



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εντοπισμός της Θέσης Σφάλματος σε Γραμμή
Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους μέσω Συστήματος
Κλειστού Βρόχου Ψηφιακών Ηλεκτρονόμενων και του RTDS**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πουλίδας Μιχαήλ

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εντοπισμός της Θέσης Σφάλματος σε Γραμμή Μεταφοράς
Μεσαίου Μήκους μέσω Συστήματος Κλειστού
Βρόχου Ψηφιακών Ηλεκτρονόμενων και του RTDS**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πουλίδας Μιχαήλ

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 14 Φεβρουαρίου 2025 .

Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Άρης Δημέας
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2025

.....
Πουλίδας Μιχαήλ

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

Copyright © Πουλίδας Μιχαήλ, 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 Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τη σημερινή εποχή η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία είναι κομβικής σημασίας. Τα δίκτυα μεταφοράς αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς οι οποίες εκτείνονται δεκάδες έως και εκατοντάδες χιλιόμετρα. Ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα που παρουσιάζονται στις γραμμές αυτές είναι, στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος σε κάποιο σημείο κατά μήκος τους, ο προσδιορισμός της θέσης του ώστε να αποκατασταθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ευκολία και ταχύτητα. Προς επίτευξη αυτού έχουν πραγματοποιηθεί πληθώρα ερευνών και έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι ανίχνευσης θέσης σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την πειραματική δοκιμή αλγορίθμων ανίχνευσης θέσης σφάλματος μέσω επεξεργασίας αναλογικών σημάτων εμπορικών ηλεκτρονόμων οι οποίοι εποπτεύουν τους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης γραμμής μεταφοράς, κατά μήκος της οποίας προσομοιώνονται σφάλματα σε πραγματικό χρόνο.

Συγκεκριμένα, η προσομοίωση του συστήματος δύο ζυγών και μοντέλου γραμμής μεταφοράς γίνεται με χρήση του προσομοιωτή πραγματικού χρόνου RTDS (Real Time Digital Simulator). Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους. Τα σήματα τάσεων και ρευμάτων των ζυγών οδηγούνται από τις αναλογικές εξόδους του RTDS σε δύο ηλεκτρονόμους οι οποίοι είναι ρυθμισμένοι κατάλληλα ώστε να ανιχνεύουν τα σφάλματα που πραγματοποιούνται κατά την προσομοίωση. Κάθε φορά που ανιχνεύουν σφάλμα οι ηλεκτρονόμοι παράγουν ένα αρχείο μορφής COMTRADE το οποίο περιέχει τις κυματομορφές ρευμάτων και τάσεων στα άκρα της γραμμής τη στιγμή του σφάλματος. Τα αρχεία αυτά ανακτώνται από τη βάση δεδομένων όπου αποθηκεύονται ενώ χρησιμοποιείται κώδικας σε γλώσσα Python για την επεξεργασία τους. Ο κώδικας εξάγει τους φασιθέτες των σημάτων από τα αρχεία COMTRADE, μετά από κατάλληλη επεξεργασία για απομόνωση του σφάλματος, αφαίρεση του DC offset και εφαρμογή μετασχηματισμού Hilbert στο σήμα, και τους χρησιμοποιεί ως εισόδους για τους αλγόριθμους θέσης σφάλματος. Οι αλγόριθμοι εκφράζονται και αυτοί σε κώδικα Python.

Στην εργασία αυτή εξετάζονται οι αλγόριθμοι θέσης σφάλματος για γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους που προσδιορίστηκαν στην εργασία [11]. Στο τέλος της εργασίας προτείνονται, ακόμα, μελλοντικές προοπτικές και πιθανές βελτιώσεις της μεθόδου που αναλύθηκε.

Λέξεις Κλειδιά: ανίχνευση θέσης σφάλματος, βραχυκύκλωμα, μοντέλο αναπαράστασης γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους, ηλεκτρονόμοι προστασίας, προσομοίωση πραγματικού χρόνου, RTDS, αναλογικές μετρήσεις

Abstract

In today's era, the provision of electrical energy with efficiency and reliability is of critical importance. The energy transmission networks consist of transmission lines that span tens to hundreds of kilometers. One of the most serious problems encountered in these lines is, in the event of a fault occurring at some point along their length, determining its location so that it can be repaired as easily and quickly as possible. To achieve this, numerous studies have been conducted, and various fault location detection algorithms have been proposed for power transmission lines.

This study examines the experimental testing of fault location detection algorithms through the processing of analog signals from commercial relays that monitor the sending and receiving ends of a transmission line along which real-time fault simulations are performed.

Specifically, the simulation of the two-bus system and the transmission line model is conducted using the real-time simulator RTDS (Real Time Digital Simulator). In this study, a medium-length transmission line model was used. The voltage and current signals from the buses are routed from the analog outputs of the RTDS to two relays, which are appropriately configured to detect faults occurring during the simulation. Each time the relays detect a fault, they generate a COMTRADE file that contains the current and voltage waveforms at the ends of the line at the time of the fault. These files are retrieved from the database where they are stored, and Python code is used to process them. The code extracts the phasors of the signals from the COMTRADE files, after appropriate processing to isolate the fault state, removal of the DC offset and application of Hilbert transform to the signal, and uses them as inputs to the fault location algorithms. The algorithms are also implemented in Python code.

In this study, the fault location algorithms for a medium-length transmission line identified in reference [11] are examined. At the end of the study, future prospects and potential improvements to the analyzed method are also proposed.

Key words: fault location, short circuit, medium-length transmission line representation model, protection relays, real-time simulation, RTDS, analogue measurements

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Κορρέ, καθηγητή του ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και μέσα από την εκπόνηση της εργασίας να αποκτήσω γνώσεις τόσο θεωρητικές όσο και πάνω στον εξοπλισμό και τα διάφορα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτριο Λαγό ο οποίος ανέλαβε την επίβλεψη της εργασίας. Δε θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της εργασίας δίχως την βοήθεια και καθοδήγηση του, την οποία έλαβα σε κάθε βήμα της διαδικασίας.

Ευχαριστώ, ακόμα, τους γονείς μου οι οποίοι μου έδωσαν με τη στήριξή τους την ευκαιρία να πραγματοποιήσω και να ολοκληρώσω απρόσκοπτα τις σπουδές μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευρετήριο Εικόνων	14
Ευρετήριο Πινάκων.....	17
1 ^ο Κεφάλαιο: Εισαγωγή	19
1.1 Μοντέλα αναπαράστασης γραμμής μεταφοράς	19
1.1.1 Μοντέλο Μικρού Μήκους Γραμμής Μεταφοράς.....	20
1.1.2 Μοντέλο Μεσαίου Μήκους Γραμμής Μεταφοράς	21
1.1.3 Μοντέλο Μεγάλου Μήκους Γραμμής Μεταφοράς.....	22
1.2 Μοντέλο Γραμμής Μεσαίου Μήκους Κατά την Εξέλιξη Σφάλματος.....	23
1.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων/Βραχυκυκλωμάτων	24
1.3.1 Μονοφασικά Σφάλματα προς Γη (L-G)	25
1.3.2 Διφασικά Σφάλματα χωρίς Γη (L-L).....	26
1.3.3 Διφασικά Σφάλματα με Γη (L-L-G)	28
1.3.4 Τριφασικά Σφάλματα (balanced).....	29
1.4 Ανίχνευση Θέσης Σφάλματος (Fault Location)	30
1.4.1 Τεχνικές Ανίχνευσης Σφαλμάτων	30
1.4.2 Μέθοδος Ανίχνευσης Σφαλμάτων με χρήση Θεμελιώδους Συνιστώσας των Ρευμάτων και Τάσεων.....	31
1.5 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Σφαλμάτων στο Μοντέλο Μεσαίου Μήκους Γραμμής Μεταφοράς.....	31
1.5.1 Αλγόριθμος για Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα	31
1.5.2 Αλγόριθμος για Διφασικό Βραχυκύκλωμα	33
1.5.3 Αλγόριθμος για Τριφασικό Βραχυκύκλωμα	35
1.6 Προσομοιωτής Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας RTDS	41
1.7 Ηλεκτρονόμοι και Συμβατικά Συστήματα Προστασίας.....	43
2 ^ο Κεφάλαιο: Εργαστηριακή Διάταξη Προσομοίωσης και Λήψης Μετρήσεων	46
2.1 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους σε RSCAD.....	47
2.2 Εκτέλεση Προσομοίωσης Μοντέλου σε Πραγματικό Χρόνο.....	50
2.3 Υποβιβασμός Μεγεθών Προσομοίωσης στο Δευτερεύον και Οδήγηση Εξόδων Προσομοίωσης στους Ψηφιακούς Ηλεκτρονόμους.....	54
2.4 Ρυθμίσεις Ηλεκτρονόμων και Λήψη Αναλογικών Μετρήσεων	58
3 ^ο Κεφάλαιο: Επεξεργασία Αναλογικών Μετρήσεων με Κώδικα Python και Εφαρμογή Αλγορίθμων Fault Location.....	65
3.1 Υπολογισμός Διαστήματος Εξέλιξης Σφάλματος.....	65

3.2 Υπολογισμός Πλάτους και Γωνίας Φασικών Μεγεθών	72
3.3 Εκτέλεση Αλγορίθμων Εύρεσης Θέσης Σφάλματος	77
4 ^ο Κεφάλαιο: Αποτελέσματα Αλγορίθμων Θέσης Σφάλματος	87
4.1 Μονοφασικό Σφάλμα με Γη (L-G)	87
4.2 Διφασικό Σφάλμα χωρίς Γη (L-L)	90
4.3 Διφασικό Σφάλμα με Γη (L-L-G)	92
4.4 Τριφασικό Σφάλμα (L-L-L)	94
5 ^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	97
Βιβλιογραφία	100

