



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εντοπισμός Θέσης Σφάλματος σε Γραμμές Μεταφοράς  
Μεγάλου Μήκους με Μοντέλο Κατανεμημένων  
Παραμέτρων και Συγχρονισμένες Μετρήσεις**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καλαντζής Δημήτριος

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2025





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εντοπισμός Θέσης Σφάλματος σε Γραμμές Μεταφοράς  
Μεγάλου Μήκους με Μοντέλο Κατανεμημένων  
Παραμέτρων και Συγχρονισμένες Μετρήσεις**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καλαντζής Δημήτριος

**Επιβλέπων :** Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2025.

---

Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

---

Άρης Δημέας  
Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

---

Βασίλειος Νικολαΐδης  
Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2025

Καλαντζής Δημήτριος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Καλαντζής Δημήτριος, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.



## Περίληψη

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η αξιοπιστία και η ακεραιότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι μέγιστης σημασίας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κοινωνιών, χωρών και ολόκληρων ηπείρων. Η προστασία αυτού του συστήματος από μόνιμα σφάλματα και ο περιορισμός των επιπτώσεων που αυτά προκαλούν είναι αναγκαία. Αυτά τα σφάλματα πρέπει να περιορίζονται και να απομονώνονται αμέσως για την προστασία του ανθρώπινου δυναμικού και του εξοπλισμού. Αφού απομονωθούν και αποσβεστούν, είναι απαραίτητη η εποπτεία, η αντικατάσταση τυχόν ελαττωματικού ή χαλασμένου εξοπλισμού και η επανασύνδεση του τμήματος του δικτύου που επλήγη, όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Για την επίσπευση των διαδικασιών απαιτείται η γνώση του τύπου, της θέσης και της αντίστασης σφάλματος με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Η έννοια της ανίχνευσης σφαλμάτων προσπαθεί να κάνει ακριβώς αυτό.

Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται, αναλύονται και διερευνώνται δώδεκα διαφορετικοί αλγόριθμοι ανίχνευσης σφαλμάτων που εφαρμόζονται σήμερα για την εύρεση της θέσης και της αντίστασης σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Εστιάζουμε σε μεθόδους που βασίζονται σε μετρήσεις τάσεως και ρεύματος που λαμβάνονται από μονάδες μέτρησης φασιθετών (phasor measurement units - PMUs). Αυτές, όταν προέρχονται μόνο από το ένα άκρο της γραμμής γίνεται λόγος για τους “αλγόριθμους εντοπισμού θέσης σφάλματος ενός άκρου”. Όμως, στις μέρες μας, η ανάπτυξη της τεχνολογίας του γεωεντοπισμού και των τηλεπικοινωνιών επιτρέπει να λαμβάνονται συγχρονισμένες μετρήσεις και από τις δύο πλευρές μιας γραμμής μεταφοράς. Έτσι, έχουν προταθεί οι “αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης σφάλματος δύο άκρων με συγχρονισμένες μετρήσεις” οι οποίες αξιοποιούν μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών. Συνοπτικά, η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η έννοια της ανίχνευσης σφαλμάτων η σημασία, ο σκοπός και η εφαρμογή της σε μία γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μοντελοποιείται μια γραμμή μεταφοράς. Επίσης, αναφέρονται οι συνδεσμολογίες των κυκλωμάτων ακολουθίας για όλα τα είδη βραχυκυκλωμάτων (μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό) με βάση το μοντέλο π μεγάλου μήκους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η ανάλυση και η απλοποίηση αυτών των κυκλωμάτων με στόχο τον υπολογισμό των μεγεθών της τάσης και του ρεύματος κατά το σφάλμα στις θέσεις των ηλεκτρονόμων, δηλαδή στα άκρα της γραμμής.

Έπειτα, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι “αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης σφάλματος ενός άκρου” και αναλύεται διεξοδικά η εφαρμογή τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται οι “αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης σφάλματος δύο άκρων με συγχρονισμένες μετρήσεις”.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών των μεθόδων με προσομοιώσεις που έγιναν με το λογισμικό Mathcad, για δύο γραμμές μεταφοράς διαφορετικού μήκους και για όλα τα είδη σφαλμάτων. Εξετάζεται η συμπεριφορά των αλγορίθμων σε φορτισμένη και αφόρτιστη γραμμή, με την θέση και την αντίσταση σφάλματος να μεταβάλλονται. Έτσι, συμπεριλαμβάνονται από τις πιο εύκολες και απλές μέχρι τις πιο δυσμενείς και σύνθετες περιπτώσεις. Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα και προτείνονται βελτιώσεις.

**Λέξεις Κλειδιά:** Βραχυκύκλωμα, μοντέλο γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους, εντοπισμός θέσης σφάλματος, Mathcad, υπολογισμός ακολουθιών μεγεθών.



## ***Abstract***

Electrical energy is an integral part of human activity. The reliability and integrity of the electrical power system are of utmost importance for meeting the energy needs of societies, countries, and entire continents. Protecting this system from permanent faults and mitigating their consequences is essential. These faults must be promptly confined and isolated to protect human resources and equipment. Once isolated and neutralized, it is necessary to monitor, replace any defective or damaged equipment, and reconnect the affected network segment as quickly as possible. To expedite these processes, knowledge of the type, location, and fault resistance with the highest possible accuracy is required. The concept of fault detection aims to achieve precisely this.

This study presents, analyzes, and examines twelve different fault detection algorithms currently applied to locate and determine fault resistance in electric power transmission lines. We focus on methods based on voltage and current measurements obtained from phasor measurement units (PMUs). When these measurements are obtained only from one end of the transmission line, they are referred to as “one-ended fault location algorithms.” However, with today’s advancements in geolocation and telecommunications technologies, synchronized measurements can be obtained from both ends of the transmission line. As a result, “two-ended fault location algorithms with synchronized measurements” have been proposed, leveraging a larger volume of information. Briefly, the structure of the study is as follows:

Initially, the first chapter introduces the concept of fault detection, its significance, its purpose, and its application in a power transmission line.

Subsequently, the second chapter presents the different methods used to model a transmission line. It also details the sequence circuit configurations for all types of short circuits (single-phase, two-phase, three-phase) based on the long-line  $\pi$  model.

In the third chapter, these circuits are analyzed and simplified to calculate voltage and current during faults at relay locations, i.e., at the line ends.

Then, the fourth chapter presents the “single-ended fault location algorithms” and thoroughly analyzes their application.

In the fifth chapter, the “two-ended fault location algorithms with synchronized measurements” are presented and analyzed.

The sixth chapter compares the results of these methods based on simulations performed in Mathcad for two transmission lines of different lengths and for all fault types. The behavior of the algorithms is examined in both loaded and no-loaded lines, with variations in fault location and resistance. Thus, cases range from the simplest and easiest to the most adverse and complex. Finally, consolidated conclusions are presented, and improvements are proposed.

**Keywords:** Short circuit, long transmission model, fault location, Mathcad, sequence quantity calculation.



## ***Ευχαριστίες***

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Κορρέ και για την ευκαιρία που μου έδωσε στην υλοποίησή της. Για την ανιδιοτελή καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου προσέφερε.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και του φίλους μου για την στήριξή τους όλο αυτόν τον καιρό.



## ***Πίνακας Περιεχομένων***

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Ευρετήριο Εικόνων.....</b>                                                                                              | <b>13</b> |
| <b>Ευρετήριο Πινάκων.....</b>                                                                                              | <b>16</b> |
| <b>Ευρετήριο Σχημάτων.....</b>                                                                                             | <b>19</b> |
| <b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Εισαγωγή.....</b>                                                                               | <b>21</b> |
| 1.1 Ο Σκοπός και η Σημασία του Εντοπισμού Σφαλμάτων.....                                                                   | 21        |
| 1.2 Η Σημασία της Θέσης του Σφάλματος.....                                                                                 | 22        |
| 1.3 Αλγόριθμοι Εντοπισμού Σφαλμάτων.....                                                                                   | 23        |
| 1.4 Ακρίβεια Εντοπισμού Σφαλμάτων.....                                                                                     | 25        |
| 1.5 Εφαρμογή των Αλγόριθμων Εντοπισμού Σφαλμάτων.....                                                                      | 25        |
| 1.6 Ποιος είναι ο καλύτερος αλγόριθμος εντοπισμού σφαλμάτων;.....                                                          | 26        |
| <b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....</b>                                                                     | <b>27</b> |
| 2.1 Μοντέλα Αναπαράστασης Γραμμής Μεταφοράς.....                                                                           | 27        |
| 2.1.1 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μικρού Μήκους.....                                                                         | 27        |
| 2.1.2 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους.....                                                                        | 28        |
| 2.1.3 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεγάλου Μήκους.....                                                                        | 28        |
| 2.2 Τύποι Σφαλμάτων και Σύνδεση Κυκλωμάτων Ακολουθίας.....                                                                 | 30        |
| 2.2.1 Αναπαράσταση Γραμμής Μεταφοράς κατά το Σφάλμα.....                                                                   | 31        |
| 2.2.2 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα LG.....                                                                                      | 32        |
| 2.2.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα (χωρίς γη) LL.....                                                                             | 34        |
| 2.2.4 Διφασικό Βραχυκύκλωμα (με γη) LLG.....                                                                               | 36        |
| 2.2.5 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα LLL.....                                                                                      | 38        |
| <b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Απλοποίηση των Κυκλωμάτων Ακολουθίας.....</b>                                                   | <b>40</b> |
| 3.1 Υπολογισμός Παραμέτρων Κυκλωμάτων - Γενική Περίπτωση.....                                                              | 40        |
| 3.2 Απλοποίηση Κυκλώματος Θετικής Ακολουθίας.....                                                                          | 42        |
| 3.3 Απλοποίηση Κυκλώματος Αρνητικής Ακολουθίας.....                                                                        | 44        |
| 3.4 Απλοποίηση Κυκλώματος Μηδενικής Ακολουθίας.....                                                                        | 46        |
| <b>4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: One Ended Fault Location Algorithms - Αλγόριθμοι Εντοπισμού Θέσης Σφάλματος Ενός Ακρου.....</b> | <b>48</b> |
| 4.1 Εισαγωγή.....                                                                                                          | 48        |
| 4.2 Σύνθετη αντίσταση σφάλματος με χρήση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους.....                                 | 48        |
| 4.3 Simple Reactance Method – Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης..                                                        | 51        |
| 4.4 Takagi Methods – Μέθοδοι Takagi.....                                                                                   | 51        |
| 4.4.1 TAK – Original Takagi Method.....                                                                                    | 51        |
| 4.4.2 TAK0 – Takagi Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας.....                                                              | 54        |
| 4.4.3 TAK2 – Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας.....                                                              | 54        |
| 4.5 Modified Takagi Method – Τροποποιημένη Μέθοδος Takagi.....                                                             | 55        |
| 4.5.1 MTAK0–Modified Takagi Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας.....                                                      | 55        |
| 4.5.2 MTAK2– Modified Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας.....                                                     | 55        |
| 4.6 WIS – Wiszniewski Method – Μέθοδος του Wiszniewski.....                                                                | 56        |
| 4.7 ERI – Eriksson Method – Μέθοδος του Eriksson.....                                                                      | 57        |
| 4.8 XU – Xu Method – Μέθοδος του Xu.....                                                                                   | 58        |
| 4.8.1 Ανάλυση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κατά το σφάλμα.....                                            | 58        |
| 4.8.2 XU – Xu Method – Ανάλυση.....                                                                                        | 59        |

|                                                                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5ο Κεφάλαιο: Two-Ended Fault Location Algorithms with Synchronized Measurements - Αλγόριθμοι Εντοπισμού Θέσης Σφάλματος Δύο Ακρων με Συγχρονισμένες Μετρήσεις.....</b> | <b>61</b>  |
| 5.1 Εισαγωγή.....                                                                                                                                                         | 61         |
| 5.2 Μέθοδος Συγχρονισμένων Μετρήσεων – Μοντέλο Γραμμής Μικρού Μήκους.....                                                                                                 | 61         |
| 5.3 Μέθοδος Διαφορικού Ρεύματος με Συγχρονισμένες Μετρήσεις.....                                                                                                          | 67         |
| 5.4 Μέθοδος Συγχρονισμένων Μετρήσεων – Μοντέλο Γραμμής Μεγάλου Μήκους.....                                                                                                | 67         |
| <b>6ο Κεφάλαιο: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Mathcad.....</b>                                                                                                               | <b>74</b>  |
| 6.1 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα LG-AG.....                                                                                                                                    | 75         |
| 6.1.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                             | 75         |
| 6.1.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο.....                                                                                                                                | 81         |
| 6.1.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                            | 87         |
| 6.1.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο.....                                                                                                                               | 93         |
| 6.1.5 Συμπεράσματα.....                                                                                                                                                   | 99         |
| 6.2 Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς γη LL-BC.....                                                                                                                             | 100        |
| 6.2.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                             | 100        |
| 6.2.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο.....                                                                                                                                | 106        |
| 6.2.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                            | 112        |
| 6.2.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο.....                                                                                                                               | 118        |
| 6.2.5 Συμπεράσματα.....                                                                                                                                                   | 124        |
| 6.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα ως προς γη LLG-BCG.....                                                                                                                         | 125        |
| 6.3.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                             | 125        |
| 6.3.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο.....                                                                                                                                | 131        |
| 6.3.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                            | 137        |
| 6.3.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο.....                                                                                                                               | 143        |
| 6.3.5 Συμπεράσματα.....                                                                                                                                                   | 149        |
| 6.4 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα LLL-ABC.....                                                                                                                                   | 150        |
| 6.4.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                             | 150        |
| 6.4.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο.....                                                                                                                                | 154        |
| 6.4.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο.....                                                                                                                            | 158        |
| 6.4.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο.....                                                                                                                               | 162        |
| 6.4.5 Συμπεράσματα.....                                                                                                                                                   | 166        |
| 6.5 Συγκεντρωτικά τα Αποτελέσματα σε Πίνακες.....                                                                                                                         | 167        |
| <b>Παράρτημα: Ανάλυση Πειραματικού Μέρους.....</b>                                                                                                                        | <b>168</b> |
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>                                                                                                                                                  | <b>204</b> |



## **Ευρετήριο Εικόνων**

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων.....                                                                             | 23  |
| Εικόνα 1.2: Αναπαράσταση του συστήματος γραμμής μεταφοράς και ηλεκτρονόμων προστασίας.....                                                | 24  |
| Εικόνα 1.3: Ο Ηλεκτρονόμος SEL-421.....                                                                                                   | 26  |
| Εικόνα 6.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....  | 76  |
| Εικόνα 6.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....              | 78  |
| Εικόνα 6.3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                  | 80  |
| Εικόνα 6.4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....       | 80  |
| Εικόνα 6.5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....     | 82  |
| Εικόνα 6.6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                 | 84  |
| Εικόνα 6.7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                     | 86  |
| Εικόνα 6.8: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....          | 86  |
| Εικόνα 6.9: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2..... | 88  |
| Εικόνα 6.10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....            | 90  |
| Εικόνα 6.11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                | 92  |
| Εικόνα 6.12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....     | 92  |
| Εικόνα 6.13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....   | 94  |
| Εικόνα 6.14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....               | 96  |
| Εικόνα 6.15: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                   | 98  |
| Εικόνα 6.16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....        | 98  |
| Εικόνα 6.17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....              | 101 |
| Εικόνα 6.18: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....             | 103 |
| Εικόνα 6.19: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                 | 105 |
| Εικόνα 6.20: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....      | 105 |
| Εικόνα 6.21: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....                 | 107 |
| Εικόνα 6.22 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                 | 109 |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 6.23: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                       | 111 |
| Εικόνα 6.24: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....            | 111 |
| Εικόνα 6.25: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....                | 113 |
| Εικόνα 6.26: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....               | 115 |
| Εικόνα 6.27: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                   | 117 |
| Εικόνα 6.28: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....        | 117 |
| Εικόνα 6.29: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....                   | 119 |
| Εικόνα 6.30: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                  | 121 |
| Εικόνα 6.31: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                      | 123 |
| Εικόνα 6.32: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....           | 123 |
| Εικόνα 6.33: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....  | 126 |
| Εικόνα 6.34: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....              | 128 |
| Εικόνα 6.35: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                  | 130 |
| Εικόνα 6.36: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....       | 130 |
| Εικόνα 6.37: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....     | 132 |
| Εικόνα 6.38: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                 | 134 |
| Εικόνα 6.39: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                     | 136 |
| Εικόνα 6.40: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....          | 136 |
| Εικόνα 6.41: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2..... | 138 |
| Εικόνα 6.42: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....             | 140 |
| Εικόνα 6.43: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                 | 142 |
| Εικόνα 6.44: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....      | 142 |
| Εικόνα 6.45: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....    | 144 |
| Εικόνα 6.46: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                | 146 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 6.47: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....               | 148 |
| Εικόνα 6.48: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....    | 148 |
| Εικόνα 6.49: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....         | 151 |
| Εικόνα 6.50: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....             | 153 |
| Εικόνα 6.51: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....  | 153 |
| Εικόνα 6.52: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....            | 155 |
| Εικόνα 6.53: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....                | 157 |
| Εικόνα 6.54: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....     | 157 |
| Εικόνα 6.55: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....        | 159 |
| Εικόνα 6.56: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....            | 161 |
| Εικόνα 6.57: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος..... | 161 |
| Εικόνα 6.58: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....           | 163 |
| Εικόνα 6.59: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....               | 165 |
| Εικόνα 6.60: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος.....    | 165 |

## **Ευρετήριο Πινάκων**

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 4.1: Ορισμός των VS και IS για διαφορετικά είδη σφαλμάτων.....                                                                   | 50  |
| Πίνακας 4.2: Ορισμός του ΔIS για διαφορετικά είδη σφαλμάτων - Μέθοδος TAK.....                                                           | 53  |
| Πίνακας 4.3: Ορισμός του Inseq για διαφορετικά είδη σφαλμάτων.....                                                                       | 54  |
| Πίνακας 4.4: Αντικατάσταση του ΔIS για διάφορα είδη σφαλμάτων Wiszniewski.....                                                           | 56  |
| Πίνακας 4.5: Αντικατάσταση του ΔIS για διάφορα είδη σφαλμάτων Eriksson.....                                                              | 57  |
| Πίνακας 4.6: Ορισμός VL και IL για διαφορετικά είδη σφαλμάτων - Μέθοδος XU.....                                                          | 60  |
| Πίνακας 5.1: Ορισμός VF και IF για διαφορετικές περιπτώσεις του LG.....                                                                  | 62  |
| Πίνακας 5.2: Ορισμός VF και IF για διαφορετικές περιπτώσεις του LL.....                                                                  | 63  |
| Πίνακας 5.3: Ορισμός VF και IF για διαφορετικές περιπτώσεις του LLG.....                                                                 | 64  |
| Πίνακας 5.4: Ορισμός Ipol για διαφορετικές περιπτώσεις σφαλμάτων.....                                                                    | 67  |
| Πίνακας 6.1: Ορισμός συμβολισμού για κάθε μέθοδο.....                                                                                    | 74  |
| Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2...  | 75  |
| Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....            | 77  |
| Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                | 79  |
| Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....   | 81  |
| Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....               | 83  |
| Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                   | 85  |
| Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2... | 87  |
| Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....           | 89  |
| Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....              | 91  |
| Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2..... | 93  |
| Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....             | 95  |
| Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                 | 97  |
| Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....            | 100 |
| Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....           | 102 |
| Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....               | 104 |
| Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....               | 106 |
| Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....              | 108 |
| Πίνακας 6.19: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                  | 110 |

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....                | 112 |
| Πίνακας 6.21: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....               | 114 |
| Πίνακας 6.22: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                   | 116 |
| Πίνακας 6.23: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2.....                   | 118 |
| Πίνακας 6.24: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                  | 120 |
| Πίνακας 6.25: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                      | 122 |
| Πίνακας 6.26: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....  | 125 |
| Πίνακας 6.27: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....              | 127 |
| Πίνακας 6.28: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                  | 129 |
| Πίνακας 6.29: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....     | 131 |
| Πίνακας 6.30: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                 | 133 |
| Πίνακας 6.31: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                     | 135 |
| Πίνακας 6.32: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2..... | 137 |
| Πίνακας 6.33: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....             | 139 |
| Πίνακας 6.34: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                 | 141 |
| Πίνακας 6.35: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.....    | 143 |
| Πίνακας 6.36: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD.....                | 145 |
| Πίνακας 6.37: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1.....                    | 147 |
| Πίνακας 6.38: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....              | 150 |
| Πίνακας 6.39: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....                  | 152 |
| Πίνακας 6.40: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....                 | 154 |
| Πίνακας 6.41: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....                     | 156 |
| Πίνακας 6.42: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU.....             | 158 |
| Πίνακας 6.43: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....                 | 160 |

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 6.44: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU..... | 162 |
| Πίνακας 6.45: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1.....     | 164 |
| Πίνακας 6.46: Συνολικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη γραμμή μεταφοράς 35km.....                                     | 167 |
| Πίνακας 6.47: Συνολικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη γραμμή μεταφοράς 350km.....                                    | 167 |

## ***Ευρετήριο Σχημάτων***

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 2.1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους.....                                      | 27 |
| Σχήμα 2.2: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς.....                                            | 28 |
| Σχήμα 2.3: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα π μοντέλου μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς.....                                         | 28 |
| Σχήμα 2.4: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους.....                                      | 29 |
| Σχήμα 2.5: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα π μοντέλου μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς.....                                         | 30 |
| Σχήμα 2.6: Γραμμή μεταφοράς - μοντέλο μεγάλου μήκους.....                                                                        | 31 |
| Σχήμα 2.7: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα στη θέση m - μοντέλο μεγάλου μήκους.....                                              | 31 |
| Σχήμα 2.8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                                         | 32 |
| Σχήμα 2.9: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG - Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας.....                                                       | 33 |
| Σχήμα 2.10: Διφασικό βραχυκύκλωμα LL γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                                          | 34 |
| Σχήμα 2.11: Διφασικό βραχυκύκλωμα LL - Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας.....                                                        | 35 |
| Σχήμα 2.12: Διφασικό βραχυκύκλωμα (με γη) LLG γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                                 | 36 |
| Σχήμα 2.13: Διφασικό βραχυκύκλωμα (με γη) LLG - Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας.....                                               | 37 |
| Σχήμα 2.14: Τριφασικό βραχυκύκλωμα LLL γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                                        | 38 |
| Σχήμα 2.15: Τριφασικό βραχυκύκλωμα LLL χωρίς(αριστερά) και με αντίσταση σφάλματος RF (δεξιά)- Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας..... | 39 |
| Σχήμα 3.1: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα μοντέλο μεγάλου μήκους κύκλωμα π                                                      | 40 |
| Σχήμα 3.2: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα μοντέλο μεγάλου μήκους κύκλωμα π με εύχρηστο συμβολισμό.....                          | 41 |
| Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα.....                                                      | 42 |
| Σχήμα 3.4: Ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                               | 42 |
| Σχήμα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin κυκλώματος θετικής ακολουθίας.....                                                         | 42 |
| Σχήμα 3.6: Ονομαστικό Κύκλωμα Θετικής Ακολουθίας.....                                                                            | 44 |
| Σχήμα 3.7: Ισοδύναμο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                             | 44 |
| Σχήμα 3.9: Ονομαστικό Κύκλωμα Αρνητικής Ακολουθίας.....                                                                          | 46 |
| Σχήμα 3.10: Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π.....                            | 46 |
| Σχήμα 3.11: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας.....                                                      | 46 |
| Σχήμα 3.12: Ονομαστικό Κύκλωμα Μηδενικής Ακολουθίας.....                                                                         | 47 |
| Σχήμα 4.1: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα στη θέση m - μοντέλο μικρού μήκους.....                                               | 48 |
| Σχήμα 4.2: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους.....                                                       | 49 |
| Σχήμα 4.3: Αρχή Επαλληλίας της Μεθόδου Takagi για μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG.....                                                | 52 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα γραμμής μεταφοράς - μοντέλο<br>μεγάλου μήκους.....                         | 58 |
| Σχήμα 5.1: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LG - μοντέλο μικρού μήκους.....                                            | 62 |
| Σχήμα 5.2: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LL - μοντέλο μικρού μήκους.....                                            | 63 |
| Σχήμα 5.3: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLG - μοντέλο μικρού μήκους.....                                           | 64 |
| Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLL - μοντέλο μικρού μήκους.....                                           | 65 |
| Σχήμα 5.5: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLLG - μοντέλο μικρού μήκους.....                                          | 66 |
| Σχήμα 5.6: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LG - μοντέλο μεγάλου μήκους.....                                           | 68 |
| Σχήμα 5.7: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LL - μοντέλο μεγάλου μήκους.....                                           | 69 |
| Σχήμα 5.8: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLG - μοντέλο μεγάλου μήκους.....                                          | 70 |
| Σχήμα 5.9: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLL - μοντέλο μεγάλου μήκους.....                                          | 71 |
| Σχήμα 5.10: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLLG - μοντέλο μεγάλου μήκους.                                            | 72 |
| Σχήμα 5.11: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLLG με αντίσταση σφάλματος<br>μεταξύ φάσεων- μοντέλο μεγάλου μήκους..... | 73 |
| Σχήμα 6.1: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις                                              | 74 |



# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## Εισαγωγή

Σήμερα, η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης δραστηριότητας και αναμένεται να είναι συνεχώς διαθέσιμη, αξιόπιστη και ευέλικτη, ανταποκρινόμενη στη διαρκώς μεταβαλλόμενη ζήτηση. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πολύπλοκο σύνολο γεννητριών, μετασχηματιστών, γραμμών μεταφοράς, γραμμών διανομής, φορτίων και άλλων ηλεκτρικών στοιχείων. Ο σκοπός αυτού του δικτύου είναι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες (Φ/Β πάρκα, αιολικά πάρκα, μονάδες παραγωγής φυσικού αερίου, λιγνιτικές μονάδες παραγωγής) στα φορτία (βιομηχανικές μονάδες, εμπορικοί και οικιακοί καταναλωτές) μέσω των διασυνδεδεμένων γραμμών μεταφοράς και διανομής. Δυστυχώς, αυτή η ροή ισχύος διαταράσσεται ή και διακόπτεται όταν συμβαίνει κάποιο σφάλμα στο σύστημα.

### 1.1 Ο Σκοπός και η Σημασία του Εντοπισμού Σφαλμάτων

Τα σφάλματα είναι ανεπιθύμητες καταστάσεις που προκαλούν την απόκλιση της τάσης, του ρεύματος, της συχνότητας και της ισχύος από τις ονομαστικές τους τιμές διαταράσσοντας την φυσιολογική ροή της ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες στα φορτία [1]. Κεραυνοί, επαφές ζώνων, επαφές δέντρων και δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως ισχυροί άνεμοι και χιονοθύελλες είναι μερικές από τις κύριες αιτίες σφαλμάτων στο σύστημα. Τα σφάλματα μπορεί να είναι μόνιμα ή προσωρινά. Τα μόνιμα σφάλματα απαιτούν επιδιορθώσεις από συνεργεία επί του πεδίου, ενώ τα προσωρινά σφάλματα εκκαθαρίζονται μόνα τους ή με την παρέμβαση προστατευτικών διατάξεων. Γενικά, ο εντοπισμός των σφαλμάτων είναι σημαντικός για τους εξής λόγους:

- Τα μόνιμα σφάλματα μπορεί να προκαλέσουν θερμικές και μηχανικές ζημιές στον εξοπλισμό του συστήματος, πυρκαγιές, εκρήξεις και άλλες καταστάσεις κινδύνου για το προσωπικό.
- Όταν συμβαίνει ένα μόνιμο σφάλμα, η φυσιολογική ροή ισχύος διακόπτεται και τα φορτία που βρίσκονται εκατέρωθεν του σφάλματος αντιμετωπίζουν διακοπή λειτουργίας. Εάν η ισχύς δεν αναδρομολογηθεί μέσω άλλων γραμμών, ο χρόνος διακοπής ισούται με τον χρόνο που απαιτείται για τον εντοπισμό του σφάλματος συν τον χρόνο για την επισκευή του. Αυτό σημαίνει διατάραξη της ανθρώπινης δραστηριότητας και διακοπή παραγωγικών διαδικασιών στις βιομηχανίες με άμεσες οικονομικές και υλικές συνέπειες, ανάλογες του χρόνου διακοπής. Ακόμη κι αν αναδρομολογηθεί η ισχύς, οι υπόλοιπες γραμμές που υποστηρίζουν το πρόσθετο φορτίο ενδέχεται να υπερφορτωθούν. Ως εκ τούτου, είναι κρίσιμο να εντοπίζονται τα μόνιμα σφάλματα το συντομότερο δυνατό, να απομονώνονται και να αποκαθίσταται η κανονική λειτουργία του συστήματος όσο το δυνατόν πιο γρήγορα.
- Εκτός από τα μόνιμα σφάλματα, είναι εξίσου σημαντικό να εντοπίζονται και τα προσωρινά σφάλματα. Παρόλο που αυτά μπορεί να μην έχουν οδηγήσει σε παρατεταμένη διακοπή, ο εντοπισμός τους και η λήψη άμεσων μέτρων μπορούν να βοηθήσουν την εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας να αποφύγει ένα μόνιμο σφάλμα και διακοπή λειτουργίας στο μέλλον.

- Επιπρόσθετα, ο εντοπισμός των σφαλμάτων παρέχει σημαντικά λειτουργικά οφέλη, όπως η επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας και σωστών ρυθμίσεων ενός ηλεκτρονόμου προστασίας. Επιπλέον, μπορούν να εντοπιστούν λάθη και παραλήψεις σε συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών ρεύματος (current transformers - CTs) και μετασχηματιστών τάσης (voltage transformers - VTs).
- Ακόμα, ο εντοπισμός σφαλμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντίστασης σφάλματος. Η γνώση της τιμής της αντίστασης σφάλματος είναι σημαντική κατά την ανάλυση της λειτουργίας των ηλεκτρονόμων προστασίας και χρήσιμη για την κατανόηση της προέλευσης του σφάλματος. Για παράδειγμα, στατιστικά στοιχεία αντίστασης σφαλμάτων που αναπτύχθηκαν από την ανάλυση 148 περιστατικών σφαλμάτων που συλλέχθηκαν από διάφορα δίκτυα κοινής ωφέλειας στις ΗΠΑ, υποδεικνύουν ότι τα δέντρα με μεγαλύτερη διάμετρο παρουσιάζουν αντίσταση σφάλματος μεγαλύτερη από  $20\Omega$  όταν πέφτουν σε εναέριες γραμμές [4].
- Τέλος, ο εντοπισμός σφαλμάτων μπορεί να αποτελέσει πολύτιμη είσοδο για έναν ηλεκτρονόμο προστασίας που εκκινεί αυτόματη επαναφορά σε υβριδικές γραμμές. Μια υβριδική γραμμή αποτελείται από τμήματα υπόγειων καλωδίων και εναέριων γραμμών. Αν το σφάλμα βρίσκεται στο εναέριο τμήμα, προτιμάται η αυτόματη επαναφορά, καθώς τα εναέρια σφάλματα είναι συνήθως προσωρινά. Ωστόσο, αν το σφάλμα βρίσκεται στο υπόγειο καλωδιακό τμήμα, προτιμάται ο αποκλεισμός της αυτόματης επαναφοράς για την αποφυγή περαιτέρω ζημιών, καθώς τα καλωδιακά σφάλματα είναι συνήθως μόνιμα. Ο εντοπισμός σφαλμάτων μπορεί να βοηθήσει τον ηλεκτρονόμο να καθορίσει αν το σφάλμα βρίσκεται στο εναέριο ή στο υπόγειο τμήμα και αν πρέπει να προχωρήσει σε αυτόματη επαναφορά ή όχι.

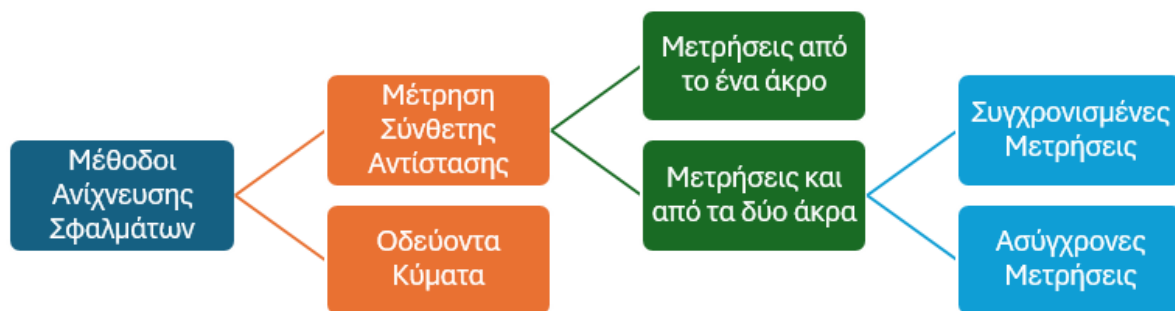
Συνεπώς, ο ακριβής και άμεσος εντοπισμός της θέσης του σφάλματος, είναι κρίσιμος για την ταχύτερη αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου και τη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.2 Η Σημασία της Θέσης του Σφάλματος

Αναφορικά με τη θέση του σφάλματος, τα σφάλματα μέσα σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και υποσταθμούς είναι τοπικά και επομένως είναι ευκολότερο και γρηγορότερο να εντοπιστούν. Αντίθετα, τα σφάλματα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής είναι πολύ πιο δύσκολο να εντοπιστούν καθώς καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις. Μετά από ένα σφάλμα, η παραδοσιακή προσέγγιση για τον εντοπισμό του είναι η επιθεώρηση της γραμμής και η αναζήτηση ορατών ενδείξεων σφάλματος. Αυτή η προσέγγιση είναι χρονοβόρα και απαιτεί έντονη εργασία. Επιπλέον, οι δύσβατες περιοχές, οι απομακρυσμένες τοποθεσίες ή οι κακές καιρικές συνθήκες μπορεί να επηρεάσουν τις προσπάθειες επιθεώρησης και να καθυστερήσουν την επιδιόρθωση. Ακόμα, τα σφάλματα που αφήνουν πίσω τους ίχνη είναι εύκολο να εντοπιστούν, ενώ άλλα είναι πιο δύσκολα (π.χ. ένας καμένος μονωτήρας δεν είναι εύκολα ορατός από το έδαφος). Παράλληλα, τα προσωρινά σφάλματα ενδέχεται να μην αφήσουν κανένα ορατό ίχνος και να μην εντοπιστούν κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων. Επομένως, για την επίσπευση των επισκευών είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε την θέση όπου συνέβη το σφάλμα με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, ιδιαίτερα στις γραμμές μεταφοράς που έχουν έκταση εκατοντάδων χιλιομέτρων και η ολική οπτική επιθεώρησή τους είναι πρακτικά αδύνατη.

### 1.3 Αλγόριθμοι Εντοπισμού Σφαλμάτων

Ανίχνευση σφαλμάτων (fault location) είναι η διαδικασία που έχει ως στόχο τον εντοπισμό της θέσης στην οποία συμβαίνει ένα σφάλμα (βραχυκύκλωμα) στο δίκτυο με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια [1]. Σήμερα, όλες οι σύγχρονες μονάδες προστασίας γραμμών μεταφοράς και διανομής συμπεριλαμβάνουν αλγορίθμους για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος (fault location). Αυτοί, εποπτεύουν τη γραμμή και όταν αναγνωρίσουν βραχυκύκλωμα δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τη θέση και την αντίσταση του σφάλματος. Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιούν μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: αλγόριθμοι βασισμένοι στη σύνθετη αντίσταση και αλγόριθμοι βασισμένοι στα οδεύοντα κύματα [4].

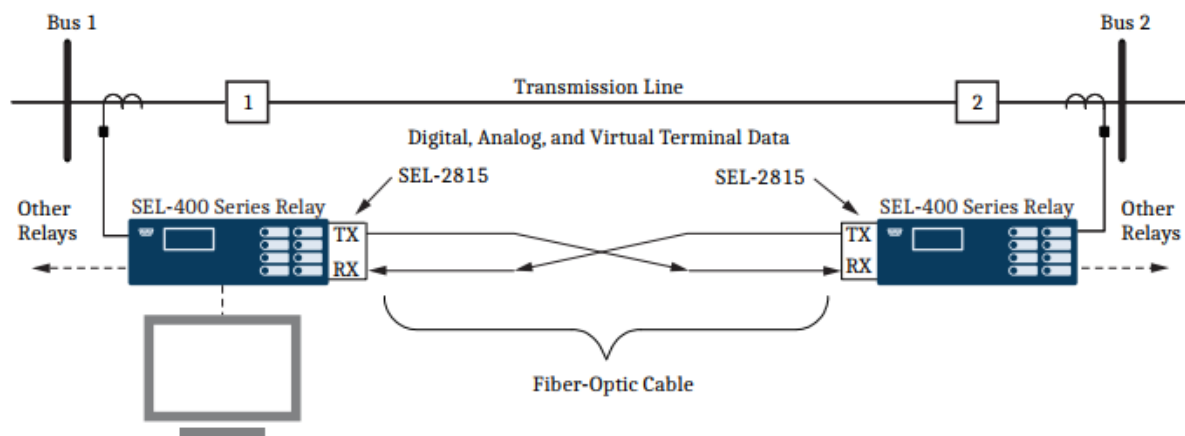


Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται στη σύνθετη αντίσταση χρησιμοποιούν τον νόμο του Ohm για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος. Χρησιμοποιούν τάσεις και ρεύματα θεμελιώδους συχνότητας από μετρήσεις στα άκρα της γραμμής για την εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταξύ του σημείου μέτρησης και του σημείου του σφάλματος. Οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι απλές και οικονομικές στην εφαρμογή. Ανάλογα με τα σήματα εισόδου που χρησιμοποιούν, οι εν λόγω αλγόριθμοι χωρίζονται σε “αλγορίθμους που χρησιμοποιούν μετρήσεις μόνο από ένα άκρο” της γραμμής και “αλγορίθμους που χρησιμοποιούν μετρήσεις και από τα δύο άκρα”.

- Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται σε μετρήσεις μόνο του ενός άκρου εκτιμούν την απόσταση από το σφάλμα χρησιμοποιώντας τις τάσεις και τα ρεύματα που μετρώνται από ένα συγκεκριμένο άκρο της γραμμής. Αυτή η τεχνική είναι απλή και οικονομική καθώς δεν απαιτεί μέσα επικοινωνίας με το απομακρυσμένο άκρο της γραμμής. Ως εκ τούτου, είναι ελκυστική και συνήθως ενσωματώνεται στην πράξη σε αρκετούς ηλεκτρονόμους προστασίας. Αλγόριθμοι που εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία και εξετάζονται ως προ την απόδοσή τους σε αυτήν την εργασία είναι η “μέθοδος επαγωγικής αντίδρασης” [1], [4], [5], οι “μέθοδοι Takagi” [1], [4], [5], διάφορες βελτιστοποιημένες μέθοδοι που προκύπτουν από τροποποίηση των “μεθόδων Takagi” [1], [4], [5], η “μέθοδος του Winzniewski” [1], [5], η “μέθοδος του Eriksson” [1], [4], [5] και η “μέθοδος του XU” [5].
- Οι αλγόριθμοι δύο άκρων επεξεργάζονται σήματα και από τα δύο άκρα της γραμμής, έτσι χρησιμοποιούν μεγαλύτερη ποσότητα πληροφοριών και η απόδοσή τους είναι γενικά ανώτερη συγκριτικά με τις προσεγγίσεις ενός άκρου. Τα σήματα που χρησιμοποιούν αποτελούνται από ψηφιακές μετρήσεις φασιθετών (phasors) τάσης και ρεύματος που προέρχονται και από τα δύο τερματικά της γραμμής. Αυτές οι μετρήσεις είναι συγχρονισμένες ως προς κάποια γωνία αναφοράς. Ο συγχρονισμός τους επιτυγχάνεται με

την χρήση χρονομέτρων υψηλής ακρίβειας τα οποία συγχρονίζονται από το GPS (global positioning system). Ειδικότερα, οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMUs) παράγουν ένα σήμα αναφοράς θεμελιώδους συχνότητας που εξαρτάται χρονικά από το GPS και ως προς αυτό συγχρονίζονται οι τοπικές μετρήσεις. Το σήμα αναφοράς είναι ίδιο για όλα τα συνδεδεμένα PMUs, ανεξάρτητα από την θέση τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα φασιθέτες από διαφορετικά PMUs να μπορούν να κανονικοποιηθούν με βάση την κοινή γωνία αναφοράς και να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα από τη διάταξη προστασίας. Ακόμα, υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των ηλεκτρονόμων που βρίσκονται στα δύο άκρα της γραμμής, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται μέσω οπτικών ινών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 [16]. Όταν το GPS δεν είναι διαθέσιμο ή το σήμα από το GPS χαθεί, οι μετρήσεις από τα τερματικά της γραμμής εκτελούνται ασύγχρονα. Τέτοιες μετρήσεις δεν έχουν κοινή αναφορά χρόνου και απαιτείται ο συγχρονισμός τους πριν την επεξεργασία τους. Σε αυτήν την εργασία εστιάζουμε μόνο σε αλγόριθμους που χρησιμοποιούν συγχρονισμένες μετρήσεις. Ειδικότερα, εξετάζουμε τη “μέθοδο διαφορικών ρευμάτων” [1], [4] και την “μέθοδο συγχρονισμένων μετρήσεων” στην περίπτωση που αυτή υλοποιείται με βάση το μοντέλο μικρού μήκους γραμμής [1], [4] και στην περίπτωση που υλοποιείται με βάση το μοντέλο μεγάλου μήκους γραμμής [1].



**Εικόνα 1.2:** Αναπαράσταση του συστήματος γραμμής μεταφοράς και ηλεκτρονόμων προστασίας[16]

Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται σε οδεύοντα κύματα χρησιμοποιούν την εξίσωση της ταχύτητας αυτών για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος. Ένα σφάλμα προκαλεί απότομη μεταβολή της τάσης στο σημείο του σφάλματος. Αυτό δημιουργεί υπερύψηλες συχνότητες τάσης και ρεύματος, γνωστές και ως οδεύοντα κύματα, τα οποία διαδίδονται και προς τις δύο κατευθύνσεις από το σημείο του σφάλματος. Αυτά τα κύματα στις εναέριες γραμμές διαδίδονται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και τελικά αποσβέννυνται λόγω πολλαπλών ανακλάσεων. Πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα των κυμάτων με τον χρόνο που χρειάζονται για να ταξιδέψουν από το σημείο του σφάλματος έως το σημείο μέτρησης, προκύπτει η απόσταση από το σημείο μέτρησης προς το σφάλμα. Αυτές οι μέθοδοι θεωρούνται πολύ ακριβείς, ωστόσο, είναι επίσης πολύπλοκες και δαπανηρές στην εφαρμογή, καθώς απαιτούν υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας.

Εκτός από τους αλγόριθμους βασισμένους στη σύνθετη αντίσταση και στα οδεύοντα κύματα, μελετώνται επίσης εκτενώς νευρωνικά δίκτυα, τεχνική νοημοσύνη και άλλες

προσεγγίσεις βασισμένες στη γνώση για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Αυτή η κατηγορία βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο και γι' αυτό δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

## **1.4 Ακρίβεια Εντοπισμού Σφαλμάτων**

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που εφαρμόζεται, οι κύριοι παράγοντες, που είναι μεταβλητοί και επηρεάζουν την ακρίβεια στον εντοπισμό του σφάλματος σε μία γραμμή μεταφοράς είναι:

- Η θέση του σφάλματος.
- Ο τύπος του σφάλματος.
- Η αντίσταση του σφάλματος.
- Η γωνία εμφάνισης του σφάλματος.
- Το μέτρο και η κατεύθυνση της ροής ισχύος πριν το σφάλμα.
- Ανακρίβεια στις τιμές των σύνθετων αντιστάσεων των ισοδυνάμων πηγών του ΣΗΕ εκατέρωθεν της γραμμής.
- Ανακρίβεια στη μοντελοποίηση της γραμμής μεταφοράς λόγω χρήσης εσφαλμένων παραμέτρων ή λανθασμένου μοντέλου. Συχνά είναι δύσκολο να ληφθεί η ακριβής σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας για τη γραμμή. Αυτό συμβαίνει διότι αυτή επηρεάζεται από την αντίσταση γείωσης η οποία με την σειρά της είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αντίσταση του εδάφους. Η αντίσταση του εδάφους μπορεί να είναι μεταβλητή κατά μήκος της γραμμής καθώς εξαρτάται από την σύστασή του και από τις καιρικές συνθήκες.
- Εσφαλμένη αναγνώριση του τύπου του σφάλματος από τον ηλεκτρονόμο.

## **1.5 Εφαρμογή των Αλγόριθμων Εντοπισμού Σφαλμάτων**

Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) ορίζει τον ηλεκτρονόμο προστασίας ως «μια διάταξη της οποίας η λειτουργία είναι να ανιχνεύει σφάλματα σε γραμμές ή εξοπλισμό ή άλλες καταστάσεις ανώμαλης ή επικίνδυνης φύσης στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και να εκκινεί την κατάλληλη ενέργεια ελέγχου» [4],[20]. Στις μέρες μας, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας είναι ψηφιακοί, δηλαδή ηλεκτρονόμοι με μικροεπεξεργαστές. Χρησιμοποιούνται για την συντομότερη δυνατή ανίχνευση και απομόνωση σφαλμάτων, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) να επανέρχεται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται η πρόσοψη του ψηφιακού ηλεκτρονόμου SEL-421 [16]. Στην οθόνη του αναγράφονται οι τιμές των μετρούμενων ρευμάτων των τριών φάσεων ABC και η συχνότητα του συστήματος. Οι ηλεκτρονόμοι, χρησιμοποιούν μετρήσεις που προέρχονται από μετασχηματιστές ρεύματος (CTs) και τάσης (VTs) για την παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος. Διαθέτουν μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D) που ψηφιοποιούν τα παραπάνω αναλογικά σήματα. Επεξεργάζονται τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αν ανιχνεύσουν ένα σφάλμα, στέλνουν εντολή διακοπής στους αυτόματους διακόπτες (circuit breakers - CBs), οι οποίοι ανοίγουν για να το απομονώσουν. Επίσης, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι είναι πολυλειτουργικές συσκευές, που σημαίνει ότι είναι ικανοί να παρέχουν διάφορες λειτουργίες προστασίας ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, προστασία από υπέρταση, υπόταση και υπέρταση, χαμηλή και υψηλή συχνότητα, προστασία κατεύθυνσης, αστοχία διακόπτη, αυτόματο επανακλείσιμο και άλλες λειτουργίες προστασίας. Εκτός από την προστασία του συστήματος καταγράφουν επίσης αρχεία συμβάντων κατά τη διάρκεια ενός

σφάλματος και παρέχουν υπηρεσίες εντοπισμού σφαλμάτων για να βοηθούν τους χειριστές να κατανοήσουν το σφάλμα, να αναλύσουν τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου και να αποκαταστήσουν την λειτουργία του συστήματος όσο το δυνατόν πιο γρήγορα.

Ο εντοπισμός σφαλμάτων είναι μια τυπική λειτουργία που είναι διαθέσιμη στους περισσότερους ηλεκτρονόμους. Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων, χρησιμοποιούν τις ψηφιακές μετρήσεις των ηλεκτρονόμων πριν, κατά και μετά το σφάλμα. Οι περισσότεροι ηλεκτρονόμοι διαθέτουν αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται στη σύνθετη αντίσταση, αλλά υπάρχουν και ορισμένοι που χρησιμοποιούν μεθόδους που βασίζονται στα οδεύοντα κύματα. Μέχρι σχετικά πρόσφατα, εφαρμόζονταν κυρίως αλγόριθμοι με μετρήσεις στο ένα άκρο. Παρόλα αυτά, λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας του γεωεντοπισμού και των τηλεπικοινωνιών, είναι πλέον δυνατή η επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών ηλεκτρονόμων και τηλεμετρίας αυτοματισμών SCADA (supervisory control and data acquisition). Αυτό, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη για βελτίωση της ακρίβειας στην εύρεση της θέσης του σφάλματος, καθιστά πλέον τους αλγόριθμους μετρήσεων δύο άκρων εφαρμόσιμους.



Εικόνα 1.3: Ο Ηλεκτρονόμος SEL-421 [16]

## 1.6 Ποιος είναι ο καλύτερος αλγόριθμος εντοπισμού σφαλμάτων;

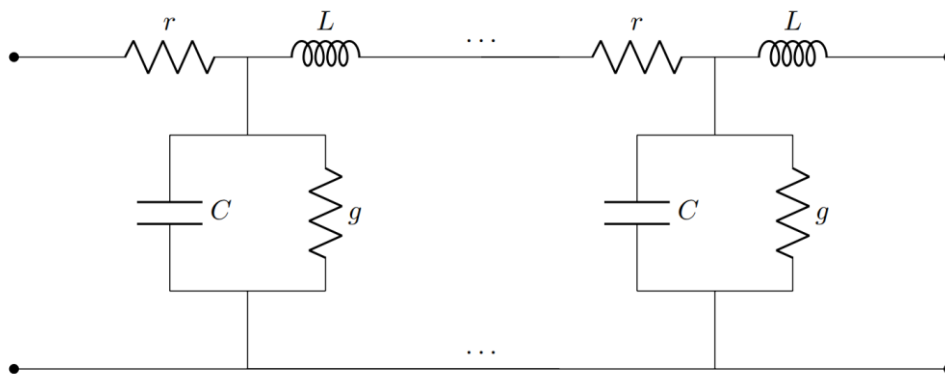
Στο πλαίσιο των κατηγοριών που βασίζονται στη σύνθετη αντίσταση και στα οδεύοντα κύματα, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων. Παρόλο που όλοι οι αλγόριθμοι έχουν τον ίδιο σκοπό, την εύρεση του σφάλματος με τη μέγιστη ακρίβεια, καθένας από αυτούς βασίζεται σε διαφορετικές παραδοχές και χρησιμοποιεί διαφορετικά δεδομένα για να φτάσει σε αυτό το στόχο. Ποιος είναι ο καλύτερος αλγόριθμος εντοπισμού σφαλμάτων; Δυστυχώς, δεν υπάρχει μία απάντηση που να ταιριάζει σε όλες τις περιπτώσεις. Η σωστή απάντηση είναι ότι εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα για τον εντοπισμό του σφάλματος, το σύστημα στο οποίο θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος και τα χαρακτηριστικά και το είδος του σφάλματος. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να συγκρίνει την απόδοση διαφόρων αλγορίθμων που έχουν είτε ίδιες είτε διαφορετικές εισόδους, βασίζονται σε διαφορετικές παραδοχές και υλοποιούνται πάνω σε διαφορετικό μοντέλο γραμμής μεταφοράς. Η σύγκριση αυτή γίνεται για όλους τους τύπους των μόνιμων σφαλμάτων (LG, LL, LLG, LLL), υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου, σε γραμμές μεταφοράς μικρού και μεγάλου μήκους (35km και 350km αντίστοιχα).

## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Θεωρητικό Υπόβαθρο

#### 2.1 Μοντέλα Αναπαράστασης Γραμμής Μεταφοράς

Μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να παρασταθεί με ένα μονοφασικό κύκλωμα με κατανεμημένες παραμέτρους [2], όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, όπου  $L$  είναι η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε H/m),  $r$  είναι η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε  $\Omega/\text{m}$ ),  $C$  είναι η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε F/m) και  $g$  είναι η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε  $\Omega^{-1}/\text{m}$ ). Οι παράμετροι  $L$ ,  $r$ ,  $C$ ,  $g$  κατανέμονται ομοιόμορφα κατά το μήκος της γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα 2.1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους

Ανάλογα με την εφαρμογή και τον τρόπο σύνδεσης των στοιχείων του ισοδυνάμου κυκλώματος τα μοντέλα χωρίζονται σε  $T$  και  $\pi$ , στην συνέχεια γίνεται χρήση του  $\pi$  μοντέλου, οπότε θα εστιάσουμε την ανάλυσή μας σε αυτό. Επίσης ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και το μήκος της γραμμής τα μοντέλα χωρίζονται σε Μικρού, Μεσαίου και Μεγάλου Μήκους.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα εν λόγω κυκλωματικά μοντέλα μιας γραμμής μεταφοράς, για τα οποία ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις:

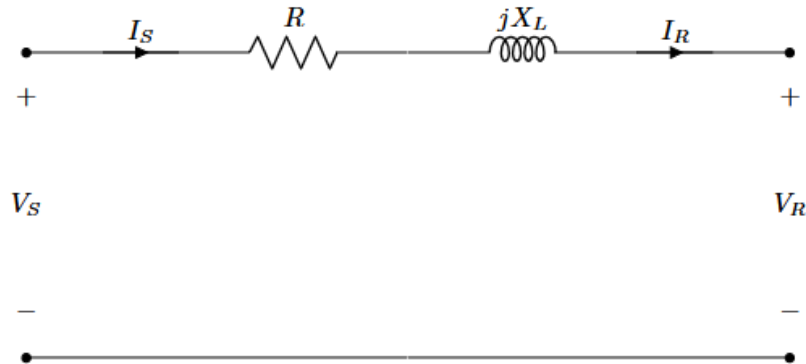
1. Το τριφασικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του οποίου αποτελεί μέρος η γραμμή μεταφοράς είναι συμμετρικό, βρίσκεται στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και αποτελείται από συμμετρικές τάσεις.
2. Εφαρμόζεται κυκλική αντιμετάθεση στους αγωγούς της γραμμής μεταφοράς ώστε να επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση των ασυμμετριών στις παραμέτρους της.

##### 2.1.1 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μικρού Μήκους

Το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους μιας γραμμής μεταφοράς φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Στο μοντέλο αυτό έχουν αγνοηθεί η εγκάρσια χωρητικότητα  $C$  και η εγκάρσια αγωγιμότητα  $g$  της γραμμής. Τα μεγέθη στην αναχώρηση της γραμμής συμβολίζονται με  $S$  (Sending) και στην άφιξη με  $R$  (Receiving). Επομένως,  $V_S$  ( $V_R$ ) και  $I_S$  ( $I_R$ ) είναι η φασική τάση και το φασικό ρεύμα στην αναχώρηση (άφιξη) της γραμμής. Ακόμα,  $l$  είναι το μήκος της γραμμής και  $f$  είναι η βασική συχνότητα του συστήματος (σε Hz). Επιπλέον,  $R$  είναι η συνολική ωμική αντίσταση της γραμμής ανά φάση (σε  $\Omega$ ),  $X_L$  είναι η συνολική επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση (σε  $\Omega$ ) και  $Z$  είναι η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής ανά



φάση (σε Ω). Το εν λόγω μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια για γραμμές μεταφοράς με μήκος έως τα 80km.



**Σχήμα 2.2:** Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη υπολογίζονται από τις σχέσεις:

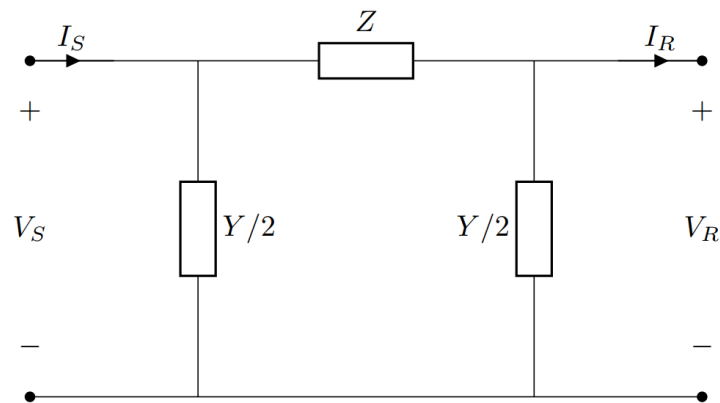
$$R = r l \quad (2.1)$$

$$X_L = 2\pi f L l \quad (2.2)$$

$$Z = R + jX_L \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους

Το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μεσαίου μήκους λαμβάνει υπόψη την εγκάρσια χωρητικότητα  $C$  και την εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα  $g$  της γραμμής. Για τον λόγο αυτό, παρουσιάζει καλύτερη ακρίβεια από το μοντέλο μικρού μήκους και έχει ικανοποιητική ακρίβεια για γραμμές μεταφοράς με μήκος έως 240km. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το π μοντέλο μεσαίου μήκους. Σε αυτό,  $Z$  είναι η σύνθετη αντίσταση σειράς (σε Ω) και  $Y$  είναι η συνολική εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε  $\Omega^{-1}$ ).



**Σχήμα 2.3:** Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα π μοντέλου μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς

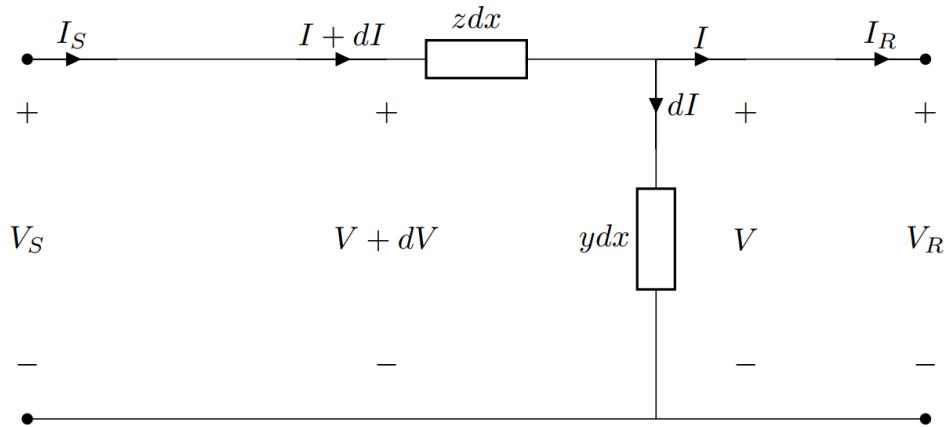
Το  $Y$  δίνεται από την σχέση:  $Y = gl + j2\pi f Cl \quad (2.4)$

### 2.1.3 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεγάλου Μήκους

Το μοντέλο μεγάλου μήκους επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της γραμμής μεταφοράς, επειδή λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι οι παράμετροι της δεν είναι συγκεντρωμένες αλλά κατανομημένες ομοιόμορφα κατά μήκος όλης της γραμμής. Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανομημένες παραμέτρους φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Ειδικότερα φαίνεται ένα στοιχειώδες τμήμα της γραμμής μήκους  $dx$ , του οποίου η απόσταση από το άκρο άφιξης είναι  $x$ . Η σύνθετη αντίσταση σειράς αυτού του τμήματος είναι  $zdx$  και η εγκάρσια αγωγιμότητά του είναι  $ydx$ .



**Σχήμα 2.4:** Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους

Εφαρμόζοντας τους νόμους τάσεων και ρευμάτων του Kirchhoff στο στοιχειώδες τμήμα της γραμμής του σχήματος 2.4 προκύπτει ότι:

$$dV = Izdx \quad (2.5)$$

$$dI = Vydx \quad (2.6)$$

Παραγωγίζοντας την (2.5) ως προς  $x$  και αντικαθιστώντας τον όρο  $dI/dx$  από την (2.6) προκύπτει:

$$\frac{dV^2}{dx^2} = yzV \quad (2.7)$$

Αντίστοιχα, παραγωγίζοντας την (2.6) ως προς  $x$  και αντικαθιστώντας τον όρο  $dV/dx$  από την (2.5) προκύπτει:

$$\frac{dI^2}{dx^2} = yzI \quad (2.8)$$

Επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις (2.7) και (2.8), με αρχικές συνθήκες για  $x = 0$ :  $V(0) = V_R$  και  $I(0) = I_R$ , προκύπτει η εξής λύση:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_R + Z_c \sinh(\gamma x) I_R \quad (2.9)$$

$$I(x) = \frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c} V_R + \cosh(\gamma x) I_R \quad (2.10)$$

Όπου  $Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$  είναι η χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega$ ) και  $\gamma = \sqrt{zy}$  είναι η σταθερά μετάδοσης της γραμμής μεταφοράς σε ( $m^{-1}$ )

Οι παραπάνω σχέσεις για μήκος γραμμής  $x = l$  γίνονται:

$$V_S = \cosh(\gamma l) V_R + Z_c \sinh(\gamma l) I_R \quad (2.11)$$

$$I_R = \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} V_S + \cosh(\gamma l) I_R \quad (2.12)$$

Οι εξισώσεις με παραμέτρους  $A B C D$  δίθυρου κυκλώματος με είσοδο  $V_S, I_S$  και έξοδο  $V_R, I_R$  είναι:

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

Στην περίπτωση κυκλώματος  $\pi$  συμμετρικού δίθυρου οι παράμετροι  $A B C D$  γίνονται:

$$A = 1 + Z' \frac{Y'}{2}, B = Z', C = Y' \left(1 + Z' \frac{Y'}{4}\right), D = 1 + Z' \frac{Y'}{2}$$

Συνεπώς, οι εξισώσεις δίθυρου λαμβάνουν την εξής μορφή:

$$V_S = \left(1 + Z' \frac{Y'}{2}\right) V_R + Z' I_R \quad (2.13)$$

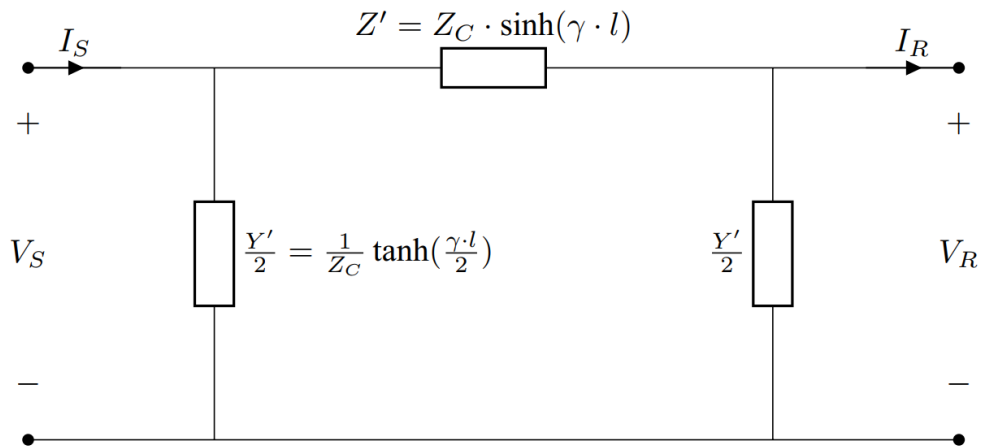
$$I_S = Y' \left(1 + \frac{Z' Y'}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{Z' Y'}{2}\right) I_R \quad (2.14)$$

Αντιπαραθέτοντας κατάλληλα τους συντελεστές των σχέσεων (2.11) και (2.12), με τις παραμέτρους του ονομαστικού κυκλώματος  $\pi$  συμμετρικού δίθυρου, όπως παρουσιάζονται στις εξισώσεις (2.13) και (2.14), προκύπτει ότι:

$$Z' = Z_C \sinh(\gamma l) \quad (2.15)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (2.16)$$

με βάση αυτά τα αποτελέσματα προκύπτει το ισοδύναμο  $\pi$  μοντέλο μιας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα  $\pi$  μοντέλου μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς

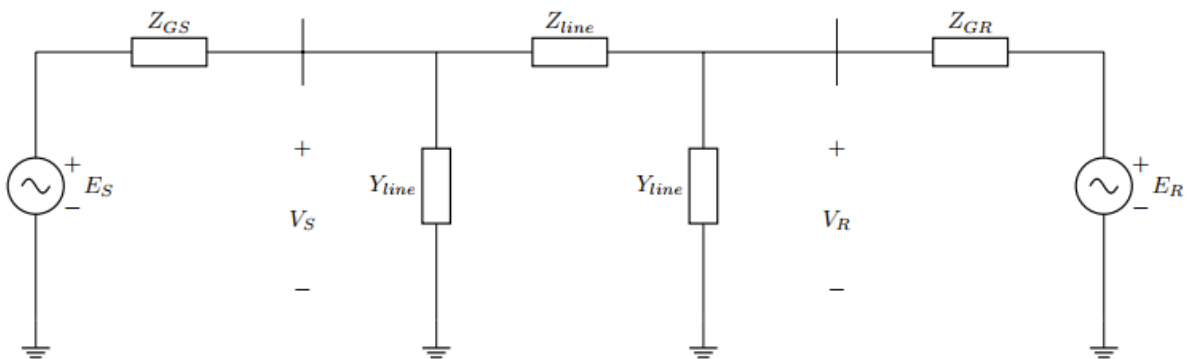
## 2.2 Τύποι Σφαλμάτων και Σύνδεση Κυκλωμάτων Ακολουθίας

Σε αυτό το μέρος θα παρουσιαστούν τα διαφορετικά είδη βραχυκυκλωμάτων (μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό) και οι συνδεσμολογίες των τριών αντιστοίχων κυκλωμάτων ακολουθίας σε κάθε περίπτωση σφάλματος. Επίσης θα γίνει αναπαράσταση μιας γραμμής μεταφοράς στην περίπτωση σφάλματος με το μοντέλο γραμμής μεγάλου μήκους.

Τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται σε συμμετρικά και ασύμμετρα [3]. Στην κατηγορία των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων, που είναι και τα πιο επώδυνα, θεωρούμε το βραχυκύκλωμα μεταξύ τριών φάσεων ή αλλιώς τριφασικό βραχυκύκλωμα LLL. Εάν το σφάλμα είναι μεταξύ των τριών φάσεων και της γης τότε πρόκειται για σφάλμα LLLG. Στην κατηγορία των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων υπάγονται το βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων LL, μεταξύ δύο φάσεων και γης LLG και μεταξύ μιας φάσης και γης LG. Τα τελευταία είναι και τα πιο συχνά σε ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.2.1 Αναπαράσταση Γραμμής Μεταφοράς κατά το Σφάλμα

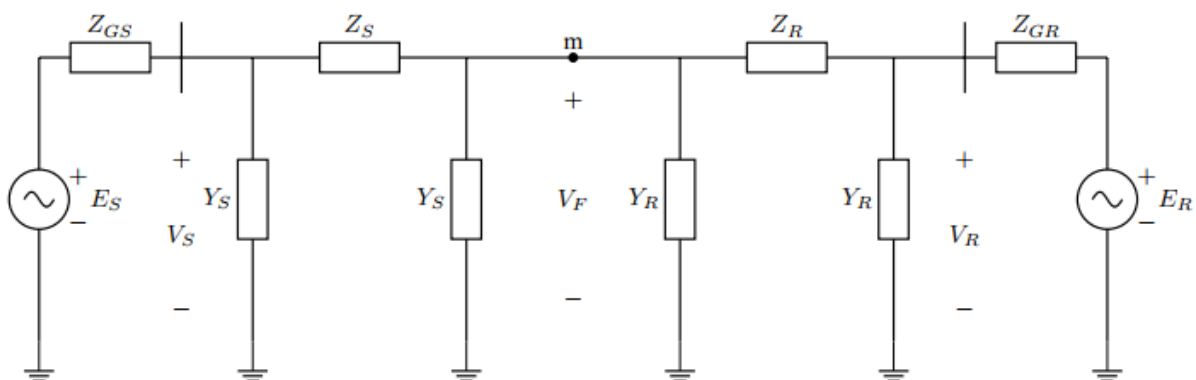
Κατά την ομαλή λειτουργία, απουσία σφάλματος, η γραμμή μεταφοράς που εξετάζουμε με βάση το μοντέλο μεγάλου μήκους έχει ανά φάση την μορφή του Σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.6: Γραμμή μεταφοράς - μοντέλο μεγάλου μήκους

όπου,  $Z_{line} = Z_C \sinh(\gamma l)$  είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega$ ) και  $Y_{line} = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)$  είναι η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega^{-1}$ ). Επίσης,  $E_S$  είναι η τάση του ισοδύναμου ΣΗΕ στην πλευρά S (Sending end),  $Z_{GS}$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση του ΣΗΕ στην πλευρά S (Sending end). Αντίστοιχα,  $E_R$  είναι η τάση του ισοδύναμου ΣΗΕ στην πλευρά R (Receiving end) και  $Z_{GR}$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση του ΣΗΕ στην πλευρά R (Receiving end). Τέλος,  $V_S$  είναι η τάση στον ζυγού S και  $V_R$  είναι η τάση στον ζυγό R.

Στην περίπτωση σφάλματος σε απόσταση m% του συνολικού μήκους της γραμμής από την πλευρά S, αυτή μοντελοποιείται με δύο κυκλώματα  $\pi$  μεγάλου μήκους ένα αριστερά και ένα δεξιά του m. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Για χάρη απλότητας, διατηρούμε τον συμβολισμό S (Sending end) και R (Receiving end).

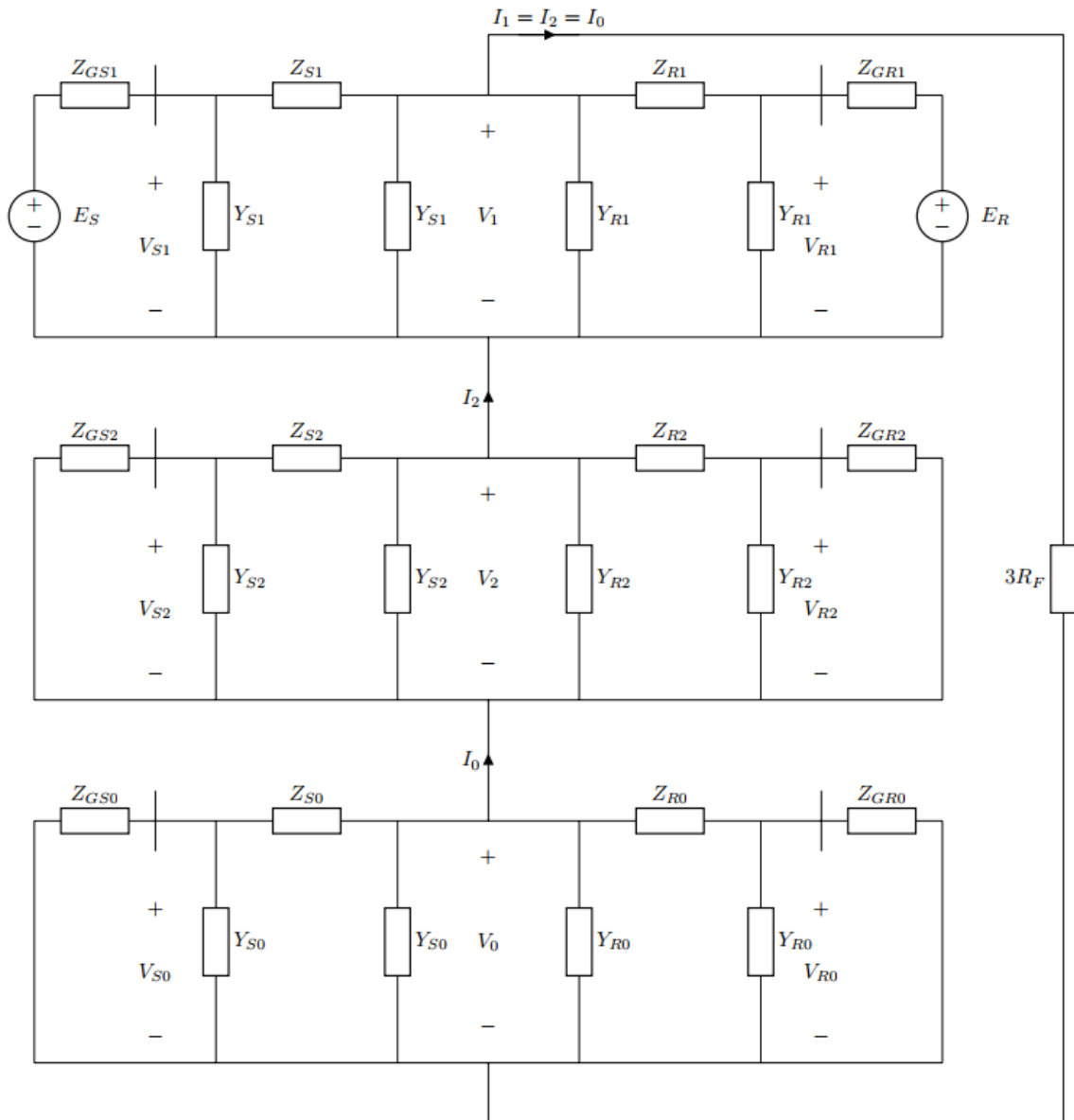


Σχήμα 2.7: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα στη θέση m - μοντέλο μεγάλου μήκους

όπου,  $Z_S = Z_C \sinh(\gamma ml)$  είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega$ ) και  $Y_S = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma ml}{2}\right)$  είναι η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega^{-1}$ ), αριστερά της θέσης του σφάλματος m. Αντίστοιχα  $Z_R = Z_C \sinh(\gamma(1-m)l)$  είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega$ ), και  $Y_R = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma(1-m)l}{2}\right)$  είναι η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega^{-1}$ ), δεξιά της θέσης του σφάλματος m.

## 2.2.2 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα LG

Στην περίπτωση σφάλματος LG, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας της γραμμής καθώς και η μεταξύ τους σύνδεση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.



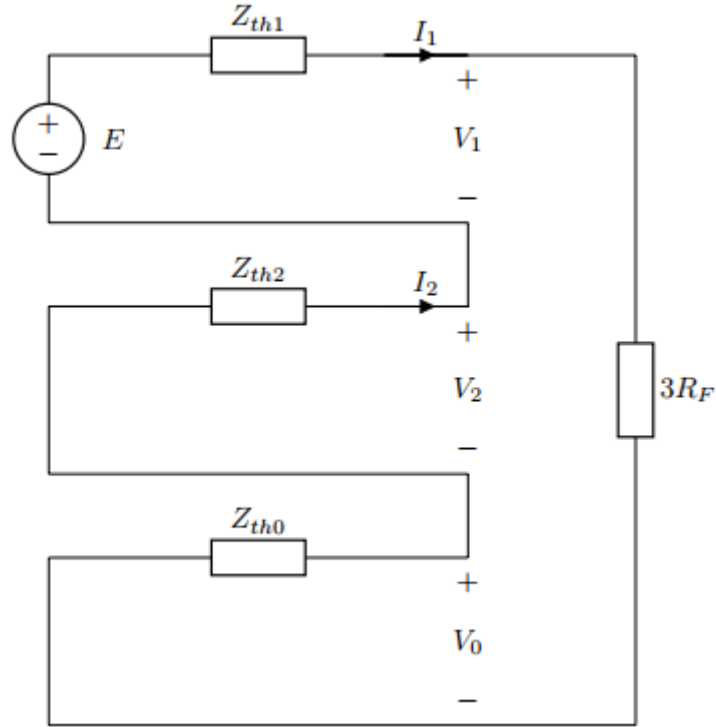
**Σχήμα 2.8:** Μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$

όπου,  $Z_{S1} = Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)$  είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega$ ) και  $Y_{S1} = \frac{1}{Z_{C1}} \tanh\left(\frac{\gamma_1 ml}{2}\right)$  είναι η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega^{-1}$ ), αριστερά της θέσης του σφάλματος m στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας. Αντίστοιχα,

$Z_{R1} = Z_{C1} \sinh(\gamma_1(1-m)l)$  είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega$ ), και  $Y_{R1} = \frac{1}{Z_{C1}} \tanh\left(\frac{\gamma_1(1-m)l}{2}\right)$  είναι η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς (σε  $\Omega^{-1}$ ), δεξιά της θέσης του σφάλματος  $m$  στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας. Επίσης,  $E_S$  είναι η τάση του ισοδύναμου ΣΗΕ στην πλευρά  $S$ ,  $Z_{GS1}$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση θετικής ακολουθίας του ΣΗΕ στην πλευρά  $S$ . Αντίστοιχα,  $E_R$  είναι η τάση του ισοδύναμου ΣΗΕ στην πλευρά  $R$  και  $Z_{GR1}$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση θετικής ακολουθίας του ΣΗΕ στην πλευρά  $R$ . Τέλος,  $V_1$  είναι η τάση θετικής ακολουθίας στη θέση του σφάλματος,  $V_{S1}$  είναι η τάση θετικής ακολουθίας στον ζυγού  $S$ ,  $V_{R1}$  είναι η τάση θετικής ακολουθίας στον ζυγό  $R$  και  $R_F$  είναι η αντίσταση σφάλματος.

Στα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, τα μεγέθη ακολουθούν το συμβολισμό της θετικής ακολουθίας.

Για την επίλυση του βραχυκυκλώματος, σκοπός της ανάλυσης που θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο είναι με κατάλληλη επεξεργασία των κυκλωμάτων ακολουθίας να καταλήξουμε στην γενική μορφή του Σχήματος 2.9. Τότε εφαρμόζοντας τις γνωστές σχέσεις που το διέπουν θα υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα των ζυγών  $S$  και  $R$ .



**Σχήμα 2.9:** Μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG - Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας

Οι σχέσεις που διέπουν το κύκλωμα του Σχήματος 2.9 είναι:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th0} + 3R_f} \quad (2.17)$$

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_{th1} \quad (2.18)$$

$$V_2 = - I_2 Z_{th2} \quad (2.19)$$

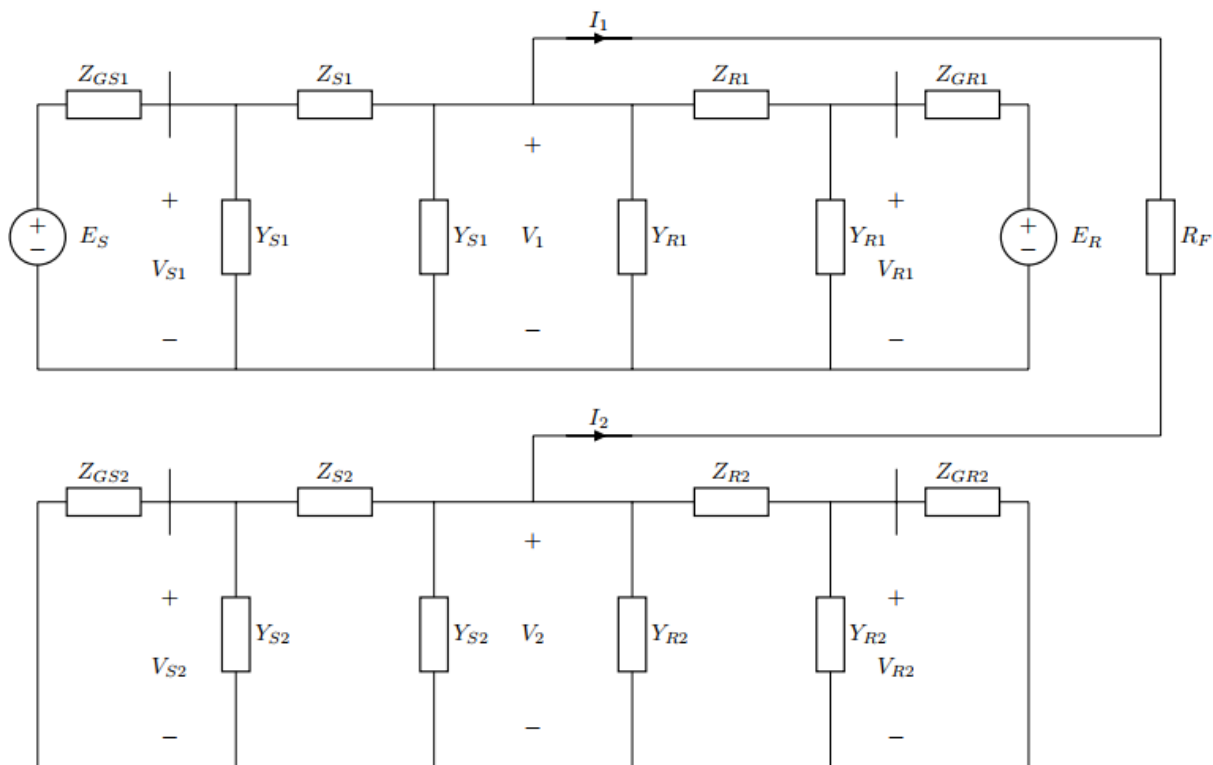
$$V_0 = - I_0 Z_{th0} \quad (2.20)$$

Για να μεταβούμε από τα μεγέθη των ακολουθιακών κυκλωμάτων στα τριφασικά, που είναι αυτά που μας ενδιαφέρουν για την ανάλυσή μας, εφαρμόζουμε την εξής μετατροπή:

$$V_{abcF} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad I_{abcF} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

### 2.2.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα (χωρίς γη) LL

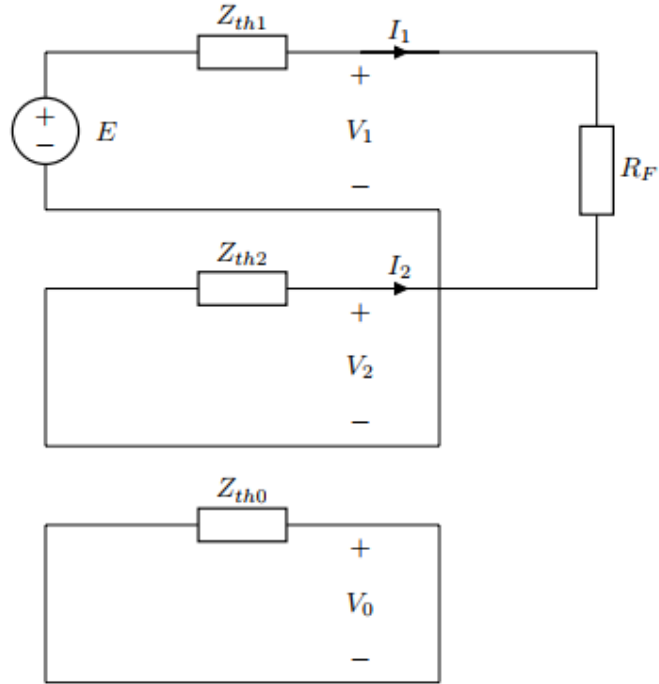
Στην περίπτωση σφάλματος LL, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας της γραμμής καθώς και η μεταξύ τους σύνδεση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.



**Σχήμα 2.10:** Διφασικό βραχυκύκλωμα LL γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π

Η μηδενική ακολουθία δεν χρησιμοποιείται καθώς ο συγκεκριμένος τύπος βραχυκυκλώματος δεν περιλαμβάνει τη γη. Οι συμβολισμοί και οι ορισμοί των μεγεθών είναι ίδιοι με την περίπτωση του σφάλματος LG.

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία του κυκλώματος του Σχήματος 2.10, σκοπός μας είναι να καταλήξουμε στη γενική μορφή σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας, για την περίπτωση σφάλματος LL. Αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11.



**Σχήμα 2.11:** Διφασικό βραχυκύκλωμα LL - Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας

Οι σχέσεις που διέπουν το κύκλωμα του Σχήματος 2.11 είναι:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{th1} + Z_{th2} + R_F} \quad (2.21)$$

$$I_2 = -I_1 \quad (2.22)$$

$$I_0 = 0 \quad (2.23)$$

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_{th1} \quad (2.24)$$

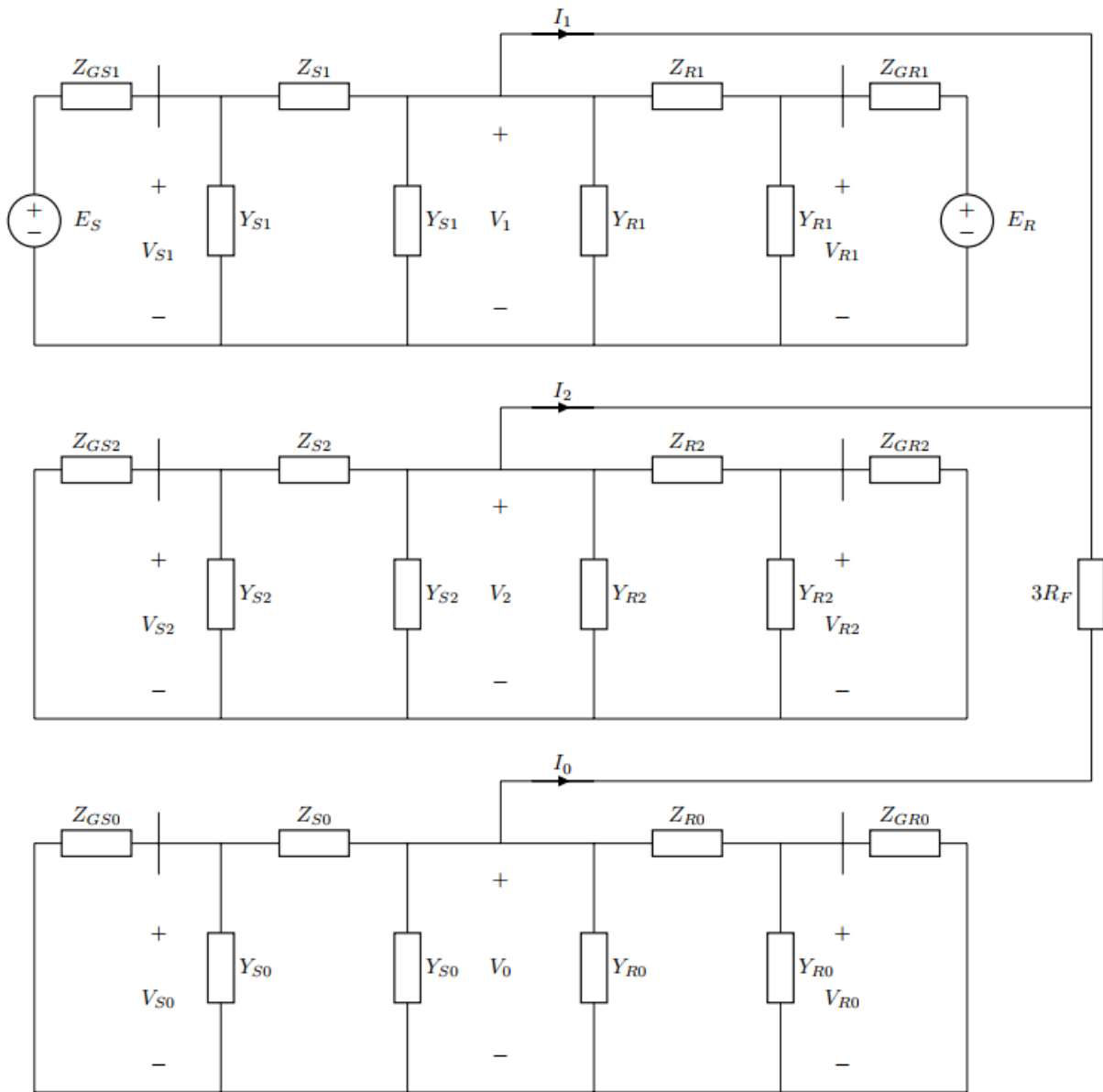
$$V_2 = -I_2 Z_{th2} \quad (2.25)$$

$$V_0 = -I_0 Z_{th0} \quad (2.26)$$

Για να μεταβούμε από τα μεγέθη των ακολουθιακών κυκλωμάτων στα τριφασικά, εφαρμόζουμε την ίδια μετατροπή με αυτήν που αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.2.

### 2.2.4 Διφασικό Βραχυκύκλωμα (με γη) LLG

Στην περίπτωση σφάλματος LLG, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας της γραμμής καθώς και η μεταξύ τους σύνδεση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12.

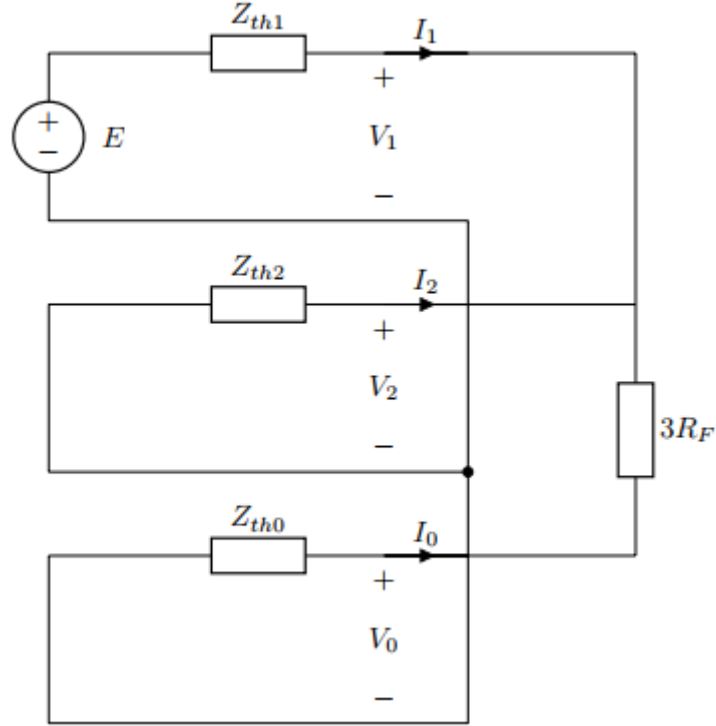


**Σχήμα 2.12:** Διφασικό βραχυκύκλωμα (με γη) LLG γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος π

Οι συμβολισμοί και οι ορισμοί των μεγεθών είναι ίδιοι με την περίπτωση του σφάλματος LG.

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία του κυκλώματος του Σχήματος 2.12, σκοπός μας είναι να καταλήξουμε στη γενική μορφή σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας, για την περίπτωση σφάλματος LLG. Αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13.





**Σχήμα 2.13:** Διφασικό βραχυκύκλωμα (με γη) LLG - Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας

Οι σχέσεις που διέπουν το κύκλωμα του Σχήματος 2.13 είναι:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{th1} + \frac{Z_{th2}(3R_F + Z_{th0})}{Z_{th2} + 3R_F + Z_{th0}}} \quad (2.27)$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_{th0} + 3R_F}{Z_{th0} + Z_{th1} + 3R_F} \quad (2.28)$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_{th2}}{Z_{th0} + Z_{th1} + 3R_F} \quad (2.29)$$

$$V_1 = E - I_1 Z_{th1} \quad (2.30)$$

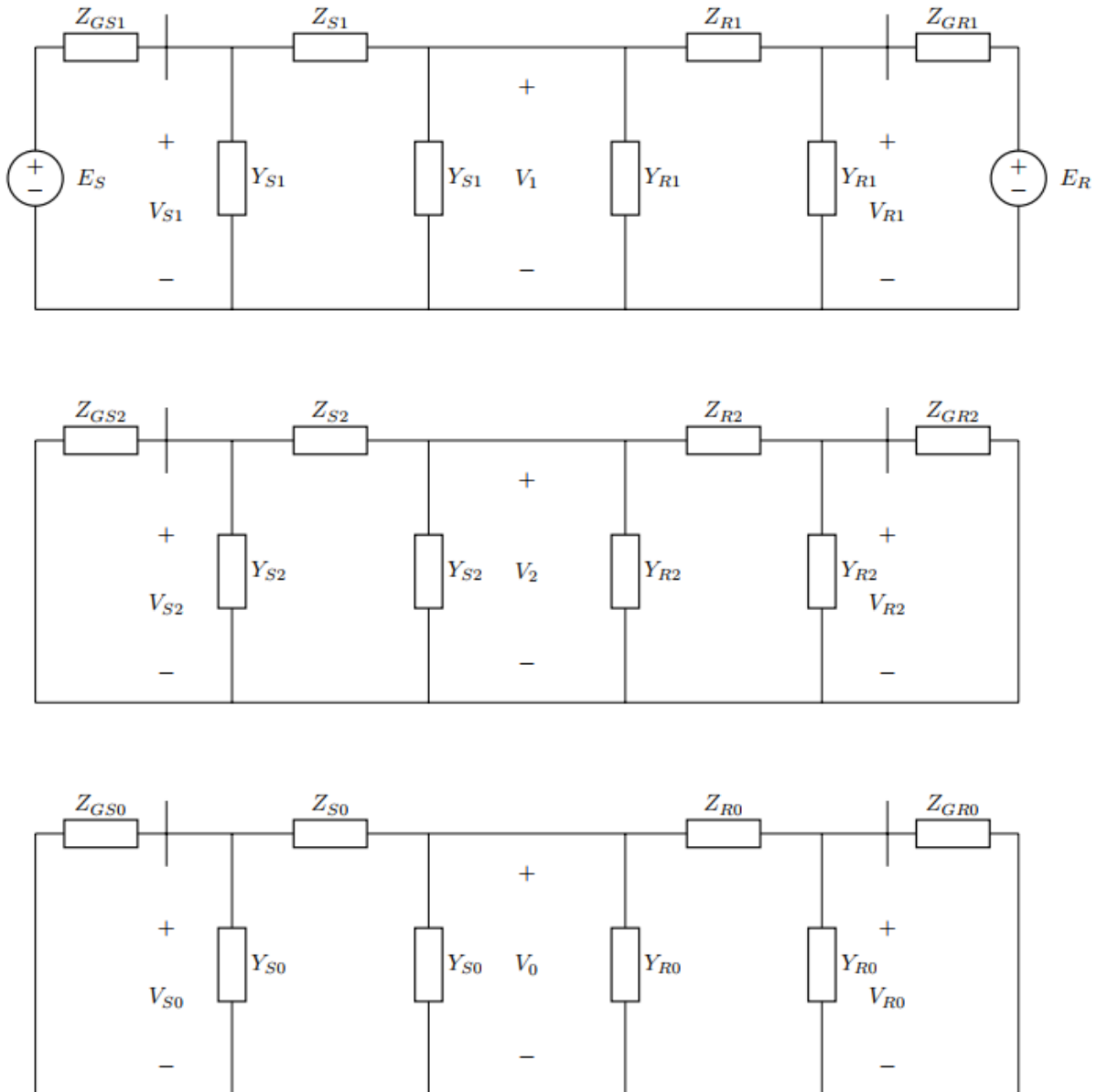
$$V_2 = -I_2 Z_{th2} \quad (2.31)$$

$$V_0 = -I_0 Z_{th0} \quad (2.32)$$

Για να μεταβούμε από τα μεγέθη των ακολουθιακών κυκλωμάτων στα τριφασικά, εφαρμόζουμε την ίδια μετατροπή με αυτήν που αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.2.

## 2.2.5 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα LLL

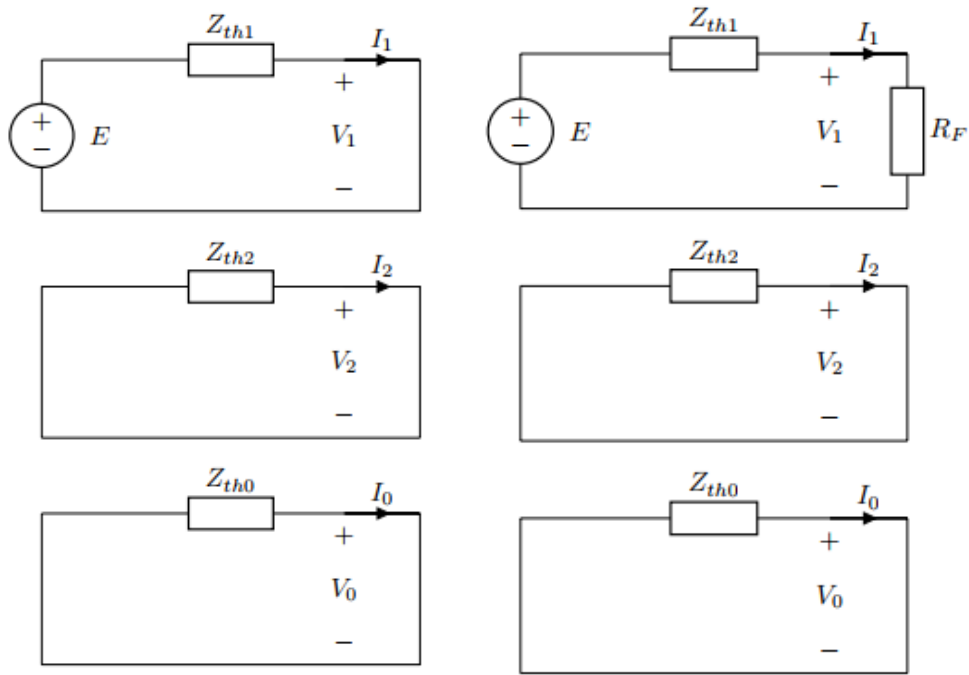
Στην περίπτωση σφάλματος LLL, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας της γραμμής καθώς και η μεταξύ τους σύνδεση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.14.



**Σχήμα 2.14:** Τριφασικό βραχυκύκλωμα LLL γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$

Οι συμβολισμοί και οι ορισμοί των μεγεθών είναι ίδιοι με την περίπτωση του σφάλματος LG.

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία του κυκλώματος του Σχήματος 2.14, σκοπός μας είναι να καταλήξουμε στη γενική μορφή σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας, για την περίπτωση σφάλματος LLL. Αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15.



**Σχήμα 2.15:** Τριφασικό βραχυκύκλωμα LLL χωρίς(αριστερά) και με αντίσταση σφάλματος  $R_F$  (δεξιά)-  
Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας

Οι σχέσεις που διέπουν το κύκλωμα του Σχήματος 2.15 είναι:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{th1} + R_F} \quad (2.33)$$

$$I_2 = 0 \quad (2.34)$$

$$I_0 = 0 \quad (2.35)$$

$$V_1 = E - I_1 Z_{th1} \quad (2.36)$$

$$V_2 = 0 \quad (2.37)$$

$$V_0 = 0 \quad (2.38)$$

Για να μεταβούμε από τα μεγέθη των ακολουθιακών κυκλωμάτων στα τριφασικά, εφαρμόζουμε την ίδια μετατροπή με αυτήν που αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.2.

### 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

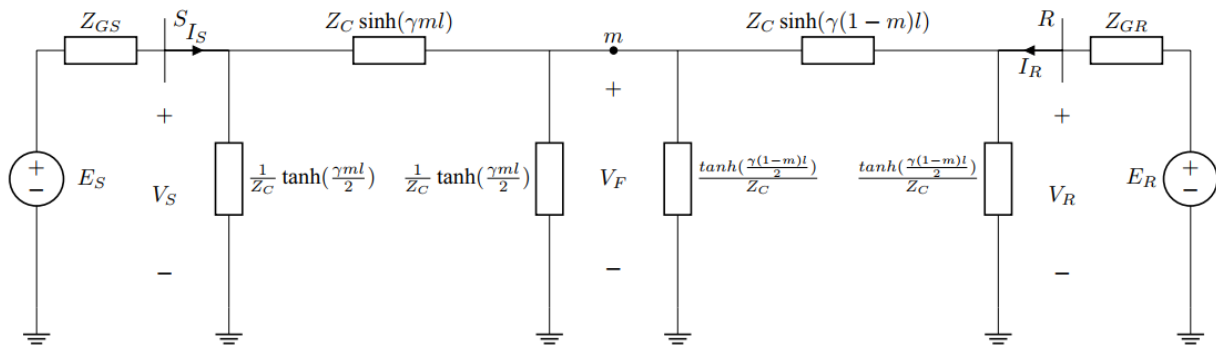
#### Απλοποίηση των Κυκλωμάτων Ακολουθίας

Για την εφαρμογή των αλγόριθμων εντοπισμού σφαλμάτων απαιτείται να είναι γνωστοί οι φασιθέτες της τάσης και του ρεύματος κατά το σφάλμα στις θέσεις των ηλεκτρονόμων. Σκοπός της ανάλυσης αυτού του κεφαλαίου είναι η απλοποίηση των ακολουθιακών κυκλωμάτων των Σχημάτων 2.8, 2.10, 2.12, 2.14 ώστε να λάβουν την γενική μορφή των κυκλωμάτων 2.9, 2.11, 2.13, 2.15. Σε αυτό το μέρος παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναλύονται και απλοποιούνται τα ακολουθιακά κυκλώματα μιας γραμμής μεταφοράς, η οποία αναπαρίσταται με το μοντέλο μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$ . Στην περίπτωση του μοντέλου μικρού μήκους, η διαδικασία είναι παρόμοια και απλούστερη, γι' αυτό και δεν παρουσιάζεται.

Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο ώστε να γίνει στην συνέχεια ο υπολογισμός των ακολουθιακών παραμέτρων της τάσης και της έντασης στο σημείο των ηλεκτρονόμων, δηλαδή στους ζυγούς S και R. Τέλος, με βάση αυτές τις παραμέτρους και μετά από κατάλληλη μετατροπή, προκύπτουν οι τιμές των φασικών μεγεθών όπως αυτά μετρούνται από τους ηλεκτρονόμους που βρίσκονται στους παραπάνω ζυγούς, κατά το σφάλμα.

#### 3.1 Υπολογισμός Παραμέτρων Κυκλωμάτων - Γενική Περίπτωση

Όπως αναφέραμε και στην Ενότητα 2.2.1 η αναπαράσταση μιας γραμμής μεταφοράς μοντέλου μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$ , κατά το σφάλμα είναι:



Σχήμα 3.1: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα μοντέλο μεγάλου μήκους κύκλωμα  $\pi$

Για λόγους απλότητας συμβολισμών και ευκολίας πράξεων ορίζουμε τα μεγέθη της γραμμής όπως περιγράφονται στην Ενότητα 2.2.1. Δηλαδή θέτουμε:

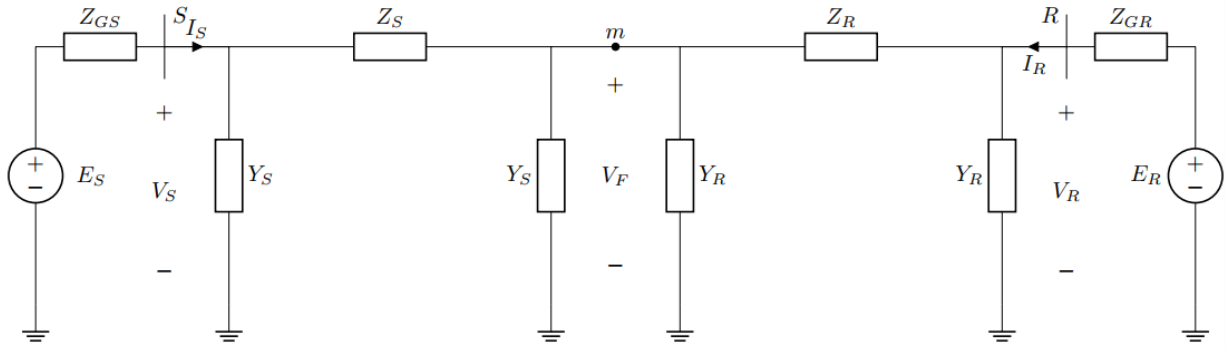
$$Z_S = Z_C \sinh(\gamma ml) \quad (3.1)$$

$$Z_R = Z_C \sinh(\gamma(1-m)l) \quad (3.2)$$

$$Y_S = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma ml}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$Y_R = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma(1-m)l}{2}\right) \quad (3.4)$$

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (3.1) έως (3.4) το κύκλωμα του Σχήματος 3.1 γίνεται:



**Σχήμα 3.2:** Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα μοντέλο μεγάλου μήκους κύκλωμα π με εύχρηστο συμβολισμό

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Thevenin στα άκρα της  $V_F$  στο αριστερό ημικύκλωμα έχουμε:

$$Z_{thS} = (Z_{GS} \parallel Y_S^{-1} + Z_S) \parallel Y_S^{-1} \Rightarrow Z_{thS} = \frac{\left( \frac{Z_{GS}Y_S^{-1}}{Z_{GS}+Y_S^{-1}} + Z_S \right) Y_S^{-1}}{\left( \frac{Z_{GS}Y_S^{-1}}{Z_{GS}+Y_S^{-1}} + Z_S \right) + Y_S^{-1}} \quad (3.5)$$

$$V_{thS} = \frac{Y_S^{-1}}{Z_S + Y_S^{-1}} V_S \quad (3.6)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων Kirchhoff για την εύρεση της  $V_S$  έχουμε ότι:

$$V_S = E_S \frac{(Z_S + Y_S^{-1}) \parallel Y_S^{-1}}{(Z_S + Y_S^{-1}) \parallel Y_S^{-1} + Z_{GS}} \Rightarrow V_S = E_S \frac{\frac{(Z_S + Y_S^{-1})Y_S^{-1}}{(Z_S + Y_S^{-1}) + Y_S^{-1}}}{\frac{(Z_S + Y_S^{-1})Y_S^{-1}}{(Z_S + Y_S^{-1}) + Y_S^{-1}} + Z_{GS}} \quad (3.7)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Thevenin στα άκρα της  $V_F$  στο δεξί ημικύκλωμα έχουμε:

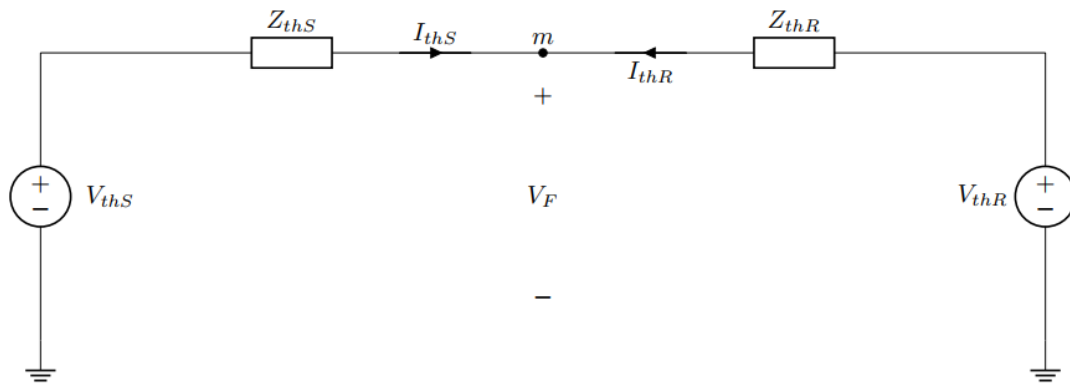
$$Z_{thR} = (Z_{GR} \parallel Y_R^{-1} + Z_R) \parallel Y_R^{-1} \Rightarrow Z_{thR} = \frac{\left( \frac{Z_{GR}Y_R^{-1}}{Z_{GR}+Y_R^{-1}} + Z_R \right) Y_R^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR}Y_R^{-1}}{Z_{GR}+Y_R^{-1}} + Z_R \right) + Y_R^{-1}} \quad (3.8)$$

$$V_{thR} = \frac{Y_R^{-1}}{Z_R + Y_R^{-1}} V_R \quad (3.9)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων kirchhoff για την εύρεση της  $V_R$  έχουμε ότι:

$$V_R = E_R \frac{(Z_R + Y_R^{-1}) \parallel Y_R^{-1}}{(Z_R + Y_R^{-1}) \parallel Y_R^{-1} + Z_{GR}} \Rightarrow V_R = E_R \frac{\frac{(Z_R + Y_R^{-1})Y_R^{-1}}{(Z_R + Y_R^{-1}) + Y_R^{-1}}}{\frac{(Z_R + Y_R^{-1})Y_R^{-1}}{(Z_R + Y_R^{-1}) + Y_R^{-1}} + Z_{GR}} \quad (3.10)$$

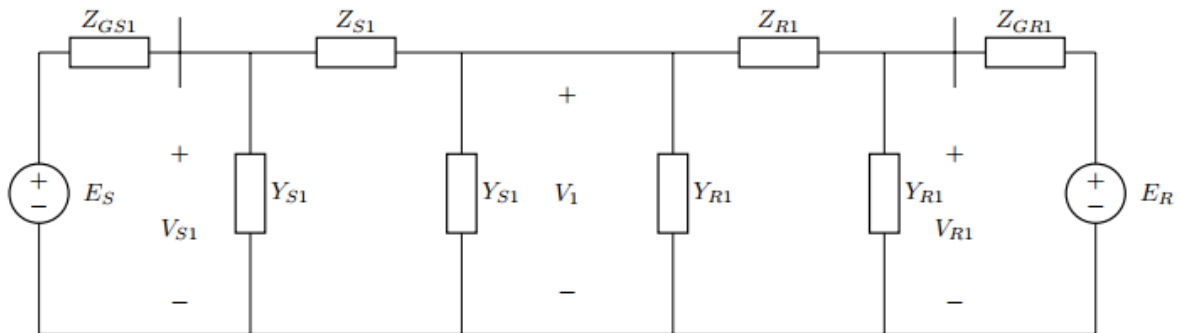
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.5) έως (3.10) προκύπτει το εξής ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα

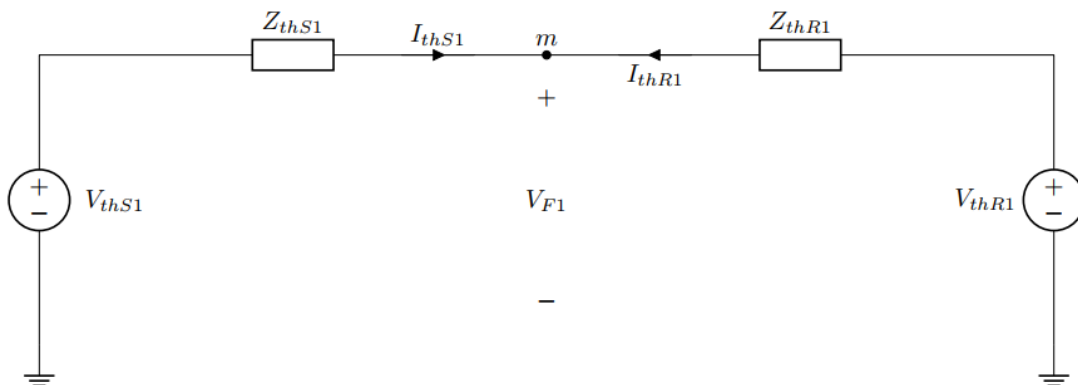
### 3.2 Απλοποίηση Κυκλώματος Θετικής Ακολουθίας

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα θετικής ακολουθίας της γραμμής:



Σχήμα 3.4: Ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$

Αντιπαραβάλλοντας το κύκλωμα του Σχήματος 3.2 με το κύκλωμα το Σχήματος 3.4 παρατηρούμε ότι αυτά όμοια και ταυτίζονται αν απλά αντικαταστήσουμε τα μεγέθη της γραμμής με τα μεγέθη της θετικής ακολουθίας αυτής. Συνεπώς, αναλύοντας το κύκλωμα της θετικής ακολουθίας καταλήγουμε στο εξής ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin κυκλώματος θετικής ακολουθίας

Αντίστοιχα με την Ενότητα 3.1.1 οι παράμετροι του κυκλώματος είναι:

$$Z_{thS1} = \frac{\left( \frac{Z_{GS1}Y_{S1}^{-1}}{Z_{GS1} + Y_{S1}^{-1}} + Z_{S1} \right) Y_{S1}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GS1}Y_{S1}^{-1}}{Z_{GS1} + Y_{S1}^{-1}} + Z_{S1} \right) + Y_{S1}^{-1}} \quad (3.11)$$

$$Z_{thR1} = \frac{\left( \frac{Z_{GR1}Y_{R1}^{-1}}{Z_{GR1} + Y_{R1}^{-1}} + Z_{R1} \right) Y_{R1}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR1}Y_{R1}^{-1}}{Z_{GR1} + Y_{R1}^{-1}} + Z_{R1} \right) + Y_{R1}^{-1}} \quad (3.12)$$

$$V_{thS1} = E_S \frac{Y_{S1}^{-1}}{Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}} \frac{\frac{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1})Y_{S1}^{-1}}{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}) + Y_{S1}^{-1}}}{\frac{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1})Y_{S1}^{-1}}{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}) + Y_{S1}^{-1}} + Z_{GS1}} \quad (3.13)$$

$$V_{thR1} = E_R \frac{Y_{R1}^{-1}}{Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}} \frac{\frac{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1})Y_{R1}^{-1}}{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}) + Y_{R1}^{-1}}}{\frac{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1})Y_{R1}^{-1}}{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}) + Y_{R1}^{-1}} + Z_{GR1}} \quad (3.14)$$

Με εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης, τα ρεύματα σφάλματος που προέρχονται από την πλευρά S και R είναι αντίστοιχα:

$$I_{thS1} = I_{F1} \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thS1} - V_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad (3.15)$$

$$I_{thR1} = I_{F1} \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thR1} - V_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad (3.16)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff και με βάση τα σχήματα 3.4 και 3.5, τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις  $Z_{S1}$  και  $Z_{R1}$  είναι:

$$I_{ZS1} = I_{thS1} + V_{F1}Y_{S1} \quad (3.17)$$

$$I_{ZR1} = I_{thR1} + V_{F1}Y_{R1} \quad (3.18)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις θετικής ακολουθίας στις θέσεις των ηλεκτρονόμων είναι:

$$V_{S1} = V_{F1} + Z_{S1}I_{ZS1} \quad (3.19)$$

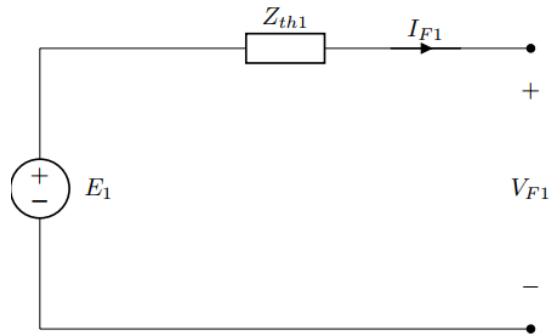
$$V_{R1} = V_{F1} + Z_{R1}I_{ZR1} \quad (3.20)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff, τα ρεύματα θετικής ακολουθίας στις θέσεις των ηλεκτρονόμων είναι:

$$I_{S1} = V_{S1}Y_{S1} + I_{ZS1} \quad (3.21)$$

$$I_{R1} = V_{R1}Y_{R1} + I_{ZR1} \quad (3.22)$$

Θέλουμε όμως να καταλήξουμε σε κύκλωμα της μορφής:



Σχήμα 3.6: *Ονομαστικό Κύκλωμα Θετικής Ακολουθίας*

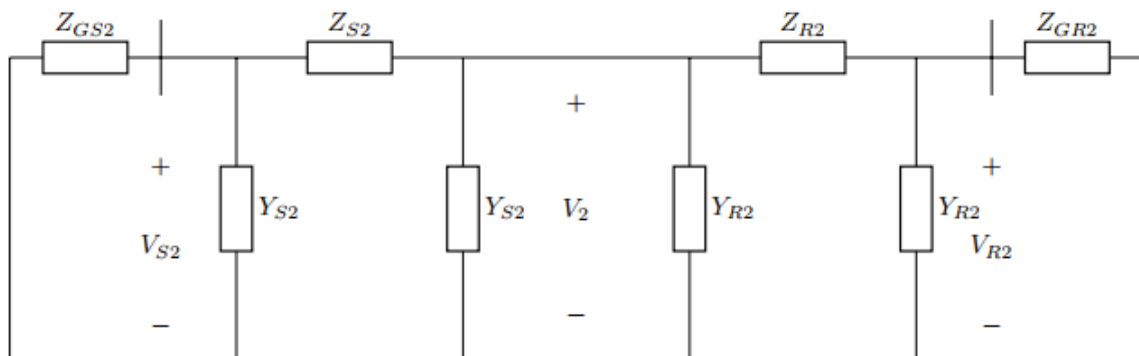
Για να το πετύχουμε αυτό εφαρμόζουμε το θεώρημα Thevenin στα άκρα της  $V_{F1}$  ώστε να βρούμε την ισοδύναμη αντίσταση και την αρχή της επαλληλίας και Thevenin για να βρούμε την ισοδύναμη τάση πηγής. Προκύπτει ότι:

$$Z_{th1} = Z_{thS1} \parallel Z_{thR1} = \frac{Z_{thS1}Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad (3.23)$$

$$E_1 = V_{thS1} \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + V_{thR1} \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad (3.24)$$

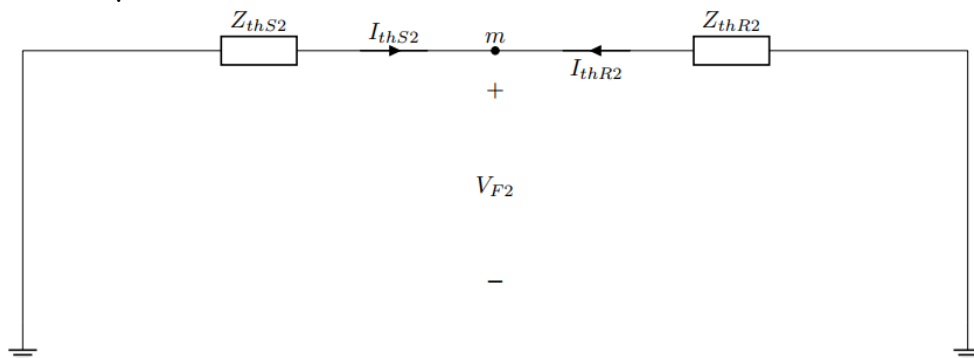
### 3.3 Απλοποίηση Κυκλώματος Αρνητικής Ακολουθίας

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας της γραμμής:



Σχήμα 3.7: *Ισοδύναμο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$*

Ομοίως όπως με την ανάλυση της Ενότητας 3.1.2 που προηγήθηκε καταλήγουμε στο εξής ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 3.8: *Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας*



Αντίστοιχα με την Ενότητα 3.1.1 οι παράμετροι του κυκλώματος είναι:

$$Z_{thS2} = \frac{\left( \frac{Z_{GS2}Y_{S2}^{-1}}{Z_{GS2} + Y_{S2}^{-1}} + Z_{S2} \right) Y_{S2}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GS2}Y_{S2}^{-1}}{Z_{GS2} + Y_{S2}^{-1}} + Z_{S2} \right) + Y_{S2}^{-1}} \quad (3.25)$$

$$Z_{thR2} = \frac{\left( \frac{Z_{GR2}Y_{R2}^{-1}}{Z_{GR2} + Y_{R2}^{-1}} + Z_{R2} \right) Y_{R2}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR2}Y_{R2}^{-1}}{Z_{GR2} + Y_{R2}^{-1}} + Z_{R2} \right) + Y_{R2}^{-1}} \quad (3.26)$$

Τα ρεύματα σφάλματος που προέρχονται από την πλευρά S και R είναι αντίστοιχα:

$$I_{thS2} = I_{F2} \frac{Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad (3.27)$$

$$I_{thR2} = I_{F2} \frac{Z_{thS2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad (3.28)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff και με βάση τα Σχήματα 3.4 και 3.5, τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις  $Z_{S2}$  και  $Z_{R2}$  είναι:

$$I_{ZS2} = I_{thS2} + V_{F2}Y_{S2} \quad (3.29)$$

$$I_{ZR2} = I_{thR2} + V_{F2}Y_{R2} \quad (3.30)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις αρνητικής ακολουθίας στις θέσεις των ηλεκτρονόμων είναι:

$$V_{S2} = V_{F2} + Z_{S2}I_{ZS2} \quad (3.31)$$

$$V_{R2} = V_{F2} + Z_{R2}I_{ZR2} \quad (3.32)$$

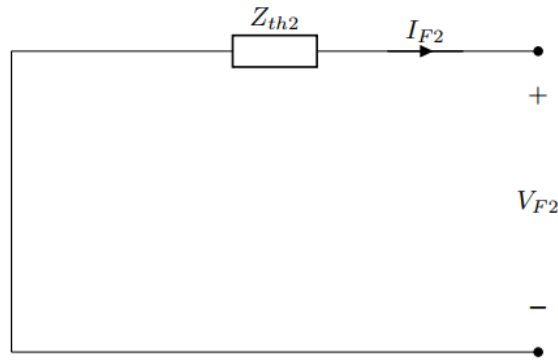
Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff, τα ρεύματα θετικής ακολουθίας στις θέσεις των ηλεκτρονόμων είναι:

$$I_{S2} = V_{S2}Y_{S2} + I_{ZS2} \quad (3.33)$$

$$I_{R2} = V_{R2}Y_{R2} + I_{ZR2} \quad (3.34)$$

Θέλουμε όμως να καταλήξουμε σε κύκλωμα της μορφής του Σχήματος 3.9, οπότε με θεώρημα Thevenin στα άκρα της  $V_{F2}$  παίρνουμε:

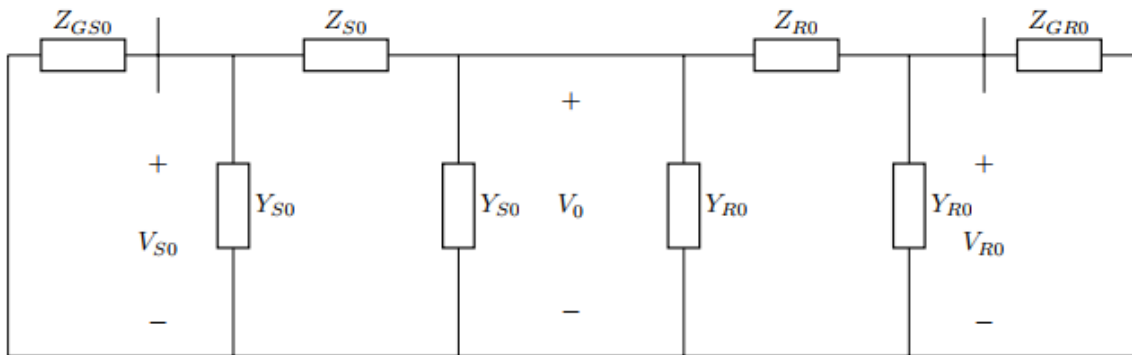
$$Z_{th2} = Z_{thS2} \parallel Z_{thR2} = \frac{Z_{thS2}Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad (3.35)$$



Σχήμα 3.9: Ονομαστικό Κύκλωμα Αρνητικής Ακολουθίας

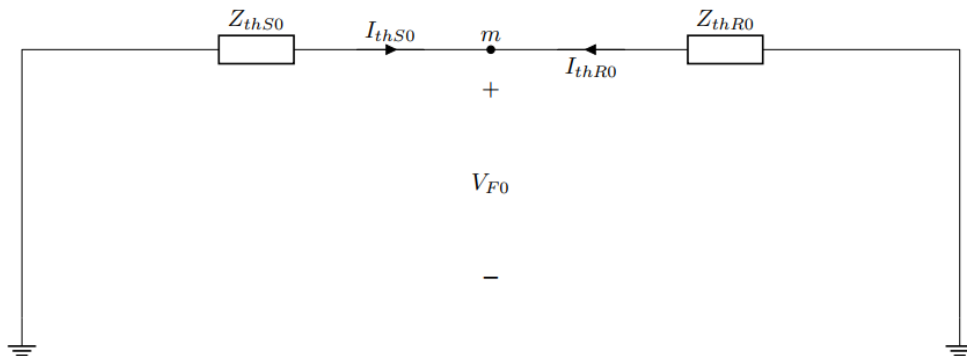
### 3.4 Απλοποίηση Κυκλώματος Μηδενικής Ακολουθίας

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας της γραμμής:



Σχήμα 3.10: Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κυκλώματος  $\pi$

Ομοίως όπως με την ανάλυση της Ενότητας 3.1.1 που προηγήθηκε καταλήγουμε στο εξής ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 3.11: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας

Αντίστοιχα με την Ενότητα 2.3.2 οι παράμετροι του κυκλώματος είναι:

$$Z_{thS0} = \frac{\left( \frac{Z_{GS0} Y_{S0}^{-1}}{Z_{GS0} + Y_{S0}^{-1}} + Z_{S0} \right) Y_{S0}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GS0} Y_{S0}^{-1}}{Z_{GS0} + Y_{S0}^{-1}} + Z_{S0} \right) + Y_{S0}^{-1}} \quad (3.36)$$

$$Z_{thR0} = \frac{\left( \frac{Z_{GR0} Y_{R0}^{-1}}{Z_{GR0} + Y_{R0}^{-1}} + Z_{R0} \right) Y_{R0}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR0} Y_{R0}^{-1}}{Z_{GR0} + Y_{R0}^{-1}} + Z_{R0} \right) + Y_{R0}^{-1}} \quad (3.37)$$

Τα ρεύματα σφάλματος που προέρχονται από την πλευρά S και R είναι αντίστοιχα:

$$I_{thS0} = I_{F0} \frac{Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad (3.38)$$

$$I_{thR0} = I_{F0} \frac{Z_{thS0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad (3.39)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff και με βάση τα Σχήματα 3.4 και 3.5, τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις  $Z_{S1}$  και  $Z_{R1}$  είναι:

$$I_{ZS0} = I_{thS0} + V_{F0} Y_{S0} \quad (3.40)$$

$$I_{ZR0} = I_{thR0} + V_{F0} Y_{R0} \quad (3.41)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις θετικής ακολουθίας στις θέσεις των ηλεκτρονόμων είναι:

$$V_{S0} = V_{F0} + Z_{S0} I_{ZS0} \quad (3.42)$$

$$V_{R0} = V_{F0} + Z_{R0} I_{ZR0} \quad (3.43)$$

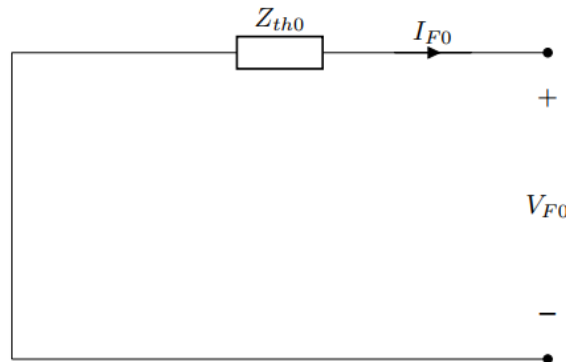
Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff, τα ρεύματα θετικής ακολουθίας στις θέσεις των ηλεκτρονόμων είναι:

$$I_{S0} = V_{S0} Y_{S0} + I_{ZS0} \quad (3.44)$$

$$I_{R0} = V_{R0} Y_{R0} + I_{ZR0} \quad (3.45)$$

Θέλουμε όμως να καταλήξουμε σε κύκλωμα της μορφής του Σχήματος 3.12, οπότε με θεώρημα Thevenin στα άκρα της  $V_{F2}$  παίρνουμε:

$$Z_{th0} = Z_{thS0} \parallel Z_{thR0} = \frac{Z_{thS0} Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad (3.22)$$



**Σχήμα 3.12:** Ονομαστικό Κύκλωμα Μηδενικής Ακολουθίας

## 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### One Ended Fault Location Algorithms - Αλγόριθμοι Εντοπισμού Θέσης Σφάλματος Ενός Άκρου.

#### 4.1 Εισαγωγή

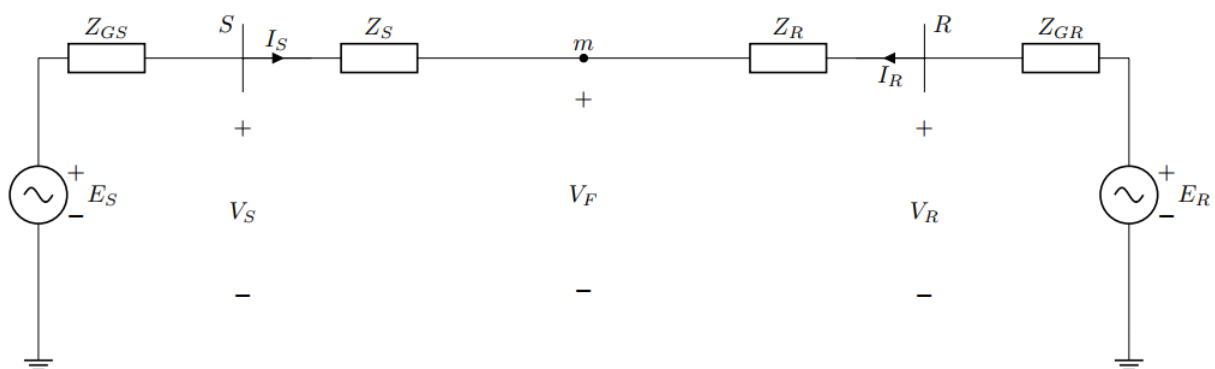
Οι “αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης σφάλματος ενός άκρου” εποπτεύουν την γραμμή μόνο από την μια πλευρά και χρησιμοποιούν μετρήσεις μόνο από αυτήν για την ανίχνευση της θέσης του σφάλματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούν τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος για να υπολογίσουν την σύνθετη αντίσταση από τη θέση του ηλεκτρονόμου μέχρι το σφάλμα. Στην συνέχεια αξιολογούν τα χαρακτηριστικά αυτής για την εύρεση της θέσης και τον τύπο του σφάλματος.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι είναι εύκολες στην υλοποίηση, χρησιμοποιούν δεδομένα μόνο από την μια πλευρά της γραμμής άρα δεν απαιτείται επικοινωνία μεταξύ των ηλεκτρονόμων και δίνουν σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### 4.2 Σύνθετη αντίσταση σφάλματος με χρήση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση των αλγορίθμων απαιτείται να ορίσουμε την σύνθετη αντίσταση που “βλέπει” ο ηλεκτρονόμος κατά το σφάλμα. Το μεγαλύτερο μέρος των One – Ended Fault Location Algorithms” χρησιμοποιούν το μοντέλο μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς. Για συνάφεια με αυτούς και για ευκολία θα χρησιμοποιήσουμε το ίδιο μοντέλο για τον υπολογισμό σύνθετης αντίστασης που “βλέπει” ο ηλεκτρονόμος.

Το εν λόγω μοντέλο έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στην Ενότητα 2.1.1 και με βάση αυτό, το ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα είναι:

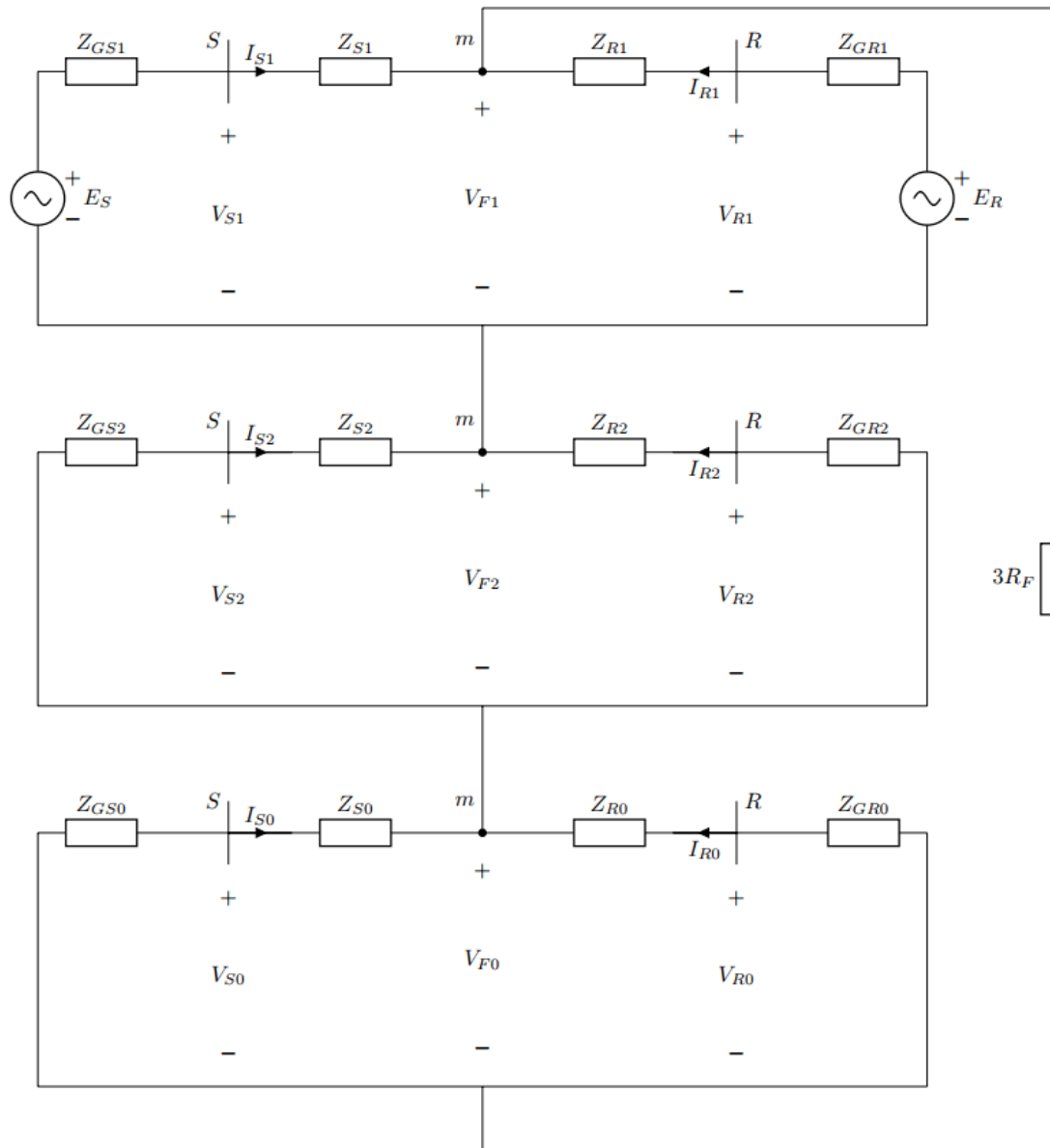


Σχήμα 4.1: Γραμμή μεταφοράς κατά το σφάλμα στη θέση  $m$  - μοντέλο μικρού μήκους

όπου,  $Z_{GS}$  και  $Z_{GR}$  είναι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου ΣΗΕ στην πλευρά  $S$  και  $R$  αντίστοιχα. Επίσης,  $Z_S = mZ$  και  $Z_R = (1 - m)Z$  είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς αριστερά και δεξιά της θέσης του σφάλματος αντίστοιχα.

Στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης από την θέση του ηλεκτρονόμου, που βρίσκεται στο ένα άκρο της γραμμής, μέχρι την θέση του βραχυκυκλώματος. Η ανάλυσή μας γίνεται αρχικά για την περίπτωση σφάλματος LG και στην συνέχεια γενικεύεται για κάθε τύπο σφάλματος.

Τα παρακάτω κυκλώματα ακολουθίας ακολουθούν τον συμβολισμό του Σχήματος 4.1 και όμοιες σχέσεις μεταξύ  $Z_S$  και  $Z_R$ .



**Σχήμα 4.2:** Μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους

όπου,  $Z_{Sn} = mZ_n$  και  $Z_{Rn} = (1 - m)Z_n$ , με  $n = 0, 1, 2$

Με βάση το Σχήμα 4.2 προκύπτει ότι:

$$V_{F1} = V_{S1} - mZ_1 I_{S1} \quad (4.1)$$

$$V_{F2} = V_{S2} - mZ_2 I_{S2} \quad (4.2)$$

$$V_{F0} = V_{S0} - mZ_0 I_{S0} \quad (4.3)$$

Όμως, υποθέτοντας ότι  $Z_1 = Z_2$  και από τις μετατροπές ακολουθιακών σε φασικών μεγεθών, όπως τις παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 2, γνωρίζουμε ότι:

$$V_F = V_{F1} + V_{F2} + V_{F0} \Rightarrow$$

$$V_F = V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} - mZ_1(I_{S1} + I_{S2}) - mZ_0I_{S0} \Rightarrow$$

$$V_F = V_{Sa} - mZ_1(I_{S1} + I_{S2}) - mZ_0I_{S0}$$

Στην συνέχεια, δεδομένου ότι εξετάζουμε την περίπτωση LG με σφάλμα φάσης A και γης, για να εμφανίσουμε το ρεύμα της φάσης A  $I_{Sa}$ , προσθέτουμε και αφαιρούμε τον όρο  $mZ_1I_{S0}$ . Επίσης αντικαθιστούμε την  $V_F = R_F I_F$ . Προκύπτει ότι:

$$R_F I_F = V_{Sa} - mZ_1(I_{S1} + I_{S2} + I_{S0}) - mZ_0I_{S0} + mZ_1I_{S0} \Rightarrow$$

$$V_{Sa} = mZ_1I_{Sa} + mI_{S0}(Z_0 - Z_1) + R_F I_F \Rightarrow$$

$$V_{Sa} = mZ_1(I_{Sa} + kI_{S0}) + R_F I_F \quad (4.4)$$

$$\text{όπου } k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}$$

Συνεπώς, από την σχέση (4.4), η σύνθετη αντίσταση που μετράει ο ηλεκτρονόμος, ο οποίος βρίσκεται στον ζυγό S, κατά την διάρκεια ενός σφάλματος LG με αντίσταση  $R_F$  στην φάση A είναι:

$$Z_{relay} = \frac{V_{Sa}}{I_{Sa} + kI_{S0}} = mZ_1 + R_F \left( \frac{I_F}{I_{Sa} + kI_{S0}} \right) \text{ (σε } \Omega) \quad (4.5)$$

Η γενική μορφή της σχέσης (4.5) είναι:

$$Z_{relay} = \frac{V_S}{I_S} = mZ_1 + R_F \left( \frac{I_F}{I_S} \right) \text{ (σε } \Omega) \quad (4.6)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (4.6) μπορούμε να υπολογίσουμε την σύνθετη αντίσταση για κάθε τύπο σφάλματος, αντικαθιστώντας κατάλληλα τα  $V_S$  και  $I_S$ , σύμφωνα με τον πίνακα:

| FAULT TYPE          | $V_S$             | $I_S$              |
|---------------------|-------------------|--------------------|
| <b>AG</b>           | $V_{Sa}$          | $I_{Sa} - kI_{S0}$ |
| <b>BG</b>           | $V_{Sb}$          | $I_{Sb} - kI_{S0}$ |
| <b>CG</b>           | $V_{Sc}$          | $I_{Sc} - kI_{S0}$ |
| <b>AB, ABG, ABC</b> | $V_{Sa} - V_{Sb}$ | $I_{Sa} - I_{Sb}$  |
| <b>BC, BCG, ABC</b> | $V_{Sb} - V_{Sc}$ | $I_{Sb} - I_{Sc}$  |
| <b>CA, CAG, ABC</b> | $V_{Sc} - V_{Sa}$ | $I_{Sc} - I_{Sa}$  |

**Πίνακας 4.1:** Ορισμός των  $V_S$  και  $I_S$  για διαφορετικά είδη σφαλμάτων

Δυστυχώς, επειδή έχουμε μετρήσεις μόνο από την μία πλευρά της γραμμής, για την εύρεση της αντίστασης σφάλματος έχουμε δύο εξισώσεις, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της (4.6) και τέσσερεις αγνώστους. Αυτοί είναι το σημείο m, η αντίσταση σφάλματος  $R_F$ , το πλάτος και η γωνία του ρεύματος  $I_F$ . Άρα η επίλυση του συστήματος είναι αδύνατη.

Με χρήση ορισμένων εύλογων, από ηλεκτρολογικής πλευράς παραδοχών, αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για την απλοποίηση και τελικά επίλυση αυτού του προβλήματος. Οι κυριότερες εκ των οποίων είναι:

- Simple Reactance Method – Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης [1], [4], [5]
- Tagaki Method – Μέθοδος Tagaki [1], [4], [5]
  - TAK – Original Tagaki Method – Μέθοδος του Tagaki
  - TAK0 – Tagaki Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας

- TAK2 – Tagaki Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας
- Modified Tagaki Method – Τροποποιημένη Μέθοδος Tagaki [1], [4], [5]
  - MTAK0 – Modified Tagaki Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας
  - MTAK2 – Modified Tagaki Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας
- WIS – Wiszniewski Method – Μέθοδος του Wiszniewski [1], [5]
- ERI – Eriksson Method – Μέθοδος του Eriksson [1], [4], [5]
- XU – Xu Method – Μέθοδος του Xu [5]

### 4.3 Simple Reactance Method – Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης

Ο αλγόριθμος της απλής επαγωγικής αντίδρασης [1], [4], [5] εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η αντίσταση σφάλματος  $R_F$  είναι κυρίως ωμική και ότι η αντίσταση της γραμμής είναι προσεγγιστικά καθαρά επαγωγική. Υποθέτει ότι το ρεύμα σφάλματος που προέρχεται από την πλευρά μέτρησης είναι συμφασικό με το συνολικό ρεύμα σφάλματος, οπότε προκύπτει ότι ο όρος της σχέσης (4.6)  $R_F \left( \frac{I_F}{I_S} \right)$  είναι καθαρά ωμικός. Άρα, αναλύοντας τη σχέση (4.6) σε πραγματική και φανταστική συνιστώσα, ο όρος που εμπεριέχει την  $R_F$  και το  $I_F$  είναι πραγματικός. Έτσι, από το φανταστικό μέρος της (4.6) έχουμε τη θέση του σφάλματος αγνοώντας την αντίσταση αυτού ως εξής:

$$\text{Im} \left( \frac{V_S}{I_S} \right) = \text{Im}(mZ_1) \Rightarrow m = \frac{\text{Im} \left( \frac{V_S}{I_S} \right)}{\text{Im}(Z_1)} \quad (4.7)$$

όπου,  $Z_1$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς με βάση το μοντέλο μικρού μήκους (σε  $\Omega$ ) και οι ορισμοί των  $V_S$  και  $I_S$  δίνονται από τον Πίνακα 4.1.

Ο παραπάνω αλγόριθμος λειτουργεί ικανοποιητικά για γραμμές με μία πηγή μόνο στην πλευρά των μετρήσεων και στην περίπτωση των δύο πηγών εάν τα  $I_S$  και  $I_F$  είναι συμφασικά. Στην περίπτωση που το δίκτυο δεν είναι ομοιογενές (homogeneous), δηλαδή  $Z_{GS} \neq Z_{GR}$ , ή για λόγους ασυμμετρίας του φορτίου τα  $I_S$  και  $I_F$  δεν είναι συμφασικά, τότε ο όρος  $R_F \left( \frac{I_F}{I_S} \right)$  θα έχει φανταστικό μέρος, το οποίο αν δεν προσμετρηθεί στον υπολογισμό του  $m$ , θα εισάγει σφάλμα. Έτσι, ανάλογα με την περίπτωση, αν το  $I_F$  προπορεύεται από το  $I_S$ , η επαγωγική αντίδραση του σφάλματος και η θέση αυτού υπερεκτιμώνται. Αντίστοιχα αν το  $I_F$  έπεται από το  $I_S$ , η επαγωγική αντίδραση του σφάλματος και η θέση αυτού υποεκτιμώνται.

Για τη βελτίωση της απόδοσης του παραπάνω αλγορίθμου εφαρμόζουμε την μέθοδο του Takagi που θα εξετάσουμε στην συνέχεια.

### 4.4 Takagi Methods – Μέθοδοι Takagi

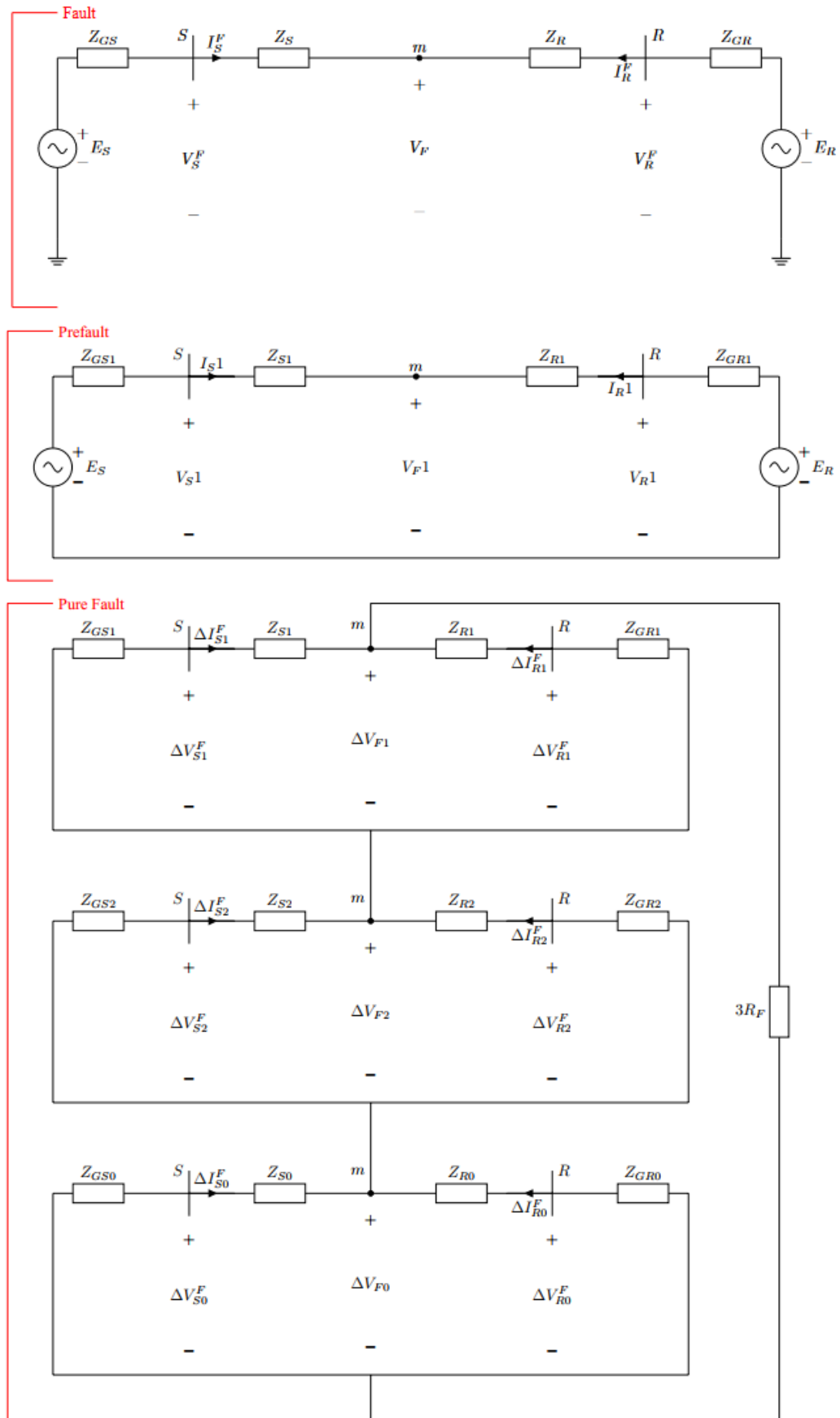
Σε αυτό το σημείο γίνεται ανάλυση των μεθόδων Takagi [1], [4], [5], αρχικά παρουσιάζεται η “βασική” μέθοδος TAK και στην συνέχεια αναλύονται δύο βελτιστοποιήσεις αυτής, οι TAK0 και TAK2. Σκοπός αυτών των μεθόδων είναι να ελαχιστοποιήσουν ακόμα περισσότερο την επίδραση της αντίστασης σφάλματος  $R_F$ .

#### 4.4.1 TAK – Original Takagi Method

Η μέθοδος Takagi [1], [4], [5] χρησιμοποιεί την αρχή της επαλληλίας και ορίζει ότι το ρεύμα κατά το σφάλμα  $I_S^F$  (Fault) απαρτίζεται αθροιστικά από το ρεύμα πριν το σφάλμα  $I_S$  (Prefault) και από το “καθαρό” ρεύμα σφάλματος  $\Delta I_S$  (Pure Fault), δηλαδή ότι:  $I_S^F = \Delta I_S + I_S$ .

Η συγκεκριμένη η ιδέα αναπαρίσταται κυκλωματικά στο παρακάτω Σχήμα 4.3. Σε αυτό παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα του συστήματος κατά το σφάλμα, πριν το σφάλμα

και του “καθαρού” σφάλματος. Τα δύο τελευταία κυκλώματα αθροιστικά μας δίνουν το πρώτο κύκλωμα.



Σχήμα 4.3: Αρχή Επαλληλίας της Μεθόδου Takagi για μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG



Στην περίπτωση του σφάλματος LG, για το “καθαρό” ρεύμα σφάλματος  $\Delta I_S$ , με βάση το Σχήμα 4.3 ισχύουν τα εξής :

$$\Delta I_S = \Delta I_{S0}^F + \Delta I_{S1}^F + \Delta I_{S2}^F \quad (4.8)$$

όπου  $\Delta I_{S0}^F$ ,  $\Delta I_{S1}^F$ ,  $\Delta I_{S2}^F$  είναι τα “καθαρά” ρεύματα σφάλματος της μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα, στον ζυγό S, εκεί που βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος.

Αν υποθέσουμε ότι πριν από την εμφάνιση του σφάλματος το δίκτυο είναι συμμετρικό, τότε δεν υπάρχει ρεύμα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας πριν το σφάλμα. Επομένως η σχέση (4.8) μετασχηματίζεται σε:

$$\Delta I_S = I_{S0}^F + (I_{S1}^F - I_{S1}) + I_{S2}^F \Rightarrow \Delta I_S = I_{Sa}^F - I_{Sa} \quad (4.9)$$

Πολλαπλασιάζοντας με  $\Delta I_S$  και τα δύο μέλη της σχέσης (4.6) έχουμε:

$$\Delta I_S \frac{V_S}{I_S} = \Delta I_S m Z_1 + \Delta I_S R_f \left( \frac{I_F}{I_S} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta I_S V_S = \Delta I_S m Z_1 I_S + \Delta I_S R_f I_F \quad (4.10)$$

Επειδή το “καθαρό” ρεύμα σφάλματος  $\Delta I_S$  υφίσταται μόνο κατά την διάρκεια διαταραχών, υποθέτουμε ότι είναι συμφασικό με το ρεύμα σφάλματος  $I_F$ . Έτσι η (4.10) γίνεται:

$$\Delta I_S V_S = \Delta I_S m Z_1 I_S + |\Delta I_S| R_f |I_F| \quad (4.11)$$

Στη συνέχεια, ακολουθώντας τη λογική της Simple Reactance Method, αναλύοντας τη σχέση σε πραγματική και φανταστική συνιστώσα έχουμε την θέση του σφάλματος αγνοώντας την αντίσταση αυτού, ως εξής:

$$Im(\Delta I_S V_S) = Im(\Delta I_S m Z_1 I_S + |\Delta I_S| R_f |I_F|) \Rightarrow$$

$$Im(\Delta I_S V_S) = Im(\Delta I_S m Z_1 I_S) \Rightarrow$$

$$m = \frac{Im(\Delta I_S V_S)}{Im(\Delta I_S Z_1 I_S)} \quad (4.12)$$

όπου,  $Z_1$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς με βάση το μοντέλο μικρού μήκους (σε  $\Omega$ ), το  $V_S$  και  $I_S$  ορίζονται από τον Πίνακα 4.1 και το  $\Delta I_S$  ορίζεται με βάση τον Πίνακα 4.2 ως εξής:

| FAULT TYPE   | $\Delta I_S$                                |
|--------------|---------------------------------------------|
| AG           | $I_{Sa}^F - I_{Sa}$                         |
| BG           | $I_{Sb}^F - I_{Sb}$                         |
| CG           | $I_{Sc}^F - I_{Sc}$                         |
| AB, ABG, ABC | $(I_{Sa}^F - I_{Sa}) - (I_{Sb}^F - I_{Sb})$ |
| BC, BCG, ABC | $(I_{Sb}^F - I_{Sb}) - (I_{Sc}^F - I_{Sc})$ |
| CA, CAG, ABC | $(I_{Sc}^F - I_{Sc}) - (I_{Sa}^F - I_{Sa})$ |

**Πίνακας 4.2:** Ορισμός του  $\Delta I_S$  για διαφορετικά είδη σφαλμάτων - Μέθοδος TAK

Η μέθοδος Takagi, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος m χρησιμοποιεί το ρεύμα πριν το βραχυκύκλωμα ως επιπλέον πληροφορία, βελτιώνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου απλής επαγωγικής αντίδρασης. Εάν όμως η

πληροφορία αυτή δεν είναι εύκολα προσβάσιμη είτε γιατί έχει χαθεί από τα μετρητικά όργανα είτε γιατί υπάρχει καθυστέρηση στην απόκριση των DFR (digital fault recorders), τότε η TAK δεν λειτουργεί ορθά.

Οι μέθοδοι TAK0 και TAK2, κάνουν τις ίδιες υποθέσεις με την TAK, αλλά προσφέρουν λύση σε αυτό το πρόβλημα καθώς χρησιμοποιούν μόνο τα μεγέθη του σφάλματος.

#### 4.4.2 TAK0 – Takagi Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας

Η TAK0 [1], [4], [5] ακολουθεί τις αρχές της μεθόδου Takagi με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας αντί για το “καθαρό” ρεύμα σφάλματος, ώστε να βελτιώσει την απόδοση του αλγορίθμου. Αυτή η τροποποίηση είναι δυνατή και επιθυμητή καθώς στην περίπτωση των σφαλμάτων ως προς γη (LG, LLG) το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας είναι πολύ κοντά στο “καθαρό” ρεύμα σφάλματος. Η μέθοδος TAK0 δεν είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση σφάλματος χωρίς γη (LL, LLL), διότι σε αυτές τις περιπτώσεις τα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας είναι μηδενικά. Άρα, απαιτείται πριν την εφαρμογή της η αναγνώριση από τον ηλεκτρονόμο του τύπου του σφάλματος. Η μέθοδος TAK0 υπολογίζει θέση του σφάλματος  $m$  ως εξής:

$$m = \frac{Im(3\overline{I_{S0}}V_S)}{Im(3I_{S0}Z_1I_S)} \quad (4.13)$$

όπου,  $Z_1$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς με βάση το μοντέλο μικρού μήκους (σε  $\Omega$ ), το  $V_S$  και  $I_S$  ορίζονται από τον Πίνακα 4.1

#### 4.4.3 TAK2 – Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας

Η TAK2 [1], [4], [5] είναι η ίδια με την TAK0 αλλά κάνει χρήση του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας για τα μη συμμετρικά σφάλματα (LG, LL, LLG). Αυτό είναι εφικτό καθώς η αρνητική ακολουθία είναι παρούσα στα σφάλματα αυτά και επιθυμητό καθώς συνήθως το κύκλωμα της αρνητικής ακολουθίας είναι πιο ομοιογενές και συμμετρικότερο από το κύκλωμα της μηδενικής (π.χ. ο τρόπος σύνδεσης των μετασχηματισμών μπορεί να κάνει το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας μη ομοιογενές). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση της μεθόδου Takagi να είναι σημαντικά βελτιωμένη για κάθε τύπο σφάλματος, στο οποίο η TAK2 είναι εφαρμόσιμη. Στην περίπτωση του σφάλματος LLL η TAK2 δεν μπορεί να εφαρμοστεί, καθώς σε αυτήν τα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας είναι μηδενικά. Η μέθοδος TAK2 υπολογίζει θέση του σφάλματος  $m$  ως εξής:

$$m = \frac{Im(\overline{I_{nseq}}V_S)}{Im(\overline{I_{nseq}}Z_1I_S)} \quad (4.14)$$

όπου,  $Z_1$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς με βάση το μοντέλο μικρού μήκους (σε  $\Omega$ ), το  $V_S$  και  $I_S$  ορίζονται από τον Πίνακα 4.1. Το ρεύμα  $I_{nseq}$  δίνεται από τον Πίνακα 4.3 ως εξής:

| FAULT TYPE | $I_{nseq}$ |
|------------|------------|
| LG         | $I_{S2}$   |
| LL, LLG    | $jI_{S2}$  |

Πίνακας 4.3: Ορισμός του  $I_{nseq}$  για διαφορετικά είδη σφαλμάτων

## 4.5 Modified Takagi Method – Τροποποιημένη Μέθοδος Takagi

Για την αντιμετώπιση της επίδρασης της αντίστασης σφάλματος, οι TAK, TAK0 και TAK2 υποθέτουν ότι το σύστημα είναι ομοιογενές και συμμετρικό. Αυτό είναι μια πολύ καλή προσέγγιση στην περίπτωση που το ισοδύναμο ΣΗΕ στα άκρα της γραμμής έχει ίδιο επίπεδο τάσης  $E_G$  και  $E_S$  και σχεδόν ίδιες ισοδύναμες αντιστάσεις  $Z_{GS}$  και  $Z_{GR}$ . Όμως, υπάρχει περίπτωση η γραμμή να βρίσκεται κοντά σε εξοπλισμό με διαφορετικές ισοδύναμες αντιστάσεις, όπως για παράδειγμα μετασχηματιστές ή γεννήτριες, οπότε το σύστημα αποκτά ετερογενή χαρακτηριστικά. Ακόμα, υπάρχει η πιθανότητα ασυμμετρίας στα φορτία της γραμμής. Αποτέλεσμα αυτών είναι η επίδραση της  $R_F$  είναι πολύ πιο έντονη και να μην μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως από τις παραπάνω μεθόδους.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, έχει προταθεί η Modified Takagi Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας [1], [4], [5].

### 4.5.1 MTAK0–Modified Takagi Method Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας

Η εν λόγω μέθοδος αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου TAK0 και μπορεί να δώσει βελτιωμένα αποτελέσματα και στην περίπτωση του μη ομοιογενούς συστήματος και ασυμμετριών που προκαλούνται από τα φορτία. Η MTAK0 εισάγει έναν παράγοντα διόρθωσης της ετερογένειας του συστήματος ως εξής:

$$d_0 \angle \beta_0 = \frac{I_{F0}}{I_{S0}} = \frac{(Z_{GS0} + Z_0 + Z_{GR0})}{(1 - m)Z_0 + Z_{GR0}} \quad (4.15)$$

όπου  $d_0 \angle \beta_0$  είναι ο διορθωτικός παράγοντας και  $\beta_0$  η γωνίας διόρθωσης. Η  $\beta_0$  είναι 0 στην περίπτωση ομοιογενούς και συμμετρικού συστήματος. Για τον υπολογισμό του  $d_0 \angle \beta_0$ , πρέπει να είναι γνωστή η θέση του σφάλματος  $m$ . Για να αποφύγουμε την χρήση επαναληπτικών αλγορίθμων, προτείνεται στην βιβλιογραφία [4], πρώτα να υπολογίζεται το  $m$  από την σχέση (4.13) και στη συνέχεια να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $d_0 \angle \beta_0$  στην (4.15). Έπειτα, χρησιμοποιώντας την γωνία διόρθωσης  $\beta_0$  βρίσκουμε τη διορθωμένη θέση του σφάλματος ως εξής:

$$m = \frac{Im(3\overline{I_{S0}}V_S e^{-j\beta_0})}{Im(3\overline{I_{S0}}Z_1 I_S e^{-j\beta_0})} \quad (4.16)$$

### 4.5.2 MTAK2– Modified Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας

Μία άλλη τροποποίηση της μεθόδου Takagi είναι η Modified Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας [1], [4], [5]. Η MTAK2 ακολουθεί την λογική της MTAK0 αλλά στον διορθωτικό παράγοντα χρησιμοποιεί μεγέθη αρνητικής ακολουθίας. Έτσι, έχει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι όλων των άλλων μεθόδων στην περίπτωση μη συμμετρικού (LG, LL, LLG) σφάλματος. Ο διορθωτικός παράγοντας σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$d_2 \angle \beta_2 = \frac{I_{F2}}{I_{S2}} = \frac{(Z_{GS2} + Z_2 + Z_{GR2})}{(1 - m)Z_2 + Z_{GR2}} \quad (4.17)$$

όπου,  $d_2 \angle \beta_2$  είναι ο διορθωτικός παράγοντας και  $\beta_2$  η γωνίας διόρθωσης. Το  $m$  υπολογίζεται αρχικά από τη σχέση (4.14) και έπειτα εισέρχεται στην (4.17). Στη συνέχεια με χρήση της γωνίας διόρθωσης  $\beta_2$  βρίσκουμε την διορθωμένη θέση του σφάλματος ως εξής:

$$m = \frac{Im(\overline{I_{nseq}}V_S e^{-j\beta_2})}{Im(\overline{I_{nseq}}Z_1 I_S e^{-j\beta_2})} \quad (4.18)$$

Το ρεύμα  $I_{nseq}$  δίνεται από τον Πίνακα 4.3.

## 4.6 WIS – Wiszniewski Method – Μέθοδος του Wiszniewski

Η μέθοδος του Winzniewski [1], [5] είναι συνδυασμός των μεθόδων Takagi και της Simple Reactance. Έχει τις ίδιες υποθέσεις με την TAK και χρησιμοποιεί το ισοδύναμο κύκλωμα του “καθαρού” ρεύματος σφάλματος, αλλά δεν χρησιμοποιεί άμεσα τη γνώση των ισοδυνάμων αντιστάσεων του ΣΗΕ, οπότε μπορεί να φανεί χρήσιμη όταν αυτές δεν μπορούν να υπολογιστούν με καλή ακρίβεια.

Θυμίζουμε ότι για τον Takagi  $V_S = V_{S1}$  και  $I_S = I_{S1}$  η τάση και το ρεύμα του ζυγού S πριν το σφάλμα αντίστοιχα.

Από το Σχήμα 4.3 με εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff καταλήγουμε στα εξής:

$$V_S - mZ_1 I_S - R_f I_F = 0 \quad (4.19)$$

$$I_F = \Delta I_S \frac{Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1}{(1-m)Z_1 + Z_{GR1}} \quad (4.20)$$

Συνδυάζοντας τις (4.19) και (4.20) έχουμε:

$$\begin{aligned} V_S - mZ_1 I_S - \Delta I_S R_f \frac{Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1}{(1-m)Z_1 + Z_{GR1}} &= 0 \Rightarrow \\ \frac{V_S}{I_S} - mZ_1 - \frac{\Delta I_S}{I_S} R_f \frac{Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1}{(1-m)Z_1 + Z_{GR1}} &= 0 \Rightarrow \\ Z_{relay} - mZ_1 - \frac{\Delta I_S}{I_S} R_f \frac{Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1}{(1-m)Z_1 + Z_{GR1}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Χωρίζοντας την (4.21) σε πραγματικό και φανταστικό μέρος προκύπτει ότι:

$$R_{relay} - mR_1 - \frac{R_f}{d_1} a = 0 \quad (4.22)$$

$$X_{relay} - mX_1 - \frac{R_f}{d_1} b = 0 \quad (4.23)$$

όπου,  $d_1 \angle \beta_1 = \frac{(1-m)Z_1 + Z_{GR1}}{Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1}$ ,  $a = \text{Re}\left(\frac{\Delta I_S}{I_S e^{\beta_1}}\right)$  και  $b = \text{Im}\left(\frac{\Delta I_S}{I_S e^{\beta_1}}\right)$

Λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων (4.22) και (4.23), ως προς τον άγνωστο m, και με κατάλληλη μορφοποίηση της λύσης, προκύπτει ότι:

$$m = \frac{X_{relay}}{X_1} - \frac{\frac{R_{relay}}{X_1} \tan(\varphi_1) - \frac{X_{relay}}{X_1}}{\frac{a}{b} \tan(\varphi_1) - 1} \quad (4.24)$$

όπου  $\varphi_1$  είναι η γωνία της σύνθετης αντίστασης θετικής ακολουθίας της γραμμής.

Η μέθοδος του Wiszniewski παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα αν χρησιμοποιήσουμε μόνο μεγέθη του σφάλματος. Τότε το  $\Delta I_S$  μπορεί να αντικατασταθεί κατάλληλα ως εξής:

| FAULT TYPE | $\Delta I_S$ |
|------------|--------------|
| LG         | $I_{S2}$     |
| LL, LLG    | $jI_{S2}$    |
| LLL        | $jI_{S1}$    |

**Πίνακας 4.4:** Αντικατάσταση του  $\Delta I_S$  για διάφορα είδη σφαλμάτων Wiszniewski

## 4.7 ERI – Eriksson Method – Μέθοδος του Eriksson

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους η μέθοδος του Eriksson [1], [4], [5] θεωρεί την αντίσταση σφάλματος  $R_f$  ως άγνωστη μεταβλητή, δεν προσπαθεί να την εξαλείψει αλλά την υπολογίζει. Πολλαπλασιάζοντας την σχέση (4.21) με  $(1 - m)Z_1 + Z_{GR1}$  έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} ((1 - m)Z_1 + Z_{GR1})Z_{relay} - ((1 - m)Z_1 + Z_{GR1})mZ_1 - \frac{\Delta I_S}{I_S} R_f (Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1) &= 0 \Rightarrow \\ m^2 Z_1^2 - mZ_1(Z_{GR1} + Z_1 + Z_{relay}) + Z_{relay}(Z_{GR1} + Z_1) - \frac{\Delta I_S}{I_S} R_f (Z_{GS1} + Z_{GR1} + Z_1) &= 0 \Rightarrow \\ m^2 - m \left( \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + \frac{Z_{relay}}{Z_1} + 1 \right) + \frac{Z_{relay}}{Z_1} \left( \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + 1 \right) - \frac{\Delta I_S}{Z_1 I_S} R_f \left( \frac{Z_{GS1}}{Z_1} + \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + 1 \right) &= 0 \Rightarrow \\ m^2 - k_1 m + k_2 - k_3 R_f &= 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

όπου τα  $k_1, k_2, k_3$  είναι μιγαδικοί αριθμοί που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} k_1 &= a + jb = 1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + \frac{V_S}{Z_1 I_S} \\ k_2 &= c + jd = \left( 1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1} \right) \frac{V_S}{Z_1 I_S} \\ k_3 &= e + jf = \left( 1 + \frac{Z_{GR1} + Z_{GS1}}{Z_1} \right) \frac{\Delta I_S}{Z_1 I_S} \end{aligned}$$

Χωρίζοντας την σχέση (4.25) σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, με κατάλληλη επεξεργασία ώστε να εξαλειφθεί η  $R_f$ , και λύνοντας ως προς τον άγνωστο  $m$  προκύπτει ότι:

$$m_{1,2} = \frac{\left( a - \frac{eb}{f} \right) \pm \sqrt{\left( a - \frac{eb}{f} \right)^2 - 4 \left( c - \frac{ed}{f} \right)}}{2} \quad (4.26)$$

Το  $m$  πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0 και 1 οπότε μία από τις δύο λύσεις θα πρέπει να απορριφθεί.

Στη συνέχεια, με την δεκτή λύση της (4.26), επιστρέφουμε στην (4.25) και δουλεύοντας με το πραγματικό μέρος αυτής υπολογίζουμε την αντίσταση σφάλματος, ως εξής:

$$R_f = \frac{m^2 - \text{Re}(k_1)m + \text{Re}(k_2)}{\text{Re}(k_3)} = \frac{m^2 - am + c}{e} \quad (4.27)$$

Η μέθοδος του Eriksson παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα αν χρησιμοποιήσουμε μόνο μεγέθη του σφάλματος. Τότε το  $\Delta I_S$  μπορεί να αντικατασταθεί κατάλληλα ως εξής:

| FAULT TYPE | $\Delta I_S$ |
|------------|--------------|
| LG         | $3I_{S2}$    |
| LL, LLG    | $jI_{S2}$    |
| LLL        | $jI_{S1}$    |

Πίνακας 4.5: Αντικατάσταση του  $\Delta I_S$  για διάφορα είδη σφαλμάτων Eriksson

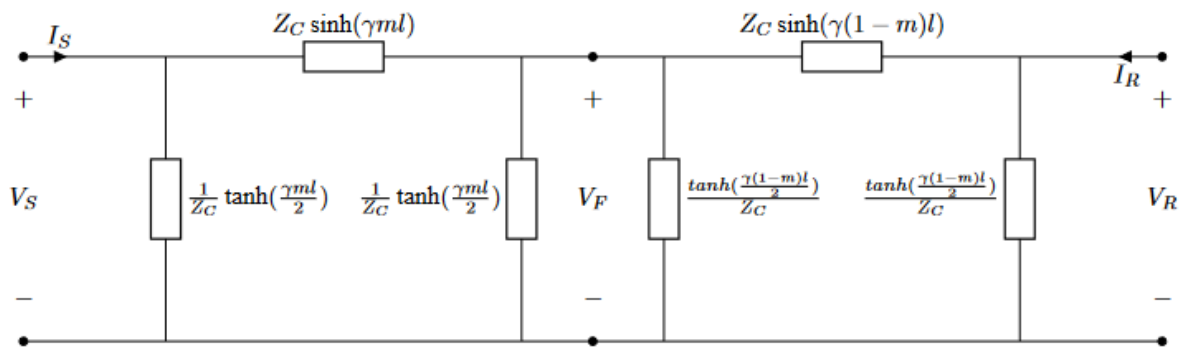
## 4.8 XU – Xu Method – Μέθοδος του Xu

Οι μέθοδοι που αναλύσαμε στις προηγούμενες ενότητες χρησιμοποιούν το μοντέλο γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους αγνοώντας τις εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής. Η μέθοδος του Xu [5], χρησιμοποιεί το μοντέλο γραμμής μεγάλου μήκους και ουσιαστικά αποτελεί εφαρμογή και επέκταση της “Simple Reactance Method”.

Πριν αναφερθούμε λεπτομερώς στην εν λόγω μέθοδο, είναι απαραίτητο να κάνουμε μία ανάλυση της γραμμής μεγάλου μήκους κατά το βραχυκύκλωμα, ώστε να εξαγάγουμε ορισμένες σχέσεις που θα μας φανούν χρήσιμες στην συνέχεια.

### 4.8.1 Ανάλυση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους κατά το σφάλμα

Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα και μεταξύ των ζυγών S και R είναι:



Σχήμα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα γραμμής μεταφοράς - μοντέλο μεγάλου μήκους

Υπενθυμίζουμε ότι τα κάθετα στοιχεία εκφράζουν εγκάρσιες αγωγιμότητες όχι αντιστάσεις.

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων Kirchhoff στο αριστερό μισό κύκλωμα του Σχήματος 4.4 προκύπτει ότι:

$$V_F = V_S - Z_C \sinh(\gamma ml) \left( I_S - \frac{V_S}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma ml}{2}\right) \right) \Rightarrow$$

$$V_F = V_S - Z_C I_S \sinh(\gamma ml) + V_S \sinh(\gamma ml) \tanh\left(\frac{\gamma ml}{2}\right) \Rightarrow$$

$$V_F = V_S \left( 1 + \sinh(\gamma ml) \tanh\left(\frac{\gamma ml}{2}\right) \right) - Z_C I_S \sinh(\gamma ml) \quad (4.28)$$

$$\tanh\left(\frac{x}{2}\right) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x) + 1} \quad (4.29)$$

$$\cosh^2(x) - \sinh^2(x) = 1 \quad (4.30)$$

Από τις σχέσεις (4.29) και (4.30) έχουμε:

$$1 + \sinh(x) \tanh\left(\frac{x}{2}\right) = \frac{\cosh(x) + 1 + \sinh^2(x)}{\cosh(x) + 1} = \frac{\cosh^2(x) + \cosh(x)}{\cosh(x) + 1} \Rightarrow$$

$$1 + \sinh(x) \tanh\left(\frac{x}{2}\right) = \cosh(x) \quad (4.31)$$


---

Εφαρμόζοντας την (4.31) στην (4.28) προκύπτει ότι:

$$V_F = V_S \cosh(\gamma ml) - Z_C I_S \sinh(\gamma ml) \quad (4.32)$$

Η σχέση (4.32) εκφράζει την τάση σφάλματος με βάση τα μεγέθη τάσης και ρεύματος που μετράει ο ηλεκτρονόμος που βρίσκεται στο αριστερό τμήμα της γραμμής, στον ζυγό S.

Ομοίως, για την πλευρά του ζυγού R ισχύει ότι:

$$V_F = V_R \cosh(\gamma(1-m)l) - Z_C I_R \sinh(\gamma(1-m)l) \quad (4.33)$$

#### 4.8.2 XU – Xu Method – Ανάλυση

Εφαρμόζοντας την (4.32) για τα ακολουθιακά κυκλώματα του σχήματος 2.8 της ενότητας 2.2.2, που ανταποκρίνονται στην περίπτωση του LG σφάλματος προκύπτει:

$$V_{F1} = V_{S1} \cosh(\gamma_1 ml) - Z_C I_{S1} \sinh(\gamma_1 ml) \quad (4.34)$$

$$V_{F2} = V_{S2} \cosh(\gamma_2 ml) - Z_C I_{S2} \sinh(\gamma_2 ml) \quad (4.35)$$

$$V_{F0} = V_{S0} \cosh(\gamma_0 ml) - Z_C I_{S0} \sinh(\gamma_0 ml) \quad (4.36)$$

Από τις ισοδυναμίες μετατροπής των ακολουθιακών μεγεθών σε φασικά γνωρίζουμε ότι:

$$V_{FA} = V_{F1} + V_{F2} + V_{F0} = (4.34) + (4.35) + (4.36) \quad (4.37)$$

Θεωρώντας ότι  $Z_1 = Z_2$  η (4.37) γίνεται:

$$V_{FA} = \cosh(\gamma_1 ml) (V_{S1} + V_{S2}) - \sinh(\gamma_1 ml) Z_{C1} (I_{S1} + I_{S2}) + V_{S0} \cosh(\gamma_0 ml) - \sinh(\gamma_0 ml) Z_{C0} I_{S0}$$

Προσθέτοντας και αφαιρώντας τον όρο,  $V_{S0} \cosh(\gamma_1 ml) + I_{S0} Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)$ , η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\begin{aligned} V_{FA} &= \cosh(\gamma_1 ml) (V_{S1} + V_{S2} + V_{S0}) - \sinh(\gamma_1 ml) Z_{C1} (I_{S1} + I_{S2} + I_{S0}) + \\ &+ V_{S0} (\cosh(\gamma_0 ml) - \cosh(\gamma_1 ml)) - I_{S0} (\sinh(\gamma_0 ml) Z_{C0} - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)) \Rightarrow \\ V_{FA} &= \cosh(\gamma_1 ml) V_{SA} - \sinh(\gamma_1 ml) Z_{C1} I_{SA} + \\ &+ V_{S0} (\cosh(\gamma_0 ml) - \cosh(\gamma_1 ml)) - I_{S0} (\sinh(\gamma_0 ml) Z_{C0} - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)) \end{aligned} \quad (4.38)$$

Η σχέση (4.38), γράφεται ως εξής:

$$V_{SA} + k_V V_{S0} = \tanh(\gamma_1 ml) Z_{C1} (I_{SA} + k_I I_{S0}) + \frac{R_f I_F}{\cosh(\gamma_1 ml)} \quad (4.39)$$

όπου, 
$$k_V = \frac{\cosh(\gamma_0 ml) - \cosh(\gamma_1 ml)}{\cosh(\gamma_1 ml)} = \frac{\cosh(\gamma_0 ml)}{\cosh(\gamma_1 ml)} - 1$$

$$k_I = \frac{Z_{C0} \sinh(\gamma_0 ml) - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)}{Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)} = \frac{Z_{C0} \sinh(\gamma_0 ml)}{Z_{C1} \sinh(\gamma_1 ml)} - 1$$

Από την (4.39), προκύπτει η αντίσταση που μετράει ο ηλεκτρονόμος που βρίσκεται στον ζυγό S:

$$Z_{relay} = \frac{V_{SA} + k_V V_{S0}}{I_{SA} + k_I I_{S0}} = \tanh(\gamma_1 ml) Z_{C1} + \frac{R_f I_F}{(I_{SA} + k_I I_{S0}) \cosh(\gamma_1 ml)} \quad (4.40)$$

Ομοίως με την μέθοδο της απλής επαγωγικής αντίδρασης, αγνοώντας τον τελευταίο όρο που εμπεριέχει την  $R_f$ , προκύπτει ότι:

$$Z_{relay} = \frac{V_{SA} + k_V V_{S0}}{I_{SA} + k_I I_{S0}} = \frac{V_L}{I_L} = \tanh(\gamma_1 ml) Z_{C1} \quad (4.41)$$

Ανάλογα με το τύπο του σφάλματος οι  $V_L$  και  $I_L$  ορίζονται σύμφωνα με τον πίνακα:

| FAULT TYPE          | $V_L$                 | $I_L$                 |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>AG</b>           | $V_{SA} + k_V V_{S0}$ | $I_{SA} + k_I I_{S0}$ |
| <b>BG</b>           | $V_{SB} + k_V V_{S0}$ | $I_{SB} + k_I I_{S0}$ |
| <b>CG</b>           | $V_{SC} + k_V V_{S0}$ | $I_{SC} + k_I I_{S0}$ |
| <b>AB, ABG, ABC</b> | $V_{SA} - V_{SB}$     | $I_{SA} - I_{SB}$     |
| <b>BC, BCG, ABC</b> | $V_{SB} - V_{SC}$     | $I_{SB} - I_{SC}$     |
| <b>CA, CAG, ABC</b> | $V_{SC} - V_{SA}$     | $I_{SC} - I_{SA}$     |

**Πίνακας 4.6:** Ορισμός  $V_L$  και  $I_L$  για διαφορετικά είδη σφαλμάτων - Μέθοδος XU

Με γνωστή την  $Z_{relay}$  η θέση του σφάλματος υπολογίζεται ως εξής:

$$m = Re \left( \frac{\tanh^{-1} \left( \frac{Z_{relay}}{Z_{C1}} \right)}{\gamma_1 l} \right) \quad (4.42)$$

Όπως γίνεται φανερό από τη σχέση (4.39), για τον υπολογισμό των  $k_V$  και  $k_I$  απαιτείται γνώση της θέσης του σφάλματος  $m$ . Όμως, αυτή υπολογίζεται στην (4.42) με χρήση της (4.39). Για την υπέρβαση αυτού του προβλήματος και δεδομένου ότι οι όροι  $k_V$  και  $k_I$ , έχουν μικρή μεταβλητότητα για διαφορετικές τιμές του  $m$ , έχει προταθεί το  $m$  στους  $k_V$  και  $k_I$  να τίθεται  $m = 1$  [5]. Παρόλα αυτά, όπως θα αποδείξουμε στην συνέχεια στο πειραματικό μέρος, η μέθοδος του XU παρουσιάζει ακόμα καλύτερη συμπεριφορά αν για τον αρχικό υπολογισμό του  $m$  γίνει χρήση κάποιου εκ των αλγορίθμων TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2.



## 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### ***Two Ended Fault Location Algorithms with Synchronized Measurements-Αλγόριθμοι Εντοπισμού Θέσης Σφάλματος Δύο Άκρων με Συγχρονισμένες Μετρήσεις***

#### 5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με αλγορίθμους “συγχρονισμένων μετρήσεων”. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται μέθοδος που υπάγεται στην κατηγορία “συγχρονισμένων μετρήσεων” απαιτείται η τάση και η ένταση να καταγράφονται και στα δύο άκρα της γραμμής από μετρητές φασιθετών (PMUs) με τον ίδιο ρυθμό δειγματοληψίας και υποτίθεται ότι οι μετρήσεις αυτές συγχρονίζονται με κοινή αναφορά χρησιμοποιώντας το GPS (global positioning system). Επίσης, πρέπει να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των ηλεκτρονόμενων στα δύο άκρα της γραμμής, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται είτε δορυφορικά είτε με οπτική ίνα η οποία βαίνει παράλληλα με τη γραμμή.

#### 5.2 Μέθοδος Συγχρονισμένων Μετρήσεων – Μοντέλο Γραμμής Μικρού Μήκους

Για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συνδυασμός ρευμάτων και τάσης ακολουθίας. Συνήθως επιλέγεται η αρνητική ακολουθία καθώς είναι παρούσα σε όλους του τύπους των ασύμμετρων σφαλμάτων, δεν επηρεάζεται από το ρεύμα του φορτίου, από τις αλληλεπαγωγές μηδενικής ακολουθίας, από συνδεδεμένα φορτία και από την αβεβαιότητα που παρουσιάζει η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας της γραμμής [4].

Από το Σχήμα 4.2 της Ενότητας 4.2, υποθέτοντας ότι  $Z_1 = Z_2$ , με βάση τον νόμο τάσεων Kirchhoff στο δεξί και αριστερό ημικύκλωμα του κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας προκύπτει ότι:

$$V_{F2} = V_{S2} - mZ_1 I_{S2} \quad (5.1)$$

$$V_{F2} = V_{R2} - (1 - m)Z_1 I_{R2} \quad (5.2)$$

Συνδυάζοντας τις (5.1) και (5.2) και λύνοντας ως προς τον άγνωστο  $m$  προκύπτει ότι:

$$m = \frac{V_{S2} - V_{R2} + Z_1 I_{R2}}{(I_{S2} + I_{R2})Z_1} \quad (5.3)$$

Η παραπάνω σχέση είναι εφαρμόσιμη για κάθε τύπο ασύμμετρου σφάλματος. Επειδή στο τριφασικό συμμετρικό σφάλμα δεν υπάρχουν οι συνιστώσες της αρνητικής ακολουθίας, αλλά μόνο αυτές της θετικής, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε αυτές για την συγκεκριμένη περίπτωση σφάλματος.

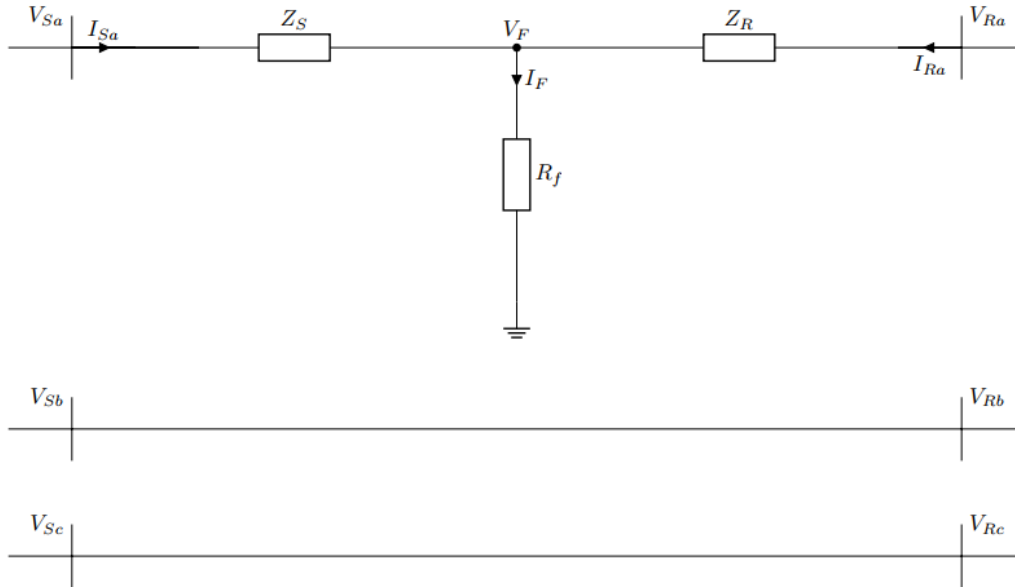
$$m = \frac{V_{S1} - V_{R1} + Z_1 I_{R1}}{(I_{S1} + I_{R1})Z_1} \quad (5.4)$$

Για ακόμα καλύτερη ακρίβεια, προτείνουμε το  $m$  να υπολογιστεί με διαφορετικούς τρόπους και να κρατήσουμε ως τελική λύση τον μέσο όρο αυτών. Ακόμα και αν δεν εφαρμοστεί αυτό, κάθε τρόπος ξεχωριστά παρουσιάζει παραπλήσια και στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδόν ίδια αποτελέσματα.

Με γνωστή την θέση του σφάλματος, τις τάσεις και τα ρεύματα στους ζυγούς R και S, μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση σφάλματος  $V_F$ , το ρεύμα σφάλματος  $I_F$  και την αντίσταση σφάλματος  $R_f$ .

### Σφάλμα LG

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LG μεταξύ της φάσης A και της γης το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.1:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LG - μοντέλο μικρού μήκους*

όπου,  $Z_S = mZ$  και  $Z_R = (1 - m)Z$  (σε  $\Omega$ )

Η τάση σφάλματος  $V_F$ , το ρεύμα σφάλματος  $I_F$  και η αντίσταση σφάλματος  $R_f$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$V_F = V_{Sa} - mZI_{Sa} \quad (5.5)$$

$$I_F = I_{Sa} + I_{Ra} \quad (5.6)$$

$$R_f = \frac{V_F}{I_F} = \frac{V_F}{I_{Sa} + I_{Ra}} \quad (5.7)$$

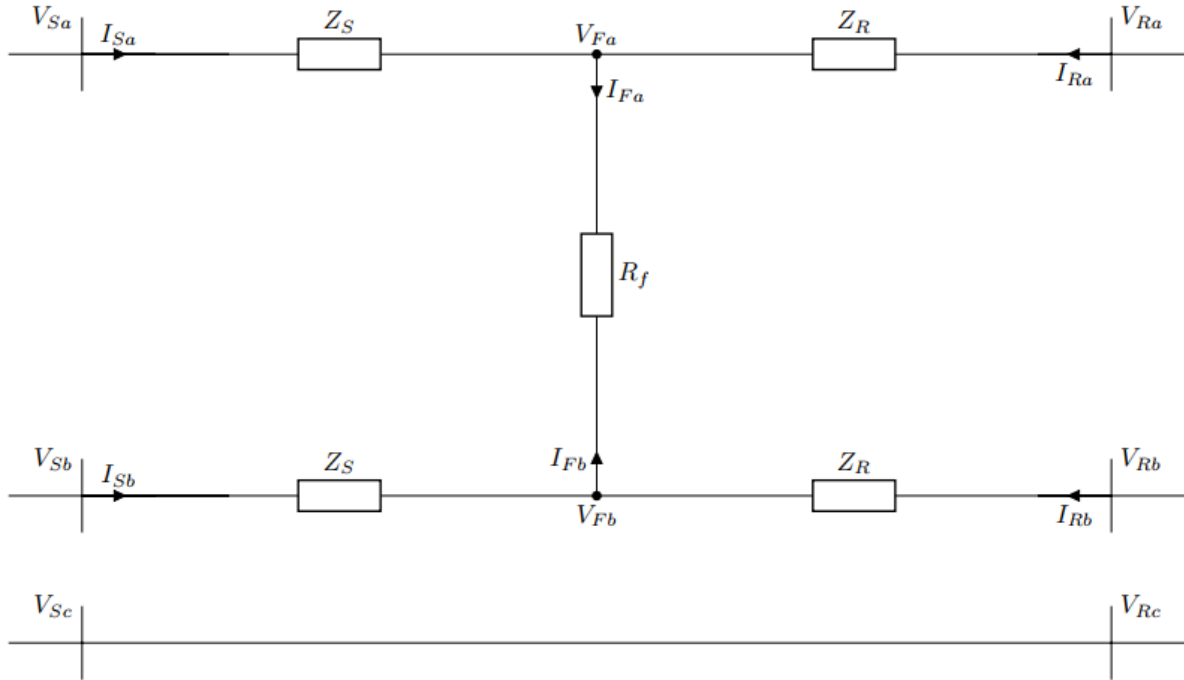
Οι (5.5), (5.6) και (5.7) εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο εάν στο βραχυκύκλωμα δεν συμμετέχει η φάση A αλλά μία εκ των B και C. Συνοπτικά,  $R_f = \frac{V_F}{I_F}$  με:

| FAULT TYPE | $V_F$                     | $I_F$                   |
|------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>A-G</b> | $V_F = V_{Sa} - mZI_{Sa}$ | $I_F = I_{Sa} + I_{Ra}$ |
| <b>B-G</b> | $V_F = V_{Sb} - mZI_{Sb}$ | $I_F = I_{Sb} + I_{Rb}$ |
| <b>C-G</b> | $V_F = V_{Sc} - mZI_{Sc}$ | $I_F = I_{Sc} + I_{Rc}$ |

**Πίνακας 5.1:** *Ορισμός  $V_F$  και  $I_F$  για διαφορετικές περιπτώσεις του LG*

### Σφάλμα LL

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LL μεταξύ των φάσεων A και B το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.2:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LL - μοντέλο μικρού μήκους*

όπου,  $Z_S = mZ$  και  $Z_R = (1 - m)Z$  (σε  $\Omega$ ) και ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{Fa} = V_{Sa} - mZI_{Sa} \quad (5.8)$$

$$V_{Fb} = V_{Sb} - mZI_{Sb} \quad (5.9)$$

$$I_F = I_{Sa} + I_{Ra} = -I_{Sb} - I_{Sb} \quad (5.10)$$

$$R_f = \frac{|V_{Fa} - V_{Fb}|}{|I_F|} \quad (5.11)$$

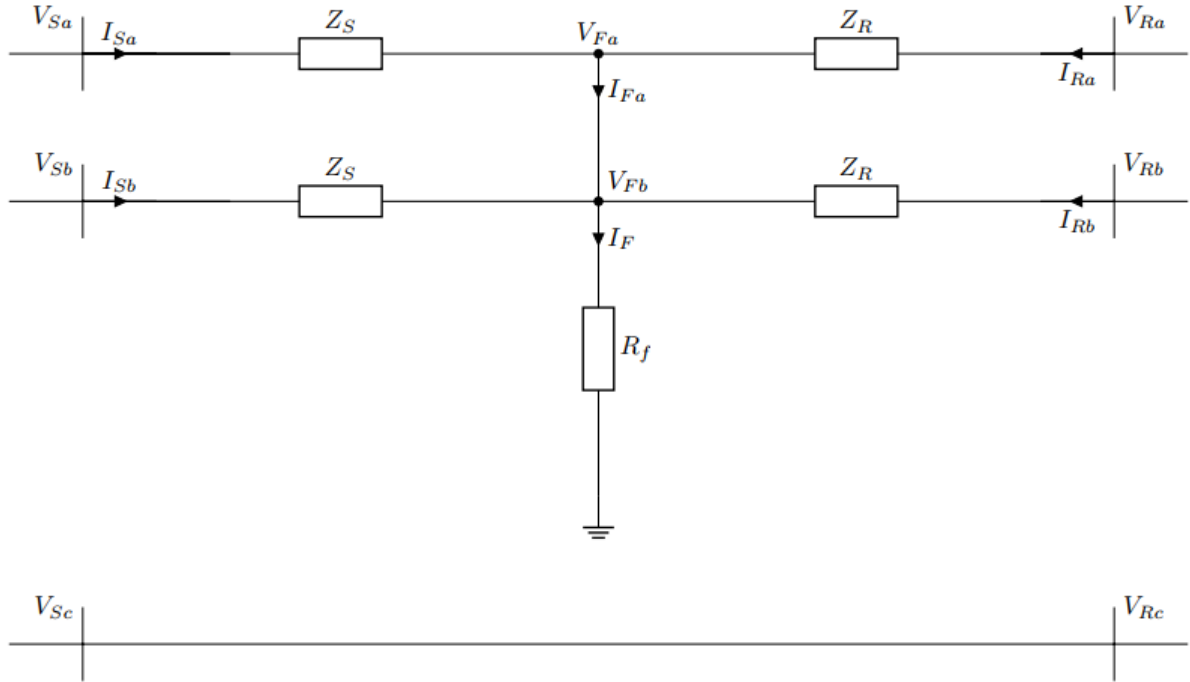
Οι (5.8), (5.9), (5.10) και (5.11) εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο εάν το βραχυκύκλωμα είναι μεταξύ των φάσεων BC ή CA. Συνοπτικά,  $R_f = \frac{|V_F|}{|I_F|}$  με:

| FAULT TYPE | $V_F$             | $I_F$                                |
|------------|-------------------|--------------------------------------|
| AB         | $V_{Fa} - V_{Fb}$ | $I_{Sa} + I_{Ra} = -I_{Sb} - I_{Sb}$ |
| BC         | $V_{Fb} - V_{Fc}$ | $I_{Sb} + I_{Rb} = -I_{Sc} - I_{Sc}$ |
| CA         | $V_{Fc} - V_{Fa}$ | $I_{Sc} + I_{Rc} = -I_{Sa} - I_{Sa}$ |

**Πίνακας 5.2:** *Ορισμός  $V_F$  και  $I_F$  για διαφορετικές περιπτώσεις του LL*

### Σφάλμα LLG

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LLG μεταξύ των φάσεων A, B και της γης το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.3:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLG - μοντέλο μικρού μήκους*

όπου,  $Z_S = mZ$  και  $Z_R = (1 - m)Z$  (σε  $\Omega$ ) και ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_F = \frac{V_{Fa} + V_{Fb}}{2} \quad (5.12)$$

$$I_F = I_{Sa} + I_{Sb} + I_{Ra} + I_{Rb} \quad (5.13)$$

$$R_f = \frac{V_F}{I_F} \quad (5.14)$$

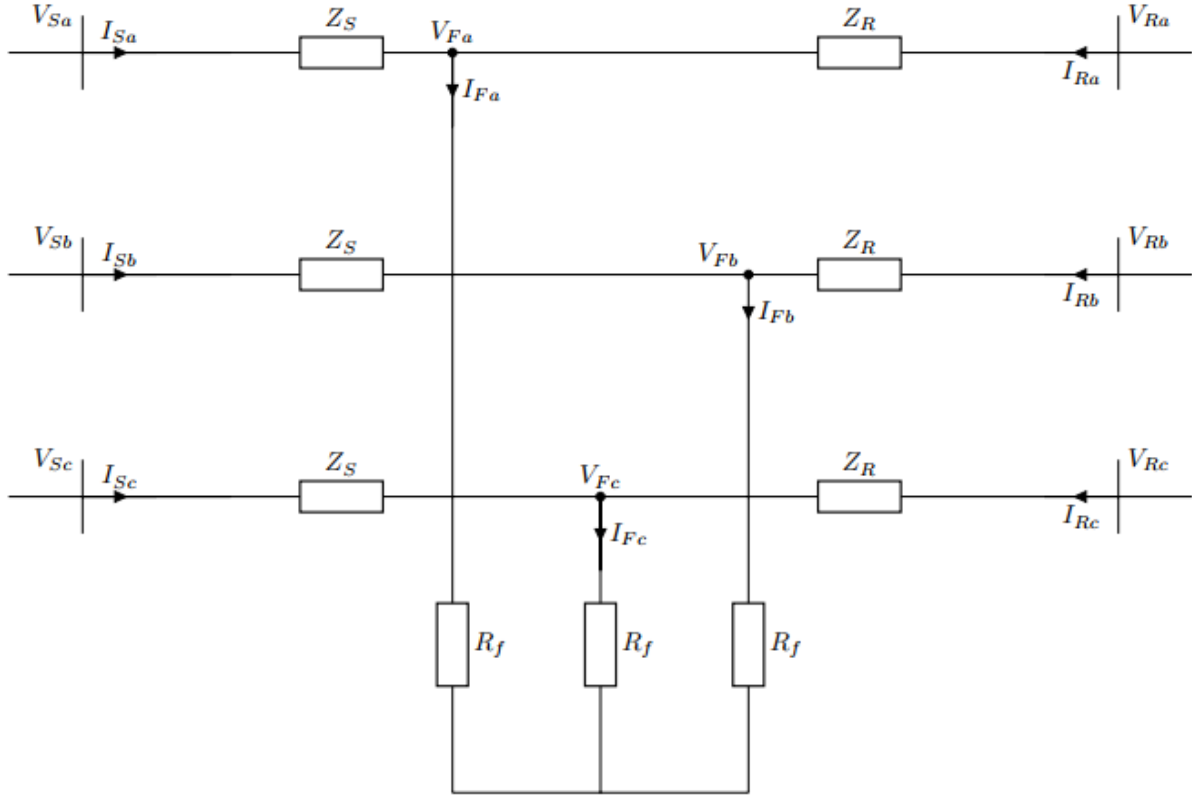
Οι (5.12), (5.13) και (5.14) εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο εάν το βραχυκύκλωμα είναι μεταξύ των φάσεων BC και γης ή CA και γης. Συνοπτικά, ισχύει η σχέση (5.14) με:

| FAULT TYPE  | $V_F$                             | $I_F$                                     |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>AB-G</b> | $V_F = \frac{V_{Fa} + V_{Fb}}{2}$ | $I_F = I_{Sa} + I_{Sb} + I_{Ra} + I_{Rb}$ |
| <b>BC-G</b> | $V_F = \frac{V_{Fb} + V_{Fc}}{2}$ | $I_F = I_{Sb} + I_{Sc} + I_{Rb} + I_{Rc}$ |
| <b>CA-G</b> | $V_F = \frac{V_{Fc} + V_{Fa}}{2}$ | $I_F = I_{Sc} + I_{Sa} + I_{Rc} + I_{Ra}$ |

**Πίνακας 5.3:** *Ορισμός  $V_F$  και  $I_F$  για διαφορετικές περιπτώσεις του LLG*

### Σφάλμα LLL

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LLL μεταξύ των φάσεων A, B και C το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLL - μοντέλο μικρού μήκους

όπου,  $Z_S = mZ$  και  $Z_R = (1 - m)Z$  (σε  $\Omega$ ) και ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{Fa} - V_{\text{κοινού κόμβου}} = R_f(I_{Sa} + I_{Ra}) \quad (5.15)$$

$$V_{Fb} - V_{\text{κοινού κόμβου}} = R_f(I_{Sb} + I_{Rb}) \quad (5.16)$$

$$V_{Fc} - V_{\text{κοινού κόμβου}} = R_f(I_{Sc} + I_{Rc}) \quad (5.17)$$

$$(5.15) - (5.16) = V_{Fa} - V_{Fb} = R_f((I_{Sa} + I_{Ra}) - (I_{Sb} + I_{Rb})) \Rightarrow$$

$$R_f = \frac{V_{Fa} - V_{Fb}}{(I_{Sa} + I_{Ra}) - (I_{Sb} + I_{Rb})} \quad (5.18)$$

Όμοια με την (5.18), με κατάλληλους συνδυασμούς των (5.15), (5.16) και (5.17), προκύπτει ότι:

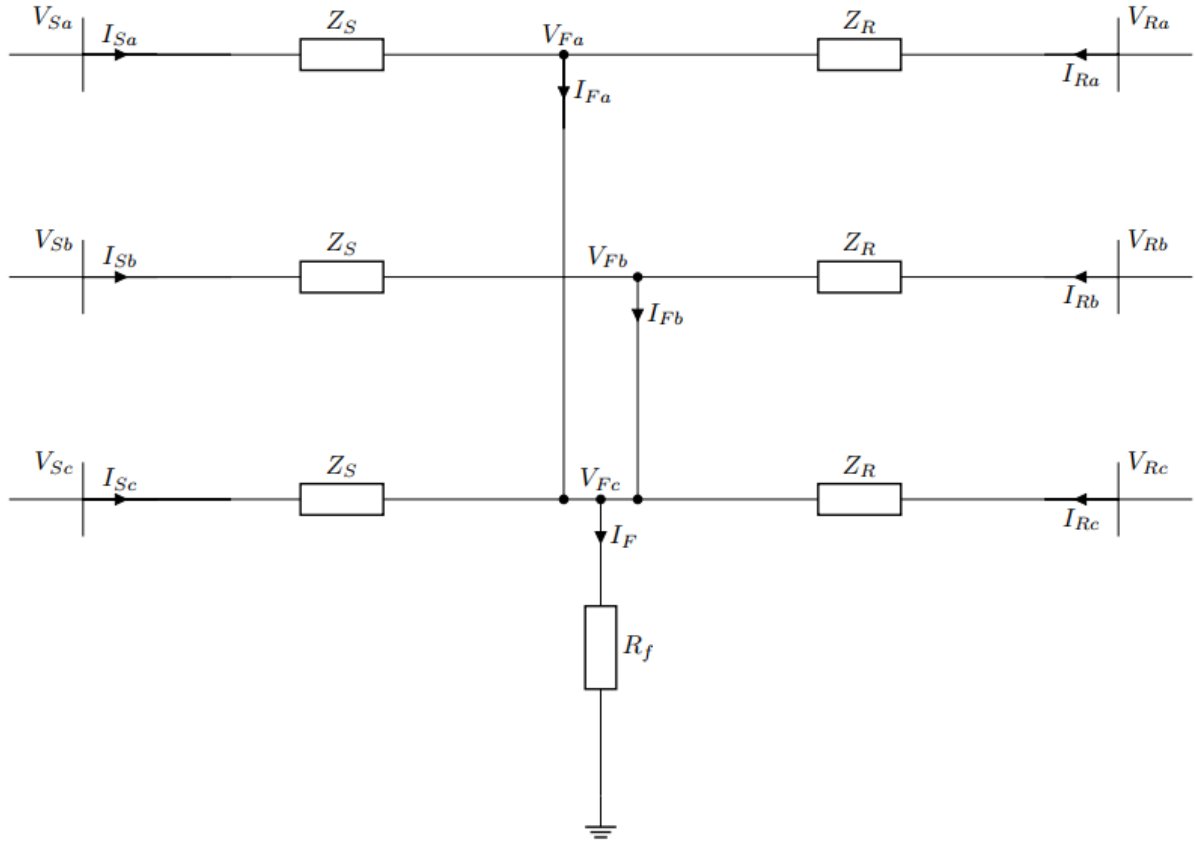
$$R_f = \frac{V_{Fb} - V_{Fc}}{(I_{Sb} + I_{Rb}) - (I_{Sc} + I_{Rc})} \quad (5.19)$$

$$R_f = \frac{V_{Fc} - V_{Fa}}{(I_{Sc} + I_{Rc}) - (I_{Sa} + I_{Ra})} \quad (5.20)$$

Παρότι οι (5.18), (5.19) και (5.20) είναι θεωρητικά ισοδύναμες, για καλύτερη ακρίβεια, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ασυμμετρίας φορτίου, προτείνεται η αντίσταση σφάλματος να αποτελεί τον μέσο όρο των παραπάνω σχέσεων.

### Σφάλμα LLLG

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LLLG μεταξύ των φάσεων A, B, C και γης το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.5:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLLG - μοντέλο μικρού μήκους*

όπου,  $Z_S = mZ$  και  $Z_R = (1 - m)Z$  (σε  $\Omega$ ) και ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_F = \frac{V_{Fa} + V_{Fb} + V_{Fc}}{3} \quad (5.21)$$

$$I_F = I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc} = I_{Sa} + I_{Ra} + I_{Sb} + I_{Rb} + I_{Sc} + I_{Rc} \quad (5.22)$$

$$R_f = \frac{V_F}{I_F} \quad (5.23)$$

Εκτός από το είδος σφάλματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5, το βραχυκύκλωμα LLLG, θα μπορούσε να έχει αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσεων. Τότε, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ίδιο με αυτό του Σχήματος 5.4 αλλά με τον κοινό κόμβο γειωμένο. Σε αυτή τη περίπτωση για τον υπολογισμό των  $V_F$ ,  $I_F$  και  $R_f$  ισχύουν οι ίδιες σχέσεις με την περίπτωση του LLL σφάλματος.

### 5.3 Μέθοδος Διαφορικού Ρεύματος με Συγχρονισμένες Μετρήσεις

Η μέθοδος αυτή [1], [4] μπορεί να θεωρηθεί ως προέκταση της μεθόδου Takagi. Εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι έχουμε συγχρονισμένες μετρήσεις από τις δύο πλευρές της γραμμής και θέτοντας στην σχέση (4.12)  $\Delta I_S = I_{pol}$  ορίζει ότι:

$$m = \frac{Im(\overline{I_{pol}V_S})}{Im(\overline{I_{pol}Z_1I_S})} \quad (5.24)$$

όπου,  $Z_1$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς με βάση το μοντέλο μικρού μήκους (σε  $\Omega$ ), ενώ τα  $V_S$  και  $I_S$  ορίζονται στον Πίνακα 4.1. Ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος το ρεύμα  $I_{pol}$  είναι:

| FAULT TYPE   | $I_{POL}$                             |
|--------------|---------------------------------------|
| AG, BG, CG   | $I_{S2} + I_{R2}$                     |
| AB, ABG, ABG | $I_{Sa} + I_{Ra} - (I_{Sb} + I_{Rb})$ |
| BC, BCG, ABC | $I_{Sb} + I_{Rb} - (I_{Sc} + I_{Rc})$ |
| CA, CAG, ABC | $I_{Sc} + I_{Rc} - (I_{Sa} + I_{Ra})$ |

Πίνακας 5.4: Ορισμός  $I_{pol}$  για διαφορετικές περιπτώσεις σφαλμάτων

Αυτή η μέθοδος είναι ικανή να αντιμετωπίσει ασυμμετρίες του συστήματος που προκύπτουν από ανομοιογένειες στο φορτία. Οι τάση σφάλματος  $V_F$ , το ρεύμα σφάλματος  $I_F$  και την αντίσταση σφάλματος  $R_F$  υπολογίζονται όπως στην Ενότητα 5.1.1.