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1:Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους [1]	19
Εικόνα 1.2:Μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς [1]	20
Εικόνα 1.3:Ονομαστικό κύκλωμα Τ γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους [1]	21
Εικόνα 1.4:Ονομαστικό κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους [1]	21
Εικόνα 1.5:Ισοδύναμο κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους [1]	22
Εικόνα 1.6: Σύστημα δύο ζυγών κατά την εξέλιξη σφάλματος [2]	23
Εικόνα 1.7: Θετική ακολουθία μοντέλου γραμμής μεσαίου μήκους κατά την εξέλιξη σφάλματος [3]	24
Εικόνα 1.8: Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς Γη στη φάση Α	25
Εικόνα 1.9:Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για μονοφασικό σφάλμα με γη	26
Εικόνα 1.10: Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς Γη στις φάσεις Β και C	27
Εικόνα 1.11:Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό σφάλμα χωρίς γη	27
Εικόνα 1.12: Διφασικό Βραχυκύκλωμα με Γη στις φάσεις Β και C	28
Εικόνα 1.13:Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό σφάλμα με γη	28
Εικόνα 1.14: Τριφασικό Βραχυκύκλωμα γραμμής	29
Εικόνα 1.15:Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για τριφασικό σφάλμα	29
Εικόνα 1.16:Μοντέλο για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	32
Εικόνα 1.17:Κύκλωμα θετικής ακολουθίας για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	32
Εικόνα 1.18:Μοντέλο για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	34
Εικόνα 1.19:Μοντέλο για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	34
Εικόνα 1.20:Μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	36
Εικόνα 1.21:Μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ των φάσεων σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	36
Εικόνα 1.22:Μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ βραχυκυκλώματος και γης σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους	37
Εικόνα 1.23:Real Time Digital Simulator (RTDS) control panel (αριστερά) και πύργος στέγασης hardware (δεξιά)	41
Εικόνα 1.24:Real Time Digital Simulator (RTDS) αναλογικές κάρτες (αριστερά) και ψηφιακές κάρτες (δεξιά)	42
Εικόνα 1.25:Σύστημα Προστασίας Γραμμής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	43
Εικόνα 1.26:Ψηφιακός Ηλεκτρονόμος Προστασίας [23]	44
Εικόνα 1.27:Ηλεκτρομηχανικός Ηλεκτρονόμος Προστασίας [24]	44
Εικόνα 2.1:Διάγραμμα ροής εργαστηριακής διάταξης	46
Εικόνα 2.2:Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους στο λογισμικό RSCAD	47
Εικόνα 2.3:Παράθυρο ελέγχου Fault Point	48
Εικόνα 2.4:Μοντελοποίηση Τμηματοποίησης της γραμμής στο RSCAD	49
Εικόνα 2.5:Μεταβλητά στοιχεία γραμμής μεταξύ ζυγού αναχώρησης S και θέσης σφάλματος	50
Εικόνα 2.6:Runtime Window προσομοίωσης στο RSCAD	51
Εικόνα 2.7:Γραφήματα εποπτείας τάσεων και ρευμάτων ζυγών Bus1 και Bus3 στη μόνιμη κατάσταση	52
Εικόνα 2.8:Όργανα ελέγχου σφάλματος προσομοίωσης	52
Εικόνα 2.9:Γραφήματα εποπτείας τάσεων και ρευμάτων ζυγών Bus1 και Bus3 κατά την εκτέλεση σφάλματος	53
Εικόνα 2.10: Αναλογικές έξοδοι κεντρικής μονάδας RTDS	54

Εικόνα 2.11: Ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι SEL-351A	55
Εικόνα 2.12: Ρυθμίσεις αναλογικής εξόδου RTDS.....	56
Εικόνα 2.13: Γενικές ρυθμίσεις ηλεκτρονόμου ST1.....	57
Εικόνα 2.14: Οδήγηση σημάτων εξόδου του ζυγού Bus 1	57
Εικόνα 2.15: Οδήγηση σημάτων εξόδου του ζυγού Bus 3	58
Εικόνα 2.16: Κύριο μενού λογισμικού AcSELeator Quickset	58
Εικόνα 2.17: Λίστες προστασιών η ενεργοποίηση των οποίων παράγει «Event File»	59
Εικόνα 2.18: Ρυθμίσεις των Phase Overcurrent Elements ηλεκτρονόμων	60
Εικόνα 2.19: Ρυθμίσεις των Phase Time-Overcurrent Elements ηλεκτρονόμων	60
Εικόνα 2.20: Παράθυρο εποπτικού εργαλείου Human Machine Interface	61
Εικόνα 2.21: Παράθυρο ανάκτησης Event Files ηλεκτρονόμων	62
Εικόνα 2.22: Ρυθμίσεις στοιχείων γραμμής και ανίχνευσης θέσης σφάλματος.....	63
Εικόνα 2.23: Προβολή κυματομορφής σφάλματος σε λογισμικό Synchrowave	64
Εικόνα 3.1: Φόρτωση αρχείων COMTRADE.....	66
Εικόνα 3.2: Υπολογισμός χρόνου δειγματοληψίας και ολίσθησης δειγμάτων μεταξύ των αρχείων.....	66
Εικόνα 3.3: Μετατροπή μετρήσεων ρεύματος I_{as} σε RMS πλάτος ανά κύκλο μετρήσεων	67
Εικόνα 3.4: Κυματομορφή τάσης (πορτοκαλί) και μετασχηματισμός Hilbert αυτής (μπλε)	68
Εικόνα 3.5: Φασικές γωνίες τάσεων συμμετρικού τριφασικού συστήματος όπως προκύπτουν από μετασχηματισμό Hilbert	68
Εικόνα 3.6: Υπολογισμός μέσου πλάτους ανά κύκλο και αποθήκευση των τιμών.....	69
Εικόνα 3.7: Διαδικασία υπολογισμού κύκλου εκκίνησης και εκκαθάρισης σφάλματος	69
Εικόνα 3.8: Εντολές εκτύπωσης αποτελεσμάτων start και end	71
Εικόνα 3.9: Αποτελέσματα κώδικα Trigger_test για τριφασικό σφάλμα	71
Εικόνα 3.10: Φασικά ρεύματα κατά την εξέλιξη τριφασικού σφάλματος.....	71
Εικόνα 3.11: Φόρτωση αρχείων COMTRADE εκ νέου στις μεταβλητές «rec_s» και «rec_r»	72
Εικόνα 3.12: Υψηλεπατό φίλτρο για αφαίρεση DC offset συνιστώσας.....	72
Εικόνα 3.13: Ρεύμα σφάλματος φάσης A με εμφανές DC offset	73
Εικόνα 3.14: Αντικατάσταση αρχικών σημάτων ρευμάτων με φιλτραρισμένη DC συνιστώσα	73
Εικόνα 3.15: Ρεύμα σφάλματος φάσης A με φιλτραρισμένη DC συνιστώσα.....	74
Εικόνα 3.16: Λίστες χρονοσειρών και ορισμός σήματος αναφοράς.....	74
Εικόνα 3.17: Υπολογισμός χρονοσειρών RMS πλάτους και γωνίας για τα σήματα τάσεων και ρευμάτων	75
Εικόνα 3.18: Λίστες τελικών αποτελεσμάτων	75
Εικόνα 3.19: Υπολογισμός και αποθήκευση μέσων τιμών για χρονοσειρές ρευμάτων	76
Εικόνα 3.20: Υπολογισμός και αποθήκευση μέσων τιμών για χρονοσειρές τάσεων	76
Εικόνα 3.21: Αποτελέσματα RMS πλάτους και γωνίας για φασικές τάσεις ζυγού αναχώρησης	77
Εικόνα 3.22: Φασικές τάσεις στο ζυγό αναχώρησης.....	77
Εικόνα 3.23: Ορισμός φασιθετών φασικών τάσεων και ρευμάτων και αντίστοιχων ακολουθιακών μεγεθών	78
Εικόνα 3.24: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.23) για μονοφασικό βραχυκύκλωμα.....	78
Εικόνα 3.25: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.24) για μονοφασικό βραχυκύκλωμα.....	79
Εικόνα 3.26: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.25) για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη.....	79
Εικόνα 3.27: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.26) για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη	80
Εικόνα 3.28: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.27) για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη	80
Εικόνα 3.29: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.28)-(1.31) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - B]	81
Εικόνα 3.30: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.28)-(1.31) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις B - C]	81
Εικόνα 3.31: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.28)-(1.31) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - C]	82
Εικόνα 3.32: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.32)-(1.35) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - B]	82

Εικόνα 3.33:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.32)-(1.35) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις B - C]	83
Εικόνα 3.34:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.32)-(1.35) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - C]	83
Εικόνα 3.35:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.36)-(1.39) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - B]	84
Εικόνα 3.36:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.36)-(1.39) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις B - C]	84
Εικόνα 3.37:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.36)-(1.39) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - C]	85
Εικόνα 3.38:Επιλογέας τύπου σφάλματος	85
Εικόνα 4.1:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα ($R_F=0\Omega$) ..	87
Εικόνα 4.2:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα ($R_F=1\Omega$) ..	88
Εικόνα 4.3:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα ($R_F=10\Omega$) ..	88
Εικόνα 4.4:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη ($R_F=0\Omega$)	90
Εικόνα 4.5:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη ($R_F=1\Omega$)	90
Εικόνα 4.6:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη ($R_F=10\Omega$)	91
Εικόνα 4.7:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα με γη ($R_F=0\Omega$)	92
Εικόνα 4.8:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα με γη ($R_F=1\Omega$)	92
Εικόνα 4.9:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα με γη ($R_F=10\Omega$)	93
Εικόνα 4.10:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα ($R_F=0\Omega$)	94
Εικόνα 4.11:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα ($R_F=1\Omega$)	94
Εικόνα 4.12:Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα ($R_F=10\Omega$) ..	95

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4.1:Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα γραμμής με γη	87
Πίνακας 4.2:Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα γραμμής χωρίς γη	89
Πίνακας 4.3:Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα γραμμής με γη	91
Πίνακας 4.4:Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα γραμμής.....	93

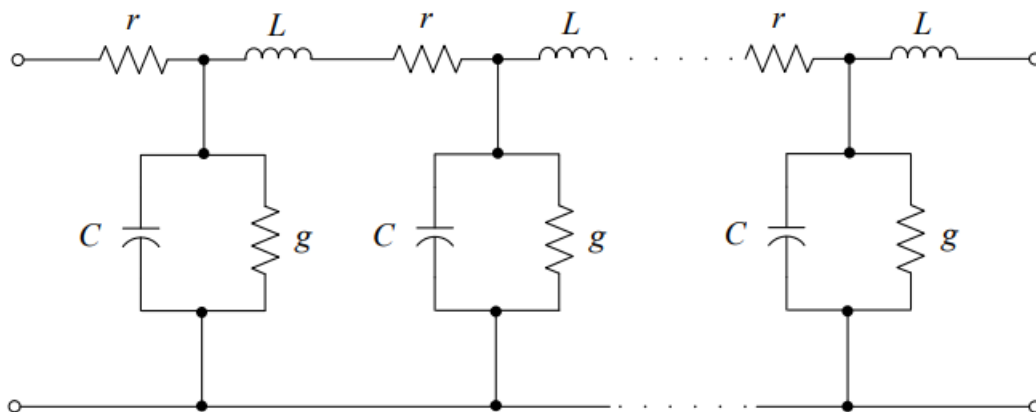
1^ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία εισαγωγική ανάλυση του θεωρητικού υπόβαθρου της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παρουσίαση των διαφόρων εννοιών και εξοπλισμού που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη της πειραματικής διαδικασίας στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα μοντέλα αναπαράστασης γραμμής μεταφοράς, εστιάζοντας ιδιαίτερα στο μοντέλο μεσαίου μήκους, γύρω από το οποίο έχει γίνει και η παρακάτω μελέτη. Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι κατηγορίες σφαλμάτων/βραχυκυκλωμάτων που μπορούν να παρουσιαστούν επί της γραμμής μεταφοράς, καθώς και η διαδικασία ανίχνευσης της θέσης σφάλματος (fault location) και οι σχετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται προς υπολογισμό αυτής. Τέλος, γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των σφαλμάτων και τη λήψη των αντίστοιχων μετρήσεων.

1.1 Μοντέλα αναπαράστασης γραμμής μεταφοράς

Μία γραμμή μεταφοράς μπορεί να εκφραστεί μέσω ενός μονοφασικού κυκλώματος με κατανεμημένες παραμέτρους, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.1* παρακάτω. [1]



Εικόνα 1.1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους [1]

Στο σχήμα αυτό με L συμβολίζεται η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε H/m), με r η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω /m), με C η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε F/m) και με g η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω^{-1} /m). Οι παράμετροι αυτοί ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή σε όλο το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Τίθενται ακόμα οι εξής υποθέσεις:

- Η τριφασική γραμμή μεταφοράς αποτελεί τμήμα ενός συνολικού τριφασικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι συμμετρικό, βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και το σύστημα τάσεων είναι συμμετρικό ημιτονοειδές.

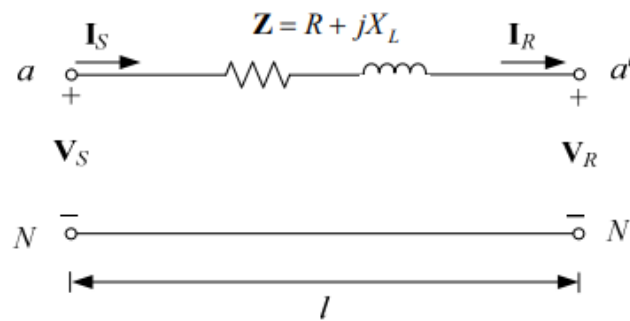
- Εφαρμόζεται κυκλική αντιμετάθεση στους αγωγούς της γραμμής μεταφοράς.

Με βάση τα παραπάνω εξάγονται τα κυκλωματικά μοντέλα της γραμμής μεταφοράς [1], συγκεκριμένα:

- Μοντέλο μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς
- Μοντέλο μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς
- Μοντέλο μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς

1.1.1 Μοντέλο μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς

Στην *Εικόνα 1.2* φαίνεται το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους της γραμμής μεταφοράς.



Εικόνα 1.2: Μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους γραμμής μεταφοράς [1]

Το παραπάνω μοντέλο γραμμής προκύπτει αγνοώντας την εγκάρσια χωρητικότητα C και την εγκάρσια αγωγιμότητα g της γραμμής. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά ακριβές για γραμμές έως και 80 km [1].

Σημειώνεται ότι στο παραπάνω σχήμα V_S και I_S συμβολίζονται η φασική τάση (σε V) και ένταση (σε A) αντίστοιχα στην αναχώρηση της γραμμής, ενώ V_R και I_R συμβολίζονται η φασική τάση (σε V) και ένταση (σε A) αντίστοιχα στην άφιξη της γραμμής. Με l συμβολίζεται το μήκος της γραμμής (σε m) και με Z η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω). Η σύνθετη αντίσταση αποτελείται από την συνολική ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω), η οποία συμβολίζεται με R , και από την συνολική επαγωγική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω), η οποία συμβολίζεται με X_L .

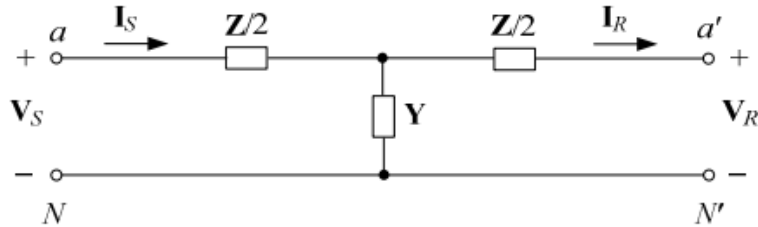
Η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς Z ανά φάση υπολογίζεται ως εξής:

$$Z = z l = R + jX_L = r \cdot l + jx_L l = rl + j2\pi f L l \quad (1.1)$$

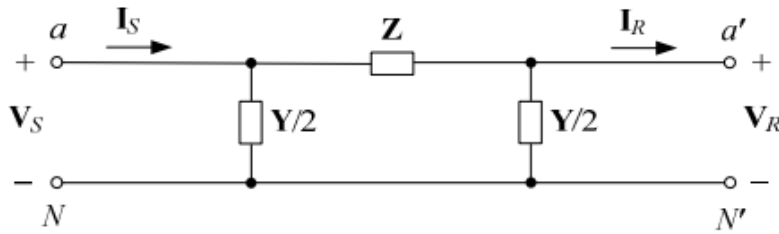
Στην σχέση (1.1) είναι z η σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω/m), r η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω/m), x_L η επαγωγική αντίσταση σειράς της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω/m), f η συχνότητα (σε Hz) και L η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε H/m).

1.1.2 Μοντέλο μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς

Όσον αφορά τα μοντέλα μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς, προκύπτουν περισσότερα από ένα, με τα δύο συνιθέστερα να είναι το ονομαστικό κύκλωμα T, το οποίο φαίνεται στην *Εικόνα 1.3*, και το ονομαστικό κύκλωμα Π, το οποίο φαίνεται στην *Εικόνα 1.4*.



Εικόνα 1.3: Ονομαστικό κύκλωμα T γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους [1]



Εικόνα 1.4: Ονομαστικό κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους [1]

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται μόνο το ονομαστικό μοντέλο Π γραμμής μεσαίου μήκους. Παρ'όλα αυτά η ανάλυση που ακολουθεί αφορά και τα δύο μοντέλα.

Τα παραπάνω μοντέλα προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη την εγκάρσια χωρητικότητα C και την εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα g της γραμμής. Τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά ακριβή για γραμμές μεταφοράς μήκους έως και 240 km [1].