### 5.4 Μέθοδος Συγχρονισμένων Μετρήσεων – Μοντέλο Γραμμής Μεγάλου Μήκους

Στην Ενότητα 4.8.1, με βάση το Σχήμα 4.4 αποδείχτηκαν οι σχέσεις (4.32), (4.33). Στην περίπτωση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας οι αντίστοιχες σχέσεις είναι:

$$V_{F1} = V_{S1} \cosh(\gamma_1 ml) - Z_{C1} I_{S1} \sinh(\gamma_1 ml) \quad (5.25)$$

$$V_{F1} = V_{R1} \cosh(\gamma_1 (1 - m)l) - Z_{C1} I_{R1} \sinh(\gamma_1 (1 - m)l) \quad (5.26)$$

Σκοπός μας είναι να λύσουμε τις (5.25) και (5.26) ως προς  $m$ .

$$\cosh(\gamma(1 - m)l) = \cosh(\gamma l) \cosh(\gamma ml) - \sinh(\gamma l) \sinh(\gamma ml) \quad (5.27)$$

$$\sinh(\gamma(1 - m)l) = \sinh(\gamma l) \cosh(\gamma ml) - \cosh(\gamma l) \sinh(\gamma ml) \quad (5.28)$$

Χρησιμοποιώντας τις γνωστές μαθηματικές σχέσεις (5.27) και (5.28) που διέπουν το υπερβολικό συνημίτονο και το υπερβολικό ημίτονο, η σχέση (5.26) γίνεται:

$$\begin{aligned} V_{F1} = & \cosh(\gamma_1 ml) (V_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \sinh(\gamma_1 l)) - \\ & - \sinh(\gamma_1 ml) (V_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \cosh(\gamma_1 l)) \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\text{Όμως, } (5.25) = (5.29) \Rightarrow \cosh(\gamma_1 ml) (V_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - V_{S1}) +$$

$$+ \sinh(\gamma_1 ml) (-V_{R1} \sinh(\gamma_1 l) + Z_{C1} I_{R1} \cosh(\gamma_1 l) + Z_{C1} I_{S1}) = 0 \Rightarrow$$

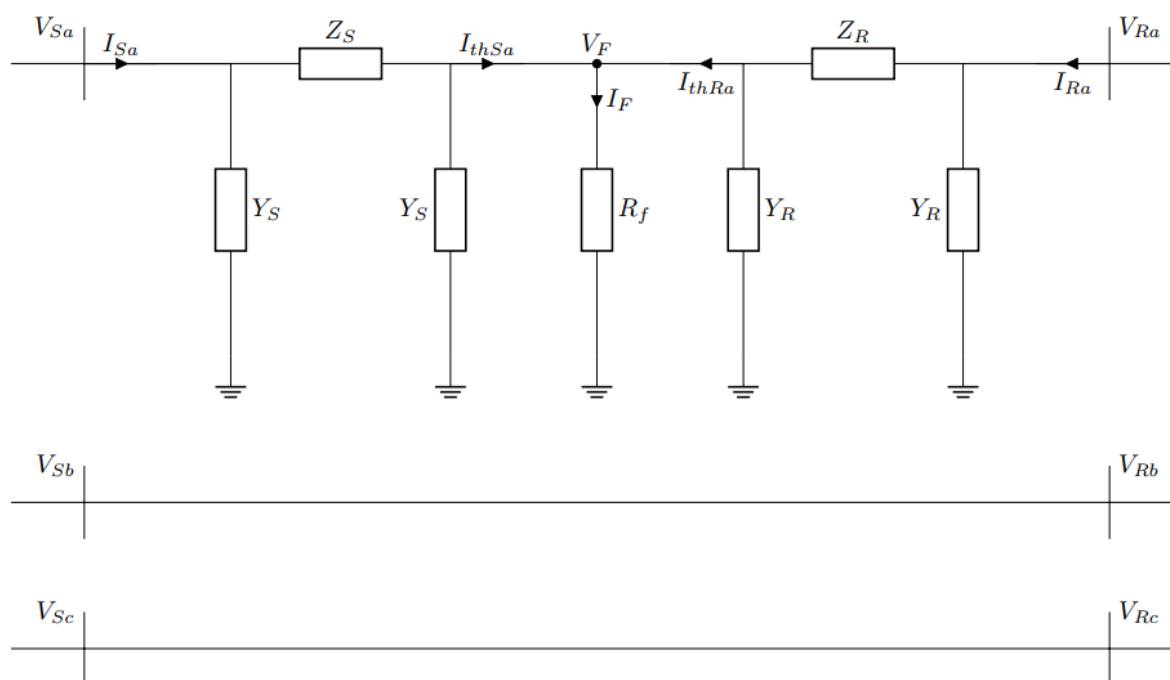
$$\cosh(\gamma_1 ml) (V_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - V_{S1}) =$$

$$\begin{aligned}
&= \sinh(\gamma_1 ml) (V_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{S1}) \Rightarrow \\
\tanh(\gamma_1 ml) &= \frac{V_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - V_{S1}}{V_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{S1}} \Rightarrow \\
m &= \frac{1}{\gamma_1 l} \tanh^{-1} \left( \frac{V_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - V_{S1}}{V_{R1} \sinh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{R1} \cosh(\gamma_1 l) - Z_{C1} I_{S1}} \right) \quad (5.30)
\end{aligned}$$

Από τη σχέση (5.30) γίνεται φανερό ότι για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος  $m$ , εκτός από τις παραμέτρους της γραμμής, απαιτείται η γνώση των  $V_{S1}$ ,  $V_{R1}$ ,  $I_{S1}$  και  $I_{R1}$ . Η θέση του σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο με βάση τα κυκλώματα μηδενικής και αρνητικής ακολουθίας. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα της θετικής ακολουθίας, διότι είναι παρών σε όλα τα είδη σφαλμάτων (LG, LL, LLG, LLL) και επειδή στην πράξη οι διαφορές μεταξύ αυτής και των άλλων υλοποιήσεων είναι μελιταιές. Τα μεγέθη του σφάλματος  $V_F$ ,  $I_F$  και  $R_f$  υπολογίζονται ανάλογα με την περίπτωση ως εξής:

**Σφάλμα LG**

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LG μεταξύ της φάσης A και της γης το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.6:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LG - μοντέλο μεγάλου μήκους*

όπου,  $Z_S = Z_C \sinh(\gamma ml)$  και  $Z_R = Z_C \sinh(\gamma(1-m)l)$  (σε Ω),

$$Y_S = \frac{1}{z_c} \tanh(\gamma m l) \text{ και } Y_R = \frac{1}{z_c} \tanh(\gamma(1-m)l) \text{ (σε } \Omega^{-1}) \text{ και ισχύουν οι σχέσεις:}$$

$$V_F = V_{Sg} \cosh(\gamma ml) - Z_C I_{Sg} \sinh(\gamma ml) \quad (5.31)$$

$$I_{thSq} = I_{Sq} - V_{Sq}Y_S - V_F Y_S \quad (5.32)$$

$$I_{thRq} = I_{Rq} - V_{Rq}Y_R - V_F Y_R \quad (5.33)$$



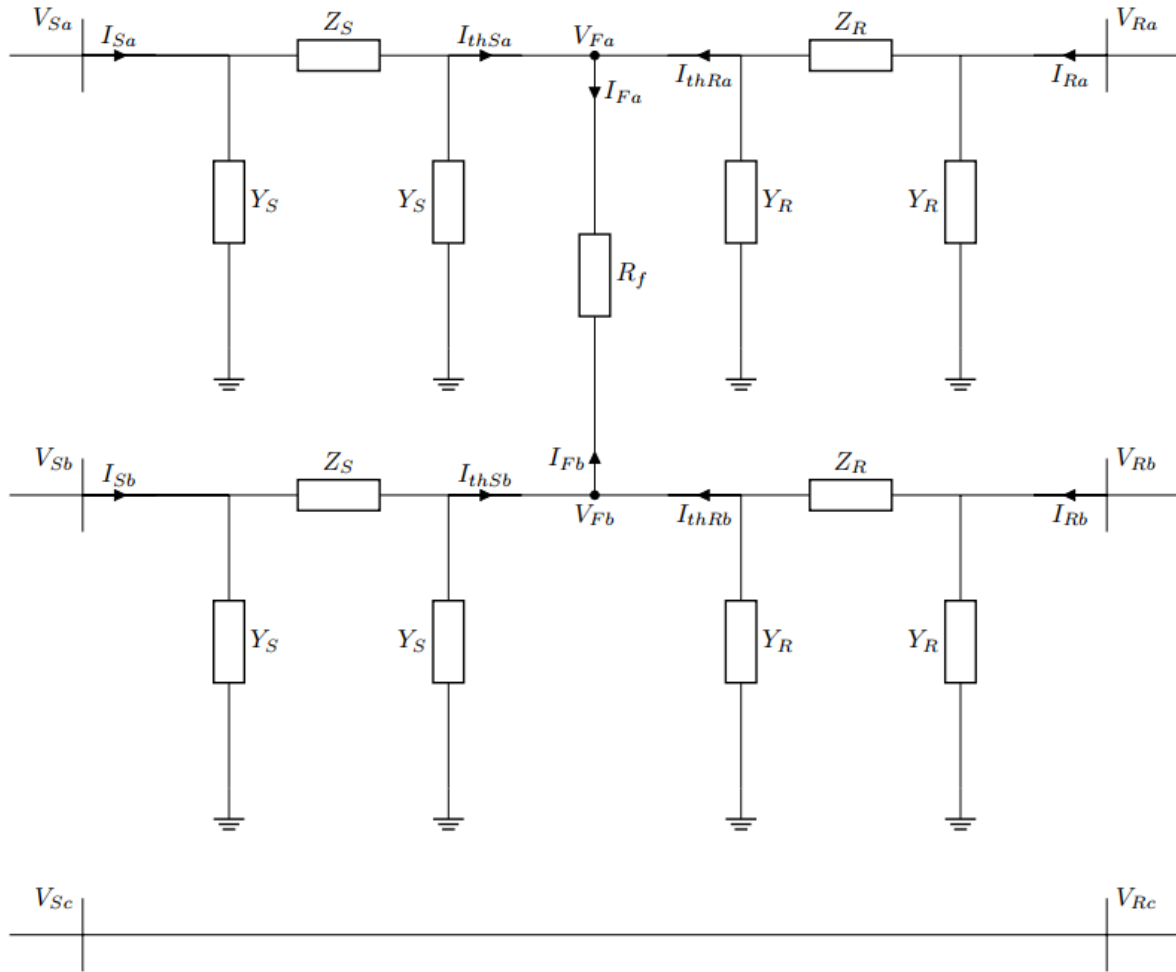
$$I_F = I_{thSa} + I_{thRa} \quad (5.34)$$

$$R_f = \frac{V_F}{I_F} \quad (5.35)$$

Οι σχέσεις (5.31) έως (5.35) εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο εάν στο βραχυκύκλωμα δεν συμμετέχει η φάση A αλλά μία εκ των B και C, με όμοιο τρόπο όπως στον Πίνακα 5.1.

### Σφάλμα LL

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LL μεταξύ των φάσεων A και B το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.7:** Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LL - μοντέλο μεγάλου μήκους

Οι σύνθετες αντιστάσεις  $Z_S$ ,  $Z_R$  και οι σύνθετες αγωγιμότητες  $Y_S$ ,  $Y_R$  είναι γνωστές. Σε αυτήν την περίπτωση βραχυκυκλώματος με βάση το Σχήμα 5.7 ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{Fa} = V_{Sa} \cosh(\gamma ml) - Z_C I_{Sa} \sinh(\gamma ml) \quad (5.36)$$

$$V_{Fb} = V_{Sb} \cosh(\gamma ml) - Z_C I_{Sb} \sinh(\gamma ml) \quad (5.37)$$

$$I_{Fa} = I_{thSa} + I_{thRa} \quad (5.38)$$

$$I_{Fb} = I_{thSb} + I_{thRb} \quad (5.39)$$

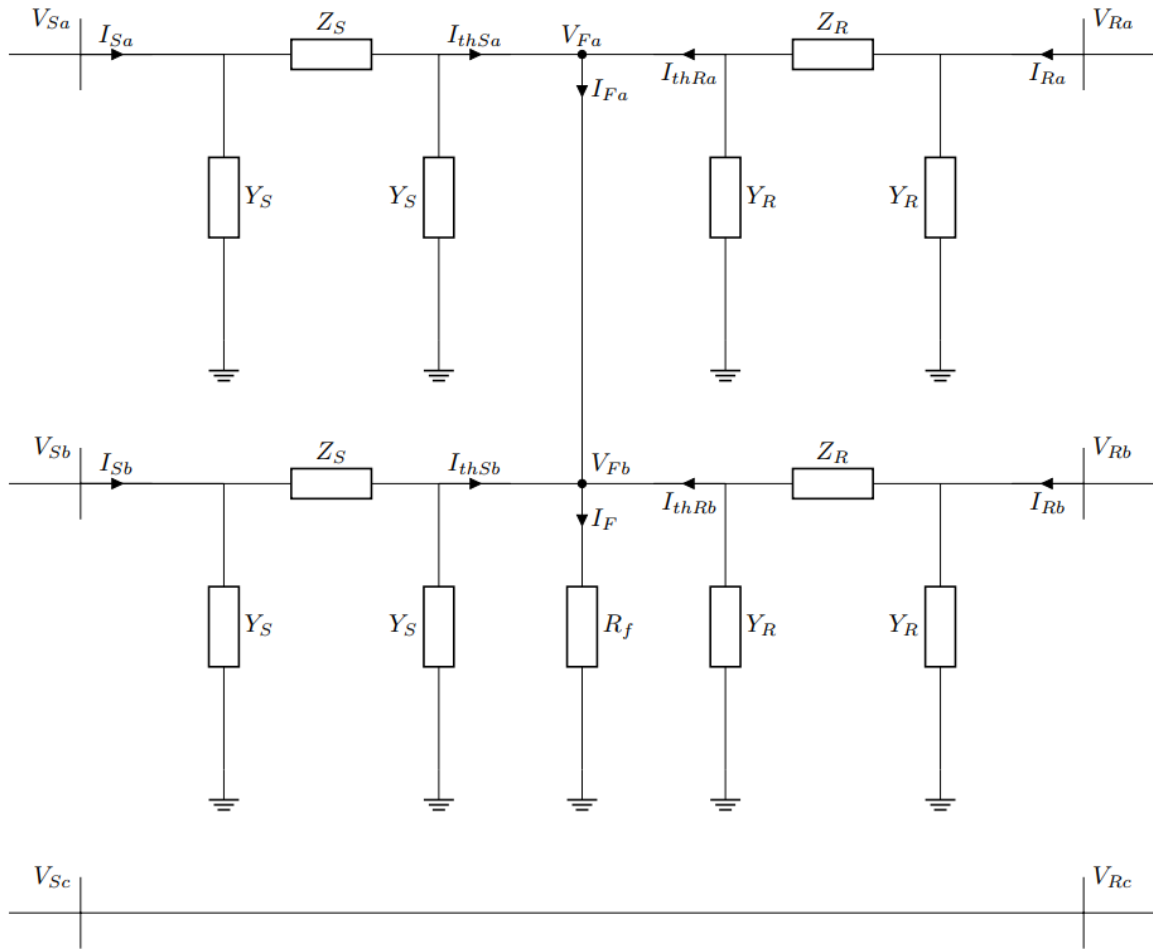
$$I_F = I_{Fa} = -I_{Fb} \quad (5.40)$$

$$R_f = \frac{|V_{Fa} - V_{Fb}|}{|I_F|} \quad (5.41)$$

Οι σχέσεις (5.36) έως και την (5.41) εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο εάν το βραχυκύκλωμα ήταν μεταξύ των φάσεων BC ή CA, με όμοιο τρόπο όπως στον Πίνακα 5.2.

### Σφάλμα LLG

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LLG μεταξύ των φάσεων A, B και της γης το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.8:** Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLG - μοντέλο μεγάλου μήκους

Οι σύνθετες αντιστάσεις  $Z_S$ ,  $Z_R$  και οι σύνθετες αγωγιμότητες  $Y_S$ ,  $Y_R$  είναι γνωστές. Σε αυτήν την περίπτωση βραχυκυκλώματος με βάση το Σχήμα 5.8 ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_F = \frac{V_{Fa} + V_{Fb}}{2} \quad (5.42)$$

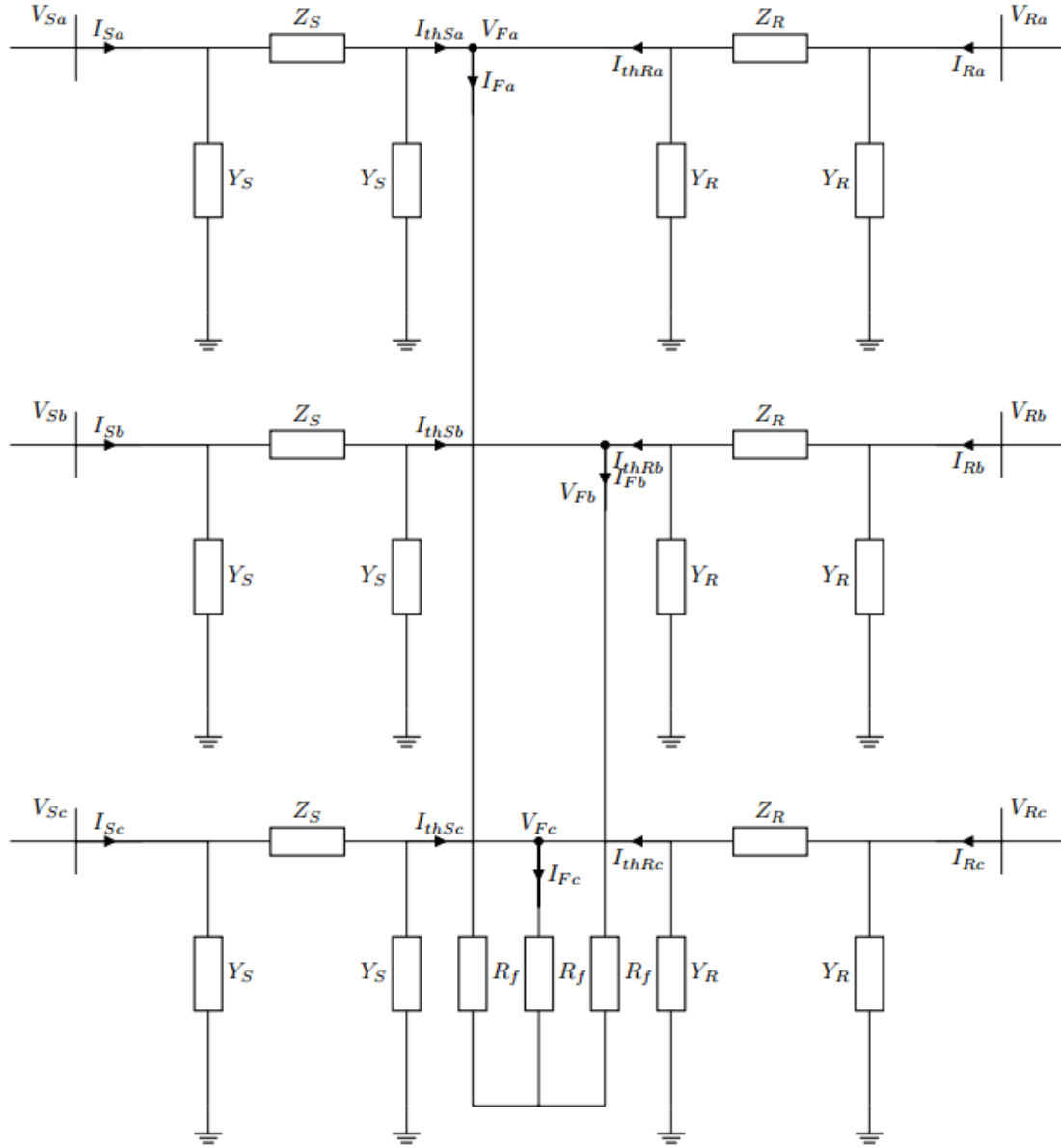
$$I_F = I_{thSa} + I_{thSb} + I_{thRa} + I_{thRb} \quad (5.43)$$

$$R_f = \frac{V_F}{I_F} \quad (5.44)$$

Οι σχέσεις (5.42), (5.43) και (5.44) εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο εάν το βραχυκύκλωμα ήταν μεταξύ των φάσεων BC και γης ή CA και γης, με όμοιο τρόπο όπως στον Πίνακα 5.3.

### Σφάλμα LLL

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LLL μεταξύ των φάσεων A, B και C το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.9:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLL - μοντέλο μεγάλου μήκους*

Οι σύνθετες αντιστάσεις  $Z_S$ ,  $Z_R$  και οι σύνθετες αγωγιμότητες  $Y_S$ ,  $Y_R$  είναι γνωστές. Σε αυτήν την περίπτωση βραχυκυκλώματος με βάση το Σχήμα 5.9 ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{Fa} - V_{\text{κοινού κόμβου}} = R_f(I_{thSa} + I_{thRa}) \quad (5.45)$$

$$V_{Fb} - V_{\text{κοινού κόμβου}} = R_f(I_{thSb} + I_{thRb}) \quad (5.46)$$

$$V_{Fc} - V_{\text{κοινού κόμβου}} = R_f(I_{thSc} + I_{thRc}) \quad (5.47)$$

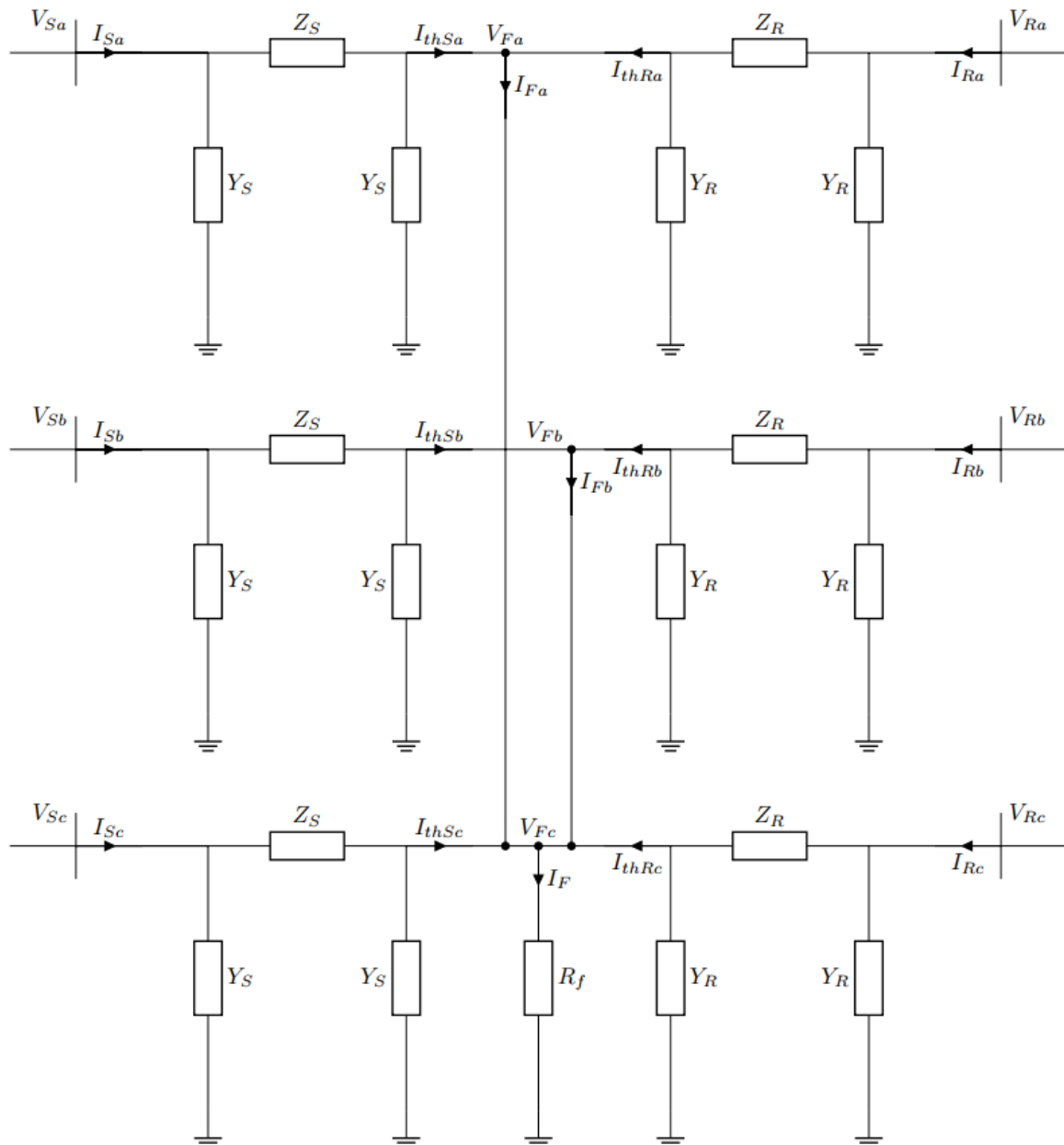
$$(5.45) - (5.46) = V_{Fa} - V_{Fb} = R_f((I_{thSa} + I_{thRa}) - (I_{thSb} + I_{thRb})) \Rightarrow$$

$$R_f = \frac{V_{Fa} - V_{Fb}}{(I_{thSa} + I_{thRa}) - (I_{thSb} + I_{thRb})} \quad (5.48)$$

Ομοίως με την Ενότητα 5.1.1 η αντίσταση σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί και με διαφορετικούς συνδυασμούς των (5.45), (5.46) και (5.47). Προτείνουμε να ληφθεί τελική αντίσταση σφάλματος ο μέσος όρος όλων των  $R_f$ .

## Σφάλμα LLLG

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος LLLG μεταξύ των φάσεων Α, Β, C και γης το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.10:** *Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLLG - μοντέλο μεγάλου μήκους*

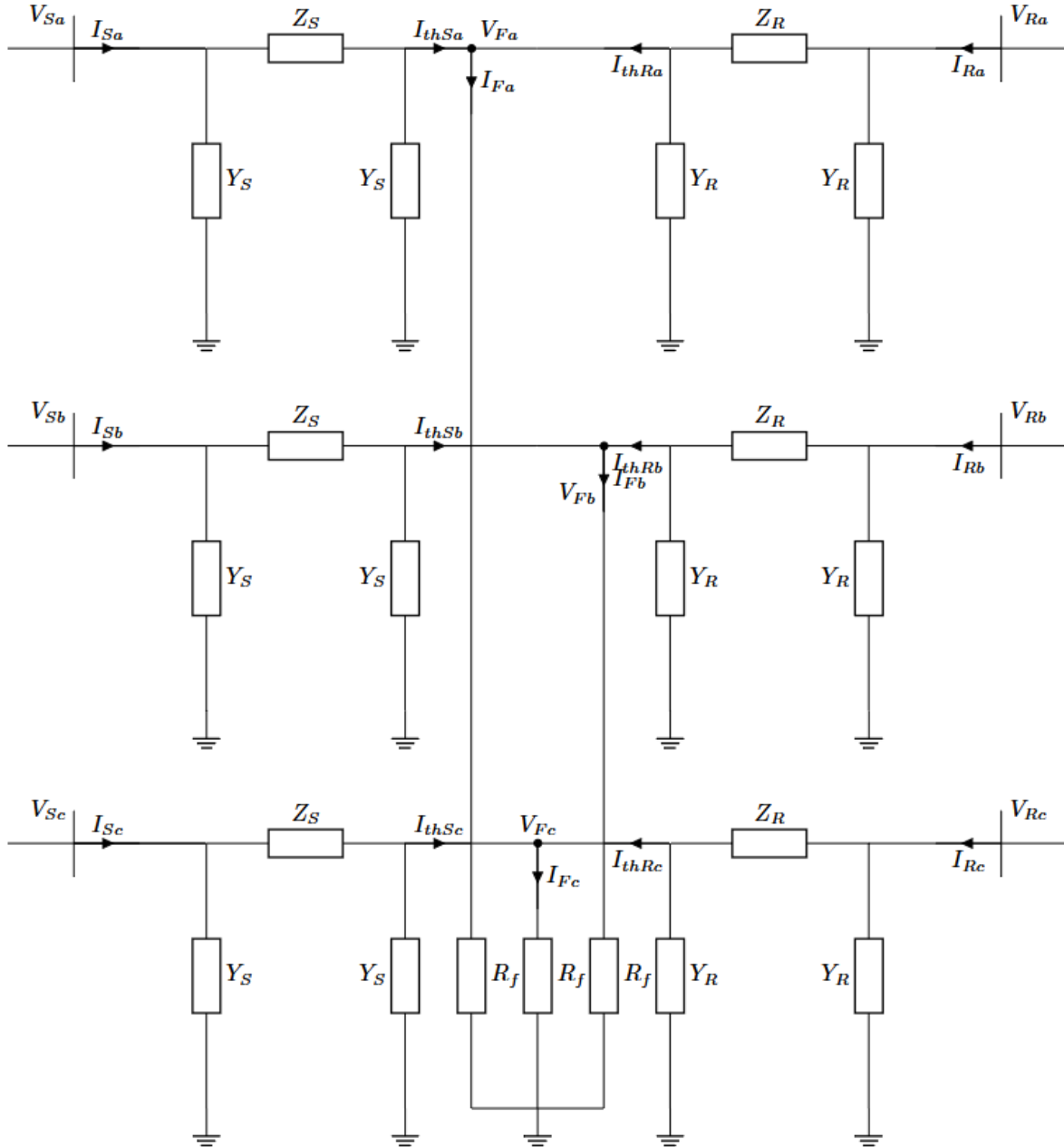
Οι σύνθετες αντιστάσεις  $Z_S$ ,  $Z_R$  και οι σύνθετες αγωγιμότητες  $Y_S$ ,  $Y_R$  είναι γνωστές. Σε αυτήν την περίπτωση βραχυκυκλώματος με βάση το Σχήμα 5.10 ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_F = \frac{V_{Fa} + V_{Fb} + V_{Fc}}{3} \quad (5.49)$$

$$I_F = I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc} = I_{thSa} + I_{thRa} + I_{thSb} + I_{thRb} + I_{thSc} + I_{thRc} \quad (5.50)$$

$$R_f = \frac{V_f}{I_F} \quad (5.51)$$

Εκτός από το είδος σφάλματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10, το βραχυκύκλωμα LLLG, θα μπορούσε να έχει αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσεων. Τότε, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:



**Σχήμα 5.11:** Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σφάλμα LLLG με αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσεων-μοντέλο μεγάλου μήκους

Τέλος, σε αυτήν την περίπτωση για τον υπολογισμό των  $V_F$ ,  $I_F$  και  $R_f$  ισχύουν οι ίδιες σχέσεις με την περίπτωση του LLL σφάλματος.

## 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο Mathcad

Οι μέθοδοι που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 4 και 5 προσομοιώθηκαν στο Mathcad σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Όλες οι δοκιμές έγιναν στο ΣΗΕ της μορφής του Σχήματος 6.1. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο γραμμής μεγάλου μήκους για τον υπολογισμό των φασικών μεγεθών των τάσεων και ρευμάτων στις θέσεις των ηλεκτρονόμων κατά το σφάλμα, όπως περιγράφεται στο 3ο κεφάλαιο. Έπειτα, με γνώση αυτών, εξετάστηκε η συμπεριφορά των αλγορίθμων που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 4 και 5 ως προς την εύρεση της θέσης και τον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος, όπου αυτή μπορεί να μετρηθεί.



Σχήμα 6.1: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά ανά περίπτωση σε πίνακες. Η απόκλιση της κάθε μεθόδου έχει μετρηθεί ως  $(m_{est} - m)100\%$  και το σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος ως  $\frac{R_{fest} - R_f}{R_f} 100\%$ . Αυτά, για καλύτερη κατανόηση παρουσιάζονται και σχηματικά σε γραφήματα. Ακόμα, έχει υιοθετηθεί ο εξής συμβολισμός:

| Simple Reactance Method                                                                                | SRM   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tagaki Method ρεύματος μηδενικής ακολουθίας                                                            | TAK0  |
| Tagaki Method ρεύματος αρνητικής ακολουθίας                                                            | TAK2  |
| Modified Tagaki Method ρεύματος μηδενικής ακολουθίας                                                   | MTAK0 |
| Modified Tagaki Method ρεύματος αρνητικής ακολουθίας                                                   | MTAK2 |
| Wiszniewski Method (με χρήση μεγεθών του Πίνακα 4.4)                                                   | WIS   |
| Eriksson Method (με χρήση μεγεθών του Πίνακα 4.5)                                                      | ERI   |
| Xu Method                                                                                              | XU    |
| Μέθοδος συγχρονισμένων μετρήσεων – Μοντέλο γραμμής μικρού μήκους με χρήση μεγεθών θετικής ακολουθίας   | Sm1   |
| Μέθοδος συγχρονισμένων μετρήσεων – Μοντέλο γραμμής μικρού μήκους με χρήση μεγεθών αρνητικής ακολουθίας | Sm2   |
| Μέθοδος συγχρονισμένων μετρήσεων – Μέθοδος διαφορικού ρεύματος                                         | SCD   |
| Μέθοδος συγχρονισμένων μετρήσεων – Μοντέλο γραμμής μεγάλου μήκους με χρήση μεγεθών θετικής ακολουθίας  | SM1   |

Πίνακας 6.1: Ορισμός συμβολισμού για κάθε μέθοδο

Οι προσομοιώσεις έγιναν για κάθε τύπο βραχυκυκλώματος, LG-AG, LL-BC, LLG-BCG, LLLG-ABCG, για γραμμή μεταφοράς 35km και 350km, ώστε να καταγραφεί η απόδοση των μεθόδων σε διαφορετικά μήκη γραμμών (οι δύο γραμμές έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά μεγέθη σύνθετης αντίστασης σειράς και εγκάρσιας αγωγιμότητας ανά km [6]). Επίσης, εξετάστηκε η απόδοση των μεθόδων για αφόρτιστη ( $E_{GS} = E_{GR}$ ) και φορτισμένη γραμμή ( $E_{GR} = |E_{GS}| \angle -25^\circ$ ), ώστε να καταγραφεί η εξάρτησή τους από το φορτίο, όπου αυτή υπάρχει. Ακόμα, έγιναν

δοκιμές για αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0, 1, 10, 50\Omega$ , ώστε να εξεταστεί πως αυτή επηρεάζει την απόδοση της κάθε μεθόδου. Τέλος, σε κάθε περίπτωση, έγιναν δοκιμές με την πραγματική απόσταση σφάλματος  $m$  να κυμαίνεται από 0p.u. έως 1p.u. της γραμμής με βήμα 0.1p.u., για να φανεί η εξάρτηση των μεθόδων από τη θέση του σφάλματος.

## 6.1 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα LG-AG

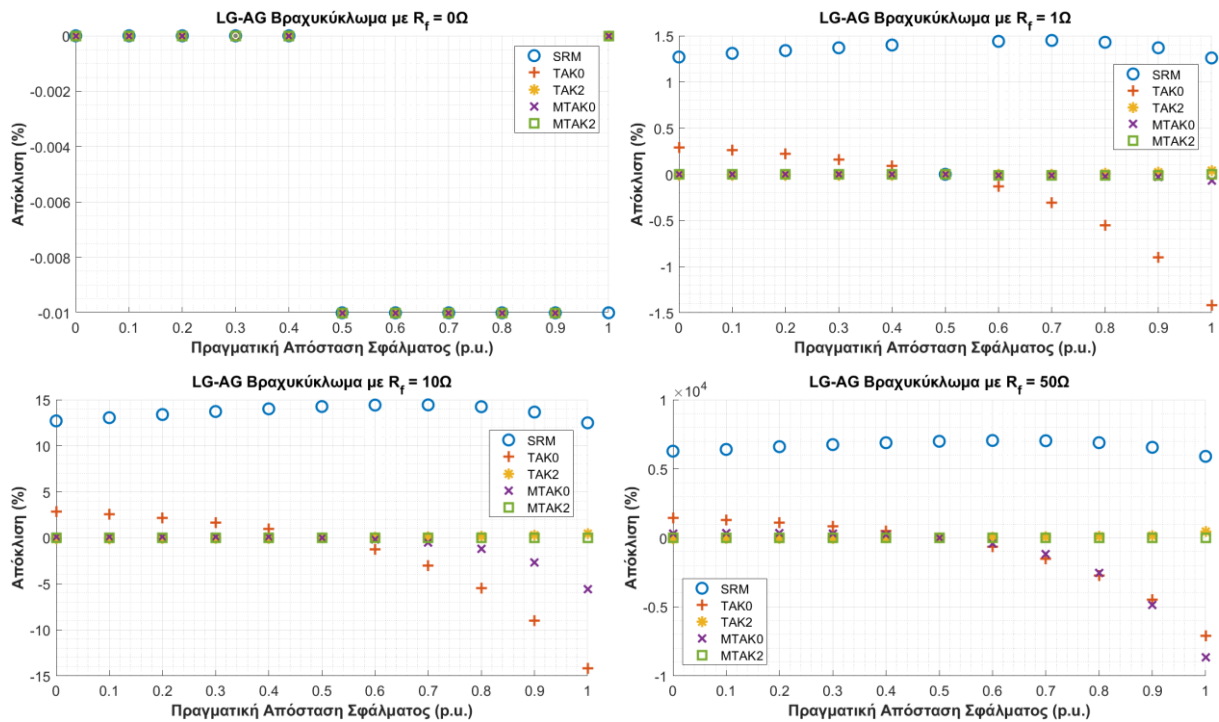
### 6.1.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0             | 0,00%           | 0              | 0,00%           | 0              | 0,00%           | 0               | 0,00%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1           | 0,00%           | 0,1            | 0,00%           | 0,1            | 0,00%           | 0,1             | 0,00%           | 0,1             | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2           | 0,00%           | 0,2            | 0,00%           | 0,2            | 0,00%           | 0,2             | 0,00%           | 0,2             | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3           | 0,00%           | 0,3            | 0,00%           | 0,3            | 0,00%           | 0,3             | 0,00%           | 0,3             | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4           | 0,00%           | 0,4            | 0,00%           | 0,4            | 0,00%           | 0,4             | 0,00%           | 0,4             | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4999        | -0,01%          | 0,4999         | -0,01%          | 0,4999         | -0,01%          | 0,4999          | -0,01%          | 0,4999          | -0,01%          |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 0,5999         | -0,01%          | 0,5999         | -0,01%          | 0,5999          | -0,01%          | 0,5999          | -0,01%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6999        | -0,01%          | 0,6999         | -0,01%          | 0,6999         | -0,01%          | 0,6999          | -0,01%          | 0,6999          | -0,01%          |
|                        | 0,8                                           | 0,7999        | -0,01%          | 0,7999         | -0,01%          | 0,7999         | -0,01%          | 0,7999          | -0,01%          | 0,7999          | -0,01%          |
|                        | 0,9                                           | 0,8999        | -0,01%          | 0,8999         | -0,01%          | 0,8999         | -0,01%          | 0,8999          | -0,01%          | 0,8999          | -0,01%          |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9999        | -0,01%          | 1              | 0,00%           | 1              | 0,00%           | 1               | 0,00%           | 1               | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,0127        | 1,27%           | 0,0029         | 0,29%           | -0,0001        | -0,01%          | 0               | 0,00%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1131        | 1,31%           | 0,1026         | 0,26%           | 0,0999         | -0,01%          | 0,1             | 0,00%           | 0,1             | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2134        | 1,34%           | 0,2022         | 0,22%           | 0,1999         | -0,01%          | 0,2             | 0,00%           | 0,2             | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3137        | 1,37%           | 0,3016         | 0,16%           | 0,2999         | -0,01%          | 0,3             | 0,00%           | 0,3             | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,414         | 1,40%           | 0,4009         | 0,09%           | 0,3999         | -0,01%          | 0,4             | 0,00%           | 0,4             | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5           | 0,00%           | 0,5            | 0,00%           | 0,5            | 0,00%           | 0,5             | 0,00%           | 0,5             | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6144        | 1,44%           | 0,5987         | -0,13%          | 0,6            | 0,00%           | 0,5999          | -0,01%          | 0,5999          | -0,01%          |
|                        | 0,7                                           | 0,7145        | 1,45%           | 0,6969         | -0,31%          | 0,7            | 0,00%           | 0,6999          | -0,01%          | 0,6999          | -0,01%          |
|                        | 0,8                                           | 0,8143        | 1,43%           | 0,7945         | -0,55%          | 0,8001         | 0,01%           | 0,7998          | -0,02%          | 0,7999          | -0,01%          |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9137        | 1,37%           | 0,891          | -0,90%          | 0,9002         | 0,02%           | 0,8997          | -0,03%          | 0,8999          | -0,01%          |
|                        | 1                                             | 1,0126        | 1,26%           | 0,9858         | -1,42%          | 1,0004         | 0,04%           | 0,9993          | -0,07%          | 1               | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,127         | 12,70%          | 0,0286         | 2,86%           | -0,0011        | -0,11%          | 0,0012          | 0,12%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,2305        | 13,05%          | 0,1257         | 2,57%           | 0,099          | -0,10%          | 0,1013          | 0,13%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,3339        | 13,39%          | 0,2218         | 2,18%           | 0,1992         | -0,08%          | 0,2014          | 0,14%           | 0,2001          | 0,01%           |
|                        | 0,3                                           | 0,4372        | 13,72%          | 0,3165         | 1,65%           | 0,2994         | -0,06%          | 0,3013          | 0,13%           | 0,3             | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,5401        | 14,01%          | 0,4096         | 0,96%           | 0,3997         | -0,03%          | 0,401           | 0,10%           | 0,4             | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,6426        | 14,26%          | 0,5002         | 0,02%           | 0,5            | 0,00%           | 0,5002          | 0,02%           | 0,5             | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,7442        | 14,42%          | 0,5874         | -1,26%          | 0,6005         | 0,05%           | 0,5985          | -0,15%          | 0,6             | 0,00%           |
|                        | 0,7                                           | 0,8444        | 14,44%          | 0,6698         | -3,02%          | 0,7011         | 0,11%           | 0,6949          | -0,51%          | 0,7             | 0,00%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,9424        | 14,24%          | 0,7452         | -5,48%          | 0,8019         | 0,19%           | 0,7878          | -1,22%          | 0,8             | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 1,0366        | 13,66%          | 0,81           | -9,00%          | 0,9029         | 0,29%           | 0,8734          | -2,66%          | 0,9             | 0,00%           |
|                        | 1                                             | 1,1249        | 12,49%          | 0,858          | -14,20%         | 1,0043         | 0,43%           | 0,944           | -5,60%          | 1               | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,6276        | 62,76%          | 0,1431         | 14,31%          | -0,0057        | -0,57%          | 0,0321          | 3,21%           | 0,0003          | 0,03%           |
|                        | 0,1                                           | 0,74          | 64,00%          | 0,2284         | 12,84%          | 0,095          | -0,50%          | 0,1342          | 3,42%           | 0,1004          | 0,04%           |
|                        | 0,2                                           | 0,86          | 66,00%          | 0,3089         | 10,89%          | 0,1959         | -0,41%          | 0,2347          | 3,47%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,9751        | 67,51%          | 0,3828         | 8,28%           | 0,2971         | -0,29%          | 0,3318          | 3,18%           | 0,3004          | 0,04%           |
|                        | 0,4                                           | 1,0886        | 68,86%          | 0,4479         | 4,79%           | 0,3985         | -0,15%          | 0,4225          | 2,25%           | 0,4004          | 0,04%           |
|                        | 0,5                                           | 1,1991        | 69,91%          | 0,501          | 0,10%           | 0,5004         | 0,04%           | 0,5016          | 0,16%           | 0,5004          | 0,04%           |
|                        | 0,6                                           | 1,3048        | 70,48%          | 0,5373         | -6,27%          | 0,6027         | 0,27%           | 0,5599          | -4,01%          | 0,6003          | 0,03%           |
|                        | 0,7                                           | 1,403         | 70,30%          | 0,5495         | -15,05%         | 0,7057         | 0,57%           | 0,5825          | -11,75%         | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 1,4889        | 68,89%          | 0,5266         | -27,34%         | 0,8096         | 0,96%           | 0,5456          | -25,44%         | 0,8             | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 1,5554        | 65,54%          | 0,4504         | -44,96%         | 0,9148         | 1,48%           | 0,4136          | -48,64%         | 0,8997          | -0,03%          |
|                        | 1                                             | 1,5898        | 58,98%          | 0,2907         | -70,93%         | 1,0445         | 4,45%           | 0,136           | -86,40%         | 0,9991          | -0,09%          |

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.1:



**Εικόνα 6.1:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, δηλαδή για  $R_f=0\Omega$ . Όσο η αντίσταση σφάλματος αυξάνεται, η SRM υπερεκτιμά ολοένα και περισσότερο τη θέση του σφάλματος, φτάνοντας μέχρι και σε απόκλιση πάνω από 50% όταν  $R_f=50\Omega$ . Η TAK0 παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από την SRM, αλλά και αυτή η μέθοδος για  $R_f=10\Omega$  και  $R_f=50\Omega$  έχει σημαντικές αποκλίσεις. Υπερεκτιμά το σφάλμα όταν αυτό γίνεται κοντά στην θέση του ηλεκτρονόμου. Σταδιακά, όσο η απόσταση σφάλματος και ηλεκτρονόμου αυξάνεται και ξεπερνά το 0.5p.u. της γραμμής, η TAK0 υποεκτιμά το σφάλμα. Η MTAK0 ακολουθεί την ίδια πορεία με την TAK0, αλλά έχει καλύτερη συμπεριφορά με μικρότερη απόκλιση, εκτός της περίπτωσης με  $R_f=50\Omega$  για μεγάλες αποστάσεις. Η TAK2 παρουσιάζει πάρα πολύ καλή απόδοση και φαίνεται να μην επηρεάζεται από την αντίσταση σφάλματος, μόνο για  $R_f=50\Omega$  και  $m=1$ p.u. εμφανίζει απόκλιση 4,45%. Η MTAK2, όπως αναμέναμε, έχει ακόμα καλύτερη απόκριση από την TAK2 και σε κάθε δοκιμή παρουσιάζει βελτιωμένα αποτελέσματα. Ακόμα, μόνο η απόκλιση της MTAK2 διατηρείται συνεχώς κάτω τους 2% της γραμμής, δηλαδή είναι μικρότερη των 700m. Συνεπώς, από τις παραπάνω μεθόδους, μόνο αυτή έχει αποδεκτή συμπεριφορά.

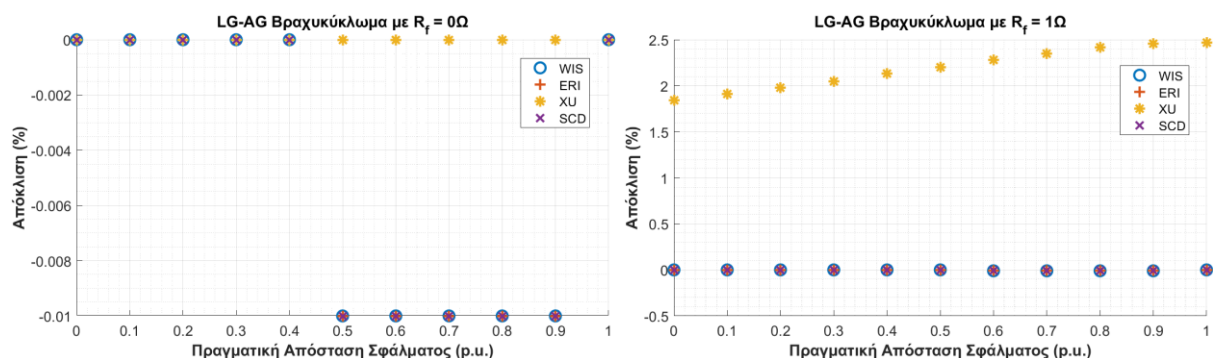


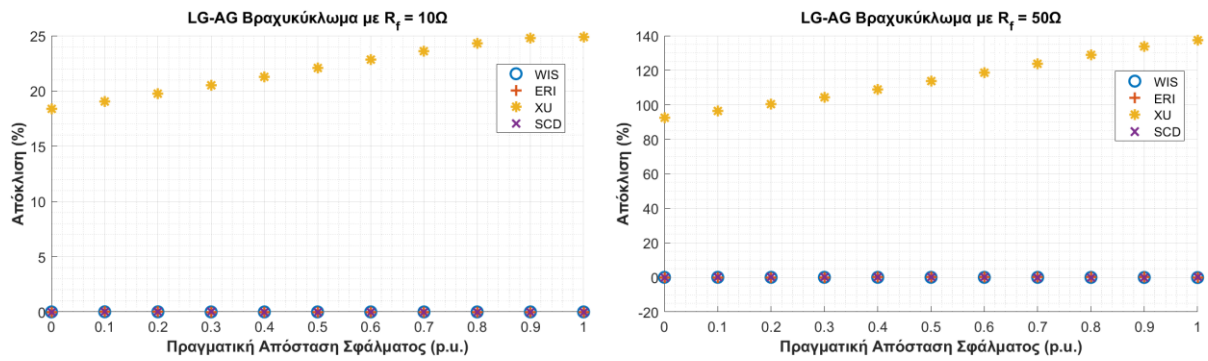
Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | WIS (p.u.) | Απόκλιση (%) | ERI (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος ERI (Ω) | Σφάλμα (%) | XU (p.u.) | Απόκλιση (%) | SCD (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SCD (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|-----------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0          | 0,00%        | 0          | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1        | 0,00%        | 0,1        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2        | 0,00%        | 0,2        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3        | 0,00%        | 0,3        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4        | 0,00%        | 0,4        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,4999     | -0,01%       | 0,4999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,5000    | 0,00%        | 0,4999     | -0,01%       | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 0,5999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,6000    | 0,00%        | 0,5999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,6999     | -0,01%       | 0,6999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,7000    | 0,00%        | 0,6999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,7999     | -0,01%       | 0,7999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,8000    | 0,00%        | 0,7999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,8999     | -0,01%       | 0,8999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,9000    | 0,00%        | 0,8999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 1                                    | 1          | 0,00%        | 1          | 0,00%        | 0,001                       | -          | 1,0000    | 0,00%        | 1,0000     | 0,00%        | 0,001                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 0                                    | 0          | 0,00%        | 0          | 0,00%        | 0,999                       | -0,08%     | 0,0184    | 1,84%        | 0,0000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,05%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1        | 0,00%        | 0,1        | 0,00%        | 0,999                       | -0,09%     | 0,1191    | 1,91%        | 0,1000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,05%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2        | 0,00%        | 0,2        | 0,00%        | 0,999                       | -0,10%     | 0,2198    | 1,98%        | 0,2000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,04%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3        | 0,00%        | 0,3        | 0,00%        | 0,999                       | -0,11%     | 0,3205    | 2,05%        | 0,3000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,04%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4        | 0,00%        | 0,4        | 0,00%        | 0,999                       | -0,12%     | 0,4213    | 2,13%        | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5        | 0,00%        | 0,5        | 0,00%        | 0,999                       | -0,14%     | 0,5220    | 2,20%        | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 0,5999     | -0,01%       | 0,999                       | -0,15%     | 0,6228    | 2,28%        | 0,5999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6999     | -0,01%       | 0,6999     | -0,01%       | 0,998                       | -0,16%     | 0,7235    | 2,35%        | 0,6999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7999     | -0,01%       | 0,7999     | -0,01%       | 0,998                       | -0,17%     | 0,8242    | 2,42%        | 0,7999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,00%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8999     | -0,01%       | 0,8999     | -0,01%       | 0,998                       | -0,17%     | 0,9246    | 2,46%        | 0,8999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,00%      |
|                     | 1                                    | 1          | 0,00%        | 1          | 0,00%        | 0,998                       | -0,17%     | 1,0247    | 2,47%        | 1,0000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      |
| Rf = 10Ω            | 0                                    | 0          | 0,00%        | 0          | 0,00%        | 9,992                       | -0,08%     | 0,1837    | 18,37%       | 0,0000     | 0,00%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1001     | 0,01%        | 0,1001     | 0,01%        | 9,991                       | -0,09%     | 0,2905    | 19,05%       | 0,1001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2001     | 0,01%        | 0,2001     | 0,01%        | 9,991                       | -0,09%     | 0,3976    | 19,76%       | 0,2001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3        | 0,00%        | 0,3        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,5050    | 20,50%       | 0,3001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4        | 0,00%        | 0,4        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,6127    | 21,27%       | 0,4000     | 0,00%        | 10,006                      | 0,06%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5        | 0,00%        | 0,5        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,7206    | 22,06%       | 0,5000     | 0,00%        | 10,006                      | 0,06%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6        | 0,00%        | 0,6        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,8286    | 22,86%       | 0,6000     | 0,00%        | 10,007                      | 0,07%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7        | 0,00%        | 0,7        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,9362    | 23,62%       | 0,7000     | 0,00%        | 10,008                      | 0,08%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8        | 0,00%        | 0,8        | 0,00%        | 9,991                       | -0,09%     | 1,0429    | 24,29%       | 0,8000     | 0,00%        | 10,009                      | 0,09%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9        | 0,00%        | 0,9        | 0,00%        | 9,992                       | -0,08%     | 1,1478    | 24,78%       | 0,9000     | 0,00%        | 10,010                      | 0,10%      |
|                     | 1                                    | 1          | 0,00%        | 1          | 0,00%        | 9,993                       | -0,07%     | 1,2490    | 24,90%       | 1,0000     | 0,00%        | 10,011                      | 0,11%      |
| Rf = 50Ω            | 0                                    | 0,0003     | 0,03%        | 0,0003     | 0,03%        | 49,956                      | -0,09%     | 0,9263    | 92,63%       | 0,0003     | 0,03%        | 50,025                      | 0,05%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 0,1003     | 0,03%        | 49,951                      | -0,10%     | 1,0632    | 96,32%       | 0,1004     | 0,04%        | 50,024                      | 0,05%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2004     | 0,04%        | 0,2003     | 0,03%        | 49,947                      | -0,11%     | 1,2026    | 100,26%      | 0,2004     | 0,04%        | 50,025                      | 0,05%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3004     | 0,04%        | 0,3003     | 0,03%        | 49,944                      | -0,11%     | 1,3447    | 104,47%      | 0,3004     | 0,04%        | 50,026                      | 0,05%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4004     | 0,04%        | 0,4004     | 0,04%        | 49,943                      | -0,11%     | 1,4896    | 108,96%      | 0,4004     | 0,04%        | 50,028                      | 0,06%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5004     | 0,04%        | 0,5004     | 0,04%        | 49,942                      | -0,12%     | 1,6371    | 113,71%      | 0,5004     | 0,04%        | 50,031                      | 0,06%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6003     | 0,03%        | 0,6004     | 0,04%        | 49,943                      | -0,11%     | 1,7869    | 118,69%      | 0,6004     | 0,04%        | 50,035                      | 0,07%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7004     | 0,04%        | 49,945                      | -0,11%     | 1,9383    | 123,83%      | 0,7003     | 0,03%        | 50,040                      | 0,08%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8        | 0,00%        | 0,8004     | 0,04%        | 49,948                      | -0,11%     | 2,0896    | 128,96%      | 0,8003     | 0,03%        | 50,046                      | 0,09%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8997     | -0,03%       | 0,9004     | 0,04%        | 49,952                      | -0,10%     | 2,2376    | 133,76%      | 0,9002     | 0,02%        | 50,052                      | 0,10%      |
|                     | 1                                    | 0,9991     | -0,09%       | 1,0003     | 0,03%        | 49,958                      | -0,08%     | 2,3755    | 137,55%      | 1,0020     | 0,20%        | 50,060                      | 0,12%      |

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.2:





**Εικόνα 6.2:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

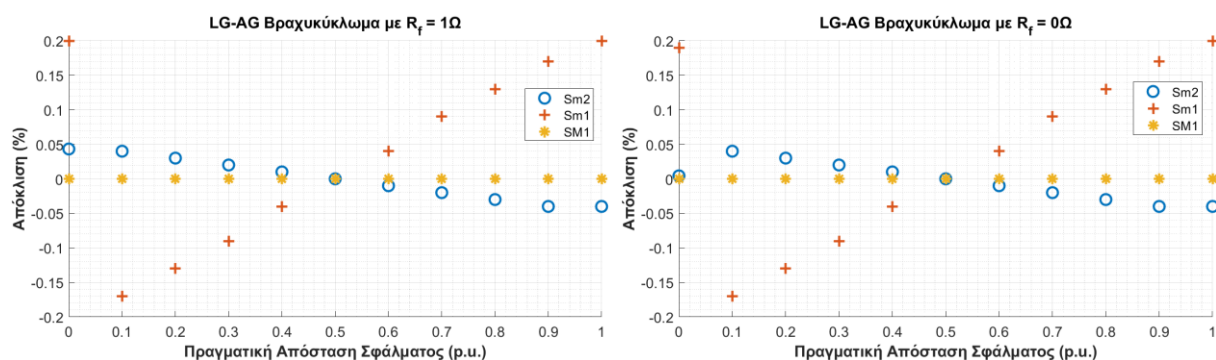
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, δηλαδή για  $R_f=0\Omega$ . Η WIS και η ERI παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά. Ακόμα, η μέθοδος του Eriksson εκτιμά την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις. Η XU φαίνεται να είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αντίσταση σφάλματος και όσο αυτή αυξάνεται, αυξάνεται αναλογικά και η απόκλιση της μεθόδου, η οποία ξεπερνάει και το 100% όταν  $R_f=50\Omega$ . Η SCD εμφανίζει εξαιρετική συμπεριφορά ανεξάρτητα από τη θέση του σφάλματος και την αντίσταση την οποία υπολογίζει με πολύ καλή ακρίβεια. Επίσης, οι αποκλίσεις των μεθόδων WIS, ERI και SCD διατηρούνται κάτω του 2% της γραμμής για όλες τις δοκιμές, δηλαδή είναι μικρότερες των 700m. Επομένως, έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

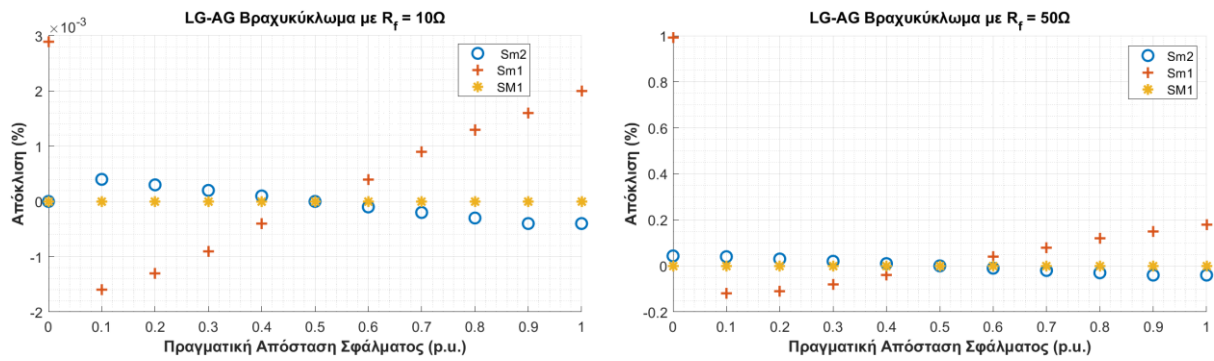
Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,0019        | 0,19%           | 0,006                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 0,000                             | -             | 0,0983        | -0,17%          | 0,000                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 0,001                             | -             | 0,1987        | -0,13%          | 0,003                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 0,001                             | -             | 0,2991        | -0,09%          | 0,002                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 0,001                             | -             | 0,3996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 0,001                             | -             | 0,6004        | 0,04%           | 0,002                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 0,001                             | -             | 0,7009        | 0,09%           | 0,002                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 0,001                             | -             | 0,8013        | 0,13%           | 0,003                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 0,9017        | 0,17%           | 0,003                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 0,999                             | -0,09%        | 0,0020        | 0,20%           | 0,994                             | -0,60%        | 0             | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 0,999                             | -0,06%        | 0,0983        | -0,17%          | 1,006                             | 0,55%         | 0,1           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 1,000                             | -0,04%        | 0,1987        | -0,13%          | 1,004                             | 0,40%         | 0,2           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 1,000                             | -0,02%        | 0,2991        | -0,09%          | 1,003                             | 0,26%         | 0,3           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,00%         | 0,3996        | -0,04%          | 1,001                             | 0,12%         | 0,4           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,01%         | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,01%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 1,000                             | 0,02%         | 0,6004        | 0,04%           | 0,999                             | -0,08%        | 0,6           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 1,000                             | 0,03%         | 0,7009        | 0,09%           | 0,999                             | -0,15%        | 0,7           | 0               | 1,000                             | 0,01%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 1,003                             | 0,30%         | 0,8013        | 0,13%           | 0,998                             | -0,19%        | 0,8           | 0               | 1,000                             | 0,01%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 1,000                             | 0,04%         | 0,9017        | 0,17%           | 0,998                             | -0,21%        | 0,9           | 0               | 1,000                             | 0,01%         |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 10,004                            | 0,05%         | 0,0029        | 0,29%           | 9,996                             | -0,04%        | 0             | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 10,004                            | 0,04%         | 0,0984        | -0,16%          | 10,010                            | 0,10%         | 0,1           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 10,005                            | 0,05%         | 0,1987        | -0,13%          | 10,009                            | 0,09%         | 0,2           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 10,005                            | 0,05%         | 0,2991        | -0,09%          | 10,008                            | 0,08%         | 0,3           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 10,006                            | 0,06%         | 0,3996        | -0,04%          | 10,007                            | 0,07%         | 0,4           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,006                            | 0,06%         | 0,5000        | 0,00%           | 10,006                            | 0,06%         | 0,5           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 10,007                            | 0,07%         | 0,6004        | 0,04%           | 10,006                            | 0,06%         | 0,6           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 10,008                            | 0,08%         | 0,7009        | 0,09%           | 10,006                            | 0,06%         | 0,7           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 10,009                            | 0,09%         | 0,8013        | 0,13%           | 10,007                            | 0,07%         | 0,8           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 10,010                            | 0,10%         | 0,9016        | 0,16%           | 10,008                            | 0,08%         | 0,9           | 0               | 10,002                            | 0,02%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 50,024                            | 0,05%         | 0,0099        | 0,99%           | 49,993                            | -0,01%        | 0             | 0               | 50,008                            | 0,02%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 50,024                            | 0,05%         | 0,0988        | -0,12%          | 50,029                            | 0,06%         | 0,1           | 0               | 50,009                            | 0,02%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 50,025                            | 0,05%         | 0,1989        | -0,11%          | 50,248                            | 0,50%         | 0,2           | 0               | 50,010                            | 0,02%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 50,027                            | 0,05%         | 0,2992        | -0,08%          | 50,029                            | 0,06%         | 0,3           | 0               | 50,010                            | 0,02%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 50,029                            | 0,06%         | 0,3996        | -0,04%          | 50,030                            | 0,06%         | 0,4           | 0               | 50,011                            | 0,02%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 50,032                            | 0,06%         | 0,5000        | 0,00%           | 50,032                            | 0,06%         | 0,5           | 0               | 50,011                            | 0,02%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 50,036                            | 0,07%         | 0,6004        | 0,04%           | 50,035                            | 0,07%         | 0,6           | 0               | 50,011                            | 0,02%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 50,041                            | 0,08%         | 0,7008        | 0,08%           | 50,039                            | 0,08%         | 0,7           | 0               | 50,010                            | 0,02%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 50,047                            | 0,09%         | 0,8012        | 0,12%           | 50,044                            | 0,09%         | 0,8           | 0               | 50,010                            | 0,02%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 50,053                            | 0,11%         | 0,9015        | 0,15%           | 50,051                            | 0,10%         | 0,9           | 0               | 50,009                            | 0,02%         |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 50,060                            | 0,12%         | 1,0018        | 0,18%           | 50,058                            | 0,12%         | 1             | 0               | 50,008                            | 0,02%         |

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.3:

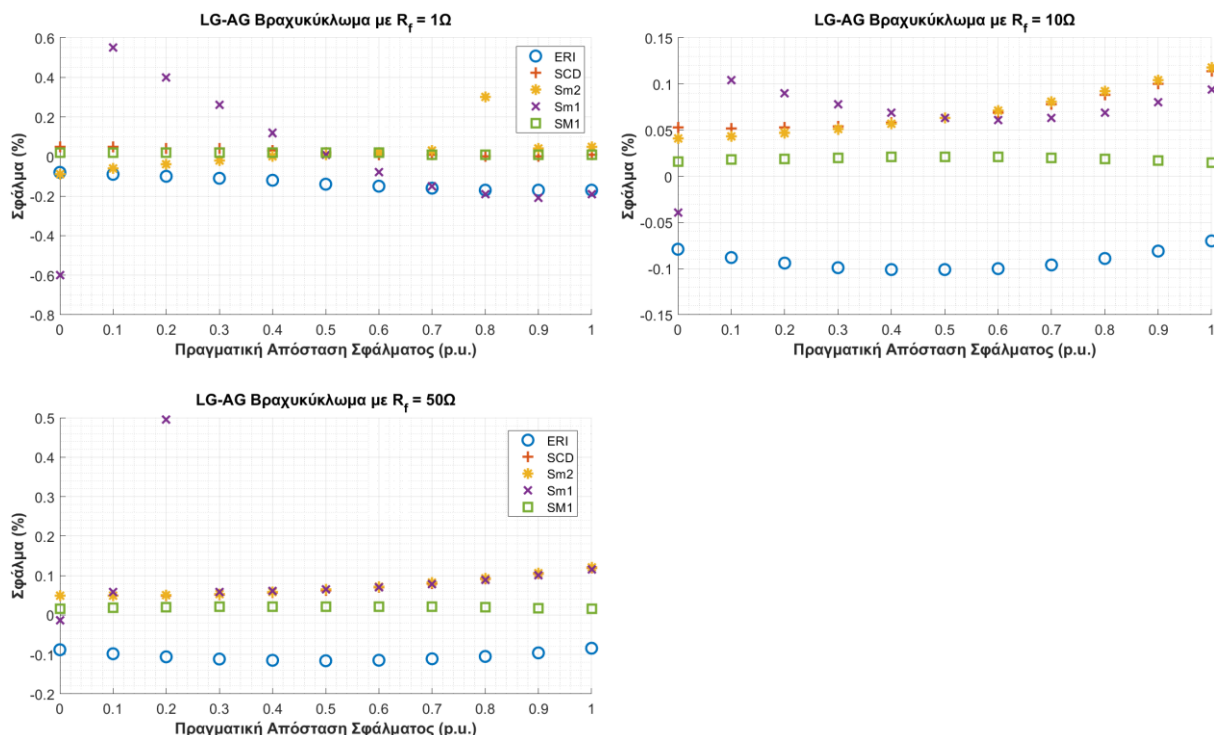




**Εικόνα 6.3:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση και τη θέση του σφάλματος. Η SM1 είναι σαφώς ανώτερη εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση. Γενικότερα, όλες οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες και διατηρούνται κάτω του 2%, άρα όλες οι μέθοδοι είναι αποδεκτές. Τέλος, παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και της Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση.

Στην Εικόνα 6.4 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.4:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι υπολογίζουν την αντίσταση σφάλματος με ικανοποιητική ακρίβεια σε κάθε περίπτωση. Η καλύτερη απόδοση είναι αυτή της SM1, καθώς παρουσιάζει σφάλμα 0,02% που είναι ουσιαστικά μηδενικό.



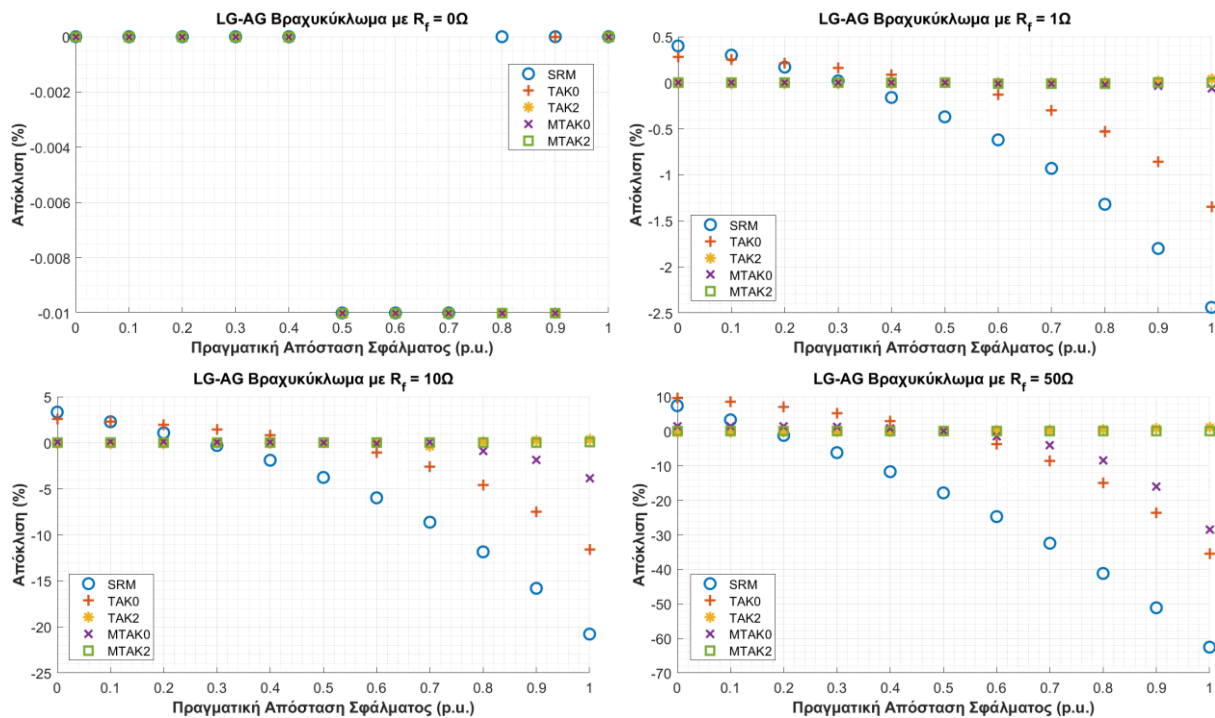
## 6.1.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο

Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTA0 και MTA2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0             | 0,00%           | 0              | 0,00%           | 0              | 0,00%           | 0               | 0,00%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1           | 0,00%           | 0,1            | 0,00%           | 0,1            | 0,00%           | 0,1             | 0,00%           | 0,1             | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2           | 0,00%           | 0,2            | 0,00%           | 0,2            | 0,00%           | 0,2             | 0,00%           | 0,2             | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3           | 0,00%           | 0,3            | 0,00%           | 0,3            | 0,00%           | 0,3             | 0,00%           | 0,3             | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4           | 0,00%           | 0,4            | 0,00%           | 0,4            | 0,00%           | 0,4             | 0,00%           | 0,4             | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4999        | -0,01%          | 0,4999         | -0,01%          | 0,4999         | -0,01%          | 0,4999          | -0,01%          | 0,4999          | -0,01%          |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 0,5999         | -0,01%          | 0,5999         | -0,01%          | 0,5999          | -0,01%          | 0,5999          | -0,01%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6999        | -0,01%          | 0,6999         | -0,01%          | 0,6999         | -0,01%          | 0,6999          | -0,01%          | 0,6999          | -0,01%          |
|                        | 0,8                                           | 0,8           | 0,00%           | 0,7999         | -0,01%          | 0,7999         | -0,01%          | 0,7999          | -0,01%          | 0,7999          | -0,01%          |
|                        | 0,9                                           | 0,9           | 0,00%           | 0,9            | 0,00%           | 0,8999         | -0,01%          | 0,8999          | -0,01%          | 0,8999          | -0,01%          |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1             | 0,00%           | 1              | 0,00%           | 1              | 0,00%           | 1               | 0,00%           | 1               | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,004         | 0,40%           | 0,0028         | 0,28%           | -0,0001        | -0,01%          | 0               | 0,00%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,103         | 0,30%           | 0,1025         | 0,25%           | 0,0999         | -0,01%          | 0,1             | 0,00%           | 0,1             | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2017        | 0,17%           | 0,2021         | 0,21%           | 0,1999         | -0,01%          | 0,2             | 0,00%           | 0,2             | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 0,3016         | 0,16%           | 0,2999         | -0,01%          | 0,3             | 0,00%           | 0,3             | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3984        | -0,16%          | 0,4009         | 0,09%           | 0,3999         | -0,01%          | 0,4             | 0,00%           | 0,4             | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4963        | -0,37%          | 0,5            | 0,00%           | 0,5            | 0,00%           | 0,5             | 0,00%           | 0,5             | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5938        | -0,62%          | 0,5987         | -0,13%          | 0,6            | 0,00%           | 0,5999          | -0,01%          | 0,5999          | -0,01%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6907        | -0,93%          | 0,697          | -0,30%          | 0,7            | 0,00%           | 0,6999          | -0,01%          | 0,6999          | -0,01%          |
|                        | 0,8                                           | 0,7868        | -1,32%          | 0,7947         | -0,53%          | 0,8001         | 0,01%           | 0,7998          | -0,02%          | 0,7999          | -0,01%          |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,882         | -1,80%          | 0,8914         | -0,86%          | 0,9002         | 0,02%           | 0,8997          | -0,03%          | 0,9             | 0,00%           |
|                        | 1                                             | 0,9756        | -2,44%          | 0,9865         | -1,35%          | 1,0004         | 0,04%           | 0,9994          | -0,06%          | 1               | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,0333        | 3,33%           | 0,0259         | 2,59%           | -0,001         | -0,10%          | 0,001           | 0,10%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1228        | 2,28%           | 0,1231         | 2,31%           | 0,0991         | -0,09%          | 0,1011          | 0,11%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2108        | 1,08%           | 0,2194         | 1,94%           | 0,1993         | -0,07%          | 0,2011          | 0,11%           | 0,2001          | 0,01%           |
|                        | 0,3                                           | 0,297         | -0,30%          | 0,3146         | 1,46%           | 0,2995         | -0,05%          | 0,301           | 0,10%           | 0,3             | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,381         | -1,90%          | 0,4084         | 0,84%           | 0,3997         | -0,03%          | 0,4008          | 0,08%           | 0,4             | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4623        | -3,77%          | 0,5001         | 0,01%           | 0,5            | 0,00%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5             | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5402        | -5,98%          | 0,5891         | -1,09%          | 0,6004         | 0,04%           | 0,5989          | -0,11%          | 0,6             | 0,00%           |
|                        | 0,7                                           | 0,6137        | -8,63%          | 0,6742         | -2,58%          | 0,6963         | -0,37%          | 0,701           | 0,10%           | 0,7             | 0,00%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,6815        | -11,85%         | 0,7538         | -4,62%          | 0,8016         | 0,16%           | 0,7912          | -0,88%          | 0,8             | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 0,7419        | -15,81%         | 0,8252         | -7,48%          | 0,9025         | 0,25%           | 0,8812          | -1,88%          | 0,9001          | 0,01%           |
|                        | 1                                             | 0,7922        | -20,78%         | 0,8841         | -11,59%         | 1,0037         | 0,37%           | 0,9612          | -3,88%          | 1,001           | 0,10%           |
|                        | 0                                             | 0,074         | 7,40%           | 0,0969         | 9,69%           | -0,0037        | -0,37%          | 0,0143          | 1,43%           | 0,000357        | 0,04%           |
|                        | 0,1                                           | 0,133         | 3,30%           | 0,1854         | 8,54%           | 0,0969         | -0,31%          | 0,1147          | 1,47%           | 0,1004          | 0,04%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1879        | -1,21%          | 0,2709         | 7,09%           | 0,1975         | -0,25%          | 0,2144          | 1,44%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2381        | -6,19%          | 0,3528         | 5,28%           | 0,2983         | -0,17%          | 0,3127          | 1,27%           | 0,3004          | 0,04%           |
|                        | 0,4                                           | 0,2829        | -11,71%         | 0,4298         | 2,98%           | 0,3993         | -0,07%          | 0,4088          | 0,88%           | 0,4004          | 0,04%           |
|                        | 0,5                                           | 0,3215        | -17,85%         | 0,5006         | 0,06%           | 0,5004         | 0,04%           | 0,5008          | 0,08%           | 0,5004          | 0,04%           |
|                        | 0,6                                           | 0,3528        | -24,72%         | 0,563          | -3,70%          | 0,6019         | 0,19%           | 0,586           | -1,40%          | 0,6005          | 0,05%           |
|                        | 0,7                                           | 0,3756        | -32,44%         | 0,6142         | -8,58%          | 0,7036         | 0,36%           | 0,6599          | -4,01%          | 0,7005          | 0,05%           |
|                        | 0,8                                           | 0,3882        | -41,18%         | 0,6499         | -15,01%         | 0,8057         | 0,57%           | 0,7149          | -8,51%          | 0,8005          | 0,05%           |
|                        | 0,9                                           | 0,3887        | -51,13%         | 0,6637         | -23,63%         | 0,9084         | 0,84%           | 0,7392          | -16,08%         | 0,9004          | 0,04%           |
|                        | 1                                             | 0,3746        | -62,54%         | 0,6455         | -35,45%         | 1,0117         | 1,17%           | 0,7151          | -28,49%         | 1,0004          | 0,04%           |

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTA0, MTA2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.5:



**Εικόνα 6.5:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, δηλαδή για  $R_f=0\Omega$ . Όσο η αντίστασή σφάλματος αυξάνεται, η SRM υποεκτιμά ολοένα και περισσότερο την θέση του σφάλματος. Η TAK0 παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από την SRM, αλλά και αυτή η μέθοδος έχει σημαντικές αποκλίσεις όσο αυξάνεται η αντίσταση σφάλματος. Υπερεκτιμά, σε σχετικά μικρό βαθμό, το σφάλμα όταν αυτό γίνεται κοντά στην θέση του ηλεκτρονόμου και σταδιακά όσο η απόσταση σφάλματος ηλεκτρονόμου αυξάνεται και ξεπερνά το 0.5p.u. της γραμμής, η TAK0 υποεκτιμά σημαντικά το σφάλμα. Η MTAK0 για  $m$  από 0 έως 0,5p.u. έχει εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση σφάλματος. Για  $m>0,5$ p.u. ακολουθεί την ίδια πορεία με την TAK0, αλλά έχει καλύτερη συμπεριφορά με μικρότερη απόκλιση. Η TAK2 παρουσιάζει πάρα πολύ καλή απόδοση και φαίνεται να μην επηρεάζεται από την αντίσταση σφάλματος. Η MTAK2, όπως αναμέναμε, έχει ακόμα καλύτερη απόκριση από την TAK2, σε κάθε δοκιμή παρουσιάζει βελτιωμένα αποτελέσματα με ουσιαστικά αμελητέα απόκλιση. Ακόμα, μόνο η απόκλιση των TAK2 και MTAK2 διατηρούνται συνεχώς κάτω τους 2% της γραμμής, δηλαδή είναι μικρότερη των 700m. Συνεπώς, από τις παραπάνω μεθόδους, μόνο αυτές έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

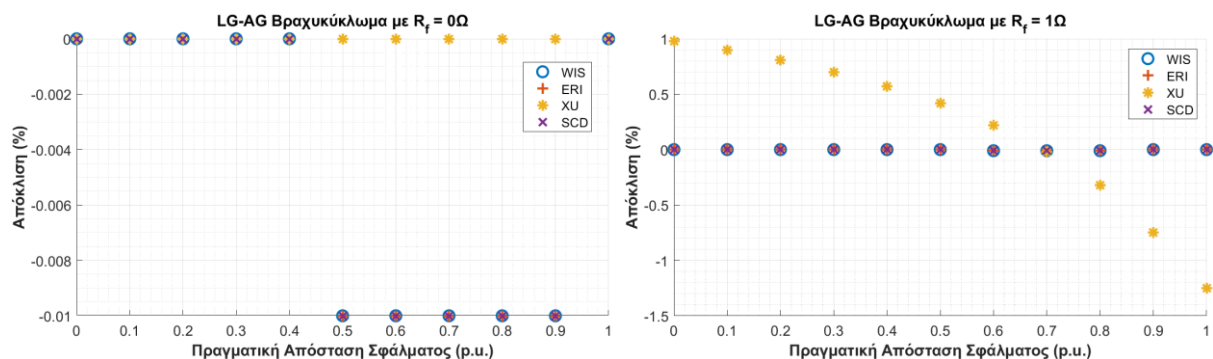
Συγκρίνοντας την απόδοση των μεθόδων χωρίς και με φορτίο, παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση η SRM υπερεκτιμά το σφάλμα ενώ στην δεύτερη το υποεκτιμά. Οι TAK0 και MTAK0 έχουν παρόμοια συμπεριφορά με μεγάλες αποκλίσεις παραπλήσιου μεγέθους για μεγάλες αντιστάσεις σφάλματος, οι οποίες όμως είναι σχετικά μικρότερες στην περίπτωση της φορτισμένης γραμμής. Οι TAK2 και MTAK2 σε κάθε περίπτωση έχουν πολύ καλή απόδοση.

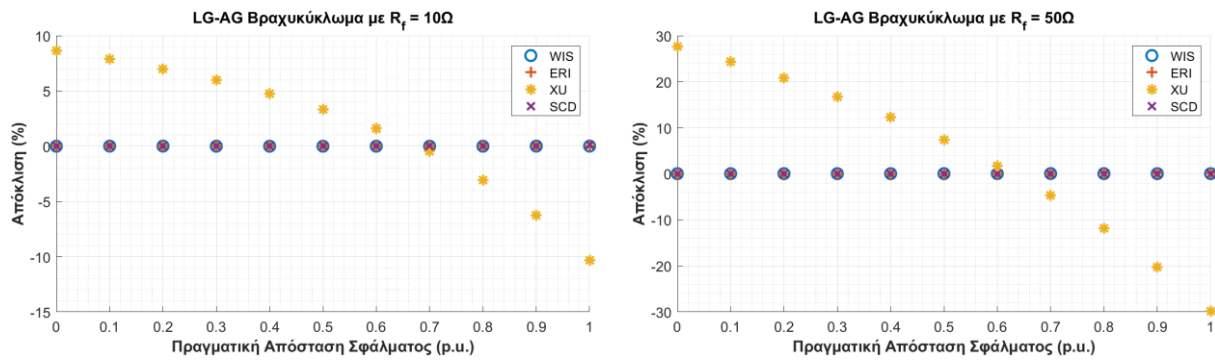
Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | WIS (p.u.) | Απόκλιση (%) | ERI (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος ERI (Ω) | Σφάλμα (%) | XU (p.u.) | Απόκλιση (%) | SCD (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SCD (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|-----------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0          | 0,00%        | 0          | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1        | 0,00%        | 0,1        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2        | 0,00%        | 0,2        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3        | 0,00%        | 0,3        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4        | 0,00%        | 0,4        | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,4999     | -0,01%       | 0,4999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,5000    | 0,00%        | 0,4999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 0,5999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,6000    | 0,00%        | 0,5999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,6999     | -0,01%       | 0,6999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,7000    | 0,00%        | 0,6999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,7999     | -0,01%       | 0,7999     | -0,01%       | 0,002                       | -          | 0,8000    | 0,00%        | 0,7999     | -0,01%       | 0,001                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,8999     | -0,01%       | 0,8999     | -0,01%       | 0,002                       | -          | 0,9000    | 0,00%        | 0,8999     | -0,01%       | 0,002                       | -          |
|                     | 1                                    | 1          | 0,00%        | 1          | 0,00%        | 0,002                       | -          | 1,0000    | 0,00%        | 1,0000     | 0,00%        | 0,002                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 0                                    | 0          | 0,00%        | 0          | 0,00%        | 0,999                       | -0,08%     | 0,0098    | 0,98%        | 0,0000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,05%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1        | 0,00%        | 0,1        | 0,00%        | 0,999                       | -0,09%     | 0,1090    | 0,90%        | 0,1000     | 0,00%        | 1,005                       | 0,50%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2        | 0,00%        | 0,2        | 0,00%        | 0,999                       | -0,10%     | 0,2081    | 0,81%        | 0,2000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,04%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3        | 0,00%        | 0,3        | 0,00%        | 0,999                       | -0,12%     | 0,3070    | 0,70%        | 0,3000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4        | 0,00%        | 0,4        | 0,00%        | 0,999                       | -0,14%     | 0,4057    | 0,57%        | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5        | 0,00%        | 0,5        | 0,00%        | 0,998                       | -0,16%     | 0,5042    | 0,42%        | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,00%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 0,5999     | -0,01%       | 0,998                       | -0,18%     | 0,6022    | 0,22%        | 0,5999     | -0,01%       | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,6999     | -0,01%       | 0,6999     | -0,01%       | 0,998                       | -0,20%     | 0,6998    | -0,02%       | 0,6999     | -0,01%       | 1,000                       | -0,03%     |
|                     | 0,8                                  | 0,7999     | -0,01%       | 0,7999     | -0,01%       | 0,998                       | -0,22%     | 0,7968    | -0,32%       | 0,7999     | -0,01%       | 1,000                       | -0,04%     |
|                     | 0,9                                  | 0,9        | 0,00%        | 0,9        | 0,00%        | 0,998                       | -0,23%     | 0,8925    | -0,75%       | 0,9000     | 0,00%        | 1,000                       | -0,05%     |
|                     | 1                                    | 1          | 0,00%        | 1          | 0,00%        | 0,998                       | -0,24%     | 0,9875    | -1,25%       | 1,0000     | 0,00%        | 0,999                       | -0,06%     |
| Rf = 10Ω            | 0                                    | 0          | 0,00%        | 0          | 0,00%        | 9,992                       | -0,08%     | 0,0866    | 8,66%        | 0,0000     | 0,00%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1001     | 0,01%        | 0,1001     | 0,01%        | 9,991                       | -0,09%     | 0,1789    | 7,89%        | 0,1001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2001     | 0,01%        | 0,2001     | 0,01%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,2701    | 7,01%        | 0,2001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3        | 0,00%        | 0,3        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,3598    | 5,98%        | 0,3000     | 0,00%        | 10,005                      | 0,05%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4        | 0,00%        | 0,4        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,4477    | 4,77%        | 0,4000     | 0,00%        | 10,006                      | 0,06%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5        | 0,00%        | 0,5        | 0,00%        | 9,990                       | -0,11%     | 0,5333    | 3,33%        | 0,5000     | 0,00%        | 10,006                      | 0,06%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6        | 0,00%        | 0,6        | 0,00%        | 9,990                       | -0,11%     | 0,6161    | 1,61%        | 0,6000     | 0,00%        | 10,007                      | 0,07%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7        | 0,00%        | 0,7        | 0,00%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,6952    | -0,48%       | 0,7000     | 0,00%        | 10,008                      | 0,08%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8        | 0,00%        | 0,8001     | 0,01%        | 9,990                       | -0,10%     | 0,7695    | -3,05%       | 0,8000     | 0,00%        | 10,009                      | 0,09%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9001     | 0,01%        | 0,9001     | 0,01%        | 9,991                       | -0,09%     | 0,8374    | -6,26%       | 0,9001     | 0,01%        | 10,010                      | 0,10%      |
|                     | 1                                    | 1,0001     | 0,01%        | 1,0001     | 0,01%        | 9,991                       | -0,09%     | 0,8965    | -10,35%      | 1,0010     | 0,10%        | 10,012                      | 0,12%      |
| Rf = 50Ω            | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 0,0003     | 0,03%        | 49,952                      | -0,10%     | 0,2764    | 27,64%       | 0,0002     | 0,02%        | 50,006                      | 0,01%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 0,1003     | 0,03%        | 49,947                      | -0,11%     | 0,3439    | 24,39%       | 0,1002     | 0,02%        | 50,009                      | 0,02%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2004     | 0,04%        | 0,2004     | 0,04%        | 49,943                      | -0,11%     | 0,4079    | 20,79%       | 0,2002     | 0,02%        | 50,014                      | 0,03%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3004     | 0,04%        | 0,3004     | 0,04%        | 49,940                      | -0,12%     | 0,4679    | 16,79%       | 0,3002     | 0,02%        | 50,019                      | 0,04%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4004     | 0,04%        | 0,4004     | 0,04%        | 49,938                      | -0,12%     | 0,5234    | 12,34%       | 0,4002     | 0,02%        | 50,025                      | 0,05%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5004     | 0,04%        | 0,5004     | 0,04%        | 49,937                      | -0,13%     | 0,5735    | 7,35%        | 0,5002     | 0,02%        | 50,032                      | 0,06%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6005     | 0,05%        | 0,6005     | 0,05%        | 49,936                      | -0,13%     | 0,6174    | 1,74%        | 0,6002     | 0,02%        | 50,040                      | 0,08%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7005     | 0,05%        | 0,7005     | 0,05%        | 49,936                      | -0,13%     | 0,6537    | -4,63%       | 0,7003     | 0,03%        | 50,048                      | 0,10%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8005     | 0,05%        | 0,8006     | 0,06%        | 49,937                      | -0,13%     | 0,6811    | -11,89%      | 0,8003     | 0,03%        | 50,058                      | 0,12%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9004     | 0,04%        | 0,9006     | 0,06%        | 49,938                      | -0,12%     | 0,6977    | -20,23%      | 0,9003     | 0,03%        | 50,068                      | 0,14%      |
|                     | 1                                    | 1,0004     | 0,04%        | 1,0007     | 0,07%        | 49,939                      | -0,12%     | 0,7012    | -29,88%      | 1,0003     | 0,03%        | 50,079                      | 0,16%      |

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.6:





**Εικόνα 6.6:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, δηλαδή για  $R_f=0\Omega$ . Η WIS και η ERI παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά. Ακόμα, η μέθοδος του Eriksson εκτιμά την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις. Η XU είναι φανερό ότι εξαρτάται από την αντίσταση σφάλματος και όσο αυτή αυξάνεται, αυξάνεται αναλογικά και η απόκλιση της μεθόδου, δηλαδή όταν η αντίσταση σφάλματος δεκαπλασιάζεται, σχεδόν δεκαπλασιάζεται και η απόκλιση της μεθόδου. Η SCD εμφανίζει εξαιρετική συμπεριφορά ανεξάρτητα από την θέση του σφάλματος και την αντίσταση, την οποία υπολογίζει με πολύ καλή ακρίβεια. Επίσης, οι αποκλίσεις των μεθόδων WIS, ERI και SCD διατηρούνται κάτω του 2% της γραμμής για όλες τις δοκιμές, δηλαδή είναι μικρότερες των 700m. Επομένως, έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Συγκρίνοντας την απόδοση των μεθόδων χωρίς και με φορτίο, παρατηρούμε έχουμε παρόμοια συμπεριφορά με την δεύτερη περίπτωση να παρουσιάζει μικρότερες αποκλίσεις. Εξαίρεση είναι η XU, η οποία με φορτισμένη γραμμή ξεκινάει από υπερεκτίμηση, σταδιακά μειώνεται και στην συνέχεια υποεκτιμά την θέση του σφάλματος. Παρόλα αυτά και η XU έχει καλύτερη απόδοση στην περίπτωση της φορτισμένης γραμμής. Τέλος, οι WIS, ERI και SCD υπολογίζουν τη θέση και την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια σε κάθε περίπτωση.

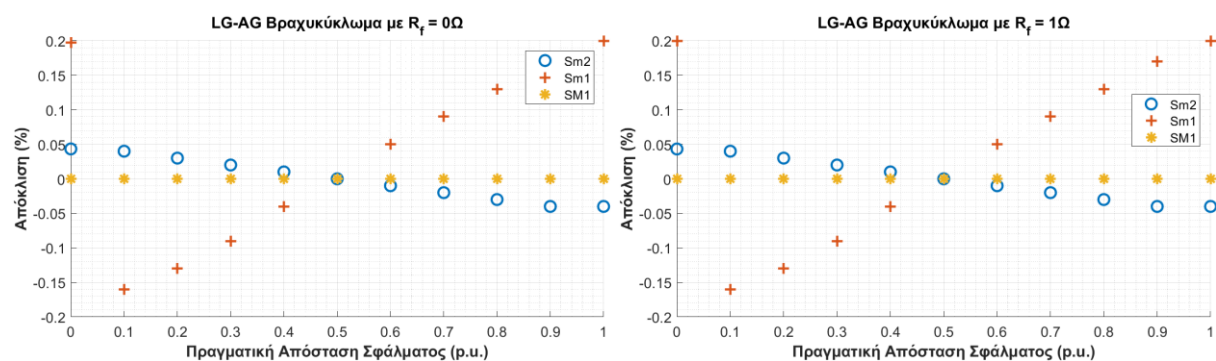


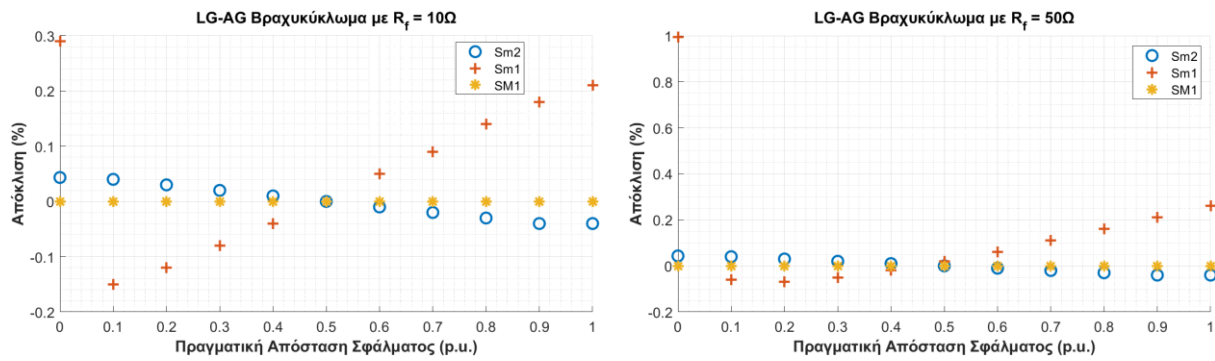
Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | Sm2 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm2 (Ω) | Σφάλμα (%) | Sm1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm1 (Ω) | Σφάλμα (%) | SM1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SM1 (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 0,001                       | -          | 0,0020     | 0,20%        | 0,003                       | -          | 0          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 0,001                       | -          | 0,0984     | -0,16%       | 0,002                       | -          | 0,1        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 0,000                       | -          | 0,1987     | -0,13%       | 0,001                       | -          | 0,2        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,2991     | -0,09%       | 0,000                       | -          | 0,3        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 0,001                       | -          | 0,3996     | -0,04%       | 0,000                       | -          | 0,4        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 0,001                       | -          | 0,5000     | 0,00%        | 0,001                       | -          | 0,5        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,6005     | 0,05%        | 0,001                       | -          | 0,6        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 0,001                       | -          | 0,7009     | 0,09%        | 0,001                       | -          | 0,7        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 0,001                       | -          | 0,8013     | 0,13%        | 0,001                       | -          | 0,8        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 0,002                       | -          | 0,9017     | 0,17%        | 0,001                       | -          | 0,9        | 0            | 0,000                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 1                                    | 0,9996     | -0,04%       | 0,002                       | -          | 1,0020     | 0,20%        | 0,001                       | -          | 1          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 1,000                       | -0,02%     | 0,0020     | 0,20%        | 0,997                       | -0,30%     | 0          | 0            | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 1,000                       | -0,01%     | 0,0984     | -0,16%       | 1,003                       | 0,28%      | 0,1        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 1,001                       | 0,10%      | 0,1987     | -0,13%       | 1,002                       | 0,19%      | 0,2        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 1,000                       | 0,01%      | 0,2991     | -0,09%       | 1,001                       | 0,11%      | 0,3        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,01%      | 0,3996     | -0,04%       | 1,000                       | 0,04%      | 0,4        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,00%      | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,00%      | 0,5        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 1,000                       | -0,01%     | 0,6005     | 0,05%        | 1,000                       | -0,02%     | 0,6        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 1,000                       | -0,03%     | 0,7009     | 0,09%        | 1,000                       | -0,03%     | 0,7        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 1,000                       | -0,05%     | 0,8013     | 0,13%        | 1,000                       | -0,02%     | 0,8        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
| Rf = 10Ω            | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 0,999                       | -0,07%     | 0,9017     | 0,17%        | 1,000                       | 0,01%      | 0,9        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 1                                    | 0,9996     | -0,04%       | 0,999                       | -0,08%     | 1,0020     | 0,20%        | 1,001                       | 0,05%      | 1          | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 10,004                      | 0,04%      | 0,0029     | 0,29%        | 9,999                       | -0,01%     | 0          | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 10,004                      | 0,04%      | 0,0985     | -0,15%       | 10,007                      | 0,07%      | 0,1        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 10,005                      | 0,05%      | 0,1988     | -0,12%       | 10,006                      | 0,06%      | 0,2        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 10,005                      | 0,05%      | 0,2992     | -0,08%       | 10,006                      | 0,06%      | 0,3        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 10,006                      | 0,06%      | 0,3996     | -0,04%       | 10,006                      | 0,06%      | 0,4        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 10,006                      | 0,06%      | 0,5000     | 0,00%        | 10,006                      | 0,06%      | 0,5        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 10,007                      | 0,07%      | 0,6005     | 0,05%        | 10,007                      | 0,07%      | 0,6        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 10,008                      | 0,08%      | 0,7009     | 0,09%        | 10,008                      | 0,08%      | 0,7        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
| Rf = 50Ω            | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 10,009                      | 0,09%      | 0,8014     | 0,14%        | 10,009                      | 0,09%      | 0,8        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 10,010                      | 0,10%      | 0,9018     | 0,18%        | 10,011                      | 0,11%      | 0,9        | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 1                                    | 0,9996     | -0,04%       | 10,011                      | 0,11%      | 1,0021     | 0,21%        | 10,013                      | 0,13%      | 1          | 0            | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 50,005                      | 0,01%      | 0,0099     | 0,99%        | 49,985                      | -0,03%     | 0          | 0            | 50,008                      | 0,02%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 50,009                      | 0,02%      | 0,0994     | -0,06%       | 50,011                      | 0,02%      | 0,1        | 0            | 50,009                      | 0,02%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 50,014                      | 0,03%      | 0,1993     | -0,07%       | 50,015                      | 0,03%      | 0,2        | 0            | 50,010                      | 0,02%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 50,019                      | 0,04%      | 0,2995     | -0,05%       | 50,020                      | 0,04%      | 0,3        | 0            | 50,010                      | 0,02%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 50,025                      | 0,05%      | 0,3998     | -0,02%       | 50,025                      | 0,05%      | 0,4        | 0            | 50,011                      | 0,02%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 50,032                      | 0,06%      | 0,5002     | 0,02%        | 50,032                      | 0,06%      | 0,5        | 0            | 50,011                      | 0,02%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 50,040                      | 0,08%      | 0,6006     | 0,06%        | 50,040                      | 0,08%      | 0,6        | 0            | 50,011                      | 0,02%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 50,048                      | 0,10%      | 0,7011     | 0,11%        | 50,048                      | 0,10%      | 0,7        | 0            | 50,010                      | 0,02%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 50,574                      | 1,15%      | 0,8016     | 0,16%        | 50,058                      | 0,12%      | 0,8        | 0            | 50,010                      | 0,02%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 50,067                      | 0,13%      | 0,9021     | 0,21%        | 50,069                      | 0,14%      | 0,9        | 0            | 50,009                      | 0,02%      |
|                     | 1                                    | 0,9996     | -0,04%       | 50,078                      | 0,16%      | 1,0026     | 0,26%        | 50,081                      | 0,16%      | 1          | 0            | 50,008                      | 0,02%      |

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.7:

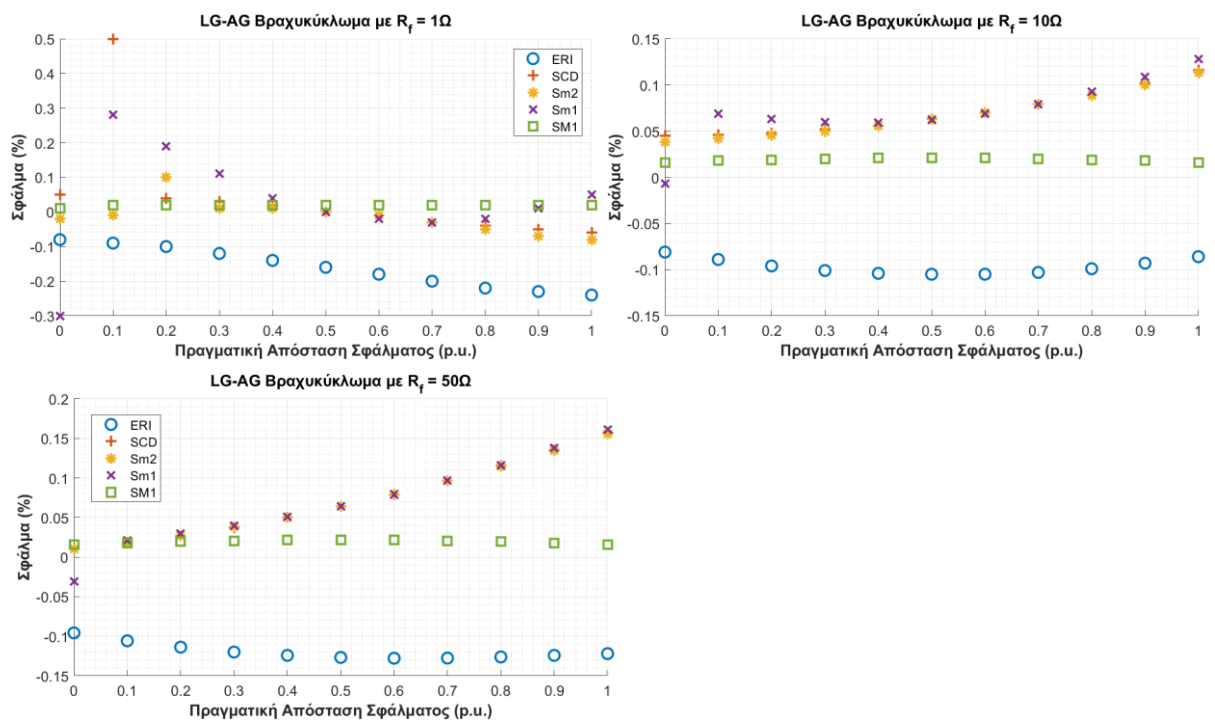




**Εικόνα 6.7:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση και τη θέση του σφάλματος. Η SM1 είναι σαφώς ανώτερη εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση. Γενικότερα, όλες οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες και διατηρούνται κάτω του 2%, άρα όλες οι μέθοδοι είναι αποδεκτές. Τέλος, παρατηρούμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και της Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση.