Και εδώ, στα παραπάνω σχήμα V_S και I_S συμβολίζονται η φασική τάση (σε V) και ένταση (σε A) αντίστοιχα στην αναχώρηση της γραμμής, ενώ V_R και I_R συμβολίζονται η φασική τάση (σε V) και ένταση (σε A) αντίστοιχα στην άφιξη της γραμμής. Με l συμβολίζεται το μήκος της γραμμής (σε m). Με Z συμβολίζεται η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω), η οποία υπολογίζεται όμοια με προηγουμένως για το μοντέλο γραμμής μικρού μήκους:

$$Z = zl = R + jX_L = rl + jx_L l = rl + j2\pi f L l \quad (1.2)$$

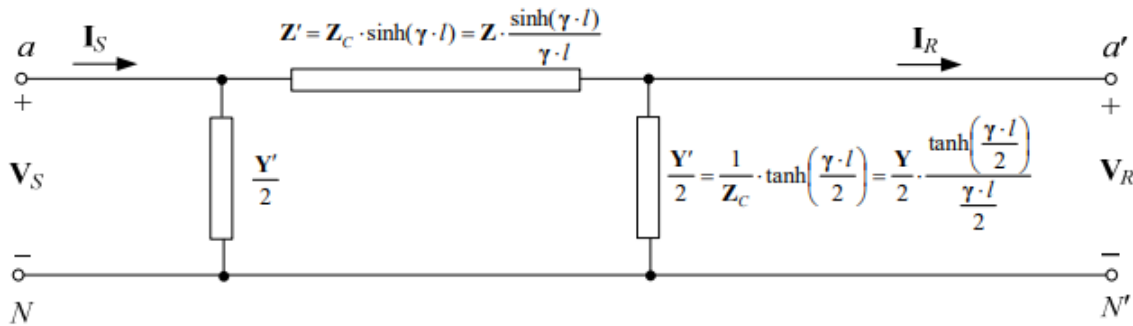
Και Y συμβολίζεται η συνολική εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής ανά φάση (σε Ω^{-1}) και η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$Y = y l = G + j \frac{1}{x_c} = gl + j \frac{l}{x_c} = gl + j 2\pi f C l \quad (1.3)$$

Στην σχέση (1.3) είναι G η συνολική εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω^{-1}), X_c η συνολική εγκάρσια χωρητική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω), y η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω^{-1}/m), g η εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε Ω^{-1}/m), x_c η εγκάρσια χωρητική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε $\Omega \cdot m$), f η συχνότητα (σε Hz) και C η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε F/m).

1.1.3 Μοντέλο μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς

Τέλος, γίνεται αναφορά στο μοντέλο μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς, του οποίου το ισοδύναμο κύκλωμα Π φαίνεται στην *Εικόνα 1.5*.



Εικόνα 1.5: Ισοδύναμο κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους [1]

Το ισοδύναμο κύκλωμα Π μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς είναι ισοδύναμο με το αντίστοιχο ονομαστικό κύκλωμα Π της γραμμής μεσαίου μήκους, όμως συνυπολογίζει το γεγονός ότι οι παράμετροι της γραμμής δεν είναι συγκεντρωμένες αλλά κατανέμονται ομοιόμορφα σε ολόκληρο το μήκος της. Για αυτό το λόγο το μοντέλο μεγάλου μήκους παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι όμως ταυτόχρονα και σημαντικά πολυπλοκότερο από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως [1].

Καθώς το μοντέλο αυτό δεν αφορά την παρούσα εργασία, σύντομα αναφέρεται πως η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση σειράς Z' και η ισοδύναμη εγκάρσια αγωγιμότητα $\frac{Y'}{2}$ δίνονται από τις εξισώσεις (1.4) και (1.5) αντίστοιχα:

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (1.4)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (1.5)$$

Στις σχέσεις (1.4) και (1.5) είναι Z_c η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής (σε Ω) και γ η σταθερά μετάδοσης της γραμμής. Οι παράμετροι αυτοί υπολογίζονται από τις εξισώσεις (1.6)

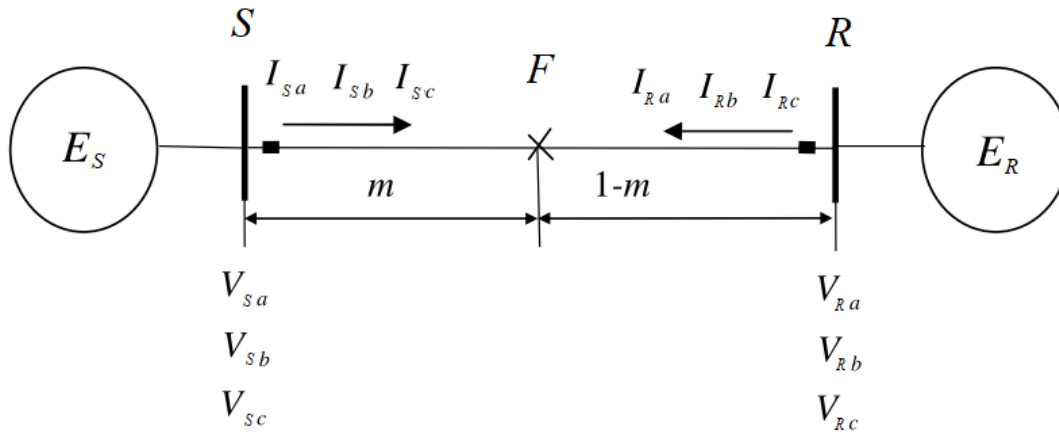
και (1.7) αντίστοιχα:

$$Z_C = \sqrt{\frac{r+j2\pi fL}{g+j2\pi fC}} \quad (1.6)$$

$$\gamma = \sqrt{(r+j2\pi fL)(g+j2\pi fC)} \quad (1.7)$$

1.2 Μοντέλο γραμμής μεσαίου μήκους κατά την εξέλιξη σφάλματος

Στην *Εικόνα 1.6* φαίνεται ένα σύστημα δύο ζυγών κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς.[2]

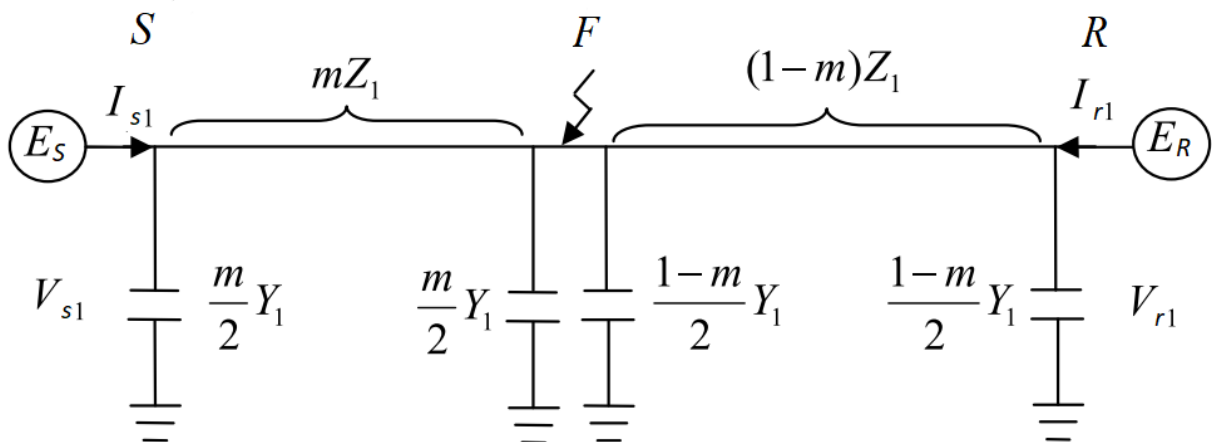


Εικόνα 1.6: Σύστημα δύο ζυγών κατά την εξέλιξη σφάλματος [2]

Στο παραπάνω σύστημα δύο ζυγών με V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} συμβολίζονται οι τάσεις των φάσεων A , B και C αντίστοιχα στο ζυγό αναχώρισης (σε V). Με I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} συμβολίζονται οι εντάσεις των φάσεων A , B και C αντίστοιχα στο ζυγό αναχώρισης (σε A). Με V_{ra} , V_{rb} , V_{rc} συμβολίζονται οι τάσεις των φάσεων A , B και C αντίστοιχα στο ζυγό άφιξης (σε V). Με I_{ra} , I_{rb} , I_{rc} συμβολίζονται οι εντάσεις των φάσεων A , B και C αντίστοιχα στο ζυγό άφιξης (σε A).

Ακόμα, γίνεται η υπόθεση ότι συμβαίνει σφάλμα στο σημείο F της γραμμής και με m συμβολίζουμε την απόσταση του σημείου σφάλματος από το ζυγό αναχώρησης της γραμμής S .

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων, οι οποίες θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το ονομαστικό κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους. Η μοντελοποίηση της θετικής ακολουθίας του κυκλώματος κατά την εξέλιξη ενός σφάλματος φαίνεται στην *Εικόνα 1.7*. [3]



Εικόνα 1.7: Θετική ακολουθία μοντέλου γραμμής μεσαίου μήκους κατά την εξέλιξη σφάλματος [3]

Το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας μπορεί να εξαχθεί ομοίως και δεν παρουσιάζεται. [3]

Στο παραπάνω μοντέλο, όπως και στο γενικό σύστημα δύο ζυγών, γίνεται η υπόθεση ότι συμβαίνει σφάλμα στο σημείο F της γραμμής μεταφοράς. Και εδώ, με m συμβολίζεται η απόσταση στην οποία συμβαίνει το σφάλμα από το άκρο αναχώρισης της γραμμής S , σε μορφή ποσοστού του συνολικού μήκους γραμμής. Εύκολα εξάγεται στη συνέχεια ότι από το άκρο άφιξης της γραμμής R , η θέση του σφάλματος βρίσκεται σε απόσταση $(1-m)$.

Όπως και προηγουμένως, με δείκτη “s” συμβολίζουμε τις παραμέτρους του άκρου αναχώρισης της γραμμής, δηλαδή V_{s1} και I_{s1} την τάση (σε V) και ένταση (σε A), ενώ με δείκτη “r” συμβολίζουμε τις παραμέτρους του άκρου άφιξης της γραμμής, δηλαδή V_{r1} και I_{r1} την τάση (σε V) και ένταση (σε A).

1.3 Κατηγορίες σφαλμάτων/βραχυκυκλωμάτων

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας τα πιο συνηθισμένα σφάλματα εμφανίζονται με τη μορφή βραχυκυκλωμάτων. Τα βραχυκυκλώματα αυτά μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση κριτήρια όπως η διάρκεια, ο τύπος και η σφάλματος, μεταξύ άλλων.

Παραδείγματος χάρη, με βάση τη διάρκεια που χρειάζεται ένα σφάλμα για να φτάσει σε σβέση, μπορούν να διακριθούν σε παροδικά ή μόνιμα σφάλματα. Τα παροδικά σφάλματα, τα οποία παρατηρούνται κυρίως σε εναέρια δίκτυα, διαιρούνται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με την επίδραση που έχουν στο ηλεκτρικό σύστημα. Πρώτη κατηγορία είναι τα αυτοαποσβεννόμενα, τα οποία εκκαθαρίζονται πριν προλάβουν να λειτουργήσουν τα συστήματα προστασίας και συνεπώς δεν διακόπτουν την τάση του συστήματος. Δεύτερη κατηγορία είναι τα κυρίως παροδικά τα οποία εκκαθαρίζονται με μια στιγμιαία διακοπή της τάσης. Τρίτη κατηγορία είναι τα ημιμόνιμα τα οποία έχουν μεγαλύτερη διάρκεια και για την εκκαθάριση τους απαιτείται διακοπή της τάσης για μερικά δευτερόλεπτα.

Στην παρούσα εργασία τα σφάλματα που θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις αντιστοιχούν στην τρίτη κατηγορία παροδικών σφαλμάτων, δηλαδή ημιμόνιμα τα οποία θα διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα.

Όσον αφορά τα μόνιμα σφάλματα, αναφέρεται πως αυτά προκαλούν μόνιμη βλάβη στον εξοπλισμό ισχύος και απαιτούν πλήρη διακοπή της τάσης του εκάστοτε συστήματος. Η αποκατάσταση ενός σφάλματος τέτοιου είδους μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και λίγες μέρες, καθώς είναι αναγκαία η ανθρώπινη παρέμβαση για την αντικατάσταση ή/και επισκευή του εξοπλισμού. Μόνιμα σφάλματα εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε υπόγεια δίκτυα στα οποία η μόνωση των αγωγών διασπάται και καταστρέφεται. [4]

Ανάλογα με την αντίσταση σφάλματος που εμφανίζει το σφάλμα μπορεί να γίνει διάκριση σε πλήρη σφάλματα, τα οποία εμφανίζουν μηδενική αντίσταση σφάλματος, σφάλματα ηλεκτρικού τόξου, τα οποία εμφανίζουν μη μηδενική αντίσταση σφάλματος μικρής τιμής, και σφάλματα διαρροής, τα οποία εμφανίζουν υψηλή αντίσταση σφάλματος.

Ένας ακόμα τρόπος που διακρίνονται σε κατηγορίες τα σφάλματα είναι ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων στις οποίες εμφανίζεται βραχυκύκλωμα. Συγκεκριμένα:

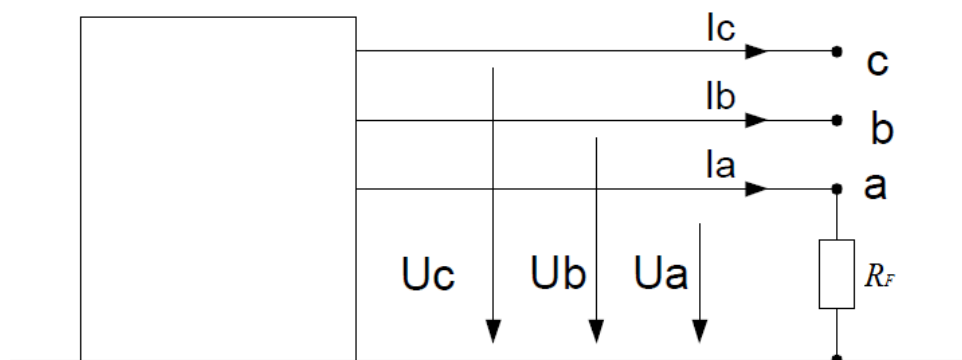
- Σφάλματα γής, τα οποία εκδηλώνονται μεταξύ φάσεως και γης. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα μονοφασικά και διφασικά σφάλματα προς γη.
- Φασικά σφάλματα, τα οποία εκδηλώνονται μεταξύ φάσεων. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα διφασικά και τριφασικά σφάλματα.
- Εξελισσόμενα σφάλματα, τα οποία ξεκινούν ως μονοφασικά προς γη και όσο εξελίσσεται το σφάλμα εμπλέκονται περισσότερες φάσεις.

1.3.1 Μονοφασικά σφάλματα προς γη (L-G)

Η προϋποθέσεις για μονοφασικό σφάλμα προς γη, υποθέτοντας χωρίς βλάβη της γενικότητας πως συμβαίνει στη φάση A , περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.8) και (1.9) [5,6]:

$$I_b = 0, I_c = 0 \quad (1.8)$$

$$V_a = R_F \cdot I_a \quad (1.9)$$



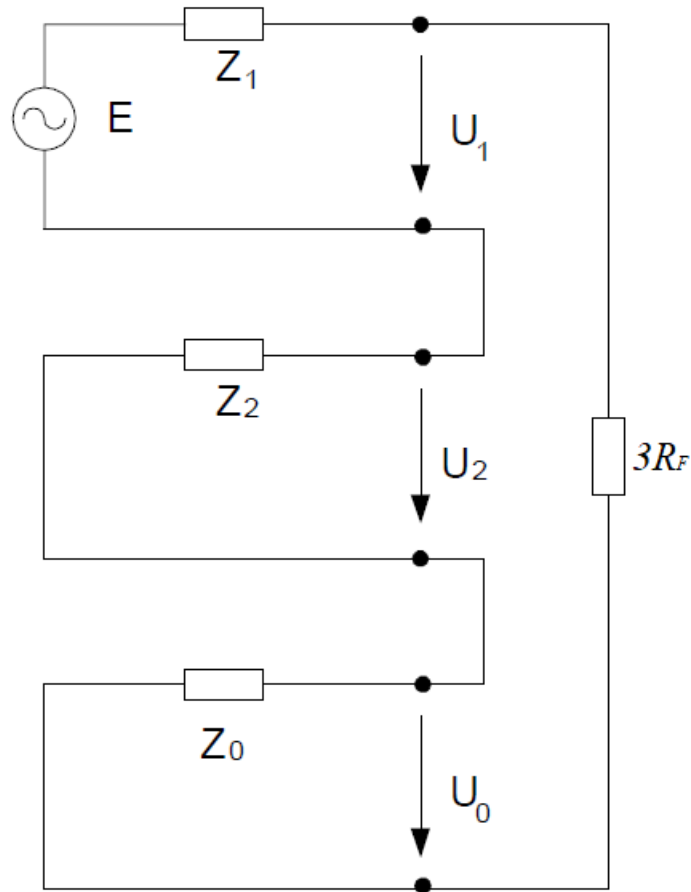
Εικόνα 1.8: Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς Γη στη φάση A

Από τις οποίες εύκολα συνάγεται για τα ακολουθιακά μεγέθη [5,6]:

$$I_1 = I_2 = I_0 = E_a / (Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_F) \quad (1.10)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = 3R_F I_1 \quad (1.11)$$

Και συνεπώς τα ακολουθιακά κυκλώματα συνδέονται ως ακολούθως:



Εικόνα 1.9: Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για μονοφασικό σφάλμα με γη

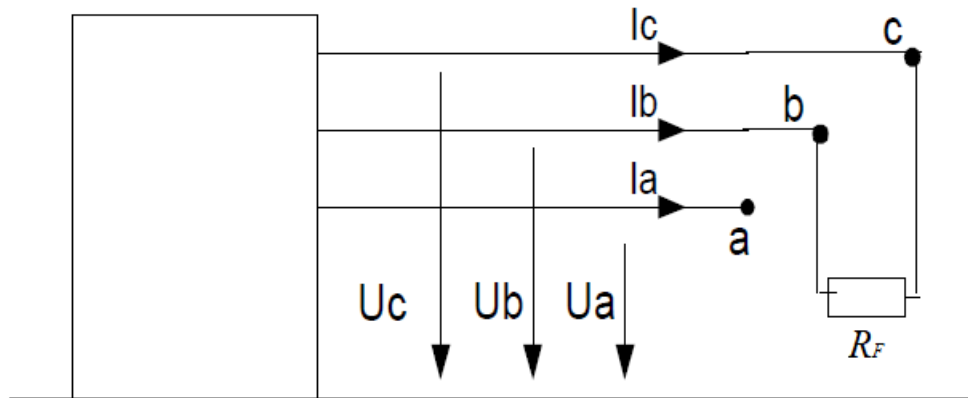
1.3.2 Διφασικά σφάλματα χωρίς γη (L-L)

Η προϋποθέσεις για διφασικό σφάλμα χωρίς γη, υποθέτοντας χωρίς βλάβη της γενικότητας πως συμβαίνει μεταξύ των φάσεων B και C , περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.12)-(1.14) [5,6]:

$$I_a = 0 \quad (1.12)$$

$$I_b = -I_c \quad (1.13)$$

$$V_b - V_c = R_F I_b \quad (1.14)$$



Εικόνα 1.10: Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς Γη στις φάσεις Β και C