Στην Εικόνα 6.8 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.8:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι υπολογίζουν την αντίσταση σφάλματος με ικανοποιητική ακρίβεια σε κάθε περίπτωση. Η καλύτερη απόδοση είναι αυτή της SM1, καθώς και εδώ παρουσιάζει σφάλμα 0,02% που είναι ουσιαστικά μηδενικό.

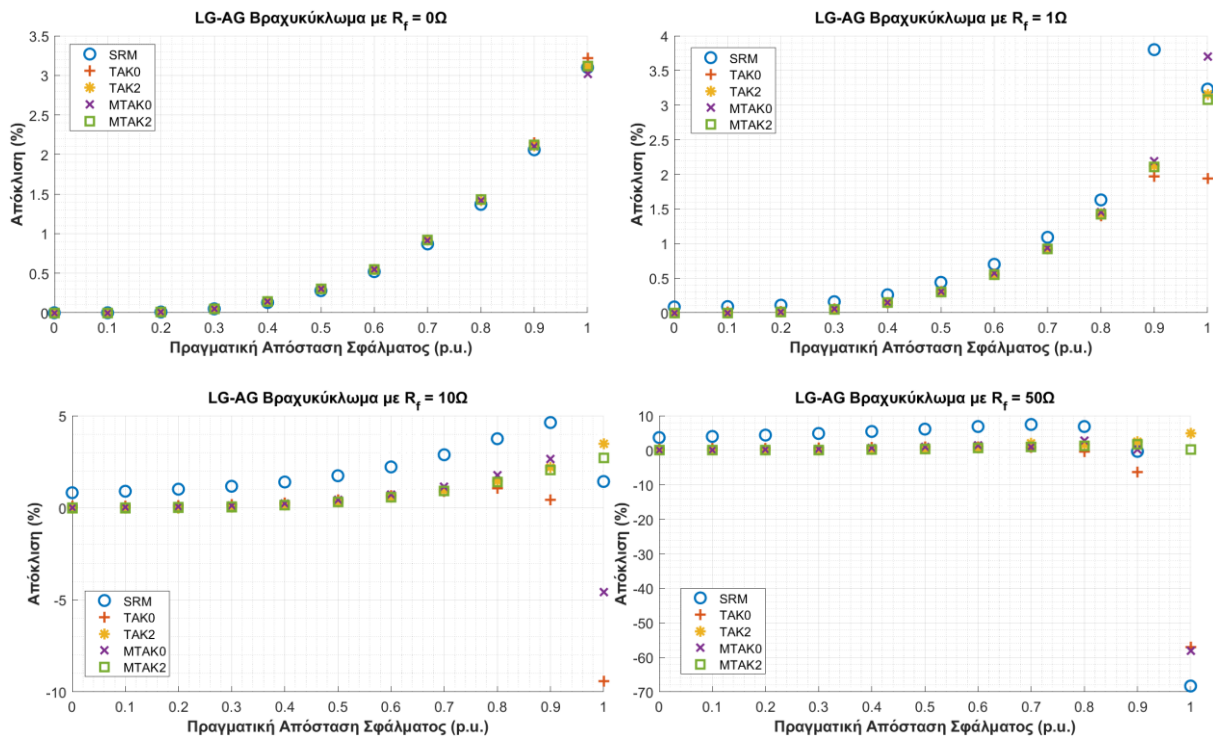
### 6.1.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο

Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3005        | 0,05%           | 0,3005         | 0,05%           | 0,3005         | 0,05%           | 0,3005          | 0,05%           | 0,3005          | 0,05%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4013        | 0,13%           | 0,4014         | 0,14%           | 0,4014         | 0,14%           | 0,4014          | 0,14%           | 0,4014          | 0,14%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5028        | 0,28%           | 0,5030         | 0,30%           | 0,5030         | 0,30%           | 0,5030          | 0,30%           | 0,5030          | 0,30%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6052        | 0,52%           | 0,6055         | 0,55%           | 0,6055         | 0,55%           | 0,6055          | 0,55%           | 0,6055          | 0,55%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7087        | 0,87%           | 0,7092         | 0,92%           | 0,7092         | 0,92%           | 0,7091          | 0,91%           | 0,7092          | 0,92%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8137        | 1,37%           | 0,8143         | 1,43%           | 0,8142         | 1,42%           | 0,8142          | 1,42%           | 0,8143          | 1,43%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9206        | 2,06%           | 0,9215         | 2,15%           | 0,9211         | 2,11%           | 0,9210          | 2,10%           | 0,9212          | 2,12%           |
|                        | 1                                             | 1,0310        | 3,10%           | 1,0322         | 3,22%           | 1,0311         | 3,11%           | 1,0302          | 3,02%           | 1,0312          | 3,12%           |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0008        | 0,08%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1009        | 0,09%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2011        | 0,11%           | 0,2002         | 0,02%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3016        | 0,16%           | 0,3006         | 0,06%           | 0,3005         | 0,05%           | 0,3006          | 0,06%           | 0,3005          | 0,05%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4026        | 0,26%           | 0,4015         | 0,15%           | 0,4014         | 0,14%           | 0,4015          | 0,15%           | 0,4015          | 0,15%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5044        | 0,44%           | 0,5031         | 0,31%           | 0,5030         | 0,30%           | 0,5031          | 0,31%           | 0,5030          | 0,30%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6070        | 0,70%           | 0,6056         | 0,56%           | 0,6055         | 0,55%           | 0,6057          | 0,57%           | 0,6055          | 0,55%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7109        | 1,09%           | 0,7092         | 0,92%           | 0,7092         | 0,92%           | 0,7094          | 0,94%           | 0,7092          | 0,92%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8163        | 1,63%           | 0,8140         | 1,40%           | 0,8143         | 1,43%           | 0,8145          | 1,45%           | 0,8142          | 1,42%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9380        | 3,80%           | 0,9197         | 1,97%           | 0,9212         | 2,12%           | 0,9219          | 2,19%           | 0,9211          | 2,11%           |
|                        | 1                                             | 1,0323        | 3,23%           | 1,0194         | 1,94%           | 1,0315         | 3,15%           | 1,0370          | 3,70%           | 1,0308          | 3,08%           |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0082        | 0,82%           | 0,0008         | 0,08%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1090        | 0,90%           | 0,1009         | 0,09%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1002          | 0,02%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2101        | 1,01%           | 0,2012         | 0,12%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2006          | 0,06%           | 0,2002          | 0,02%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3117        | 1,17%           | 0,3018         | 0,18%           | 0,3006         | 0,06%           | 0,3012          | 0,12%           | 0,3006          | 0,06%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4140        | 1,40%           | 0,4027         | 0,27%           | 0,4015         | 0,15%           | 0,4024          | 0,24%           | 0,4015          | 0,15%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5174        | 1,74%           | 0,5043         | 0,43%           | 0,5031         | 0,31%           | 0,5043          | 0,43%           | 0,5031          | 0,31%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6222        | 2,22%           | 0,6065         | 0,65%           | 0,6056         | 0,56%           | 0,6072          | 0,72%           | 0,6056          | 0,56%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7288        | 2,88%           | 0,7090         | 0,90%           | 0,7093         | 0,93%           | 0,7115          | 1,15%           | 0,7092          | 0,92%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8375        | 3,75%           | 0,8107         | 1,07%           | 0,8145         | 1,45%           | 0,8177          | 1,77%           | 0,8141          | 1,41%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9463        | 4,63%           | 0,9043         | 0,43%           | 0,9219         | 2,19%           | 0,9264          | 2,64%           | 0,9205          | 2,05%           |
|                        | 1                                             | 1,0143        | 1,43%           | 0,9059         | -9,41%          | 1,0349         | 3,49%           | 0,9541          | -4,59%          | 1,0270          | 2,70%           |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0367        | 3,67%           | 0,0038         | 0,38%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0002          | 0,02%           | 0,0002          | 0,02%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1400        | 4,00%           | 0,1047         | 0,47%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1012          | 0,12%           | 0,1003          | 0,03%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2439        | 4,39%           | 0,2056         | 0,56%           | 0,2003         | 0,03%           | 0,2024          | 0,24%           | 0,2005          | 0,05%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3486        | 4,86%           | 0,3068         | 0,68%           | 0,3008         | 0,08%           | 0,3041          | 0,41%           | 0,3010          | 0,10%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4544        | 5,44%           | 0,4081         | 0,81%           | 0,4018         | 0,18%           | 0,4064          | 0,64%           | 0,4019          | 0,19%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5612        | 6,12%           | 0,5094         | 0,94%           | 0,5035         | 0,35%           | 0,5097          | 0,97%           | 0,5035          | 0,35%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6687        | 6,87%           | 0,6102         | 1,02%           | 0,6061         | 0,61%           | 0,6144          | 1,44%           | 0,6059          | 0,59%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7746        | 7,46%           | 0,7083         | 0,83%           | 0,7210         | 2,10%           | 0,7100          | 1,00%           | 0,7091          | 0,91%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8687        | 6,87%           | 0,7961         | -0,39%          | 0,8156         | 1,56%           | 0,8284          | 2,84%           | 0,8133          | 1,33%           |
|                        | 0,9                                           | 0,8967        | -0,33%          | 0,8364         | -6,36%          | 0,9247         | 2,47%           | 0,9023          | 0,23%           | 0,9175          | 1,75%           |
|                        | 1                                             | 0,3171        | -68,29%         | 0,4294         | -57,06%         | 1,0497         | 4,97%           | 0,4192          | -58,08%         | 1,0024          | 0,24%           |

**Πίνακας 6.8:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.9:



**Εικόνα 6.9:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν ικανοποιητική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση και όταν αυτή έχει μικρή τιμή. Η αύξηση της αντίστασης και η αύξηση της απόστασης μεταξύ της θέσης του σφάλματος και της θέσης του ηλεκτρονόμου οδηγεί στην αύξηση της απόκλισης όλων των αλγορίθμων. Επίσης, η MTAK2 εμφανίζει και εδώ την καλύτερη συμπεριφορά μεταξύ των μεθόδων, διορθώνοντας την TAK2 σε κάθε δοκιμή. Ακόμα, για  $R_f=10\Omega$  και  $R_f=50\Omega$  και για μεγάλες τιμές του  $m$  παρατηρούμε ουσιαστικά κατάρρευση των μεθόδων SRM, TAK0, MTAK0 με εκθετική αύξηση της απόκλισης στα αρνητικά που σηματοδοτεί στην υποεκτίμηση της θέσης του σφάλματος από αυτές τις μεθόδους. Τέλος, η απόκλιση σε καμία μέθοδο δεν διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Συνεπώς, καμία δεν έχει αποδεκτή συμπεριφορά σε αυτήν την περίπτωση.

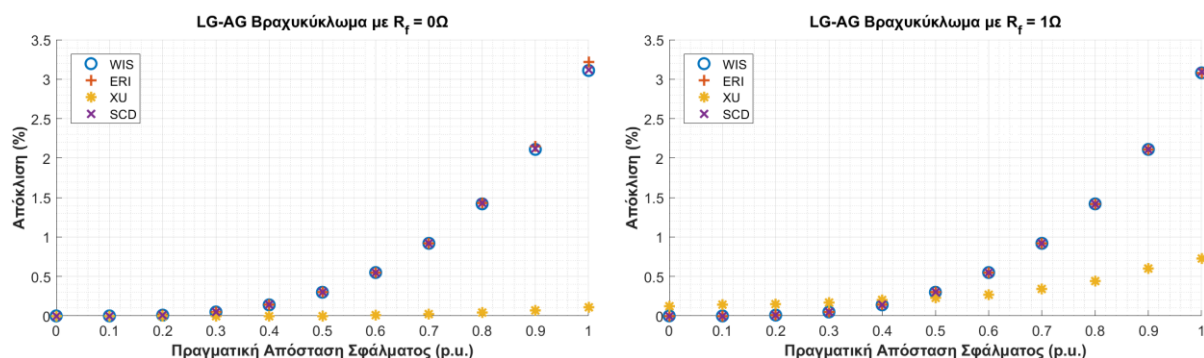


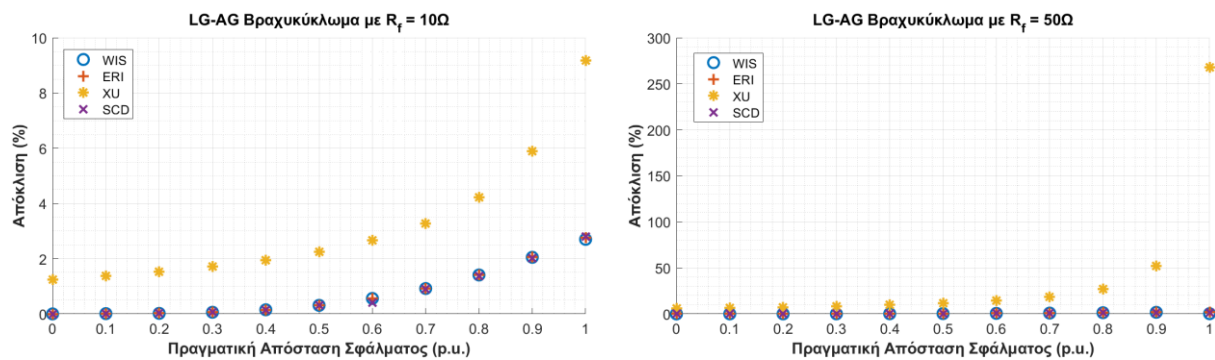
Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,003                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,004                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001        | 0,01%           | 0,018                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2001        | 0,01%           | 0,019                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3005        | 0,05%           | 0,3005        | 0,05%           | 0,044                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3005        | 0,05%           | 0,046                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4014        | 0,14%           | 0,4014        | 0,14%           | 0,078                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4014        | 0,14%           | 0,087                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5030        | 0,30%           | 0,5030        | 0,30%           | 0,123                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5030        | 0,30%           | 0,136                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6055        | 0,55%           | 0,6055        | 0,55%           | 0,170                             | -             | 0,6001       | 0,01%           | 0,6055        | 0,55%           | 0,185                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7092        | 0,92%           | 0,7092        | 0,92%           | 0,203                             | -             | 0,7002       | 0,02%           | 0,7092        | 0,92%           | 0,222                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8142        | 1,42%           | 0,8143        | 1,43%           | 0,208                             | -             | 0,8004       | 0,04%           | 0,8143        | 1,43%           | 0,231                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9211        | 2,11%           | 0,9215        | 2,15%           | 0,201                             | -             | 0,9007       | 0,07%           | 0,9212        | 2,12%           | 0,194                             | -             |
|                        | 1                                             | 1,0311        | 3,11%           | 1,0322        | 3,22%           | 0,104                             | -             | 1,0011       | 0,11%           | 1,0312        | 3,12%           | 0,086                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,993                             | -0,66%        | 0,0013       | 0,13%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,012                             | 1,16%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,985                             | -1,48%        | 0,1014       | 0,14%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,018                             | 1,82%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001        | 0,01%           | 0,969                             | -3,13%        | 0,2015       | 0,15%           | 0,2001        | 0,01%           | 1,014                             | 1,35%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3005        | 0,05%           | 0,3005        | 0,05%           | 0,941                             | -5,87%        | 0,3017       | 0,17%           | 0,3005        | 0,05%           | 0,995                             | -0,52%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4014        | 0,14%           | 0,4014        | 0,14%           | 0,904                             | -9,64%        | 0,4020       | 0,20%           | 0,4014        | 0,14%           | 0,963                             | -3,71%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5030        | 0,30%           | 0,5030        | 0,30%           | 0,859                             | -14,09%       | 0,5023       | 0,23%           | 0,5030        | 0,30%           | 0,922                             | -7,80%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6055        | 0,55%           | 0,6055        | 0,55%           | 0,814                             | -18,58%       | 0,6027       | 0,27%           | 0,6055        | 0,55%           | 0,880                             | -11,97%       |
|                        | 0,7                                           | 0,7092        | 0,92%           | 0,7092        | 0,92%           | 0,778                             | -22,19%       | 0,7034       | 0,34%           | 0,7092        | 0,92%           | 0,850                             | -15,03%       |
|                        | 0,8                                           | 0,8142        | 1,42%           | 0,8142        | 1,42%           | 0,760                             | -23,96%       | 0,8044       | 0,44%           | 0,8142        | 1,42%           | 0,846                             | -15,41%       |
|                        | 0,9                                           | 0,9211        | 2,11%           | 0,9211        | 2,11%           | 0,764                             | -23,62%       | 0,9060       | 0,60%           | 0,9211        | 2,11%           | 0,888                             | -11,16%       |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 9,993                             | -0,07%        | 0,0124       | 1,24%           | 0,0000        | 0,00%           | 10,115                            | 1,15%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 9,885                             | -1,15%        | 0,1137       | 1,37%           | 0,1001        | 0,01%           | 10,214                            | 2,14%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2002        | 0,02%           | 0,2002        | 0,02%           | 9,844                             | -1,56%        | 0,2152       | 1,52%           | 0,2002        | 0,02%           | 10,298                            | 2,98%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3006        | 0,06%           | 0,3006        | 0,06%           | 9,806                             | -1,94%        | 0,3171       | 1,71%           | 0,3006        | 0,06%           | 10,362                            | 3,62%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4015        | 0,15%           | 0,4015        | 0,15%           | 9,767                             | -2,33%        | 0,4194       | 1,94%           | 0,4015        | 0,15%           | 10,407                            | 4,07%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5031        | 0,31%           | 0,5031        | 0,31%           | 9,726                             | -2,75%        | 0,5225       | 2,25%           | 0,5031        | 0,31%           | 10,437                            | 4,37%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6056        | 0,56%           | 0,6056        | 0,56%           | 9,676                             | -3,24%        | 0,6267       | 2,67%           | 0,6041        | 0,41%           | 10,461                            | 4,61%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7092        | 0,92%           | 0,7092        | 0,92%           | 9,607                             | -3,93%        | 0,7327       | 3,27%           | 0,7091        | 0,91%           | 10,489                            | 4,89%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8141        | 1,41%           | 0,8141        | 1,41%           | 9,480                             | -5,20%        | 0,8422       | 4,22%           | 0,8138        | 1,38%           | 10,538                            | 5,38%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9205        | 2,05%           | 0,9205        | 2,05%           | 9,166                             | -8,34%        | 0,9590       | 5,90%           | 0,9202        | 2,02%           | 10,627                            | 6,27%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0002        | 0,02%           | 0,0002        | 0,02%           | 49,663                            | -0,67%        | 0,0583       | 5,83%           | 0,0003        | 0,03%           | 50,360                            | 0,72%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1003        | 0,03%           | 0,1003        | 0,03%           | 49,429                            | -1,14%        | 0,1640       | 6,40%           | 0,1004        | 0,04%           | 50,856                            | 1,71%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2005        | 0,05%           | 0,2005        | 0,05%           | 49,275                            | -1,45%        | 0,2733       | 7,33%           | 0,2006        | 0,06%           | 51,317                            | 2,63%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3010        | 0,10%           | 0,3010        | 0,10%           | 49,183                            | -1,63%        | 0,3837       | 8,37%           | 0,3011        | 0,11%           | 51,738                            | 3,47%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4019        | 0,19%           | 0,4019        | 0,19%           | 49,136                            | -1,73%        | 0,4972       | 9,72%           | 0,4020        | 0,20%           | 52,117                            | 4,23%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5035        | 0,35%           | 0,5035        | 0,35%           | 49,104                            | -1,79%        | 0,6157       | 11,57%          | 0,5035        | 0,35%           | 52,460                            | 4,92%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6059        | 0,59%           | 0,6059        | 0,59%           | 49,041                            | -1,92%        | 0,7429       | 14,29%          | 0,6057        | 0,57%           | 52,771                            | 5,54%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7091        | 0,91%           | 0,7091        | 0,91%           | 48,852                            | -2,30%        | 0,8870       | 18,70%          | 0,7087        | 0,87%           | 53,065                            | 6,13%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8133        | 1,33%           | 0,8133        | 1,33%           | 48,337                            | -3,33%        | 1,0731       | 27,31%          | 0,8124        | 1,24%           | 53,354                            | 6,71%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9175        | 1,75%           | 0,9179        | 1,79%           | 47,056                            | -5,89%        | 1,4236       | 52,36%          | 0,9161        | 1,61%           | 53,654                            | 7,31%         |
| Rf = 50Ω               | 1                                             | 1,0024        | 0,24%           | 1,0174        | 1,74%           | 44,996                            | -10,01%       | 3,6783       | 267,83%         | 1,0155        | 1,55%           | 53,962                            | 7,92%         |

**Πίνακας 6.9:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.10:





**Εικόνα 6.10:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

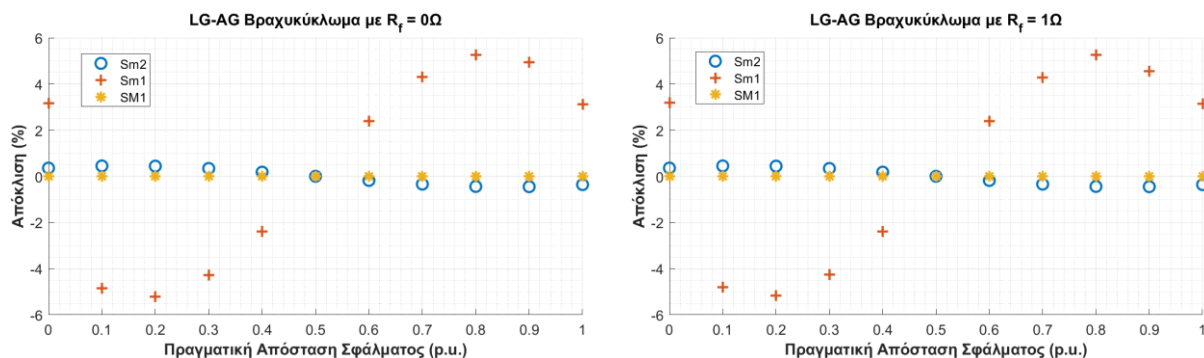
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν ικανοποιητική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος και όταν αυτή λαμβάνει μικρές τιμές. Η WIS και η ERI παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά και για μεγαλύτερες τιμές αντίστασης σφάλματος, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η απόκλισή τους περιορίζεται κάτω του 3%. Η XU παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, αλλά γίνεται πάλι φανερή η εξάρτησή της από την αντίσταση. Καθώς αυτή αυξάνεται, αυξάνεται με την απόσταση εκθετικά και η απόκλιση της μεθόδου. Η SCD εμφανίζει καλή συμπεριφορά που είναι στα ίδια επίπεδα με τις WIS και ERI. Σε ορισμένες δοκιμές έχει αξιοσημείωτο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος, που φτάνει και ξεπερνά το 10%. Τέλος, η απόκλιση σε καμία μέθοδο δεν διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Συνεπώς, καμία δεν έχει αποδεκτή συμπεριφορά σε αυτήν την περίπτωση.

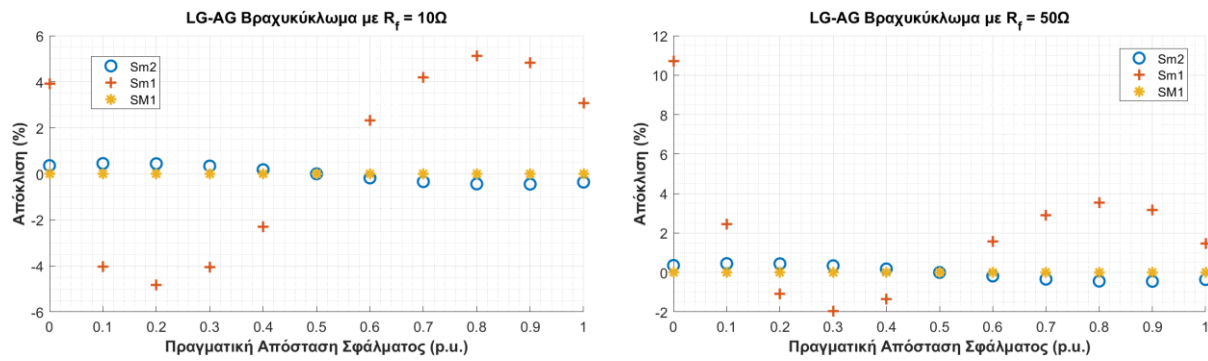
Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,149                             | -             | 0,0317        | 3,17%           | 1,322                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,181                             | -             | 0,0514        | -4,86%          | 1,887                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,172                             | -             | 0,1479        | -5,21%          | 1,842                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,139                             | -             | 0,2573        | -4,27%          | 1,337                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,099                             | -             | 0,3761        | -2,39%          | 0,622                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,064                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,064                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,042                             | -             | 0,6240        | 2,40%           | 0,542                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,035                             | -             | 0,7430        | 4,30%           | 0,724                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,039                             | -             | 0,8527        | 5,27%           | 0,628                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,042                             | -             | 0,9495        | 4,95%           | 0,361                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,029                             | -             | 1,0312        | 3,12%           | 0,086                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,862                             | -13,78%       | 0,0319        | 3,19%           | 0,326                             | -67,40%       | 0             | 0               | 1,002                             | 0,21%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,841                             | -15,94%       | 0,0519        | -4,81%          | 2,897                             | 189,70%       | 0,1           | 0               | 1,003                             | 0,33%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,860                             | -13,98%       | 0,1482        | -5,18%          | 2,872                             | 187,20%       | 0,2           | 0               | 1,005                             | 0,50%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,903                             | -9,74%        | 0,2575        | -4,25%          | 2,378                             | 137,79%       | 0,3           | 0               | 1,006                             | 0,62%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,952                             | -4,85%        | 0,3762        | -2,38%          | 1,672                             | 67,24%        | 0,4           | 0               | 1,007                             | 0,71%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,994                             | -0,58%        | 0,5000        | 0,00%           | 0,994                             | -0,58%        | 0,5           | 0               | 1,007                             | 0,73%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 1,023                             | 2,31%         | 0,6239        | 2,39%           | 0,524                             | -47,60%       | 0,6           | 0               | 1,007                             | 0,70%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 1,036                             | 3,62%         | 0,7429        | 4,29%           | 0,349                             | -65,14%       | 0,7           | 0               | 1,006                             | 0,62%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 1,038                             | 3,79%         | 0,8526        | 5,26%           | 0,450                             | -54,96%       | 0,8           | 0               | 1,005                             | 0,49%         |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 1,039                             | 3,88%         | 0,9455        | 4,55%           | 0,722                             | -27,82%       | 0,9           | 0               | 1,003                             | 0,32%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 1,056                             | 5,60%         | 1,0315        | 3,15%           | 1,000                             | 0,01%         | 1             | 0               | 1,001                             | 0,13%         |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 9,962                             | -0,38%        | 0,0392        | 3,92%           | 8,419                             | -15,81%       | 0             | 0               | 10,021                            | 0,21%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 10,034                            | 0,34%         | 0,0596        | -4,04%          | 11,848                            | 18,48%        | 0,1           | 0               | 10,035                            | 0,35%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 10,143                            | 1,43%         | 0,1518        | -4,82%          | 12,083                            | 20,83%        | 0,2           | 0               | 10,052                            | 0,52%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 10,271                            | 2,71%         | 0,2595        | -4,05%          | 11,720                            | 17,20%        | 0,3           | 0               | 10,066                            | 0,66%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 10,399                            | 3,99%         | 0,3771        | -2,29%          | 11,111                            | 11,11%        | 0,4           | 0               | 10,074                            | 0,74%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,513                            | 5,13%         | 0,5000        | 0,00%           | 10,513                            | 5,13%         | 0,5           | 0               | 10,077                            | 0,77%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 10,606                            | 6,06%         | 0,6232        | 2,32%           | 10,113                            | 1,13%         | 0,6           | 0               | 10,074                            | 0,74%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 10,676                            | 6,76%         | 0,7418        | 4,18%           | 10,000                            | 0,00%         | 0,7           | 0               | 10,065                            | 0,65%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 10,725                            | 7,25%         | 0,8513        | 5,13%           | 10,156                            | 1,56%         | 0,8           | 0               | 10,052                            | 0,52%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 10,765                            | 7,65%         | 0,9483        | 4,83%           | 10,470                            | 4,70%         | 0,9           | 0               | 10,034                            | 0,34%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 10,814                            | 8,14%         | 1,0307        | 3,07%           | 10,776                            | 7,76%         | 1             | 0               | 10,014                            | 0,14%         |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 50,195                            | 0,39%         | 0,1070        | 10,70%          | 45,077                            | -9,85%        | 0             | 0               | 50,140                            | 0,28%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 50,666                            | 1,33%         | 0,1244        | 2,44%           | 49,758                            | -0,48%        | 0,1           | 0               | 50,202                            | 0,40%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 51,160                            | 2,32%         | 0,1891        | -1,09%          | 51,797                            | 3,59%         | 0,2           | 0               | 50,273                            | 0,55%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 51,653                            | 3,31%         | 0,2805        | -1,95%          | 52,498                            | 5,00%         | 0,3           | 0               | 50,334                            | 0,67%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 52,123                            | 4,25%         | 0,3864        | -1,36%          | 52,614                            | 5,23%         | 0,4           | 0               | 50,374                            | 0,75%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 52,552                            | 5,10%         | 0,5000        | 0,00%           | 52,552                            | 5,10%         | 0,5           | 0               | 50,388                            | 0,78%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 52,930                            | 5,86%         | 0,6158        | 1,58%           | 52,558                            | 5,12%         | 0,6           | 0               | 50,373                            | 0,75%         |
| Rf = 50Ω               | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 53,251                            | 6,50%         | 0,7291        | 2,91%           | 52,750                            | 5,50%         | 0,7           | 0               | 50,331                            | 0,66%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 53,518                            | 7,04%         | 0,8355        | 3,55%           | 53,127                            | 6,25%         | 0,8           | 0               | 50,265                            | 0,53%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 53,743                            | 7,49%         | 0,9316        | 3,16%           | 53,587                            | 7,17%         | 0,9           | 0               | 50,180                            | 0,36%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 53,944                            | 7,89%         | 1,0147        | 1,47%           | 53,961                            | 7,92%         | 1             | 0               | 50,078                            | 0,16%         |

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.11:

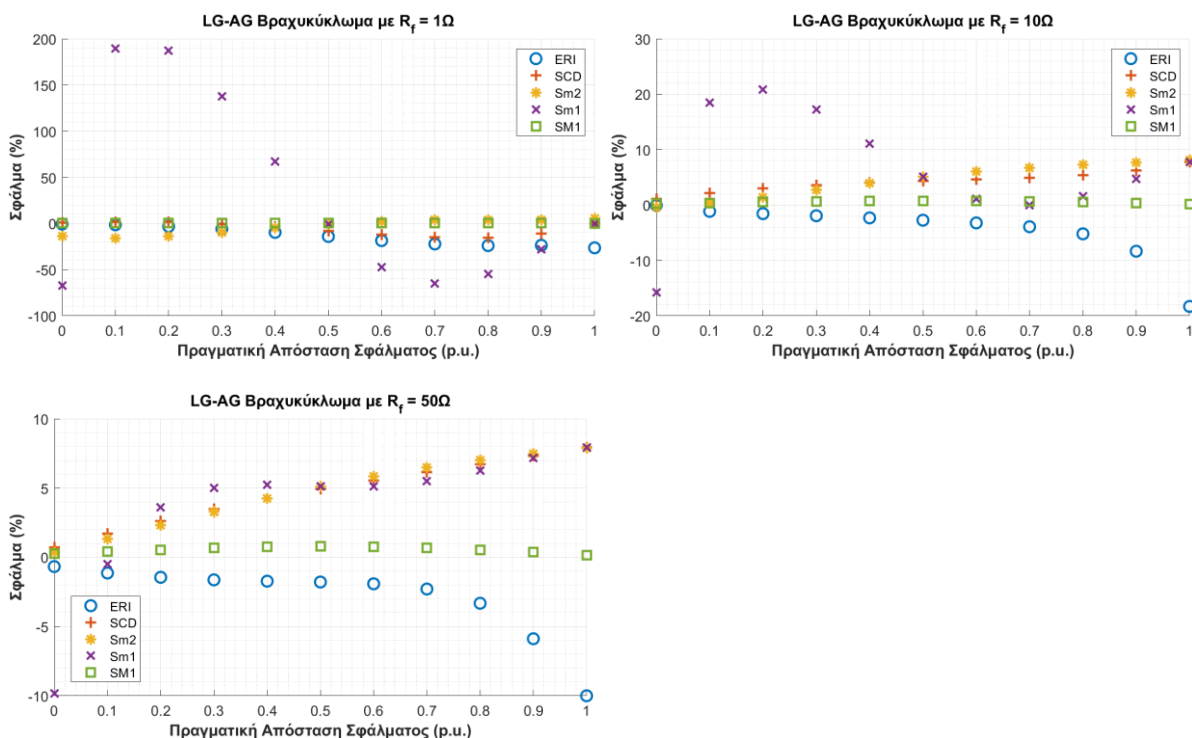




**Εικόνα 6.11:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει την καλύτερη απόδοση με μηδενική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση, με την απόκλιση της Sm2 να είναι συνεχώς μικρότερη του 2%. Τέλος, η Sm1 παρουσιάζει δυσανάλογα την μεγαλύτερη απόκλιση που όμως σε γενικές γραμμές διατηρείται εντός των ορίων  $\pm 5\%$ . Συνεπώς, από τις παραπάνω μεθόδους, μόνο οι Sm1 και SM1 έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 6.12 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.12:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα η μέθοδος SM1 υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI με την αύξηση της απόστασης παρουσιάζει εκθετική αύξηση του σφάλματος προς τα αρνητικά, που σημαίνει ότι υποεκτιμά την αντίσταση σφάλματος. Η Sm2 και η SCD έχουν αποδεκτή συμπεριφορά και μόνο σε ορισμένες δοκιμές το σφάλμα τους



υπερβαίνει το 7%. Από την άλλη, η Sm1 εμφανίζει εντονότατο σφάλμα για  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$  όταν το βραχυκύκλωμα γίνεται κοντά στην αρχή της γραμμής.

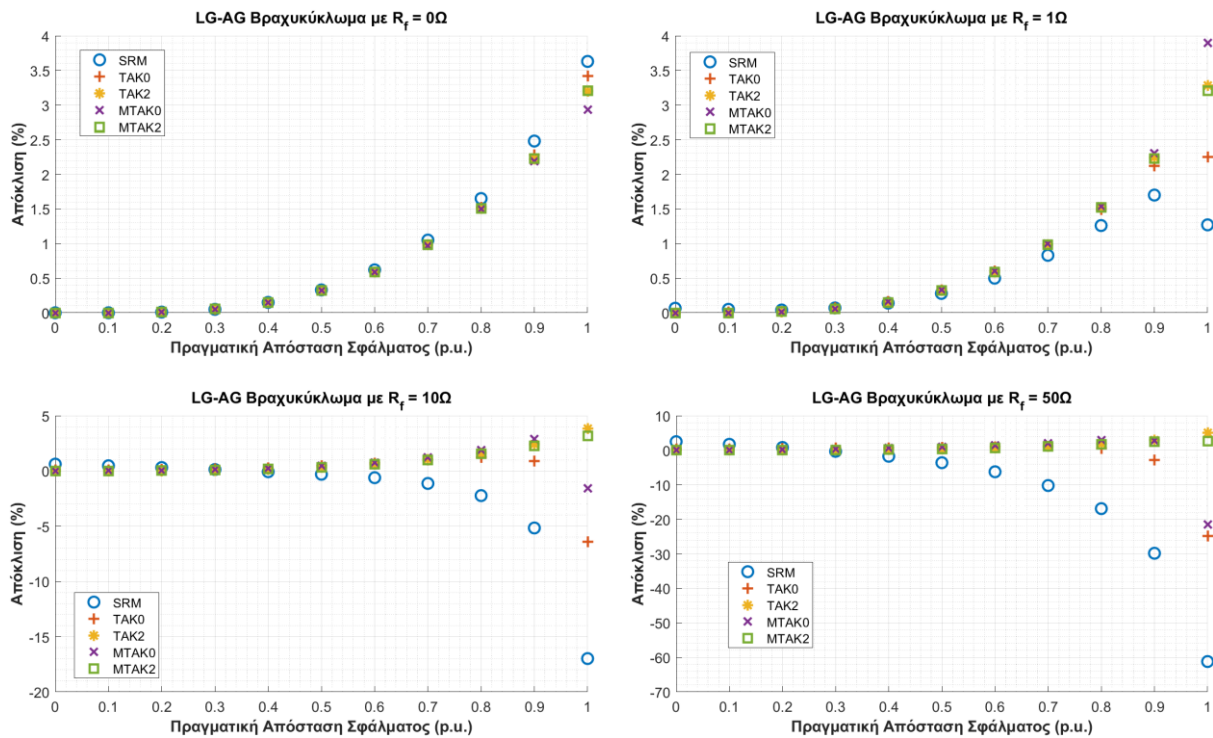
### 6.1.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο

Στον Πίνακα 6.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3005        | 0,05%           | 0,3005         | 0,05%           | 0,3006         | 0,06%           | 0,3005          | 0,05%           | 0,3006          | 0,06%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4015        | 0,15%           | 0,4015         | 0,15%           | 0,4015         | 0,15%           | 0,4015          | 0,15%           | 0,4015          | 0,15%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5033        | 0,33%           | 0,5032         | 0,32%           | 0,5032         | 0,32%           | 0,5032          | 0,32%           | 0,5032          | 0,32%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6062        | 0,62%           | 0,6059         | 0,59%           | 0,6059         | 0,59%           | 0,6059          | 0,59%           | 0,6059          | 0,59%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7105        | 1,05%           | 0,7098         | 0,98%           | 0,7098         | 0,98%           | 0,7097          | 0,97%           | 0,7098          | 0,98%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8165        | 1,65%           | 0,8152         | 1,52%           | 0,8151         | 1,51%           | 0,8150          | 1,50%           | 0,8151          | 1,51%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9248        | 2,48%           | 0,9228         | 2,28%           | 0,9222         | 2,22%           | 0,9219          | 2,19%           | 0,9223          | 2,23%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0363        | 3,63%           | 1,0342         | 3,42%           | 1,0320         | 3,20%           | 1,0293          | 2,93%           | 1,0321          | 3,21%           |
|                        | 0                                             | 0,0007        | 0,07%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1005        | 0,05%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2002         | 0,02%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2001          | 0,01%           | 0,2002          | 0,02%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3007        | 0,07%           | 0,3007         | 0,07%           | 0,3006         | 0,06%           | 0,3006          | 0,06%           | 0,3006          | 0,06%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4014        | 0,14%           | 0,4016         | 0,16%           | 0,4015         | 0,15%           | 0,4016          | 0,16%           | 0,4015          | 0,15%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5028        | 0,28%           | 0,5033         | 0,33%           | 0,5032         | 0,32%           | 0,5033          | 0,33%           | 0,5032          | 0,32%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6050        | 0,50%           | 0,6060         | 0,60%           | 0,6059         | 0,59%           | 0,6060          | 0,60%           | 0,6059          | 0,59%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7083        | 0,83%           | 0,7098         | 0,98%           | 0,7098         | 0,98%           | 0,7100          | 1,00%           | 0,7098          | 0,98%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8126        | 1,26%           | 0,8149         | 1,49%           | 0,8152         | 1,52%           | 0,8154          | 1,54%           | 0,8152          | 1,52%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9170        | 1,70%           | 0,9212         | 2,12%           | 0,9224         | 2,24%           | 0,9230          | 2,30%           | 0,9223          | 2,23%           |
|                        | 1                                             | 1,0127        | 1,27%           | 1,0225         | 2,25%           | 1,0328         | 3,28%           | 1,0390          | 3,90%           | 1,0321          | 3,21%           |
|                        | 0                                             | 0,0062        | 0,62%           | 0,0007         | 0,07%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1047        | 0,47%           | 0,1009         | 0,09%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1002          | 0,02%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2031        | 0,31%           | 0,2012         | 0,12%           | 0,2001         | 0,01%           | 0,2006          | 0,06%           | 0,2002          | 0,02%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3017         | 0,17%           | 0,3006         | 0,06%           | 0,3012          | 0,12%           | 0,3007          | 0,07%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3993        | -0,07%          | 0,4028         | 0,28%           | 0,4016         | 0,16%           | 0,4025          | 0,25%           | 0,4017          | 0,17%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4970        | -0,30%          | 0,5045         | 0,45%           | 0,5034         | 0,34%           | 0,5045          | 0,45%           | 0,5034          | 0,34%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5939        | -0,61%          | 0,6069         | 0,69%           | 0,6062         | 0,62%           | 0,6077          | 0,77%           | 0,6061          | 0,61%           |
|                        | 0,7                                           | 0,6887        | -1,13%          | 0,7099         | 0,99%           | 0,7102         | 1,02%           | 0,7123          | 1,23%           | 0,7101          | 1,01%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7777        | -2,23%          | 0,8125         | 1,25%           | 0,8160         | 1,60%           | 0,8190          | 1,90%           | 0,8156          | 1,56%           |
|                        | 0,9                                           | 0,8484        | -5,16%          | 0,9088         | 0,88%           | 0,9242         | 2,42%           | 0,9290          | 2,90%           | 0,9229          | 2,29%           |
|                        | 1                                             | 0,8302        | -16,98%         | 0,9360         | -6,40%          | 1,0385         | 3,85%           | 0,9845          | -1,55%          | 1,0316          | 3,16%           |
|                        | 0                                             | 0,0248        | 2,48%           | 0,0034         | 0,34%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1172        | 1,72%           | 0,1042         | 0,42%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1011          | 0,11%           | 0,1003          | 0,03%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2080        | 0,80%           | 0,2050         | 0,50%           | 0,2003         | 0,03%           | 0,2022          | 0,22%           | 0,2005          | 0,05%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2968        | -0,32%          | 0,3060         | 0,60%           | 0,3009         | 0,09%           | 0,3037          | 0,37%           | 0,3010          | 0,10%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3826        | -1,74%          | 0,4073         | 0,73%           | 0,4020         | 0,20%           | 0,4059          | 0,59%           | 0,4021          | 0,21%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4639        | -3,61%          | 0,5089         | 0,89%           | 0,5040         | 0,40%           | 0,5091          | 0,91%           | 0,5040          | 0,40%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5376        | -6,24%          | 0,6104         | 1,04%           | 0,6071         | 0,71%           | 0,6137          | 1,37%           | 0,6069          | 0,69%           |
| Rf = 50Ω               | 0,7                                           | 0,5978        | -10,22%         | 0,7105         | 1,05%           | 0,7118         | 1,18%           | 0,7204          | 2,04%           | 0,7111          | 1,11%           |
|                        | 0,8                                           | 0,6309        | -16,91%         | 0,8045         | 0,45%           | 0,8186         | 1,86%           | 0,8294          | 2,94%           | 0,8169          | 1,69%           |
|                        | 0,9                                           | 0,6016        | -29,84%         | 0,8722         | -2,78%          | 0,9294         | 2,94%           | 0,9277          | 2,77%           | 0,9245          | 2,45%           |
|                        | 1                                             | 0,3880        | -61,20%         | 0,7515         | -24,85%         | 1,0510         | 5,10%           | 0,7855          | -21,45%         | 1,0269          | 2,69%           |

**Πίνακας 6.11:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.13:



**Εικόνα 6.13:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν ικανοποιητική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση και όταν αυτή έχει μικρή τιμή. Η αύξηση της αντίστασης και η αύξηση της απόστασης μεταξύ της θέσης του σφάλματος και της θέσης του ηλεκτρονόμου οδηγεί στην αύξηση της απόκλισης όλων των αλγορίθμων. Σε γενικές γραμμές οι TAK0 και TAK2 έχουν παραπλήσιες αποκλίσεις με τις MTAK0 και MTAK2 αντίστοιχα. Ειδικότερα, η MTAK2 εμφανίζει πολύ καλή απόδοση για κάθε τιμή της αντίστασης σφάλματος. Ακόμα, για  $R_f=10\Omega$  και  $R_f=50\Omega$  και για μεγάλες τιμές του  $m$  παρατηρούμε ουσιαστικά κατάρρευση των SRM, TAK0 και MTAK0 με εκθετική αύξηση της απόκλισης στα αρνητικά που σηματοδοτεί στην υποεκτίμηση της θέσης του σφάλματος από αυτές τις μεθόδους. Τέλος, η απόκλιση σε καμία μέθοδο δεν διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Συνεπώς, καμία δεν έχει αποδεκτή συμπεριφορά σε αυτήν την περίπτωση.

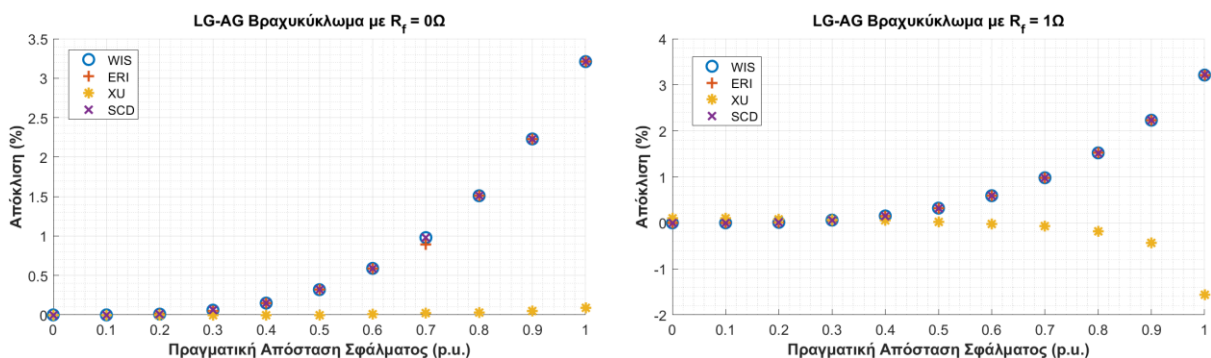
Συγκρίνοντας την απόδοση των μεθόδων χωρίς και με φορτίο, παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση οι παραπάνω μέθοδοι έχουν παρόμοια συμπεριφορά, με εξαίρεση την SRM, η οποία με φορτίο μεταβαίνει πιο απότομα σε υποεκτίμηση της θέσης του σφάλματος.

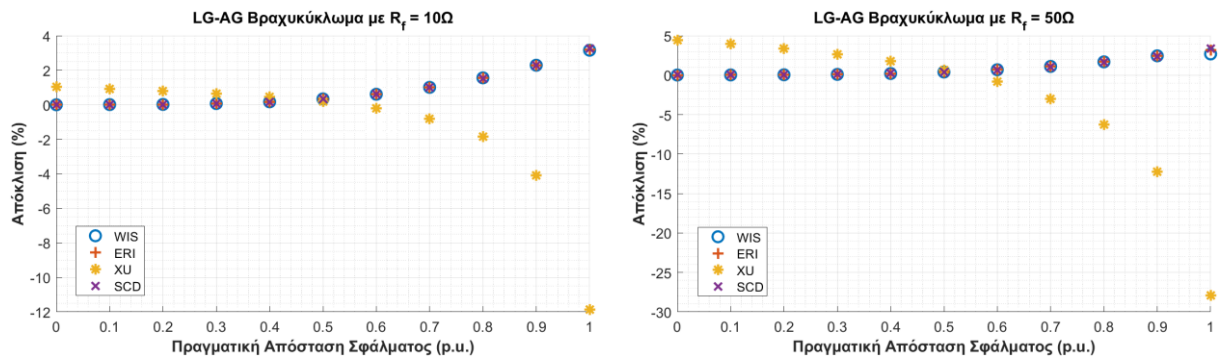
Στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,004                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,004                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001        | 0,01%           | 0,021                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2001        | 0,01%           | 0,023                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3006        | 0,06%           | 0,3005        | 0,05%           | 0,054                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3006        | 0,06%           | 0,060                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4015        | 0,15%           | 0,4015        | 0,15%           | 0,107                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4015        | 0,15%           | 0,119                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5032        | 0,32%           | 0,5032        | 0,32%           | 0,181                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5032        | 0,32%           | 0,195                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6059        | 0,59%           | 0,6059        | 0,59%           | 0,255                             | -             | 0,6001       | 0,01%           | 0,6059        | 0,59%           | 0,278                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7098        | 0,98%           | 0,7089        | 0,89%           | 0,328                             | -             | 0,7002       | 0,02%           | 0,7098        | 0,98%           | 0,351                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8151        | 1,51%           | 0,8151        | 1,51%           | 0,346                             | -             | 0,8003       | 0,03%           | 0,8151        | 1,51%           | 0,386                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9223        | 2,23%           | 0,9223        | 2,23%           | 0,298                             | -             | 0,9005       | 0,05%           | 0,9223        | 2,23%           | 0,348                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0321        | 3,21%           | 1,0321        | 3,21%           | 0,138                             | -             | 1,0009       | 0,09%           | 1,0321        | 3,21%           | 0,190                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,993                             | -0,66%        | 0,0010       | 0,10%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,010                             | 1,04%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,985                             | -1,53%        | 0,1010       | 0,10%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,016                             | 1,57%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001        | 0,01%           | 0,965                             | -3,52%        | 0,2008       | 0,08%           | 0,2001        | 0,01%           | 1,008                             | 0,75%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3006        | 0,06%           | 0,3006        | 0,06%           | 0,929                             | -7,15%        | 0,3007       | 0,07%           | 0,3006        | 0,06%           | 0,980                             | -2,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4015        | 0,15%           | 0,4015        | 0,15%           | 0,874                             | -12,60%       | 0,4005       | 0,05%           | 0,4015        | 0,15%           | 0,931                             | -6,92%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5032        | 0,32%           | 0,5032        | 0,32%           | 0,804                             | -19,58%       | 0,5002       | 0,02%           | 0,5032        | 0,32%           | 0,864                             | -13,65%       |
|                        | 0,6                                           | 0,6059        | 0,59%           | 0,6059        | 0,59%           | 0,728                             | -27,22%       | 0,5998       | -0,02%          | 0,6059        | 0,59%           | 0,788                             | -21,22%       |
|                        | 0,7                                           | 0,7098        | 0,98%           | 0,7098        | 0,98%           | 0,660                             | -34,04%       | 0,6993       | -0,07%          | 0,7098        | 0,98%           | 0,722                             | -27,83%       |
|                        | 0,8                                           | 0,8152        | 1,52%           | 0,8152        | 1,52%           | 0,620                             | -38,01%       | 0,7982       | -0,18%          | 0,8151        | 1,51%           | 0,692                             | -30,81%       |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9223        | 2,23%           | 0,9223        | 2,23%           | 0,628                             | -37,22%       | 0,8956       | -0,44%          | 0,9223        | 2,23%           | 0,735                             | -26,55%       |
|                        | 1                                             | 1,0321        | 3,21%           | 1,0321        | 3,21%           | 0,650                             | -34,96%       | 0,9844       | -1,56%          | 1,0322        | 3,22%           | 0,897                             | -10,35%       |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 9,934                             | -0,66%        | 0,0103       | 1,03%           | 0,0000        | 0,00%           | 10,082                            | 0,82%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 9,885                             | -1,15%        | 0,1093       | 0,93%           | 0,1001        | 0,01%           | 10,177                            | 1,77%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2002        | 0,02%           | 0,2002        | 0,02%           | 9,841                             | -1,59%        | 0,2081       | 0,81%           | 0,2002        | 0,02%           | 10,262                            | 2,62%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3007        | 0,07%           | 0,3007        | 0,07%           | 9,794                             | -2,06%        | 0,3065       | 0,65%           | 0,3007        | 0,07%           | 10,327                            | 3,26%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4017        | 0,17%           | 0,4017        | 0,17%           | 9,738                             | -2,62%        | 0,4045       | 0,45%           | 0,4017        | 0,17%           | 10,366                            | 3,66%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5034        | 0,34%           | 0,5034        | 0,34%           | 9,669                             | -3,31%        | 0,5018       | 0,18%           | 0,5034        | 0,34%           | 10,382                            | 3,82%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6061        | 0,61%           | 0,6061        | 0,61%           | 9,584                             | -4,16%        | 0,5979       | -0,21%          | 0,6061        | 0,61%           | 10,381                            | 3,81%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7101        | 1,01%           | 0,7101        | 1,01%           | 9,473                             | -5,27%        | 0,6920       | -0,80%          | 0,7100        | 1,00%           | 10,381                            | 3,81%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8156        | 1,56%           | 0,8156        | 1,56%           | 9,301                             | -6,99%        | 0,7815       | -1,85%          | 0,8154        | 1,54%           | 10,407                            | 4,07%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9229        | 2,29%           | 0,9229        | 2,29%           | 8,933                             | -10,67%       | 0,8590       | -4,10%          | 0,9227        | 2,27%           | 10,496                            | 4,96%         |
|                        | 1                                             | 1,0316        | 3,16%           | 1,0321        | 3,21%           | 7,752                             | -22,48%       | 0,8814       | -11,86%         | 1,0327        | 3,27%           | 10,699                            | 6,99%         |
|                        | 0                                             | 0,0002        | 0,02%           | 0,0002        | 0,02%           | 49,664                            | -0,67%        | 0,0444       | 4,44%           | 0,0002        | 0,02%           | 49,762                            | -0,48%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1003        | 0,03%           | 0,1003        | 0,03%           | 49,432                            | -1,14%        | 0,1395       | 3,95%           | 0,1004        | 0,04%           | 50,305                            | 0,61%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2005        | 0,05%           | 0,2005        | 0,05%           | 49,276                            | -1,45%        | 0,2337       | 3,37%           | 0,2006        | 0,06%           | 50,863                            | 1,73%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3010        | 0,10%           | 0,3010        | 0,10%           | 49,175                            | -1,63%        | 0,3267       | 2,67%           | 0,3011        | 0,11%           | 51,414                            | 2,83%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4021        | 0,21%           | 0,4021        | 0,21%           | 49,103                            | -1,79%        | 0,4179       | 1,79%           | 0,4022        | 0,22%           | 51,937                            | 3,87%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5040        | 0,40%           | 0,5040        | 0,40%           | 49,024                            | -1,95%        | 0,5067       | 0,67%           | 0,5040        | 0,40%           | 52,420                            | 4,84%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6069        | 0,69%           | 0,6069        | 0,69%           | 48,875                            | -2,25%        | 0,5916       | -0,84%          | 0,6068        | 0,68%           | 52,859                            | 5,72%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7111        | 1,11%           | 0,7111        | 1,11%           | 48,528                            | -2,94%        | 0,6702       | -2,98%          | 0,7108        | 1,08%           | 53,260                            | 6,52%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8169        | 1,69%           | 0,8170        | 1,70%           | 47,681                            | -4,64%        | 0,7372       | -6,28%          | 0,8163        | 1,63%           | 53,645                            | 7,29%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9245        | 2,45%           | 0,9247        | 2,47%           | 45,478                            | -9,04%        | 0,7779       | -12,21%         | 0,9237        | 2,37%           | 54,054                            | 8,11%         |
|                        | 1                                             | 1,0269        | 2,69%           | 1,0320        | 3,20%           | 39,326                            | -21,35%       | 0,7209       | -27,91%         | 1,0338        | 3,38%           | 54,536                            | 9,07%         |

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.14:





**Εικόνα 6.14:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν ικανοποιητική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος και όταν αυτή λαμβάνει μικρές τιμές. Η WIS και η ERI παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά και για μεγαλύτερες τιμές αντίστασης σφάλματος, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η απόκλισή τους περιορίζεται κάτω του 3%. Η XU παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, αλλά γίνεται πάλι φανερό η εξάρτησή της από την αντίσταση. Καθώς αυτή αυξάνεται, αυξάνεται με την απόσταση εκθετικά και η απόκλιση της μεθόδου προς τα αρνητικά, υποδηλώνοντας υποεκτίμηση της θέσης του σφάλματος. Η SCD εμφανίζει καλή συμπεριφορά που είναι στα ίδια επίπεδα με τις WIS και ERI. Σε ορισμένες δοκιμές έχει αξιοσημείωτο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος, που φτάνει και ξεπερνά το 10%. Τέλος, η απόκλιση σε καμία μέθοδο δεν διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Συνεπώς, καμία δεν έχει αποδεκτή συμπεριφορά σε αυτήν την περίπτωση.

Συγκρίνοντας την απόδοση των μεθόδων χωρίς και με φορτίο, παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση οι παραπάνω μέθοδοι έχουν παρόμοια συμπεριφορά, με εξαίρεση την XU, η οποία με φορτίο υποεκτιμά την θέση του σφάλματος.

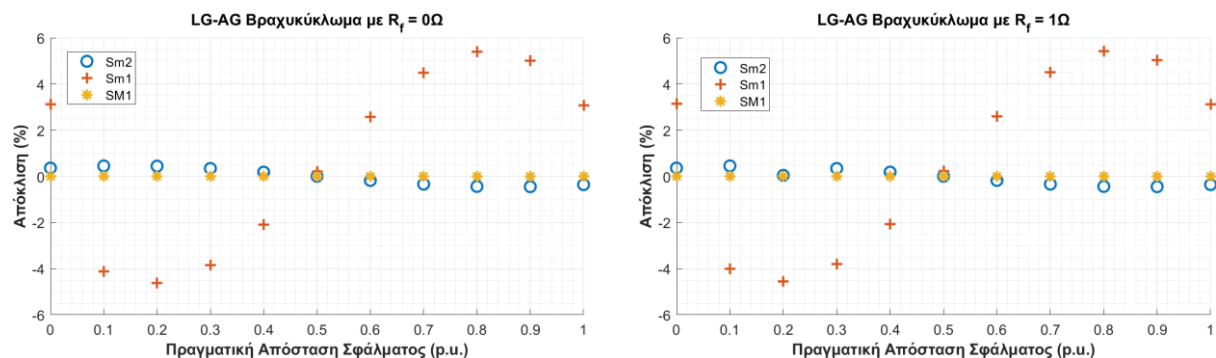


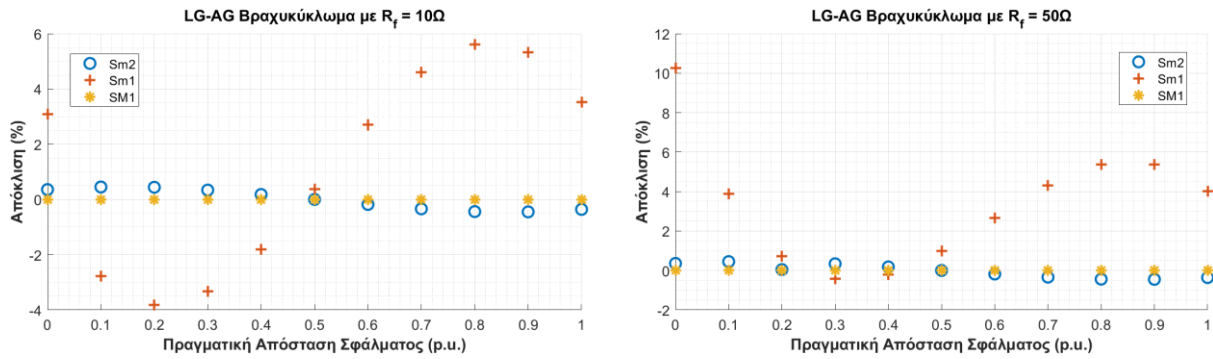
Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | Sm2 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm2 (Ω) | Σφάλμα (%) | Sm1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm1 (Ω) | Σφάλμα (%) | SM1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SM1 (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0036     | 0,36%        | 0,130                       | -          | 0,0312     | 3,12%        | 1,138                       | -          | 0          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1045     | 0,45%        | 0,136                       | -          | 0,0588     | -4,12%       | 1,181                       | -          | 0,1        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2044     | 0,44%        | 0,114                       | -          | 0,1538     | -4,62%       | 0,968                       | -          | 0,2        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3034     | 0,34%        | 0,101                       | -          | 0,2616     | -3,84%       | 0,505                       | -          | 0,3        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4018     | 0,18%        | 0,121                       | -          | 0,3790     | -2,10%       | 0,070                       | -          | 0,4        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 0,184                       | -          | 0,5021     | 0,21%        | 0,191                       | -          | 0,5        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,5982     | -0,18%       | 0,285                       | -          | 0,6258     | 2,58%        | 0,261                       | -          | 0,6        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,6966     | -0,34%       | 0,398                       | -          | 0,7448     | 4,48%        | 0,225                       | -          | 0,7        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,7956     | -0,44%       | 0,484                       | -          | 0,8540     | 5,40%        | 0,190                       | -          | 0,8        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,8955     | -0,45%       | 0,487                       | -          | 0,9500     | 5,00%        | 0,205                       | -          | 0,9        | 0            | 0,000                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 1                                    | 0,9964     | -0,36%       | 0,338                       | -          | 1,0308     | 3,08%        | 0,196                       | -          | 1          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0                                    | 0,0036     | 0,36%        | 0,880                       | -12,02%    | 0,0315     | 3,15%        | 0,144                       | -85,61%    | 0          | 0            | 1,002                       | 0,20%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1045     | 0,45%        | 0,884                       | -11,60%    | 0,0600     | -4,00%       | 2,175                       | 117,47%    | 0,1        | 0            | 1,004                       | 0,35%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2004     | 0,04%        | 0,915                       | -8,46%     | 0,1545     | -4,55%       | 1,991                       | 99,05%     | 0,2        | 0            | 1,005                       | 0,52%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3034     | 0,34%        | 0,939                       | -6,15%     | 0,2620     | -3,80%       | 1,544                       | 54,38%     | 0,3        | 0            | 1,007                       | 0,65%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4018     | 0,18%        | 0,928                       | -7,17%     | 0,3793     | -2,07%       | 1,119                       | 11,92%     | 0,4        | 0            | 1,007                       | 0,74%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 0,874                       | -12,60%    | 0,5022     | 0,22%        | 0,867                       | -13,33%    | 0,5        | 0            | 1,008                       | 0,76%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5982     | -0,18%       | 0,782                       | -21,85%    | 0,6260     | 2,60%        | 0,804                       | -19,58%    | 0,6        | 0            | 1,007                       | 0,73%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6966     | -0,34%       | 0,674                       | -32,59%    | 0,7450     | 4,50%        | 0,849                       | -15,13%    | 0,7        | 0            | 1,007                       | 0,65%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7956     | -0,44%       | 0,593                       | -40,73%    | 0,8543     | 5,43%        | 0,891                       | -10,91%    | 0,8        | 0            | 1,005                       | 0,52%      |
| Rf = 10Ω            | 0,9                                  | 0,8955     | -0,45%       | 0,593                       | -40,68%    | 0,9504     | 5,04%        | 0,882                       | -11,80%    | 0,9        | 0            | 1,004                       | 0,35%      |
|                     | 1                                    | 0,9964     | -0,36%       | 0,745                       | -25,54%    | 1,0313     | 3,13%        | 0,893                       | -10,72%    | 1          | 0            | 1,002                       | 0,15%      |
|                     | 0                                    | 0,0036     | 0,36%        | 9,946                       | -0,54%     | 0,0309     | 3,09%        | 8,590                       | -14,10%    | 0          | 0            | 10,020                      | 0,20%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1045     | 0,45%        | 10,040                      | 0,40%      | 0,0723     | -2,77%       | 11,029                      | 10,29%     | 0,1        | 0            | 10,037                      | 0,37%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2044     | 0,44%        | 10,166                      | 1,66%      | 0,1618     | -3,82%       | 11,146                      | 11,46%     | 0,2        | 0            | 10,055                      | 0,55%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3034     | 0,34%        | 10,284                      | 2,84%      | 0,2667     | -3,33%       | 10,866                      | 8,66%      | 0,3        | 0            | 10,068                      | 0,68%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4018     | 0,18%        | 10,365                      | 3,65%      | 0,3820     | -1,80%       | 10,551                      | 5,51%      | 0,4        | 0            | 10,075                      | 0,75%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 10,395                      | 3,95%      | 0,5038     | 0,38%        | 10,381                      | 3,81%      | 0,5        | 0            | 10,077                      | 0,77%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5982     | -0,18%       | 10,377                      | 3,77%      | 0,6270     | 2,70%        | 10,392                      | 3,92%      | 0,6        | 0            | 10,073                      | 0,73%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6966     | -0,34%       | 10,332                      | 3,32%      | 0,7461     | 4,61%        | 10,512                      | 5,12%      | 0,7        | 0            | 10,064                      | 0,64%      |
| Rf = 50Ω            | 0,8                                  | 0,7956     | -0,44%       | 10,299                      | 2,99%      | 0,8561     | 5,61%        | 10,629                      | 6,29%      | 0,8        | 0            | 10,050                      | 0,50%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8955     | -0,45%       | 10,334                      | 3,34%      | 0,9532     | 5,32%        | 10,678                      | 6,78%      | 0,9        | 0            | 10,033                      | 0,33%      |
|                     | 1                                    | 0,9964     | -0,36%       | 10,509                      | 5,09%      | 1,0352     | 3,52%        | 10,712                      | 7,12%      | 1          | 0            | 10,013                      | 0,13%      |
|                     | 0                                    | 0,0036     | 0,36%        | 49,603                      | -0,79%     | 0,1027     | 10,27%       | 44,910                      | -10,18%    | 0          | 0            | 50,076                      | 0,15%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1045     | 0,45%        | 50,143                      | 0,29%      | 0,1389     | 3,89%        | 48,808                      | -2,38%     | 0,1        | 0            | 50,183                      | 0,36%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2004     | 0,04%        | 50,749                      | 1,50%      | 0,2073     | 0,73%        | 50,659                      | 1,32%      | 0,2        | 0            | 50,274                      | 0,55%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3034     | 0,34%        | 51,364                      | 2,73%      | 0,2957     | -0,43%       | 51,534                      | 3,07%      | 0,3        | 0            | 50,340                      | 0,68%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4018     | 0,18%        | 51,942                      | 3,88%      | 0,3980     | -0,20%       | 51,998                      | 4,00%      | 0,4        | 0            | 50,376                      | 0,75%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 52,450                      | 4,90%      | 0,5098     | 0,98%        | 52,376                      | 4,75%      | 0,5        | 0            | 50,381                      | 0,76%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5982     | -0,18%       | 52,873                      | 5,75%      | 0,6266     | 2,66%        | 52,825                      | 5,65%      | 0,6        | 0            | 50,355                      | 0,71%      |
| Rf = 50Ω            | 0,7                                  | 0,6966     | -0,34%       | 53,219                      | 6,44%      | 0,7430     | 4,30%        | 53,354                      | 6,71%      | 0,7        | 0            | 50,302                      | 0,60%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7956     | -0,44%       | 53,518                      | 7,04%      | 0,8536     | 5,36%        | 53,878                      | 7,76%      | 0,8        | 0            | 50,227                      | 0,45%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8955     | -0,45%       | 53,824                      | 7,65%      | 0,9538     | 5,38%        | 54,298                      | 8,60%      | 0,9        | 0            | 50,139                      | 0,28%      |
|                     | 1                                    | 0,9964     | -0,36%       | 54,208                      | 8,42%      | 1,0402     | 4,02%        | 54,592                      | 9,18%      | 1          | 0            | 50,044                      | 0,09%      |

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.15:

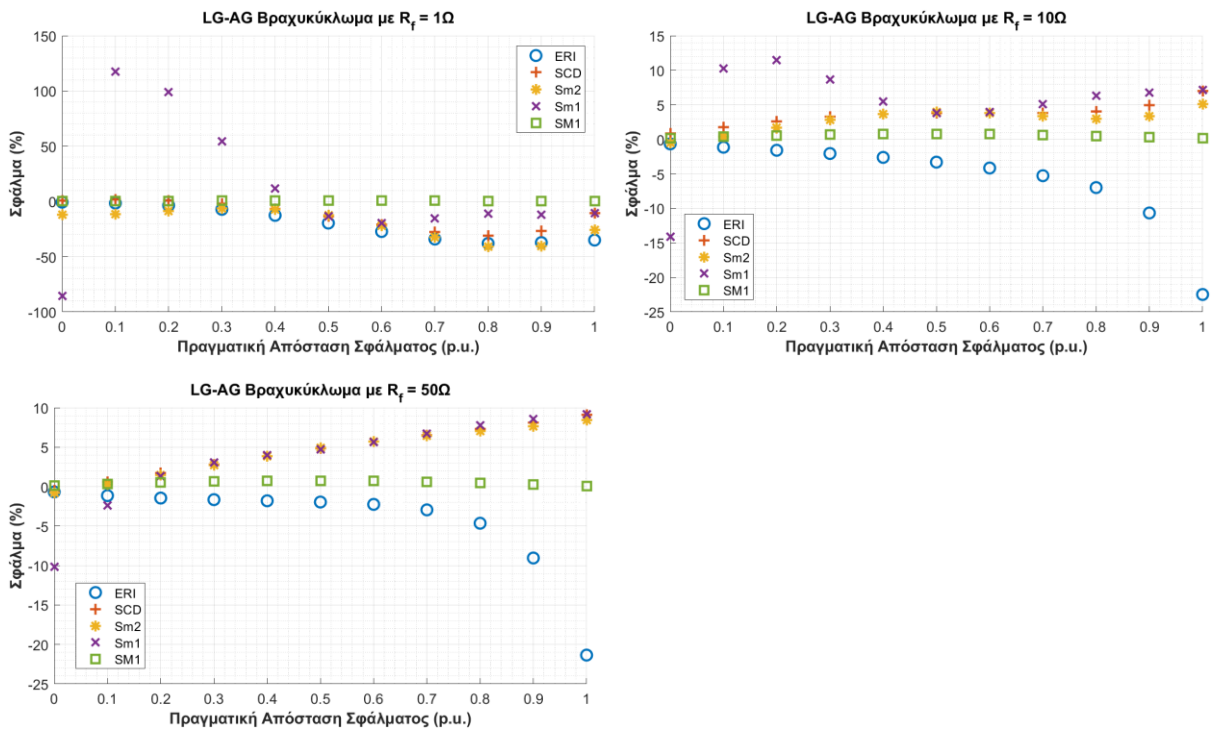




**Εικόνα 6.15:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει την καλύτερη απόδοση με μηδενική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση, με την απόκλιση της Sm2 να είναι συνεχώς μικρότερη του 2%. Τέλος, η Sm1 παρουσιάζει δυσανάλογα την μεγαλύτερη απόκλιση. Συνεπώς, από τις παραπάνω μεθόδους, μόνο οι Sm2 και SM1 έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 6.16 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.16:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LG-AG στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα η μέθοδος SM1 υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI με την αύξηση της απόστασης παρουσιάζει εκθετική αύξηση του σφάλματος προς τα αρνητικά, που σημαίνει ότι υποεκτιμά την αντίσταση σφάλματος. Η Sm2 και η SCD έχουν σημαντικό σφάλμα για  $R_f=1\Omega$ , αλλά με την αύξηση της αντίστασης η απόδοσή τους βελτιώνεται. Η Sm1 εμφανίζει εντονότερο σφάλμα για  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$  όταν το βραχυκύκλωμα γίνεται κοντά στην αρχή της γραμμής.

### 6.1.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στην περίπτωση του μονοφασικού βραχυκυκλώματος για κάθε μέθοδο και για όλες τις περιπτώσεις αναλύθηκαν και σχολιάστηκαν διεξοδικά στις Ενότητες 6.1.1 έως και 6.1.4. Συγκεντρωτικά, από τις προηγούμενες προσομοιώσεις και ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι SRM και XU εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αντίσταση και την θέση του σφάλματος. Χωρίς αντίσταση, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά με την αύξηση αυτής αποκλίνουν σημαντικά. Γι' αυτό, δεν είναι αποδεκτές.
- Οι TAK0 και MTAK0 επηρεάζονται από την αύξηση της αντίστασης σφάλματος σε μικρότερο βαθμό από τις SRM και XU, αλλά εμφανίζουν σημαντικό σφάλμα και δεν είναι αποδεκτές.
- Οι TAK2 και MTAK2 έχουν εξαιρετική συμπεριφορά στην περίπτωση της γραμμής των 35km, με την απόκλισή τους να είναι σχεδόν πάντα πολύ κάτω του 2%. Στην γραμμή των 350km έχουν πάλι καλή συμπεριφορά, αλλά σε ορισμένες δοκιμές παρουσιάζουν απόκλιση κοντά στο 3%. Αυτό είναι ικανοποιητικό δεδομένου ότι υλοποιούνται με το μοντέλο μικρού μήκους, ενώ εφαρμόζονται σε γραμμή μεγάλου μήκους. Επίσης, όπως θα αναμέναμε, η MTAK2 έχει καλύτερα αποτελέσματα από την TAK2 σε κάθε δοκιμή. Ακόμα, δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από τις TAK0 και MTAK0, άρα φαίνεται ότι η χρήση μεγεθών αρνητικής ακολουθίας είναι πλεονεκτική. Σε γενικές γραμμές έχουν αρκετά καλή συμπεριφορά με και χωρίς φορτίο, με την MTAK2 να είναι η καλύτερη εκ των δύο. Συνεπώς, αυτή είναι αποδεκτή και ενδείκνυται για χρήση σε γραμμές μικρού και μεγάλου μήκους.
- Οι ERI, WIS εμφανίζουν παραπλήσια αποτελέσματα, που είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι υλοποιούνται με παρόμοιο τρόπο και έχουν απόκλιση αρκετά κάτω του 2% στην γραμμή 35km. Στην περίπτωση των 350km έχουν πάλι καλή συμπεριφορά, αλλά σε ορισμένες δοκιμές παρουσιάζουν απόκλιση κοντά στο 3%. Αυτό είναι ικανοποιητικό δεδομένου ότι και αυτές υλοποιούνται με το μοντέλο μικρού μήκους, ενώ εφαρμόζονται σε γραμμή μεγάλου μήκους. Επίσης, η ERI έχει πολύ καλή ακρίβεια στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος στην περίπτωση της γραμμής 35km αλλά εμφανίζει σημαντικό σφάλμα στην περίπτωση των 350km. Άρα, και οι δύο είναι αποδεκτές για γραμμές μικρού μήκους. Συγκριτικά, με τους υπόλοιπους αλγορίθμους μίας πλευράς, η ERI έχει το πλεονέκτημά της ακρίβειας στον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος αλλά και της αντίστασης σφάλματος. Συνεπώς είναι η καλύτερη επιλογή, μεταξύ αυτών, στην περίπτωση του LG βραχυκυκλώματος.
- Οι SCD είναι αποδεκτή μέθοδος για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος σε κάθε περίπτωση γραμμής και φορτίου. Επίσης υπολογίζει με πολύ καλή ακρίβεια την αντίσταση σφάλματος στην γραμμή 35km, αλλά εμφανίζει σημαντικό σφάλμα στην γραμμή 350km, ιδιαίτερα όταν η αντίσταση έχει μικρές τιμές.
- Η Sm2 και Sm1 έχουν αποδεκτή συμπεριφορά στην περίπτωση γραμμής 35km. Η Sm2 διατηρεί την καλή απόδοσή της τόσο στον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος αλλά και τον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος και στην περίπτωση των 350km, παρότι υλοποιείται με το μοντέλο μικρού μήκους. Αντίθετα, η Sm1 στην δεύτερη περίπτωση εμφανίζει έντονες αποκλίσεις. Συνεπώς, η χρήση μεγεθών της αρνητικής ακολουθίας δίνει συγκριτικό πλεονέκτημα στην Sm2.
- Η SM1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις μεθόδους σε κάθε δοκιμή εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση στην εύρεση της θέσης του σφάλματος και αμελητέο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι υλοποιείται με το μοντέλο μεγάλου μήκους που είναι ιδανικό για κάθε τύπο γραμμής.
- Συνολικά, καταδεικνύεται η ανωτερότητα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν μετρήσεις και από τα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς με συγχρονισμένες μετρήσεις. Παρόλα αυτά,

οι μέθοδοι WIS, ERI και MTAK2 δεν υπολείπονται σημαντικά των παραπάνω μεθόδων στην περίπτωση του LG σφάλματος.

## 6.2 Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς γη LL-BC

### 6.2.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο

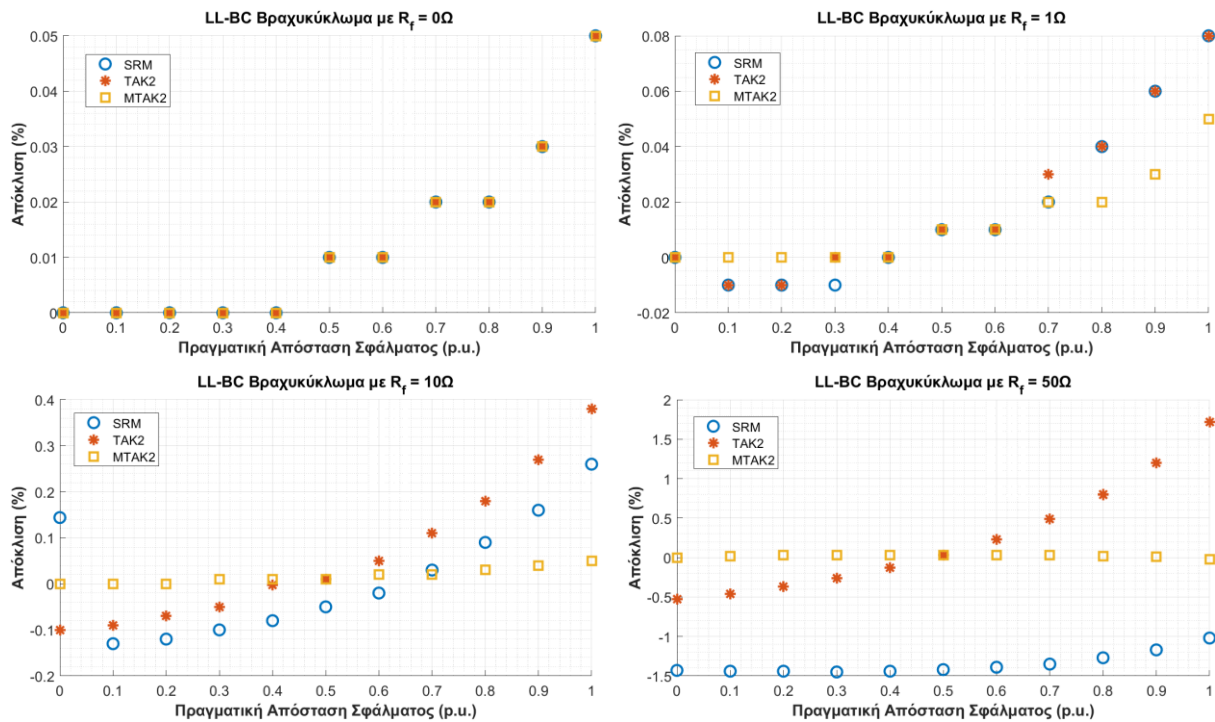
Στον Πίνακα 6.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK2, και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003         | 0,03%           | 0,9003          | 0,03%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0999        | -0,01%          | 0,0999         | -0,01%          | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1999        | -0,01%          | 0,1999         | -0,01%          | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2999        | -0,01%          | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7003         | 0,03%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8004        | 0,04%           | 0,8004         | 0,04%           | 0,8002          | 0,02%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9006        | 0,06%           | 0,9006         | 0,06%           | 0,9003          | 0,03%           |
|                        | 1                                             | 1,0008        | 0,08%           | 1,0008         | 0,08%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0014        | 0,14%           | -0,0010        | -0,10%          | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0987        | -0,13%          | 0,0991         | -0,09%          | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1988        | -0,12%          | 0,1993         | -0,07%          | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2990        | -0,10%          | 0,2995         | -0,05%          | 0,3001          | 0,01%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3992        | -0,08%          | 0,4000         | 0,00%           | 0,4001          | 0,01%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4995        | -0,05%          | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5998        | -0,02%          | 0,6005         | 0,05%           | 0,6002          | 0,02%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7003        | 0,03%           | 0,7011         | 0,11%           | 0,7002          | 0,02%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8009        | 0,09%           | 0,8018         | 0,18%           | 0,8003          | 0,03%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9016        | 0,16%           | 0,9027         | 0,27%           | 0,9004          | 0,04%           |
|                        | 1                                             | 1,0026        | 0,26%           | 1,0038         | 0,38%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | -0,0143       | -1,43%          | -0,0053        | -0,53%          | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0856        | -1,44%          | 0,0954         | -0,46%          | 0,1002          | 0,02%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1856        | -1,44%          | 0,1963         | -0,37%          | 0,2003          | 0,03%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2855        | -1,45%          | 0,2974         | -0,26%          | 0,3003          | 0,03%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3856        | -1,44%          | 0,3987         | -0,13%          | 0,4003          | 0,03%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4858        | -1,42%          | 0,5003         | 0,03%           | 0,5003          | 0,03%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5861        | -1,39%          | 0,6023         | 0,23%           | 0,6003          | 0,03%           |
|                        | 0,7                                           | 0,6865        | -1,35%          | 0,7049         | 0,49%           | 0,7003          | 0,03%           |
|                        | 0,8                                           | 0,7873        | -1,27%          | 0,8080         | 0,80%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,8883        | -1,17%          | 0,9120         | 1,20%           | 0,9001          | 0,01%           |
|                        | 1                                             | 0,9898        | -1,02%          | 1,0172         | 1,72%           | 0,9998          | -0,02%          |

**Πίνακας 6.14:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2



Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.17:



**Εικόνα 6.17:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

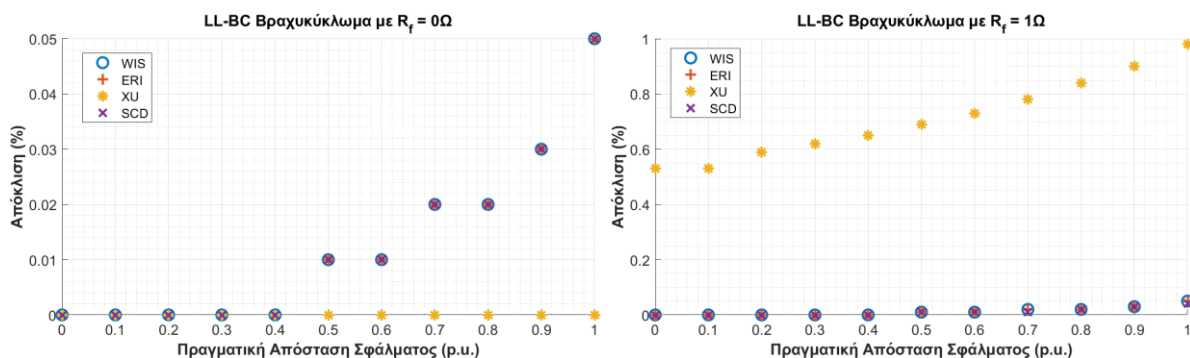
Οι αλγόριθμοι TAK0 και MTAK0 δεν είναι εφαρμόσιμοι στη περίπτωση του LL βραχυκυκλώματος διότι ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος δεν συμπεριλαμβάνει γη και ως εκ τούτου τα μεγέθη της μηδενικής ακολουθίας είναι μηδενικά. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση για  $R_f=0\Omega$ ,  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$ . Για  $R_f=50\Omega$  η απόκλιση των μεθόδων είναι αυξημένη αλλά σε αποδεκτά επίπεδα. Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση και για κάθε μέθοδο η απόκλιση αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ηλεκτρονόμο. Εξαιρετική αποτελεί η SRM για  $R_f=10\Omega$  όπου η απόκλιση αρχικά μειώνεται με την αύξηση της απόστασης, περνάει το μηδέν και στην συνέχεια βαίνει εκθετικά αυξανόμενη. Επίσης, για  $R_f=50\Omega$ , η απόκλιση αυτού του αλγορίθμου μειώνεται εκθετικά. Ακόμα, είναι φανερό ότι σε κάθε δοκιμή η MTAK2 έχει εξαιρετική συμπεριφορά και βελτιώνει την απόδοση της TAK2. Τέλος, η απόκλιση σε όλες τις μεθόδους διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Επομένως, όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

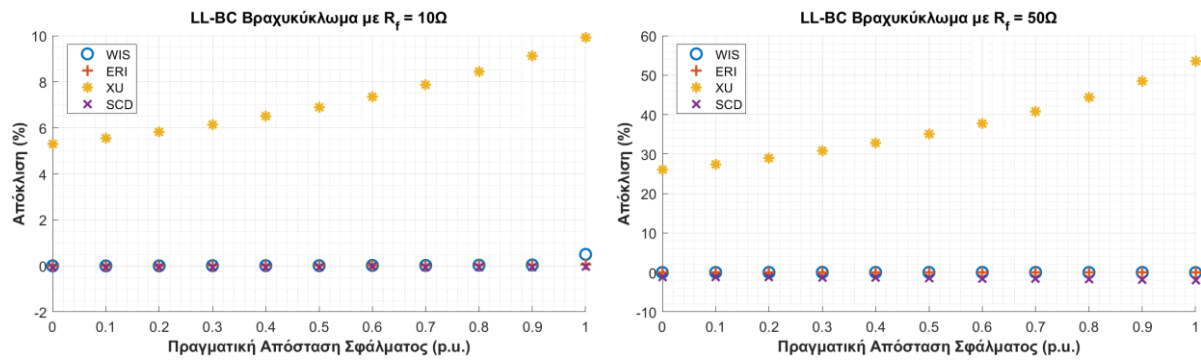
Στον Πίνακα 6.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | WIS (p.u.) | Απόκλιση (%) | ERI (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος ERI (Ω) | Σφάλμα (%) | XU (p.u.) | Απόκλιση (%) | SCD (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SCD (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|-----------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,5000    | 0,00%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,6000    | 0,00%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,7000    | 0,00%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,8000    | 0,00%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -          | 0,9000    | 0,00%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -          |
|                     | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,001                       | -          | 1,0000    | 0,00%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 1,731                       | 73,08%     | 0,0053    | 0,53%        | 0,0000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 1,731                       | 73,06%     | 0,1053    | 0,53%        | 0,1000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 1,731                       | 73,05%     | 0,2059    | 0,59%        | 0,2000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 1,731                       | 73,05%     | 0,3062    | 0,62%        | 0,3000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 1,731                       | 73,05%     | 0,4065    | 0,65%        | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 1,731                       | 73,05%     | 0,5069    | 0,69%        | 0,5001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,03%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,6001     | 0,01%        | 1,731                       | 73,05%     | 0,6073    | 0,73%        | 0,6001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,04%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 1,731                       | 73,06%     | 0,7078    | 0,78%        | 0,7001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,05%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8002     | 0,02%        | 1,731                       | 73,08%     | 0,8084    | 0,84%        | 0,8002     | 0,02%        | 1,001                       | 0,07%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,9003     | 0,03%        | 1,731                       | 73,09%     | 0,9090    | 0,90%        | 0,9003     | 0,03%        | 1,001                       | 0,09%      |
|                     | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 1,0005     | 0,05%        | 1,731                       | 73,10%     | 1,0098    | 0,98%        | 1,0004     | 0,04%        | 1,001                       | 0,11%      |
| Rf = 10Ω            | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 17,308                      | 73,08%     | 0,0529    | 5,29%        | -0,0004    | -0,04%       | 9,998                       | -0,02%     |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 17,306                      | 73,06%     | 0,1555    | 5,55%        | 0,0995     | -0,05%       | 9,998                       | -0,02%     |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 17,605                      | 76,05%     | 0,2583    | 5,83%        | 0,1995     | -0,05%       | 9,998                       | -0,02%     |
|                     | 0,3                                  | 0,3001     | 0,01%        | 0,3001     | 0,01%        | 17,304                      | 73,04%     | 0,3615    | 6,15%        | 0,2995     | -0,05%       | 9,998                       | -0,02%     |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 0,4001     | 0,01%        | 17,304                      | 73,04%     | 0,4651    | 6,51%        | 0,3995     | -0,05%       | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 17,304                      | 73,04%     | 0,5690    | 6,90%        | 0,4995     | -0,05%       | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,6002     | 0,02%        | 0,6002     | 0,02%        | 17,304                      | 73,04%     | 0,6735    | 7,35%        | 0,6000     | 0,00%        | 10,000                      | 0,00%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 17,304                      | 73,04%     | 0,7786    | 7,86%        | 0,6995     | -0,05%       | 10,011                      | 0,11%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8003     | 0,03%        | 0,8003     | 0,03%        | 17,304                      | 73,04%     | 0,8844    | 8,44%        | 0,7995     | -0,05%       | 10,002                      | 0,02%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9004     | 0,04%        | 0,9004     | 0,04%        | 17,305                      | 73,05%     | 0,9912    | 9,12%        | 0,8995     | -0,05%       | 10,004                      | 0,04%      |
|                     | 1                                    | 1,0050     | 0,50%        | 1,0005     | 0,05%        | 17,305                      | 73,05%     | 1,0991    | 9,91%        | 0,9996     | -0,04%       | 10,006                      | 0,06%      |
| Rf = 50Ω            | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 86,533                      | 73,07%     | 0,2602    | 26,02%       | -0,0112    | -1,12%       | 49,927                      | -0,15%     |
|                     | 0,1                                  | 0,1002     | 0,02%        | 0,1002     | 0,02%        | 86,525                      | 73,05%     | 0,3745    | 27,45%       | 0,0883     | -1,17%       | 49,926                      | -0,15%     |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 0,2002     | 0,02%        | 86,518                      | 73,04%     | 0,4905    | 29,05%       | 0,1877     | -1,23%       | 49,926                      | -0,15%     |
|                     | 0,3                                  | 0,3003     | 0,03%        | 0,3002     | 0,02%        | 86,513                      | 73,03%     | 0,6084    | 30,84%       | 0,2872     | -1,28%       | 49,927                      | -0,15%     |
|                     | 0,4                                  | 0,4003     | 0,03%        | 0,4003     | 0,03%        | 86,510                      | 73,02%     | 0,7286    | 32,86%       | 0,3865     | -1,35%       | 49,929                      | -0,14%     |
|                     | 0,5                                  | 0,5003     | 0,03%        | 0,5003     | 0,03%        | 86,508                      | 73,02%     | 0,8515    | 35,15%       | 0,4858     | -1,42%       | 49,932                      | -0,14%     |
|                     | 0,6                                  | 0,6003     | 0,03%        | 0,6004     | 0,04%        | 86,508                      | 73,02%     | 0,9778    | 37,78%       | 0,5850     | -1,50%       | 49,936                      | -0,13%     |
|                     | 0,7                                  | 0,7003     | 0,03%        | 0,7004     | 0,04%        | 86,508                      | 73,02%     | 1,1082    | 40,82%       | 0,6841     | -1,59%       | 49,941                      | -0,12%     |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8005     | 0,05%        | 86,510                      | 73,02%     | 1,2436    | 44,36%       | 0,7830     | -1,70%       | 49,948                      | -0,10%     |
|                     | 0,9                                  | 0,9001     | 0,01%        | 0,9005     | 0,05%        | 86,513                      | 73,03%     | 1,3856    | 48,56%       | 0,8819     | -1,81%       | 49,955                      | -0,09%     |
|                     | 1                                    | 0,9998     | -0,02%       | 1,0006     | 0,06%        | 86,517                      | 73,03%     | 1,5359    | 53,59%       | 0,9805     | -1,95%       | 49,935                      | -0,13%     |

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.18:





**Εικόνα 6.18:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

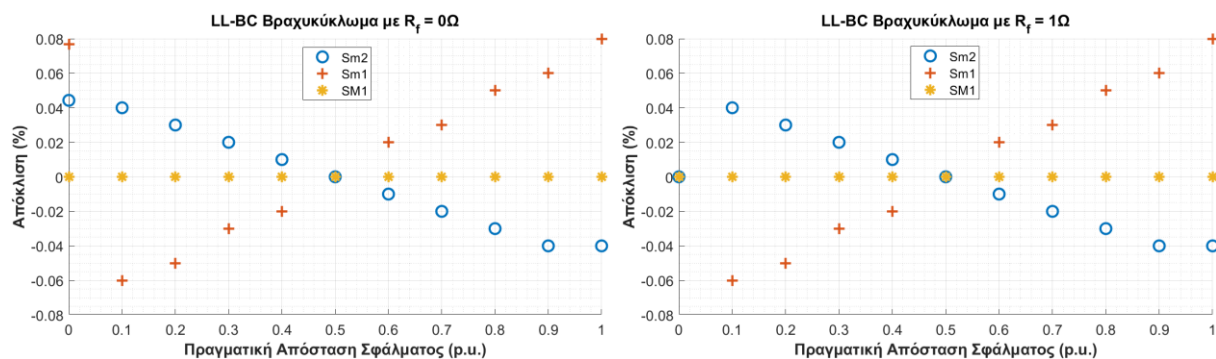
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, δηλαδή για  $R_f=0\Omega$ . Η WIS, η ERI και η SCD παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις, ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Η SCD υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με εξαιρετική ακρίβεια. Αντίθετα, η ERI έχει σημαντικό και μόνιμο σφάλμα. Επίσης, γίνεται και εδώ φανερό η άμεση εξάρτηση της μεθόδου του XU από την αύξηση της αντίστασης σφάλματος, η οποία οδηγεί τον αλγόριθμο σε σημαντική υπερεκτίμηση της θέσης του σφάλματος και άρα χειρότερα αποτελέσματα. Τέλος, η απόκλιση στις WIS, ERI και SCD διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Επομένως, αυτές έχουν αποδεκτή συμπεριφορά, ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος.

Στον Πίνακα 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

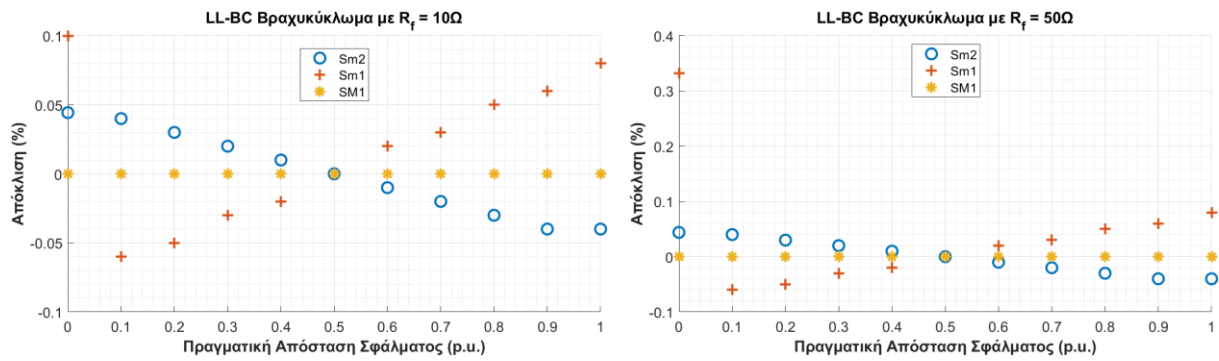
| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 0,000                             | -             | 0,0008        | 0,08%           | 0,001                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 0,000                             | -             | 0,0994        | -0,06%          | 0,001                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,1995        | -0,05%          | 0,000                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,2997        | -0,03%          | 0,000                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,3998        | -0,02%          | 0,000                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 0,000                             | -             | 0,6002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 0,000                             | -             | 0,7003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 0,001                             | -             | 0,8005        | 0,05%           | 0,000                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 0,9006        | 0,06%           | 0,000                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 1,0008        | 0,08%           | 0,000                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 1,000                             | -0,04%        | 0,0000        | 0,00%           | 0,999                             | -0,07%        | 0             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 1,000                             | -0,03%        | 0,0994        | -0,06%          | 1,001                             | 0,07%         | 0,1           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 1,000                             | -0,02%        | 0,1995        | -0,05%          | 1,001                             | 0,06%         | 0,2           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 1,000                             | -0,01%        | 0,2997        | -0,03%          | 1,000                             | 0,04%         | 0,3           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,01%         | 0,3998        | -0,02%          | 1,000                             | 0,03%         | 0,4           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 1,001                             | 0,05%         | 0,6002        | 0,02%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,6           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 1,001                             | 0,08%         | 0,7003        | 0,03%           | 1,000                             | 0,04%         | 0,7           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 1,001                             | 0,11%         | 0,8005        | 0,05%           | 1,001                             | 0,05%         | 0,8           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 1,001                             | 0,14%         | 0,9006        | 0,06%           | 1,001                             | 0,07%         | 0,9           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 1,002                             | 0,17%         | 1,0008        | 0,08%           | 1,001                             | 0,09%         | 1             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 9,997                             | -0,03%        | 0,0010        | 0,10%           | 9,997                             | -0,03%        | 0             | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 9,997                             | -0,03%        | 0,0994        | -0,06%          | 9,998                             | -0,02%        | 0,1           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 9,997                             | -0,03%        | 0,1995        | -0,05%          | 9,998                             | -0,02%        | 0,2           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 9,998                             | -0,02%        | 0,2997        | -0,03%          | 9,998                             | -0,02%        | 0,3           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 9,998                             | -0,02%        | 0,3998        | -0,02%          | 9,998                             | -0,02%        | 0,4           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 9,999                             | -0,01%        | 0,5000        | 0,00%           | 9,999                             | -0,01%        | 0,5           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 10,000                            | 0,00%         | 0,6002        | 0,02%           | 10,000                            | -0,01%        | 0,6           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 10,001                            | 0,01%         | 0,7003        | 0,03%           | 10,001                            | 0,01%         | 0,7           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 10,002                            | 0,02%         | 0,8005        | 0,05%           | 10,002                            | 0,02%         | 0,8           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 10,004                            | 0,04%         | 0,9006        | 0,06%           | 10,003                            | 0,03%         | 0,9           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 10,006                            | 0,06%         | 1,0008        | 0,08%           | 10,005                            | 0,05%         | 1             | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 49,915                            | -0,17%        | 0,0033        | 0,33%           | 49,914                            | -0,17%        | 0             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 49,914                            | -0,17%        | 0,0994        | -0,06%          | 49,915                            | -0,17%        | 0,1           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 49,135                            | -1,73%        | 0,1995        | -0,05%          | 49,914                            | -0,17%        | 0,2           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 49,915                            | -0,17%        | 0,2997        | -0,03%          | 49,915                            | -0,17%        | 0,3           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 49,917                            | -0,17%        | 0,3998        | -0,02%          | 49,917                            | -0,17%        | 0,4           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 49,920                            | -0,16%        | 0,5000        | 0,00%           | 49,920                            | -0,16%        | 0,5           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 49,924                            | -0,15%        | 0,6002        | 0,02%           | 49,924                            | -0,15%        | 0,6           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |

Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.19:



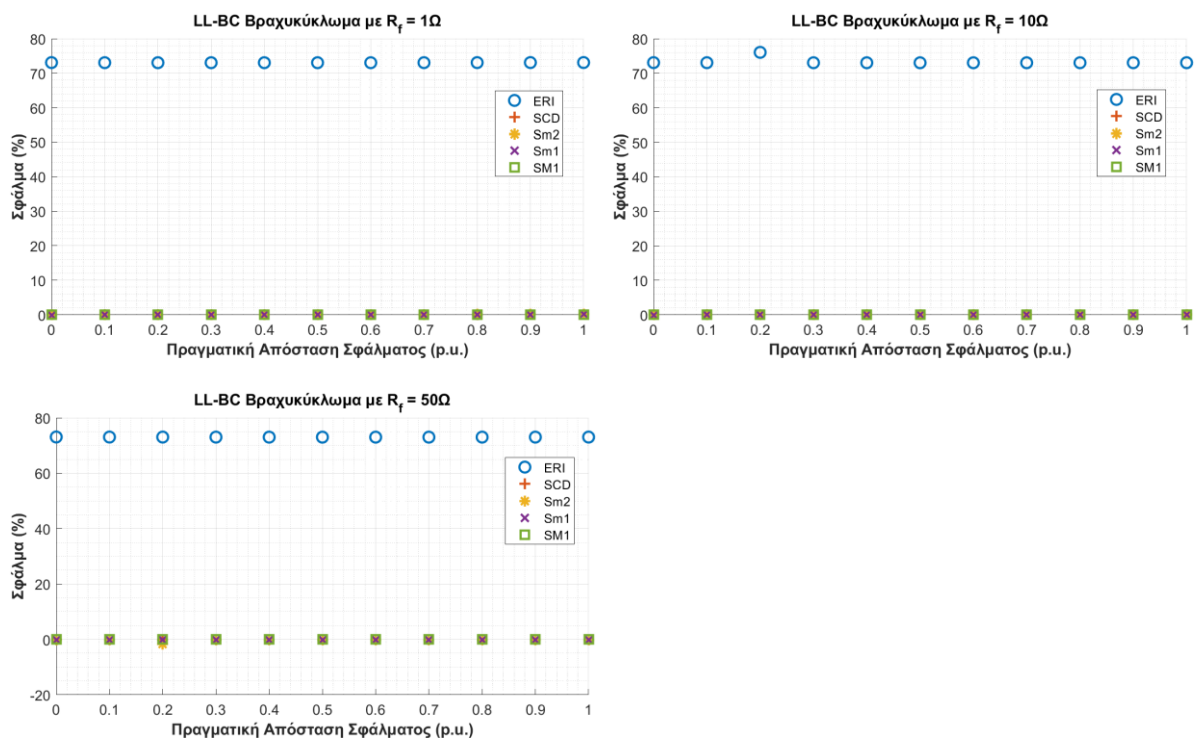




**Εικόνα 6.19:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση και τη θέση του σφάλματος. Η SM1 είναι σαφώς ανώτερη εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση. Γενικότερα, όλες οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές και σχεδόν αμελητέες. Τέλος, παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και της Sm2 έχουν αντίθετο ρυθμό μεταβολής. Όλες οι μέθοδοι είναι και εδώ αποδεκτές.

Στην Εικόνα 6.20 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.20:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα γίνεται εμφανές το μόνιμο σφάλμα έχει η ERI στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό το σφάλμα είναι της τάξης του 70% με 80%. Οι υπόλοιπες μέθοδοι έχουν πολύ καλά αποτελέσματα με ουσιαστικά αμελητέο σφάλμα στον ίδιο υπολογισμό.