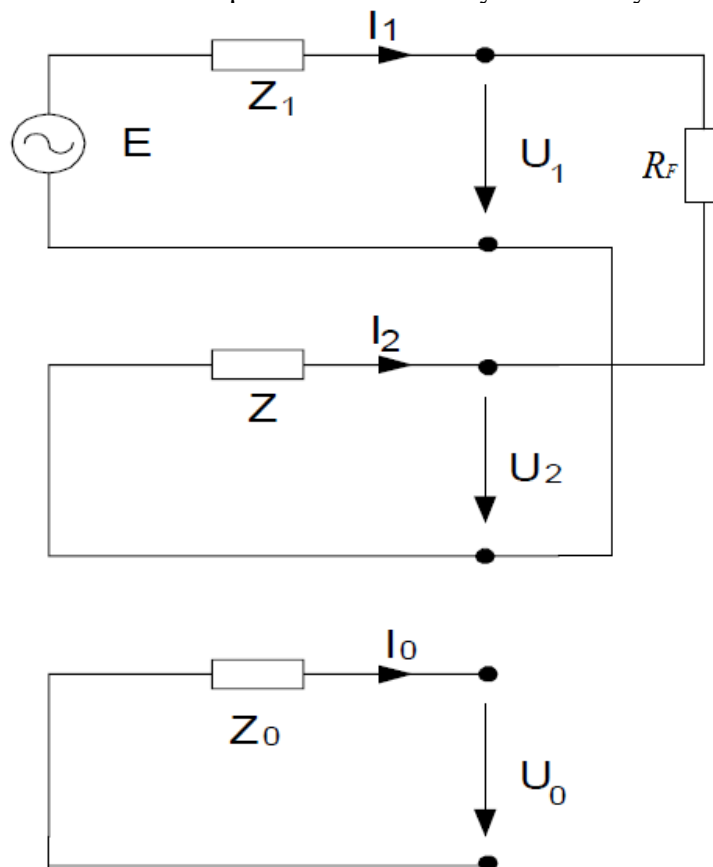
Από τις οποίες εύκολα συνάγεται για τα ακολουθιακά μεγέθη [5,6]:

$$I_0 = 0 \quad (1.15)$$

$$I_1 = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + R_F} = -I_2 \quad (1.16)$$

$$V_1 - V_2 = R_F I_1 \quad (1.17)$$

Και συνεπώς τα ακολουθιακά κυκλώματα συνδέονται ως ακολούθως:



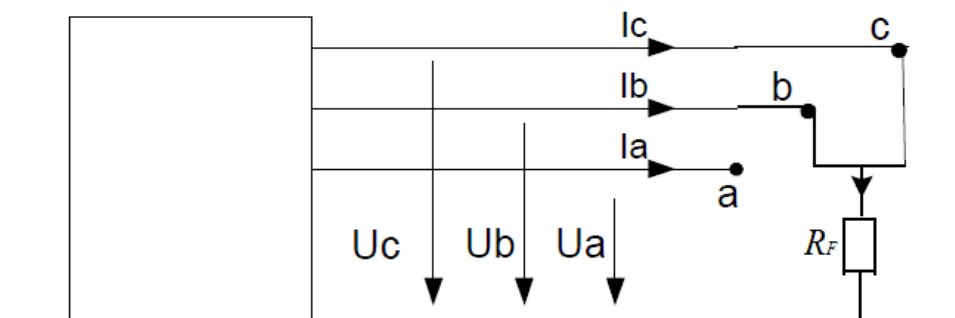
Εικόνα 1.11: Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό σφάλμα χωρίς γη

1.3.3 Διφασικά σφάλματα με γη (L-L-G)

Η προϋποθέσεις για διφασικό σφάλμα με γη, υποθέτοντας χωρίς βλάβη της γενικότητας πως συμβαίνει μεταξύ των φάσεων *B* και *C*, περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.18) - (1.19) [5,6]:

$$I_a = 0 \quad (1.18)$$

$$V_b = V_c = R_F(I_b + I_c) \quad (1.19)$$



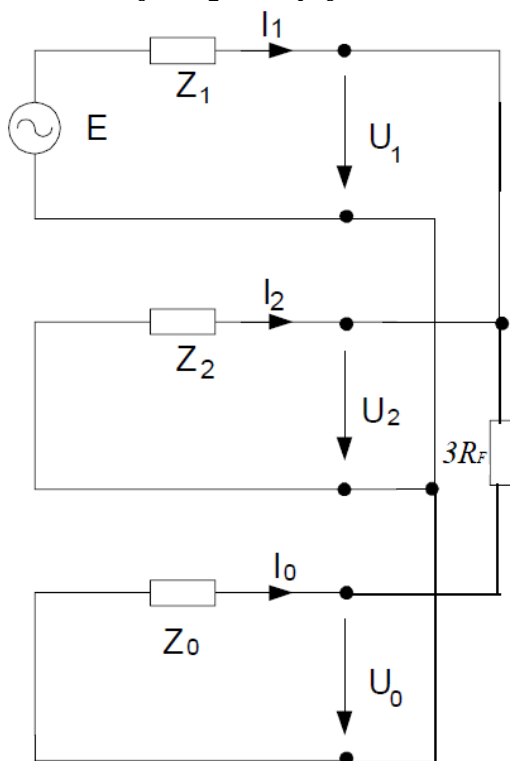
Εικόνα 1.12: Διφασικό Βραχυκύκλωμα με Γη στις φάσεις B και C

Από τις οποίες εύκολα συνάγεται για τα ακολουθιακά μεγέθη [5,6]:

$$I_1 + I_2 + I_0 = 0 \quad (1.20)$$

$$V_1 = V_2 \quad (1.21)$$

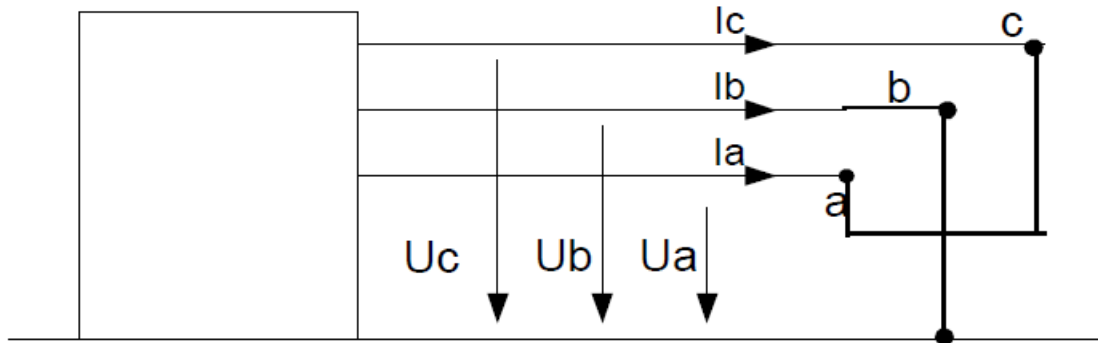
$$V_0 = V_2 + 3R_F I_0 \quad (1.22)$$



Εικόνα 1.13: Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό σφάλμα με γη

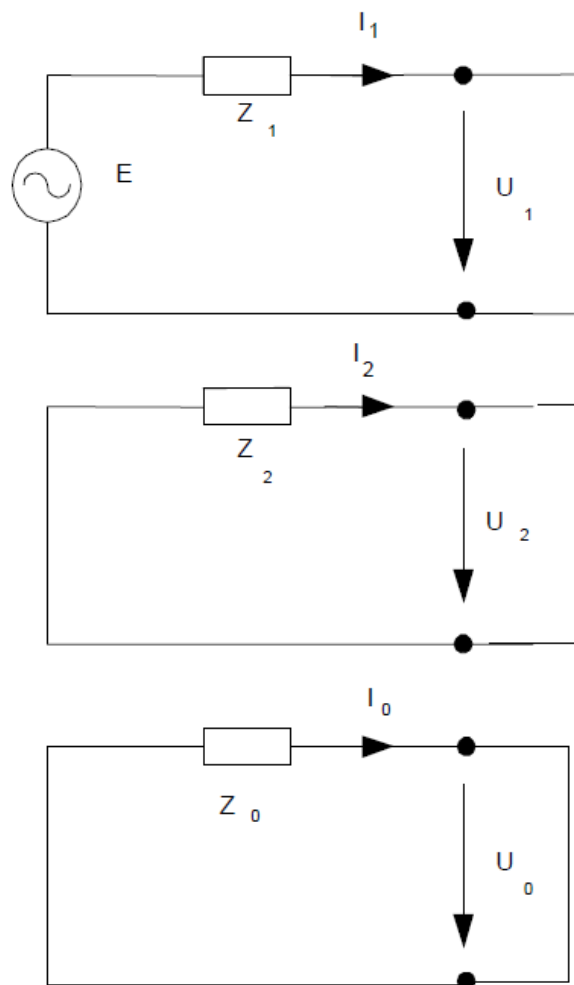
1.3.4 Τριφασικά σφάλματα (balanced)

Το τριφασικό σφάλμα είναι συμμετρικό, ισορροπημένο, σφάλμα, που εμπλέκει και τις τρεις φάσεις της γραμμής μεταφοράς A , B και C . [6]



Εικόνα 1.14: Τριφασικό Βραχυκύκλωμα γραμμής

Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μόνο η θετική ακολουθία του συστήματος. [6]



Εικόνα 1.15: Συνδεσμολογία ακολουθιακών κυκλωμάτων για τριφασικό σφάλμα

1.4 Ανίχνευση θέσης σφάλματος (fault location)

Τις τελευταίες δεκαετίες τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν παρουσιάσει ταχεία ανάπτυξη με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση των γραμμών μεταφοράς και διανομής που βρίσκονται σε λειτουργία παγκοσμίως. Ταυτόχρονα, υπάρχει αυξανόμενη απαίτηση για συνεχή και υψηλής ποιότητας παροχή ρεύματος, δίχως όμως σημαντική ακρίβεια στο κόστος αυτής. Αυτό θέτει ως θέμα πρωταρχικής σημασίας την ύπαρξη υψηλής ποιότητας συσκευών προστασίας και ελέγχου των συστημάτων ισχύος, μαζί με τον συμπληρωματικό εξοπλισμό τους. Μία από τις βασικές και πιο σημαντικές λειτουργίες που επιτελούν οι συσκευές αυτές είναι η ανίχνευση σφαλμάτων. [6,7]

Τα εργαλεία αυτά παρέχουν εκτιμήσεις τόσο για μόνιμα όσο και για παροδικά σφάλματα και βοηθούν στον εντοπισμό της θέσης αυτών ώστε να γίνουν έγκαιρες επισκευές και να αποφευχθεί η εμφάνιση επακόλουθων ζημιών. [7]

Ο τομέας της ανίχνευσης σφαλμάτων είναι υψηλού ενδιαφέροντος για μηχανικούς και ερευνητές, με το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας που έχει γίνει να αφορά γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι επιπτώσεις των σφαλμάτων στις γραμμές μεταφοράς είναι σφοδρές και ο χρόνος που απαιτείται για τον φυσικό έλεγχο κατά μήκος τους είναι πολύ μεγαλύτερος συγκριτικά με βλάβες σε γραμμές διανομής. Συνεπώς, ο εντοπισμός σφαλμάτων θεωρείται μία από τις πρώτες λειτουργίες που πρέπει να ενσωματωθούν σε ένα σύγχρονο σύστημα ελέγχου υποσταθμού. [7]

Συναρτήσεις εντοπισμού σφάλματος μπορούν να υλοποιηθούν σε ηλεκτρονικούς προστασίας με μικροεπεξεργαστή, σε ψηφιακές συσκευές εγγραφής σφαλμάτων (DFRs), σε αυτόνομους εντοπιστές σφαλμάτων ή σε προγράμματα ανάλυσης μετά από το σφάλμα. [7]

1.4.1 Τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων

Η ανίχνευση της θέσης που συνέβη ένα σφάλμα μπορεί να γίνει με πεζές ή εξοπλισμένες με μεταφορικά μέσα περιπολίες και κιάλια. Πριν την ανάπτυξη σύγχρονων μεθόδων ο εντοπισμός σφαλμάτων βασιζόταν σε κλήσεις από μάρτυρες για ζημιές στη γραμμή και οπτική επιθεώρηση. Τέτοια μέσα επιθεώρησης είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και δεν ικανοποιούν τις σύγχρονες απαιτήσεις για τον εντοπισμό σφαλμάτων. [8] Χρήσιμες πληροφορίες μπορούν να ληφθούν και από ενδείξεις σφάλματος σε εγκαταστάσεις υποσταθμών ή από στήλους (και πυλώνες) κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς ή διανομής. [9] Πλέον, η αυτόματη ανίχνευση σφαλμάτων είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική, η οποία βασίζεται στην επεξεργασία των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος της γραμμής.

Οι τεχνικές για την υλοποίηση συναρτήσεων αυτόματου εντοπισμού σφαλμάτων μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες: [7]

- Τεχνική βασισμένη στις μετρήσεις των θεμελιωδών συνιστωσών των ρευμάτων και των τάσεων, κυρίως από επαγωγικές μετρήσεις.
- Τεχνική βασισμένη στη θεωρία των οδοντών κυμάτων.
- Τεχνική βασισμένη στα υψίσυχνα στοιχεία των ρευμάτων και των τάσεων που παράγονται κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων.
- Τεχνική ανίχνευσης βασισμένη στη γνώση και την εμπειρία.

Οι αλγόριθμοι που θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία αφορούν τη μέθοδο ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση μετρήσεων των θεμελιωδών συνιστωσών των ρευμάτων και τάσεων.

1.4.2 Μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση θεμελιώδους συνιστώσας των ρευμάτων και τάσεων

Η μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση θεμελιώδους συνιστώσας ρευμάτων και τάσεων λειτουργεί λαμβάνοντας μετρήσεις των μεγεθών αυτών σε διάφορα σημεία του δικτύου και από αυτές να προσδιοριστεί, με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια, το σημείο όπου συνέβη το σφάλμα. Προφανώς για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι απαραίτητη προϋπόθεση να υπάρχουν τα κατάλληλα μετρητικά όργανα και υπολογιστικά εργαλεία εκγατεστημένα στα σημεία ενδιαφέροντος. Ακόμα, μεγάλη σημασία έχει να υπάρχουν και τηλεπικοινωνιακά μέσα ώστε οι μετρήσεις να μπορούν να ληφθούν ανά πάσα χρονική στιγμή.

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη μέθοδο για την εκτέλεσή τους. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν μετρήσεις από το ένα άκρο μίας γραμμής μεταφοράς, μετρήσεις και από τα δύο άκρα, μετρήσεις από τρία σημεία ενός δικτύου που βιώνει σφάλμα, ακόμα και απομακρυσμένες μετρήσεις. Οι μετρήσεις είναι είτε συγχρονισμένες ως προς μια γωνία αναφοράς, εάν προέρχονται για παράδειγμα από μετρητές φασιθετών, είτε ασυγχρόνιστες. Η δεύτερη περίπτωση προφανώς απαιτεί πιο σύνθετη λύση καθώς πρέπει να βρεθεί κατά την ανάλυση των δεδομένων μια γωνία αναφοράς. [6,10]

Τέλος, οι διάφοροι αλγόριθμοι και συναρτήσεις για ανίχνευση σφάλματος που προκύπτουν από αυτή τη μέθοδο διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το μοντέλο γραμμής το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εκάστοτε ανάλυση. Οι αλγόριθμοι για το μοντέλο μικρού, μεσαίου και μεγάλου μήκους παρουσιάζουν διαφορές τόσο στην ανάλυση που απαιτείται και την πολυπλοκότητα όσο και στην τελική ακρίβεια που αποδίδουν. [2,3,10]

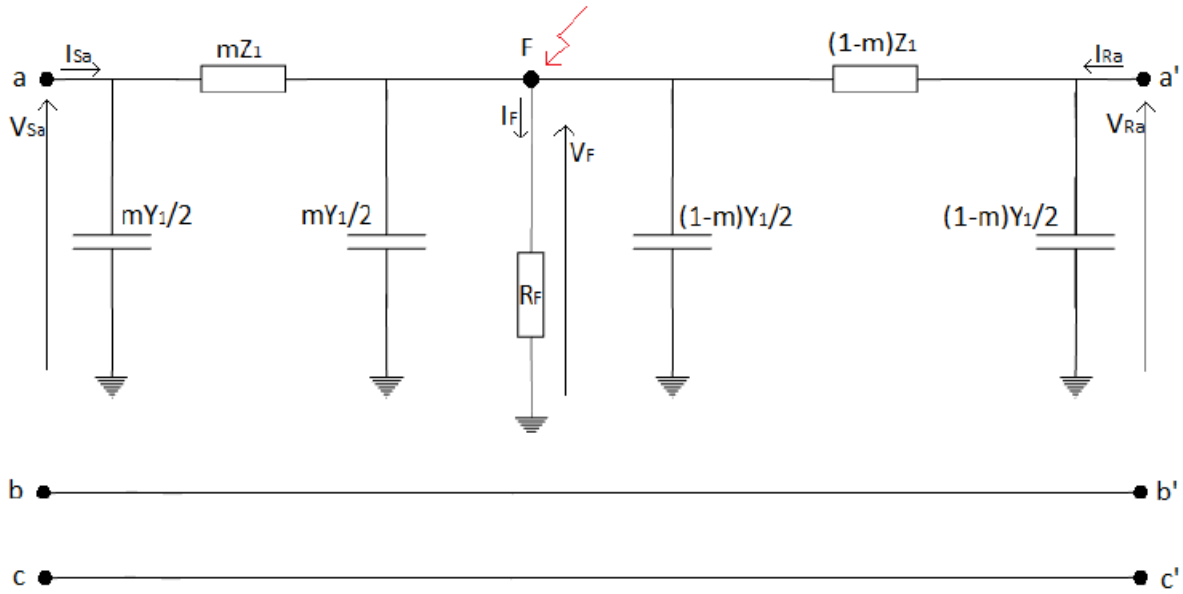
1.5 Αλγόριθμοι ανίχνευσης σφαλμάτων στο μοντέλο μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση θέσης σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους, όπως αυτοί υπολογίστηκαν από την ανάλυση που έγινε στην εργασία [11].

Οι ακόλουθοι αλγόριθμοι καλύπτουν κάθε τύπο σφάλματος που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα και υπολογίζουν την απόσταση στην οποία συμβαίνει το βραχυκύκλωμα από το άκρο αναχώρησης της γραμμής. Στην ανάλυση της εργασίας [11] οι παράμετροι γραμμής θεωρήθηκαν ως άγνωστοι ενώ ως γνωστά θεωρήθηκαν μόνο τα δεδομένα από τα μετρητικά όργανα, δηλαδή οι τάσεις και τα ρεύματα στα άκρα αναχώρησης και άφιξης. Οι μετρήσεις θεωρείται πως δίνονται από μετρητές φασιθετών, αυτό σημαίνει ότι είναι συγχρονισμένες.