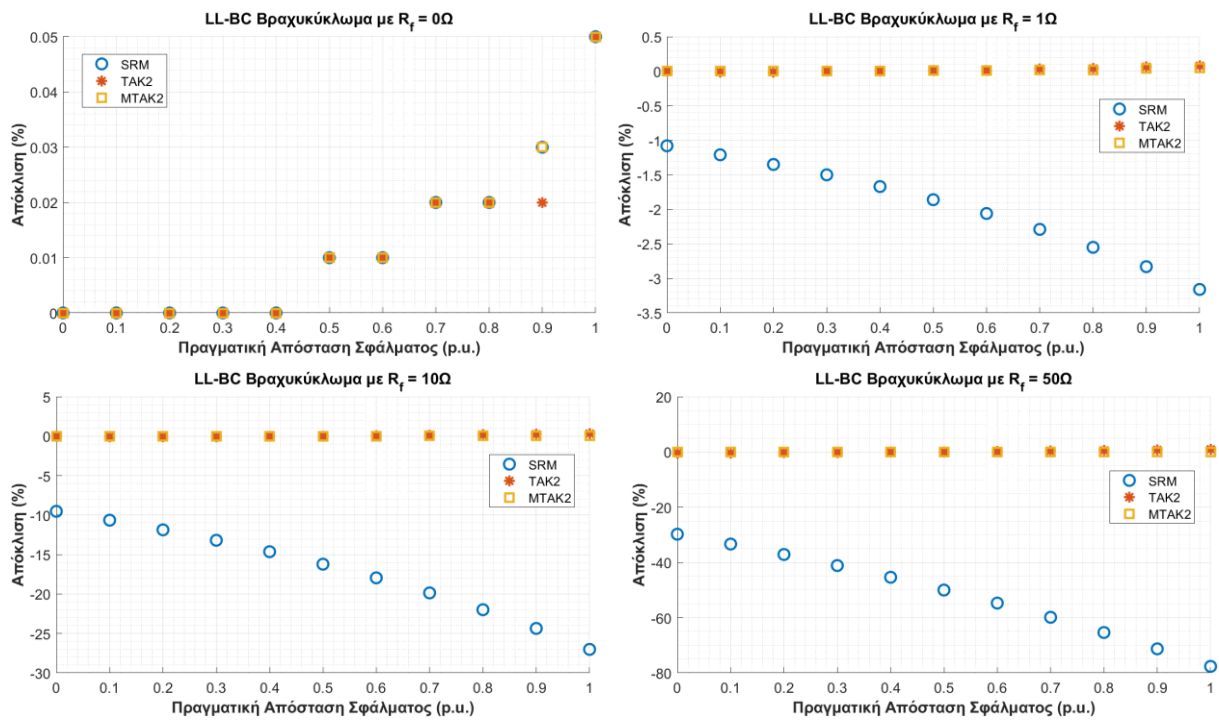
## 6.2.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο

Στον Πίνακα 6.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK2 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9002         | 0,02%           | 0,9003          | 0,03%           |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0005          | 0,05%           |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | -0,0108       | -1,08%          | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0879        | -1,21%          | 0,0999         | -0,01%          | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1865        | -1,35%          | 0,1999         | -0,01%          | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2850        | -1,50%          | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3833        | -1,67%          | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4814        | -1,86%          | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5794        | -2,06%          | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,6771        | -2,29%          | 0,7003         | 0,03%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,7745        | -2,55%          | 0,8004         | 0,04%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,8717        | -2,83%          | 0,9006         | 0,06%           | 0,9004          | 0,04%           |
|                        | 1                                             | 0,9684        | -3,16%          | 1,0008         | 0,08%           | 1,0005          | 0,05%           |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | -0,0952       | -9,52%          | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | -0,0064       | -10,64%         | 0,0992         | -0,08%          | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,0813        | -11,87%         | 0,1993         | -0,07%          | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,1681        | -13,19%         | 0,2995         | -0,05%          | 0,3001          | 0,01%           |
|                        | 0,4                                           | 0,2536        | -14,64%         | 0,3998         | -0,02%          | 0,4001          | 0,01%           |
|                        | 0,5                                           | 0,3378        | -16,22%         | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,4205        | -17,95%         | 0,6005         | 0,05%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,5014        | -19,86%         | 0,7010         | 0,10%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,5801        | -21,99%         | 0,8016         | 0,16%           | 0,8003          | 0,03%           |
|                        | 0,9                                           | 0,6564        | -24,36%         | 0,9024         | 0,24%           | 0,9004          | 0,04%           |
|                        | 1                                             | 0,7298        | -27,02%         | 1,0034         | 0,34%           | 1,0005          | 0,05%           |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | -0,2977       | -29,77%         | -0,0037        | -0,37%          | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | -0,2334       | -33,34%         | 0,0968         | -0,32%          | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | -0,1711       | -37,11%         | 0,1975         | -0,25%          | 0,2001          | 0,01%           |
|                        | 0,3                                           | -0,1112       | -41,12%         | 0,2982         | -0,18%          | 0,3001          | 0,01%           |
|                        | 0,4                                           | -0,0537       | -45,37%         | 0,3991         | -0,09%          | 0,4001          | 0,01%           |
|                        | 0,5                                           | 0,0001        | -49,99%         | 0,5002         | 0,02%           | 0,5002          | 0,02%           |
|                        | 0,6                                           | 0,0529        | -54,71%         | 0,6015         | 0,15%           | 0,6002          | 0,02%           |
|                        | 0,7                                           | 0,1014        | -59,86%         | 0,7030         | 0,30%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,1463        | -65,37%         | 0,8049         | 0,49%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,1872        | -71,28%         | 0,9072         | 0,72%           | 0,9002          | 0,02%           |
|                        | 1                                             | 0,2236        | -77,64%         | 1,0100         | 1,00%           | 1,0002          | 0,02%           |

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.21:



**Εικόνα 6.21:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η TAK2 έχει πολύ καλή απόδοση σε κάθε δοκιμή. Η MTAK2 έχει εξαιρετική συμπεριφορά, με ουσιαστικά μηδενική απόκλιση και βελτιώνει την TAK2 σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από τη θέση και την αντίσταση σφάλματος. Η μέθοδος SRM παρουσιάζει αποδεκτά αποτελέσματα όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος. Η αύξηση της αντίστασης σφάλματος οδηγεί την SRM σε υποεκτίμηση της θέσης του σφάλματος, με την απόκλισή της να χειροτερεύει όσο η πραγματική απόσταση του σφάλματος αυξάνεται.

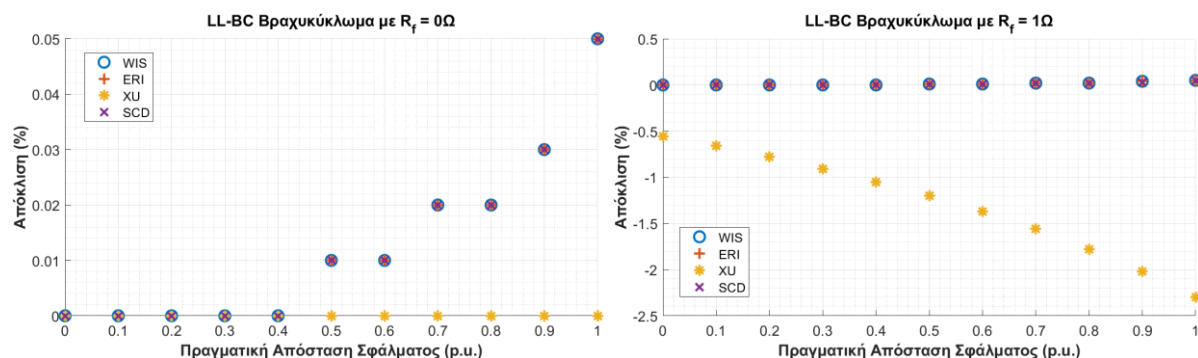
Συγκρίνοντας την απόδοση των μεθόδων χωρίς και με φορτίο, παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση η SRM υπερεκτιμά το σφάλμα ενώ στην δεύτερη το υποεκτιμά. Οι TAK2 και MTAK2 έχουν παρόμοια συμπεριφορά, που όμως είναι λίγο βελτιωμένη στην περίπτωση με φορτίο.

Στον Πίνακα 6.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

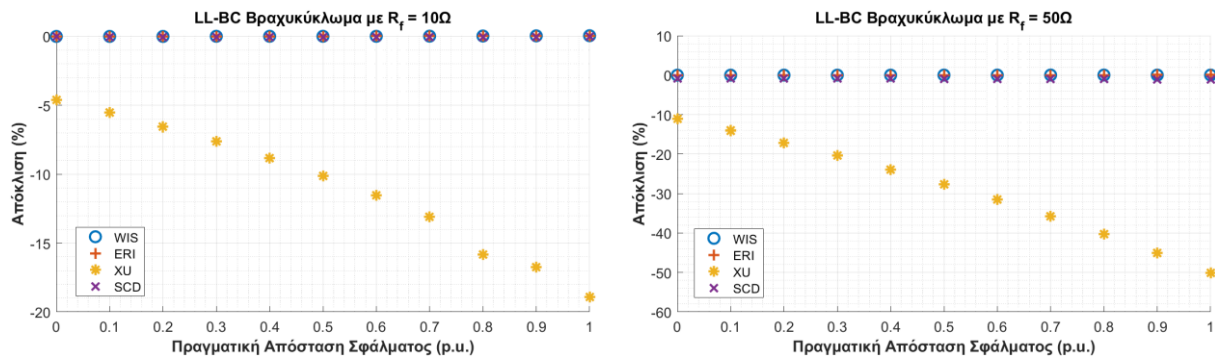
| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,6000       | 0,00%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,7000       | 0,00%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,8000       | 0,00%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,9000       | 0,00%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,001                             | -             | 1,0000       | 0,00%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,731                             | 73,08%        | -0,0055      | -0,55%          | 0,0000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,00%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,731                             | 73,07%        | 0,0934       | -0,66%          | 0,1000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,00%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 1,731                             | 73,06%        | 0,1922       | -0,78%          | 0,2000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,00%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 1,731                             | 73,05%        | 0,2909       | -0,91%          | 0,3000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,01%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 1,731                             | 73,05%        | 0,3895       | -1,05%          | 0,4000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,01%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 1,731                             | 73,05%        | 0,4880       | -1,20%          | 0,5001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 1,731                             | 73,06%        | 0,5863       | -1,37%          | 0,6001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,04%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 1,731                             | 73,07%        | 0,6844       | -1,56%          | 0,7002        | 0,02%           | 1,001                             | 0,05%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 1,731                             | 73,08%        | 0,7822       | -1,78%          | 0,8002        | 0,02%           | 1,001                             | 0,07%         |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9004        | 0,04%           | 0,9004        | 0,04%           | 1,731                             | 73,09%        | 0,8798       | -2,02%          | 0,9003        | 0,03%           | 1,001                             | 0,09%         |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 1,731                             | 73,11%        | 0,9770       | -2,30%          | 1,0005        | 0,05%           | 1,001                             | 0,12%         |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 17,308                            | 73,08%        | -0,0461      | -4,61%          | 0,0000        | 0,00%           | 9,996                             | -0,04%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 17,306                            | 73,06%        | 0,0446       | -5,54%          | 0,0995        | -0,05%          | 9,996                             | -0,04%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 17,305                            | 73,05%        | 0,1345       | -6,55%          | 0,1995        | -0,05%          | 9,996                             | -0,04%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3001        | 0,01%           | 0,3001        | 0,01%           | 17,305                            | 73,05%        | 0,2237       | -7,63%          | 0,2995        | -0,05%          | 9,997                             | -0,03%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 0,4001        | 0,01%           | 17,304                            | 73,04%        | 0,3118       | -8,82%          | 0,3995        | -0,05%          | 9,997                             | -0,03%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 17,304                            | 73,04%        | 0,3989       | -10,11%         | 0,4995        | -0,05%          | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6002        | 0,02%           | 17,304                            | 73,04%        | 0,4847       | -11,53%         | 0,5996        | -0,04%          | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 17,304                            | 73,04%        | 0,5690       | -13,10%         | 0,6996        | -0,04%          | 10,000                            | 0,00%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8003        | 0,03%           | 0,8003        | 0,03%           | 17,305                            | 73,05%        | 0,6417       | -15,83%         | 0,7996        | -0,04%          | 10,001                            | 0,01%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9004        | 0,04%           | 0,9004        | 0,04%           | 17,305                            | 73,05%        | 0,7324       | -16,76%         | 0,8997        | -0,03%          | 10,003                            | 0,03%         |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 17,306                            | 73,06%        | 0,8108       | -18,92%         | 0,9998        | -0,02%          | 10,005                            | 0,05%         |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 86,539                            | 73,08%        | -0,1105      | -11,05%         | -0,0079       | -0,79%          | 49,897                            | -0,21%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 86,531                            | 73,06%        | -0,0400      | -14,00%         | 0,0919        | -0,81%          | 49,896                            | -0,21%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2001        | 0,01%           | 0,2001        | 0,01%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,0288       | -17,12%         | 0,1916        | -0,84%          | 49,897                            | -0,21%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3001        | 0,01%           | 0,3001        | 0,01%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,0959       | -20,41%         | 0,2914        | -0,86%          | 49,898                            | -0,20%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 0,4001        | 0,01%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,1610       | -23,90%         | 0,3911        | -0,89%          | 49,901                            | -0,20%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5002        | 0,02%           | 0,5002        | 0,02%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,2239       | -27,61%         | 0,4909        | -0,91%          | 49,049                            | -1,90%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6002        | 0,02%           | 0,6002        | 0,02%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,2845       | -31,55%         | 0,5906        | -0,94%          | 49,910                            | -0,18%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7003        | 0,03%           | 0,7003        | 0,03%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,3426       | -35,74%         | 0,6903        | -0,97%          | 49,916                            | -0,17%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8003        | 0,03%           | 0,8003        | 0,03%           | 86,523                            | 73,05%        | 0,3978       | -40,22%         | 0,7900        | -1,00%          | 49,923                            | -0,15%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9002        | 0,02%           | 0,9004        | 0,04%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,4500       | -45,00%         | 0,8897        | -1,03%          | 49,931                            | -0,14%        |
|                        | 1                                             | 1,0002        | 0,02%           | 1,0005        | 0,05%           | 86,525                            | 73,05%        | 0,4987       | -50,13%         | 0,9893        | -1,07%          | 49,940                            | -0,12%        |

**Πίνακας 6.18:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.22:







**Εικόνα 6.22** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος, δηλαδή για  $R_f=0\Omega$ . Η WIS, η ERI και η SCD παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις, ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Η SCD υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με εξαιρετική ακρίβεια. Αντίθετα, η ERI έχει σημαντικό και μόνιμο σφάλμα. Ακόμα, γίνεται και εδώ φανερό η άμεση εξάρτηση της μέθοδου του XU από την αύξηση της αντίστασης σφάλματος, η οποία οδηγεί τον αλγόριθμο σε σημαντική υποεκτίμηση της θέσης του σφάλματος και άρα χειρότερα αποτελέσματα. Τέλος, η απόκλιση στις WIS, ERI και SCD διατηρείται συνεχώς κάτω του 2%, δηλαδή μικρότερη των 7km. Επομένως, αυτές έχουν αποδεκτή συμπεριφορά, ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος.

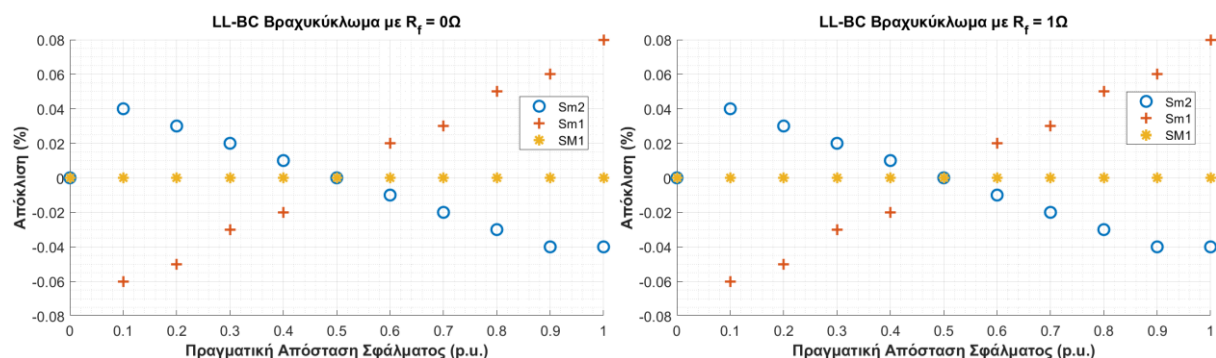
Συγκρίνοντας την απόδοση των μεθόδων WIS, ERI και SCD για την περίπτωση με χωρίς και με φορτίο, παρατηρούμε ότι έχουμε παρόμοια συμπεριφορά, με την δεύτερη περίπτωση να παρουσιάζει λίγο μικρότερες αποκλίσεις. Εξάιρεση είναι η μέθοδος XU, η οποία με φορτισμένη γραμμή υποεκτιμά την θέση του σφάλματος, ενώ με αφόρτιστη γραμμή το υποεκτιμά.

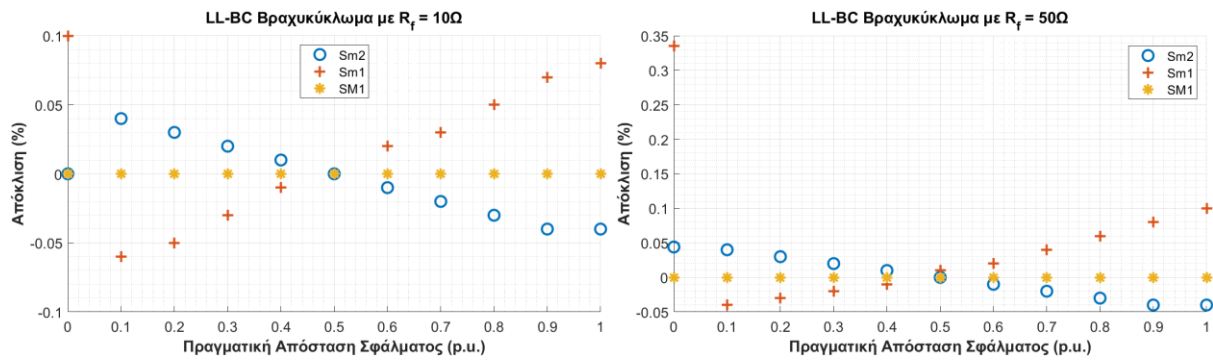
Στον Πίνακα 6.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 0,000                             | -             | 0,0994        | -0,06%          | 0,000                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,1995        | -0,05%          | 0,001                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,2997        | -0,03%          | 0,000                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,3998        | -0,02%          | 0,000                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 0,000                             | -             | 0,6002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 0,000                             | -             | 0,7003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 0,001                             | -             | 0,8005        | 0,05%           | 0,001                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 0,9006        | 0,06%           | 0,001                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 1,0008        | 0,08%           | 0,001                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 1,001                             | 0,06%         | 0,0000        | 0,00%           | 1,001                             | 0,10%         | 0             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 1,001                             | 0,05%         | 0,0994        | -0,06%          | 0,999                             | -0,08%        | 0,1           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 1,000                             | 0,04%         | 0,1995        | -0,05%          | 0,999                             | -0,06%        | 0,2           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,2997        | -0,03%          | 1,000                             | -0,04%        | 0,3           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,3998        | -0,02%          | 1,000                             | -0,01%        | 0,4           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,02%         | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,02%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 1,000                             | 0,00%         | 0,6002        | 0,02%           | 1,001                             | 0,05%         | 0,6           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 1,000                             | -0,01%        | 0,7003        | 0,03%           | 1,001                             | 0,08%         | 0,7           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 1,000                             | -0,02%        | 0,8005        | 0,05%           | 1,001                             | 0,11%         | 0,8           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 1,000                             | -0,03%        | 0,9006        | 0,06%           | 1,001                             | 0,14%         | 0,9           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 1,000                             | -0,03%        | 1,0008        | 0,08%           | 1,002                             | 0,17%         | 1             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 9,997                             | -0,03%        | 0,0010        | 0,10%           | 9,998                             | -0,02%        | 0             | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 9,997                             | -0,03%        | 0,0994        | -0,06%          | 9,996                             | -0,04%        | 0,1           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 9,997                             | -0,03%        | 0,1995        | -0,05%          | 9,996                             | -0,04%        | 0,2           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 9,998                             | -0,02%        | 0,2997        | -0,03%          | 9,997                             | -0,03%        | 0,3           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 9,998                             | -0,02%        | 0,3999        | -0,01%          | 9,998                             | -0,02%        | 0,4           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 9,999                             | -0,01%        | 0,5000        | 0,00%           | 9,999                             | -0,01%        | 0,5           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 9,999                             | -0,01%        | 0,6002        | 0,02%           | 10,000                            | 0,00%         | 0,6           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 10,000                            | 0,00%         | 0,7003        | 0,03%           | 10,001                            | 0,01%         | 0,7           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 10,002                            | 0,02%         | 0,8005        | 0,05%           | 10,003                            | 0,03%         | 0,8           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 10,003                            | 0,03%         | 0,9007        | 0,07%           | 10,005                            | 0,05%         | 0,9           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 10,004                            | 0,04%         | 1,0008        | 0,08%           | 10,007                            | 0,07%         | 1             | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 49,904                            | -0,19%        | 0,0034        | 0,34%           | 49,906                            | -0,19%        | 0             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 49,905                            | -0,19%        | 0,0996        | -0,04%          | 49,904                            | -0,19%        | 0,1           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 49,907                            | -0,19%        | 0,1997        | -0,03%          | 49,906                            | -0,19%        | 0,2           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 49,910                            | -0,18%        | 0,2998        | -0,02%          | 49,910                            | -0,18%        | 0,3           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 49,914                            | -0,17%        | 0,3999        | -0,01%          | 49,914                            | -0,17%        | 0,4           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 49,920                            | -0,16%        | 0,5001        | 0,01%           | 49,920                            | -0,16%        | 0,5           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 49,926                            | -0,15%        | 0,6002        | 0,02%           | 49,927                            | -0,15%        | 0,6           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 49,933                            | -0,13%        | 0,7004        | 0,04%           | 49,934                            | -0,13%        | 0,7           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 49,941                            | -0,12%        | 0,8006        | 0,06%           | 49,943                            | -0,11%        | 0,8           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 49,951                            | -0,10%        | 0,9008        | 0,08%           | 49,953                            | -0,09%        | 0,9           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 49,961                            | -0,08%        | 1,0010        | 0,10%           | 49,964                            | -0,07%        | 1             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |

Πίνακας 6.19: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.23:

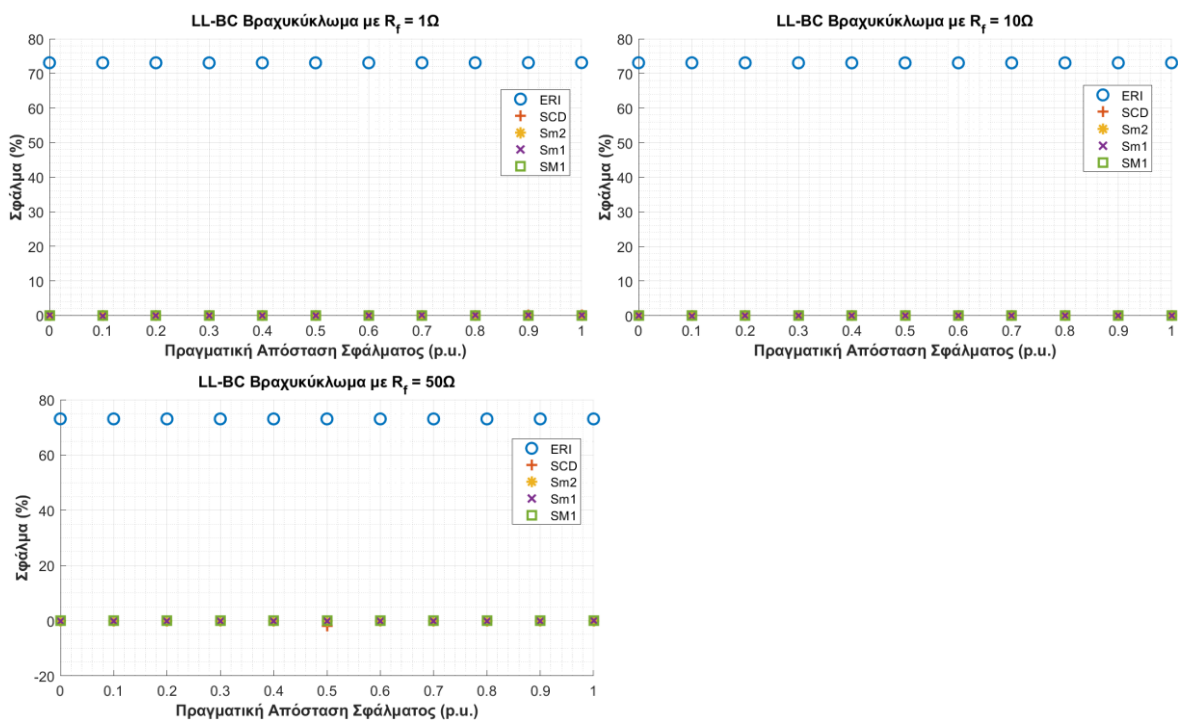




**Εικόνα 6.23:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση και τη θέση του σφάλματος. Η SM1 είναι σαφώς ανώτερη εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση. Τέλος, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Όλες οι μέθοδοι είναι και εδώ αποδεκτές.

Στην Εικόνα 6.24 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.24:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα γίνεται εμφανές το μόνιμο σφάλμα έχει η ERI στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό το σφάλμα είναι της τάξης του 70% με 80%. Οι υπόλοιπες μέθοδοι έχουν πολύ καλά αποτελέσματα με ουσιαστικά αμελητέο σφάλμα στον ίδιο υπολογισμό.

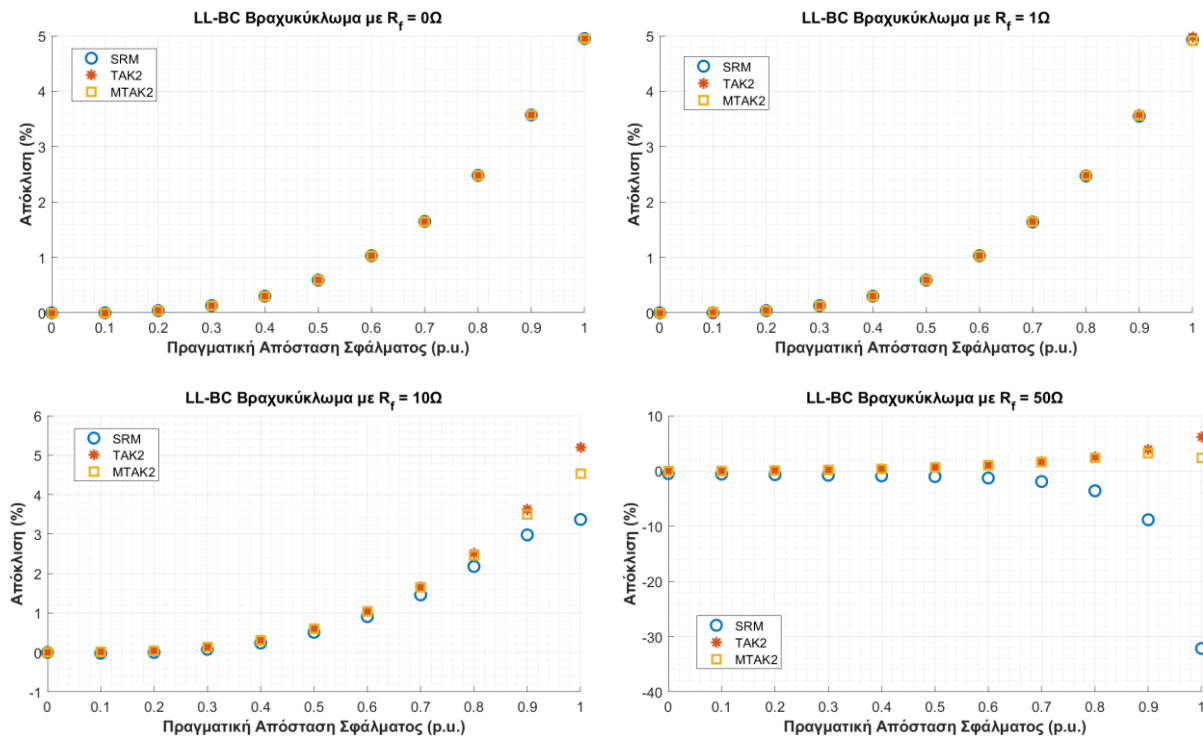
### 6.2.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο

Στον Πίνακα 6.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK2 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030         | 0,30%           | 0,4030          | 0,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059         | 0,59%           | 0,5059          | 0,59%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103         | 1,03%           | 0,6103          | 1,03%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165         | 1,65%           | 0,7165          | 1,65%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248         | 2,48%           | 0,8248          | 2,48%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9357         | 3,57%           | 0,9357          | 3,57%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0495         | 4,95%           | 1,0495          | 4,95%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030         | 0,30%           | 0,4030          | 0,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059         | 0,59%           | 0,5059          | 0,59%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103         | 1,03%           | 0,6103          | 1,03%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7164        | 1,64%           | 0,7165         | 1,65%           | 0,7165          | 1,65%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8247        | 2,47%           | 0,8249         | 2,49%           | 0,8248          | 2,48%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9355        | 3,55%           | 0,9358         | 3,58%           | 0,9356          | 3,56%           |
|                        | 1                                             | 1,0493        | 4,93%           | 1,0498         | 4,98%           | 1,0491          | 4,91%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0998        | -0,02%          | 0,1001         | 0,01%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3008        | 0,08%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3014          | 0,14%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4024        | 0,24%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5051        | 0,51%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6091        | 0,91%           | 0,6104         | 1,04%           | 0,6104          | 1,04%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7146        | 1,46%           | 0,7166         | 1,66%           | 0,7165          | 1,65%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8218        | 2,18%           | 0,8251         | 2,51%           | 0,8246          | 2,46%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9298        | 2,98%           | 0,9363         | 3,63%           | 0,9350          | 3,50%           |
|                        | 1                                             | 1,0337        | 3,37%           | 1,0520         | 5,20%           | 1,0453          | 4,53%           |
|                        | 0                                             | -0,0048       | -0,48%          | 0,0000         | 0,00%           | 0,0001          | 0,01%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0943        | -0,57%          | 0,1001         | 0,01%           | 0,1003          | 0,03%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1933        | -0,67%          | 0,2005         | 0,05%           | 0,2007          | 0,07%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2923        | -0,77%          | 0,3015         | 0,15%           | 0,3017          | 0,17%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3912        | -0,88%          | 0,4033         | 0,33%           | 0,4035          | 0,35%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4898        | -1,02%          | 0,5063         | 0,63%           | 0,5063          | 0,63%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5872        | -1,28%          | 0,6108         | 1,08%           | 0,6106          | 1,06%           |
| Rf = 50Ω               | 0,7                                           | 0,6809        | -1,91%          | 0,7171         | 1,71%           | 0,7164          | 1,64%           |
|                        | 0,8                                           | 0,7641        | -3,59%          | 0,8259         | 2,59%           | 0,8239          | 2,39%           |
|                        | 0,9                                           | 0,8117        | -8,83%          | 0,9384         | 3,84%           | 0,9322          | 3,22%           |
|                        | 1                                             | 0,6787        | -32,13%         | 1,0619         | 6,19%           | 1,0235          | 2,35%           |

Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.25:



**Εικόνα 6.25:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η TAK2 και η MTAK2 έχουν παρόμοια συνεισφορά με την απόκλισή τους να αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ της θέσης του σφάλματος και του ηλεκτρονόμου. Ακόμα, αν αντιπαραβάλουμε τις δοκιμές για την ίδια θέση σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, παρατηρούμε ότι η απόκλιση των παραπάνω μεθόδων είναι ουσιαστικά σταθερή. Η MTAK2 βελτιώνει τα αποτελέσματα της TAK2 και εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση για  $R_f=50\Omega$ , η οποία μάλιστα είναι βελτιωμένη σε σχέση με την περίπτωση όπου  $R_f=10\Omega$ . Η μέθοδος SRM φαίνεται να ακολουθεί την συμπεριφορά των TAK2 και MTAK2 αλλά για  $R_f=50\Omega$  και σε μεγάλες αποστάσεις, υποεκτιμά την θέση του σφάλματος και η απόκλιση της αυξάνεται εκθετικά. Τέλος, δεδομένου ότι σε αρκετές δοκιμές η απόκλιση των SRM, TAK2 και MTAK2 υπερβαίνει το 2%, δεν τις θεωρούμε αποδεκτές.

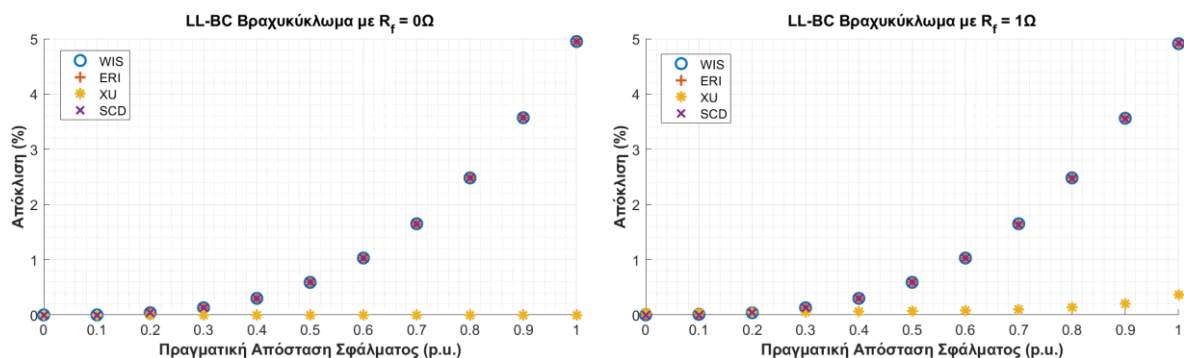


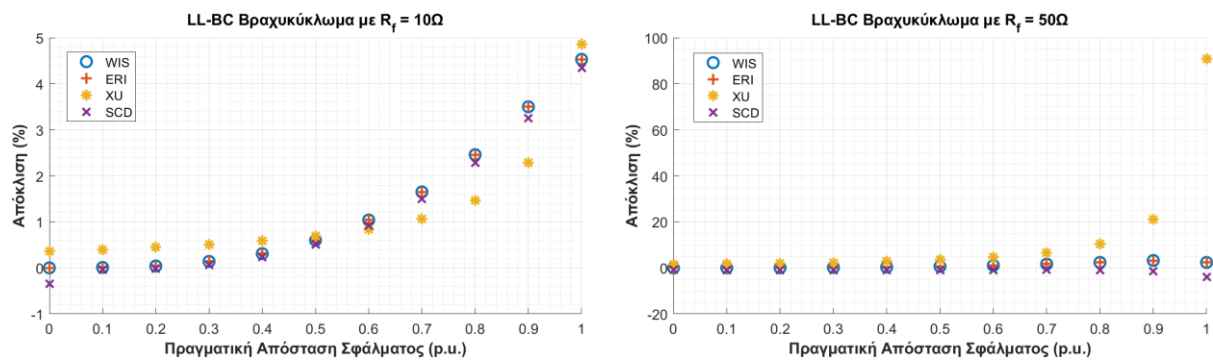
Στον Πίνακα 6.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,008                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,005                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,025                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,017                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,051                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,031                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,086                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,053                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,125                             | -             | 0,6000       | 0,00%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,077                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,160                             | -             | 0,7000       | 0,00%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,100                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,178                             | -             | 0,8000       | 0,00%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,116                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,165                             | -             | 0,9000       | 0,00%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,118                             | -             |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0495        | 4,95%           | 0,098                             | -             | 1,0000       | 0,00%           | 1,0495        | 4,95%           | 0,094                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,721                             | 72,08%        | 0,0004       | 0,04%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,006                             | 0,63%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 1,714                             | 71,42%        | 0,1004       | 0,04%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,011                             | 1,08%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 1,716                             | 71,62%        | 0,2005       | 0,05%           | 0,2004        | 0,04%           | 1,020                             | 1,95%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 1,730                             | 72,97%        | 0,3005       | 0,05%           | 0,3013        | 0,13%           | 1,035                             | 3,46%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 1,754                             | 75,40%        | 0,4006       | 0,06%           | 0,4030        | 0,30%           | 1,057                             | 5,69%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 1,786                             | 78,56%        | 0,5007       | 0,07%           | 0,5059        | 0,59%           | 1,085                             | 8,54%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 1,816                             | 81,60%        | 0,6008       | 0,08%           | 0,6103        | 1,03%           | 1,118                             | 11,78%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 1,830                             | 83,03%        | 0,7010       | 0,10%           | 0,7164        | 1,64%           | 1,150                             | 14,99%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248        | 2,48%           | 1,801                             | 80,10%        | 0,8014       | 0,14%           | 0,8247        | 2,47%           | 1,176                             | 17,59%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9356        | 3,56%           | 0,9356        | 3,56%           | 1,668                             | 66,84%        | 0,9020       | 0,20%           | 0,9355        | 3,55%           | 1,188                             | 18,79%        |
|                        | 1                                             | 1,0491        | 4,91%           | 1,0491        | 4,91%           | 1,120                             | 12,03%        | 1,0037       | 0,37%           | 1,0492        | 4,92%           | 1,176                             | 17,59%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 17,208                            | 72,08%        | 0,0036       | 0,36%           | -0,0035       | -0,35%          | 10,033                            | 0,33%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 17,131                            | 71,31%        | 0,1040       | 0,40%           | 0,0996        | -0,04%          | 10,072                            | 0,72%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 17,088                            | 70,88%        | 0,2045       | 0,45%           | 0,1999        | -0,01%          | 10,121                            | 1,21%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3014        | 0,14%           | 0,3014        | 0,14%           | 17,074                            | 70,74%        | 0,3051       | 0,51%           | 0,3007        | 0,07%           | 10,183                            | 1,83%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 17,078                            | 70,78%        | 0,4059       | 0,59%           | 0,4023        | 0,23%           | 10,259                            | 2,59%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 17,078                            | 70,78%        | 0,5069       | 0,69%           | 0,5051        | 0,51%           | 10,350                            | 3,50%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6104        | 1,04%           | 0,6104        | 1,04%           | 17,034                            | 70,34%        | 0,6084       | 0,84%           | 0,6092        | 0,92%           | 10,453                            | 4,53%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 16,865                            | 68,65%        | 0,7107       | 1,07%           | 0,7150        | 1,50%           | 10,564                            | 5,64%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8246        | 2,46%           | 0,8246        | 2,46%           | 16,414                            | 64,14%        | 0,8146       | 1,46%           | 0,8228        | 2,28%           | 10,678                            | 6,78%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9350        | 3,50%           | 0,9350        | 3,50%           | 15,245                            | 52,45%        | 0,9228       | 2,28%           | 0,9325        | 3,25%           | 10,787                            | 7,87%         |
|                        | 1                                             | 1,0453        | 4,53%           | 1,0453        | 4,53%           | 11,951                            | 19,51%        | 1,0486       | 4,86%           | 1,0435        | 4,35%           | 10,879                            | 8,79%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0001        | 0,01%           | 0,0001        | 0,01%           | 86,031                            | 72,06%        | 0,0146       | 1,46%           | -0,0083       | -0,83%          | 49,490                            | -1,02%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1003        | 0,03%           | 0,1003        | 0,03%           | 85,635                            | 71,27%        | 0,1167       | 1,67%           | 0,0909        | -0,91%          | 49,671                            | -0,66%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2007        | 0,07%           | 0,2007        | 0,07%           | 85,343                            | 70,69%        | 0,2194       | 1,94%           | 0,1901        | -0,99%          | 49,888                            | -0,22%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3017        | 0,17%           | 0,3017        | 0,17%           | 85,239                            | 70,48%        | 0,3230       | 2,30%           | 0,2896        | -1,04%          | 50,150                            | 0,30%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4035        | 0,35%           | 0,4035        | 0,35%           | 85,145                            | 70,29%        | 0,4279       | 2,79%           | 0,3894        | -1,06%          | 50,457                            | 0,91%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5063        | 0,63%           | 0,5063        | 0,63%           | 85,003                            | 70,01%        | 0,5352       | 3,52%           | 0,4898        | -1,02%          | 50,811                            | 1,62%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6106        | 1,06%           | 0,6106        | 1,06%           | 84,638                            | 69,28%        | 0,6464       | 4,64%           | 0,5906        | -0,94%          | 51,211                            | 2,42%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7164        | 1,64%           | 0,7164        | 1,64%           | 83,719                            | 67,44%        | 0,7657       | 6,57%           | 0,6915        | -0,85%          | 51,652                            | 3,30%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8239        | 2,39%           | 0,8239        | 2,39%           | 81,550                            | 63,10%        | 0,9047       | 10,47%          | 0,7912        | -0,88%          | 52,125                            | 4,25%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9322        | 3,22%           | 0,9322        | 3,22%           | 76,531                            | 53,06%        | 1,1113       | 21,13%          | 0,8859        | -1,41%          | 52,607                            | 5,21%         |
|                        | 1                                             | 1,0235        | 2,35%           | 1,0235        | 2,35%           | 66,416                            | 32,83%        | 1,9079       | 90,79%          | 0,9594        | -4,06%          | 53,035                            | 6,07%         |

Πίνακας 6.21: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.26:





**Εικόνα 6.26:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

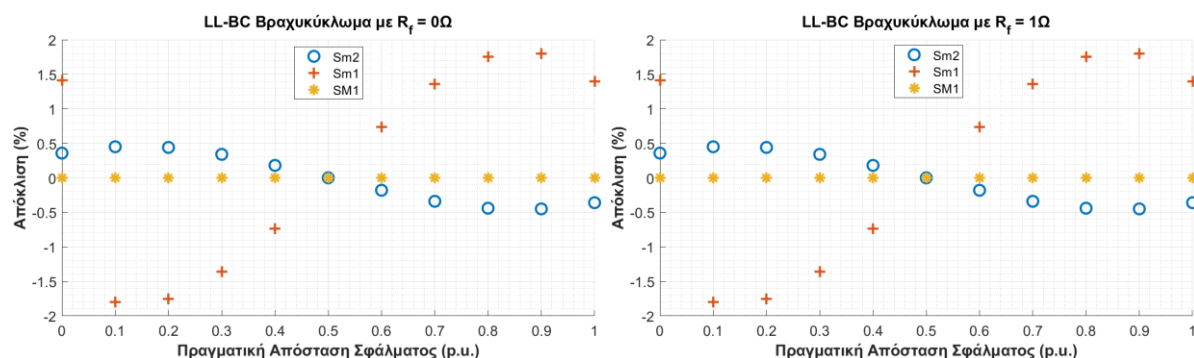
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι WIS, η ERI και η SCD έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Η απόκλισή τους αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ της θέσης του σφάλματος και του ηλεκτρονόμου. Ακόμα, αν αντιπαραβάλουμε τις δοκιμές για την ίδια θέση σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, παρατηρούμε ότι η απόκλιση των παραπάνω μεθόδων είναι ουσιαστικά σταθερή. Η SCD υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με ικανοποιητική ακρίβεια. Αντίθετα, η ERI έχει σημαντικό και μόνιμο σφάλμα. Η απόκλιση στην XU έχει εκθετική αύξηση με την αύξηση της απόστασης αλλά παρουσιάζει σχετικά καλύτερη συμπεριφορά από τις άλλες μεθόδους. Επίσης, είναι φανερό η απότομη επιδείνωση της απόδοσης της XU στην περίπτωση της  $R_f=50\Omega$ , κάνοντας και πάλι φανερό την άμεση εξάρτησή αυτής της μεθόδου από την τιμή της αντίστασης σφάλματος. Τέλος, δεδομένου ότι σε αρκετές δοκιμές η απόκλιση όλων των μεθόδων υπερβαίνει το 2%, δεν τις θεωρούμε αποδεκτές.

Στον Πίνακα 6.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

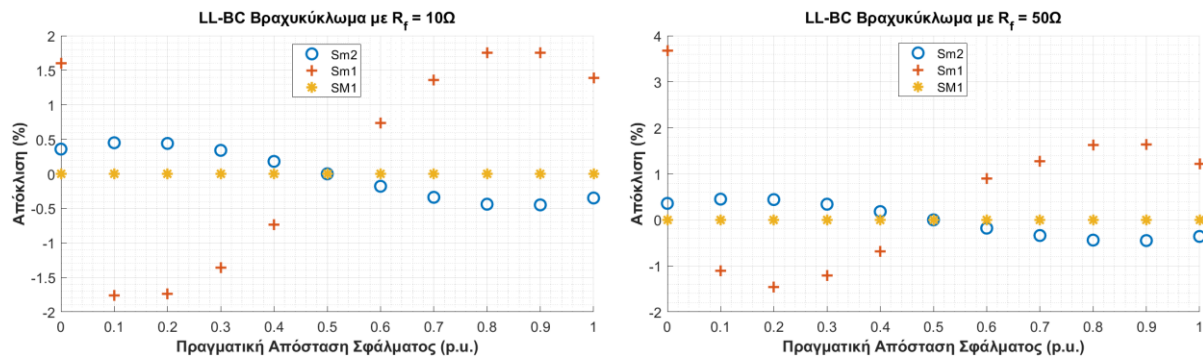
| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,062                             | -             | 0,0141        | 1,41%           | 0,245                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,076                             | -             | 0,0820        | -1,80%          | 0,308                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,060                             | -             | 0,1825        | -1,75%          | 0,294                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,017                             | -             | 0,2864        | -1,36%          | 0,237                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,047                             | -             | 0,3926        | -0,74%          | 0,170                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,121                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,121                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,194                             | -             | 0,6074        | 0,74%           | 0,105                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,252                             | -             | 0,7136        | 1,36%           | 0,122                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,282                             | -             | 0,8175        | 1,75%           | 0,158                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,270                             | -             | 0,9180        | 1,80%           | 0,185                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,205                             | -             | 1,0140        | 1,40%           | 0,168                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,944                             | -5,62%        | 0,0141        | 1,41%           | 0,760                             | -24,04%       | 0             | 0               | 1,000                             | 0,00%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,934                             | -6,61%        | 0,0820        | -1,80%          | 1,318                             | 31,79%        | 0,1           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,954                             | -4,58%        | 0,1825        | -1,75%          | 1,309                             | 30,91%        | 0,2           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 1,003                             | 0,26%         | 0,2864        | -1,36%          | 1,257                             | 25,69%        | 0,3           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 1,072                             | 7,24%         | 0,3926        | -0,74%          | 1,196                             | 19,60%        | 0,4           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 1,154                             | 15,36%        | 0,5000        | 0,00%           | 1,154                             | 15,36%        | 0,5           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 1,234                             | 23,42%        | 0,6074        | 0,74%           | 1,145                             | 14,52%        | 0,6           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 1,301                             | 30,10%        | 0,7136        | 1,36%           | 1,171                             | 17,11%        | 0,7           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 1,340                             | 34,01%        | 0,8175        | 1,75%           | 1,216                             | 21,64%        | 0,8           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 1,338                             | 33,82%        | 0,9180        | 1,80%           | 1,254                             | 25,36%        | 0,9           | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 1,283                             | 28,34%        | 1,0140        | 1,40%           | 1,248                             | 24,76%        | 1             | 0               | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 9,963                             | -0,37%        | 0,0160        | 1,60%           | 9,740                             | -2,60%        | 0             | 0               | 10,001                            | 0,01%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 9,986                             | -0,14%        | 0,0824        | -1,76%          | 10,371                            | 3,71%         | 0,1           | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 10,047                            | 0,47%         | 0,1826        | -1,74%          | 10,404                            | 4,04%         | 0,2           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 10,142                            | 1,42%         | 0,2864        | -1,36%          | 10,397                            | 3,97%         | 0,3           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 10,266                            | 2,66%         | 0,3926        | -0,74%          | 10,389                            | 3,89%         | 0,4           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,409                            | 4,09%         | 0,5000        | 0,00%           | 10,409                            | 4,09%         | 0,5           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 10,558                            | 5,58%         | 0,6074        | 0,74%           | 10,470                            | 4,70%         | 0,6           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 10,700                            | 7,00%         | 0,7136        | 1,36%           | 10,575                            | 5,75%         | 0,7           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 10,822                            | 8,22%         | 0,8175        | 1,75%           | 10,706                            | 7,06%         | 0,8           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 10,910                            | 9,10%         | 0,9175        | 1,75%           | 10,835                            | 8,35%         | 0,9           | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 1                                             | 0,9965        | -0,35%          | 10,951                            | 9,51%         | 1,0139        | 1,39%           | 10,924                            | 9,24%         | 1             | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 49,257                            | -1,49%        | 0,0367        | 3,67%           | 48,604                            | -2,79%        | 0             | 0               | 50,010                            | 0,02%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 49,414                            | -1,17%        | 0,0889        | -1,11%          | 49,708                            | -0,58%        | 0,1           | 0               | 49,994                            | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 49,641                            | -0,72%        | 0,1854        | -1,46%          | 49,970                            | -0,06%        | 0,2           | 0               | 49,994                            | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 49,934                            | -0,13%        | 0,2879        | -1,21%          | 50,176                            | 0,35%         | 0,3           | 0               | 49,995                            | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 50,289                            | 0,58%         | 0,3932        | -0,68%          | 50,406                            | 0,81%         | 0,4           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 50,697                            | 1,39%         | 0,5000        | 0,00%           | 50,697                            | 1,39%         | 0,5           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 51,145                            | 2,29%         | 0,6090        | 0,90%           | 51,068                            | 2,14%         | 0,6           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 51,620                            | 3,24%         | 0,7127        | 1,27%           | 51,518                            | 3,04%         | 0,7           | 0               | 49,995                            | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 52,108                            | 4,22%         | 0,8163        | 1,63%           | 52,029                            | 4,06%         | 0,8           | 0               | 49,994                            | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 52,594                            | 5,19%         | 0,9164        | 1,64%           | 52,563                            | 5,13%         | 0,9           | 0               | 49,992                            | -0,02%        |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 53,063                            | 6,13%         | 1,0122        | 1,22%           | 53,075                            | 6,15%         | 1             | 0               | 49,993                            | -0,01%        |

Πίνακας 6.22: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.27:



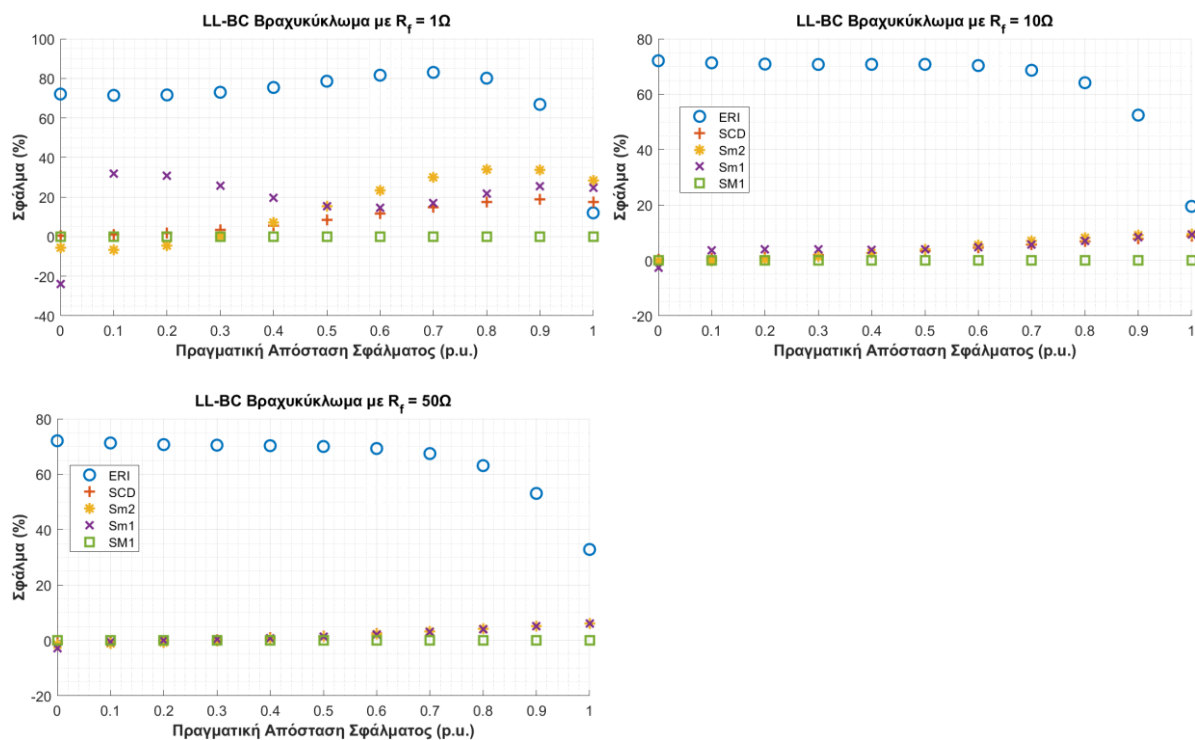




**Εικόνα 6.27:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει την καλύτερη απόδοση με μηδενική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντίθετο ρυθμό μεταβολής. Τέλος, η Sm1 παρουσιάζει δυσανάλογα την μεγαλύτερη απόκλιση που όμως σε γενικές γραμμές διατηρείται εντός των ορίων του 2%. Συνεπώς, οι εν λόγω μέθοδοι έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 6.28 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.28:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα η μέθοδος SM1 υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα της τάξης του 70%-80% στις περισσότερες δοκιμές. Η Sm2 και η SCD έχουν σημαντικό σφάλμα για  $R_f=1\Omega$ , αλλά με την αύξηση της αντίστασης η απόδοσή τους βελτιώνεται. Η Sm1 εμφανίζει εντονότατο σφάλμα για  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$  όταν το βραχυκύκλωμα γίνεται κοντά στο ζυγό S.

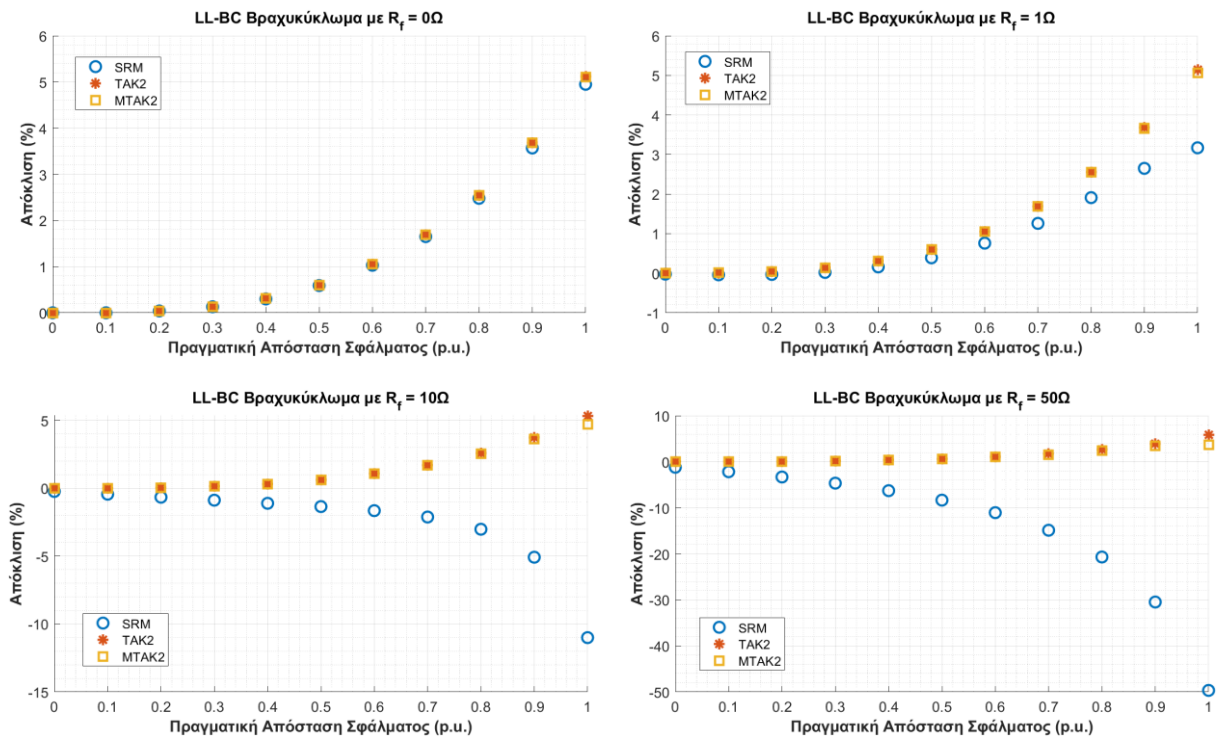
## 6.2.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο

Στον Πίνακα 6.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK2 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0               | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6105         | 1,05%           | 0,6105          | 1,05%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7169         | 1,69%           | 0,7169          | 1,69%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8255         | 2,55%           | 0,8255          | 2,55%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9265        | 2,65%           | 0,9368         | 3,68%           | 0,9368          | 3,68%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0512         | 5,12%           | 1,0511          | 5,11%           |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | -0,0002       | -0,02%          | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0996        | -0,04%          | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1997        | -0,03%          | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4016        | 0,16%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5039        | 0,39%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6076        | 0,76%           | 0,6105         | 1,05%           | 0,6105          | 1,05%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7126        | 1,26%           | 0,7169         | 1,69%           | 0,7169          | 1,69%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8191        | 1,91%           | 0,8255         | 2,55%           | 0,8255          | 2,55%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9650        | 6,50%           | 0,9368         | 3,68%           | 0,9367          | 3,67%           |
|                        | 1                                             | 1,0317        | 3,17%           | 1,0514         | 5,14%           | 1,0507          | 5,07%           |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | -0,0024       | -0,24%          | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0956        | -0,44%          | 0,1001         | 0,01%           | 0,1001          | 0,01%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1934        | -0,66%          | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2912        | -0,88%          | 0,3013         | 0,13%           | 0,3014          | 0,14%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3889        | -1,11%          | 0,4031         | 0,31%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4865        | -1,35%          | 0,5061         | 0,61%           | 0,5061          | 0,61%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5835        | -1,65%          | 0,6106         | 1,06%           | 0,6106          | 1,06%           |
|                        | 0,7                                           | 0,6788        | -2,12%          | 0,7170         | 1,70%           | 0,7168          | 1,68%           |
|                        | 0,8                                           | 0,7698        | -3,02%          | 0,8257         | 2,57%           | 0,8253          | 2,53%           |
|                        | 0,9                                           | 0,8492        | -5,08%          | 0,9373         | 3,73%           | 0,9361          | 3,61%           |
|                        | 1                                             | 0,8900        | -11,00%         | 1,0534         | 5,34%           | 1,0471          | 4,71%           |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | -0,0120       | -1,20%          | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0783        | -2,17%          | 0,1001         | 0,01%           | 0,1003          | 0,03%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1669        | -3,31%          | 0,2005         | 0,05%           | 0,2007          | 0,07%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2535        | -4,65%          | 0,3015         | 0,15%           | 0,3016          | 0,16%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3372        | -6,28%          | 0,4033         | 0,33%           | 0,4034          | 0,34%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4166        | -8,34%          | 0,5064         | 0,64%           | 0,5064          | 0,64%           |
|                        | 0,6                                           | 0,4894        | -11,06%         | 0,6109         | 1,09%           | 0,6107          | 1,07%           |
|                        | 0,7                                           | 0,5512        | -14,88%         | 0,7174         | 1,74%           | 0,7156          | 1,56%           |
|                        | 0,8                                           | 0,5931        | -20,69%         | 0,8263         | 2,63%           | 0,8247          | 2,47%           |
|                        | 0,9                                           | 0,5953        | -30,47%         | 0,9386         | 3,86%           | 0,9341          | 3,41%           |
|                        | 1                                             | 0,5033        | -49,67%         | 1,0584         | 5,84%           | 1,0365          | 3,65%           |

**Πίνακας 6.23:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.29:



**Εικόνα 6.29:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK2, MTAK2

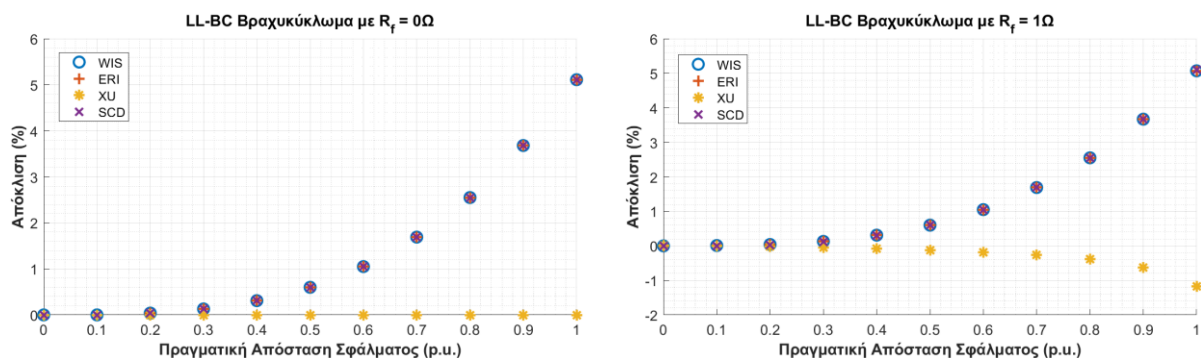
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η TAK2 και η MTAK2 έχουν παρόμοια συνεισφορά με την απόκλισή τους να αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ της θέσης του σφάλματος και του ηλεκτρονόμου. Ακόμα, αν αντιπαραβάλουμε τις δοκιμές για την ίδια θέση σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, παρατηρούμε ότι η απόκλιση των παραπάνω μεθόδων είναι ουσιαστικά σταθερή. Η MTAK2 βελτιώνει τα αποτελέσματα της TAK2 και εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση για  $R_f=50\Omega$ , η οποία μάλιστα είναι βελτιωμένη σε σχέση με την περίπτωση όπου  $R_f=10\Omega$ . Η μέθοδος SRM φαίνεται να ακολουθεί την συμπεριφορά των TAK2 και MTAK2 αλλά για  $R_f=10\Omega$  και  $R_f=50\Omega$  υποεκτιμά την θέση του σφάλματος και η απόκλισή της αυξάνεται έντονα εκθετικά προς τα αρνητικά. Τέλος, σε αρκετές δοκιμές, κυρίως όταν η απόσταση μεταξύ σφάλματος και ηλεκτρονόμου είναι μεγάλη, η απόκλιση των SRM, TAK2 και MTAK2 υπερβαίνει το 2%. Επομένως, δεν θεωρούμε τις προηγούμενες μεθόδους αποδεκτές.

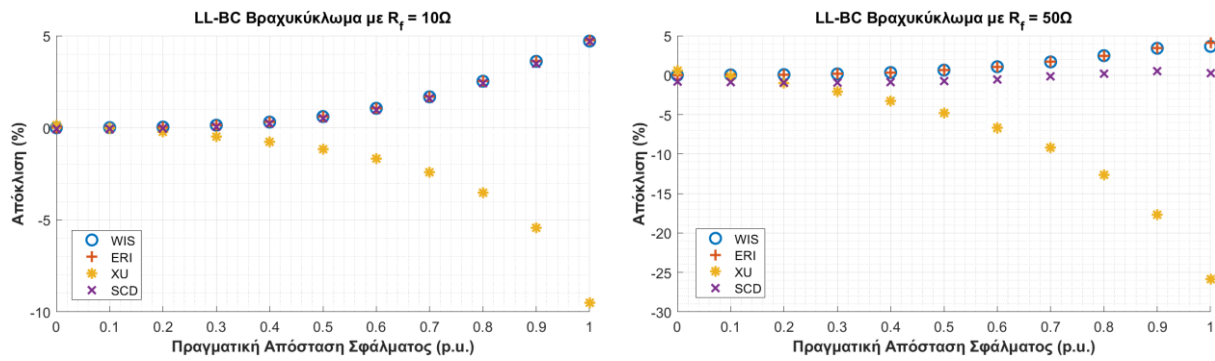
Στον Πίνακα 6.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,008                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,005                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,025                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,015                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,053                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,032                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,089                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,054                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6105        | 1,05%           | 0,6105        | 1,05%           | 0,130                             | -             | 0,6000       | 0,00%           | 0,6105        | 1,05%           | 0,080                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7169        | 1,69%           | 0,7169        | 1,69%           | 0,166                             | -             | 0,7000       | 0,00%           | 0,7169        | 1,69%           | 0,105                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8255        | 2,55%           | 0,8255        | 2,55%           | 0,186                             | -             | 0,8000       | 0,00%           | 0,8255        | 2,55%           | 0,122                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9368        | 3,68%           | 0,9368        | 3,68%           | 0,173                             | -             | 0,9000       | 0,00%           | 0,9368        | 3,68%           | 0,124                             | -             |
|                        | 1                                             | 1,0511        | 5,11%           | 1,0511        | 5,11%           | 0,102                             | -             | 1,0000       | 0,00%           | 1,0511        | 5,11%           | 0,099                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,721                             | 72,08%        | 0,0002       | 0,02%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,004                             | 0,38%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 1,714                             | 71,43%        | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,008                             | 0,76%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 1,717                             | 71,66%        | 0,1998       | -0,02%          | 0,2003        | 0,03%           | 1,016                             | 1,63%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 1,731                             | 73,05%        | 0,2995       | -0,05%          | 0,3012        | 0,12%           | 1,032                             | 3,22%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 1,756                             | 75,58%        | 0,3992       | -0,08%          | 0,4030        | 0,30%           | 1,056                             | 5,59%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 1,789                             | 78,87%        | 0,4988       | -0,12%          | 0,5060        | 0,60%           | 1,086                             | 8,64%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6105        | 1,05%           | 0,6105        | 1,05%           | 1,821                             | 82,06%        | 0,5982       | -0,18%          | 0,6105        | 1,05%           | 1,121                             | 12,13%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7169        | 1,69%           | 0,7169        | 1,69%           | 1,836                             | 83,61%        | 0,6974       | -0,26%          | 0,7169        | 1,69%           | 1,156                             | 15,59%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8255        | 2,55%           | 0,8255        | 2,55%           | 1,806                             | 80,62%        | 0,7961       | -0,39%          | 0,8255        | 2,55%           | 1,184                             | 18,38%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9367        | 3,67%           | 0,9367        | 3,67%           | 1,668                             | 66,82%        | 0,8938       | -0,62%          | 0,9367        | 3,67%           | 1,196                             | 19,64%        |
|                        | 1                                             | 1,0507        | 5,07%           | 1,0507        | 5,07%           | 1,220                             | 21,99%        | 0,9882       | -1,18%          | 1,0510        | 5,10%           | 1,183                             | 18,25%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 17,208                            | 72,08%        | 0,0014       | 0,14%           | -0,0005       | -0,05%          | 9,997                             | -0,03%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1001        | 0,01%           | 0,1001        | 0,01%           | 17,132                            | 71,32%        | 0,0997       | -0,03%          | 0,0995        | -0,05%          | 10,278                            | 2,78%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 17,090                            | 70,90%        | 0,1977       | -0,23%          | 0,1997        | -0,03%          | 10,076                            | 0,76%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3014        | 0,14%           | 0,3014        | 0,14%           | 17,078                            | 70,78%        | 0,2953       | -0,47%          | 0,3006        | 0,06%           | 10,144                            | 1,44%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 17,083                            | 70,83%        | 0,3923       | -0,77%          | 0,4023        | 0,23%           | 10,230                            | 2,30%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5061        | 0,61%           | 0,5061        | 0,61%           | 17,084                            | 70,84%        | 0,4884       | -1,16%          | 0,5052        | 0,52%           | 10,333                            | 3,33%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6106        | 1,06%           | 0,6106        | 1,06%           | 17,039                            | 70,39%        | 0,5832       | -1,68%          | 0,6096        | 0,96%           | 10,449                            | 4,49%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7168        | 1,68%           | 0,7168        | 1,68%           | 16,867                            | 68,67%        | 0,6759       | -2,41%          | 0,7159        | 1,59%           | 10,572                            | 5,72%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8253        | 2,53%           | 0,8253        | 2,53%           | 16,394                            | 63,94%        | 0,7648       | -3,52%          | 0,8242        | 2,42%           | 10,693                            | 6,93%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9361        | 3,61%           | 0,9361        | 3,61%           | 15,174                            | 51,74%        | 0,8456       | -5,44%          | 0,9347        | 3,47%           | 10,803                            | 8,03%         |
|                        | 1                                             | 1,0471        | 4,71%           | 1,0476        | 4,76%           | 11,697                            | 16,97%        | 0,9050       | -9,50%          | 1,0470        | 4,70%           | 10,888                            | 8,88%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 86,034                            | 72,07%        | 0,0056       | 0,56%           | -0,0079       | -0,79%          | 49,093                            | -1,81%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1003        | 0,03%           | 0,1003        | 0,03%           | 85,643                            | 71,29%        | 0,0983       | -0,17%          | 0,0911        | -0,89%          | 49,230                            | -1,54%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2007        | 0,07%           | 0,2007        | 0,07%           | 85,397                            | 70,79%        | 0,1897       | -1,03%          | 0,1904        | -0,96%          | 49,438                            | -1,13%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3016        | 0,16%           | 0,3016        | 0,16%           | 85,260                            | 70,52%        | 0,2795       | -2,05%          | 0,2903        | -0,97%          | 49,719                            | -0,56%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4034        | 0,34%           | 0,4034        | 0,34%           | 85,172                            | 70,34%        | 0,3673       | -3,27%          | 0,3909        | -0,91%          | 50,067                            | 0,13%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5064        | 0,64%           | 0,5064        | 0,64%           | 85,029                            | 70,06%        | 0,4522       | -4,78%          | 0,4923        | -0,77%          | 50,476                            | 0,95%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6107        | 1,07%           | 0,6107        | 1,07%           | 84,652                            | 69,30%        | 0,5332       | -6,68%          | 0,5948        | -0,52%          | 50,938                            | 1,88%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7168        | 1,68%           | 0,7168        | 1,68%           | 83,688                            | 67,38%        | 0,6081       | -9,19%          | 0,6982        | -0,18%          | 51,439                            | 2,88%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8247        | 2,47%           | 0,8247        | 2,47%           | 81,385                            | 62,77%        | 0,6736       | -12,64%         | 0,8021        | 0,21%           | 51,965                            | 3,93%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9341        | 3,41%           | 0,9342        | 3,42%           | 75,883                            | 51,77%        | 0,7230       | -17,70%         | 0,9050        | 0,50%           | 52,494                            | 4,99%         |
|                        | 1                                             | 1,0365        | 3,65%           | 1,0411        | 4,11%           | 62,445                            | 24,89%        | 0,7412       | -25,88%         | 1,0024        | 0,24%           | 53,003                            | 6,01%         |

Πίνακας 6.24: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.30:





**Εικόνα 6.30:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι WIS, η ERI και η SCD έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Η απόκλισή τους αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ της θέσης του σφάλματος και του ηλεκτρονόμου. Ακόμα, αν αντιπαραβάλουμε τις δοκιμές για την ίδια θέση σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, παρατηρούμε ότι η απόκλιση των παραπάνω μεθόδων είναι ουσιαστικά σταθερή. Η απόκλιση στην XU έχει εκθετική αύξηση προς τα αρνητικά με την αύξηση της απόστασης, αλλά παρουσιάζει σχετικά καλύτερη συμπεριφορά από τις άλλες μεθόδους για μικρές τιμές της αντίστασης σφάλματος. Επίσης, είναι φανερή η απότομη επιδείνωση της απόδοσης της XU στην περίπτωση της  $R_f=10\Omega$  και  $R_f=50\Omega$ , κάνοντας και πάλι φανερή την άμεση εξάρτησή αυτής της μεθόδου από την τιμή της αντίστασης σφάλματος. Τέλος, σε αρκετές δοκιμές, κυρίως όταν η απόσταση μεταξύ σφάλματος και ηλεκτρονόμου είναι μεγάλη, η απόκλιση των WIS, ERI και SCD υπερβαίνει το 2%. Επομένως, δεν θεωρούμε τις προηγούμενες μεθόδους αποδεκτές.

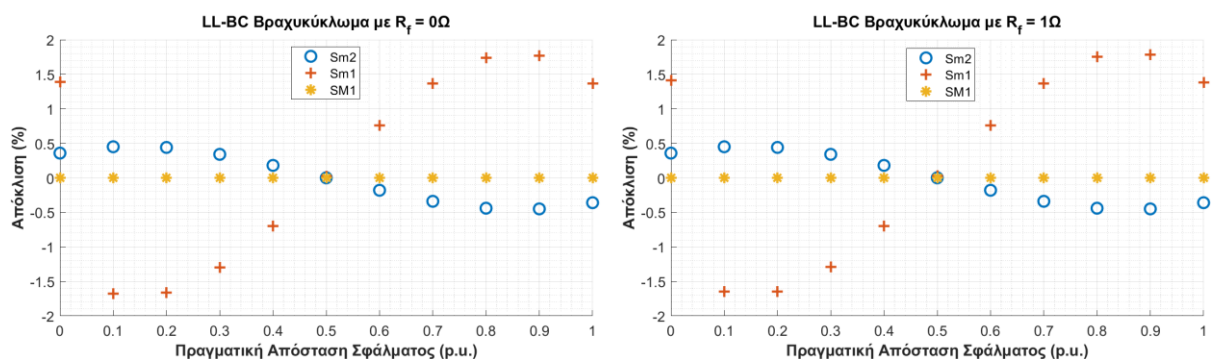


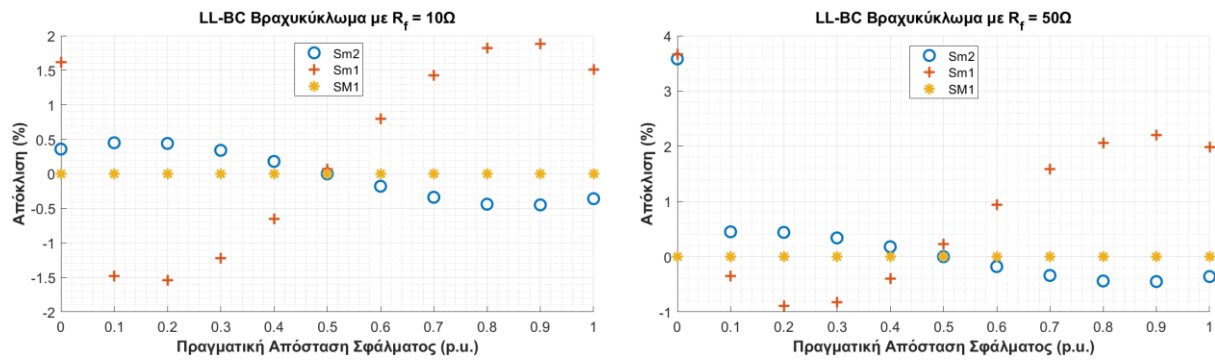
Στον Πίνακα 6.25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,031                             | -             | 0,0139        | 1,39%           | 0,121                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,012                             | -             | 0,0832        | -1,68%          | 0,048                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,015                             | -             | 0,1834        | -1,66%          | 0,036                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,030                             | -             | 0,2870        | -1,30%          | 0,084                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,019                             | -             | 0,3930        | -0,70%          | 0,074                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,025                             | -             | 0,5002        | 0,02%           | 0,022                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,098                             | -             | 0,6076        | 0,76%           | 0,037                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,190                             | -             | 0,7137        | 1,37%           | 0,058                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,274                             | -             | 0,8174        | 1,74%           | 0,015                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,314                             | -             | 0,9177        | 1,77%           | 0,080                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,275                             | -             | 1,0137        | 1,37%           | 0,157                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,972                             | -2,77%        | 0,0141        | 1,41%           | 0,881                             | -11,94%       | 0             | 0               | 1,000                             | 0,00%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,994                             | -0,57%        | 0,0835        | -1,65%          | 1,056                             | 5,58%         | 0,1           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 1,026                             | 2,58%         | 0,1835        | -1,65%          | 0,977                             | -2,30%        | 0,2           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 1,047                             | 4,69%         | 0,2871        | -1,29%          | 0,935                             | -6,52%        | 0,3           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 1,043                             | 4,34%         | 0,3930        | -0,70%          | 0,951                             | -4,90%        | 0,4           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 1,008                             | 0,82%         | 0,5003        | 0,03%           | 1,012                             | 1,19%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,944                             | -5,64%        | 0,6076        | 0,76%           | 1,080                             | 7,97%         | 0,6           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,862                             | -13,81%       | 0,7137        | 1,37%           | 1,111                             | 11,08%        | 0,7           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,787                             | -21,34%       | 0,8175        | 1,75%           | 1,078                             | 7,81%         | 0,8           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,752                             | -24,77%       | 0,9178        | 1,78%           | 0,993                             | -0,67%        | 0,9           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,804                             | -19,58%       | 1,0138        | 1,38%           | 0,925                             | -7,53%        | 1             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 9,958                             | -0,42%        | 0,0162        | 1,62%           | 9,836                             | -1,64%        | 0             | 0               | 10,000                            | 0,00%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 10,009                            | 0,09%         | 0,0852        | -1,48%          | 10,081                            | 0,81%         | 0,1           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 10,084                            | 0,84%         | 0,1846        | -1,54%          | 10,051                            | 0,51%         | 0,2           | 0               | 10,000                            | 0,00%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 10,162                            | 1,62%         | 0,2878        | -1,22%          | 10,062                            | 0,62%         | 0,3           | 0               | 10,000                            | 0,00%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 10,225                            | 2,25%         | 0,3935        | -0,65%          | 10,141                            | 1,41%         | 0,4           | 0               | 10,000                            | 0,00%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,266                            | 2,66%         | 0,5007        | 0,07%           | 10,274                            | 2,74%         | 0,5           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 10,283                            | 2,83%         | 0,6080        | 0,80%           | 10,455                            | 4,55%         | 0,6           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 10,286                            | 2,86%         | 0,7143        | 1,43%           | 10,548                            | 5,48%         | 0,7           | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 10,298                            | 2,98%         | 0,8182        | 1,82%           | 10,611                            | 6,11%         | 0,8           | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 10,351                            | 3,51%         | 0,9188        | 1,88%           | 10,620                            | 6,20%         | 0,9           | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 10,488                            | 4,88%         | 1,0151        | 1,51%           | 10,666                            | 6,66%         | 1             | 0               | 9,998                             | -0,02%        |
|                        | 0                                             | 0,0358        | 3,58%           | 48,933                            | -2,13%        | 0,0366        | 3,66%           | 48,475                            | -3,05%        | 0             | 0               | 49,996                            | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 49,129                            | -1,74%        | 0,0965        | -0,35%          | 49,189                            | -1,62%        | 0,1           | 0               | 49,998                            | 0,00%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 49,418                            | -1,16%        | 0,1911        | -0,89%          | 49,438                            | -1,13%        | 0,2           | 0               | 49,999                            | 0,00%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 49,769                            | -0,46%        | 0,2918        | -0,82%          | 49,725                            | -0,55%        | 0,3           | 0               | 50,000                            | 0,00%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 50,159                            | 0,32%         | 0,3960        | -0,40%          | 50,110                            | 0,22%         | 0,4           | 0               | 49,999                            | 0,00%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 50,568                            | 1,14%         | 0,5023        | 0,23%           | 50,596                            | 1,19%         | 0,5           | 0               | 49,996                            | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 50,986                            | 1,97%         | 0,6094        | 0,94%           | 51,148                            | 2,30%         | 0,6           | 0               | 49,991                            | -0,02%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 51,414                            | 2,83%         | 0,7159        | 1,59%           | 51,716                            | 3,43%         | 0,7           | 0               | 49,987                            | -0,03%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 51,863                            | 3,73%         | 0,8206        | 2,06%           | 52,253                            | 4,51%         | 0,8           | 0               | 49,983                            | -0,03%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 52,357                            | 4,71%         | 0,9220        | 2,20%           | 52,741                            | 5,48%         | 0,9           | 0               | 49,981                            | -0,04%        |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 52,933                            | 5,87%         | 1,0198        | 1,98%           | 53,208                            | 6,42%         | 1             | 0               | 49,983                            | -0,03%        |

Πίνακας 6.25: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.31:

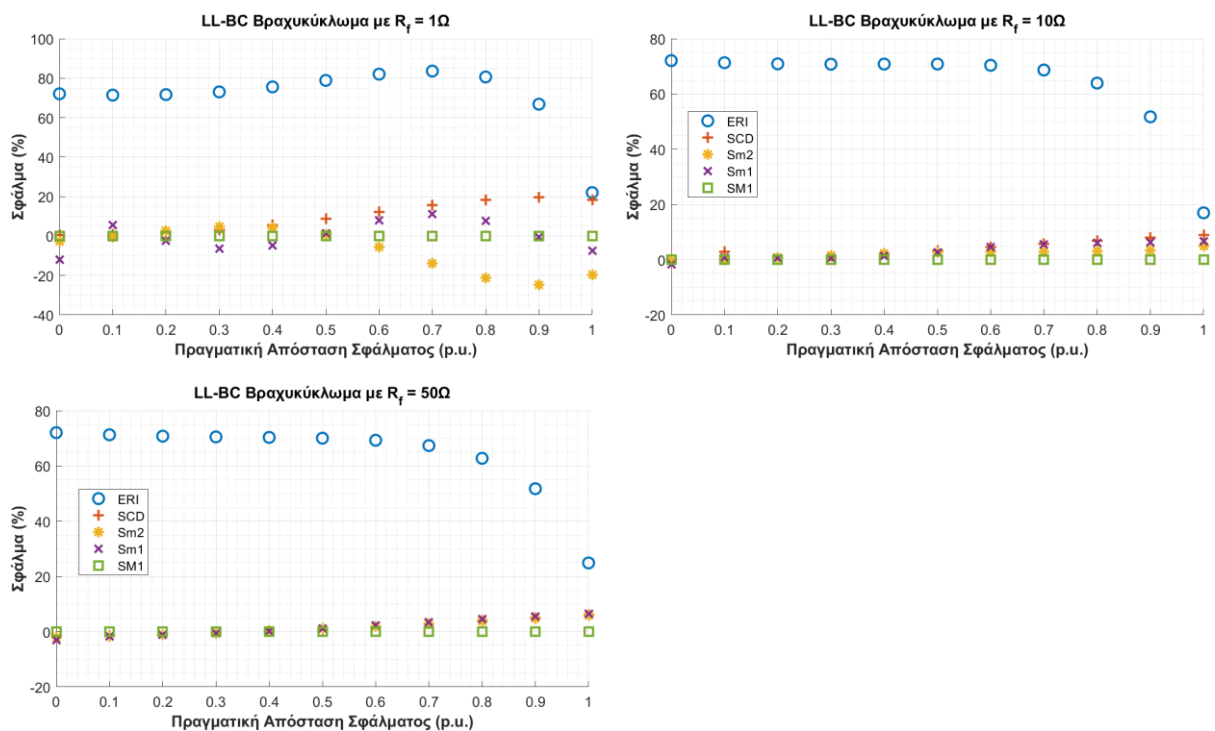




**Εικόνα 6.31:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει την καλύτερη απόδοση με μηδενική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Τέλος, η Sm1 παρουσιάζει δυσανάλογα την μεγαλύτερη απόκλιση που όμως σε γενικές γραμμές διατηρείται εντός των ορίων του 2%. Συνεπώς, οι εν λόγω μέθοδοι έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 6.32 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.32:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LL-BC στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα η μέθοδος SM1 υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα της τάξης του 70%-80% στις περισσότερες δοκιμές. Η Sm2, η Sm1 και SCD έχουν σημαντικό σφάλμα για  $R_f=1\Omega$ , αλλά με την αύξηση της αντίστασης η απόδοσή τους βελτιώνεται.



## 6.2.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στην περίπτωση του διφασικού βραχυκυκλώματος χωρίς γη για κάθε μέθοδο και για όλες τις περιπτώσεις αναλύθηκαν και σχολιάστηκαν διεξοδικά στις Ενότητες 6.2.1 έως και 6.2.4. Συγκεντρωτικά, από τις προηγούμενες προσομοιώσεις και ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η SRM έχει καλή συμπεριφορά στη γραμμή μήκους 35km χωρίς φορτίο, με φορτίο όμως η απόκλισή της είναι σημαντική και ξεπερνά το όριο του 2%. Επίσης βρίσκεται εκτός ορίων σε αρκετές δοκιμές στην γραμμή 350km. Συνεπώς, δεν είναι αποδεκτή.
- Οι TAK2 και MTAK2 έχουν αποδεκτή συμπεριφορά στην περίπτωση γραμμής 35km. Συγκεκριμένα, η MTAK2 είναι εξαιρετική με ουσιαστικά μηδενική απόκλιση σε όλες τις δοκιμές. Για την γραμμή των 350km, οι μέθοδοι έχουν παρόμοια αποτελέσματα και σε ορισμένες δοκιμές βγαίνουν εκτός ορίων οπότε δεν γίνονται αποδεκτές σε αυτήν την περίπτωση.
- Οι WIS και ERI έχουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα σε όλες τις δοκιμές, που αναμενόμενο καθώς έχουν παρόμοια υλοποίηση. Η συμπεριφορά τους είναι αποδεκτή στην γραμμή 35km. Αντίθετα, στην γραμμή 350km, σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν τα όρια του 2% και στην χειρότερη περίπτωση φτάνουν κοντά στο 4,5%. Συνεπώς, δεν γίνονται αποδεκτές για γραμμή μεγάλου μήκους.
- Η ERI, αντίθετα με την περίπτωση του μονοφασικού βραχυκυκλώματος, εμφανίζει έντονο και μόνιμο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι της τάξης του 70%-80%. Δεδομένου ότι αυτό είναι σταθερό, η εισαγωγή ενός διορθωτικού συντελεστή ίσως επιλύσει το πρόβλημα.
- Η SCD είναι αποδεκτή στην περίπτωση της γραμμής 35km, όμως για την γραμμή 350km εμφανίζει σφάλμα που αγγίζει οριακά το 5%. Παρόλα αυτά, σχεδόν σε όλες τις δοκιμές υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος ικανοποιητικά.
- Η Sm2 και Sm1 έχουν αποδεκτή συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις. Η Sm2 εμφανίζει μικρότερες αποκλίσεις από την Sm1 ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Ακόμα, σε όλες τις δοκιμές η Sm1 έχει μεγαλύτερο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Τα παραπάνω καταδεικνύουν και εδώ την ανωτερότητα την χρήσης μεγεθών αρνητικής ακολουθίας.
- Η SM1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις μεθόδους σε κάθε δοκιμή εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση στην εύρεση της θέσης του σφάλματος και αμελητέο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι υλοποιείται με τον μοντέλο μεγάλου μήκους που είναι ιδανικό για κάθε τύπο γραμμής.
- Συνολικά, γίνεται φανερό και εδώ η ανωτερότητα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν μετρήσεις και από τα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς με συγχρονισμένες μετρήσεις. Παρόλα αυτά, οι μέθοδοι WIS, ERI και MTAK2, ως προς τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος, είναι εφαρμόσιμες και δεν υπολείπονται σημαντικά των παραπάνω μεθόδων στην γραμμή μικρού μήκους.
- Η Sm2 παρότι υλοποιείται με το μοντέλο μικρού μήκους, έχει απόδοση που όχι μόνο είναι αποδεκτή αλλά είναι πολύ κοντά στην SM1.
- Οι περισσότεροι αλγόριθμοι εμφανίζουν λίγο βελτιωμένα αποτελέσματα στην περίπτωση που η γραμμή είναι φορτισμένη.
- Η απόδοση της SCD, παρότι χρησιμοποιεί συγχρονισμένες μετρήσεις, υπολείπεται των Sm2 και SM1. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιεί μόνο μετρήσεις ρεύματος για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, δηλαδή λιγότερες πληροφορίες, με αποτέλεσμα η ακρίβειά της να επηρεάζεται αρνητικά.

## 6.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα ως προς γη LLG-BCG

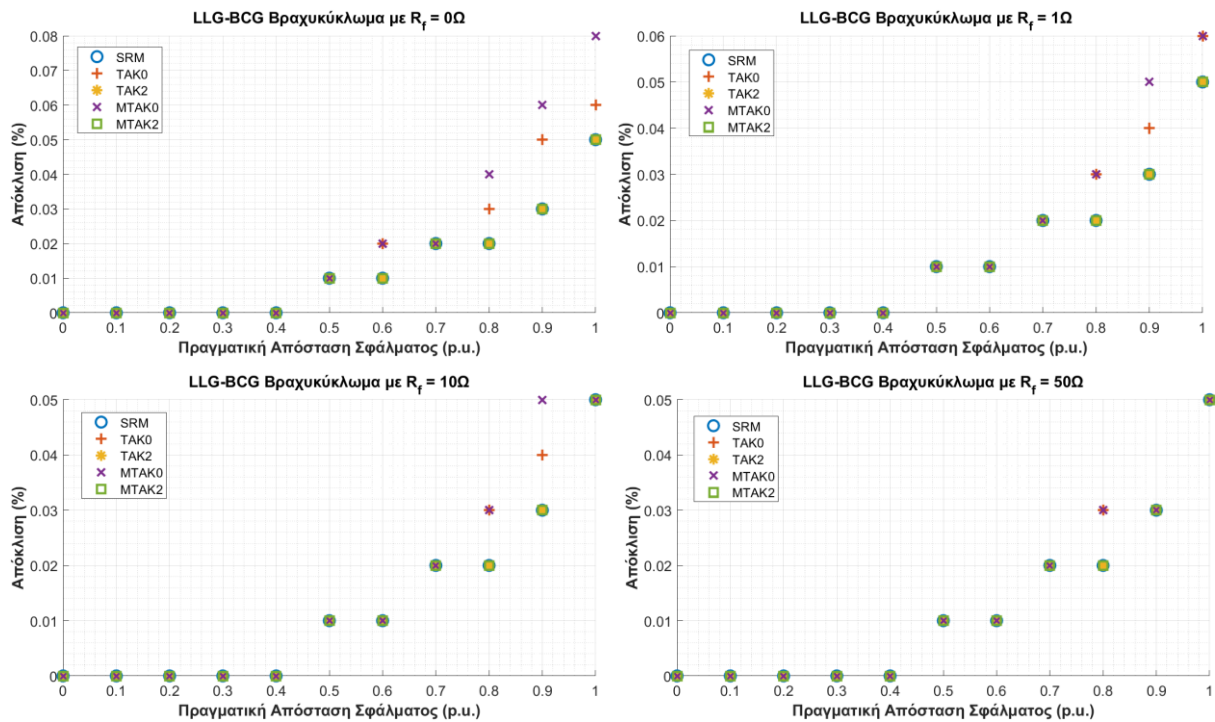
### 6.3.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο

Στον Πίνακα 6.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6002         | 0,02%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6002          | 0,02%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8003         | 0,03%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8004          | 0,04%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9005         | 0,05%           | 0,9003         | 0,03%           | 0,9006          | 0,06%           | 0,9003          | 0,03%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0006         | 0,06%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0008          | 0,08%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8003         | 0,03%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8003          | 0,03%           | 0,8002          | 0,02%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9004         | 0,04%           | 0,9003         | 0,03%           | 0,9005          | 0,05%           | 0,9003          | 0,03%           |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0006         | 0,06%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0006          | 0,06%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8003         | 0,03%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8003          | 0,03%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9004         | 0,04%           | 0,9003         | 0,03%           | 0,9005          | 0,05%           | 0,9003          | 0,03%           |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0005          | 0,05%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |

**Πίνακας 6.26:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.33:



**Εικόνα 6.33:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

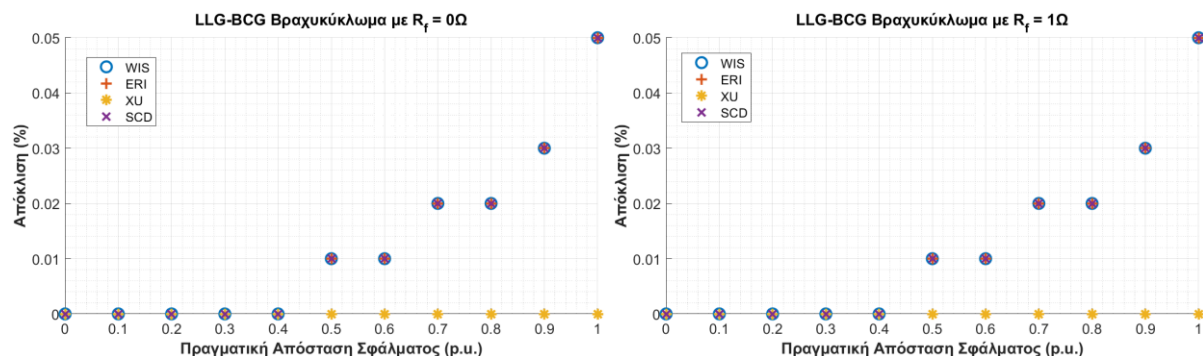
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, κάθε δοκιμή οι αποδόσεις τους είναι εξαιρετικές και ανεξάρτητες από την αντίσταση σφάλματος. Παρόλα αυτά και εδώ φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποκλίσεις που είναι μικρότερες του 2% και άρα είναι αποδεκτοί.

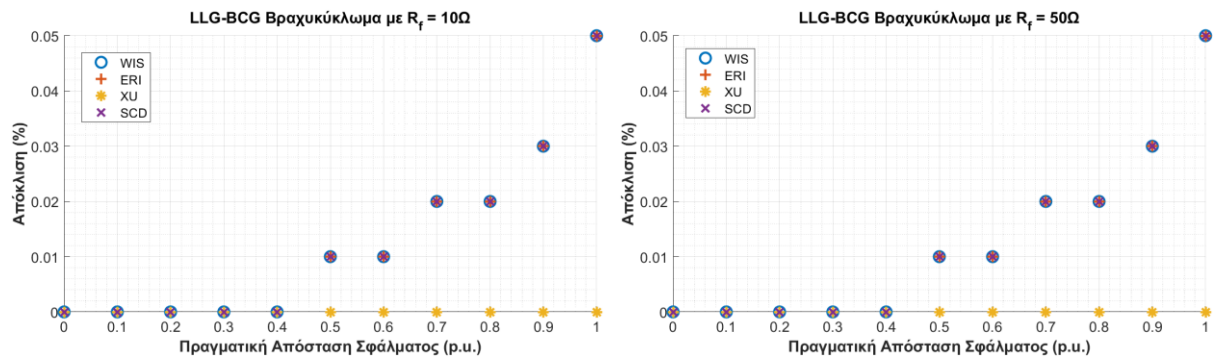
Στον Πίνακα 6.27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | WIS (p.u.) | Απόκλιση (%) | ERI (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος ERI (Ω) | Σφάλμα (%) | XU (p.u.) | Απόκλιση (%) | SCD (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SCD (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|-----------|--------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,001                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,5000    | 0,00%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,001                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,6000    | 0,00%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,001                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,7000    | 0,00%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,001                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,8000    | 0,00%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,001                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -          | 0,9000    | 0,00%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,002                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -          | 1,0000    | 0,00%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,002                       | -          |
|                     | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,07%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,07%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,06%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 1,001                       | 0,05%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,5000    | 0,00%        | 0,5001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,6000    | 0,00%        | 0,6001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,00%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,7000    | 0,00%        | 0,7002     | 0,02%        | 1,000                       | -0,02%     |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,8000    | 0,00%        | 0,8002     | 0,02%        | 1,000                       | -0,02%     |
| Rf = 10Ω            | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,9000    | 0,00%        | 0,9003     | 0,03%        | 1,000                       | -0,03%     |
|                     | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -100,00%   | 1,0000    | 0,00%        | 1,0005     | 0,05%        | 1,000                       | -0,03%     |
|                     | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 10,008                      | 0,08%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 10,008                      | 0,08%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 10,008                      | 0,08%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 10,008                      | 0,08%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 10,009                      | 0,08%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,5000    | 0,00%        | 0,5001     | 0,01%        | 10,009                      | 0,09%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,6000    | 0,00%        | 0,6001     | 0,01%        | 10,010                      | 0,09%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,7000    | 0,00%        | 0,7002     | 0,02%        | 10,010                      | 0,10%      |
| Rf = 50Ω            | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,8000    | 0,00%        | 0,8002     | 0,02%        | 10,011                      | 0,11%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,9000    | 0,00%        | 0,9003     | 0,03%        | 10,012                      | 0,12%      |
|                     | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -100,00%   | 1,0000    | 0,00%        | 1,0005     | 0,05%        | 10,013                      | 0,13%      |
|                     | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,0000    | 0,00%        | 0,0000     | 0,00%        | 50,032                      | 0,06%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,1000    | 0,00%        | 0,1000     | 0,00%        | 50,032                      | 0,06%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,2000    | 0,00%        | 0,2000     | 0,00%        | 50,033                      | 0,07%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,3000    | 0,00%        | 0,3000     | 0,00%        | 50,035                      | 0,07%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,4000    | 0,00%        | 0,4000     | 0,00%        | 50,037                      | 0,07%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,5000    | 0,00%        | 0,5001     | 0,01%        | 50,040                      | 0,08%      |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,6000    | 0,00%        | 0,6001     | 0,01%        | 50,044                      | 0,09%      |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,7000    | 0,00%        | 0,7002     | 0,02%        | 50,048                      | 0,10%      |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,8000    | 0,00%        | 0,8002     | 0,02%        | 50,053                      | 0,11%      |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -100,00%   | 0,9000    | 0,00%        | 0,9003     | 0,03%        | 50,059                      | 0,12%      |
|                     | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -100,00%   | 1,0000    | 0,00%        | 1,0005     | 0,05%        | 50,063                      | 0,13%      |

Πίνακας 6.27: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.34:





**Εικόνα 6.34:** *Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD*

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, κάθε δοκιμή οι αποδόσεις τους είναι εξαιρετικές και ανεξάρτητες από την αντίσταση σφάλματος. Παρόλα αυτά και εδώ φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Εξαιρέση αυτού είναι η μέθοδος του XU που έχει τέλεια συμπεριφορά με μηδενική απόκλιση ανεξάρτητα από την θέση και την αντίσταση του σφάλματος. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποκλίσεις που είναι μικρότερες του 2% και άρα είναι αποδεκτοί.

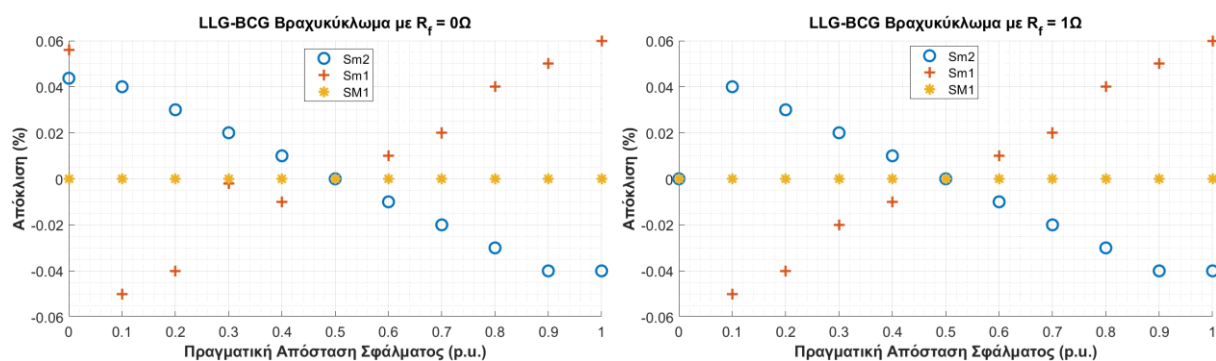


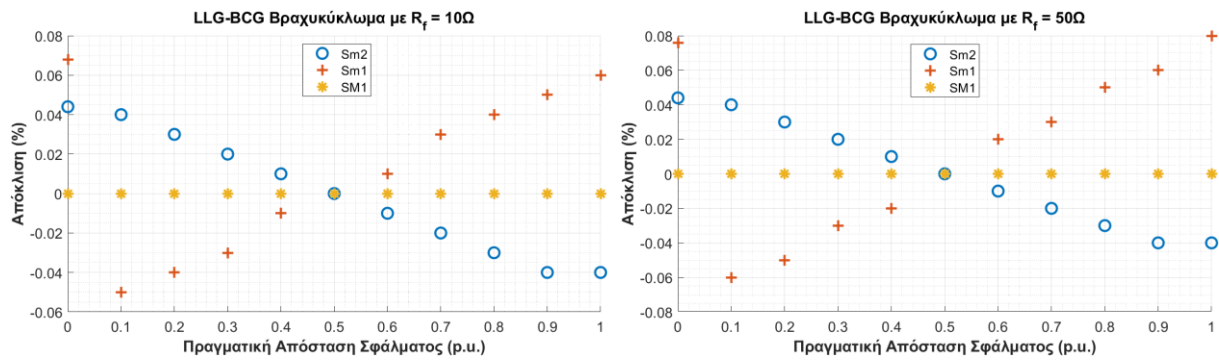
Στον Πίνακα 6.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 0,001                             | -             | 0,0006        | 0,06%           | 0,002                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 0,001                             | -             | 0,0995        | -0,05%          | 0,002                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 0,001                             | -             | 0,1996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 0,001                             | -             | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 0,001                             | -             | 0,3999        | -0,01%          | 0,000                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 0,001                             | -             | 0,6001        | 0,01%           | 0,001                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 0,001                             | -             | 0,7002        | 0,02%           | 0,001                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 0,001                             | -             | 0,8004        | 0,04%           | 0,002                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 0,9005        | 0,05%           | 0,002                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 0,001                             | -             | 1,0006        | 0,06%           | 0,002                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 1,000                             | -0,05%        | 0,0000        | 0,00%           | 0,999                             | -0,09%        | 0             | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 1,000                             | -0,03%        | 0,0995        | -0,05%          | 1,002                             | 0,20%         | 0,1           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 1,000                             | -0,01%        | 0,1996        | -0,04%          | 1,002                             | 0,15%         | 0,2           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 1,000                             | 0,01%         | 0,2998        | -0,02%          | 1,001                             | 0,11%         | 0,3           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,02%         | 0,3999        | -0,01%          | 1,001                             | 0,07%         | 0,4           | 0               | 1,000                             | 0,03%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,5000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,03%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | 0,03%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 1,000                             | 0,04%         | 0,6001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,00%         | 0,6           | 0               | 1,000                             | 0,03%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 1,004                             | 0,40%         | 0,7002        | 0,02%           | 1,000                             | -0,02%        | 0,7           | 0               | 1,000                             | 0,03%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 1,000                             | 0,04%         | 0,8004        | 0,04%           | 1,000                             | -0,04%        | 0,8           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 1,004                             | 0,40%         | 0,9005        | 0,05%           | 1,000                             | -0,04%        | 0,9           | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 1,001                             | 0,05%         | 1,0006        | 0,06%           | 1,000                             | -0,03%        | 1             | 0               | 1,000                             | 0,02%         |
|                        | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 10,007                            | 0,07%         | 0,0007        | 0,07%           | 10,006                            | 0,06%         | 0             | 0               | 10,003                            | 0,02%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 10,007                            | 0,07%         | 0,0995        | -0,05%          | 10,009                            | 0,09%         | 0,1           | 0               | 10,003                            | 0,03%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 10,007                            | 0,07%         | 0,1996        | -0,04%          | 10,009                            | 0,09%         | 0,2           | 0               | 10,003                            | 0,03%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 10,008                            | 0,08%         | 0,2997        | -0,03%          | 10,009                            | 0,09%         | 0,3           | 0               | 10,004                            | 0,04%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 10,008                            | 0,08%         | 0,3999        | -0,01%          | 10,009                            | 0,09%         | 0,4           | 0               | 10,004                            | 0,04%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,009                            | 0,09%         | 0,5000        | 0,00%           | 10,009                            | 0,09%         | 0,5           | 0               | 10,004                            | 0,04%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 10,010                            | 0,09%         | 0,6001        | 0,01%           | 10,009                            | 0,09%         | 0,6           | 0               | 10,004                            | 0,04%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 10,011                            | 0,11%         | 0,7003        | 0,03%           | 10,010                            | 0,10%         | 0,7           | 0               | 10,004                            | 0,04%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 10,012                            | 0,12%         | 0,8004        | 0,04%           | 10,108                            | 1,08%         | 0,8           | 0               | 10,003                            | 0,03%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 10,013                            | 0,13%         | 0,9005        | 0,05%           | 10,012                            | 0,12%         | 0,9           | 0               | 10,003                            | 0,03%         |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 10,014                            | 0,14%         | 1,0006        | 0,06%           | 10,013                            | 0,13%         | 1             | 0               | 10,003                            | 0,02%         |
|                        | 0                                             | 0,0004        | 0,04%           | 50,030                            | 0,06%         | 0,0008        | 0,08%           | 50,029                            | 0,06%         | 0             | 0               | 50,013                            | 0,03%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1004        | 0,04%           | 50,031                            | 0,06%         | 0,0994        | -0,06%          | 50,034                            | 0,07%         | 0,1           | 0               | 50,015                            | 0,03%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 50,032                            | 0,06%         | 0,1995        | -0,05%          | 50,034                            | 0,07%         | 0,2           | 0               | 50,017                            | 0,03%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3002        | 0,02%           | 50,034                            | 0,07%         | 0,2997        | -0,03%          | 50,036                            | 0,07%         | 0,3           | 0               | 50,018                            | 0,04%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4001        | 0,01%           | 50,037                            | 0,07%         | 0,3998        | -0,02%          | 50,038                            | 0,08%         | 0,4           | 0               | 50,018                            | 0,04%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 50,040                            | 0,08%         | 0,5000        | 0,00%           | 50,040                            | 0,08%         | 0,5           | 0               | 50,019                            | 0,04%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5999        | -0,01%          | 50,044                            | 0,09%         | 0,6002        | 0,02%           | 50,044                            | 0,09%         | 0,6           | 0               | 50,018                            | 0,04%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6998        | -0,02%          | 50,049                            | 0,10%         | 0,7003        | 0,03%           | 50,048                            | 0,10%         | 0,7           | 0               | 50,018                            | 0,04%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7997        | -0,03%          | 50,054                            | 0,11%         | 0,8005        | 0,05%           | 50,053                            | 0,11%         | 0,8           | 0               | 50,017                            | 0,03%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8996        | -0,04%          | 50,060                            | 0,12%         | 0,9006        | 0,06%           | 50,058                            | 0,12%         | 0,9           | 0               | 50,015                            | 0,03%         |
|                        | 1                                             | 0,9996        | -0,04%          | 50,066                            | 0,13%         | 1,0008        | 0,08%           | 50,065                            | 0,13%         | 1             | 0               | 50,013                            | 0,03%         |

Πίνακας 6.28: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.35:

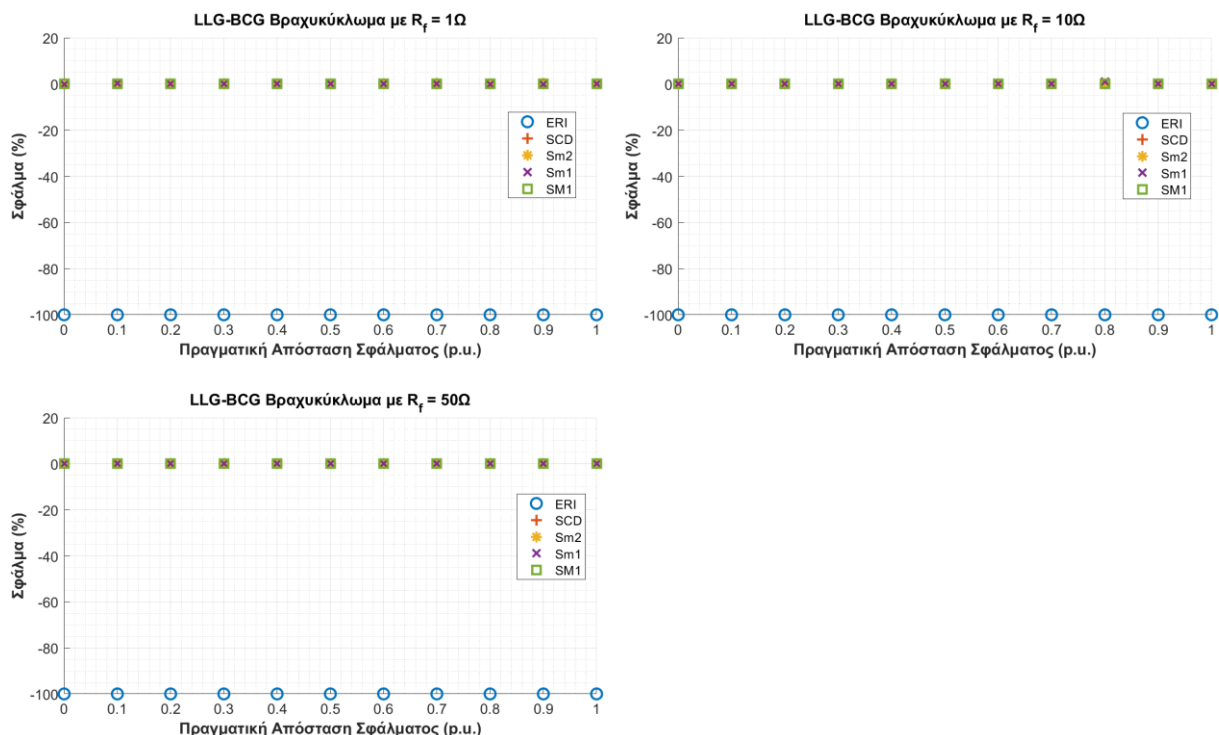




**Εικόνα 6.35:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση και τη θέση του σφάλματος. Η SM1 είναι σαφώς ανώτερη εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση. Γενικότερα, όλες οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές και σχεδόν αμελητέες. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και της Sm2 έχουν αντίθετο ρυθμό μεταβολής. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποκλίσεις που είναι μικρότερες του 2% και άρα είναι αποδεκτοί.

Στην Εικόνα 6.36 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.36:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα γίνεται εμφανές το μόνιμο σφάλμα έχει η ERI στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό το σφάλμα είναι της τάξης του 100% καθώς σε κάθε δοκιμή υπολογίζει σχεδόν μηδενική αντίσταση σφάλματος. Οι υπόλοιπες μέθοδοι έχουν εξαιρετική συμπεριφορά με ουσιαστικά αμελητέο σφάλμα στον ίδιο υπολογισμό.



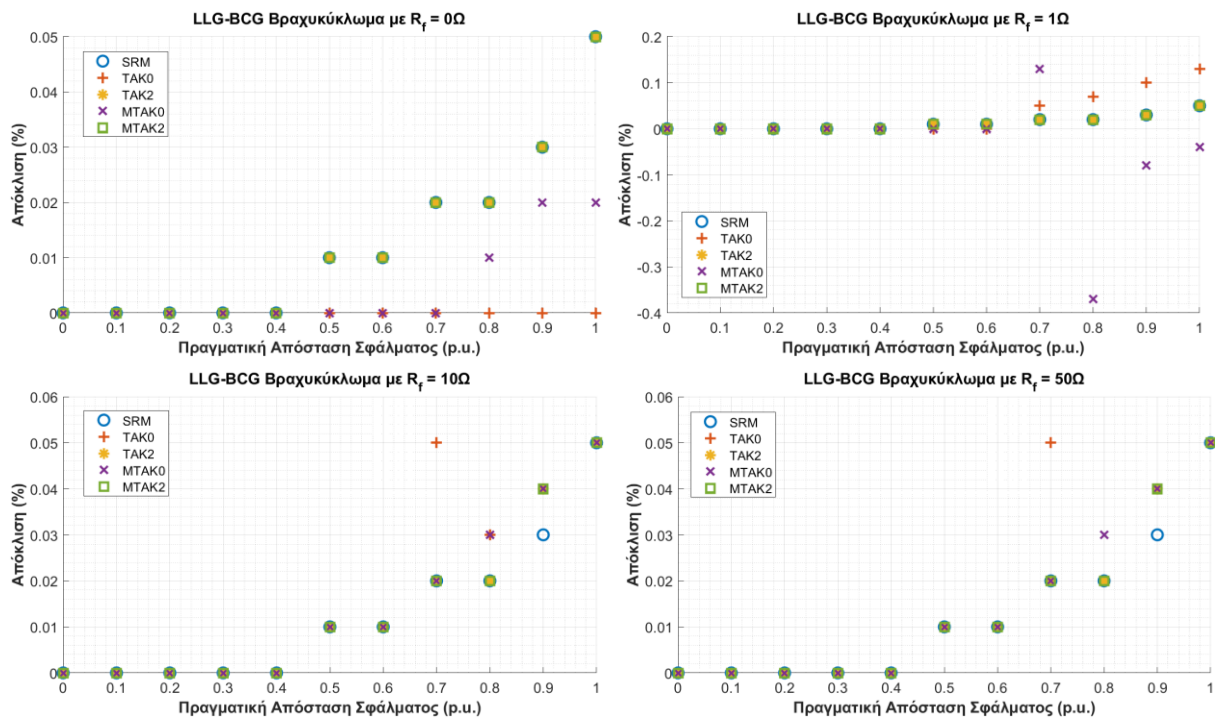
### 6.3.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο

Στον Πίνακα 6.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5000         | 0,00%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5000          | 0,00%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6000         | 0,00%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6000          | 0,00%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7000         | 0,00%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7000          | 0,00%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8000         | 0,00%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8001          | 0,01%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9000         | 0,00%           | 0,9003         | 0,03%           | 0,9002          | 0,02%           | 0,9003          | 0,03%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0000         | 0,00%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0002          | 0,02%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5000         | 0,00%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5000          | 0,00%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6000         | 0,00%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6000          | 0,00%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7005         | 0,05%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7013          | 0,13%           | 0,7002          | 0,02%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8007         | 0,07%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,7963          | -0,37%          | 0,8002          | 0,02%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9010         | 0,10%           | 0,9003         | 0,03%           | 0,8992          | -0,08%          | 0,9003          | 0,03%           |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0013         | 0,13%           | 1,0005         | 0,05%           | 0,9996          | -0,04%          | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7005         | 0,05%           | 0,7002         | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           | 0,7002          | 0,02%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8003         | 0,03%           | 0,8002         | 0,02%           | 0,8003          | 0,03%           | 0,8002          | 0,02%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9004         | 0,04%           | 0,9004         | 0,04%           | 0,9004          | 0,04%           | 0,9004          | 0,04%           |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0005         | 0,05%           | 1,0005          | 0,05%           | 1,0005          | 0,05%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000         | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           | 0,2000          | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000         | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           | 0,3000          | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000         | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           | 0,4000          | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001         | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           | 0,5001          | 0,01%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001         | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           | 0,6001          | 0,01%           |

Πίνακας 6.29: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.37:



**Εικόνα 6.37:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

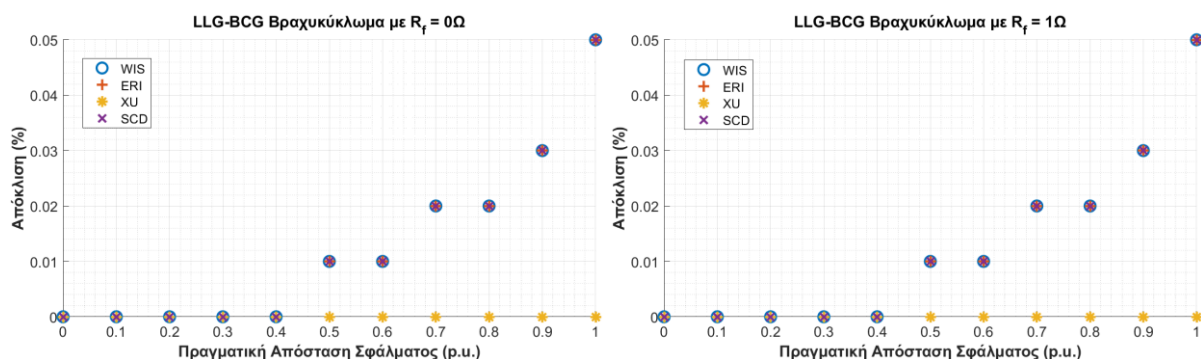
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, κάθε δοκιμή οι αποδόσεις τους είναι εξαιρετικές και ανεξάρτητες από την αντίσταση σφάλματος. Παρόλα αυτά και εδώ φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποκλίσεις που είναι μικρότερες του 2% και άρα είναι αποδεκτοί.

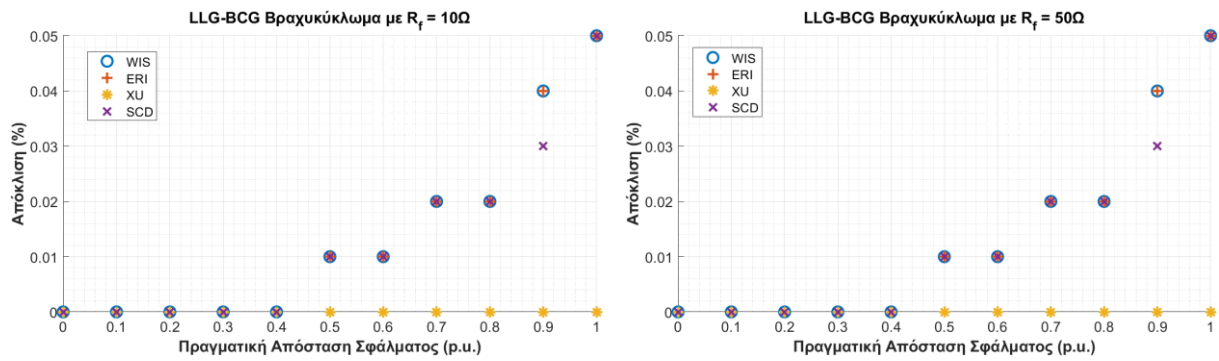
Στον Πίνακα 6.30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,001                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,001                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,6000       | 0,00%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,001                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,7000       | 0,00%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,001                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,8000       | 0,00%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,002                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,9000       | 0,00%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,002                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -             | 1,0000       | 0,00%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,002                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,001                             | 0,07%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,007                             | 0,70%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,2000       | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 1,001                             | 0,06%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,3000       | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 1,001                             | 0,05%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,4000       | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 1,000                             | 0,03%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,5000       | 0,00%           | 0,5001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,01%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,6000       | 0,00%           | 0,6001        | 0,01%           | 1,000                             | 0,00%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,7000       | 0,00%           | 0,7002        | 0,02%           | 1,000                             | -0,02%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,8000       | 0,00%           | 0,8002        | 0,02%           | 1,000                             | -0,03%        |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,9000       | 0,00%           | 0,9003        | 0,03%           | 1,000                             | -0,03%        |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -100,00%      | 1,0000       | 0,00%           | 1,0005        | 0,05%           | 1,000                             | -0,03%        |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 10,006                            | 0,06%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 10,007                            | 0,07%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,2000       | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 10,007                            | 0,07%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,3000       | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 10,008                            | 0,08%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,4000       | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 10,008                            | 0,08%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,5000       | 0,00%           | 0,5001        | 0,01%           | 10,009                            | 0,09%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,6000       | 0,00%           | 0,6001        | 0,01%           | 10,010                            | 0,10%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,7000       | 0,00%           | 0,7002        | 0,02%           | 10,011                            | 0,11%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,8000       | 0,00%           | 0,8002        | 0,02%           | 10,012                            | 0,12%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9004        | 0,04%           | 0,9004        | 0,04%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,9000       | 0,00%           | 0,9003        | 0,03%           | 10,013                            | 0,13%         |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -100,00%      | 1,0000       | 0,00%           | 1,0005        | 0,05%           | 10,015                            | 0,15%         |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 49,993                            | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 50,001                            | 0,00%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,2000       | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 50,010                            | 0,02%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,3000       | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 50,019                            | 0,04%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,4000       | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 50,029                            | 0,06%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,5000       | 0,00%           | 0,5001        | 0,01%           | 50,040                            | 0,08%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,6000       | 0,00%           | 0,6001        | 0,01%           | 50,052                            | 0,10%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,7000       | 0,00%           | 0,7002        | 0,02%           | 50,064                            | 0,13%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,8000       | 0,00%           | 0,8002        | 0,02%           | 50,076                            | 0,15%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9004        | 0,04%           | 0,9004        | 0,04%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,9000       | 0,00%           | 0,9003        | 0,03%           | 50,090                            | 0,18%         |
|                        | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -100,00%      | 1,0000       | 0,00%           | 1,0005        | 0,05%           | 50,104                            | 0,21%         |

Πίνακας 6.30: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.38:





**Εικόνα 6.38:** *Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD*

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, κάθε δοκιμή οι αποδόσεις τους είναι εξαιρετικές και ανεξάρτητες από την αντίσταση σφάλματος. Παρόλα αυτά και εδώ φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Εξαιρετική είναι η μέθοδος του XU που έχει τέλεια συμπεριφορά με μηδενική απόκλιση ανεξάρτητα από την θέση και την αντίσταση του σφάλματος. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποκλίσεις που είναι μικρότερες του 2% και άρα είναι αποδεκτοί.

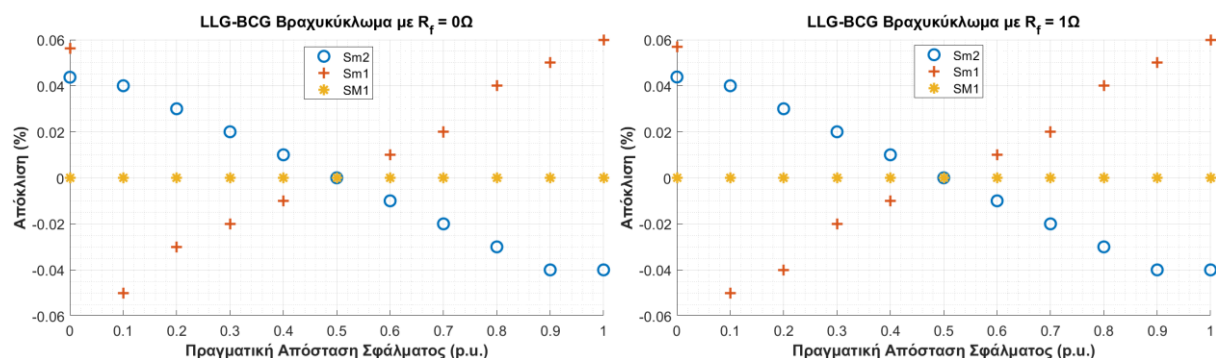


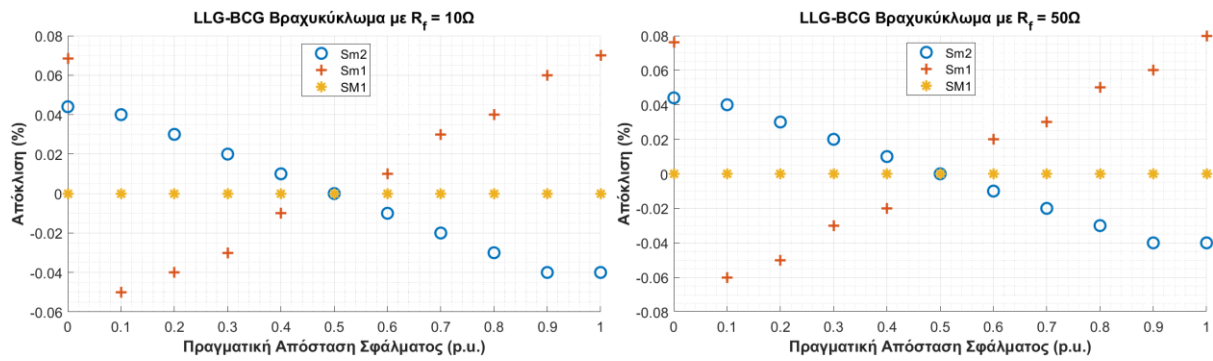
Στον Πίνακα 6.31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | Sm2 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm2 (Ω) | Σφάλμα (%) | Sm1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm1 (Ω) | Σφάλμα (%) | SM1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SM1 (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 0,001                       | -          | 0,0006     | 0,06%        | 0,001                       | -          | 0          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 0,001                       | -          | 0,0995     | -0,05%       | 0,001                       | -          | 0,1        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 0,001                       | -          | 0,1997     | -0,03%       | 0,000                       | -          | 0,2        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 0,001                       | -          | 0,2998     | -0,02%       | 0,000                       | -          | 0,3        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 0,001                       | -          | 0,3999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,4        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 0,001                       | -          | 0,5000     | 0,00%        | 0,001                       | -          | 0,5        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 0,001                       | -          | 0,6001     | 0,01%        | 0,001                       | -          | 0,6        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 0,001                       | -          | 0,7002     | 0,02%        | 0,001                       | -          | 0,7        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 0,004                       | -          | 0,8004     | 0,04%        | 0,002                       | -          | 0,8        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 0,002                       | -          | 0,9005     | 0,05%        | 0,002                       | -          | 0,9        | 0            | 0,000                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 1,000                       | -0,02%     | 0,0006     | 0,06%        | 1,000                       | -0,05%     | 0          | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 1,000                       | 0,00%      | 0,0995     | -0,05%       | 1,002                       | 0,15%      | 0,1        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,1996     | -0,04%       | 1,001                       | 0,11%      | 0,2        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,2998     | -0,02%       | 1,001                       | 0,08%      | 0,3        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,3999     | -0,01%       | 1,001                       | 0,05%      | 0,4        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,5        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 1,001                       | 0,10%      | 0,6001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,00%      | 0,6        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 1,000                       | 0,00%      | 0,7002     | 0,02%        | 1,000                       | -0,02%     | 0,7        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 1,000                       | -0,02%     | 0,8004     | 0,04%        | 1,000                       | -0,03%     | 0,8        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 1,000                       | -0,03%     | 0,9005     | 0,05%        | 1,000                       | -0,03%     | 0,9        | 0            | 1,000                       | 0,02%      |
| Rf = 10Ω            | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 10,005                      | 0,05%      | 0,0007     | 0,07%        | 10,005                      | 0,05%      | 0          | 0            | 10,003                      | 0,02%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 10,006                      | 0,06%      | 0,0995     | -0,05%       | 10,008                      | 0,08%      | 0,1        | 0            | 10,003                      | 0,03%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 10,007                      | 0,07%      | 0,1996     | -0,04%       | 10,008                      | 0,08%      | 0,2        | 0            | 10,003                      | 0,03%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 10,007                      | 0,07%      | 0,2997     | -0,03%       | 10,008                      | 0,08%      | 0,3        | 0            | 10,004                      | 0,04%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 10,008                      | 0,08%      | 0,3999     | -0,01%       | 10,008                      | 0,08%      | 0,4        | 0            | 10,004                      | 0,04%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 10,009                      | 0,09%      | 0,5000     | 0,00%        | 10,009                      | 0,09%      | 0,5        | 0            | 10,004                      | 0,04%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 10,010                      | 0,10%      | 0,6001     | 0,01%        | 10,010                      | 0,10%      | 0,6        | 0            | 10,004                      | 0,04%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 10,011                      | 0,11%      | 0,7003     | 0,03%        | 10,011                      | 0,11%      | 0,7        | 0            | 10,003                      | 0,03%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 10,012                      | 0,12%      | 0,8004     | 0,04%        | 10,012                      | 0,12%      | 0,8        | 0            | 10,003                      | 0,03%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 10,013                      | 0,13%      | 0,9006     | 0,06%        | 10,013                      | 0,13%      | 0,9        | 0            | 10,003                      | 0,03%      |
| Rf = 50Ω            | 0                                    | 0,0004     | 0,04%        | 49,992                      | -0,02%     | 0,0008     | 0,08%        | 49,991                      | -0,02%     | 0          | 0            | 50,013                      | 0,03%      |
|                     | 0,1                                  | 0,1004     | 0,04%        | 50,000                      | 0,00%      | 0,0994     | -0,06%       | 50,002                      | 0,00%      | 0,1        | 0            | 50,015                      | 0,03%      |
|                     | 0,2                                  | 0,2003     | 0,03%        | 50,009                      | 0,02%      | 0,1995     | -0,05%       | 50,010                      | 0,02%      | 0,2        | 0            | 50,017                      | 0,03%      |
|                     | 0,3                                  | 0,3002     | 0,02%        | 50,019                      | 0,04%      | 0,2997     | -0,03%       | 50,020                      | 0,04%      | 0,3        | 0            | 50,018                      | 0,04%      |
|                     | 0,4                                  | 0,4001     | 0,01%        | 50,029                      | 0,06%      | 0,3998     | -0,02%       | 50,030                      | 0,06%      | 0,4        | 0            | 50,019                      | 0,04%      |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 50,040                      | 0,08%      | 0,5000     | 0,00%        | 50,040                      | 0,08%      | 0,5        | 0            | 50,019                      | 0,04%      |
|                     | 0,6                                  | 0,5999     | -0,01%       | 50,052                      | 0,10%      | 0,6002     | 0,02%        | 50,052                      | 0,10%      | 0,6        | 0            | 50,019                      | 0,04%      |
|                     | 0,7                                  | 0,6998     | -0,02%       | 50,064                      | 0,13%      | 0,7003     | 0,03%        | 50,064                      | 0,13%      | 0,7        | 0            | 50,018                      | 0,04%      |
|                     | 0,8                                  | 0,7997     | -0,03%       | 50,077                      | 0,15%      | 0,8005     | 0,05%        | 50,076                      | 0,15%      | 0,8        | 0            | 50,017                      | 0,03%      |
|                     | 0,9                                  | 0,8996     | -0,04%       | 50,090                      | 0,18%      | 0,9006     | 0,06%        | 50,090                      | 0,18%      | 0,9        | 0            | 50,015                      | 0,03%      |
|                     | 1                                    | 0,9996     | -0,04%       | 50,104                      | 0,21%      | 1,0008     | 0,08%        | 50,010                      | 0,02%      | 1          | 0            | 50,013                      | 0,03%      |

Πίνακας 6.31: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.39:

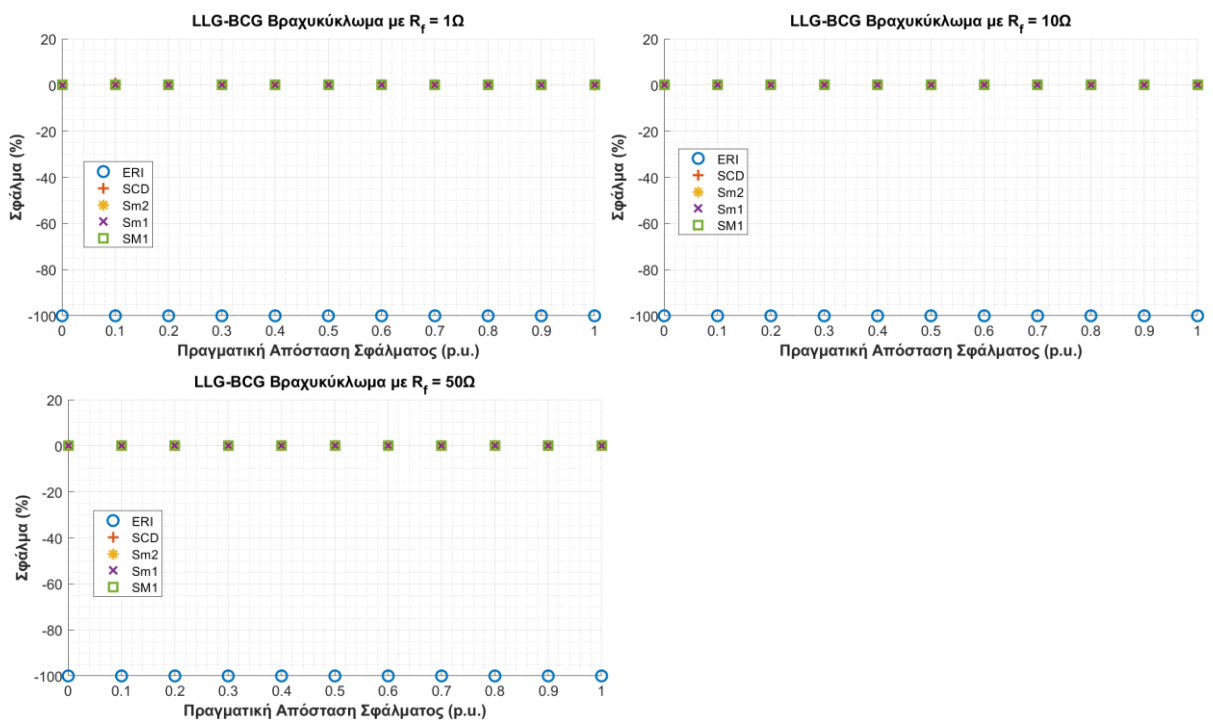




**Εικόνα 6.39:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι έχουν εξαιρετική απόδοση ανεξάρτητα από την αντίσταση και τη θέση του σφάλματος. Η SM1 είναι σαφώς ανώτερη εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντίθετο ρυθμό μεταβολής. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι έχουν αποκλίσεις που είναι μικρότερες του 2% και άρα είναι αποδεκτοί.

Στην Εικόνα 6.40 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.40:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα γίνεται εμφανές το μόνιμο σφάλμα έχει η ERI στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό το σφάλμα είναι της τάξης του 100% καθώς σε κάθε δοκιμή υπολογίζει σχεδόν μηδενική αντίσταση σφάλματος. Οι υπόλοιπες μέθοδοι έχουν εξαιρετική συμπεριφορά με ουσιαστικά αμελητέο σφάλμα στον ίδιο υπολογισμό.

### 6.3.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο

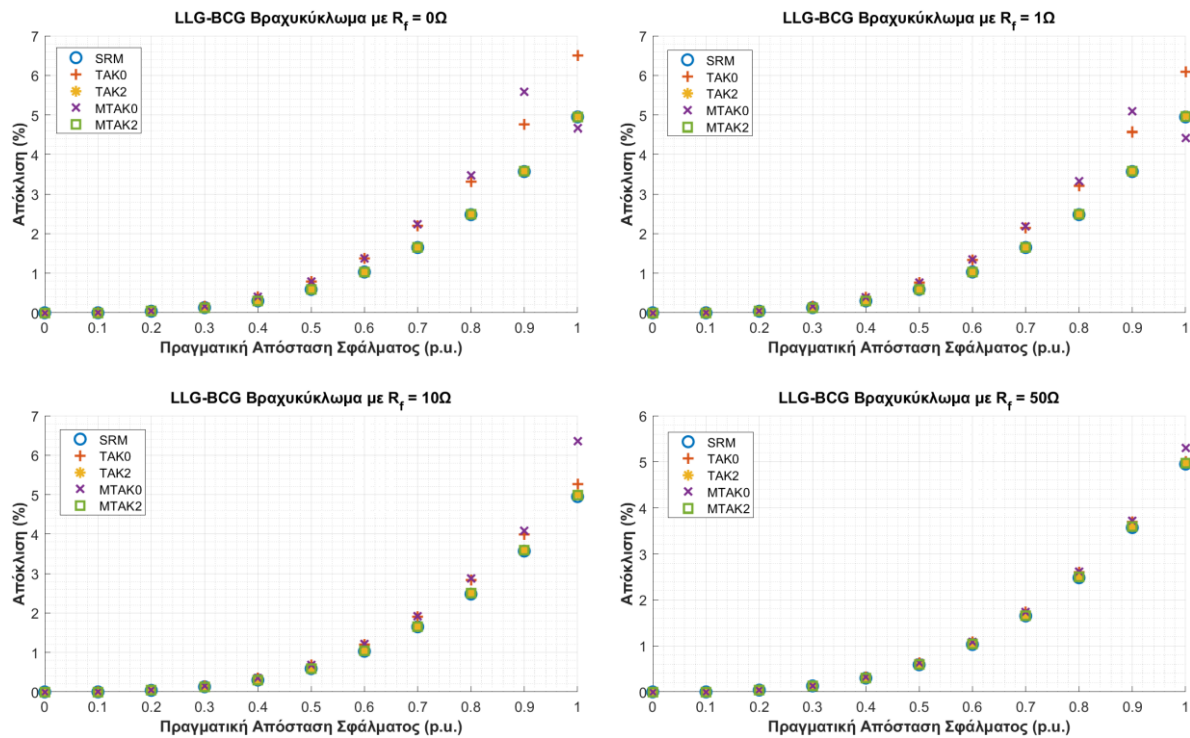
Στον Πίνακα 6.32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2005         | 0,05%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2005          | 0,05%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3017         | 0,17%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3017          | 0,17%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4040         | 0,40%           | 0,4030         | 0,30%           | 0,4040          | 0,40%           | 0,4030          | 0,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5079         | 0,79%           | 0,5059         | 0,59%           | 0,5079          | 0,79%           | 0,5059          | 0,59%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6137         | 1,37%           | 0,6103         | 1,03%           | 0,6138          | 1,38%           | 0,6103          | 1,03%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7220         | 2,20%           | 0,7165         | 1,65%           | 0,7224          | 2,24%           | 0,7165          | 1,65%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8331         | 3,31%           | 0,8249         | 2,49%           | 0,8347          | 3,47%           | 0,8249          | 2,49%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9476         | 4,76%           | 0,9358         | 3,58%           | 0,9558          | 5,58%           | 0,9358          | 3,58%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0650         | 6,50%           | 1,0496         | 4,96%           | 1,0467          | 4,67%           | 1,0495          | 4,95%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2005         | 0,05%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2005          | 0,05%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3017         | 0,17%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3017          | 0,17%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4039         | 0,39%           | 0,4030         | 0,30%           | 0,4039          | 0,39%           | 0,4030          | 0,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5077         | 0,77%           | 0,5059         | 0,59%           | 0,5077          | 0,77%           | 0,5059          | 0,59%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6134         | 1,34%           | 0,6103         | 1,03%           | 0,6135          | 1,35%           | 0,6103          | 1,03%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7214         | 2,14%           | 0,7165         | 1,65%           | 0,7218          | 2,18%           | 0,7165          | 1,65%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8321         | 3,21%           | 0,8249         | 2,49%           | 0,8333          | 3,33%           | 0,8249          | 2,49%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9458         | 4,58%           | 0,9358         | 3,58%           | 0,9509          | 5,09%           | 0,9358          | 3,58%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0609         | 6,09%           | 1,0497         | 4,97%           | 1,0441          | 4,41%           | 1,0496          | 4,96%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3015         | 0,15%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3015          | 0,15%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4035         | 0,35%           | 0,4030         | 0,30%           | 0,4035          | 0,35%           | 0,4030          | 0,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5069         | 0,69%           | 0,5059         | 0,59%           | 0,5069          | 0,69%           | 0,5059          | 0,59%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6120         | 1,20%           | 0,6104         | 1,04%           | 0,6121          | 1,21%           | 0,6104          | 1,04%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7191         | 1,91%           | 0,7166         | 1,66%           | 0,7192          | 1,92%           | 0,7166          | 1,66%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8284         | 2,84%           | 0,8250         | 2,50%           | 0,8287          | 2,87%           | 0,8250          | 2,50%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9399         | 3,99%           | 0,9359         | 3,59%           | 0,9408          | 4,08%           | 0,9359          | 3,59%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0526         | 5,26%           | 1,0500         | 5,00%           | 1,0635          | 6,35%           | 1,0499          | 4,99%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3013          | 0,13%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4032         | 0,32%           | 0,4030         | 0,30%           | 0,4032          | 0,32%           | 0,4030          | 0,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5063         | 0,63%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5063          | 0,63%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6109         | 1,09%           | 0,6104         | 1,04%           | 0,6109          | 1,09%           | 0,6104          | 1,04%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7174         | 1,74%           | 0,7166         | 1,66%           | 0,7174          | 1,74%           | 0,7166          | 1,66%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8260         | 2,60%           | 0,8250         | 2,50%           | 0,8261          | 2,61%           | 0,8250          | 2,50%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9369         | 3,69%           | 0,9359         | 3,59%           | 0,9372          | 3,72%           | 0,9359          | 3,59%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0500         | 5,00%           | 1,0497         | 4,97%           | 1,0530          | 5,30%           | 1,0497          | 4,97%           |

**Πίνακας 6.32:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2



Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.41:



**Εικόνα 6.41:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

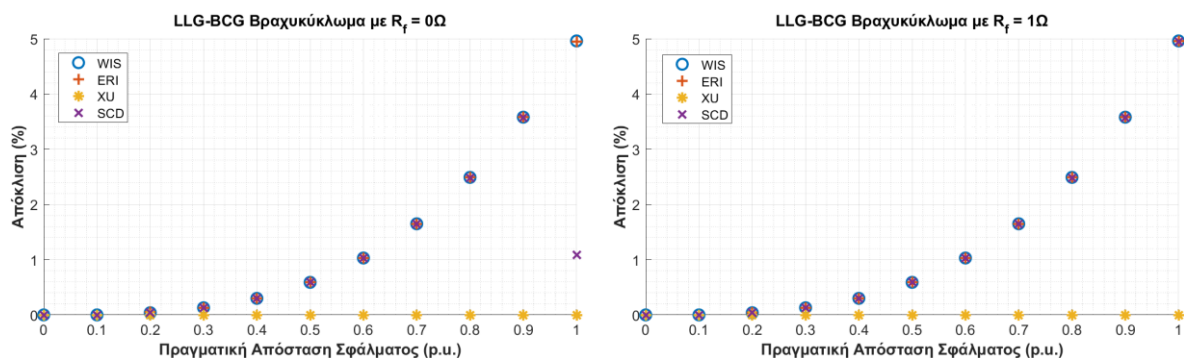
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Οι καλύτεροι αλγόριθμοι εδώ είναι οι TAK2, MTAK2 αλλά και ο SRM. Επίσης, φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε εκθετική αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Ακόμα, στις περισσότερες περιπτώσεις, για σταθερή πραγματική απόσταση του σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, ο ίδιος αλγόριθμος έχει σχεδόν ίδια απόκλιση. Τέλος, οι αποκλίσεις όλων των μεθόδων σε αρκετές δοκιμές είναι πάνω του 2%. Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση, καμία μέθοδος δεν είναι αποδεκτή.

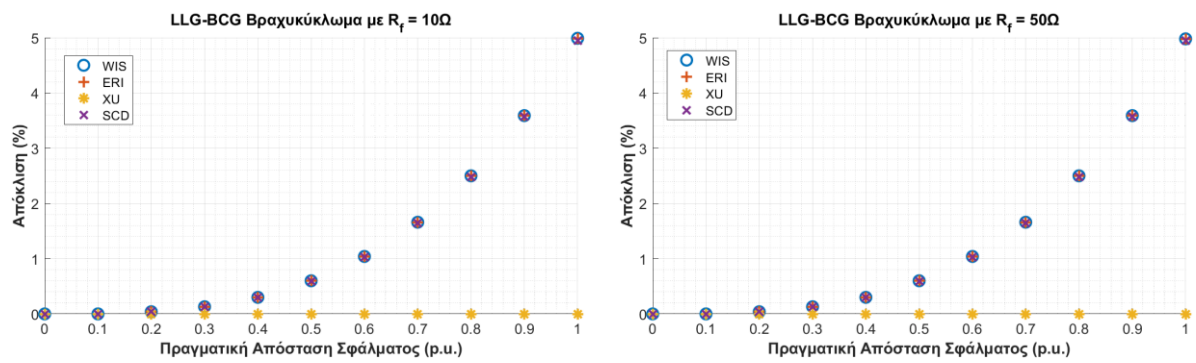
Στον Πίνακα 6.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,006                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2005        | 0,05%           | 0,010                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,031                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,012                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,077                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,060                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,145                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,100                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,206                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,145                             | -             | 0,6000       | 0,00%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,307                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,186                             | -             | 0,7000       | 0,00%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,366                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8249        | 2,49%           | 0,8249        | 2,49%           | 0,209                             | -             | 0,8000       | 0,00%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,379                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9358        | 3,58%           | 0,9358        | 3,58%           | 0,197                             | -             | 0,9000       | 0,00%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,314                             | -             |
|                        | 1                                             | 1,0496        | 4,96%           | 1,0495        | 4,95%           | 0,125                             | -             | 1,0000       | 0,00%           | 1,0109        | 1,09%           | 0,140                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,016                             | 1,60%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -99,90%       | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,026                             | 2,64%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,010                             | -99,04%       | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 1,017                             | 1,72%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,012                             | -98,80%       | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,984                             | -1,63%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,060                             | -94,05%       | 0,4000       | 0,00%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,927                             | -7,32%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,100                             | -90,00%       | 0,5000       | 0,00%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,854                             | -14,59%       |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,145                             | -85,50%       | 0,6000       | 0,00%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,780                             | -22,04%       |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,186                             | -81,44%       | 0,7000       | 0,00%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,724                             | -27,59%       |
|                        | 0,8                                           | 0,8249        | 2,49%           | 0,8249        | 2,49%           | 0,209                             | -79,12%       | 0,8000       | 0,00%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,714                             | -28,64%       |
|                        | 0,9                                           | 0,9358        | 3,58%           | 0,9358        | 3,58%           | 0,196                             | -80,38%       | 0,9000       | 0,00%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,778                             | -22,17%       |
|                        | 1                                             | 1,0496        | 4,96%           | 1,0496        | 4,96%           | 0,124                             | -87,63%       | 1,0000       | 0,00%           | 1,0495        | 4,95%           | 0,951                             | -4,87%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 10,153                            | 1,53%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -99,99%       | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 10,311                            | 3,11%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,009                             | -99,91%       | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 10,434                            | 4,34%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,028                             | -99,72%       | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 10,516                            | 5,16%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,058                             | -99,42%       | 0,4000       | 0,00%           | 0,4030        | 0,30%           | 10,555                            | 5,55%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,098                             | -99,02%       | 0,5000       | 0,00%           | 0,5059        | 0,59%           | 10,558                            | 5,58%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6104        | 1,04%           | 0,6104        | 1,04%           | 0,142                             | -98,58%       | 0,6000       | 0,00%           | 0,6103        | 1,03%           | 10,541                            | 5,41%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7166        | 1,66%           | 0,7166        | 1,66%           | 0,181                             | -98,19%       | 0,7000       | 0,00%           | 0,7165        | 1,65%           | 10,523                            | 5,23%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8250        | 2,50%           | 0,8250        | 2,50%           | 0,202                             | -97,98%       | 0,8000       | 0,00%           | 0,8248        | 2,48%           | 10,533                            | 5,33%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9359        | 3,59%           | 0,9359        | 3,59%           | 0,187                             | -98,13%       | 0,9000       | 0,00%           | 0,9357        | 3,57%           | 10,601                            | 6,01%         |
|                        | 1                                             | 1,0499        | 4,99%           | 1,0499        | 4,99%           | 0,109                             | -98,91%       | 1,0000       | 0,00%           | 1,0495        | 4,95%           | 10,765                            | 7,65%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 49,933                            | -0,13%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -100,00%      | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 50,667                            | 1,33%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,021                             | -99,96%       | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 51,031                            | 2,06%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,026                             | -99,95%       | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 51,842                            | 3,68%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,054                             | -99,89%       | 0,4000       | 0,00%           | 0,4030        | 0,30%           | 52,268                            | 4,54%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,091                             | -99,82%       | 0,5000       | 0,00%           | 0,5059        | 0,59%           | 52,592                            | 5,18%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6104        | 1,04%           | 0,6104        | 1,04%           | 0,131                             | -99,74%       | 0,6000       | 0,00%           | 0,6103        | 1,03%           | 52,828                            | 5,66%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7166        | 1,66%           | 0,7166        | 1,66%           | 0,166                             | -99,67%       | 0,7000       | 0,00%           | 0,7165        | 1,65%           | 52,999                            | 6,00%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8250        | 2,50%           | 0,8250        | 2,50%           | 0,185                             | -99,63%       | 0,8000       | 0,00%           | 0,8248        | 2,48%           | 53,136                            | 6,27%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9359        | 3,59%           | 0,9359        | 3,59%           | 0,169                             | -99,66%       | 0,9000       | 0,00%           | 0,9357        | 3,57%           | 53,276                            | 6,55%         |
|                        | 1                                             | 1,0498        | 4,98%           | 1,0498        | 4,98%           | 0,096                             | -99,81%       | 1,0000       | 0,00%           | 1,0495        | 4,95%           | 53,462                            | 6,92%         |

Πίνακας 6.33: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.42:





**Εικόνα 6.42:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

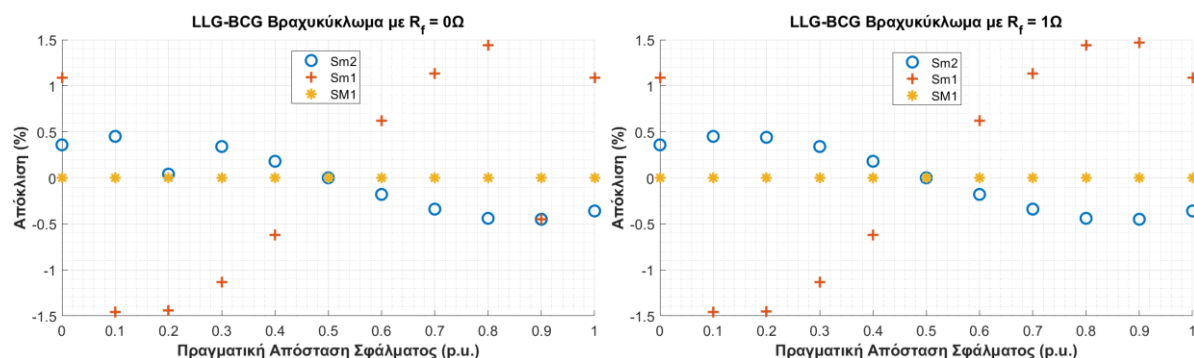
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε εκθετική αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Εξαίρεση αυτού είναι η μέθοδος του XU που έχει τέλεια συμπεριφορά με μηδενική απόκλιση ανεξάρτητα από την θέση και την αντίσταση του σφάλματος. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις, για σταθερή πραγματική απόσταση του σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, ο ίδιος αλγόριθμος έχει σχεδόν ίδια απόκλιση. Συνεπώς, μόνο η μέθοδος του XU είναι αποδεκτή.

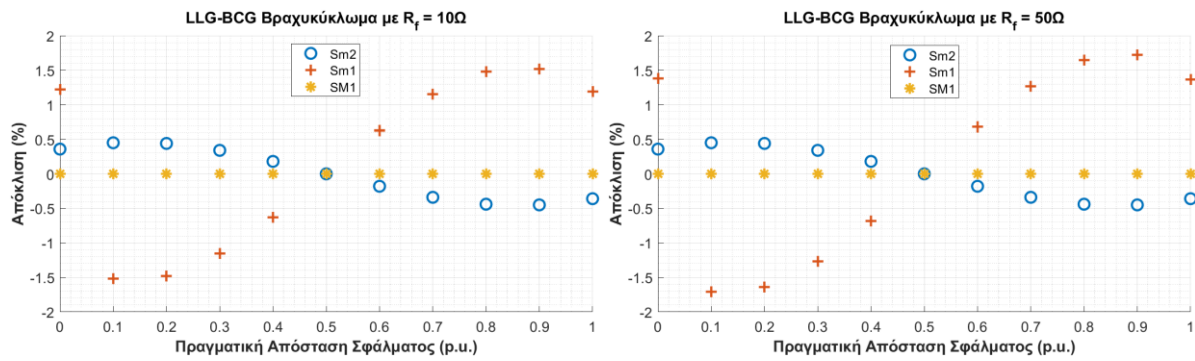
Στον Πίνακα 6.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,136                             | -             | 0,0109        | 1,09%           | 0,415                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,168                             | -             | 0,0854        | -1,46%          | 0,521                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,164                             | -             | 0,1856        | -1,44%          | 0,463                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,141                             | -             | 0,2887        | -1,13%          | 0,301                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,114                             | -             | 0,3938        | -0,62%          | 0,098                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,093                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,093                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,086                             | -             | 0,6062        | 0,62%           | 0,231                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,092                             | -             | 0,7113        | 1,13%           | 0,295                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,104                             | -             | 0,8144        | 1,44%           | 0,211                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,101                             | -             | 0,8955        | -0,45%          | 0,205                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,077                             | -             | 1,0109        | 1,09%           | 0,009                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,879                             | -12,10%       | 0,0109        | 1,09%           | 0,597                             | -40,32%       | 0             | 0               | 1,003                             | 0,33%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,863                             | -13,66%       | 0,0854        | -1,46%          | 1,559                             | 55,93%        | 0,1           | 0               | 1,007                             | 0,73%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,883                             | -11,74%       | 0,1855        | -1,45%          | 1,514                             | 51,42%        | 0,2           | 0               | 1,010                             | 1,04%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,919                             | -8,06%        | 0,2887        | -1,13%          | 1,364                             | 36,43%        | 0,3           | 0               | 1,013                             | 1,27%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,958                             | -4,17%        | 0,3938        | -0,62%          | 1,171                             | 17,07%        | 0,4           | 0               | 1,014                             | 1,41%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,988                             | -1,25%        | 0,5000        | 0,00%           | 0,988                             | -1,25%        | 0,5           | 0               | 1,015                             | 1,46%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 1,001                             | 0,10%         | 0,6062        | 0,62%           | 0,855                             | -14,48%       | 0,6           | 0               | 1,014                             | 1,41%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,999                             | -0,08%        | 0,7113        | 1,13%           | 0,796                             | -20,43%       | 0,7           | 0               | 1,013                             | 1,27%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,990                             | -1,05%        | 0,8144        | 1,44%           | 0,811                             | -18,86%       | 0,8           | 0               | 1,010                             | 1,04%         |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,987                             | -1,33%        | 0,9147        | 1,47%           | 0,887                             | -11,28%       | 0,9           | 0               | 1,007                             | 0,73%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 1,012                             | 1,15%         | 1,0109        | 1,09%           | 0,995                             | -0,49%        | 1             | 0               | 1,003                             | 0,33%         |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 10,008                            | 0,08%         | 0,0122        | 1,22%           | 9,657                             | -3,43%        | 0             | 0               | 10,034                            | 0,34%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 10,139                            | 1,39%         | 0,0848        | -1,52%          | 10,895                            | 8,95%         | 0,1           | 0               | 10,076                            | 0,76%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 10,292                            | 2,92%         | 0,1852        | -1,48%          | 10,972                            | 9,72%         | 0,2           | 0               | 10,110                            | 1,10%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 10,448                            | 4,48%         | 0,2885        | -1,15%          | 10,924                            | 9,24%         | 0,3           | 0               | 10,135                            | 1,35%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 10,588                            | 5,88%         | 0,3937        | -0,63%          | 10,814                            | 8,14%         | 0,4           | 0               | 10,150                            | 1,50%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,698                            | 6,98%         | 0,5000        | 0,00%           | 10,698                            | 6,98%         | 0,5           | 0               | 10,155                            | 1,55%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 10,771                            | 7,71%         | 0,6063        | 0,63%           | 10,617                            | 6,17%         | 0,6           | 0               | 10,150                            | 1,50%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 10,807                            | 8,07%         | 0,7115        | 1,15%           | 10,523                            | 5,23%         | 0,7           | 0               | 10,135                            | 1,35%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 10,813                            | 8,13%         | 0,8148        | 1,48%           | 10,628                            | 6,28%         | 0,8           | 0               | 10,110                            | 1,10%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 10,804                            | 8,04%         | 0,9152        | 1,52%           | 10,704                            | 7,04%         | 0,9           | 0               | 10,761                            | 7,61%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 10,802                            | 8,02%         | 1,0119        | 1,19%           | 10,791                            | 7,91%         | 1             | 0               | 10,034                            | 0,34%         |
|                        | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 49,753                            | -0,49%        | 0,0138        | 1,38%           | 49,238                            | -1,52%        | 0             | 0               | 50,169                            | 0,34%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 50,455                            | 0,91%         | 0,0829        | -1,71%          | 51,475                            | 2,95%         | 0,1           | 0               | 50,382                            | 0,76%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 51,134                            | 2,27%         | 0,1836        | -1,64%          | 52,031                            | 4,06%         | 0,2           | 0               | 50,553                            | 1,11%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 51,760                            | 3,52%         | 0,2873        | -1,27%          | 52,377                            | 4,75%         | 0,3           | 0               | 50,677                            | 1,35%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 52,308                            | 4,62%         | 0,3932        | -0,68%          | 52,597                            | 5,19%         | 0,4           | 0               | 50,752                            | 1,50%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 52,757                            | 5,51%         | 0,5000        | 0,00%           | 52,757                            | 5,51%         | 0,5           | 0               | 50,777                            | 1,55%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 53,094                            | 6,19%         | 0,6068        | 0,68%           | 52,904                            | 5,81%         | 0,6           | 0               | 50,752                            | 1,50%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 53,317                            | 6,63%         | 0,7127        | 1,27%           | 53,060                            | 6,12%         | 0,7           | 0               | 50,677                            | 1,35%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 53,431                            | 6,86%         | 0,8165        | 1,65%           | 53,220                            | 6,44%         | 0,8           | 0               | 50,552                            | 1,10%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 53,451                            | 6,90%         | 0,9172        | 1,72%           | 53,356                            | 6,71%         | 0,9           | 0               | 50,382                            | 0,76%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 53,402                            | 6,80%         | 1,0137        | 1,37%           | 53,422                            | 6,84%         | 1             | 0               | 50,169                            | 0,34%         |

Πίνακας 6.34: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.43:

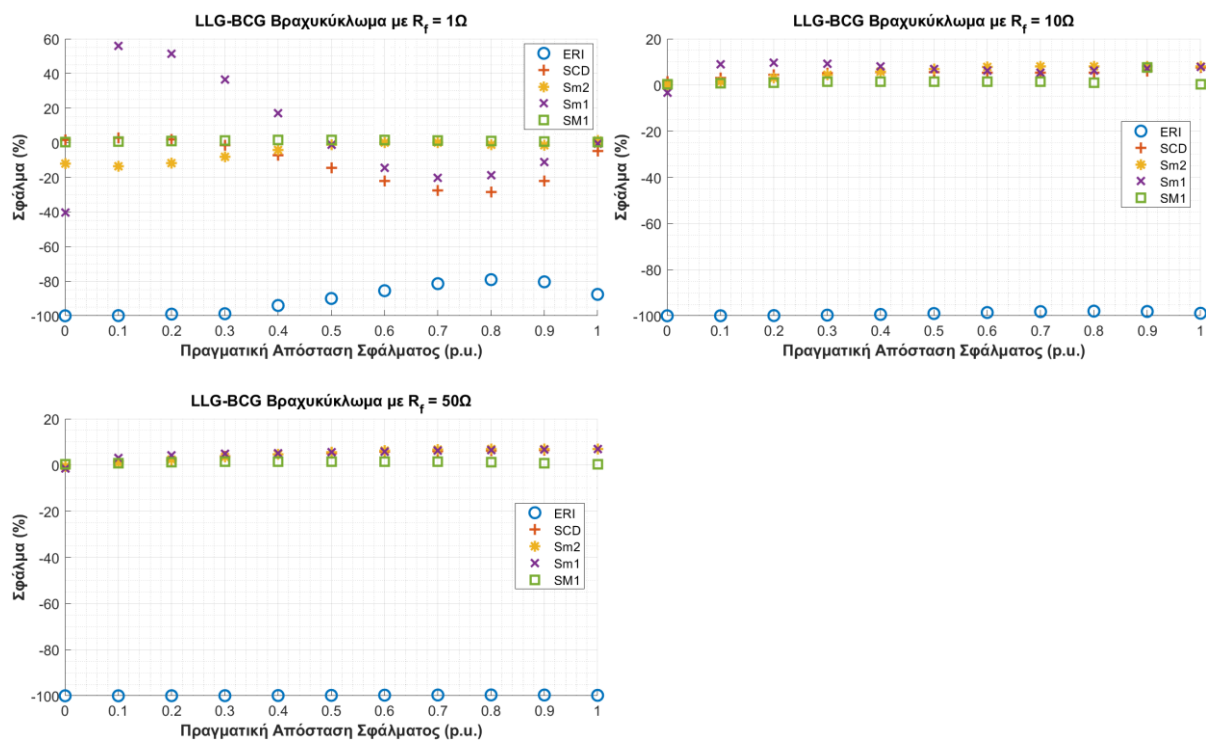




**Εικόνα 6.43:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει την καλύτερη απόδοση με μηδενική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Τέλος, η Sm1 παρουσιάζει δυσανάλογα την μεγαλύτερη απόκλιση που όμως σε γενικές γραμμές διατηρείται εντός των ορίων. Συνεπώς οι εν λόγω μέθοδοι έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 6.44 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.44:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα η μέθοδος SM1 υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό, είναι της τάξης του 100% καθώς σε κάθε δοκιμή υπολογίζει σχεδόν μηδενική αντίσταση σφάλματος. Η Sm2, η Sm1 και SCD έχουν σημαντικό σφάλμα για  $R_f=1\Omega$ , αλλά με την αύξηση της αντίστασης η απόδοσή τους βελτιώνεται.



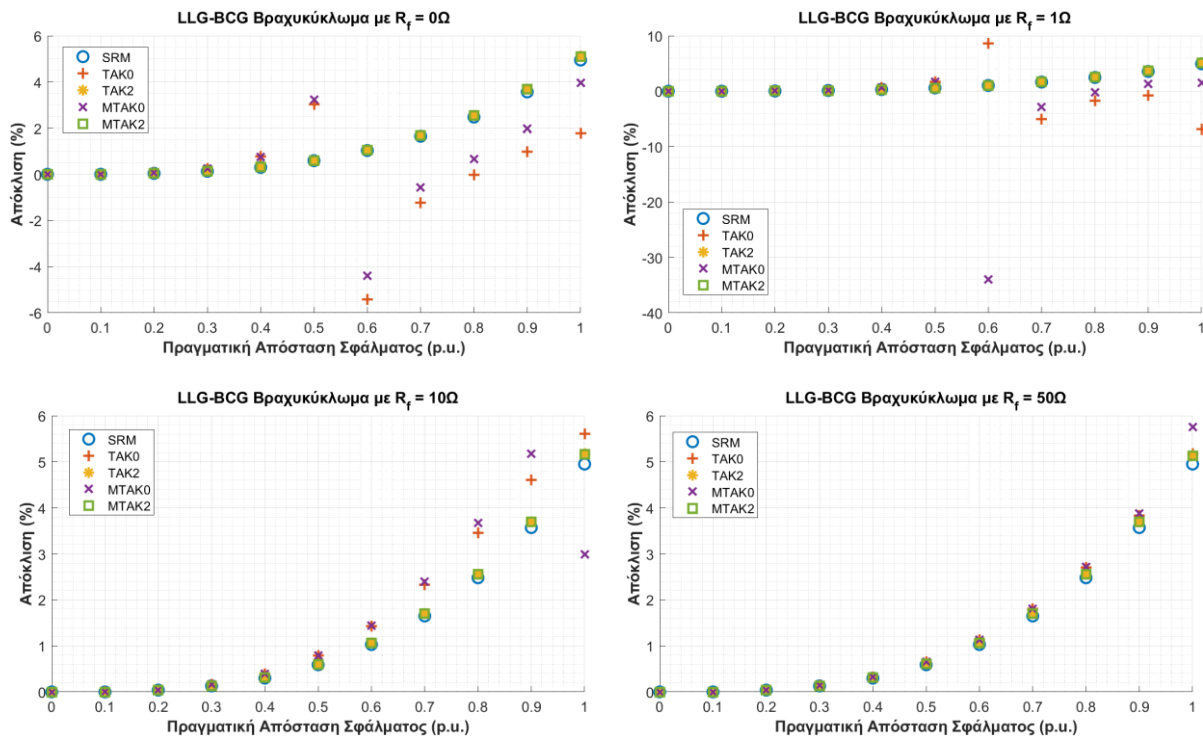
### 6.3.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο

Στον Πίνακα 6.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | TAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK0<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | MTAK2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2007         | 0,07%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2007          | 0,07%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3026         | 0,26%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3026          | 0,26%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4078         | 0,78%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4075          | 0,75%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5303         | 3,03%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5324          | 3,24%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,5458         | -5,42%          | 0,6105         | 1,05%           | 0,5560          | -4,40%          | 0,6105          | 1,05%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,6877         | -1,23%          | 0,7169         | 1,69%           | 0,6942          | -0,58%          | 0,7169          | 1,69%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,7997         | -0,03%          | 0,8256         | 2,56%           | 0,8067          | 0,67%           | 0,8255          | 2,55%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9098         | 0,98%           | 0,9369         | 3,69%           | 0,9199          | 1,99%           | 0,9368          | 3,68%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0177         | 1,77%           | 1,0512         | 5,12%           | 1,0397          | 3,97%           | 1,0511          | 5,11%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2006         | 0,06%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2006          | 0,06%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3022         | 0,22%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3022          | 0,22%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4063         | 0,63%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4061          | 0,61%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5171         | 1,71%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5173          | 1,73%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6863         | 8,63%           | 0,6105         | 1,05%           | 0,2599          | -34,01%         | 0,6105          | 1,05%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,6497         | -5,03%          | 0,7169         | 1,69%           | 0,6717          | -2,83%          | 0,7169          | 1,69%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,7829         | -1,71%          | 0,8256         | 2,56%           | 0,7980          | -0,20%          | 0,8256          | 2,56%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,8924         | -0,76%          | 0,9369         | 3,69%           | 0,9130          | 1,30%           | 0,9368          | 3,68%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 0,9319         | -6,81%          | 1,0513         | 5,13%           | 1,0155          | 1,55%           | 1,0512          | 5,12%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1001         | 0,01%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1001          | 0,01%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3016         | 0,16%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3016          | 0,16%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4039         | 0,39%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4039          | 0,39%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5079         | 0,79%           | 0,5060         | 0,60%           | 0,5079          | 0,79%           | 0,5060          | 0,60%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6143         | 1,43%           | 0,6106         | 1,06%           | 0,6144          | 1,44%           | 0,6106          | 1,06%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7233         | 2,33%           | 0,7170         | 1,70%           | 0,7240          | 2,40%           | 0,7170          | 1,70%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8345         | 3,45%           | 0,8256         | 2,56%           | 0,8367          | 3,67%           | 0,8256          | 2,56%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9461         | 4,61%           | 0,9370         | 3,70%           | 0,9518          | 5,18%           | 0,9370          | 3,70%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0561         | 5,61%           | 1,0517         | 5,17%           | 1,0299          | 2,99%           | 1,0516          | 5,16%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000         | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           | 0,0000          | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000         | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           | 0,1000          | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004         | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           | 0,2004          | 0,04%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3014         | 0,14%           | 0,3013         | 0,13%           | 0,3014          | 0,14%           | 0,3013          | 0,13%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4033         | 0,33%           | 0,4031         | 0,31%           | 0,4033          | 0,33%           | 0,4031          | 0,31%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5065         | 0,65%           | 0,5061         | 0,61%           | 0,5065          | 0,65%           | 0,5061          | 0,61%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6113         | 1,13%           | 0,6106         | 1,06%           | 0,6113          | 1,13%           | 0,6106          | 1,06%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7181         | 1,81%           | 0,7170         | 1,70%           | 0,7181          | 1,81%           | 0,7170          | 1,70%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8270         | 2,70%           | 0,8256         | 2,56%           | 0,8272          | 2,72%           | 0,8256          | 2,56%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9383         | 3,83%           | 0,9370         | 3,70%           | 0,9388          | 3,88%           | 0,9369          | 3,69%           |
|                        | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0517         | 5,17%           | 1,0514         | 5,14%           | 1,0576          | 5,76%           | 1,0513          | 5,13%           |

Πίνακας 6.35: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.45:



**Εικόνα 6.45:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι SRM, TAK2 και MTAK2 εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε εκθετική αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Ακόμα, στις περισσότερες περιπτώσεις, για σταθερή πραγματική απόσταση του σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, ο ίδιος αλγόριθμος έχει σχεδόν ίδια απόκλιση. Επιπλέον, σημειώνουμε ότι οι TAK0 και MTAK0 για  $R_f=0\Omega$  και  $R_f=1\Omega$  εμφανίζουν μια μη αναμενόμενη κατάρρευση στην απόδοση, η οποία είναι εντονότερη για  $R_f=1\Omega$ . Τέλος, από τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι καμία μέθοδος δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή.

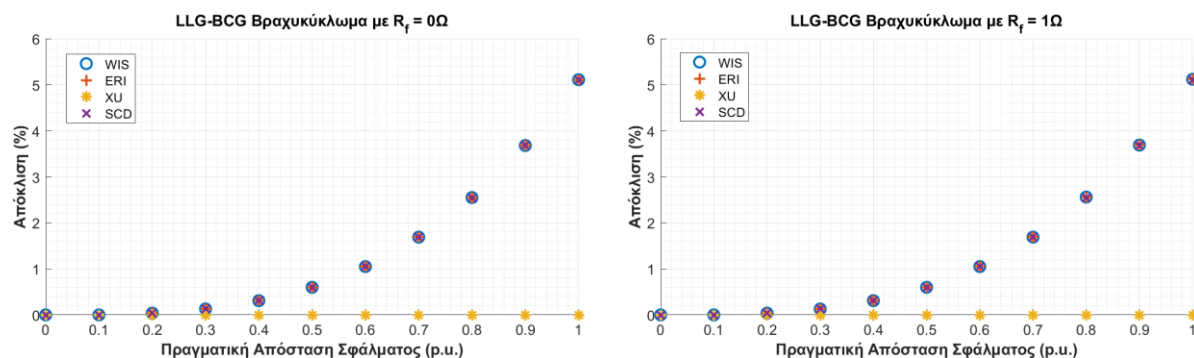


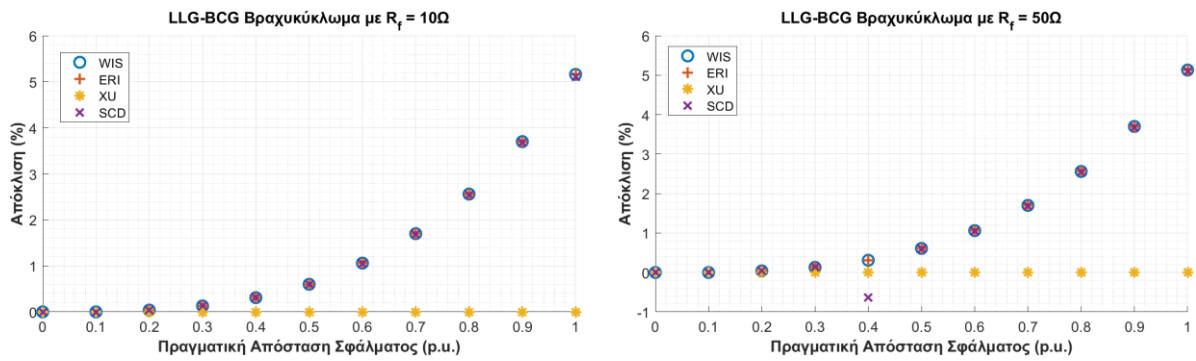
Στον Πίνακα 6.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους WIS, ERI, XU και SCD.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,007                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,010                             | -             | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,031                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,030                             | -             | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,078                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,062                             | -             | 0,4000       | 0,00%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,145                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,104                             | -             | 0,5000       | 0,00%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,226                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6105        | 1,05%           | 0,6105        | 1,05%           | 0,152                             | -             | 0,6000       | 0,00%           | 0,6105        | 1,05%           | 0,305                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7169        | 1,69%           | 0,7169        | 1,69%           | 0,195                             | -             | 0,7000       | 0,00%           | 0,7169        | 1,69%           | 0,363                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8255        | 2,55%           | 0,8255        | 2,55%           | 0,221                             | -             | 0,8000       | 0,00%           | 0,8255        | 2,55%           | 0,374                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9368        | 3,68%           | 0,9368        | 3,68%           | 0,208                             | -             | 0,9000       | 0,00%           | 0,9368        | 3,68%           | 0,309                             | -             |
|                        | 1                                             | 1,0511        | 5,11%           | 1,0511        | 5,11%           | 0,129                             | -             | 1,0000       | 0,00%           | 1,0511        | 5,11%           | 0,138                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,014                             | 1,42%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -99,90%       | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,023                             | 2,30%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,010                             | -99,02%       | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 1,014                             | 1,35%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,030                             | -97,05%       | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,981                             | -1,95%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,062                             | -93,85%       | 0,4000       | 0,00%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,925                             | -7,50%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,104                             | -89,59%       | 0,5000       | 0,00%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,854                             | -14,57%       |
|                        | 0,6                                           | 0,6105        | 1,05%           | 0,6105        | 1,05%           | 0,152                             | -84,82%       | 0,6000       | 0,00%           | 0,6105        | 1,05%           | 0,783                             | -21,73%       |
|                        | 0,7                                           | 0,7169        | 1,69%           | 0,7169        | 1,69%           | 0,195                             | -80,48%       | 0,7000       | 0,00%           | 0,7169        | 1,69%           | 0,730                             | -27,01%       |
|                        | 0,8                                           | 0,8256        | 2,56%           | 0,8256        | 2,56%           | 0,221                             | -77,92%       | 0,8000       | 0,00%           | 0,8255        | 2,55%           | 0,721                             | -27,88%       |
|                        | 0,9                                           | 0,9369        | 3,69%           | 0,9369        | 3,69%           | 0,208                             | -79,20%       | 0,9000       | 0,00%           | 0,9368        | 3,68%           | 0,786                             | -21,45%       |
|                        | 1                                             | 1,0512        | 5,12%           | 1,0512        | 5,12%           | 0,129                             | -87,10%       | 1,0000       | 0,00%           | 1,0511        | 5,11%           | 0,956                             | -4,44%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 10,094                            | 0,94%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -99,99%       | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 10,243                            | 2,43%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,010                             | -99,90%       | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 10,371                            | 3,71%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,030                             | -99,71%       | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 10,469                            | 4,69%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,062                             | -99,39%       | 0,4000       | 0,00%           | 0,4031        | 0,31%           | 10,531                            | 5,31%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,5060        | 0,60%           | 0,104                             | -98,96%       | 0,5000       | 0,00%           | 0,5060        | 0,60%           | 10,560                            | 5,60%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6106        | 1,06%           | 0,6106        | 1,06%           | 0,149                             | -98,51%       | 0,6000       | 0,00%           | 0,6105        | 1,05%           | 10,567                            | 5,67%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7170        | 1,70%           | 0,7170        | 1,70%           | 0,195                             | -98,05%       | 0,7000       | 0,00%           | 0,7169        | 1,69%           | 10,569                            | 5,69%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8256        | 2,56%           | 0,8256        | 2,56%           | 0,221                             | -97,79%       | 0,8000       | 0,00%           | 0,8255        | 2,55%           | 10,592                            | 5,92%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9370        | 3,70%           | 0,9370        | 3,70%           | 0,201                             | -97,99%       | 0,9000       | 0,00%           | 0,9368        | 3,68%           | 10,666                            | 6,66%         |
|                        | 1                                             | 1,0516        | 5,16%           | 1,0516        | 5,16%           | 0,118                             | -98,82%       | 1,0000       | 0,00%           | 1,0511        | 5,11%           | 10,829                            | 8,29%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -100,00%      | 0,0000       | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 48,830                            | -2,34%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -100,00%      | 0,1000       | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 49,625                            | -0,75%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,010                             | -99,98%       | 0,2000       | 0,00%           | 0,2004        | 0,04%           | 50,428                            | 0,86%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,030                             | -99,94%       | 0,3000       | 0,00%           | 0,3013        | 0,13%           | 51,208                            | 2,42%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,4031        | 0,31%           | 0,056                             | -99,89%       | 0,4000       | 0,00%           | 0,3937        | -0,63%          | 52,158                            | 4,32%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5061        | 0,61%           | 0,5061        | 0,61%           | 0,104                             | -99,79%       | 0,5000       | 0,00%           | 0,5060        | 0,60%           | 52,601                            | 5,20%         |
|                        | 0,6                                           | 0,6106        | 1,06%           | 0,6106        | 1,06%           | 0,152                             | -99,70%       | 0,6000       | 0,00%           | 0,6105        | 1,05%           | 53,178                            | 6,36%         |
|                        | 0,7                                           | 0,7170        | 1,70%           | 0,7170        | 1,70%           | 0,195                             | -99,61%       | 0,7000       | 0,00%           | 0,7169        | 1,69%           | 53,666                            | 7,33%         |
|                        | 0,8                                           | 0,8256        | 2,56%           | 0,8256        | 2,56%           | 0,197                             | -99,61%       | 0,8000       | 0,00%           | 0,8255        | 2,55%           | 54,079                            | 8,16%         |
|                        | 0,9                                           | 0,9370        | 3,70%           | 0,9370        | 3,70%           | 0,208                             | -99,58%       | 0,9000       | 0,00%           | 0,9368        | 3,68%           | 54,443                            | 8,89%         |
|                        | 1                                             | 1,0513        | 5,13%           | 1,0513        | 5,13%           | 0,104                             | -99,79%       | 1,0000       | 0,00%           | 1,0511        | 5,11%           | 54,800                            | 9,60%         |

Πίνακας 6.36: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.46:





**Εικόνα 6.46:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους WIS, ERI, XU, SCD

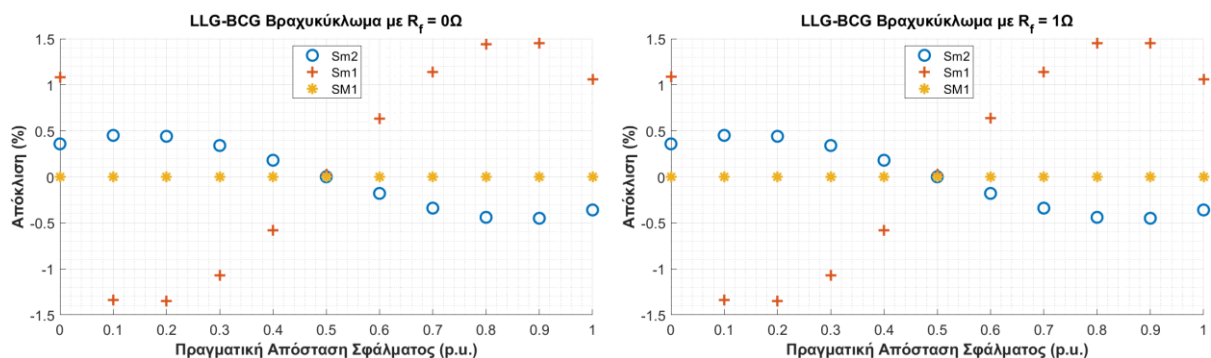
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Επίσης, φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε εκθετική αύξηση της απόκλισης σε κάθε αλγόριθμο. Εξαίρεση αυτού είναι η μέθοδος του XU που έχει τέλεια συμπεριφορά με μηδενική απόκλιση ανεξάρτητα από την θέση και την αντίσταση του σφάλματος. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις, για σταθερή πραγματική απόσταση του σφάλματος αλλά διαφορετική αντίσταση, ο ίδιος αλγόριθμος έχει σχεδόν ίδια απόκλιση. Συνεπώς, μόνο η XU είναι αποδεκτή.

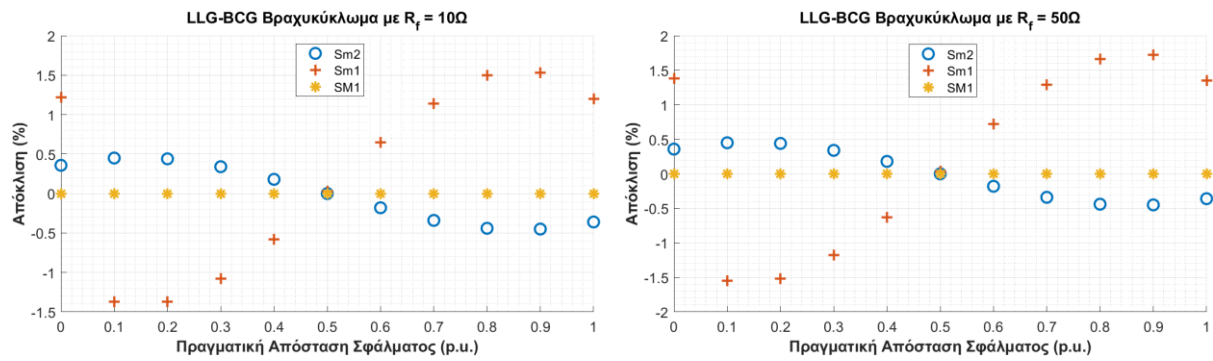
Στον Πίνακα 6.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLG σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους Sm2, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | Sm2<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm2 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,125                             | -             | 0,0108        | 1,08%           | 0,379                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,139                             | -             | 0,0866        | -1,34%          | 0,390                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,126                             | -             | 0,1865        | -1,35%          | 0,299                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,116                             | -             | 0,2893        | -1,07%          | 0,138                             | -             | 0,3           | 0               | 0,001                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,130                             | -             | 0,3942        | -0,58%          | 0,034                             | -             | 0,4           | 0               | 0,001                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,179                             | -             | 0,5003        | 0,03%           | 0,181                             | -             | 0,5           | 0               | 0,001                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,258                             | -             | 0,6063        | 0,63%           | 0,289                             | -             | 0,6           | 0               | 0,001                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,348                             | -             | 0,7114        | 1,14%           | 0,359                             | -             | 0,7           | 0               | 0,001                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,413                             | -             | 0,8144        | 1,44%           | 0,388                             | -             | 0,8           | 0               | 0,001                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,406                             | -             | 0,9145        | 1,45%           | 0,361                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,268                             | -             | 1,0106        | 1,06%           | 0,234                             | -             | 1             | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 0,888                             | -11,18%       | 0,0109        | 1,09%           | 0,630                             | -36,96%       | 0             | 0               | 1,003                             | 0,33%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 0,889                             | -11,07%       | 0,0866        | -1,34%          | 1,423                             | 42,33%        | 0,1           | 0               | 1,007                             | 0,72%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 0,917                             | -8,27%        | 0,1865        | -1,35%          | 1,347                             | 34,69%        | 0,2           | 0               | 1,010                             | 1,03%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 0,942                             | -5,80%        | 0,2893        | -1,07%          | 1,199                             | 19,90%        | 0,3           | 0               | 1,013                             | 1,25%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 0,941                             | -5,93%        | 0,3942        | -0,58%          | 1,038                             | 3,83%         | 0,4           | 0               | 1,014                             | 1,38%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,903                             | -9,75%        | 0,5003        | 0,03%           | 0,900                             | -9,97%        | 0,5           | 0               | 1,014                             | 1,42%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 0,831                             | -16,92%       | 0,6064        | 0,64%           | 0,799                             | -20,11%       | 0,6           | 0               | 1,014                             | 1,36%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 0,745                             | -25,48%       | 0,7114        | 1,14%           | 0,734                             | -26,60%       | 0,7           | 0               | 1,012                             | 1,22%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 0,681                             | -31,90%       | 0,8145        | 1,45%           | 0,706                             | -29,36%       | 0,8           | 0               | 1,010                             | 0,99%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 0,686                             | -31,36%       | 0,9145        | 1,45%           | 0,732                             | -26,79%       | 0,9           | 0               | 1,007                             | 0,69%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 0,820                             | -18,05%       | 1,0106        | 1,06%           | 0,855                             | -14,52%       | 1             | 0               | 1,003                             | 0,31%         |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 9,996                             | -0,04%        | 0,0122        | 1,22%           | 9,931                             | -0,69%        | 0             | 0               | 10,034                            | 0,34%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 10,098                            | 0,98%         | 0,0863        | -1,37%          | 10,687                            | 6,87%         | 0,1           | 0               | 10,076                            | 0,76%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 10,266                            | 2,66%         | 0,1863        | -1,37%          | 10,742                            | 7,42%         | 0,2           | 0               | 10,110                            | 1,10%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 10,426                            | 4,26%         | 0,2892        | -1,08%          | 10,714                            | 7,14%         | 0,3           | 0               | 10,135                            | 1,34%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 10,549                            | 5,49%         | 0,3942        | -0,58%          | 10,660                            | 6,60%         | 0,4           | 0               | 10,149                            | 1,49%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 10,616                            | 6,16%         | 0,5003        | 0,03%           | 10,613                            | 6,13%         | 0,5           | 0               | 10,154                            | 1,54%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 10,626                            | 6,26%         | 0,6065        | 0,65%           | 10,586                            | 5,86%         | 0,6           | 0               | 10,149                            | 1,49%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 10,593                            | 5,93%         | 0,7114        | 1,14%           | 10,575                            | 5,75%         | 0,7           | 0               | 10,134                            | 1,34%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 10,550                            | 5,50%         | 0,8150        | 1,50%           | 10,578                            | 5,78%         | 0,8           | 0               | 10,110                            | 1,10%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 10,566                            | 5,66%         | 0,9153        | 1,53%           | 10,604                            | 6,04%         | 0,9           | 0               | 10,076                            | 0,76%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 10,644                            | 6,44%         | 1,0120        | 1,20%           | 10,697                            | 6,97%         | 1             | 0               | 10,034                            | 0,34%         |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,0036        | 0,36%           | 49,649                            | -0,70%        | 0,0138        | 1,38%           | 49,134                            | -1,73%        | 0             | 0               | 50,169                            | 0,34%         |
|                        | 0,1                                           | 0,1045        | 0,45%           | 49,426                            | -1,15%        | 0,0845        | -1,55%          | 50,314                            | 0,63%         | 0,1           | 0               | 50,382                            | 0,76%         |
|                        | 0,2                                           | 0,2044        | 0,44%           | 50,277                            | 0,55%         | 0,1848        | -1,52%          | 51,021                            | 2,04%         | 0,2           | 0               | 50,552                            | 1,10%         |
|                        | 0,3                                           | 0,3034        | 0,34%           | 51,144                            | 2,29%         | 0,2882        | -1,18%          | 51,607                            | 3,21%         | 0,3           | 0               | 50,677                            | 1,35%         |
|                        | 0,4                                           | 0,4018        | 0,18%           | 51,969                            | 3,94%         | 0,3937        | -0,63%          | 52,158                            | 4,32%         | 0,4           | 0               | 51,940                            | 3,88%         |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 52,709                            | 5,42%         | 0,5004        | 0,04%           | 52,694                            | 5,39%         | 0,5           | 0               | 50,777                            | 1,55%         |
|                        | 0,6                                           | 0,5982        | -0,18%          | 53,304                            | 6,61%         | 0,6072        | 0,72%           | 53,212                            | 6,42%         | 0,6           | 0               | 50,752                            | 1,50%         |
|                        | 0,7                                           | 0,6966        | -0,34%          | 53,763                            | 7,53%         | 0,7129        | 1,29%           | 53,685                            | 7,37%         | 0,7           | 0               | 50,676                            | 1,35%         |
|                        | 0,8                                           | 0,7956        | -0,44%          | 54,085                            | 8,17%         | 0,8166        | 1,66%           | 54,081                            | 8,16%         | 0,8           | 0               | 50,056                            | 0,11%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8955        | -0,45%          | 54,307                            | 8,61%         | 0,9172        | 1,72%           | 54,378                            | 8,76%         | 0,9           | 0               | 50,382                            | 0,76%         |
|                        | 1                                             | 0,9964        | -0,36%          | 54,489                            | 8,98%         | 1,0135        | 1,35%           | 54,586                            | 9,17%         | 1             | 0               | 50,169                            | 0,34%         |

Πίνακας 6.37: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.47:

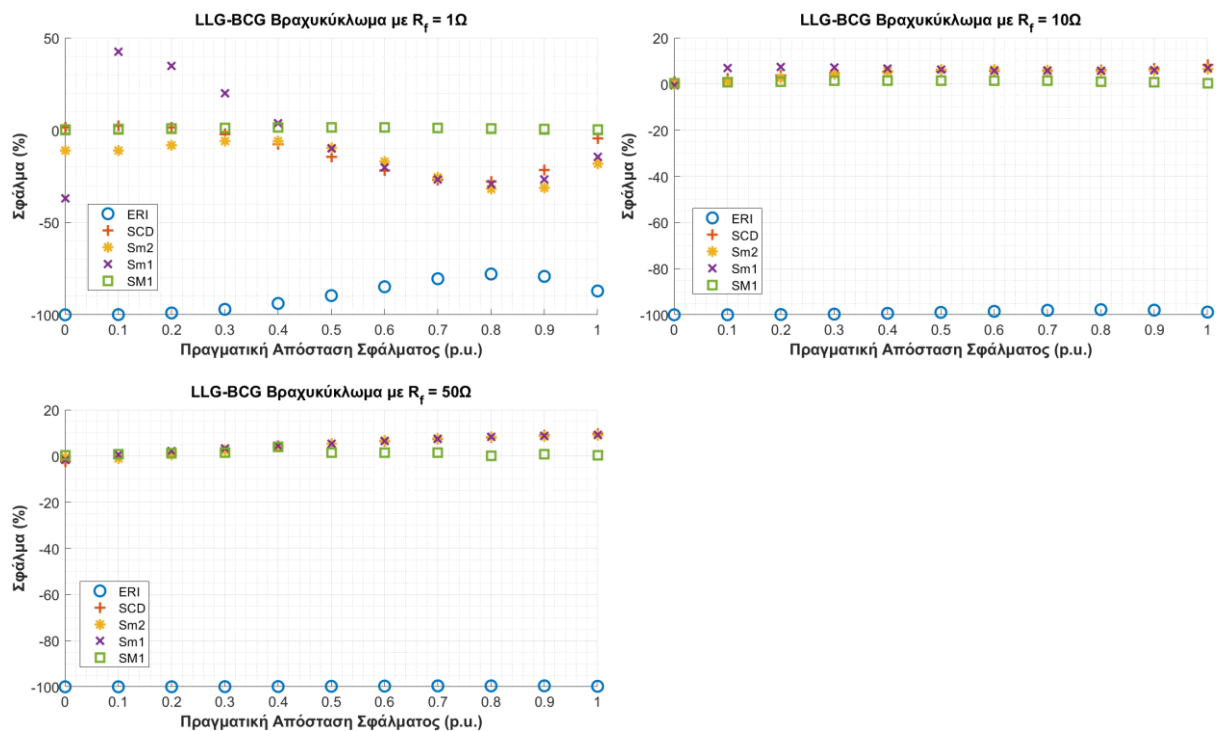




**Εικόνα 6.47:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους Sm2, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει την καλύτερη απόδοση με μηδενική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, βλέπουμε και εδώ ότι οι αποκλίσεις των Sm1 και Sm2 έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Τέλος, η Sm1 παρουσιάζει δυσανάλογα την μεγαλύτερη απόκλιση που όμως σε γενικές γραμμές διατηρείται εντός των ορίων του 2%. Συνεπώς, οι εν λόγω μέθοδοι έχουν αποδεκτή συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 6.48 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.48:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLG-BCG στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα η μέθοδος SM1 υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό, είναι της τάξης του 100% καθώς σε κάθε δοκιμή υπολογίζει σχεδόν μηδενική αντίσταση σφάλματος. Η Sm2, η Sm1 και SCD έχουν σημαντικό σφάλμα για  $R_f=1\Omega$ , αλλά με την αύξηση της αντίστασης η απόδοσή τους βελτιώνεται.

### 6.3.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στην περίπτωση του διφασικού βραχυκυκλώματος ως προς γη για κάθε μέθοδο και για όλες τις περιπτώσεις αναλύθηκαν και σχολιάστηκαν διεξοδικά στις Ενότητες 6.3.1 έως και 6.3.4. Συγκεντρωτικά, από τις προηγούμενες προσομοιώσεις και ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι SRM, TAK0, TAK2, MTAK0, MTAK2, WIS και ERI έχουν εξαιρετική συμπεριφορά στον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος στη περίπτωση της γραμμής μήκους 35km, σε κάθε περίπτωση φόρτισης και εμφανίζουν παρόμοιες αποκλίσεις. Στην περίπτωση της γραμμής 350km, σε δοκιμές για  $m > 0.8p.u.$ , ξεπερνούν τα όρια του 2%. Άρα, δεν είναι αποδεκτές για εφαρμογή σε γραμμές μεγάλου μήκους, αλλά ενδείκνυνται για εφαρμογή σε γραμμές μικρού μήκους. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι όλες οι παραπάνω μέθοδοι στην υλοποίησή τους χρησιμοποιούν το μοντέλο μικρού μήκους που αγνοεί τις εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής.
- Η ERI, εμφανίζει και σε αυτήν την περίπτωση έντονο και μόνιμο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι της τάξης του 80%-99%. Δεδομένου ότι αυτό είναι πρακτικά σταθερό, η εισαγωγή ενός διορθωτικού συντελεστή ίσως επιλύσει το πρόβλημα.
- Η SCD είναι αποδεκτή στην περίπτωση της γραμμής 35km, όμως για στην γραμμή 350km εμφανίζει σφάλμα που αγγίζει οριακά το 5%. Παρόλα αυτά, σχεδόν σε όλες τις δοκιμές υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος ικανοποιητικά.
- Η XU έχει τέλεια συμπεριφορά με μηδενική απόκλιση σε κάθε περίπτωση.
- Η Sm2 και Sm1 έχουν αποδεκτή συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις. Η Sm2 εμφανίζει μικρότερες αποκλίσεις από την Sm1 ως προς τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Ακόμα, σε όλες τις δοκιμές η Sm1 έχει μεγαλύτερο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Τα παραπάνω καταδεικνύουν και εδώ την ανωτερότητα την χρήσης μεγεθών αρνητικής ακολουθίας.
- Η SM1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις μεθόδους σε κάθε δοκιμή εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση στην εύρεση της θέσης του σφάλματος και αμελητέο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι υλοποιείται με τον μοντέλο μεγάλου μήκους που είναι ιδανικό για κάθε τύπο γραμμής.
- Η Sm2 παρότι υλοποιείται με το μοντέλο μικρού μήκους, έχει απόδοση που όχι μόνο είναι αποδεκτή αλλά είναι πολύ κοντά στην SM1.
- Οι περισσότεροι αλγόριθμοι εμφανίζουν λίγο βελτιωμένα αποτελέσματα στην περίπτωση που η γραμμή είναι φορτισμένη.
- Η απόδοση της SCD, παρότι χρησιμοποιεί συγχρονισμένες μετρήσεις, υπολείπεται των Sm2 και SM1. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιεί μόνο μετρήσεις ρεύματος για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, δηλαδή λιγότερες πληροφορίες, με αποτέλεσμα η ακρίβειά της να επηρεάζεται αρνητικά.
- Οι αποκλίσεις των Sm2 και Sm1 και εδώ μεταβάλλονται με αντίθετο ρυθμό στην περίπτωση της γραμμής 35km. Συνεπώς, για την εύρεση της θέσης του σφάλματος με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, θα μπορούσαμε να πάρουμε ως θέση σφάλματος τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων των Sm2 και Sm1. Στην συνέχεια, με γνωστή την νέα-διορθωμένη θέση του σφάλματος να υπολογίζουμε την αντίσταση αυτού.



## 6.4 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα LLL-ABC

### 6.4.1 Γραμμή μεταφοράς 35km χωρίς φορτίο

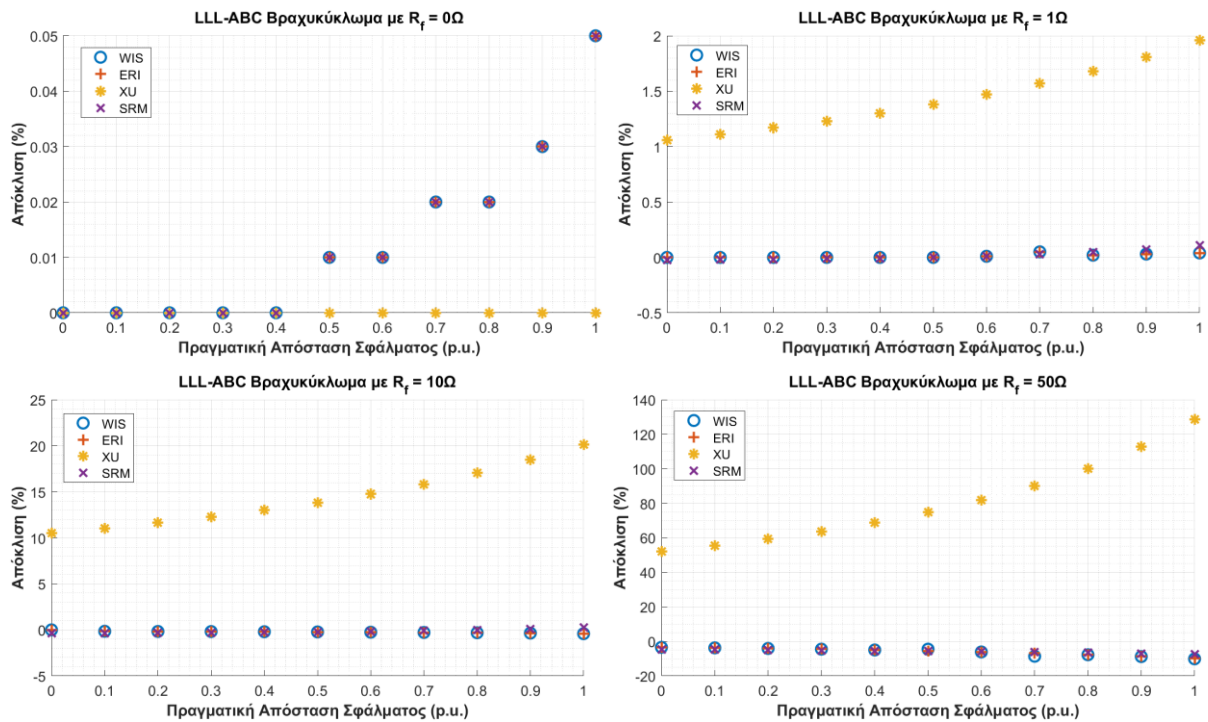
Στον Πίνακα 6.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, και XU.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,1000       | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,2000       | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,3000       | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,4000       | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,5000       | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,6000       | 0,00%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,7000       | 0,00%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,8000       | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,9000       | 0,00%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -             | 1,0000       | 0,00%           |
|                        | 0                                             | -0,0002       | -0,02%          | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,732                             | 73,20%        | 0,0106       | 1,06%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0998        | -0,02%          | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,732                             | 73,24%        | 0,1111       | 1,11%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1998        | -0,02%          | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 1,732                             | 73,24%        | 0,2117       | 1,17%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2999        | -0,01%          | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 1,733                             | 73,25%        | 0,3123       | 1,23%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3999        | -0,01%          | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 1,733                             | 73,26%        | 0,4130       | 1,30%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5000        | 0,00%           | 0,5000        | 0,00%           | 0,5000        | 0,00%           | 1,733                             | 73,27%        | 0,5138       | 1,38%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 1,733                             | 73,29%        | 0,6147       | 1,47%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7003        | 0,03%           | 0,7005        | 0,05%           | 0,7005        | 0,05%           | 1,733                             | 73,31%        | 0,7157       | 1,57%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8005        | 0,05%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 1,733                             | 73,33%        | 0,8168       | 1,68%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9007        | 0,07%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 1,734                             | 73,35%        | 0,9181       | 1,81%           |
|                        | 1                                             | 1,0011        | 0,11%           | 1,0004        | 0,04%           | 1,0004        | 0,04%           | 1,734                             | 73,37%        | 1,0196       | 1,96%           |
|                        | 0                                             | -0,0036       | -0,36%          | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 17,337                            | 73,37%        | 0,1052       | 10,52%          |
|                        | 0,1                                           | 0,0965        | -0,35%          | 0,0985        | -0,15%          | 0,0985        | -0,15%          | 17,337                            | 73,37%        | 0,2105       | 11,05%          |
|                        | 0,2                                           | 0,1967        | -0,33%          | 0,1983        | -0,17%          | 0,1983        | -0,17%          | 17,339                            | 73,39%        | 0,3164       | 11,64%          |
|                        | 0,3                                           | 0,2970        | -0,30%          | 0,2982        | -0,18%          | 0,2981        | -0,19%          | 17,342                            | 73,42%        | 0,4229       | 12,29%          |
|                        | 0,4                                           | 0,3973        | -0,27%          | 0,3980        | -0,20%          | 0,3980        | -0,20%          | 17,345                            | 73,45%        | 0,5302       | 13,02%          |
|                        | 0,5                                           | 0,4977        | -0,23%          | 0,4978        | -0,22%          | 0,4978        | -0,22%          | 17,350                            | 73,50%        | 0,6384       | 13,84%          |
|                        | 0,6                                           | 0,5983        | -0,17%          | 0,5975        | -0,25%          | 0,5975        | -0,25%          | 17,355                            | 73,55%        | 0,7476       | 14,76%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6990        | -0,10%          | 0,6972        | -0,28%          | 0,6972        | -0,28%          | 17,362                            | 73,62%        | 0,8582       | 15,82%          |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7999        | -0,01%          | 0,7969        | -0,31%          | 0,7969        | -0,31%          | 17,370                            | 73,70%        | 0,9704       | 17,04%          |
|                        | 0,9                                           | 0,9011        | 0,11%           | 0,8965        | -0,35%          | 0,8965        | -0,35%          | 17,380                            | 73,80%        | 1,0846       | 18,46%          |
|                        | 1                                             | 1,0026        | 0,26%           | 0,9959        | -0,41%          | 0,9961        | -0,39%          | 17,393                            | 73,93%        | 1,2012       | 20,12%          |
|                        | 0                                             | -0,0461       | -4,61%          | -0,0344       | -3,44%          | -0,0346       | -3,46%          | 87,893                            | 75,79%        | 0,5205       | 52,05%          |
|                        | 0,1                                           | 0,0521        | -4,79%          | 0,0625        | -3,75%          | 0,0624        | -3,76%          | 88,103                            | 76,21%        | 0,6546       | 55,46%          |
|                        | 0,2                                           | 0,1502        | -4,98%          | 0,1591        | -4,09%          | 0,1589        | -4,11%          | 88,314                            | 76,63%        | 0,7932       | 59,32%          |
|                        | 0,3                                           | 0,2480        | -5,20%          | 0,2551        | -4,49%          | 0,2549        | -4,51%          | 88,568                            | 77,14%        | 0,9374       | 63,74%          |
|                        | 0,4                                           | 0,3457        | -5,43%          | 0,3504        | -4,96%          | 0,3503        | -4,97%          | 88,877                            | 77,75%        | 1,0882       | 68,82%          |
|                        | 0,5                                           | 0,4431        | -5,69%          | 0,4551        | -4,49%          | 0,4450        | -5,50%          | 89,255                            | 78,51%        | 1,2475       | 74,75%          |
|                        | 0,6                                           | 0,5403        | -5,97%          | 0,5388        | -6,12%          | 0,5389        | -6,11%          | 89,720                            | 79,44%        | 1,4172       | 81,72%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6373        | -6,27%          | 0,6140        | -8,60%          | 0,6317        | -6,83%          | 90,298                            | 80,60%        | 1,6006       | 90,06%          |
|                        | 0,8                                           | 0,7339        | -6,61%          | 0,7226        | -7,74%          | 0,7232        | -7,68%          | 91,023                            | 82,05%        | 1,8020       | 100,20%         |
|                        | 0,9                                           | 0,8301        | -6,99%          | 0,8120        | -8,80%          | 0,8131        | -8,69%          | 91,945                            | 83,89%        | 2,0275       | 112,75%         |
|                        | 1                                             | 0,9258        | -7,42%          | 0,8990        | -10,10%         | 0,9010        | -9,90%          | 93,132                            | 86,26%        | 2,2870       | 128,70%         |

**Πίνακας 6.38:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU



Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.49:



**Εικόνα 6.49:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU

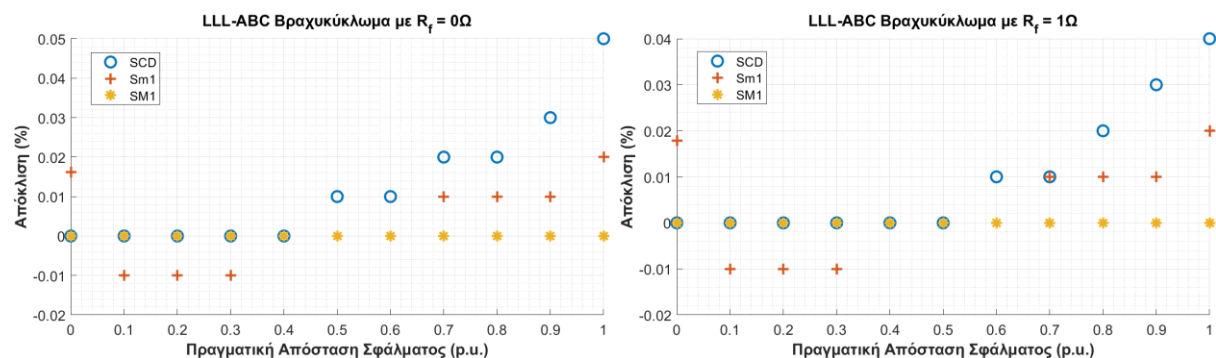
Οι μέθοδοι TAK0, TAK2, MTAK0 και MTAK2 δεν είναι εφαρμόσιμοι στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, διότι το σφάλμα είναι συμμετρικό και γι' αυτό τα μεγέθη της μηδενικής και της αρνητικής ακολουθίας είναι μηδενικά. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι SRM, WIS και ERI εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Αυτές διατηρούνται σε επιθυμητά επίπεδα με εξαίρεση για  $R_f=50\Omega$ , όπου και οι τρεις μέθοδοι υποεκτιμούν το σφάλμα, και οι αποκλίσεις τους είναι άνω του 2%. Η μέθοδος του XU χωρίς αντίσταση σφάλματος έχει τέλεια αποτελέσματα. Με αντίσταση, η αύξηση της απόστασης της θέσης του σφάλματος από τον ζυγό S, στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος, οδηγεί σε εκθετική αύξηση της απόκλισης στον XU. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται πιο έντονο και με μεγαλύτερες αποκλίσεις όσο η τιμή της αντίστασης σφάλματος αυξάνεται. Τέλος, με βάση τα προηγούμενα, καμία μέθοδος δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή.

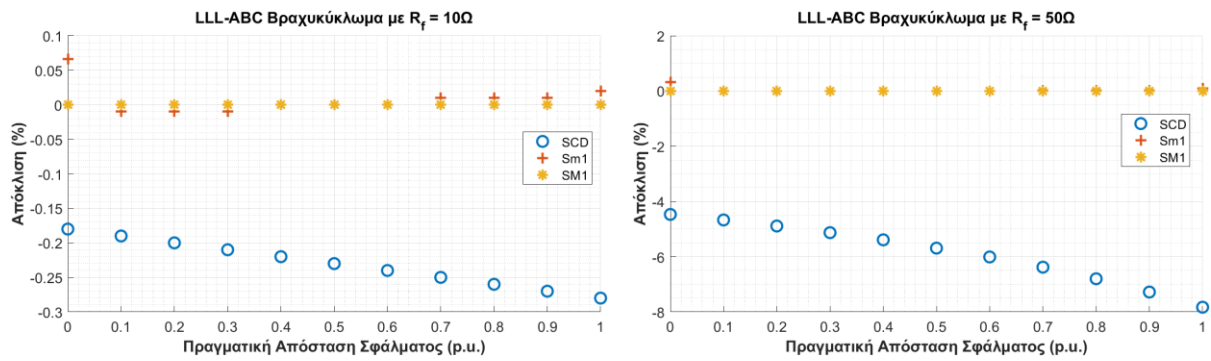
Στον Πίνακα 6.39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SCD, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | SCD (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SCD (Ω) | Σφάλμα (%) | Sm1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm1 (Ω) | Σφάλμα (%) | SM1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SM1 (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,1        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,1999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,2        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,2999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,3        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,5000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,5        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,6000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,6        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,7001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,7        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,8001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,8        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -          | 0,9001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,9        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -          | 1,0002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 1          | 0            | 0,000                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,0002     | 0,02%        | 1,000                       | 0,01%      | 0          | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,0999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,02%      | 0,1        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,1999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,02%      | 0,2        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,2999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,02%      | 0,3        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      | 0,4        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      | 0,5        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,04%      | 0,6000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,04%      | 0,6        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,7001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,06%      | 0,7001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,06%      | 0,7        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 1,001                       | 0,07%      | 0,8001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,07%      | 0,8        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 1,001                       | 0,09%      | 0,9001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,09%      | 0,9        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 1                                    | 1,0004     | 0,04%        | 1,001                       | 0,11%      | 1,0002     | 0,02%        | 1,001                       | 0,12%      | 1          | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
| Rf = 10Ω            | 0                                    | -0,0018    | -0,18%       | 10,003                      | 0,03%      | 0,0007     | 0,07%        | 10,002                      | 0,02%      | 0          | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,1                                  | 0,0981     | -0,19%       | 10,003                      | 0,03%      | 0,0999     | -0,01%       | 10,002                      | 0,02%      | 0,1        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,2                                  | 0,1980     | -0,20%       | 10,003                      | 0,03%      | 0,1999     | -0,01%       | 10,002                      | 0,02%      | 0,2        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,3                                  | 0,2979     | -0,21%       | 10,003                      | 0,03%      | 0,2999     | -0,01%       | 10,002                      | 0,02%      | 0,3        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,4                                  | 0,3978     | -0,22%       | 10,003                      | 0,03%      | 0,4000     | 0,00%        | 10,002                      | 0,02%      | 0,4        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,4977     | -0,23%       | 10,004                      | 0,04%      | 0,5000     | 0,00%        | 10,003                      | 0,03%      | 0,5        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,5976     | -0,24%       | 10,005                      | 0,05%      | 0,6000     | 0,00%        | 10,004                      | 0,04%      | 0,6        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,6975     | -0,25%       | 10,006                      | 0,06%      | 0,7001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      | 0,7        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,8                                  | 0,7974     | -0,26%       | 10,007                      | 0,07%      | 0,8001     | 0,01%        | 10,006                      | 0,06%      | 0,8        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,9                                  | 0,8973     | -0,27%       | 10,009                      | 0,09%      | 0,9001     | 0,01%        | 10,008                      | 0,08%      | 0,9        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 1                                    | 0,9972     | -0,28%       | 10,010                      | 0,10%      | 1,0002     | 0,02%        | 10,009                      | 0,09%      | 1          | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
| Rf = 50Ω            | 0                                    | -0,0447    | -4,47%       | 50,032                      | 0,06%      | 0,0032     | 0,32%        | 50,006                      | 0,01%      | 0          | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,1                                  | 0,0533     | -4,67%       | 50,031                      | 0,06%      | 0,0999     | -0,01%       | 50,007                      | 0,01%      | 0,1        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,2                                  | 0,1511     | -4,89%       | 50,031                      | 0,06%      | 0,1999     | -0,01%       | 50,007                      | 0,01%      | 0,2        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,3                                  | 0,2487     | -5,13%       | 50,032                      | 0,06%      | 0,2999     | -0,01%       | 50,008                      | 0,02%      | 0,3        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,4                                  | 0,3461     | -5,39%       | 50,034                      | 0,07%      | 0,4000     | 0,00%        | 50,010                      | 0,02%      | 0,4        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,4431     | -5,69%       | 50,037                      | 0,07%      | 0,5000     | 0,00%        | 50,013                      | 0,03%      | 0,5        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,5399     | -6,01%       | 50,041                      | 0,08%      | 0,6000     | 0,00%        | 50,017                      | 0,03%      | 0,6        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,6362     | -6,38%       | 50,047                      | 0,09%      | 0,7001     | 0,01%        | 50,022                      | 0,04%      | 0,7        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,8                                  | 0,7320     | -6,80%       | 50,053                      | 0,11%      | 0,8001     | 0,01%        | 50,053                      | 0,11%      | 0,8        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,9                                  | 0,8272     | -7,28%       | 50,006                      | 0,01%      | 0,9001     | 0,01%        | 50,035                      | 0,07%      | 0,9        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 1                                    | 0,9217     | -7,83%       | 50,068                      | 0,14%      | 1,0010     | 0,10%        | 50,044                      | 0,09%      | 1          | 0            | 49,997                      | -0,01%     |

Πίνακας 6.39: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.50:

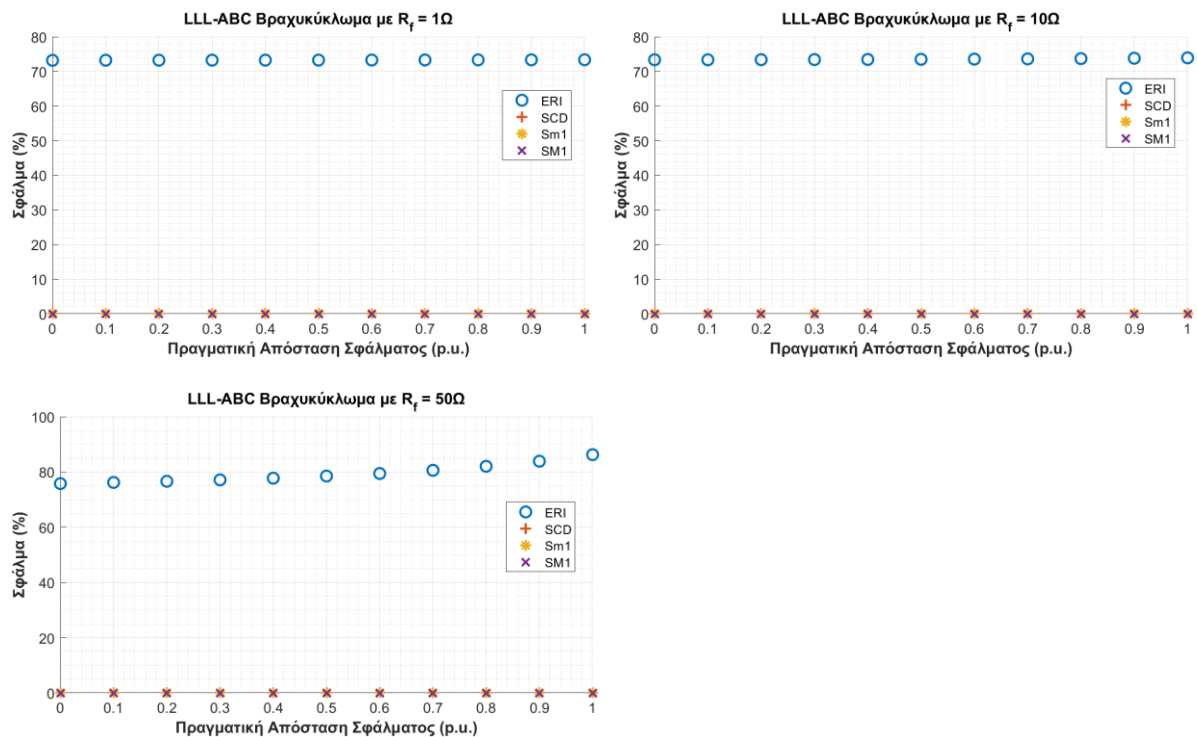




**Εικόνα 6.50:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η Sm1 και SM1 έχουν τέλεια συμπεριφορά με ουσιαστικά αμελητέα απόκλιση. Η απόκλιση της SCD είναι αρχικά ικανοποιητική για μικρές τιμές της αντίστασης σφάλματος. Παρόλα αυτά, για  $R_f=10\Omega$  σταδιακά αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης του σφάλματος, αλλά παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα ( $<2\%$ ). Όμως, για  $R_f=50\Omega$  ξεπερνά αυτά τα όρια. Συνεπώς, μόνο οι SM1 και Sm1 γίνονται αποδεκτές.

Στην Εικόνα 6.51 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.51:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα οι SM1, Sm1 και SCD υπολογίζουν την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος που κυμαίνεται μεταξύ 70% και 90%.

## 6.4.2 Γραμμή μεταφοράς 35km με φορτίο

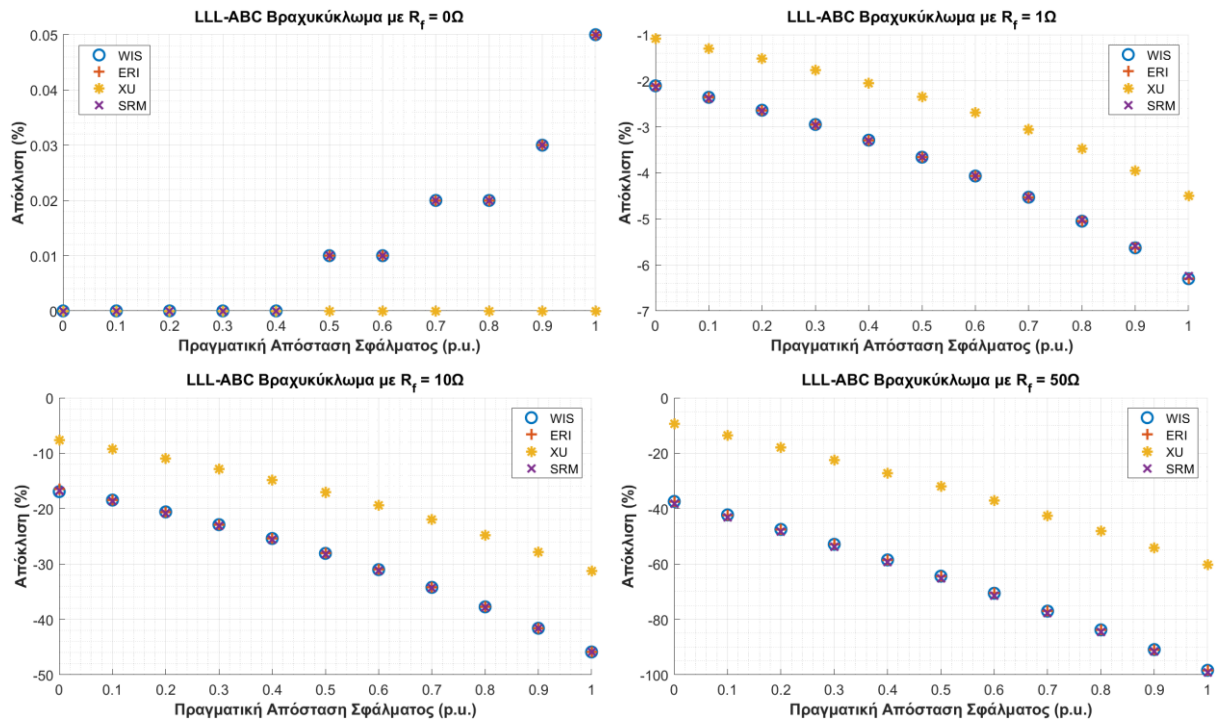
Στον Πίνακα 6.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, και XU.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,1000       | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,2000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,2000       | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,3000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,3000       | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,4000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,4000       | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,5001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,5000       | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,6001        | 0,01%           | 0,000                             | -             | 0,6000       | 0,00%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,7002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,7000       | 0,00%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,8002        | 0,02%           | 0,000                             | -             | 0,8000       | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,9003        | 0,03%           | 0,000                             | -             | 0,9000       | 0,00%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 1,0005        | 0,05%           | 0,000                             | -             | 1,0000       | 0,00%           |
|                        | 0                                             | -0,0213       | -2,13%          | -0,0211       | -2,11%          | -0,0211       | -2,11%          | 1,681                             | 68,08%        | -0,0108      | -1,08%          |
|                        | 0,1                                           | 0,0762        | -2,38%          | 0,0764        | -2,36%          | 0,0764        | -2,36%          | 1,680                             | 67,95%        | 0,0870       | -1,30%          |
|                        | 0,2                                           | 0,1734        | -2,66%          | 0,1736        | -2,64%          | 0,1735        | -2,65%          | 1,679                             | 67,86%        | 0,1848       | -1,52%          |
|                        | 0,3                                           | 0,2704        | -2,96%          | 0,2705        | -2,95%          | 0,2705        | -2,95%          | 1,678                             | 67,82%        | 0,2823       | -1,77%          |
|                        | 0,4                                           | 0,3670        | -3,30%          | 0,3671        | -3,29%          | 0,3671        | -3,29%          | 1,678                             | 67,82%        | 0,3795       | -2,05%          |
|                        | 0,5                                           | 0,4634        | -3,66%          | 0,4634        | -3,66%          | 0,4634        | -3,66%          | 1,679                             | 67,90%        | 0,4765       | -2,35%          |
|                        | 0,6                                           | 0,5593        | -4,07%          | 0,5593        | -4,07%          | 0,5593        | -4,07%          | 1,681                             | 68,05%        | 0,5731       | -2,69%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6548        | -4,52%          | 0,6547        | -4,53%          | 0,6547        | -4,53%          | 1,683                             | 68,30%        | 0,6694       | -3,06%          |
|                        | 0,8                                           | 0,7498        | -5,02%          | 0,7495        | -5,05%          | 0,7495        | -5,05%          | 1,687                             | 68,68%        | 0,7652       | -3,48%          |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,8441        | -5,59%          | 0,8437        | -5,63%          | 0,8437        | -5,63%          | 1,622                             | 62,20%        | 0,8604       | -3,96%          |
|                        | 1                                             | 0,9376        | -6,24%          | 0,9370        | -6,30%          | 0,9370        | -6,30%          | 1,700                             | 69,98%        | 0,9550       | -4,50%          |
|                        | 0                                             | -0,1670       | -16,70%         | -0,1693       | -16,93%         | -0,1648       | -16,48%         | 15,589                            | 55,89%        | -0,0760      | -7,60%          |
|                        | 0,1                                           | -0,0868       | -18,68%         | -0,0846       | -18,46%         | -0,0846       | -18,46%         | 15,645                            | 56,45%        | 0,0078       | -9,22%          |
|                        | 0,2                                           | -0,0080       | -20,80%         | -0,0060       | -20,60%         | -0,0060       | -20,60%         | 15,717                            | 57,17%        | 0,0904       | -10,96%         |
|                        | 0,3                                           | 0,0692        | -23,08%         | 0,0710        | -22,90%         | 0,0710        | -22,90%         | 15,808                            | 58,08%        | 0,1717       | -12,83%         |
|                        | 0,4                                           | 0,1445        | -25,55%         | 0,1461        | -25,39%         | 0,1461        | -25,39%         | 15,923                            | 59,23%        | 0,2515       | -14,85%         |
|                        | 0,5                                           | 0,2178        | -28,22%         | 0,2192        | -28,08%         | 0,2192        | -28,08%         | 16,067                            | 60,67%        | 0,3297       | -17,03%         |
|                        | 0,6                                           | 0,2887        | -31,13%         | 0,2898        | -31,02%         | 0,2898        | -31,02%         | 16,245                            | 62,45%        | 0,4060       | -19,40%         |
|                        | 0,7                                           | 0,3569        | -34,31%         | 0,3578        | -34,22%         | 0,3578        | -34,22%         | 16,466                            | 64,66%        | 0,4802       | -21,98%         |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,4222        | -37,78%         | 0,4226        | -37,74%         | 0,4226        | -37,74%         | 16,738                            | 67,38%        | 0,5520       | -24,80%         |
|                        | 0,9                                           | 0,4839        | -41,61%         | 0,4840        | -41,60%         | 0,4840        | -41,60%         | 17,076                            | 70,76%        | 0,6211       | -27,89%         |
|                        | 1                                             | 0,5415        | -45,85%         | 0,5412        | -45,88%         | 0,5412        | -45,88%         | 17,494                            | 74,94%        | 0,6870       | -31,30%         |
|                        | 0                                             | -0,3831       | -38,31%         | -0,3742       | -37,42%         | -0,3743       | -37,43%         | 54,773                            | 9,55%         | -0,0947      | -9,47%          |
|                        | 0,1                                           | -0,3324       | -43,24%         | -0,3226       | -42,26%         | -0,3237       | -42,37%         | 54,296                            | 8,59%         | -0,0362      | -13,62%         |
|                        | 0,2                                           | -0,2837       | -48,37%         | -0,2751       | -47,51%         | -0,2752       | -47,52%         | 54,574                            | 9,15%         | 0,0206       | -17,94%         |
|                        | 0,3                                           | -0,2374       | -53,74%         | -0,2289       | -52,89%         | -0,2290       | -52,90%         | 54,919                            | 9,84%         | 0,0755       | -22,45%         |
|                        | 0,4                                           | -0,1934       | -59,34%         | -0,1852       | -58,52%         | -0,1852       | -58,52%         | 55,340                            | 10,68%        | 0,1285       | -27,15%         |
|                        | 0,5                                           | -0,1521       | -65,21%         | -0,1440       | -64,40%         | -0,1441       | -64,41%         | 55,845                            | 11,69%        | 0,1794       | -32,06%         |
|                        | 0,6                                           | -0,1135       | -71,35%         | -0,1056       | -70,56%         | -0,1057       | -70,57%         | 56,446                            | 12,89%        | 0,2281       | -37,19%         |
| Rf = 50Ω               | 0,7                                           | -0,0779       | -77,79%         | -0,0701       | -77,01%         | -0,0702       | -77,02%         | 57,155                            | 14,31%        | 0,2744       | -42,56%         |
|                        | 0,8                                           | -0,0455       | -84,55%         | -0,0378       | -83,78%         | -0,0379       | -83,79%         | 57,986                            | 15,97%        | 0,3181       | -48,19%         |
|                        | 0,9                                           | -0,0165       | -91,65%         | -0,0089       | -90,89%         | -0,0090       | -90,90%         | 58,966                            | 17,93%        | 0,3591       | -54,09%         |
|                        | 1                                             | 0,0088        | -99,12%         | 0,0163        | -98,37%         | 0,0162        | -98,38%         | 60,083                            | 20,17%        | 0,3972       | -60,28%         |

**Πίνακας 6.40:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU



Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.52:



**Εικόνα 6.52:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU

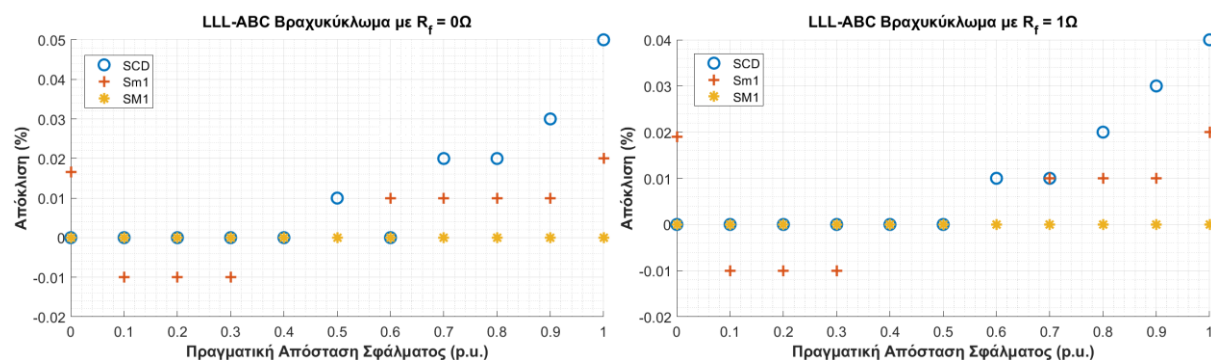
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι SRM, WIS και ERI εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Αυτές διατηρούνται σε επιθυμητά επίπεδα όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος. Με την αύξηση της αντίστασης οι τρεις μέθοδοι υποεκτιμούν το σφάλμα και η απόκλισή τους αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης σφάλματος ηλεκτρονόμου. Η μέθοδος του XU χωρίς αντίσταση σφάλματος έχει τέλεια αποτελέσματα. Η αύξηση της αντίστασης και της απόστασης του σφάλματος οδηγούν σε εκθετική αύξηση της απόκλισης της XU. Τέλος, το φαινόμενο αυτό φαίνεται πιο έντονο όσο η τιμή της αντίστασης αυξάνεται, αλλά τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι σημαντικά καλύτερα σε κάθε περίπτωση. Επομένως, καμία μέθοδος δεν είναι αποδεκτή.

Στον Πίνακα 6.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 35km με φορτίο, για τις μεθόδους SCD, Sm1 και SM1.

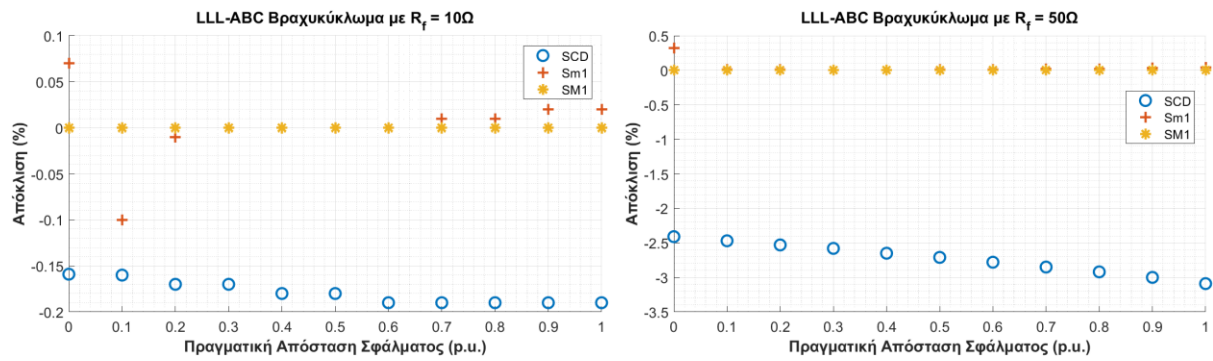
| Αντίσταση Σφάλματος | Πραγματική Απόσταση Σφάλματος (p.u.) | SCD (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SCD (Ω) | Σφάλμα (%) | Sm1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος Sm1 (Ω) | Σφάλμα (%) | SM1 (p.u.) | Απόκλιση (%) | Αντίσταση Σφάλματος SM1 (Ω) | Σφάλμα (%) |
|---------------------|--------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|------------|
| Rf = 0Ω             | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,0999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,1        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,1999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,2        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,2999     | -0,01%       | 0,000                       | -          | 0,3        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,4        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,5                                  | 0,5001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,5000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,5        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,6                                  | 0,6000     | 0,00%        | 0,000                       | -          | 0,6001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,6        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,7                                  | 0,7002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,7001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,7        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 0,8001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,8        | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 0,000                       | -          | 0,9001     | 0,01%        | 0,000                       | -          | 0,9        | 0            | 0,000                       | -          |
| Rf = 1Ω             | 1                                    | 1,0005     | 0,05%        | 0,000                       | -          | 1,0002     | 0,02%        | 0,000                       | -          | 1          | 0            | 0,000                       | -          |
|                     | 0                                    | 0,0000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,00%      | 0,0002     | 0,02%        | 1,000                       | 0,03%      | 0          | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,1                                  | 0,1000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      | 0,0999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,01%      | 0,1        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,2                                  | 0,2000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,01%      | 0,1999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,01%      | 0,2        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,3                                  | 0,3000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,2999     | -0,01%       | 1,000                       | 0,01%      | 0,3        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,4                                  | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,4000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,02%      | 0,4        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      | 0,5000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,03%      | 0,5        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,6001     | 0,01%        | 1,000                       | 0,04%      | 0,6000     | 0,00%        | 1,000                       | 0,04%      | 0,6        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,7001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,05%      | 0,7001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,05%      | 0,7        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0,8                                  | 0,8002     | 0,02%        | 1,001                       | 0,07%      | 0,8001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,06%      | 0,8        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
| Rf = 10Ω            | 0,9                                  | 0,9003     | 0,03%        | 1,001                       | 0,08%      | 0,9001     | 0,01%        | 1,001                       | 0,07%      | 0,9        | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 1                                    | 1,0004     | 0,04%        | 1,001                       | 0,10%      | 1,0002     | 0,02%        | 1,001                       | 0,08%      | 1          | 0            | 1,000                       | -0,01%     |
|                     | 0                                    | -0,0016    | -0,16%       | 10,000                      | 0,00%      | 0,0007     | 0,07%        | 10,002                      | 0,02%      | 0          | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,1                                  | 0,0984     | -0,16%       | 10,000                      | 0,00%      | 0,0990     | -0,10%       | 10,001                      | 0,01%      | 0,1        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,2                                  | 0,1983     | -0,17%       | 10,000                      | 0,00%      | 0,1999     | -0,01%       | 10,001                      | 0,01%      | 0,2        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,3                                  | 0,2983     | -0,17%       | 10,000                      | 0,00%      | 0,3000     | 0,00%        | 10,002                      | 0,02%      | 0,3        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,4                                  | 0,3982     | -0,18%       | 10,001                      | 0,01%      | 0,4000     | 0,00%        | 10,002                      | 0,02%      | 0,4        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,4982     | -0,18%       | 10,001                      | 0,01%      | 0,5000     | 0,00%        | 10,003                      | 0,03%      | 0,5        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,5981     | -0,19%       | 10,002                      | 0,02%      | 0,6000     | 0,00%        | 10,004                      | 0,04%      | 0,6        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,6981     | -0,19%       | 10,003                      | 0,03%      | 0,7001     | 0,01%        | 10,005                      | 0,05%      | 0,7        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
| Rf = 50Ω            | 0,8                                  | 0,7981     | -0,19%       | 10,005                      | 0,05%      | 0,8001     | 0,01%        | 10,007                      | 0,07%      | 0,8        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0,9                                  | 0,8981     | -0,19%       | 10,006                      | 0,06%      | 0,9002     | 0,02%        | 10,008                      | 0,08%      | 0,9        | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 1                                    | 0,9981     | -0,19%       | 10,008                      | 0,08%      | 1,0002     | 0,02%        | 10,010                      | 0,10%      | 1          | 0            | 9,999                       | -0,01%     |
|                     | 0                                    | -0,0241    | -2,41%       | 49,983                      | -0,03%     | 0,0032     | 0,32%        | 49,989                      | -0,02%     | 0          | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,1                                  | 0,0753     | -2,47%       | 49,982                      | -0,04%     | 0,1001     | 0,01%        | 49,991                      | -0,02%     | 0,1        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,2                                  | 0,1747     | -2,53%       | 49,983                      | -0,03%     | 0,2001     | 0,01%        | 49,995                      | -0,01%     | 0,2        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,3                                  | 0,2742     | -2,58%       | 49,984                      | -0,03%     | 0,3000     | 0,00%        | 50,000                      | 0,00%      | 0,3        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,4                                  | 0,3735     | -2,65%       | 49,987                      | -0,03%     | 0,4000     | 0,00%        | 50,006                      | 0,01%      | 0,4        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,5                                  | 0,4729     | -2,71%       | 49,991                      | -0,02%     | 0,5001     | 0,01%        | 50,013                      | 0,03%      | 0,5        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,6                                  | 0,5722     | -2,78%       | 49,996                      | -0,01%     | 0,6001     | 0,01%        | 50,021                      | 0,04%      | 0,6        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,7                                  | 0,6715     | -2,85%       | 50,001                      | 0,00%      | 0,7002     | 0,02%        | 50,030                      | 0,06%      | 0,7        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,8                                  | 0,7708     | -2,92%       | 50,008                      | 0,02%      | 0,8002     | 0,02%        | 50,040                      | 0,08%      | 0,8        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 0,9                                  | 0,8700     | -3,00%       | 50,016                      | 0,03%      | 0,9003     | 0,03%        | 50,051                      | 0,10%      | 0,9        | 0            | 49,997                      | -0,01%     |
|                     | 1                                    | 0,9691     | -3,09%       | 50,025                      | 0,05%      | 1,0004     | 0,04%        | 50,063                      | 0,13%      | 1          | 0            | 49,997                      | -0,01%     |

Πίνακας 6.41: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.53:



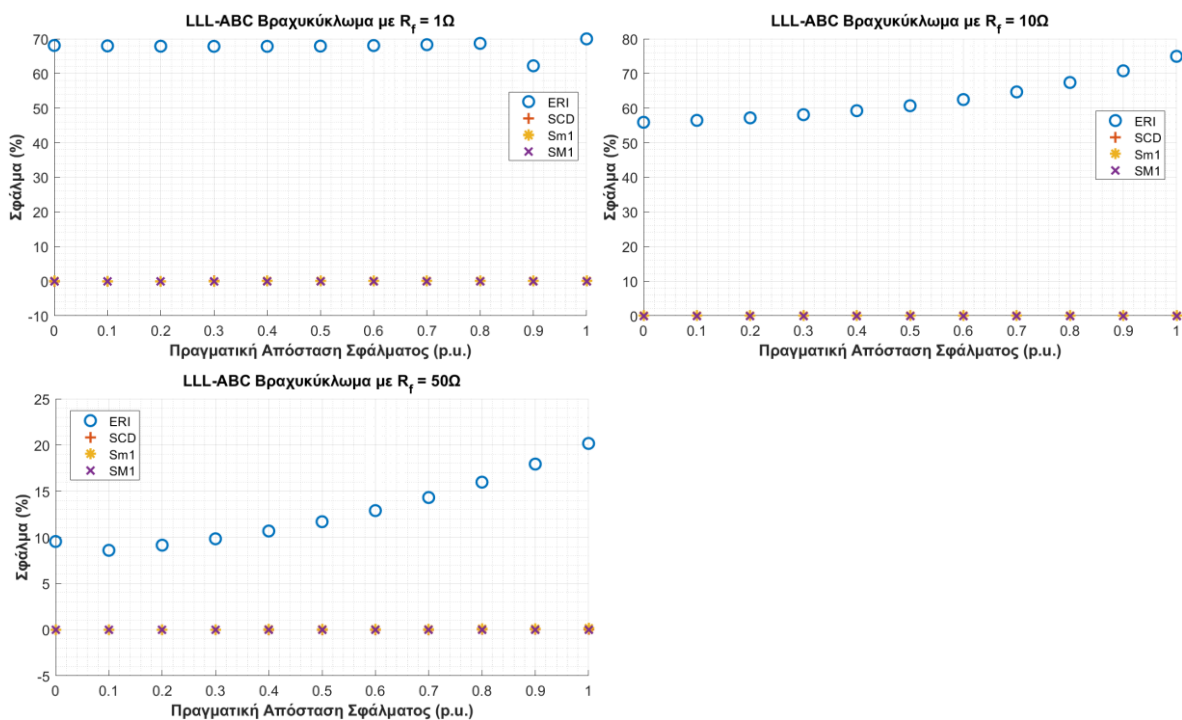




**Εικόνα 6.53:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η Sm1 και SM1 έχουν τέλεια συμπεριφορά με ουσιαστικά αμελητέα απόκλιση. Η απόκλιση της SCD είναι αρχικά ικανοποιητική για μικρές τιμές της αντίστασης σφάλματος. Παρόλα αυτά για  $R_f=10\Omega$  σταδιακά αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης του σφάλματος, αλλά παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα ( $<2\%$ ). Όμως, για  $R_f=50\Omega$  ξεπερνά αυτά τα όρια. Συνεπώς, μόνο οι SM1 και Sm1 γίνονται αποδεκτές.

Στην Εικόνα 6.54 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.54:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 35km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα οι SM1, Sm1 και SCD υπολογίζουν την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος που κυμαίνεται μεταξύ 7% και 80%.

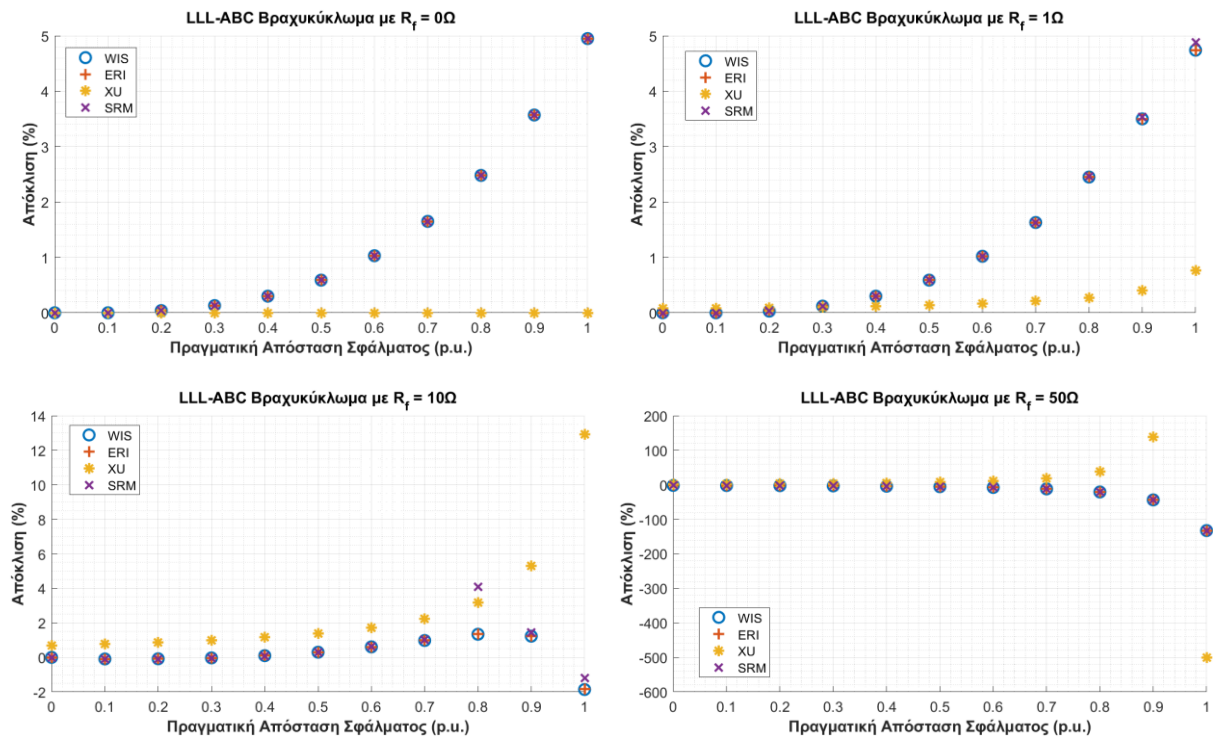
### 6.4.3 Γραμμή μεταφοράς 350km χωρίς φορτίο

Στον Πίνακα 6.42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI και XU.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,1000       | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,004                             | -             | 0,2000       | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,013                             | -             | 0,3000       | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,027                             | -             | 0,4000       | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,045                             | -             | 0,5000       | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,066                             | -             | 0,6000       | 0,00%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,085                             | -             | 0,7000       | 0,00%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,095                             | -             | 0,8000       | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,089                             | -             | 0,9000       | 0,00%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0495        | 4,95%           | 1,0495        | 4,95%           | 0,053                             | -             | 1,0000       | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,739                             | 73,89%        | 0,0008       | 0,08%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 1,743                             | 74,29%        | 0,1008       | 0,08%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 0,2003        | 0,03%           | 0,2004        | 0,04%           | 1,754                             | 75,39%        | 0,2009       | 0,09%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3012        | 0,12%           | 0,3012        | 0,12%           | 0,3012        | 0,12%           | 1,772                             | 77,18%        | 0,3010       | 0,10%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 1,796                             | 79,61%        | 0,4012       | 0,12%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 1,824                             | 82,38%        | 0,5014       | 0,14%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6102        | 1,02%           | 0,6102        | 1,02%           | 0,6102        | 1,02%           | 1,849                             | 84,89%        | 0,6017       | 0,17%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7163        | 1,63%           | 0,7163        | 1,63%           | 0,7163        | 1,63%           | 1,860                             | 85,97%        | 0,7021       | 0,21%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8246        | 2,46%           | 0,8245        | 2,45%           | 0,8245        | 2,45%           | 1,833                             | 83,32%        | 0,8027       | 0,27%           |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9353        | 3,53%           | 0,9350        | 3,50%           | 0,9350        | 3,50%           | 1,715                             | 71,46%        | 0,9040       | 0,40%           |
|                        | 1                                             | 1,0488        | 4,88%           | 1,0474        | 4,74%           | 1,0474        | 4,74%           | 1,319                             | 31,88%        | 1,0076       | 0,76%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 17,429                            | 74,29%        | 0,0069       | 0,69%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0990        | -0,10%          | 0,0991        | -0,09%          | 0,0991        | -0,09%          | 17,447                            | 74,47%        | 0,1077       | 0,77%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1991        | -0,09%          | 0,1992        | -0,08%          | 0,1992        | -0,08%          | 17,531                            | 75,31%        | 0,2087       | 0,87%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2997        | -0,03%          | 0,2997        | -0,03%          | 0,2997        | -0,03%          | 17,645                            | 76,45%        | 0,3099       | 0,99%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4009        | 0,09%           | 0,4010        | 0,10%           | 0,4010        | 0,10%           | 17,781                            | 77,81%        | 0,4116       | 1,16%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5030        | 0,30%           | 0,5030        | 0,30%           | 0,5030        | 0,30%           | 17,924                            | 79,24%        | 0,5138       | 1,38%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6062        | 0,62%           | 0,6061        | 0,61%           | 0,6061        | 0,61%           | 18,050                            | 80,50%        | 0,6172       | 1,72%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7101        | 1,01%           | 0,7098        | 0,98%           | 0,7098        | 0,98%           | 18,125                            | 81,25%        | 0,7224       | 2,24%           |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,8410        | 4,10%           | 0,8134        | 1,34%           | 0,8134        | 1,34%           | 18,118                            | 81,18%        | 0,8319       | 3,19%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9144        | 1,44%           | 0,9123        | 1,23%           | 0,9123        | 1,23%           | 18,224                            | 82,24%        | 0,9531       | 5,31%           |
|                        | 1                                             | 0,9881        | -1,19%          | 0,9814        | -1,86%          | 0,9817        | -1,83%          | 22,279                            | 122,79%       | 1,1291       | 12,91%          |
|                        | 0                                             | -0,0186       | -1,86%          | -0,0181       | -1,81%          | -0,0181       | -1,81%          | 88,795                            | 77,59%        | 0,0204       | 2,04%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0777        | -2,23%          | 0,0782        | -2,18%          | 0,0782        | -2,18%          | 89,074                            | 78,15%        | 0,1251       | 2,51%           |
|                        | 0,2                                           | 0,1729        | -2,71%          | 0,1734        | -2,66%          | 0,1733        | -2,67%          | 90,133                            | 80,27%        | 0,2341       | 3,41%           |
|                        | 0,3                                           | 0,2665        | -3,35%          | 0,2669        | -3,31%          | 0,2669        | -3,31%          | 91,699                            | 83,40%        | 0,3404       | 4,04%           |
|                        | 0,4                                           | 0,3557        | -4,43%          | 0,3580        | -4,20%          | 0,3580        | -4,20%          | 94,035                            | 88,07%        | 0,4537       | 5,37%           |
|                        | 0,5                                           | 0,4442        | -5,58%          | 0,4444        | -5,56%          | 0,4444        | -5,56%          | 97,727                            | 95,45%        | 0,5747       | 7,47%           |
|                        | 0,6                                           | 0,5219        | -7,81%          | 0,5219        | -7,81%          | 0,5219        | -7,81%          | 104,205                           | 108,41%       | 0,7111       | 11,11%          |
|                        | 0,7                                           | 0,5806        | -11,94%         | 0,5802        | -11,98%         | 0,5802        | -11,98%         | 107,479                           | 114,96%       | 0,8840       | 18,40%          |
|                        | 0,8                                           | 0,5926        | -20,74%         | 0,5919        | -20,81%         | 0,5919        | -20,81%         | 151,231                           | 202,46%       | 1,1781       | 37,81%          |
|                        | 0,9                                           | 0,4620        | -43,80%         | 0,4623        | -43,77%         | 0,4623        | -43,77%         | 269,012                           | 438,02%       | 2,2880       | 138,80%         |
|                        | 1                                             | -0,3269       | -132,69%        | -0,3269       | -132,69%        | -0,3269       | -132,69%        | 984,199                           | 1868,40%      | -4,0118      | -501,18%        |

**Πίνακας 6.42:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.55:



**Εικόνα 6.55:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU

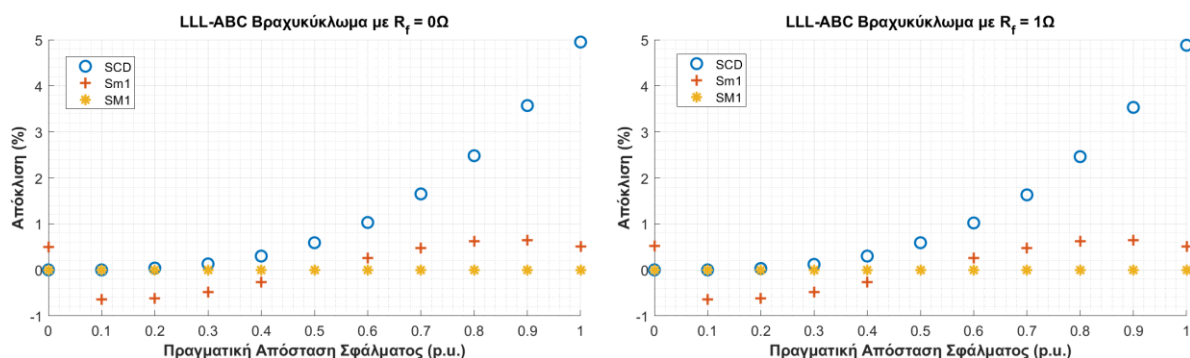
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι SRM, WIS και ERI εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Με την αύξηση της αντίστασης οι τρεις μέθοδοι υπερεκτιμούν το σφάλμα και η απόκλισή τους αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ σφάλματος και ηλεκτρονόμου. Η μέθοδος του XU χωρίς αντίσταση σφάλματος έχει τέλεια αποτελέσματα. Η αύξηση της αντίστασης και της απόστασης του σφάλματος οδηγούν σε εκθετική αύξηση της απόκλισης της XU. Τέλος, το φαινόμενο αυτό φαίνεται πιο έντονο όσο η τιμή της αντίστασης αυξάνεται. Επομένως, καμία μέθοδος δεν είναι αποδεκτή.

Στον Πίνακα 6.43 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km χωρίς φορτίο, για τις μεθόδους SCD, Sm1 και SM1.

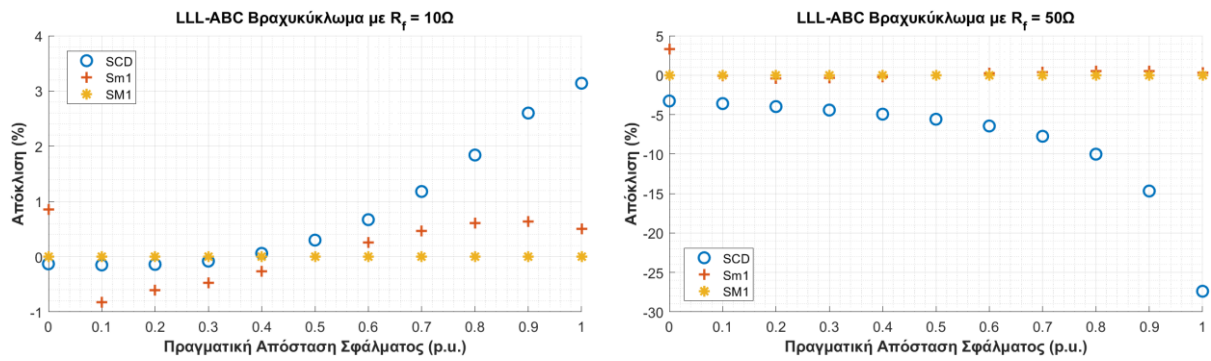
| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0050        | 0,50%           | 0,039                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0936        | -0,64%          | 0,046                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,002                             | -             | 0,1938        | -0,62%          | 0,044                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,007                             | -             | 0,2952        | -0,48%          | 0,042                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,016                             | -             | 0,3974        | -0,26%          | 0,044                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,026                             | -             | 0,5000        | 0,00%           | 0,052                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,039                             | -             | 0,6026        | 0,26%           | 0,067                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,050                             | -             | 0,7048        | 0,48%           | 0,085                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,058                             | -             | 0,8062        | 0,62%           | 0,100                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,059                             | -             | 0,9064        | 0,64%           | 0,105                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 1,008                             | 0,77%         | 0,0052        | 0,52%           | 0,967                             | -3,26%        | 0             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 1,013                             | 1,25%         | 0,0936        | -0,64%          | 1,058                             | 5,82%         | 0,1           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 1,020                             | 1,97%         | 0,1938        | -0,62%          | 1,062                             | 6,16%         | 0,2           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3012        | 0,12%           | 1,030                             | 3,03%         | 0,2952        | -0,48%          | 1,065                             | 6,47%         | 0,3           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 1,045                             | 4,48%         | 0,3974        | -0,26%          | 1,073                             | 7,27%         | 0,4           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 1,063                             | 6,27%         | 0,5000        | 0,00%           | 1,088                             | 8,80%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6102        | 1,02%           | 1,083                             | 8,28%         | 0,6026        | 0,26%           | 1,110                             | 11,03%        | 0,6           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7163        | 1,63%           | 1,103                             | 10,31%        | 0,7048        | 0,48%           | 1,137                             | 13,67%        | 0,7           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8246        | 2,46%           | 1,121                             | 12,06%        | 0,8062        | 0,62%           | 1,161                             | 16,14%        | 0,8           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9353        | 3,53%           | 1,131                             | 13,14%        | 0,9064        | 0,64%           | 1,176                             | 17,58%        | 0,9           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | -0,0013       | -0,13%          | 10,085                            | 0,85%         | 0,0085        | 0,85%           | 10,003                            | 0,03%         | 0             | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,0985        | -0,15%          | 10,130                            | 1,30%         | 0,0918        | -0,82%          | 10,165                            | 1,65%         | 0,1           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,1986        | -0,14%          | 10,183                            | 1,83%         | 0,1939        | -0,61%          | 10,214                            | 2,14%         | 0,2           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,2992        | -0,08%          | 10,244                            | 2,44%         | 0,2953        | -0,47%          | 10,268                            | 2,68%         | 0,3           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4006        | 0,06%           | 10,316                            | 3,16%         | 0,3974        | -0,26%          | 10,332                            | 3,32%         | 0,4           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5030        | 0,30%           | 10,397                            | 3,97%         | 0,5000        | 0,00%           | 10,410                            | 4,10%         | 0,5           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6067        | 0,67%           | 10,487                            | 4,87%         | 0,6026        | 0,26%           | 10,502                            | 5,02%         | 0,6           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7118        | 1,18%           | 10,584                            | 5,84%         | 0,7047        | 0,47%           | 10,604                            | 6,04%         | 0,7           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8184        | 1,84%           | 10,686                            | 6,86%         | 0,8061        | 0,61%           | 10,709                            | 7,09%         | 0,8           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9260        | 2,60%           | 10,787                            | 7,87%         | 0,9064        | 0,64%           | 10,809                            | 8,09%         | 0,9           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | -0,0327       | -3,27%          | 50,508                            | 1,02%         | 0,0330        | 3,30%           | 49,816                            | -0,37%        | 0             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,0640        | -3,60%          | 50,722                            | 1,44%         | 0,0990        | -0,10%          | 50,396                            | 0,79%         | 0,1           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,1602        | -3,98%          | 50,964                            | 1,93%         | 0,1962        | -0,38%          | 50,672                            | 1,34%         | 0,2           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,2558        | -4,42%          | 51,237                            | 2,47%         | 0,2964        | -0,36%          | 50,958                            | -58,08%       | 0,3           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,3506        | -4,94%          | 51,540                            | 3,08%         | 0,3979        | -0,21%          | 51,275                            | 2,55%         | 0,4           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,4442        | -5,58%          | 51,873                            | 3,75%         | 0,5000        | 0,00%           | 51,632                            | 3,26%         | 0,5           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5356        | -6,44%          | 52,231                            | 4,46%         | 0,6022        | 0,22%           | 52,028                            | 4,06%         | 0,6           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6226        | -7,74%          | 52,606                            | 5,21%         | 0,7040        | 0,40%           | 52,460                            | 4,92%         | 0,7           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,6999        | -10,01%         | 52,976                            | 5,95%         | 0,8051        | 0,51%           | 52,919                            | 5,84%         | 0,8           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,7532        | -14,68%         | 53,287                            | 6,57%         | 0,9051        | 0,51%           | 53,392                            | 6,78%         | 0,9           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 1                                             | 0,7262        | -27,38%         | 53,336                            | 6,67%         | 1,0034        | 0,34%           | 53,862                            | 7,72%         | 1             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |

Πίνακας 6.43: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.56:



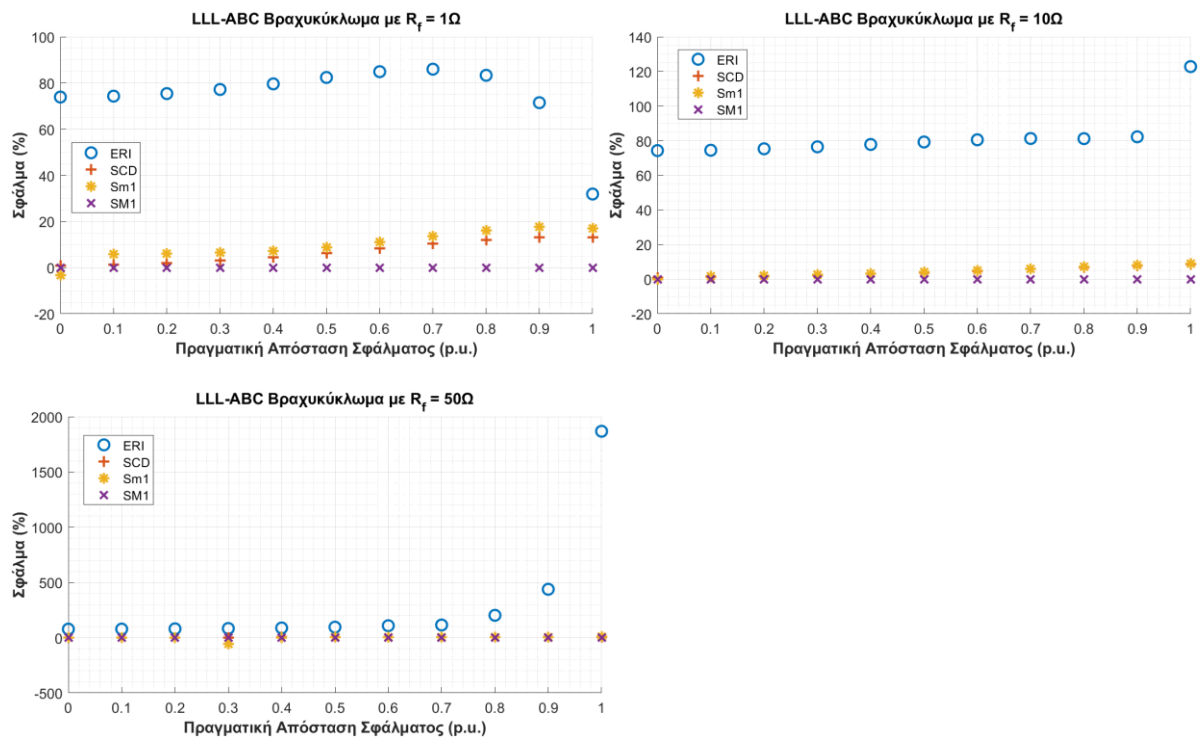




**Εικόνα 6.56:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει τέλεια απόδοση. Η Sm1 έχει πολύ καλή συμπεριφορά με ικανοποιητική απόκλιση, εντός των ορίων του 2%. Η απόκλιση της SCD αυξάνεται εκθετικά προς τα θετικά για  $R_f=0\Omega$ ,  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$ . Παρόλα αυτά, για  $R_f=50\Omega$  η SCD υποεκτιμά το σφάλμα και εμφανίζει σημαντική απόκλιση που βαίνει εκθετικά προς τα αρνητικά. Συνεπώς, μόνο οι SM1 και Sm1 γίνονται αποδεκτές.

Στην Εικόνα 6.57 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.57:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km χωρίς φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα οι SM1 και Sm1 υπολογίζουν την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος που κυμαίνεται μεταξύ 70% και 90%, ενώ στην περίπτωση όπου  $R_f=50\Omega$  το σφάλμα αυξάνεται φτάνοντας σε τεράστιες τιμές. Τέλος, η SCD για μικρές τιμές της αντίστασης σφάλματος εμφανίζει σημαντικό σφάλμα, αλλά για μεγάλες τιμές αντίστασης το σφάλμα της μεθόδου μειώνεται.

#### 6.4.4 Γραμμή μεταφοράς 350km με φορτίο

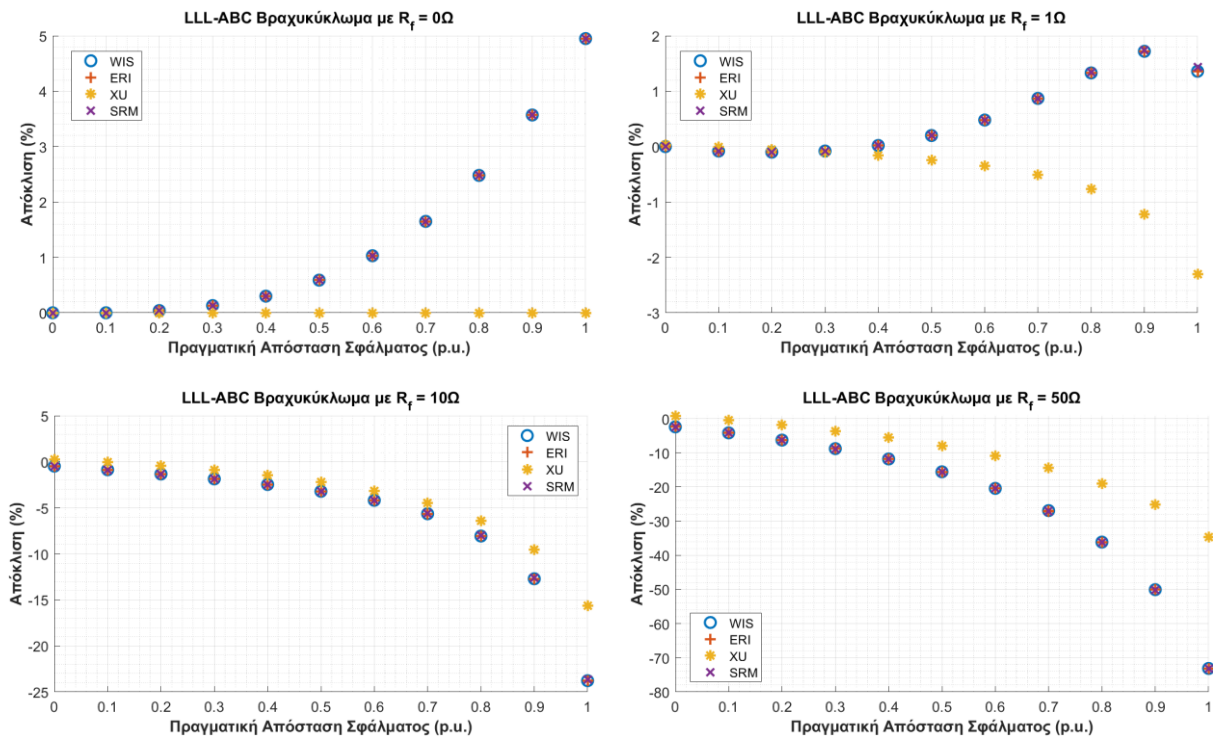
Στον Πίνακα 6.44 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI και XU.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SRM<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | WIS<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | ERI<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>ERI (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | XU<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0000       | 0,00%           |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,1000        | 0,00%           | 0,001                             | -             | 0,1000       | 0,00%           |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,2004        | 0,04%           | 0,004                             | -             | 0,2000       | 0,00%           |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,3013        | 0,13%           | 0,013                             | -             | 0,3000       | 0,00%           |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,4030        | 0,30%           | 0,027                             | -             | 0,4000       | 0,00%           |
|                        | 0,5                                           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,5059        | 0,59%           | 0,045                             | -             | 0,5000       | 0,00%           |
|                        | 0,6                                           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,6103        | 1,03%           | 0,066                             | -             | 0,6000       | 0,00%           |
|                        | 0,7                                           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,7165        | 1,65%           | 0,085                             | -             | 0,7000       | 0,00%           |
|                        | 0,8                                           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,8248        | 2,48%           | 0,095                             | -             | 0,8000       | 0,00%           |
|                        | 0,9                                           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,9357        | 3,57%           | 0,089                             | -             | 0,9000       | 0,00%           |
| Rf = 1Ω                | 1                                             | 1,0495        | 4,95%           | 1,0495        | 4,95%           | 1,0495        | 4,95%           | 0,053                             | -             | 1,0000       | 0,00%           |
|                        | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 0,0000        | 0,00%           | 1,720                             | 71,99%        | 0,0003       | 0,03%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0992        | -0,08%          | 0,0992        | -0,08%          | 0,0992        | -0,08%          | 1,717                             | 71,68%        | 0,0999       | -0,01%          |
|                        | 0,2                                           | 0,1990        | -0,10%          | 0,1990        | -0,10%          | 0,1990        | -0,10%          | 1,720                             | 71,97%        | 0,1995       | -0,05%          |
|                        | 0,3                                           | 0,2992        | -0,08%          | 0,2992        | -0,08%          | 0,2992        | -0,08%          | 1,173                             | 17,30%        | 0,2990       | -0,10%          |
|                        | 0,4                                           | 0,4002        | 0,02%           | 0,4002        | 0,02%           | 0,4002        | 0,02%           | 1,747                             | 74,69%        | 0,3984       | -0,16%          |
|                        | 0,5                                           | 0,5020        | 0,20%           | 0,5020        | 0,20%           | 0,5020        | 0,20%           | 1,769                             | 76,85%        | 0,4976       | -0,24%          |
|                        | 0,6                                           | 0,6048        | 0,48%           | 0,6048        | 0,48%           | 0,6048        | 0,48%           | 1,790                             | 79,01%        | 0,5965       | -0,35%          |
|                        | 0,7                                           | 0,7087        | 0,87%           | 0,7087        | 0,87%           | 0,7087        | 0,87%           | 1,804                             | 80,36%        | 0,6949       | -0,51%          |
|                        | 0,8                                           | 0,8134        | 1,34%           | 0,8133        | 1,33%           | 0,8133        | 1,33%           | 1,796                             | 79,60%        | 0,7923       | -0,77%          |
| Rf = 10Ω               | 0,9                                           | 0,9174        | 1,74%           | 0,9172        | 1,72%           | 0,9172        | 1,72%           | 1,749                             | 74,88%        | 0,8878       | -1,22%          |
|                        | 1                                             | 1,0144        | 1,44%           | 1,0136        | 1,36%           | 1,0136        | 1,36%           | 1,684                             | 68,40%        | 0,9770       | -2,30%          |
|                        | 0                                             | -0,0048       | -0,48%          | -0,0048       | -0,48%          | -0,0048       | -0,48%          | 16,740                            | 67,40%        | 0,0027       | 0,27%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0912        | -0,88%          | 0,0913        | -0,87%          | 0,0913        | -0,87%          | 16,724                            | 67,24%        | 0,0994       | -0,06%          |
|                        | 0,2                                           | 0,1866        | -1,34%          | 0,1867        | -1,33%          | 0,1867        | -1,33%          | 16,754                            | 67,54%        | 0,1956       | -0,44%          |
|                        | 0,3                                           | 0,2814        | -1,86%          | 0,2814        | -1,86%          | 0,2814        | -1,86%          | 16,840                            | 68,40%        | 0,2910       | -0,90%          |
|                        | 0,4                                           | 0,3753        | -2,47%          | 0,3753        | -2,47%          | 0,3753        | -2,47%          | 16,994                            | 69,94%        | 0,3853       | -1,47%          |
|                        | 0,5                                           | 0,4679        | -3,21%          | 0,4679        | -3,21%          | 0,4679        | -3,21%          | 17,244                            | 72,44%        | 0,4780       | -2,20%          |
|                        | 0,6                                           | 0,5581        | -4,19%          | 0,5581        | -4,19%          | 0,5581        | -4,19%          | 17,655                            | 76,55%        | 0,5685       | -3,15%          |
|                        | 0,7                                           | 0,6436        | -5,64%          | 0,6435        | -5,65%          | 0,6435        | -5,65%          | 18,490                            | 84,90%        | 0,6554       | -4,46%          |
| Rf = 50Ω               | 0,8                                           | 0,7197        | -8,03%          | 0,7193        | -8,07%          | 0,7193        | -8,07%          | 19,916                            | 99,16%        | 0,7360       | -6,40%          |
|                        | 0,9                                           | 0,7736        | -12,64%         | 0,7729        | -12,71%         | 0,7729        | -12,71%         | 23,928                            | 139,28%       | 0,8043       | -9,57%          |
|                        | 1                                             | 0,7632        | -23,68%         | 0,7622        | -23,78%         | 0,7622        | -23,78%         | 39,099                            | 290,99%       | 0,8436       | -15,64%         |
|                        | 0                                             | -0,0241       | -2,41%          | -0,0241       | -2,41%          | -0,0237       | -2,37%          | 74,961                            | 49,92%        | 0,0085       | 0,85%           |
|                        | 0,1                                           | 0,0579        | -4,21%          | 0,0583        | -4,17%          | 0,0583        | -4,17%          | 75,249                            | 50,50%        | 0,0957       | -0,43%          |
|                        | 0,2                                           | 0,1368        | -6,32%          | 0,1372        | -6,28%          | 0,1372        | -6,28%          | 50,258                            | 0,52%         | 0,1810       | -1,90%          |
|                        | 0,3                                           | 0,2118        | -8,82%          | 0,2122        | -8,78%          | 0,2122        | -8,78%          | 77,093                            | 54,19%        | 0,2640       | -3,60%          |
|                        | 0,4                                           | 0,2816        | -11,84%         | 0,2819        | -11,81%         | 0,2819        | -11,81%         | 79,154                            | 58,31%        | 0,3442       | -5,58%          |
|                        | 0,5                                           | 0,3440        | -15,60%         | 0,3443        | -15,57%         | 0,3443        | -15,57%         | 82,546                            | 65,09%        | 0,4206       | -7,94%          |
|                        | 0,6                                           | 0,3956        | -20,44%         | 0,3958        | -20,42%         | 0,3958        | -20,42%         | 88,189                            | 76,38%        | 0,4919       | -10,81%         |
|                        | 0,7                                           | 0,4305        | -26,95%         | 0,4307        | -26,93%         | 0,4307        | -26,93%         | 97,916                            | 95,83%        | 0,5561       | -14,39%         |
|                        | 0,8                                           | 0,4384        | -36,16%         | 0,4386        | -36,14%         | 0,4386        | -36,14%         | 115,698                           | 131,40%       | 0,6101       | -18,99%         |
|                        | 0,9                                           | 0,3991        | -50,09%         | 0,3994        | -50,06%         | 0,3994        | -50,06%         | 151,153                           | 202,31%       | 0,6478       | -25,22%         |
|                        | 1                                             | 0,2677        | -73,23%         | 0,2687        | -73,13%         | 0,2687        | -73,13%         | 231,538                           | 363,08%       | 0,6532       | -34,68%         |

**Πίνακας 6.44:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU



Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.58:



**Εικόνα 6.58:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SRM, WIS, ERI, XU

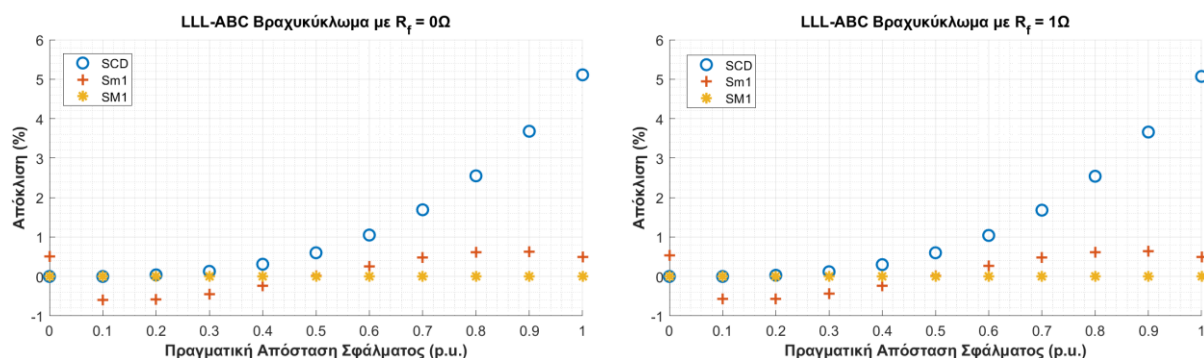
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι SRM, WIS και ERI εμφανίζουν παραπλήσιες αποκλίσεις. Αρχικά, για μικρές τιμές της αντίστασης σφάλματος, οι τρεις μέθοδοι υπερεκτιμούν την θέση του σφάλματος. Για μεγαλύτερες τιμές της αντίστασης το υποεκτιμούν με την απόκλισή τους να αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης σφάλματος ηλεκτρονόμου. Η μέθοδος του XU χωρίς αντίσταση σφάλματος έχει τέλεια αποτελέσματα. Η αύξηση της αντίστασης και της απόστασης του σφάλματος οδηγούν σε εκθετική αύξηση της απόκλισης της XU. Τέλος, το φαινόμενο αυτό φαίνεται πιο έντονο όσο η τιμή της αντίστασης αυξάνεται. Επομένως, καμία μέθοδος δεν είναι αποδεκτή.

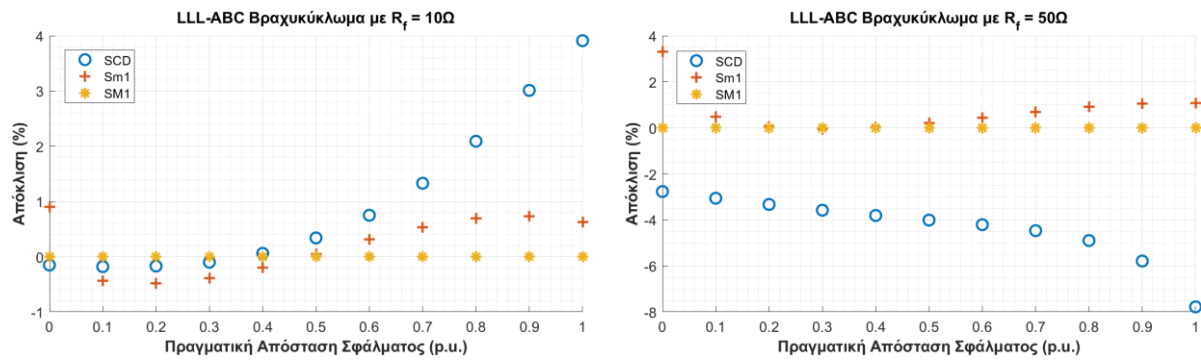
Στον Πίνακα 6.45 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση LLL σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς μήκους 350km με φορτίο, για τις μεθόδους SCD, Sm1 και SM1.

| Αντίσταση<br>Σφάλματος | Πραγματική<br>Απόσταση<br>Σφάλματος<br>(p.u.) | SCD<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SCD (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | Sm1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>Sm1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) | SM1<br>(p.u.) | Απόκλιση<br>(%) | Αντίσταση<br>Σφάλματος<br>SM1 (Ω) | Σφάλμα<br>(%) |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|
| Rf = 0Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0051        | 0,51%           | 0,017                             | -             | 0             | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 0,000                             | -             | 0,0941        | -0,59%          | 0,000                             | -             | 0,1           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,2                                           | 0,2004        | 0,04%           | 0,002                             | -             | 0,1942        | -0,58%          | 0,015                             | -             | 0,2           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,3                                           | 0,3013        | 0,13%           | 0,008                             | -             | 0,2955        | -0,45%          | 0,023                             | -             | 0,3           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,4                                           | 0,4031        | 0,31%           | 0,016                             | -             | 0,3976        | -0,24%          | 0,022                             | -             | 0,4           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 0,027                             | -             | 0,5001        | 0,01%           | 0,021                             | -             | 0,5           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,6                                           | 0,6105        | 1,05%           | 0,040                             | -             | 0,6026        | 0,26%           | 0,026                             | -             | 0,6           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,7                                           | 0,7169        | 1,69%           | 0,052                             | -             | 0,7048        | 0,48%           | 0,046                             | -             | 0,7           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,8                                           | 0,8255        | 2,55%           | 0,061                             | -             | 0,8061        | 0,61%           | 0,079                             | -             | 0,8           | 0               | 0,000                             | -             |
|                        | 0,9                                           | 0,9368        | 3,68%           | 0,062                             | -             | 0,9063        | 0,63%           | 0,110                             | -             | 0,9           | 0               | 0,000                             | -             |
| Rf = 1Ω                | 0                                             | 0,0000        | 0,00%           | 1,007                             | 0,67%         | 0,0053        | 0,53%           | 0,988                             | -1,20%        | 0             | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,1000        | 0,00%           | 1,011                             | 1,13%         | 0,0943        | -0,57%          | 1,012                             | 1,18%         | 0,1           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,2003        | 0,03%           | 1,019                             | 1,85%         | 0,1943        | -0,57%          | 1,002                             | 0,15%         | 0,2           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,3012        | 0,12%           | 1,029                             | 2,93%         | 0,2956        | -0,44%          | 1,000                             | 0,00%         | 0,3           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4030        | 0,30%           | 1,044                             | 4,42%         | 0,3976        | -0,24%          | 1,007                             | 0,70%         | 0,4           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5060        | 0,60%           | 1,063                             | 6,28%         | 0,5001        | 0,01%           | 1,016                             | 1,60%         | 0,5           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6104        | 1,04%           | 1,084                             | 8,37%         | 0,6027        | 0,27%           | 1,018                             | 1,80%         | 0,6           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7168        | 1,68%           | 1,105                             | 10,48%        | 0,7048        | 0,48%           | 1,007                             | 0,67%         | 0,7           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8254        | 2,54%           | 1,123                             | 12,30%        | 0,8062        | 0,62%           | 0,983                             | -1,68%        | 0,8           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9366        | 3,66%           | 1,134                             | 13,40%        | 0,9064        | 0,64%           | 0,961                             | -3,95%        | 0,9           | 0               | 1,000                             | -0,01%        |
| Rf = 10Ω               | 0                                             | -0,0015       | -0,15%          | 10,051                            | 0,51%         | 0,0090        | 0,90%           | 10,002                            | 0,02%         | 0             | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,0982        | -0,18%          | 10,093                            | 0,93%         | 0,0956        | -0,44%          | 10,096                            | 0,96%         | 0,1           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,1983        | -0,17%          | 10,146                            | 1,46%         | 0,1952        | -0,48%          | 10,146                            | 1,46%         | 0,2           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,2990        | -0,10%          | 10,208                            | 2,08%         | 0,2961        | -0,39%          | 10,195                            | 1,95%         | 0,3           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,4006        | 0,06%           | 10,282                            | 2,82%         | 0,3980        | -0,20%          | 10,265                            | 2,65%         | 0,4           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,5034        | 0,34%           | 10,366                            | 3,66%         | 0,5005        | 0,05%           | 10,343                            | 3,43%         | 0,5           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,6075        | 0,75%           | 10,459                            | 4,59%         | 0,6031        | 0,31%           | 10,420                            | 4,20%         | 0,6           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,7133        | 1,33%           | 10,559                            | 5,59%         | 0,7053        | 0,53%           | 10,490                            | 4,90%         | 0,7           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,8209        | 2,09%           | 10,662                            | 6,62%         | 0,8069        | 0,69%           | 10,551                            | 5,51%         | 0,8           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,9301        | 3,01%           | 10,763                            | 7,63%         | 0,9073        | 0,73%           | 10,614                            | 6,14%         | 0,9           | 0               | 9,999                             | -0,01%        |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | -0,0277       | -2,77%          | 49,864                            | -0,27%        | 0,0330        | 3,30%           | 49,524                            | -0,95%        | 0             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,1                                           | 0,0694        | -3,06%          | 50,071                            | 0,14%         | 0,1049        | 0,49%           | 49,869                            | -0,26%        | 0,1           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,2                                           | 0,1667        | -3,33%          | 50,318                            | 0,64%         | 0,2006        | 0,06%           | 50,258                            | 0,52%         | 0,2           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,3                                           | 0,2642        | -3,58%          | 50,605                            | 1,21%         | 0,2995        | -0,05%          | 50,665                            | 1,33%         | 0,3           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,4                                           | 0,3619        | -3,81%          | 50,931                            | 1,86%         | 0,4002        | 0,02%           | 51,109                            | 2,22%         | 0,4           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,5                                           | 0,4599        | -4,01%          | 51,296                            | 2,59%         | 0,5020        | 0,20%           | 51,588                            | 3,18%         | 0,5           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,6                                           | 0,5579        | -4,21%          | 51,698                            | 3,40%         | 0,6044        | 0,44%           | 52,095                            | 4,19%         | 0,6           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,7                                           | 0,6553        | -4,47%          | 52,131                            | 4,26%         | 0,7069        | 0,69%           | 52,621                            | 5,24%         | 0,7           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,8                                           | 0,7510        | -4,90%          | 52,591                            | 5,18%         | 0,8091        | 0,91%           | 53,159                            | 6,32%         | 0,8           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
|                        | 0,9                                           | 0,8421        | -5,79%          | 53,070                            | 6,14%         | 0,9105        | 1,05%           | 53,713                            | 7,43%         | 0,9           | 0               | 49,997                            | -0,01%        |
| Rf = 50Ω               | 0                                             | 0,9222        | -7,78%          | 53,554                            | 7,11%         | 1,0108        | 1,08%           | 54,298                            | 8,60%         | 1             | 0               | 49,997                            | -0,01%        |

Πίνακας 6.45: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στην Εικόνα 6.59:

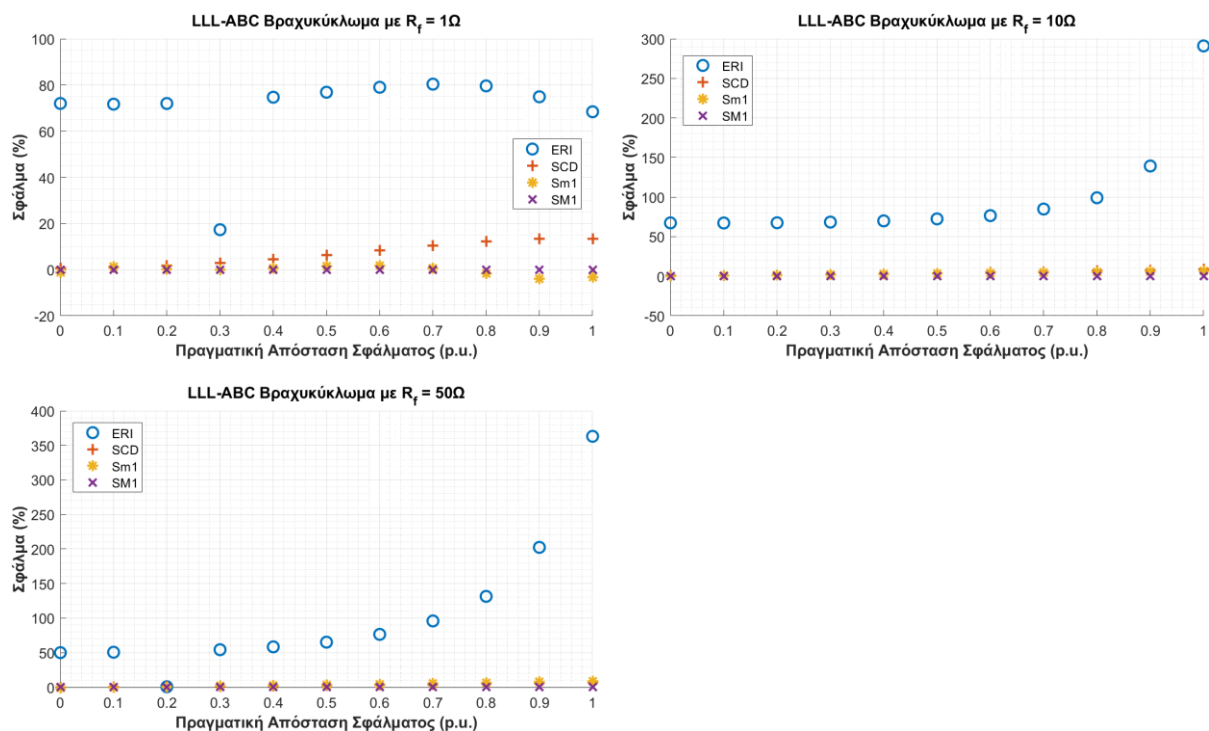




**Εικόνα 6.59:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για τις μεθόδους SCD, Sm1, SM1

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η SM1 έχει τέλεια απόδοση. Η Sm1 έχει πολύ καλή συμπεριφορά με ικανοποιητική απόκλιση, εντός των ορίων του 2%. Η απόκλιση της SCD αυξάνεται εκθετικά προς τα θετικά για  $R_f=0\Omega$ ,  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$ . Παρόλα αυτά, για  $R_f=50\Omega$  η SCD υποεκτιμά το σφάλμα και εμφανίζει σημαντική απόκλιση που βαίνει εκθετικά προς τα αρνητικά. Συνεπώς, μόνο οι SM1 και Sm1 γίνονται αποδεκτές.

Στην Εικόνα 6.60 οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών για την αντίσταση σφάλματος, όπως την υπολογίζει κάθε μέθοδος.



**Εικόνα 6.60:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για σφάλμα LLL-ABC στη γραμμή 350km με φορτίο για την υπολογιζόμενη αντίσταση σφάλματος

Με βάση τα παραπάνω γραφήματα οι SM1 και Sm1 υπολογίζουν την αντίσταση σφάλματος με πολύ καλή ακρίβεια. Η ERI έχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος που αυξάνεται εκθετικά φτάνοντας σε τεράστιες τιμές. Τέλος, η SCD για μικρές τιμές της αντίστασης σφάλματος εμφανίζει σημαντικό σφάλμα, αλλά για μεγάλες τιμές αντίστασης το σφάλμα της μεθόδου μειώνεται.

### 6.4.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος για κάθε μέθοδο και για όλες τις περιπτώσεις αναλύθηκαν και σχολιάστηκαν διεξοδικά στις Ενότητες 6.4.1 έως και 6.4.4. Συγκεντρωτικά, από τις προηγούμενες προσομοιώσεις και ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι SRM, WIS και ERI έχουν εξαιρετική συμπεριφορά στον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος στη περίπτωση της γραμμής μήκους 35km χωρίς φορτίο για αντιστάσεις  $R_f=0\Omega$ ,  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$ . Για  $R_f=50\Omega$  η αποκλίσεις τους αυξάνονται και βγαίνουν εκτός ορίων του  $\pm 2\%$ . Επίσης, στην περίπτωση με φορτισμένη γραμμή και με μη μηδενική αντίσταση σφάλματος, οι αποκλίσεις τους είναι σημαντικές. Στην περίπτωση της γραμμής 350km, εμφανίζουν παρόμοια ασταθή συμπεριφορά. Συνεπώς, δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτές.
- Η ERI, εμφανίζει και σε αυτήν την περίπτωση έντονο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό δεν είναι σταθερό, οπότε δεν μπορούμε να εισάγουμε κάποιο συντελεστή διόρθωσης σε αυτήν την περίπτωση.
- Η SCD είναι αποδεκτή σε κάθε περίπτωση γραμμής και φόρτισης για αντιστάσεις  $R_f=0\Omega$ ,  $R_f=1\Omega$  και  $R_f=10\Omega$ . Για  $R_f=50\Omega$  η αποκλίσεις τους αυξάνονται και βγαίνουν εκτός ορίων του  $\pm 2\%$ . Παρόλα αυτά σχεδόν σε όλες τις δοκιμές υπολογίζει την αντίσταση σφάλματος ικανοποιητικά.
- Η XU έχει τέλεια συμπεριφορά με μηδενική απόκλιση όταν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος και όταν αυτή έχει μικρές τιμές. Η αύξηση της αντίστασης προκαλεί αύξηση της απόκλισης της μεθόδου, καταδεικνύοντας και εδώ την εξάρτησή της από την αντίσταση σφάλματος. Επομένως, δεν είναι αποδεκτή.
- Η Sm1 έχει αποδεκτή συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις. Μάλιστα, συγκριτικά με άλλες περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων (LG, LL, LLG), εδώ φαίνεται να παρουσιάζει τις μικρότερες αποκλίσεις.
- Η SM1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις μεθόδους σε κάθε δοκιμή εμφανίζοντας μηδενική απόκλιση στην εύρεση της θέσης του βραχυκυκλώματος και αμελητέο σφάλμα στον υπολογισμό της αντίστασης σφάλματος. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι υλοποιείται με τον μοντέλο μεγάλου μήκους που είναι ιδανικό για κάθε τύπο γραμμής.
- Αντίθετα με τις προηγούμενες κατηγορίες βραχυκυκλωμάτων (LG, LL, LLG), στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, οι περισσότεροι αλγόριθμοι εμφανίζουν χειρότερα αποτελέσματα στην περίπτωση που η γραμμή είναι φορτισμένη.
- Η απόδοση της SCD, παρότι χρησιμοποιεί συγχρονισμένες μετρήσεις, υπολείπεται των Sm1 και SM1. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιεί μόνο μετρήσεις ρεύματος για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, δηλαδή λιγότερες πληροφορίες, με αποτέλεσμα η ακρίβειά της να επηρεάζεται αρνητικά.

## 6.5 Συγκεντρωτικά τα Αποτελέσματα σε Πίνακες

Τα αποτελέσματα ανάλογα με τη γραμμή μεταφοράς που προσομοιώθηκε παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω:

| Γραμμή Μεταφοράς μήκους 35km |         |         |         |         |         |         |           |         |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| Μέθοδοι                      | LG      |         | LL      |         | LLG     |         | LLL       |         |
|                              | noload  | load    | noload  | load    | noload  | load    | noload    | load    |
| SRM                          |         |         | [-2, 2] |         | [-2, 2] | [-2, 2] | [-10, 10] |         |
| TAK0                         |         |         |         |         | [-2, 2] | [-2, 2] |           |         |
| TAK2                         | [-5, 5] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] |           |         |
| MTAK0                        |         |         |         |         | [-2, 2] | [-2, 2] |           |         |
| MTAK2                        | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] |           |         |
| WIS                          | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-10, 10] |         |
| ERI                          | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-10, 10] |         |
| XU                           |         |         |         |         | [-2, 2] | [-2, 2] |           |         |
| SCD                          | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-10, 10] | [-5, 5] |
| Sm2                          | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] |           |         |
| Sm1                          | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2]   | [-2, 2] |
| SM1                          | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2] | [-2, 2]   | [-2, 2] |

**Πίνακας 6.46:** Συνολικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη γραμμή μεταφοράς 35km

| Απόκλιση Μεθόδου %                  | Χρωματικός Συμβολισμός |
|-------------------------------------|------------------------|
| [-2, 2]                             |                        |
| [-5, 5]                             |                        |
| [-10, 10]                           |                        |
| $(-\infty, -10) \cup (10, +\infty)$ |                        |
| μη εφαρμόσιμη                       |                        |

| Γραμμή Μεταφοράς μήκους 350km |         |           |           |           |           |           |         |           |
|-------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|
| Μέθοδοι                       | LG      |           | LL        |           | LLG       |           | LLL     |           |
|                               | noload  | load      | noload    | load      | noload    | load      | noload  | load      |
| SRM                           |         |           |           |           | [-5, 5]   | [-5, 5]   |         |           |
| TAK0                          |         |           |           |           | [-10, 10] | [-10, 10] |         |           |
| TAK2                          | [-5, 5] | [-10, 10] | [-10, 10] | [-10, 10] | [-5, 5]   | [-10, 10] |         |           |
| MTAK0                         |         |           |           |           | [-5, 5]   |           |         |           |
| MTAK2                         | [-5, 5] | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-10, 10] |         |           |
| WIS                           | [-5, 5] | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-10, 10] |         |           |
| ERI                           | [-5, 5] | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-10, 10] |         |           |
| XU                            |         |           |           |           | [-2, 2]   | [-2, 2]   |         |           |
| SCD                           | [-5, 5] | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-10, 10] |         | [-10, 10] |
| Sm2                           | [-2, 2] | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   |         |           |
| Sm1                           |         |           | [-5, 5]   | [-5, 5]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-5, 5] | [-5, 5]   |
| SM1                           | [-2, 2] | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2]   | [-2, 2] | [-2, 2]   |

**Πίνακας 6.47:** Συνολικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη γραμμή μεταφοράς 350km

## Παράρτημα

### Ανάλυση Πειραματικού Μέρους

Η διεξαγωγή των δοκιμών έγινε με εφαρμογή του μοντέλου δικτύου που παρουσιάζεται στην συνέχεια. Αυτό, υλοποιήθηκε στο Mathcad 15.0 της Mathsoft - PTC και έχει την εξής δομή:

Αρχικά, μοντελοποιούμε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) του Σχήματος 6.1, επιλέγοντας κατάλληλα τις παραμέτρους των γεννητριών, της γραμμής, της θέσης και της αντίστασης σφάλματος. Η υλοποίηση της γραμμής μεταφοράς γίνεται με βάση το μοντέλο μεγάλου μήκους. Το ΣΗΕ, στην περίπτωση της αφόρτιστης γραμμής, έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά, τα οποία προέχονται από μια πλατφόρμα EMTP-RV (Electromagnetic Transients Program - Restructured Version) [6].



Σχήμα 6.1: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις

Γεννήτριες στους ζυγούς S και R:

$$E_{GS} = 230.94 \text{ kV (φασική τιμή)}, Z_{GS1} = Z_{GS2} = 1.312 + j15\Omega, Z_{GS0} = 2.334 + j26.6\Omega$$

$$E_{GR} = 230.94 \text{ kV (φασική τιμή)}, Z_{GR1} = Z_{GR2} = 1.312 + j15\Omega, Z_{GR0} = 2.334 + j26.6\Omega$$

Γραμμή μεταφοράς:

$$z_{L1} = z_{L2} = 0.0247 + j0.3189\Omega/\text{km}, z_{L0} = 0.314 + j1.0041\Omega/\text{km}$$

$$b_{L1} = b_{L2} = j3.612\mu\text{S}/\text{km}, b_{L0} = j2.4916\mu\text{S}/\text{km}$$

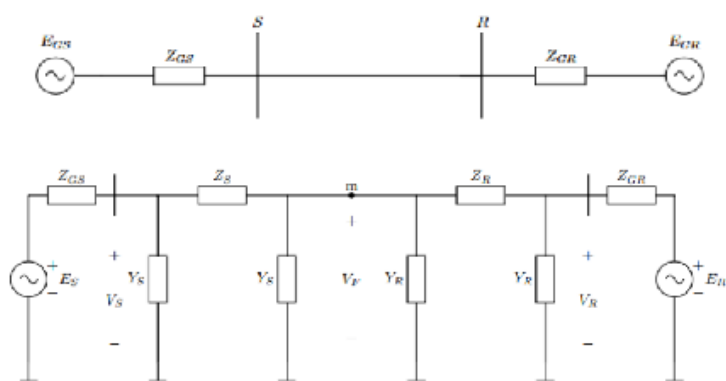
Επίσης επιλέγουμε το μήκος της γραμμής  $l$ , την πραγματική θέση του σφάλματος  $m$  και την αντίσταση σφάλματος  $R_F$ . Με αυτόν τον τρόπο έχουμε την ευελιξία να δοκιμάσουμε προσομοιώσεις με διαφορετικό μήκος γραμμής, μεταβλητή θέση και αντίσταση σφάλματος.

Στη συνέχεια, σε κάθε δοκιμή υπολογίζονται τα ακολουθιακά και τα φασικά μεγέθη των τάσεων και ρευμάτων, όπως μετρώνται στις θέσεις των ηλεκτρονόμων, σύμφωνα με την ανάλυση του τρίτου κεφαλαίου. Έπειτα, χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις, εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι ανίχνευσης σφάλματος, όπως περιγράφονται στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο. Τα παραπάνω πραγματοποιούνται τέσσερις φορές, μια για κάθε τύπο σφάλματος και στο τέλος κάθε περίπτωσης αναφέρονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στην περίπτωση της φορτισμένης γραμμής χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες παραμέτρους με την διαφορά ότι θέσαμε  $E_{GS} = 230.94 \angle -25^\circ \text{ kV}$ . Τέλος, έχουμε υλοποιήσει τα ίδια πειράματα και με το μοντέλο γραμμής μικρού μήκους, αλλά δεν το παρουσιάζουμε λόγους οικονομίας χώρου.



## Fault Location - Μοντέλο Μεγάλου Μήκους



### Ορισμός Μεγεθών και Παραμέτρων

#### Παράμετροι Βραχυκυκλώματος:

Θα ορίσουμε τις παραμέτρους του βραχυκυκλώματος που θέλουμε να μελετήσουμε :

$$m := 0.75 \quad R_F := 1 \cdot \text{ohm} \quad Z_n := 0 \text{ohm}$$

$$a := -0.5 + 0.866i$$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

$$A_2 := \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3333 & 0.3333 & 0.3333 \\ 0.3333 & -0.1667 + 0.2887i & -0.1667 - 0.2887i \\ 0.3333 & -0.1667 - 0.2887i & -0.1667 + 0.2887i \end{pmatrix}$$

#### Γεννήτρια στον ζυγό S (Φασικές τάσεις):

$$E_{GS} := \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \text{ V} = 230.9401 \cdot \text{kV} \quad |E_{GS}| = 230.9401 \cdot \text{kV}$$

$$R_{GS1} := 1.312 \text{ohm} \quad X_{GS1} := 15 \text{ohm} \quad Z_{GS1} := (R_{GS1} + jX_{GS1})$$

$$R_{GS2} := 1.312 \text{ohm} \quad X_{GS2} := 15 \text{ohm} \quad Z_{GS2} := (R_{GS2} + jX_{GS2})$$

$$R_{GS0} := 2.334 \text{ohm} \quad X_{GS0} := 26.6 \text{ohm} \quad Z_{GS0} := (R_{GS0} + jX_{GS0})$$

$$Z_{GS1} = (1.312 + 15i) \Omega \quad |Z_{GS1}| = 15.0573 \Omega \quad \arg(Z_{GS1}) = 85.0013 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{GS2} = (1.312 + 15i) \Omega \quad |Z_{GS2}| = 15.0573 \Omega \quad \arg(Z_{GS2}) = 85.0013 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{GS0} = (2.334 + 26.6i) \Omega \quad |Z_{GS0}| = 26.7022 \Omega \quad \arg(Z_{GS0}) = 84.9855 \cdot \text{deg}$$

#### Γεννήτρια στον ζυγό R (Φασικές τάσεις):

$$V_{\text{heavy\_load}} := 362.5231148 - j \cdot 169.0473047 \quad |V_{\text{heavy\_load}}| = 400 \\ \arg(V_{\text{heavy\_load}}) = -25 \cdot \text{deg}$$

$$V_{\text{light\_load}} := 400$$

$$E_{GR} := \frac{V_{light\_load} \cdot 10^3}{\sqrt{3}} V = 230.9401 \cdot kV \quad |E_{GR}| = 230.9401 \cdot kV$$

$$R_{GR1} := 1.312 \text{ ohm} \quad X_{GR1} := 15 \text{ ohm} \quad Z_{GR1} := (R_{GR1} + jX_{GR1})$$

$$R_{GR2} := 1.312 \text{ ohm} \quad X_{GR2} := 15 \text{ ohm} \quad Z_{GR2} := (R_{GR2} + jX_{GR2})$$

$$R_{GR0} := 2.334 \text{ ohm} \quad X_{GR0} := 26.6 \text{ ohm} \quad Z_{GR0} := (R_{GR0} + jX_{GR0})$$

$$Z_{GR1} = (1.312 + 15j) \Omega \quad |Z_{GR1}| = 15.0573 \Omega \quad \arg(Z_{GR1}) = 85.0013 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{GR2} = (1.312 + 15j) \Omega \quad |Z_{GR2}| = 15.0573 \Omega \quad \arg(Z_{GR2}) = 85.0013 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{GR0} = (2.334 + 26.6j) \Omega \quad |Z_{GR0}| = 26.7022 \Omega \quad \arg(Z_{GR0}) = 84.9855 \cdot \text{deg}$$

#### Γραμμή Μεταφοράς :

$$l := 350 \text{ km}$$

Χαρακτηριστικά Γραμμή Μεταφοράς σε Ω/km:

$$z_{L1} := (0.0247 + j \cdot 0.3189) \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad z_{L0} := (0.3140 + j \cdot 1.0041) \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$Z_{L1} := z_{L1} \cdot l = (8.645 + 111.615j) \Omega \quad Z_{L0} := z_{L0} \cdot l = (109.9 + 351.435j) \Omega$$

$$b_{L1} := j \cdot 3.6128 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ohm}^{-1}}{\text{km}} \quad b_{L0} := j \cdot 2.4916 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ohm}^{-1}}{\text{km}}$$

Χαρακτηριστικά Γραμμή Μεταφοράς σε Ω:

$$R_1 := \text{Re}(Z_{L1}) = 8.645 \Omega \quad X_1 := \text{Im}(Z_{L1}) = 111.615 \Omega \quad Z_1 := (R_1 + jX_1)$$

$$R_2 := \text{Re}(Z_{L1}) = 8.645 \Omega \quad X_2 := \text{Im}(Z_{L1}) = 111.615 \Omega \quad Z_2 := (R_2 + jX_2)$$

$$R_0 := \text{Re}(Z_{L0}) = 109.9 \Omega \quad X_0 := \text{Im}(Z_{L0}) = 351.435 \Omega \quad Z_0 := (R_0 + jX_0)$$

$$Z_1 = (8.645 + 111.615j) \Omega \quad Z_2 = (8.645 + 111.615j) \Omega \quad Z_0 = (109.9 + 351.435j) \Omega$$

$$G_1 := 0 \text{ ohm}^{-1} \quad X_{C1} := \frac{1}{|b_{L1}| \cdot l} = 790.8389 \Omega \quad Y_1 := \left( G_1 + j \frac{1}{X_{C1}} \right)$$

$$G_2 := 0 \text{ ohm}^{-1} \quad X_{C2} := \frac{1}{|b_{L1}| \cdot l} = 790.8389 \Omega \quad Y_2 := \left( G_2 + j \frac{1}{X_{C2}} \right)$$

$$G_0 := 0 \text{ ohm}^{-1} \quad X_{C0} := \frac{1}{|b_{L0}| \cdot l} = 1.1467 \times 10^3 \Omega \quad Y_0 := \left( G_0 + j \frac{1}{X_{C0}} \right)$$

$$Y_1 = 1.2645j \times 10^{-3} \frac{1}{\Omega} \quad Y_2 = 1.2645j \times 10^{-3} \frac{1}{\Omega} \quad Y_0 = 8.7206j \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega}$$

$$Z_{C1} := \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} \quad Z_{C2} := \sqrt{\frac{Z_2}{Y_2}} \quad Z_{C0} := \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$$

$$|Z_{C1}| = 297.5464 \Omega \quad \arg(Z_{C1}) = -2.2145 \cdot \text{deg}$$

$$|Z_{C2}| = 297.5464 \Omega \quad \arg(Z_{C2}) = -2.2145 \cdot \text{deg}$$

$$|Z_{C0}| = 649.7995 \Omega \quad \arg(Z_{C0}) = -8.6827 \cdot \text{deg}$$

$$z_1 := \frac{Z_1}{1} \quad z_2 := \frac{Z_2}{1} \quad z_0 := \frac{Z_0}{1}$$

$$y_1 := \frac{Y_1}{1} \quad y_2 := \frac{Y_2}{1} \quad y_0 := \frac{Y_0}{1}$$

$$\gamma_1 := \sqrt{z_1 \cdot y_1} \quad \gamma_2 := \sqrt{z_2 \cdot y_2} \quad \gamma_0 := \sqrt{z_0 \cdot y_0}$$

$$\gamma_1 = 1.0742i \times 10^{-6} \frac{1}{m} \quad \gamma_2 = 1.0742i \times 10^{-6} \frac{1}{m} \quad \gamma_0 = (2.4441 \times 10^{-7} + 1.6005i \times 10^{-6}) \frac{1}{m}$$

### Μοντελοποίηση Συστήματος κατά το Σφάλμα

#### Παράμετροι Γραμμή Μεταφοράς μετά το σφάλμα

$$\begin{aligned} Z_{S1} &:= Z_{C1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot m \cdot l) & Z_{S2} &:= Z_{C2} \cdot \sinh(\gamma_2 \cdot m \cdot l) & Z_{S0} &:= Z_{C0} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot m \cdot l) \\ Z_{R1} &:= Z_{C1} \cdot \sinh[\gamma_1 \cdot (1 - m) \cdot l] & Z_{R2} &:= Z_{C2} \cdot \sinh[\gamma_2 \cdot (1 - m) \cdot l] & Z_{R0} &:= Z_{C0} \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (1 - m) \cdot l] \\ Y_{S1} &:= \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_1 \cdot m \cdot l}{2}\right) & Y_{S2} &:= \frac{1}{Z_{C2}} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_2 \cdot m \cdot l}{2}\right) & Y_{S0} &:= \frac{1}{Z_{C0}} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_0 \cdot m \cdot l}{2}\right) \\ Y_{R1} &:= \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left[\frac{\gamma_1 \cdot (1 - m) \cdot l}{2}\right] & Y_{R2} &:= \frac{1}{Z_{C2}} \cdot \tanh\left[\frac{\gamma_2 \cdot (1 - m) \cdot l}{2}\right] & Y_{R0} &:= \frac{1}{Z_{C0}} \cdot \tanh\left[\frac{\gamma_0 \cdot (1 - m) \cdot l}{2}\right] \end{aligned}$$

$$Z_{S1} = (6.3132 + 82.6146i) \Omega \quad |Z_{S1}| = 82.8555 \Omega \quad \arg(Z_{S1}) = 85.6301 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{S2} = (6.3132 + 82.6146i) \Omega \quad |Z_{S2}| = 82.8555 \Omega \quad \arg(Z_{S2}) = 85.6301 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{S0} = (77.7475 + 256.7898i) \Omega \quad |Z_{S0}| = 268.3015 \Omega \quad \arg(Z_{S0}) = 73.1554 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{R1} = (2.1549 + 27.863i) \Omega \quad |Z_{R1}| = 27.9462 \Omega \quad \arg(Z_{R1}) = 85.5776 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{R2} = (2.1549 + 27.863i) \Omega \quad |Z_{R2}| = 27.9462 \Omega \quad \arg(Z_{R2}) = 85.5776 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{R0} = (27.2998 + 87.6059i) \Omega \quad |Z_{R0}| = 91.7609 \Omega \quad \arg(Z_{R0}) = 72.6919 \cdot \text{deg}$$

$$Y_{S1} = (2.4688 \times 10^{-7} + 4.7734i \times 10^{-4}) \frac{1}{\Omega} \quad |Y_{S1}| = 4.7734 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad \arg(Y_{S1}) = 89.9704 \cdot \text{deg}$$

$$Y_{S2} = (2.4688 \times 10^{-7} + 4.7734i \times 10^{-4}) \frac{1}{\Omega} \quad |Y_{S2}| = 4.7734 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad \arg(Y_{S2}) = 89.9704 \cdot \text{deg}$$

$$Y_{S0} = (1.5211 \times 10^{-6} + 3.3179i \times 10^{-4}) \frac{1}{\Omega} \quad |Y_{S0}| = 3.318 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad \arg(Y_{S0}) = 89.7373 \cdot \text{deg}$$

$$Y_{R1} = 1.5818i \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad |Y_{R1}| = 1.5818 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad \arg(Y_{R1}) = 89.9967 \cdot \text{deg}$$

$$Y_{R2} = 1.5818i \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad |Y_{R2}| = 1.5818 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad \arg(Y_{R2}) = 89.9967 \cdot \text{deg}$$

$$Y_{R0} = 1.0918i \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad |Y_{R0}| = 1.0918 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \quad \arg(Y_{R0}) = 89.9713 \cdot \text{deg}$$

#### Ισοδύναμες αντιστάσεις αριστερά (πλευρά S) και δεξιά (πλευρά R) του σφάλματος

$$Z_{thS1} := \frac{\left( \frac{Z_{GS1} \cdot Y_{S1}^{-1}}{Z_{GS1} + Y_{S1}^{-1}} + Z_{S1} \right) \cdot Y_{S1}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GS1} \cdot Y_{S1}^{-1}}{Z_{GS1} + Y_{S1}^{-1}} + Z_{S1} \right) + Y_{S1}^{-1}} \quad Z_{thR1} := \frac{\left( \frac{Z_{GR1} \cdot Y_{R1}^{-1}}{Z_{GR1} + Y_{R1}^{-1}} + Z_{R1} \right) \cdot Y_{R1}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR1} \cdot Y_{R1}^{-1}}{Z_{GR1} + Y_{R1}^{-1}} + Z_{R1} \right) + Y_{R1}^{-1}}$$

$$Z_{thS1} = (8.413 + 102.4707i) \Omega \quad |Z_{thS1}| = 102.8155 \Omega \quad \arg(Z_{thS1}) = 85.3064 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{thR1} = (3.5208 + 43.1895i) \Omega \quad |Z_{thR1}| = 43.3328 \Omega \quad \arg(Z_{thR1}) = 85.3396 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{thS2} := \frac{\left( \frac{Z_{GS2} \cdot Y_{S2}^{-1}}{Z_{GS2} + Y_{S2}^{-1}} + Z_{S2} \right) \cdot Y_{S2}^{-1}}{\frac{Z_{GS2} \cdot Y_{S2}^{-1}}{Z_{GS2} + Y_{S2}^{-1}} + Z_{S2} + Y_{S2}^{-1}} \quad Z_{thR2} := \frac{\left( \frac{Z_{GR2} \cdot Y_{R2}^{-1}}{Z_{GR2} + Y_{R2}^{-1}} + Z_{R2} \right) \cdot Y_{R2}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR2} \cdot Y_{R2}^{-1}}{Z_{GR2} + Y_{R2}^{-1}} + Z_{R2} \right) + Y_{R2}^{-1}}$$

$$Z_{thS2} = (8.413 + 102.4707i) \, \Omega \quad |Z_{thS2}| = 102.8155 \, \Omega \quad \arg(Z_{thS2}) = 85.3064 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{thR2} = (3.5208 + 43.1895i) \, \Omega \quad |Z_{thR2}| = 43.3328 \, \Omega \quad \arg(Z_{thR2}) = 85.3396 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{thS0} := \frac{\left( \frac{Z_{GS0} \cdot Y_{S0}^{-1}}{Z_{GS0} + Y_{S0}^{-1}} + Z_{S0} \right) \cdot Y_{S0}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GS0} \cdot Y_{S0}^{-1}}{Z_{GS0} + Y_{S0}^{-1}} + Z_{S0} \right) + Y_{S0}^{-1}} \quad Z_{thR0} := \frac{\left( \frac{Z_{GR0} \cdot Y_{R0}^{-1}}{Z_{GR0} + Y_{R0}^{-1}} + Z_{R0} \right) \cdot Y_{R0}^{-1}}{\left( \frac{Z_{GR0} \cdot Y_{R0}^{-1}}{Z_{GR0} + Y_{R0}^{-1}} + Z_{R0} \right) + Y_{R0}^{-1}}$$

$$Z_{thS0} = (97.6836 + 310.1329i) \, \Omega \quad |Z_{thS0}| = 325.153 \, \Omega \quad \arg(Z_{thS0}) = 72.517 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{thR0} = (30.4018 + 115.6267i) \, \Omega \quad |Z_{thR0}| = 119.5567 \, \Omega \quad \arg(Z_{thR0}) = 75.2686 \cdot \text{deg}$$

#### Ανάλυση Θετικής Ακολουθίας

$$V_{S\_1} := E_{GS} \cdot \frac{\frac{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}) \cdot Y_{S1}^{-1}}{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}) + Y_{S1}^{-1}}}{\frac{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}) \cdot Y_{S1}^{-1}}{(Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}) + Y_{S1}^{-1}} + Z_{GS1}} \quad V_{R\_1} := E_{GR} \cdot \frac{\frac{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}) \cdot Y_{R1}^{-1}}{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}) + Y_{R1}^{-1}}}{\frac{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}) \cdot Y_{R1}^{-1}}{(Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}) + Y_{R1}^{-1}} + Z_{GR1}}$$

$$V_{thS1} := \frac{Y_{S1}^{-1}}{Z_{S1} + Y_{S1}^{-1}} \cdot V_{S\_1} \quad V_{thR1} := \frac{Y_{R1}^{-1}}{Z_{R1} + Y_{R1}^{-1}} \cdot V_{R\_1}$$

$$|V_{S\_1}| = 234.3643 \cdot \text{kV} \quad |V_{thS1}| = 243.9844 \cdot \text{kV} \quad |V_{R\_1}| = 232.0436 \cdot \text{kV} \quad |V_{thR1}| = 233.0708 \cdot \text{kV}$$

$$E_1 := V_{thS1} \cdot \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + V_{thR1} \cdot \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad Z_{th1} := \frac{Z_{thS1} \cdot Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}}$$

$$|E_1| = 236.3064 \cdot \text{kV} \quad |Z_{th1}| = 30.4847 \, \Omega$$

$$\arg(E_1) = -0.1087 \cdot \text{deg} \quad \arg(Z_{th1}) = 85.3298 \cdot \text{deg}$$

#### Ανάλυση Αρνητικής Ακολουθίας:

$$Z_{th2} := \frac{Z_{thS2} \cdot Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}}$$

$$|Z_{th2}| = 30.4847 \, \Omega \quad \arg(Z_{th2}) = 85.3298 \cdot \text{deg}$$

Ανάλυση Μηδενικής Ακολουθίας:

$$Z_{th0} := \frac{Z_{thS0} \cdot Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}}$$

$$|Z_{th0}| = 87.4346 \, \Omega \quad \arg(Z_{th0}) = 74.529 \, \text{deg}$$

**Υπολογισμός Μεγεθών κατά μονοφασικό βραχυκύκλωμα LG, AG**

$$Z_{total} := Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th0} + 3 \cdot Z_n + 3 \cdot R_F$$

$$I_{F1} := \frac{E_1}{Z_{total}} \quad I_{F2} := I_{F1} \quad I_{F0} := I_{F1}$$

$$V_{F1} := E_1 - I_{F1} \cdot Z_{th1}$$

$$V_{F2} := -I_{F2} \cdot Z_{th2}$$

$$V_{F0} := -I_{F0} \cdot Z_{th0}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{F0}| \\ |I_{F1}| \\ |I_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5927 \times 10^3 \\ 1.5927 \times 10^3 \\ 1.5927 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{F0}) \\ \arg(I_{F1}) \\ \arg(I_{F2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.935 \\ -77.935 \\ -77.935 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{F0}| \\ |V_{F1}| \\ |V_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.3926 \times 10^5 \\ 1.8828 \times 10^5 \\ 4.8552 \times 10^4 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{F0}) \\ \arg(V_{F1}) \\ \arg(V_{F2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 176.5939 \\ -2.0385 \\ -172.6053 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης είναι:

$$\begin{pmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \\ I_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 998.7124 - 4.6725i \times 10^3 \\ 0.0146 - 0.0685i \\ 0.0146 - 0.0685i \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Fa}| \\ |I_{Fb}| \\ |I_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.7781 \times 10^3 \\ 0.0701 \\ 0.0701 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Fa}) \\ \arg(I_{Fb}) \\ \arg(I_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.935 \\ -77.935 \\ -77.935 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Ενώ οι τάσεις είναι:

$$\begin{pmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0} \\ V_{F1} \\ V_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 998.7124 - 4.6725i \times 10^3 \\ -2.0939 \times 10^5 - 1.8989i \times 10^5 \\ -2.0863 \times 10^5 + 2.1939i \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Fa}| \\ |V_{Fb}| \\ |V_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.7781 \times 10^3 \\ 2.8268 \times 10^5 \\ 3.0275 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Fa}) \\ \arg(V_{Fb}) \\ \arg(V_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.935 \\ -137.7958 \\ 133.5601 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης S και άφιξης R της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι.

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο του βραχυκυκλώματος, σε κάθε ακολουθιακό κύκλωμα έχουμε

$$I_{thS1} := I_{F1} \cdot \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thS1} - V_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad I_{thR1} := I_{F1} \cdot \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thR1} - V_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}}$$

$$I_{thS2} := I_{F2} \cdot \frac{Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad I_{thR2} := I_{F2} \cdot \frac{Z_{thS2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}}$$

$$I_{thS0} := I_{F0} \cdot \frac{Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad I_{thR0} := I_{F0} \cdot \frac{Z_{thS0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}}$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff :

$$I_{ZS1} := I_{thS1} + \frac{V_{F1}}{Y_{S1}^{-1}} \quad I_{ZR1} := I_{thR1} + \frac{V_{F1}}{Y_{R1}^{-1}}$$

$$I_{ZS2} := I_{thS2} + \frac{V_{F2}}{Y_{S2}^{-1}} \quad I_{ZR2} := I_{thR2} + \frac{V_{F2}}{Y_{R2}^{-1}}$$

$$I_{ZS0} := I_{thS0} + \frac{V_{F0}}{Y_{S0}^{-1}} \quad I_{ZR0} := I_{thR0} + \frac{V_{F0}}{Y_{R0}^{-1}}$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας είναι:

$$V_{S1} := V_{F1} + Z_{S1} \cdot I_{ZS1} \quad V_{R1} := V_{F1} + Z_{R1} \cdot I_{ZR1}$$

$$V_{S2} := V_{F2} + Z_{S2} \cdot I_{ZS2} \quad V_{R2} := V_{F2} + Z_{R2} \cdot I_{ZR2}$$

$$V_{S0} := V_{F0} + Z_{S0} \cdot I_{ZS0} \quad V_{R0} := V_{F0} + Z_{R0} \cdot I_{ZR0}$$

Στους ζυγούς τα ακολουθιακά ρεύματα είναι:

$$I_{S1} := \frac{V_{S1}}{Y_{S1}^{-1}} + I_{ZS1} \quad I_{R1} := \frac{V_{R1}}{Y_{R1}^{-1}} + I_{ZR1}$$

$$I_{S2} := \frac{V_{S2}}{Y_{S2}^{-1}} + I_{ZS2} \quad I_{R2} := \frac{V_{R2}}{Y_{R2}^{-1}} + I_{ZR2}$$

$$I_{S0} := \frac{V_{S0}}{Y_{S0}^{-1}} + I_{ZS0} \quad I_{R0} := \frac{V_{R0}}{Y_{R0}^{-1}} + I_{ZR0}$$

Οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών είναι:

**Ζυγός S:**

$$\begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.0563 \times 10^5 - 3.6061i \times 10^3 \\ -1.2192 \times 10^5 - 2.0256i \times 10^5 \\ -1.2158 \times 10^5 + 2.0131i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.0567 \times 10^5 \\ 2.3642 \times 10^5 \\ 2.3517 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.0047 \\ -121.0436 \\ 121.1307 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 306.574 - 1.2931i \times 10^3 \\ 128.5037 - 52.2514i \\ -129.8805 - 51.7974i \end{pmatrix} A$$

$$+ \begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.329 \times 10^3 \\ 138.7206 \\ 139.8282 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -76.6627 \\ -22.1274 \\ -158.2575 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.6797 \times 10^5 - 7.7181i \times 10^3 \\ -1.3126 \times 10^5 - 2.0311i \times 10^5 \\ -1.3092 \times 10^5 + 2.0075i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.6815 \times 10^5 \\ 2.4184 \times 10^5 \\ 2.3967 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.6308 \\ -122.8721 \\ 123.1115 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} I_{Ra} \\ I_{Rb} \\ I_{Rc} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 699.1108 - 3.2236i \times 10^3 \\ 121.9328 - 129.522i \\ -136.4514 - 129.0679i \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2985 \times 10^3 \\ 177.8864 \\ 187.8231 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.7635 \\ -46.7287 \\ -136.5929 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

### **Μετρήσεις των PMUs στους ζυγούς S και R**

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τα PMUs στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, εκφρασμένες σε ανα φάση μεγέθη είναι είναι:

### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.0563 \times 10^5 - 3.6061i \times 10^3 \\ -1.2192 \times 10^5 - 2.0256i \times 10^5 \\ -1.2158 \times 10^5 + 2.0131i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.0567 \times 10^5 \\ 2.3642 \times 10^5 \\ 2.3517 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.0047 \\ -121.0436 \\ 121.1307 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 306.574 - 1.2931i \times 10^3 \\ 128.5037 - 52.2514i \\ -129.8805 - 51.7974i \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.329 \times 10^3 \\ 138.7206 \\ 139.8282 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -76.6627 \\ -22.1274 \\ -158.2575 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.6797 \times 10^5 - 7.7181i \times 10^3 \\ -1.3126 \times 10^5 - 2.0311i \times 10^5 \\ -1.3092 \times 10^5 + 2.0075i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.6815 \times 10^5 \\ 2.4184 \times 10^5 \\ 2.3967 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.6308 \\ -122.8721 \\ 123.1115 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Ra}} \\ \underline{I_{Rb}} \\ \underline{I_{Rc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 699.1108 - 3.2236i \times 10^3 \\ 121.9328 - 129.522i \\ -136.4514 - 129.0679i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2985 \times 10^3 \\ 177.8864 \\ 187.8231 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.7635 \\ -46.7287 \\ -136.5929 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Συνεπώς τα αντίστοιχα ακολουθιακά μεγέθη, όπως τα υπολογίζει ο H/N είναι:

#### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{S0}} \\ \underline{V_{S1}} \\ \underline{V_{S2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.2622 \times 10^4 - 1.619i \times 10^3 \\ 2.2571 \times 10^5 - 1.0875i \times 10^3 \\ -7.4553 \times 10^3 - 899.6097i \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{S0}| \\ |V_{S1}| \\ |V_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.2726 \times 10^4 \\ 2.2571 \times 10^5 \\ 7.5094 \times 10^3 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{S0}) \\ \arg(V_{S1}) \\ \arg(V_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -172.6907 \\ -0.2761 \\ -173.1196 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{S0}} \\ \underline{I_{S1}} \\ \underline{I_{S2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 101.7324 - 465.7306i \\ 102.55 - 339.12i \\ 102.2916 - 488.2939i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{S0}| \\ |I_{S1}| \\ |I_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 476.7122 \\ 354.2865 \\ 498.8933 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{S0}) \\ \arg(I_{S1}) \\ \arg(I_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.6781 \\ -73.1747 \\ -78.1683 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{R0}} \\ \underline{V_{R1}} \\ \underline{V_{R2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.1404 \times 10^4 - 3.3609i \times 10^3 \\ 2.1627 \times 10^5 - 2.2726i \times 10^3 \\ -1.6896 \times 10^4 - 2.0847i \times 10^3 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{R0}| \\ |V_{R1}| \\ |V_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1583 \times 10^4 \\ 2.1628 \times 10^5 \\ 1.7024 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{R0}) \\ \arg(V_{R1}) \\ \arg(V_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -173.8915 \\ -0.602 \\ -172.9661 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{R0}} \\ \underline{I_{R1}} \\ \underline{I_{R2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Ra} \\ I_{Rb} \\ I_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 228.1974 - 1.1607i \times 10^3 \\ 235.5858 - 956.8448i \\ 235.3274 - 1.106i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{R0}| \\ |I_{R1}| \\ |I_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1829 \times 10^3 \\ 985.42 \\ 1.1308 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{R0}) \\ \arg(I_{R1}) \\ \arg(I_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -78.8776 \\ -76.1683 \\ -77.9883 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

## Fault Location - Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα LG-AG

SRM - Simple Reactance Method - Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης

$$k := \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad V_S := V_{Sa} \quad I_S := I_{Sa} + k \cdot I_{S0}$$

$$m_{SRM} := \frac{\text{Im}\left(\frac{V_S}{I_S}\right)}{\text{Im}(Z_1)} = 0.7634 \quad \text{error}_{SRM} := m_{SRM} - m = 1.3391\%$$

TAK0 - Takagi Method Ρευματος Μηδενικής Ακολουθίας

$$m_{TAK0} := \frac{\text{Im}(V_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})} = 0.7614 \quad \text{error}_{TAK0} := m_{TAK0} - m = 1.1405\%$$

TAK2 - Takagi Method Ρευματος Αρνητικής Ακολουθίας

$$m_{TAK2} := \frac{\text{Im}(V_S \cdot \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot \overline{I_{S2}})} = 0.7615 \quad \text{error}_{TAK2} := m_{TAK2} - m = 1.1532\%$$

MTAK0 - Modified Takagi Method Ρευματος Μηδενικής Ακολουθίας

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})} = 0.7614$$

$$d_0 := \frac{Z_{GS0} + Z_0 + Z_{GR0}}{(1 - n)Z_0 + Z_{GR0}} = 3.6853 - 0.0845i \quad \text{beta}_0 := \arg(d_0) = -0.0229$$

$$m_{MTAK0} := \frac{\text{Im}\left(\overline{3 \cdot I_{S0}} \cdot V_S \cdot e^{-j \cdot \text{beta}_0}\right)}{\text{Im}\left(\overline{3 \cdot I_{S0}} \cdot Z_1 \cdot I_S \cdot e^{-j \text{beta}_0}\right)} = 0.7617 \quad \text{error}_{MTAK0} := m_{MTAK0} - m = 1.1744\%$$

MTAK2 - Modified Takagi Method Ρευματος Αρνητικής Ακολουθίας

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot \overline{I_{S2}})} = 0.7615$$

$$d_2 := \frac{Z_{GS2} + Z_2 + Z_{GR2}}{(1 - n)Z_2 + Z_{GR2}} = 3.4024 + 5.0298i \times 10^{-3} \quad \text{beta}_2 := \arg(d_2) = 1.4783 \times 10^{-3}$$

$$m_{MTAK2} := \frac{\text{Im}\left(\overline{I_{S2}} \cdot V_S \cdot e^{-j \cdot \text{beta}_2}\right)}{\text{Im}\left(\overline{I_{S2}} \cdot Z_1 \cdot I_S \cdot e^{-j \text{beta}_2}\right)} = 0.7615 \quad \text{error}_{MTAK2} := m_{MTAK2} - m = 1.151\%$$

WIS - Wiszniewski Method

$$Z_{\text{relay}} := \frac{V_S}{I_S} = (8.1939 + 85.2059i) \Omega$$

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot \overline{I_{S2}})} = 0.7615$$

$$d_1 := \left[ \frac{Z_{GS1} + Z_1 + Z_{GR1}}{(1 - n)Z_1 + Z_{GR1}} \right]^{-1} = 0.2939 - 4.3448i \times 10^{-4} \quad \text{beta}_1 := \arg(d_1) = -1.4783 \times 10^{-3}$$

$$\alpha := \text{Re}\left(\frac{I_{S2}}{I_S \cdot e^{i \text{beta}_1}}\right) \quad \text{beta} := \text{Im}\left(\frac{I_{S2}}{I_S \cdot e^{i \text{beta}_1}}\right)$$

$$\text{angle}_{Z1} := \arg(Z_1) = 85.5711 \cdot \text{deg}$$

$$m_{\text{WIS}} := \frac{\text{Im}(Z_{\text{relay}})}{X_1} - \frac{\frac{\text{Re}(Z_{\text{relay}}) \cdot \tan(\text{angle}_{Z1})}{X_1} - \frac{\text{Im}(Z_{\text{relay}})}{X_1}}{\frac{\alpha \cdot \tan(\text{angle}_{Z1})}{\beta} - 1} = 0.7615$$

$$\text{error}_{\text{WIS}} := m_{\text{WIS}} - m = 1.151\%$$

#### ERI - Eriksson Method

$$k_1 := 1 + \frac{Z_{\text{GR1}}}{Z_1} + \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} \quad \underline{\underline{a}} := \text{Re}(k_1) \quad b := \text{Im}(k_1)$$

$$k_2 := \left(1 + \frac{Z_{\text{GR1}}}{Z_1}\right) \cdot \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} \quad \underline{\underline{c}} := \text{Re}(k_2) \quad d := \text{Im}(k_2)$$

$$k_3 := \left(1 + \frac{Z_{\text{GR1}} + Z_{\text{GS1}}}{Z_1}\right) \cdot \frac{3I_{S2}}{Z_1 \cdot I_S} \quad \underline{\underline{e}} := \text{Re}(k_3) \quad f := \text{Im}(k_3)$$

$$m_{1\text{ERI}} := \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) + \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 1.1343$$

$$m_{2\text{ERI}} := \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) - \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 0.7615$$

$$m_{\text{ERI}}(m_{1\text{ERI}}, m_{2\text{ERI}}) := \begin{cases} m_{1\text{ERI}} & \text{if } 0 < m_{1\text{ERI}} < 1 \\ m_{2\text{ERI}} & \text{if } 0 < m_{2\text{ERI}} < 1 \\ m_{1\text{ERI}} & \text{if } [(m_{1\text{ERI}} > 1) \wedge (m_{2\text{ERI}} > 1) \wedge (m_{1\text{ERI}} < m_{2\text{ERI}})] \\ m_{2\text{ERI}} & \text{if } [(m_{1\text{ERI}} > 1) \wedge (m_{2\text{ERI}} > 1) \wedge (m_{2\text{ERI}} < m_{1\text{ERI}})] \\ m_{1\text{ERI}} & \text{if } m_{2\text{ERI}} < 0 \\ m_{2\text{ERI}} & \text{if } m_{1\text{ERI}} < 0 \end{cases}$$

$$m_{\text{ERI}}(m_{1\text{ERI}}, m_{2\text{ERI}}) = 0.7615 \quad \text{error}_{\text{ERI}} := m_{\text{ERI}}(m_{1\text{ERI}}, m_{2\text{ERI}}) - m = 1.151\%$$

$$R_{\text{fERI}} := \frac{m_{\text{ERI}}(m_{1\text{ERI}}, m_{2\text{ERI}})^2 - a \cdot m_{\text{ERI}}(m_{1\text{ERI}}, m_{2\text{ERI}}) + c}{e} = 0.7664 \, \Omega$$

$$\underline{\underline{\text{error}}} := \frac{R_{\text{fERI}} - R_F}{R_F} = -23.3588\%$$

#### Sm2 και Sm1 - Synchronized Method - Μοντέλο Μικρού Μήκους

$$m_{\text{Sm2}} := \left| \frac{V_{S2} - V_{R2} + Z_2 \cdot I_{R2}}{(I_{S2} + I_{R2}) \cdot Z_2} \right| = 0.746 \quad \underline{\underline{\text{error}}} := m_{\text{Sm2}} - m = -0.398\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{\text{Sm2}} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.9681 \times 10^5 - 7.4394i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{\text{Sm2}} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (-4.8774 \times 10^4 - 6.268i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{\text{Sm2}} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (-1.4307 \times 10^5 + 9.8931i \times 10^3) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.9686 \times 10^3 - 3.8142i \times 10^3 \\ -2.1809 \times 10^5 - 1.9593i \times 10^5 \\ -2.1607 \times 10^5 + 2.2942i \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.2638 \times 10^3 \\ 2.9318 \times 10^5 \\ 3.1515 \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sa} + I_{Ra} = (1.0057 \times 10^3 - 4.5167i \times 10^3) A \quad |I_{F\_relay}| = 4.6273 \times 10^3 A$$

$$R_{fSm2} := \operatorname{Re} \left( \frac{V_{Fa\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 1.0379 \Omega \quad |R_{fSm2}| = 1.0379 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSm2} - R_F}{R_F} = 3.7938\%$$

$$m_{Sm1} := \left| \frac{V_{S1} - V_{R1} + Z_1 \cdot I_{R1}}{(I_{S1} + I_{R1}) \cdot Z_1} \right| = 0.7992 \quad \text{error} := m_{Sm1} - m = 4.9156\%$$

Με γνωστό το m, υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{Sm1} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.9475 \times 10^5 - 7.8918i \times 10^3) V$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{Sm1} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (-5.1717 \times 10^4 - 6.6503i \times 10^3) V$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{Sm1} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (-1.5236 \times 10^5 + 1.0713i \times 10^4) V$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -9.3238 \times 10^3 - 3.829i \times 10^3 \\ -2.2494 \times 10^5 - 1.9546i \times 10^5 \\ -2.228 \times 10^5 + 2.3143i \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.2638 \times 10^3 \\ 2.9318 \times 10^5 \\ 3.1515 \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sa} + I_{Ra} = (1.0057 \times 10^3 - 4.5167i \times 10^3) A \quad |I_{F\_relay}| = 4.6273 \times 10^3 A$$

$$R_{fSm1} := \operatorname{Re} \left( \frac{V_{Fa\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 0.3698 \Omega \quad |R_{fSm1}| = 0.3698 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSm1} - R_F}{R_F} = -63.0217\%$$

#### SCD - Μέθοδος Διαφορικού Ρεύματος

$$I_{pol} := I_{S2} + I_{R2}$$

$$m_{SCD} := \frac{\operatorname{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot V_S)}{\operatorname{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot I_S \cdot Z_1)} = 0.7615 \quad \text{error} := m_{SCD} - m = 1.15\%$$

Με γνωστό το m, υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{SCD} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.9621 \times 10^5 - 7.5712i \times 10^3) V$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{SCD} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (-4.9631 \times 10^4 - 6.3793i \times 10^3) V$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{SCD} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (-1.4577 \times 10^5 + 1.0132i \times 10^4) V$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 804.9266 - 3.8185i \times 10^3 \\ -2.2009 \times 10^5 - 1.9579i \times 10^5 \\ -2.1803 \times 10^5 + 2.3001i \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.9024 \times 10^3 \\ 2.9457 \times 10^5 \\ 3.1692 \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sa} + I_{Ra} = (1.0057 \times 10^3 - 4.5167i \times 10^3) A \quad |I_{F\_relay}| = 4.6273 \times 10^3 A$$

$$R_{fSCD} := \operatorname{Re} \left( \frac{V_{Fa\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 0.8433 \Omega \quad |R_{fSCD}| = 0.8433 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSCD} - R_F}{R_F} = -15.6709\%$$

## SM1 - Synchronized Method - Μοντέλο Γραμμής Μεγάλου Μήκους

$$k_1 := \frac{V_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l) - V_{S1}}{V_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{S1}} = 0.0118 + 0.2897i$$

$$m_{SM1} := \operatorname{Re}\left(\frac{\operatorname{atanh}(k_1)}{\gamma_1 \cdot l}\right) = 0.75 \quad \text{error} := m_{SM1} - m = 1.0501 \times 10^{-4} \%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{S1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (1.8815 \times 10^5 - 6.691i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} \cdot \cosh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C2} \cdot I_{S2} \cdot \sinh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (-4.8145 \times 10^4 - 6.2549i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C0} \cdot I_{S0} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (-1.3901 \times 10^5 + 8.2737i \times 10^3) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 992.398 - 4.6721i \times 10^3 \\ -2.0938 \times 10^5 - 1.8988i \times 10^5 \\ -2.0864 \times 10^5 + 2.1938i \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.7764 \times 10^3 \\ 2.8266 \times 10^5 \\ 3.0275 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$Y_{S1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l}{2}\right) \quad Y_{R1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left[\frac{\gamma_1 \cdot (1 - m_{SM1}) \cdot l}{2}\right]$$

$$I_{thSa\_relay} := I_{Sa} - V_{Sa} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fa\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (302.5715 - 1.3918i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{thRa\_relay} := I_{Ra} - V_{Ra} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fa\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (697.1494 - 3.2503i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{F\_relay} := I_{thSa\_relay} + I_{thRa\_relay} \quad |I_{F\_relay}| = 4.7485 \times 10^3 \text{ A}$$

$$R_{fSM1} := \operatorname{Re}\left(\frac{V_{Fa\_relay}}{I_{F\_relay}}\right) = 1.0059 \Omega \quad |R_{fSM1}| = 1.0059 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSM1} - R_F}{R_F} = 0.5859 \%$$

## LG-AG, All Results Panel

$$m_{SRM} = 0.7634$$

$$m_{TAK0} = 0.7614 \quad m_{MTAK0} = 0.7617$$

$$m_{TAK2} = 0.7615 \quad m_{MTAK2} = 0.7615$$

$$m_{WIS} = 0.7615$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) = 0.7615 \quad |R_{fERI}| = 0.7664 \Omega$$

$$m_{Sm2} = 0.746 \quad |R_{fSm2}| = 1.0379 \Omega$$

$$m_{Sm1} = 0.7992 \quad |R_{fSm1}| = 0.3698 \Omega$$

$$m_{SCD} = 0.7615 \quad |R_{fSCD}| = 0.8433 \Omega$$

$$m_{XU} = 0.7538$$

$$m_{SM1} = 0.75 \quad |R_{fSM1}| = 1.0059 \Omega$$



### Υπολογισμός Μεγεθών κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη LL-BC

$$Z_{total} := Z_{th1} + Z_{th2} + R_F$$

$$I_{F1} := \frac{E_1}{Z_{total}} \quad I_{F2} := -I_{F1} \quad I_{F0} := 0$$

$$V_{F1} := E_1 \cdot \frac{Z_{th2} + R_F}{Z_{th1} + Z_{th2} + R_F} = (1.1834 \times 10^5 - 2.1503i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2} := E_1 \cdot \frac{Z_{th2}}{Z_{th1} + Z_{th2} + R_F} \quad V_{F0} := 0$$

$$\begin{pmatrix} |I_{F0}| \\ |I_{F1}| \\ |I_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3.8701 \times 10^3 \\ 3.8701 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{F0}) \\ \arg(I_{F1}) \\ \arg(I_{F2}) \end{pmatrix} = \mathbf{1} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{F0}| \\ |V_{F1}| \\ |V_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.1836 \times 10^5 \\ 1.1798 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{F0}) \\ \arg(V_{F1}) \\ \arg(V_{F2}) \end{pmatrix} = \mathbf{1} \cdot \text{deg}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης είναι:

$$\begin{pmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \\ I_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -6.6722 \times 10^3 - 642.2666i \\ 6.6722 \times 10^3 + 642.2666i \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Fa}| \\ |I_{Fb}| \\ |I_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 6.7031 \times 10^3 \\ 6.7031 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Fa}) \\ \arg(I_{Fb}) \\ \arg(I_{Fc}) \end{pmatrix} = \mathbf{1} \cdot \text{deg}$$

Ενώ οι τάσεις είναι:

$$\begin{pmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0} \\ V_{F1} \\ V_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3631 \times 10^5 - 448.182i \\ -1.2148 \times 10^5 - 97.0522i \\ -1.1481 \times 10^5 + 545.2144i \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Fa}| \\ |V_{Fb}| \\ |V_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3631 \times 10^5 \\ 1.2148 \times 10^5 \\ 1.1481 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Fa}) \\ \arg(V_{Fb}) \\ \arg(V_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.1087 \\ -179.9542 \\ 179.7279 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης S και άφιξης R της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι.

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο του βραχυκυκλώματος, σε κάθε ακολουθιακό κύκλωμα έχουμε:

$$\underline{I_{thS1}} := I_{F1} \cdot \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thS1} - V_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad \underline{I_{thR1}} := I_{F1} \cdot \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thR1} - V_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}}$$

$$\underline{I_{thS2}} := I_{F2} \cdot \frac{Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad \underline{I_{thR2}} := I_{F2} \cdot \frac{Z_{thS2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}}$$

$$\underline{I_{thS0}} := I_{F0} \cdot \frac{Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad \underline{I_{thR0}} := I_{F0} \cdot \frac{Z_{thS0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}}$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff :

$$\underline{I_{ZS1}} := I_{thS1} + \frac{V_{F1}}{Y_{S1} - 1} \quad \underline{I_{ZR1}} := I_{thR1} + \frac{V_{F1}}{Y_{R1} - 1}$$

$$\underline{I_{ZS2}} := I_{thS2} + \frac{V_{F2}}{Y_{S2} - 1} \quad \underline{I_{ZR2}} := I_{thR2} + \frac{V_{F2}}{Y_{R2} - 1}$$

$$\underline{I_{ZS0}} := I_{thS0} + \frac{V_{F0}}{Y_{S0} - 1} \quad \underline{I_{ZR0}} := I_{thR0} + \frac{V_{F0}}{Y_{R0} - 1}$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας είναι:

$$\underline{V_{S1}} := V_{F1} + Z_{S1} \cdot I_{ZS1} \quad \underline{V_{R1}} := V_{F1} + Z_{R1} \cdot I_{ZR1}$$

$$\underline{V_{S2}} := V_{F2} + Z_{S2} \cdot I_{ZS2} \quad \underline{V_{R2}} := V_{F2} + Z_{R2} \cdot I_{ZR2}$$

$$\underline{V_{S0}} := V_{F0} + Z_{S0} \cdot I_{ZS0} \quad \underline{V_{R0}} := V_{F0} + Z_{R0} \cdot I_{ZR0}$$

Στους ζυγούς τα ακολουθιακά ρεύματα είναι:

$$\underline{I_{S1}} := \frac{V_{S1}}{Y_{S1} - 1} + I_{ZS1} \quad \underline{I_{R1}} := \frac{V_{R1}}{Y_{R1} - 1} + I_{ZR1}$$

$$\underline{I_{S2}} := \frac{V_{S2}}{Y_{S2} - 1} + I_{ZS2} \quad \underline{I_{R2}} := \frac{V_{R2}}{Y_{R2} - 1} + I_{ZR2}$$

$$\underline{I_{S0}} := \frac{V_{S0}}{Y_{S0} - 1} + I_{ZS0} \quad \underline{I_{R0}} := \frac{V_{R0}}{Y_{R0} - 1} + I_{ZR0}$$

Οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών είναι:

**Ζυγός S:**

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Sa}} \\ \underline{V_{Sb}} \\ \underline{V_{Sc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 - 199.7167i \\ -1.169 \times 10^5 - 1.7022i \times 10^5 \\ -1.1627 \times 10^5 + 1.7042i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 \\ 2.0649 \times 10^5 \\ 2.063 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0491 \\ -124.4798 \\ 124.3044 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Sa}} \\ \underline{I_{Sb}} \\ \underline{I_{Sc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2659 + 149.1826i \\ -1.9618 \times 10^3 - 267.473i \\ 1.9615 \times 10^3 + 118.2969i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 149.1828 \\ 1.9799 \times 10^3 \\ 1.9651 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.8979 \\ -172.2361 \\ 3.4512 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Ra}} \\ \underline{V_{Rb}} \\ \underline{V_{Rc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 - 199.7167i \\ -1.1731 \times 10^5 - 1.3017i \times 10^5 \\ -1.1586 \times 10^5 + 1.3037i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 \\ 1.7523 \times 10^5 \\ 1.7441 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0491 \\ -132.0242 \\ 131.6261 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Ra}} \\ \underline{I_{Rb}} \\ \underline{I_{Rc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2659 + 149.1826i \\ -4.6086 \times 10^3 - 526.3981i \\ 4.6083 \times 10^3 + 377.2221i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 149.1828 \\ 4.6386 \times 10^3 \\ 4.6237 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.8979 \\ -173.4839 \\ 4.6796 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### **Μετρήσεις των PMUs στους ζυγούς S και R**

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τα PMUs στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, εκφρασμένες σε ανα φάση μεγέθη είναι είναι:

#### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Sa}} \\ \underline{V_{Sb}} \\ \underline{V_{Sc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 - 199.7167i \\ -1.169 \times 10^5 - 1.7022i \times 10^5 \\ -1.1627 \times 10^5 + 1.7042i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 \\ 2.0649 \times 10^5 \\ 2.063 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0491 \\ -124.4798 \\ 124.3044 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Sa}} \\ \underline{I_{Sb}} \\ \underline{I_{Sc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2659 + 149.1826i \\ -1.9618 \times 10^3 - 267.473i \\ 1.9615 \times 10^3 + 118.2969i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 149.1828 \\ 1.9799 \times 10^3 \\ 1.9651 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.8979 \\ -172.2361 \\ 3.4512 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Ra}} \\ \underline{V_{Rb}} \\ \underline{V_{Rc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 - 199.7167i \\ -1.1731 \times 10^5 - 1.3017i \times 10^5 \\ -1.1586 \times 10^5 + 1.3037i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3318 \times 10^5 \\ 1.7523 \times 10^5 \\ 1.7441 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0491 \\ -132.0242 \\ 131.6261 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Ra}} \\ \underline{I_{Rb}} \\ \underline{I_{Rc}} \end{pmatrix} = A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2659 + 149.1826i \\ -4.6086 \times 10^3 - 526.3981i \\ 4.6083 \times 10^3 + 377.2221i \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 149.1828 \\ 4.6386 \times 10^3 \\ 4.6237 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.8979 \\ -173.4839 \\ 4.6796 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Συνεπώς τα αντίστοιχα ακολουθιακά μεγέθη, όπως τα υπολογίζει ο H/N είναι:

### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{S0}} \\ \underline{V_{S1}} \\ \underline{V_{S2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.4199 - 2.9292i \times 10^{-3} \\ 2.1491 \times 10^5 - 278.9238i \\ 1.8256 \times 10^4 + 79.2129i \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{S0}| \\ |V_{S1}| \\ |V_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.4199 \\ 2.1491 \times 10^5 \\ 1.8256 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{S0}) \\ \arg(V_{S1}) \\ \arg(V_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0491 \\ -0.0744 \\ 0.2486 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{S0}} \\ \underline{I_{S1}} \\ \underline{I_{S2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.9005 \times 10^{-6} + 2.188i \times 10^{-3} \\ 111.5207 - 1.0579i \times 10^3 \\ -111.2547 + 1.2071i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{S0}| \\ |I_{S1}| \\ |I_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.188 \times 10^{-3} \\ 1.0638 \times 10^3 \\ 1.2122 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{S0}) \\ \arg(I_{S1}) \\ \arg(I_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.8979 \\ -83.9825 \\ 95.2658 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{R0}} \\ \underline{V_{R1}} \\ \underline{V_{R2}} \end{pmatrix} = A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.4199 - 2.9292i \times 10^{-3} \\ 1.918 \times 10^5 - 516.9505i \\ 4.1374 \times 10^4 + 317.2396i \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{R0}| \\ |V_{R1}| \\ |V_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.4199 \\ 1.918 \times 10^5 \\ 4.1375 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{R0}) \\ \arg(V_{R1}) \\ \arg(V_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0491 \\ -0.1544 \\ 0.4393 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Ra} \\ I_{Rb} \\ I_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.9005 \times 10^{-6} + 2.188i \times 10^{-3} \\ 261.0456 - 2.586i \times 10^3 \\ -260.7796 + 2.7352i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{R0}| \\ |I_{R1}| \\ |I_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.188 \times 10^{-3} \\ 2.5992 \times 10^3 \\ 2.7476 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{R0}) \\ \arg(I_{R1}) \\ \arg(I_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.8979 \\ -84.2358 \\ 95.4462 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

## Fault Location - Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς γη LL-BC

SRM - Simple Reactance Method - Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης

$$V_S := V_{Sb} - V_{Sc} \quad I_S := I_{Sb} - I_{Sc}$$

$$m_{SRM} := \frac{\text{Im}\left(\frac{V_S}{I_S}\right)}{\text{Im}(Z_1)} = 0.7703 \quad \text{error}_{SRM} := m_{SRM} - m = 2.0285\%$$

TAK2 - Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας

$$m_{TAK2} := \frac{\text{Im}(V_S \cdot j \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot j \overline{I_{S2}})} = 0.7704 \quad \text{error}_{TAK2} := m_{TAK2} - m = 2.0391\%$$

MTAK2 - Modified Takagi Method Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot j \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot j \overline{I_{S2}})} = 0.7704$$

$$d_1 := \frac{Z_{GS2} + Z_2 + Z_{GR2}}{(1-n)Z_2 + Z_{GR2}} = 3.4852 + 5.4563i \times 10^{-3} \quad \beta_{21} := \arg(d_1) = 1.5656 \times 10^{-3}$$

$$m_{MTAK2} := \frac{\text{Im}(j \overline{I_{S2}} \cdot V_S \cdot \exp(-j \cdot \beta_{21}))}{\text{Im}(j \overline{I_{S2}} \cdot Z_1 \cdot I_S \cdot \exp(-j \cdot \beta_{21}))} = 0.7704 \quad \text{error}_{MTAK2} := m_{MTAK2} - m = 2.0364\%$$

WIS - Wiszniewski Method

$$Z_{relay} := \frac{V_S}{I_S} = (8.614 + 85.9753i) \Omega$$

$$m_{TAK2} := \frac{\text{Im}(V_S \cdot j \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot j \overline{I_{S2}})} = 0.7704$$

$$d_1 := \left[ \frac{Z_{GS1} + Z_1 + Z_{GR1}}{(1-n)Z_1 + Z_{GR1}} \right]^{-1} = 0.2869 - 4.492i \times 10^{-3} \quad \beta_{21} := \arg(d_1) = -1.5656 \times 10^{-3}$$

$$\alpha := \text{Re}\left(\frac{j \cdot I_{S2}}{I_S \cdot \exp(i \beta_{21})}\right) \quad \beta := \text{Im}\left(\frac{j \cdot I_{S2}}{I_S \cdot \exp(i \beta_{21})}\right)$$

$$\text{angle}_{Z1} := \arg(Z_1) = 85.5711 \cdot \text{deg}$$

$$m_{WIS} := \frac{\text{Im}(Z_{relay})}{X_1} - \frac{\frac{\text{Re}(Z_{relay}) \cdot \tan(\text{angle}_{Z1})}{X_1} - \frac{\text{Im}(Z_{relay})}{X_1}}{\frac{\alpha \cdot \tan(\text{angle}_{Z1})}{\beta} - 1} = 0.7704 \quad \text{error}_{WIS} := m_{WIS} - m = 2.0364\%$$

### ERI - Eriksson Method

$$k_1 := 1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} \quad a := \operatorname{Re}(k_1) \quad b := \operatorname{Im}(k_1)$$

$$k_2 := \left(1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1}\right) \cdot \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} \quad c := \operatorname{Re}(k_2) \quad d := \operatorname{Im}(k_2)$$

$$k_3 := \left(1 + \frac{Z_{GR1} + Z_{GS1}}{Z_1}\right) \cdot \frac{j \cdot I_{S2}}{Z_1 \cdot I_S} \quad e := \operatorname{Re}(k_3) \quad f := \operatorname{Im}(k_3)$$

$$m_{1ERI} := \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) + \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 1.1345$$

$$m_{2ERI} := \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) - \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 0.7704$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) := \begin{cases} m_{1ERI} & \text{if } 0 < m_{1ERI} < 1 \\ m_{2ERI} & \text{if } 0 < m_{2ERI} < 1 \\ m_{1ERI} & \text{if } [(m_{1ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} > 1) \wedge (m_{1ERI} < m_{2ERI})] \\ m_{2ERI} & \text{if } [(m_{1ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} < m_{1ERI})] \\ m_{1ERI} & \text{if } m_{2ERI} < 0 \\ m_{2ERI} & \text{if } m_{1ERI} < 0 \end{cases}$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) = 0.7704 \quad error_{ERI} := m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) - m = 2.0364\%$$

$$R_{ERI} := \frac{m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI})^2 - a \cdot m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) + c}{e} = 1.8236 \Omega \quad error := \frac{R_{ERI} - R_F}{R_F} = 82.3641\%$$

### Sm2 και Sm1 - Synchronized Method - Μοντέλο Μικρού Μήκους

$$m_{Sm2} := \frac{|V_{S2} - V_{R2} + Z_2 \cdot I_{R2}|}{(I_{S2} + I_{R2}) \cdot Z_2} = 0.746 \quad error := m_{Sm2} - m = -0.3982\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{Sm2} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.261 \times 10^5 - 2.7419i \times 10^3) V$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{Sm2} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (1.1949 \times 10^5 + 1.5579i \times 10^3) V$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{Sm2} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (3.9933 - 0.1833i) V$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4559 \times 10^5 - 1.1841i \times 10^3 \\ -1.2651 \times 10^5 - 5.1387i \times 10^3 \\ -1.1906 \times 10^5 + 6.3223i \times 10^3 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.456 \times 10^5 \\ 1.2661 \times 10^5 \\ 1.1923 \times 10^5 \end{pmatrix} V$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sb} + I_{Rb} = (-6.5704 \times 10^3 - 793.871i) A \quad |I_{F\_relay}| = 6.6182 \times 10^3 A$$

$$R_{FSm2} := \operatorname{Re}\left(\frac{V_{Fb\_relay} - V_{Fc\_relay}}{I_{F\_relay}}\right) = 1.3248 \Omega \quad |R_{FSm2}| = 1.3248 \Omega \quad error := \frac{R_{FSm2} - R_F}{R_F} = 32.4834\%$$



$$m_{Sm1} := \left| \frac{V_{S1} - V_{R1} + Z_1 \cdot I_{R1}}{(I_{S1} + I_{R1}) \cdot Z_1} \right| = 0.766 \quad \text{error} := m_{Sm1} - m = 1.5954\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{Sm1} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.2373 \times 10^5 - 2.8077i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{Sm1} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (1.2219 \times 10^5 + 1.5974i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{Sm1} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (4.0086 - 0.1882i) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4593 \times 10^5 - 1.2104i \times 10^3 \\ -1.2677 \times 10^5 - 727.6533i \\ -1.1914 \times 10^5 + 1.9375i \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4593 \times 10^5 \\ 1.2677 \times 10^5 \\ 1.1915 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sb} + I_{Rb} = (-6.5704 \times 10^3 - 793.871i) \text{ A} \quad |I_{F\_relay}| = 6.6182 \times 10^3 \text{ A}$$

$$R_{FSm1} := \text{Re} \left( \frac{V_{Fb\_relay} - V_{Fc\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 1.1928 \Omega \quad |R_{FSm1}| = 1.1928 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{FSm1} - R_F}{R_F} = 19.2811\%$$

#### SCD - Μέθοδος Διαφορικού Ρεύματος

$$I_{pol} := I_{Sb} + I_{Rb} - (I_{Sc} + I_{Rc})$$

$$m_{SCD} := \frac{\text{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot V_S)}{\text{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot I_S \cdot Z_1)} = 0.7703 \quad \text{error} := m_{SCD} - m = 2.0288\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{SCD} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.2321 \times 10^5 - 2.822i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{SCD} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (1.2278 \times 10^5 + 1.606i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{SCD} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (4.0119 - 0.1892i) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.46 \times 10^5 - 1.2162i \times 10^3 \\ -1.2682 \times 10^5 + 231.2961i \\ -1.1915 \times 10^5 + 984.2456i \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.46 \times 10^5 \\ 1.2682 \times 10^5 \\ 1.1916 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sb} + I_{Rb} = (-6.5704 \times 10^3 - 793.871i) \text{ A} \quad |I_{F\_relay}| = 6.6182 \times 10^3 \text{ A}$$

$$R_{FSCD} := \text{Re} \left( \frac{V_{Fb\_relay} - V_{Fc\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 1.1641 \Omega \quad |R_{FSCD}| = 1.1641 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{FSCD} - R_F}{R_F} = 16.411\%$$

#### XU Method

$$Z_{relay} := \frac{(V_{Sb} - V_{Sc})}{(I_{Sb} - I_{Sc})}$$

$$m_{XU} := \text{Re} \left( \frac{\text{atanh} \left( \frac{Z_{relay}}{Z_{C1}} \right)}{\gamma_1 - 1} \right) = 0.7512 \quad \text{error}_{XU} := m_{XU} - m = 0.1166\%$$

### SM1 - Synchronized Method - Μοντέλο Γραμμής Μεγάλου Μήκους

$$k_1 := \frac{V_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l) - V_{S1}}{V_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{S1}} = 0.0118 + 0.2897i$$

$$m_{SM1} := \operatorname{Re}\left(\frac{\operatorname{atanh}(k_1)}{\gamma_1 \cdot l}\right) = 0.75 \quad \text{error} := m_{SM1} - m = 0\%$$

Με γνωστό το m, υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{S1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (1.1833 \times 10^5 - 2.1501i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} \cdot \cosh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C2} \cdot I_{S2} \cdot \sinh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (1.1796 \times 10^5 + 1.702i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C0} \cdot I_{S0} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (3.6906 - 0.0842i) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} = A_1 \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.363 \times 10^5 - 448.2531i \\ -1.2148 \times 10^5 - 97.2937i \\ -1.148 \times 10^5 + 545.2743i \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.363 \times 10^5 \\ 1.2148 \times 10^5 \\ 1.1481 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$Y_{S1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l}{2}\right) \quad Y_{S2\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left[\frac{\gamma_1 \cdot (1 - m_{SM1}) \cdot l}{2}\right]$$

$$I_{thSb\_relay} := I_{Sb} - V_{Sb} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fb\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (-2.043 \times 10^3 - 153.6447i) \text{ A}$$

$$I_{thRb\_relay} := I_{Rb} - V_{Rb} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fb\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (-4.6292 \times 10^3 - 488.6266i) \text{ A}$$

$$I_{F\_relay} := I_{thSb\_relay} + I_{thRb\_relay} \quad |I_{F\_relay}| = 6.7031 \times 10^3 \text{ A}$$

$$R_{FSM1} := \operatorname{Re}\left(\frac{V_{Fb\_relay} - V_{Fc\_relay}}{I_{F\_relay}}\right) = 0.9999 \Omega \quad |R_{FSM1}| = 0.9999 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{FSM1} - R_F}{R_F} = -5.8757 \times 10^{-3} \%$$

### LL- BC, All Results Panel

$$m_{SRM} = 0.7703$$

$$m_{TAK2} = 0.7704 \quad m_{MTAK2} = 0.7704$$

$$m_{VIS} = 0.7704$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) = 0.7704 \quad |R_{fERI}| = 1.8236 \Omega$$

$$m_{Sm2} = 0.746 \quad |R_{fSm2}| = 1.3248 \Omega$$

$$m_{Sm1} = 0.766 \quad |R_{fSm1}| = 1.1928 \Omega$$

$$m_{SCD} = 0.7703 \quad |R_{fSCD}| = 1.1641 \Omega$$

$$m_{XU} = 0.7512$$

$$m_{SM1} = 0.75 \quad |R_{fSM1}| = 0.9999 \Omega$$

**Υπολογισμός Μεγεθών κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη LLG-BCG**

$$Z_{total} := Z_{th1} + \frac{Z_{th2} \cdot (3 \cdot Z_n + 3 \cdot R_F + Z_{th0})}{Z_{th2} + (3 \cdot Z_n + 3 \cdot R_F + Z_{th0})}$$

$$I_{F1} := \frac{E_1}{Z_{total}}$$

$$I_{F0} := \frac{-E_1 \cdot Z_{th2}}{Z_{th1} \cdot Z_{th2} + Z_{th1} \cdot Z_{th0} + Z_{th2} \cdot Z_{th0} + 3 \cdot (Z_n + R_F) \cdot (Z_{th1} + Z_{th2})}$$

$$I_{F2} := -I_{F1} - I_{F0}$$

$$V_{F1} := \frac{E_1 \cdot Z_{th2} (Z_{th0} + 3 \cdot Z_n + 3 \cdot R_F)}{Z_{th1} \cdot Z_{th2} + Z_{th1} \cdot Z_{th0} + Z_{th2} \cdot Z_{th0} + 3 \cdot (Z_n + R_F) \cdot (Z_{th1} + Z_{th2})}$$

$$V_{F2} := V_{F1}$$

$$V_{F0} := V_{F2} + 3 \cdot I_{F0} \cdot R_F$$

$$\begin{pmatrix} |I_{F0}| \\ |I_{F1}| \\ |I_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1448 \times 10^3 \\ 4.4394 \times 10^3 \\ 3.3153 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{F0}) \\ \arg(I_{F1}) \\ \arg(I_{F2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 105.3818 \\ -84.0514 \\ 92.7042 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{F0}| \\ |V_{F1}| \\ |V_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.001 \times 10^5 \\ 1.0107 \times 10^5 \\ 1.0107 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{F0}) \\ \arg(V_{F1}) \\ \arg(V_{F2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0893 \\ -1.9661 \\ -1.9661 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης είναι:

$$\begin{pmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \\ I_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -7.1471 \times 10^3 + 1.1216i \times 10^3 \\ 6.2362 \times 10^3 + 2.1897i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Fa}| \\ |I_{Fb}| \\ |I_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7.2346 \times 10^3 \\ 6.6094 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Fa}) \\ \arg(I_{Fb}) \\ \arg(I_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 170.54 \\ 16.70 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Ενώ οι τάσεις είναι:

$$\begin{pmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0} \\ V_{F1} \\ V_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.0211 \times 10^5 - 7.0907i \times 10^3 \\ -906.5406 + 3.3113i \times 10^3 \\ -906.5406 + 3.3113i \times 10^3 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Fa}| \\ |V_{Fb}| \\ |V_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.0219 \times 10^5 \\ 3.4331 \times 10^3 \\ 3.4331 \times 10^3 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Fa}) \\ \arg(V_{Fb}) \\ \arg(V_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.3445 \\ 105.3109 \\ 105.3109 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης S και άφιξης R της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι.

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο του βραχυκυκλώματος, σε κάθε ακολουθιακό κύκλωμα έχουμε:

$$I_{thS1} := I_{F1} \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thS1} - V_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad I_{thR1} := I_{F1} \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thR1} - V_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}}$$

$$I_{thS2} := I_{F2} \frac{Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad I_{thR2} := I_{F2} \frac{Z_{thS2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}}$$

$$I_{thS0} := I_{F0} \frac{Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad I_{thR0} := I_{F0} \frac{Z_{thS0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}}$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff :

$$\begin{aligned} I_{ZS1} &:= I_{thS1} + \frac{V_{F1}}{Y_{S1} - 1} & I_{ZR1} &:= I_{thR1} + \frac{V_{F1}}{Y_{R1} - 1} \\ I_{ZS2} &:= I_{thS2} + \frac{V_{F2}}{Y_{S2} - 1} & I_{ZR2} &:= I_{thR2} + \frac{V_{F2}}{Y_{R2} - 1} \\ I_{ZS0} &:= I_{thS0} + \frac{V_{F0}}{Y_{S0} - 1} & I_{ZR0} &:= I_{thR0} + \frac{V_{F0}}{Y_{R0} - 1} \end{aligned}$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας είναι :

$$\begin{aligned} V_{S1} &:= V_{F1} + Z_{S1} \cdot I_{ZS1} & V_{R1} &:= V_{F1} + Z_{R1} \cdot I_{ZR1} \\ V_{S2} &:= V_{F2} + Z_{S2} \cdot I_{ZS2} & V_{R2} &:= V_{F2} + Z_{R2} \cdot I_{ZR2} \\ V_{S0} &:= V_{F0} + Z_{S0} \cdot I_{ZS0} & V_{R0} &:= V_{F0} + Z_{R0} \cdot I_{ZR0} \end{aligned}$$

Στους ζυγούς τα ακολουθιακά ρεύματα είναι:

$$\begin{aligned} I_{S1} &:= \frac{V_{S1}}{Y_{S1} - 1} + I_{ZS1} & I_{R1} &:= \frac{V_{R1}}{Y_{R1} - 1} + I_{ZR1} \\ I_{S2} &:= \frac{V_{S2}}{Y_{S2} - 1} + I_{ZS2} & I_{R2} &:= \frac{V_{R2}}{Y_{R2} - 1} + I_{ZR2} \\ I_{S0} &:= \frac{V_{S0}}{Y_{S0} - 1} + I_{ZS0} & I_{R0} &:= \frac{V_{R0}}{Y_{R0} - 1} + I_{ZR0} \end{aligned}$$

Οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών είναι:

**Ζυγός S:**

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} &:= A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3685 \times 10^5 + 535.6461i \\ -1.0473 \times 10^5 - 1.6801i \times 10^5 \\ -1.0514 \times 10^5 + 1.7253i \times 10^5 \end{pmatrix} V \\ \begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 2.3686 \times 10^5 \\ 1.9798 \times 10^5 \\ 2.0204 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1296 \\ -121.9381 \\ 121.3565 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \\ \begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} &:= A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.607 + 132.999i \\ -2.107 \times 10^3 + 269.4811i \\ 1.8283 \times 10^3 + 587.4062i \end{pmatrix} A \\ \begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 133.0087 \\ 2.1241 \times 10^3 \\ 1.9203 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.3077 \\ 172.7114 \\ 17.8119 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \end{aligned}$$

#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Ra}} \\ \underline{V_{Rb}} \\ \underline{V_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4353 \times 10^5 + 1.3236i \times 10^3 \\ -8.7721 \times 10^4 - 1.2525i \times 10^5 \\ -8.8611 \times 10^4 + 1.3508i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4354 \times 10^5 \\ 1.5292 \times 10^5 \\ 1.6155 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3114 \\ -125.0052 \\ 123.2636 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Ra}} \\ \underline{I_{Rb}} \\ \underline{I_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1141 + 188.7017i \\ -4.9418 \times 10^3 + 765.7917i \\ 4.3026 \times 10^3 + 1.5157i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 188.7274 \\ 5.0007 \times 10^3 \\ 4.5618 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.0546 \\ 171.1913 \\ 19.4064 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### **Μετρήσεις των PMUs στους ζυγούς S και R**

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τα PMUs στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, εκφρασμένες σε ανα φάση μεγέθη είναι είναι:

#### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Sa}} \\ \underline{V_{Sb}} \\ \underline{V_{Sc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3685 \times 10^5 + 535.6461i \\ -1.0473 \times 10^5 - 1.6801i \times 10^5 \\ -1.0514 \times 10^5 + 1.7253i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3686 \times 10^5 \\ 1.9798 \times 10^5 \\ 2.0204 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1296 \\ -121.9381 \\ 121.3565 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Sa}} \\ \underline{I_{Sb}} \\ \underline{I_{Sc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.607 + 132.999i \\ -2.107 \times 10^3 + 269.4811i \\ 1.8283 \times 10^3 + 587.4062i \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 133.0087 \\ 2.1241 \times 10^3 \\ 1.9203 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.3077 \\ 172.7114 \\ 17.8119 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Ra}} \\ \underline{V_{Rb}} \\ \underline{V_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4353 \times 10^5 + 1.3236i \times 10^3 \\ -8.7721 \times 10^4 - 1.2525i \times 10^5 \\ -8.8611 \times 10^4 + 1.3508i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.4354 \times 10^5 \\ 1.5292 \times 10^5 \\ 1.6155 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3114 \\ -125.0052 \\ 123.2636 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Ra}} \\ \underline{I_{Rb}} \\ \underline{I_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1141 + 188.7017i \\ -4.9418 \times 10^3 + 765.7917i \\ 4.3026 \times 10^3 + 1.5157i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 188.7274 \\ 5.0007 \times 10^3 \\ 4.5618 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.0546 \\ 171.1913 \\ 19.4064 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 188.7274 \\ 5.0007 \times 10^3 \\ 4.5618 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.0546 \\ 171.1913 \\ 19.4064 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Συνεπώς τα αντίστοιχα ακολουθιακά μεγέθη, όπως τα υπολογίζει ο H/N είναι:

**Ζυγός S:**

$$\begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.996 \times 10^3 + 1.6868i \times 10^3 \\ 2.1223 \times 10^5 - 456.3627i \\ 1.5625 \times 10^4 - 694.7619i \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{S0}| \\ |V_{S1}| \\ |V_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9.1528 \times 10^3 \\ 2.1223 \times 10^5 \\ 1.564 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{S0}) \\ \arg(V_{S1}) \\ \arg(V_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.6202 \\ -0.1232 \\ -2.546 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -92.3668 + 329.9621i \\ 138.7881 - 1.2344i \times 10^3 \\ -44.8184 + 1.0375i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{S0}| \\ |I_{S1}| \\ |I_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 342.6465 \\ 1.2422 \times 10^3 \\ 1.0385 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{S0}) \\ \arg(I_{S1}) \\ \arg(I_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 105.6386 \\ -83.5852 \\ 92.4736 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

**Ζυγός R:**

$$\begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.2401 \times 10^4 + 3.7178i \times 10^3 \\ 1.8572 \times 10^5 - 938.2661i \\ 3.5414 \times 10^4 - 1.4558i \times 10^3 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{R0}| \\ |V_{R1}| \\ |V_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.2707 \times 10^4 \\ 1.8572 \times 10^5 \\ 3.5444 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{R0}) \\ \arg(V_{R1}) \\ \arg(V_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9.4232 \\ -0.2895 \\ -2.3539 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Ra} \\ I_{Rb} \\ I_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -212.0146 + 823.4054i \\ 324.1075 - 2.9859i \times 10^3 \\ -108.9882 + 2.3512i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{R0}| \\ |I_{R1}| \\ |I_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 850.2627 \\ 3.0034 \times 10^3 \\ 2.3537 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{R0}) \\ \arg(I_{R1}) \\ \arg(I_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 104.4392 \\ -83.805 \\ 92.654 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

## Fault Location - Διαστικό Βραχυκύκλωμα με χωρίς γη LLG-BCG

SRM - Simple Reactance Method - Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης

$$V_{S'} := V_{Sb} - V_{Sc} \quad I_{S'} := I_{Sb} - I_{Sc}$$

$$m_{SRM} := \frac{\text{Im} \left[ \frac{(V_{S'})}{(I_{S'})} \right]}{\text{Im}(Z_1)} = 0.7704 \quad \text{error}_{SRM} := m_{SRM} - m = 2.0367\%$$



#### TAK0 - Takagi Method Ρευματος Μηδενικής Ακολουθίας

$$m_{TAK0} := \frac{\text{Im}(V_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})} = 0.7764 \quad error_{TAK0} := m_{TAK0} - m = 2.6428\%$$

#### TAK2 - Takagi Method Ρευματος Αρνητικής Ακολουθίας

$$m_{TAK2} := \frac{\text{Im}(V_S \cdot j \cdot \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot j \cdot \overline{I_{S2}})} = 0.7704 \quad error_{TAK2} := m_{TAK2} - m = 2.0429\%$$

#### MTAK0 - Modified Takagi Method Ρευματος Μηδενικής Ακολουθίας

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot 3 \cdot \overline{I_{S0}})} = 0.7764$$

$$d_0 := \frac{Z_{GS0} + Z_0 + Z_{GR0}}{(1 - n)Z_0 + Z_{GR0}} = 3.8726 - 0.0987i \quad beta_0 := \arg(d_0) = -0.0255$$

$$m_{MTAK0} := \frac{\text{Im}(3 \cdot \overline{I_{S0}} \cdot V_S \cdot \exp(-j \cdot beta_0))}{\text{Im}(3 \cdot \overline{I_{S0}} \cdot Z_1 \cdot I_S \cdot \exp(-j \cdot beta_0))} = 0.7771 \quad error_{MTAK0} := m_{MTAK0} - m = 2.7076\%$$

#### MTAK2 - Modified Takagi Method Ρευματος Αρνητικής Ακολουθίας

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot j \cdot \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot j \cdot \overline{I_{S2}})} = 0.7704$$

$$d_2 := \frac{Z_{GS2} + Z_2 + Z_{GR2}}{(1 - n)Z_2 + Z_{GR2}} = 3.4856 + 5.4582i \times 10^{-3} \quad beta_2 := \arg(d_2) = 1.5659 \times 10^{-3}$$

$$m_{MTAK2} := \frac{\text{Im}(j \cdot \overline{I_{S2}} \cdot V_S \cdot \exp(-j \cdot beta_2))}{\text{Im}(j \cdot \overline{I_{S2}} \cdot Z_1 \cdot I_S \cdot \exp(-j \cdot beta_2))} = 0.7704 \quad error_{MTAK2} := m_{MTAK2} - m = 2.0426\%$$

#### WIS - Wiszniewski Method

$$Z_{relay} := \frac{V_S}{I_S} = (6.8439 + 85.9845i) \Omega$$

$$n := \frac{\text{Im}(V_S \cdot j \cdot \overline{I_{S2}})}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_S \cdot j \cdot \overline{I_{S2}})} = 0.7704$$

$$d_1 := \left[ \frac{Z_{GS1} + Z_1 + Z_{GR1}}{(1 - n)Z_1 + Z_{GR1}} \right]^{-1} = 0.2869 - 4.4926i \times 10^{-4}$$

$$beta_1 := \arg(d_1) = -0.0897 \cdot \text{deg}$$

$$alpha := \text{Re} \left( \frac{j \cdot I_{S2}}{I_S \cdot \exp(ibeta_1)} \right) \quad beta := \text{Im} \left( \frac{j \cdot I_{S2}}{I_S \cdot \exp(ibeta_1)} \right)$$

$$angle_{Z1} := \arg(Z_1) = 85.5711 \cdot \text{deg}$$

$$m_{WIS} := \frac{\text{Im}(Z_{relay})}{X_1} - \frac{\frac{\text{Re}(Z_{relay}) \cdot \tan(angle_{Z1})}{X_1} - \frac{\text{Im}(Z_{relay})}{X_1}}{\frac{alpha \cdot \tan(angle_{Z1})}{beta} - 1} = 0.7704 \quad error_{WIS} := m_{WIS} - m = 2.0426\%$$

### ERI - Eriksson Method

$$k_1 := 1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} \quad a := \operatorname{Re}(k_1) \quad b := \operatorname{Im}(k_1)$$

$$k_2 := \left(1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1}\right) \cdot \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} \quad c := \operatorname{Re}(k_2) \quad d := \operatorname{Im}(k_2)$$

$$k_3 := \left(1 + \frac{Z_{GR1} + Z_{GS1}}{Z_1}\right) \cdot \frac{j I_{S2}}{Z_1 \cdot I_S} \quad e := \operatorname{Re}(k_3) \quad f := \operatorname{Im}(k_3)$$

$$m_{1ERI} := \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) + \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 1.1344$$

$$m_{2ERI} := \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) - \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 0.7704$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) := \begin{cases} m_{1ERI} & \text{if } 0 < m_{1ERI} < 1 \\ m_{2ERI} & \text{if } 0 < m_{2ERI} < 1 \\ m_{1ERI} & \text{if } [(m_{1ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} > 1) \wedge (m_{1ERI} < m_{2ERI})] \\ m_{2ERI} & \text{if } [(m_{1ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} < m_{1ERI})] \\ m_{1ERI} & \text{if } m_{2ERI} < 0 \\ m_{2ERI} & \text{if } m_{1ERI} < 0 \end{cases}$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) = 0.7704 \quad error_{ERI} := m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) - m = 2.0426\%$$

$$R_{ERI} := \frac{m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI})^2 - a \cdot m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) + c}{e} = 0.2004 \Omega \quad error := \frac{R_{ERI} - R_F}{R_F} = -79.96\%$$

### Sm2 και Sm1 - Synchronized Method - Μοντέλο Μικρού Μήκους

$$m_{Sm2} := \left| \frac{V_{S2} - V_{R2} + Z_2 \cdot I_{R2}}{(I_{S2} + I_{R2}) \cdot Z_2} \right| = 0.746 \quad error := m_{Sm2} - m = -0.3981\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{Sm2} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.0855 \times 10^5 - 4.0515i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{Sm2} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (1.023 \times 10^5 - 3.654i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{Sm2} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (1.0308 \times 10^5 - 1.1495i \times 10^3) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1393 \times 10^5 - 8.855i \times 10^3 \\ -2.6873 \times 10^3 - 2.7066i \times 10^3 \\ -1.999 \times 10^3 + 8.1128i \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1405 \times 10^5 \\ 3.8141 \times 10^3 \\ 8.3555 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sb} + I_{Rb} + I_{Sc} + I_{Rc} = (-917.8651 + 3.1384i \times 10^3) \text{ A} \quad |I_{F\_relay}| = 3.2699 \times 10^3 \text{ A}$$

$$V_{F\_relay} := \frac{V_{Fb\_relay} + V_{Fc\_relay}}{2} = (-2.3432 \times 10^3 + 2.7031i \times 10^3) \text{ V} \quad |V_{F\_relay}| = 3.5773 \times 10^3 \text{ V}$$

$$R_{Sm2} := \operatorname{Re}\left(\frac{V_{F\_relay}}{I_{F\_relay}}\right) = 0.9946 \Omega \quad |R_{fSm2}| = 0.9946 \Omega \quad error := \frac{R_{fSm2} - R_F}{R_F} = -0.5416\%$$

$$m_{Sm1} := \left| \frac{V_{S1} - V_{R1} + Z_1 \cdot I_{R1}}{(I_{S1} + I_{R1}) \cdot Z_1} \right| = 0.7632 \quad \text{error} := m_{Sm1} - m = 1.3204\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{Sm1} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.0616 \times 10^5 - 4.1343i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{Sm1} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (1.043 \times 10^5 - 3.7221i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{Sm1} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (1.0524 \times 10^5 - 1.2148i \times 10^3) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.157 \times 10^5 - 9.0713i \times 10^3 \\ -336.8973 + 1.1012i \times 10^3 \\ 376.955 + 4.3253i \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1583 \times 10^5 \\ 1.1516 \times 10^3 \\ 4.3417 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sb} + I_{Rb} + I_{Sc} + I_{Rc} = (-917.8651 + 3.1384i \times 10^3) \text{ A} \quad |I_{F\_relay}| = 3.2699 \times 10^3 \text{ A}$$

$$V_{F\_relay} := \frac{V_{Fb\_relay} + V_{Fc\_relay}}{2} = (20.0289 + 2.7133i \times 10^3) \text{ V} \quad |V_{F\_relay}| = 2.7133 \times 10^3 \text{ V}$$

$$R_{fSm1} := \text{Re} \left( \frac{V_{F\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 0.7947 \Omega \quad |R_{fSm1}| = 0.7947 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSm1} - R_F}{R_F} = -20.5306\%$$

#### SCD - Μέθοδος Διαφορικού Ρεύματος

$$I_{pol} := I_{Sb} + I_{Rb} - (I_{Sc} + I_{Rc})$$

$$m_{SCD} := \frac{\text{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot V_S)}{\text{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot I_S \cdot Z_1)} = 0.7704 \quad \text{error} := m_{SCD} - m = 2.0367\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{SCD} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (1.0516 \times 10^5 - 4.1689i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{SCD} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (1.0513 \times 10^5 - 3.7505i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{SCD} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (1.0615 \times 10^5 - 1.242i \times 10^3) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1644 \times 10^5 - 9.1614i \times 10^3 \\ 642.6524 + 2.6881i \times 10^3 \\ 1.3672 \times 10^3 + 2.7469i \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1658 \times 10^5 \\ 2.7639 \times 10^3 \\ 3.0683 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$I_{F\_relay} := I_{Sb} + I_{Rb} + I_{Sc} + I_{Rc} = (-917.8651 + 3.1384i \times 10^3) \text{ A} \quad |I_{F\_relay}| = 3.2699 \times 10^3 \text{ A}$$

$$V_{F\_relay} := \frac{V_{Fb\_relay} + V_{Fc\_relay}}{2} = (1.0049 \times 10^3 + 2.7175i \times 10^3) \text{ V} \quad |V_{F\_relay}| = 2.8973 \times 10^3 \text{ V}$$

$$R_{fSCD} := \text{Re} \left( \frac{V_{F\_relay}}{I_{F\_relay}} \right) = 0.7114 \Omega \quad |R_{fSCD}| = 0.7114 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSCD} - R_F}{R_F} = -28.8611\%$$

#### XU Method

$$Z_{relay} := \frac{(V_{Sb} - V_{Sc})}{(I_{Sb} - I_{Sc})}$$

$$m_{XU} := \text{Re} \left( \frac{\text{atanh} \left( \frac{Z_{relay}}{Z_{C1}} \right)}{\gamma_1 - 1} \right) = 0.75 \quad \text{error}_{XU} := m_{XU} - m = 0\%$$

### SM1 - Synchronized Method - Μοντέλο Γραμμής Μεγάλου Μήκους

$$k_1 := \frac{V_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot 1) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot 1) - V_{S1}}{V_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot 1) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot 1) - Z_{C1} \cdot I_{S1}} = 0.0118 + 0.2897i$$

$$m_{SM1} := \operatorname{Re}\left(\frac{\operatorname{atanh}(k_1)}{\gamma_1 \cdot 1}\right) = 0.75 \quad \text{error} := m_{SM1} - m = -2.7256 \times 10^{-5} \%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot 1) - Z_{C1} \cdot I_{S1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot 1) = (1.0101 \times 10^5 - 3.4672i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} \cdot \cosh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot 1) - Z_{C2} \cdot I_{S2} \cdot \sinh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot 1) = (1.01 \times 10^5 - 3.4672i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot 1) - Z_{C0} \cdot I_{S0} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot 1) = (1.001 \times 10^5 - 155.9956i) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.0211 \times 10^5 - 7.0903i \times 10^3 \\ -901.9409 + 3.3109i \times 10^3 \\ -901.941 + 3.3111i \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.0219 \times 10^5 \\ 3.4316 \times 10^3 \\ 3.4317 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$Y_{S1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot 1}{2}\right) \quad Y_{R1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh\left[\frac{\gamma_1 \cdot (1 - m_{SM1}) \cdot 1}{2}\right]$$

$$I_{thSb\_relay} := I_{Sb} - V_{Sb} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fb\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (-2.1855 \times 10^3 + 319.945i) \text{ A}$$

$$I_{thRb\_relay} := I_{Rb} - V_{Rb} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fb\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (-4.961 \times 10^3 + 779.8109i) \text{ A}$$

$$I_{thSc\_relay} := I_{Sc} - V_{Sc} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fc\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (1.9122 \times 10^3 + 637.9789i) \text{ A}$$

$$I_{thRc\_relay} := I_{Rc} - V_{Rc} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fc\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (4.3245 \times 10^3 + 1.5299i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{F\_relay} := I_{thSb\_relay} + I_{thRb\_relay} + I_{thSc\_relay} + I_{thRc\_relay} \quad |I_{F\_relay}| = 3.3919 \times 10^3 \text{ A}$$

$$V_{F\_relay} := \frac{V_{Fb\_relay} + V_{Fc\_relay}}{2} = (-901.9409 + 3.311i \times 10^3) \text{ V} \quad |V_{F\_relay}| = 3.4317 \times 10^3 \text{ V}$$

$$R_{fSM1} := \operatorname{Re}\left(\frac{V_{F\_relay}}{I_{F\_relay}}\right) = 1.0117 \Omega \quad |R_{fSM1}| = 1.0117 \Omega \quad \text{error} := \frac{R_{fSM1} - R_F}{R_F} = 1.1695 \%$$

### LLG-BCG, All Results Panel

$$m_{SRM} = 0.7704$$

$$m_{TAK0} = 0.7764 \quad m_{MTAK0} = 0.7771$$

$$m_{TAK2} = 0.7704 \quad m_{MTAK2} = 0.7704$$

$$m_{WIS} = 0.7704$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) = 0.7704 \quad |R_{fERI}| = 0.2004 \Omega$$

$$m_{Sm2} = 0.746 \quad |R_{fSm2}| = 0.9946 \Omega$$

$$m_{Sm1} = 0.7632 \quad |R_{fSm1}| = 0.7947 \Omega$$

$$m_{SCD} = 0.7704 \quad |R_{fSCD}| = 0.7114 \Omega$$

$$m_{XU} = 0.75$$

$$m_{SM1} = 0.75 \quad |R_{fSM1}| = 1.0117 \Omega$$

**Υπολογισμός Μεγεθών κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα LLL-ABC  
(περίπτωση αντίστασης σφάλματος μεταξύ φάσεων)**

$$Z_{total} := Z_{th1} + R_F = (3.4821 + 30.3835i) \Omega$$

$$I_{F1} := \frac{E_1}{Z_{total}} \quad I_{F2} := 0 \quad I_{F0} := 0$$

$$V_{F1} := I_{F1} \cdot R_F \quad V_{F2} := 0 \quad V_{F0} := 0$$

$$\begin{pmatrix} |I_{F0}| \\ |I_{F1}| \\ |I_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7.7269 \times 10^3 \\ 0 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{F0}) \\ \arg(I_{F1}) \\ \arg(I_{F2}) \end{pmatrix} = \bullet \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{F0}| \\ |V_{F1}| \\ |V_{F2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7.7269 \times 10^3 \\ 0 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{F0}) \\ \arg(V_{F1}) \\ \arg(V_{F2}) \end{pmatrix} = \bullet \cdot \text{deg}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης είναι:

$$\begin{pmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \\ I_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 865.2185 - 7.6783i \times 10^3 \\ -7.082 \times 10^3 + 3.0895i \times 10^3 \\ 6.2168 \times 10^3 + 4.5884i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Fa}| \\ |I_{Fb}| \\ |I_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.7269 \times 10^3 \\ 7.7266 \times 10^3 \\ 7.7267 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Fa}) \\ \arg(I_{Fb}) \\ \arg(I_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.5708 \\ 156.4306 \\ 36.4299 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Ενώ οι τάσεις είναι:

$$\begin{pmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0} \\ V_{F1} \\ V_{F2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 865.2185 - 7.6783i \times 10^3 \\ -7.082 \times 10^3 + 3.0895i \times 10^3 \\ 6.2168 \times 10^3 + 4.5884i \times 10^3 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{Fa}| \\ |V_{Fb}| \\ |V_{Fc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.7269 \times 10^3 \\ 7.7266 \times 10^3 \\ 7.7267 \times 10^3 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Fa}) \\ \arg(V_{Fb}) \\ \arg(V_{Fc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.5708 \\ 156.4306 \\ 36.4299 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης S και άφιξης R της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι.

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο του βραχυκυκλώματος, σε κάθε ακολουθιακό κύκλωμα έχουμε:

$$I_{thS1} := I_{F1} \cdot \frac{Z_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thS1} - V_{thR1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} \quad I_{thR1} := I_{F1} \cdot \frac{Z_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}} + \frac{V_{thR1} - V_{thS1}}{Z_{thS1} + Z_{thR1}}$$

$$I_{thS2} := I_{F2} \cdot \frac{Z_{thR2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}} \quad I_{thR2} := I_{F2} \cdot \frac{Z_{thS2}}{Z_{thS2} + Z_{thR2}}$$

$$I_{thS0} := I_{F0} \cdot \frac{Z_{thR0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}} \quad I_{thR0} := I_{F0} \cdot \frac{Z_{thS0}}{Z_{thS0} + Z_{thR0}}$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff :

$$\begin{aligned} \underline{I_{ZS1}} &:= I_{thS1} + \frac{V_{F1}}{Y_{S1} - 1} & \underline{I_{ZR1}} &:= I_{thR1} + \frac{V_{F1}}{Y_{R1} - 1} \\ \underline{I_{ZS2}} &:= I_{thS2} + \frac{V_{F2}}{Y_{S2} - 1} & \underline{I_{ZR2}} &:= I_{thR2} + \frac{V_{F2}}{Y_{R2} - 1} \\ \underline{I_{ZS0}} &:= I_{thS0} + \frac{V_{F0}}{Y_{S0} - 1} & \underline{I_{ZR0}} &:= I_{thR0} + \frac{V_{F0}}{Y_{R0} - 1} \end{aligned}$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας είναι :

$$\begin{aligned} \underline{V_{S1}} &:= V_{F1} + Z_{S1} \cdot I_{ZS1} & \underline{V_{R1}} &:= V_{F1} + Z_{R1} \cdot I_{ZR1} \\ \underline{V_{S2}} &:= V_{F2} + Z_{S2} \cdot I_{ZS2} & \underline{V_{R2}} &:= V_{F2} + Z_{R2} \cdot I_{ZR2} \\ \underline{V_{S0}} &:= V_{F0} + Z_{S0} \cdot I_{ZS0} & \underline{V_{R0}} &:= V_{F0} + Z_{R0} \cdot I_{ZR0} \end{aligned}$$

Στους ζυγούς τα ακολουθιακά ρεύματα είναι:

$$\begin{aligned} \underline{I_{S1}} &:= \frac{V_{S1}}{Y_{S1} - 1} + I_{ZS1} & \underline{I_{R1}} &:= \frac{V_{R1}}{Y_{R1} - 1} + I_{ZR1} \\ \underline{I_{S2}} &:= \frac{V_{S2}}{Y_{S2} - 1} + I_{ZS2} & \underline{I_{R2}} &:= \frac{V_{R2}}{Y_{R2} - 1} + I_{ZR2} \\ \underline{I_{S0}} &:= \frac{V_{S0}}{Y_{S0} - 1} + I_{ZS0} & \underline{I_{R0}} &:= \frac{V_{R0}}{Y_{R0} - 1} + I_{ZR0} \end{aligned}$$

Οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών είναι:

**Ζυγός S:**

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \underline{V_{Sa}} \\ \underline{V_{Sb}} \\ \underline{V_{Sc}} \end{pmatrix} &:= A_1 \cdot \begin{pmatrix} \underline{V_{S0}} \\ \underline{V_{S1}} \\ \underline{V_{S2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.9674 \times 10^5 - 960.8294i \\ -9.9194 \times 10^4 - 1.699i \times 10^5 \\ -9.7538 \times 10^4 + 1.7086i \times 10^5 \end{pmatrix} V \\ \begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1.9674 \times 10^5 \\ 1.9673 \times 10^5 \\ 1.9674 \times 10^5 \end{pmatrix} V & \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -0.2798 \\ -120.2784 \\ 119.7209 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \\ \begin{pmatrix} \underline{I_{Sa}} \\ \underline{I_{Sb}} \\ \underline{I_{Sc}} \end{pmatrix} &:= A_1 \cdot \begin{pmatrix} \underline{I_{S0}} \\ \underline{I_{S1}} \\ \underline{I_{S2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 261.4762 - 2.2571i \times 10^3 \\ -2.0854 \times 10^3 + 902.0117i \\ 1.8239 \times 10^3 + 1.355i \times 10^3 \end{pmatrix} A \\ \begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 2.2722 \times 10^3 \\ 2.2721 \times 10^3 \\ 2.2721 \times 10^3 \end{pmatrix} A & \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -83.392 \\ 156.6095 \\ 36.6088 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \end{aligned}$$



#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Ra}} \\ \underline{V_{Rb}} \\ \underline{V_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.506 \times 10^5 - 2.1847i \times 10^3 \\ -7.7184 \times 10^4 - 1.2932i \times 10^5 \\ -7.3406 \times 10^4 + 1.3151i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5061 \times 10^5 \\ 1.5061 \times 10^5 \\ 1.5061 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.8311 \\ -120.8297 \\ 119.1696 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Ra}} \\ \underline{I_{Rb}} \\ \underline{I_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 609.4763 - 5.3029i \times 10^3 \\ -4.897 \times 10^3 + 2.1234i \times 10^3 \\ 4.2876 \times 10^3 + 3.1793i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.3378 \times 10^3 \\ 5.3376 \times 10^3 \\ 5.3377 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.4436 \\ 156.5578 \\ 36.5571 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### **Μετρήσεις των PMUs στους ζυγούς S και R**

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τα PMUs στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, εκφρασμένες σε ανα φάση μεγέθη είναι είναι:

#### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Sa}} \\ \underline{V_{Sb}} \\ \underline{V_{Sc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.9674 \times 10^5 - 960.8294i \\ -9.9194 \times 10^4 - 1.699i \times 10^5 \\ -9.7538 \times 10^4 + 1.7086i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Sa}| \\ |V_{Sb}| \\ |V_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.9674 \times 10^5 \\ 1.9673 \times 10^5 \\ 1.9674 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Sa}) \\ \arg(V_{Sb}) \\ \arg(V_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.2798 \\ -120.2784 \\ 119.7209 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$
$$\begin{pmatrix} \underline{I_{Sa}} \\ \underline{I_{Sb}} \\ \underline{I_{Sc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 261.4762 - 2.2571i \times 10^3 \\ -2.0854 \times 10^3 + 902.0117i \\ 1.8239 \times 10^3 + 1.355i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$
$$\begin{pmatrix} |I_{Sa}| \\ |I_{Sb}| \\ |I_{Sc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.2722 \times 10^3 \\ 2.2721 \times 10^3 \\ 2.2721 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Sa}) \\ \arg(I_{Sb}) \\ \arg(I_{Sc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.392 \\ 156.6095 \\ 36.6088 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{Ra}} \\ \underline{V_{Rb}} \\ \underline{V_{Rc}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.506 \times 10^5 - 2.1847i \times 10^3 \\ -7.7184 \times 10^4 - 1.2932i \times 10^5 \\ -7.3406 \times 10^4 + 1.3151i \times 10^5 \end{pmatrix} V$$
$$\begin{pmatrix} |V_{Ra}| \\ |V_{Rb}| \\ |V_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5061 \times 10^5 \\ 1.5061 \times 10^5 \\ 1.5061 \times 10^5 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{Ra}) \\ \arg(V_{Rb}) \\ \arg(V_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.8311 \\ -120.8297 \\ 119.1696 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{R0}} \\ \underline{I_{R1}} \\ \underline{I_{R2}} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 609.4763 - 5.3029i \times 10^3 \\ -4.897 \times 10^3 + 2.1234i \times 10^3 \\ 4.2876 \times 10^3 + 3.1793i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{Ra}| \\ |I_{Rb}| \\ |I_{Rc}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.3378 \times 10^3 \\ 5.3376 \times 10^3 \\ 5.3377 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{Ra}) \\ \arg(I_{Rb}) \\ \arg(I_{Rc}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.4436 \\ 156.5578 \\ 36.5571 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Συνεπώς τα αντίστοιχα ακολουθιακά μεγέθη, όπως τα υπολογίζει ο H/N είναι:

#### Ζυγός S:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{S0}} \\ \underline{V_{S1}} \\ \underline{V_{S2}} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.8855 - 0.0141i \\ 1.9673 \times 10^5 - 955.7894i \\ 2.8612 - 5.0118i \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{S0}| \\ |V_{S1}| \\ |V_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.8856 \\ 1.9673 \times 10^5 \\ 5.7711 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{S0}) \\ \arg(V_{S1}) \\ \arg(V_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.2798 \\ -0.2784 \\ -60.278 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{S0}} \\ \underline{I_{S1}} \\ \underline{I_{S2}} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.835 \times 10^{-3} - 0.0331i \\ 261.522 - 2.257i \times 10^3 \\ -0.0535 - 0.0397i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{S0}| \\ |I_{S1}| \\ |I_{S2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0333 \\ 2.2721 \times 10^3 \\ 0.0667 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{S0}) \\ \arg(I_{S1}) \\ \arg(I_{S2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.392 \\ -83.3905 \\ -143.3901 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

#### Ζυγός R:

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{R0}} \\ \underline{V_{R1}} \\ \underline{V_{R2}} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.2088 - 0.032i \\ 1.5059 \times 10^5 - 2.1808i \times 10^3 \\ 2.1534 - 3.8576i \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{R0}| \\ |V_{R1}| \\ |V_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.209 \\ 1.5061 \times 10^5 \\ 4.4179 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{R0}) \\ \arg(V_{R1}) \\ \arg(V_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.8311 \\ -0.8297 \\ -60.8293 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I_{R0}} \\ \underline{I_{R1}} \\ \underline{I_{R2}} \end{pmatrix} := A_2 \cdot \begin{pmatrix} I_{Ra} \\ I_{Rb} \\ I_{Rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.939 \times 10^{-3} - 0.0778i \\ 609.5842 - 5.3027i \times 10^3 \\ -0.1258 - 0.0933i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{R0}| \\ |I_{R1}| \\ |I_{R2}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0783 \\ 5.3376 \times 10^3 \\ 0.1566 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{R0}) \\ \arg(I_{R1}) \\ \arg(I_{R2}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -83.4436 \\ -83.4422 \\ -143.4418 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

## Fault Location Τριφασικό Βραχυκύκλωμα LLL-ABC (περίπτωση αντίστασης σφάλματος μεταξύ φάσεων)

SRM - Simple Reactance Method - Μέθοδος Απλής Επαγωγικής Αντίδρασης

$$\begin{aligned} V_S &:= V_{Sb} - V_{Sc} & I_S &:= I_{Sb} - I_{Sc} \\ m_{SRM} &:= \frac{\operatorname{Im}\left[\frac{V_S}{I_S}\right]}{\operatorname{Im}(Z_1)} = 0.7702 & error_{SRM} &:= m_{SRM} - m = 2.0168\% \end{aligned}$$

WIS - Wiszniewski Method

$$\begin{aligned} Z_{relay} &:= \frac{V_S}{I_S} = (10.3841 + 85.9623i) \Omega \\ n &:= \frac{\operatorname{Im}\left[\frac{V_S}{I_S}\right]}{\operatorname{Im}(Z_1)} = 0.7702 \\ d_1 &:= \left[ \frac{Z_{GS1} + Z_1 + Z_{GR1}}{(1-n)Z_1 + Z_{GR1}} \right]^{-1} = 0.2871 - 4.4883i \times 10^{-4} & \beta_{d1} &:= \arg(d_1) = -1.5633 \times 10^{-3} \\ \alpha &:= \operatorname{Re}\left(\frac{j \cdot I_{S1}}{I_S \cdot \exp(i\beta_{d1})}\right) & \beta &:= \operatorname{Im}\left(\frac{j \cdot I_{S1}}{I_S \cdot \exp(i\beta_{d1})}\right) \\ \angle Z_1 &:= \arg(Z_1) = 85.5711 \cdot \text{deg} \\ m_{WIS} &:= \frac{\operatorname{Im}(Z_{relay})}{X_1} - \frac{\frac{\operatorname{Re}(Z_{relay}) \cdot \tan(\angle Z_1)}{X_1} - \frac{\operatorname{Im}(Z_{relay})}{X_1}}{\frac{\alpha \cdot \tan(\angle Z_1)}{\beta} - 1} = 0.7701 & error_{WIS} &:= m_{WIS} - m = 2.0116\% \end{aligned}$$

ERI - Eriksson Method

$$\begin{aligned} k_1 &:= 1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1} + \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} & a &:= \operatorname{Re}(k_1) & b &:= \operatorname{Im}(k_1) \\ k_2 &:= \left(1 + \frac{Z_{GR1}}{Z_1}\right) \cdot \frac{V_S}{Z_1 \cdot I_S} & c &:= \operatorname{Re}(k_2) & d &:= \operatorname{Im}(k_2) \\ k_3 &:= \left(1 + \frac{Z_{GR1} + Z_{GS1}}{Z_1}\right) \cdot \frac{j \cdot I_{S1}}{Z_1 \cdot I_S} & e &:= \operatorname{Re}(k_3) & f &:= \operatorname{Im}(k_3) \\ m_{1ERI} &:= \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) + \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 1.1345 \\ m_{2ERI} &:= \frac{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right) - \sqrt{\left(a - e \cdot \frac{b}{f}\right)^2 - 4 \cdot \left(c - \frac{e \cdot d}{f}\right)}}{2} = 0.7701 \\ m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) &:= \begin{cases} m_{1ERI} & \text{if } 0 < m_{1ERI} < 1 \\ m_{2ERI} & \text{if } 0 < m_{2ERI} < 1 \\ m_{1ERI} & \text{if } [(m_{1ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} > 1) \wedge (m_{1ERI} < m_{2ERI})] \\ m_{2ERI} & \text{if } [(m_{1ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} > 1) \wedge (m_{2ERI} < m_{1ERI})] \\ m_{1ERI} & \text{if } m_{2ERI} > 2 \\ m_{2ERI} & \text{if } m_{1ERI} > 2 \end{cases} \\ m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) &= 0.7701 & error_{ERI} &:= m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) - m = 2.0116\% \\ R_{ERI} &:= \frac{m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI})^2 - a \cdot m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) + c}{e} = -1.8534 \Omega & error &:= \frac{R_{ERI} - R_F}{R_F} = -285.3356\% \end{aligned}$$

### Sm1 - Synchronized Method - Μοντέλο Μικρού Μήκους

$$m_{Sm1} := \left| \frac{V_{S1} - V_{R1} + Z_1 \cdot I_{R1}}{(I_{S1} + I_{R1}) \cdot Z_1} \right| = 0.7556 \quad error := m_{Sm1} - m = 0.5601\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{Sm1} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (4.6771 \times 10^3 - 8.2686i \times 10^3) V$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{Sm1} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (-0.1415 - 0.2401i) V$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{Sm1} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (-6.2235 + 1.7165i) V$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.6707 \times 10^3 - 8.2671i \times 10^3 \\ -9.5048 \times 10^3 + 85.2825i \\ 4.8157 \times 10^3 + 8.1866i \times 10^3 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9.4953 \times 10^3 \\ 9.5052 \times 10^3 \\ 9.4979 \times 10^3 \end{pmatrix} V$$

$$R_{fSm1} := \operatorname{Re} \left( \frac{V_{Fa\_relay} - V_{Fb\_relay}}{I_{Sa} + I_{Ra} - I_{Sb} - I_{Rb}} \right) = 1.1497 \Omega \quad |R_{fSm1}| = 1.1497 \Omega \quad error := \frac{R_{fSm1} - R_F}{R_F} = 14.973\%$$

### SCD - Μέθοδος Διαφορικού Ρεύματος

$$I_{pol} := I_{Sb} + I_{Rb} - (I_{Sc} + I_{Rc})$$

$$m_{SCD} := \frac{\operatorname{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot V_S)}{\operatorname{Im}(\overline{I_{pol}} \cdot I_S \cdot Z_1)} = 0.7702 \quad error := m_{SCD} - m = 2.0189\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} - m_{SCD} \cdot Z_1 \cdot I_{S1} = (969.0614 - 8.4097i \times 10^3) V$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} - m_{SCD} \cdot Z_2 \cdot I_{S2} = (-0.1994 - 0.148i) V$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} - m_{SCD} \cdot Z_0 \cdot I_{S0} = (-6.3994 + 1.7499i) V$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 962.4626 - 8.4081i \times 10^3 \\ -7.7735 \times 10^3 + 3.3669i \times 10^3 \\ 6.7919 \times 10^3 + 5.0461i \times 10^3 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.463 \times 10^3 \\ 8.4713 \times 10^3 \\ 8.4612 \times 10^3 \end{pmatrix} V$$

$$R_{fSCD} := \operatorname{Re} \left( \frac{V_{Fa\_relay} - V_{Fb\_relay}}{I_{Sa} + I_{Ra} - I_{Sb} - I_{Rb}} \right) = 1.1124 \Omega \quad |R_{fSCD}| = 1.1124 \Omega \quad error := \frac{R_{fSCD} - R_F}{R_F} = 11.2384\%$$

### XU Method

$$Z_{relay} := \frac{(V_{Sb} - V_{Sc})}{(I_{Sb} - I_{Sc})}$$

$$m_{XU} := \operatorname{Re} \left( \frac{\operatorname{atanh} \left( \frac{Z_{relay}}{Z_{C1}} \right)}{\gamma_1 - 1} \right) = 0.7523 \quad error_{XU} := m_{XU} - m = 0.2347\%$$

### SM1 - Synchronized Method - Μοντέλο Γραμμής Μεγάλου Μήκους

$$k_1 := \frac{V_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l) - V_{S1}}{V_{R1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{R1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{S1}} = 0.0118 + 0.2897i$$

$$m_{SM1} := \operatorname{Re} \left( \frac{\operatorname{atanh}(k_1)}{\gamma_1 \cdot l} \right) = 0.75 \quad \text{error} := m_{SM1} - m = 0.0\%$$

Με γνωστό το  $m$ , υπολογίζουμε την τάση στην θέση του σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος και την αντίσταση σφάλματος, όπως τα υπολογίζει ο H/N στον ζυγό S:

$$V_{F1\_relay} := V_{S1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C1} \cdot I_{S1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (865.3755 - 7.6779i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{F2\_relay} := V_{S2} \cdot \cosh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C2} \cdot I_{S2} \cdot \sinh(\gamma_2 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (-0.1824 - 0.1346i) \text{ V}$$

$$V_{F0\_relay} := V_{S0} \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot l) - Z_{C0} \cdot I_{S0} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot m_{SM1} \cdot l) = (-6.1586 + 1.6516i) \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} V_{Fa\_relay} \\ V_{Fb\_relay} \\ V_{Fc\_relay} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{F0\_relay} \\ V_{F1\_relay} \\ V_{F2\_relay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 859.0345 - 7.6764i \times 10^3 \\ -7.0877 \times 10^3 + 3.0908i \times 10^3 \\ 6.2102 \times 10^3 + 4.5903i \times 10^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |V_{Fa\_relay}| \\ |V_{Fb\_relay}| \\ |V_{Fc\_relay}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.7243 \times 10^3 \\ 7.7323 \times 10^3 \\ 7.7225 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$Y_{S1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh \left( \frac{\gamma_1 \cdot m_{SM1} \cdot l}{2} \right) \quad Y_{R1\_relay} := \frac{1}{Z_{C1}} \cdot \tanh \left[ \frac{\gamma_1 \cdot (1 - m_{SM1}) \cdot l}{2} \right]$$

$$I_{thSa\_relay} := I_{Sa} - V_{Sa} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fa\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (257.3045 - 2.3514i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{thRa\_relay} := I_{Ra} - V_{Ra} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fa\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (607.9152 - 5.3269i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{thSb\_relay} := I_{Sb} - V_{Sb} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fb\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (-2.165 \times 10^3 + 952.7854i) \text{ A}$$

$$I_{thRb\_relay} := I_{Rb} - V_{Rb} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fb\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (-4.917 \times 10^3 + 2.1368i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{thSc\_relay} := I_{Sc} - V_{Sc} \cdot Y_{S1\_relay} - V_{Fc\_relay} \cdot Y_{S1\_relay} = (1.9077 \times 10^3 + 1.3985i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{thRc\_relay} := I_{Rc} - V_{Rc} \cdot Y_{R1\_relay} - V_{Fc\_relay} \cdot Y_{R1\_relay} = (4.3091 \times 10^3 + 3.1899i \times 10^3) \text{ A}$$

$$R_{FSM1} := \operatorname{Re} \left( \frac{V_{Fa\_relay} - V_{Fb\_relay}}{I_{thSa\_relay} + I_{thRa\_relay} - I_{thSb\_relay} - I_{thRb\_relay}} \right) = 0.9999 \Omega \quad |R_{FSM1}| = 0.9999 \Omega$$

$$\text{error} := \frac{R_{FSM1} - R_F}{R_F} = -5.8666 \times 10^{-3} \%$$

### LLL-ABC All Results Panel

$$m_{SRM} = 0.7702$$

$$m_{WIS} = 0.7701$$

$$m_{ERI}(m_{1ERI}, m_{2ERI}) = 0.7701$$

$$|R_{fERI}| = 1.8534 \Omega$$

$$m_{Sm1} = 0.7556$$

$$|R_{fSm1}| = 1.1497 \Omega$$

$$m_{SCD} = 0.7702$$

$$|R_{fSCD}| = 1.1124 \Omega$$

$$m_{XU} = 0.7523$$

$$m_{SM1} = 0.75$$

$$|R_{fSM1}| = 0.9999 \Omega$$

## Βιβλιογραφία

- [1] M. M. Saha, J. Izykowski, and E. Rosolowski, (2010) *Fault Location on Power Networks*. London: Springer.
- [2] Παύλος Σ. Γεωργιάκης, (2015) *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*.
- [3] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, (1993) *ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΤΟΜΟΣ II ΑΣΥΜΜΕΤΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ*. Αθήνα.
- [4] Swagata Das, Surya Santoso, Sundaravaradan N. Ananthan (2022) *Fault Location on Transmission and Distribution Lines Principles and Applications*. IEEE Press Wiley.
- [5] Felipe V. Lopes, Eduardo Jorge S. Leite Jr, João Paulo G. Ribeiro, Artur B. Piardi, Allan V. Scheid, Guilherme Zat, Renzo G.F. Espinoza. *Single-ended multi-method phasor-based approach for optimized fault location on transmission lines*. Electric Power Systems Research 212 (2022) 108361.
- [6] Felipe V. Lopes, Eduardo Jorge S. Leite Jr, João Paulo G. Ribeiro, Artur B. Piardi, Allan V. Scheid, Guilherme Zat, Renzo G.F. Espinoza. *Single-ended multi-method phasor-based approach for optimized fault location on transmission lines*. Electric Power Systems Research 212 (2022) 108361.
- [7] Kaustav Kalita, Shubham Anand, and S. K. Parida. *A Novel Non-Iterative Fault Location Algorithm for Transmission Line With Unsynchronized Terminal*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, June 2021.
- [8] Seyed Sina Mousavi-Seyedi, Student Member, IEEE, Farrokh Aminifar, Member, IEEE, and Saeed Afsharnia. *Parameter Estimation of Multiterminal Transmission Lines Using Joint PMU and SCADA Data*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 3, June 2015.
- [9] Yu Liu, Dayou Lu, Stepan Vasilev, Binglin Wang, Dian Lu, Vladimir Terzija. *Model-based transmission line fault location methods: A review*. Electrical Power and Energy Systems 153 (2023) 109321.
- [10] Moossa Khodadadi Arpanahi, Masoud Hajiakbari Fini, Majid Khoshnama, Amir Ghorbani. *A fast and accurate Bi-level fault location method for transmission system using single ended phasor measurements*. Electric Power Systems Research 210 (2022) 108110.
- [11] Felipe V. Lopes, Eduardo Jorge S. Leite Jr, João Paulo G. Ribeiro, Artur B. Piardi, Renzo G. Fabián Espinoza, Allan V. Scheid, Guilherme Zat, Rodrigo B. Otto. *Phasor-based fault location challenges and solutions for transmission lines equipped with high-speed time-domain protective relays*. Electric Power Systems Research 189 (2020) 106617.
- [12] GE Alexander JM Kennedy GE Protection & Control Malvern, PA. *Evaluation of a Phasor-Based Fault Location Algorithm*.
- [13] Omar Avendano, Portland General Electric Bogdan Kasztenny, Héctor J. Altuve, Bin Le, and Normann Fischer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. *Tutorial on Fault Locating Embedded in Line Current Differential Relays – Methods, Implementation, and Application Considerations*. 17th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, April 2014.
- [14] Swagata Das, (Student Member, IEEE), Surya Santoso, (Senior Member, IEEE), Anish Gaikwad, (Member, IEEE), and Mahendra Patel, (Senior Member, IEEE). *Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application*.



- [15] C. Apostolopoulos NTUA, G. Korres NTUA, P.Katsikas PROTASIS S.A. Advanced Protection Applications in Electric Power Systems using Synchronized Phasor Measurements.
- [16] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. SEL-421-4, -5 Protection, Automation, and Control System Datasheet.
- [17] Hector J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer, III. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electronic Power Systems.
- [18] NR Electric Co, Ltd. PCS-902S Line Distance Relay Operation and Commissioning Manual.
- [19] John J. Grainger, William D. Stevenson, Gary W. Chang. Power System Analysis. Mc Graw Hill.
- [20] (2014) IEEE standard for seismic qualification testing of protective relays and auxiliaries for nuclear facilities. IEEE Std C37.98-2013 (Revision of IEEE Std C37.98-1987), pp. 1–35.