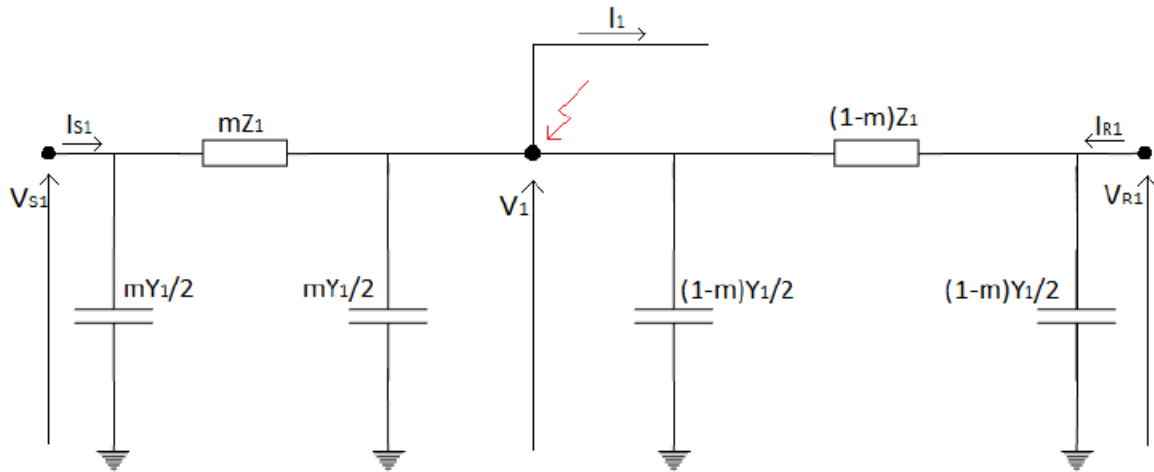
1.5.1 Αλγόριθμος για μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Στην *Εικόνα 1.16* φαίνεται το μοντέλο για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε απόσταση m από το ζυγό αναχώρησης S της γραμμής μεταφοράς μοντέλου μεσαίου μήκους.



Εικόνα 1.16: Μοντέλο για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους

Το αντίστοιχο κύκλωμα θετικής ακολουθίας για το παραπάνω βραχυκύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 1.17.



Εικόνα 1.17: Κύκλωμα θετικής ακολουθίας για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους

Έπειτα από ανάλυση των παραπάνω κυκλωμάτων η απόσταση σφάλματος m δίνεται ως εξής:

$$m = \frac{a_2}{a_1 + a_2} \quad (1.23)$$

Όπου είναι:

- $a_1 = \text{real}(A_1 \overline{A_2})$
- $a_2 = \text{real}(A_3 \overline{A_2})$
- $A_1 = I_{S2} V_{S1} - I_{S2} V_{R1} - I_{S1} V_{S2} + I_{S1} V_{R2}$

- $A_2 = V_{R2}V_{S1} - V_{R1}V_{S2}$
- $A_3 = I_{R1}V_{R2} - I_{R1}V_{S2} + I_{R2}V_{S1} - I_{R2}V_{R1}$

Εάν η λύση που προκύπτει ανήκει στο διάστημα $[0,1]$ τότε θεωρείται αποδεκτή. Εάν είναι εκτός αυτού του διαστήματος τότε απορρίπτεται και η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Για μηδενική ανίσταση σφάλματος, δηλαδή $\mathbf{R}_F = \mathbf{0}$, η απόσταση σφάλματος m δίνεται ως εξής:

$$m = \frac{a_4}{a_3 + a_4} \quad (1.24)$$

Όπου είναι:

- $a_3 = \text{real}(A_4 \overline{A_5})$
- $a_4 = \text{real}(A_6 \overline{A_5})$
- $A_4 = I_{Sa}V_{Ra}$
- $A_5 = V_{Ra}V_{Sa}$
- $A_6 = I_{Ra}V_{Sa}$

Και πάλι εάν η λύση που προκύπτει ανήκει στο διάστημα $[0,1]$ τότε θεωρείται αποδεκτή, αλλιώς απορρίπτεται και η απόσταση είναι ίση με 0.5.

1.5.2 Αλγόριθμος για διφασικό βραχυκύκλωμα

Παρακάτω φαίνονται δύο μοντέλα για διφασικό βραχυκύκλωμα σε απόσταση m από το ζυγό αναχώρησης S της γραμμής μεταφοράς μοντέλου μεσαίου μήκους. Στην *Εικόνα 1.18* φαίνεται το μοντέλο για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη και στην *Εικόνα 1.19* το μοντέλο για διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη.

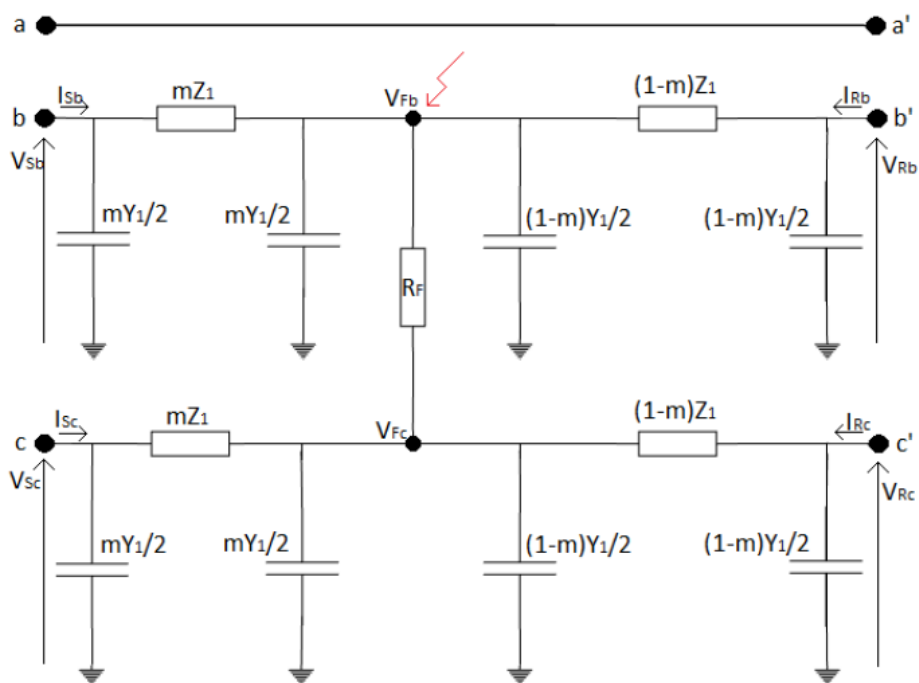
Από ανάλυση του κυκλώματος της *Εικόνας 1.18* για μοντέλο διφασικού βραχυκυκλώματος χωρίς γη η απόσταση σφάλματος m δίνεται ως εξής:

$$m = \frac{b_2}{b_1 + b_2} \quad (1.25)$$

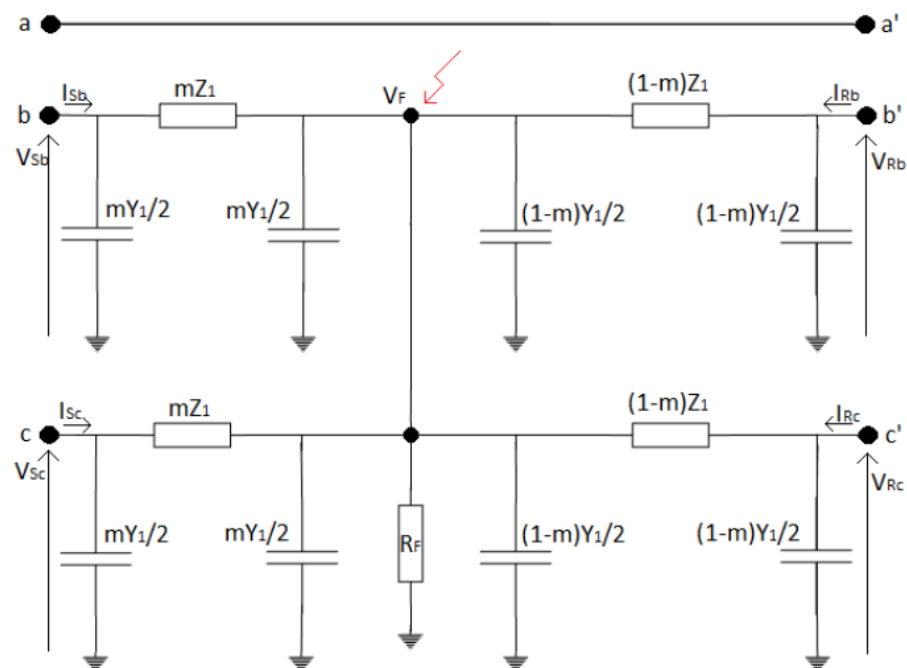
Όπου είναι:

- $b_1 = \text{real}(B_1 \overline{B_2})$
- $b_2 = \text{real}(B_3 \overline{B_2})$
- $B_1 = I_{Sc}V_{Sb} - I_{Sc}V_{Rb} - I_{Sb}V_{Sc} + I_{Sb}V_{Rc}$
- $B_2 = V_{Rc}V_{Sb} - V_{Rb}V_{Sc}$
- $B_3 = I_{Rb}V_{Rc} - I_{Rb}V_{Sc} + I_{Rc}V_{Sb} - I_{Rc}V_{Rb}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.



Εικόνα 1.18: Μοντέλο για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους



Εικόνα 1.19: Μοντέλο για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους

Από ανάλυση του κυκλώματος της *Εικόνας 1.19* για μοντέλο διαφασικού βραχυκυκλώματος με γη η απόσταση σφάλματος m δίνεται ως εξής:

$$m = \frac{b_4}{b_3 + b_4} \quad (1.26)$$

Όπου είναι:

- $b_3 = \text{real}(B_4 \overline{B_5})$
- $b_4 = \text{real}(B_6 \overline{B_5})$
- $B_4 = I_{Sb}V_{Rb} - I_{Sb}V_{Rc} - I_{Sc}V_{Rb} + I_{Sc}V_{Rc}$
- $B_5 = V_{Rb}V_{Sb} - V_{Rb}V_{Sc} + V_{Rc}V_{Sc} - V_{Rc}V_{Sb}$
- $B_6 = I_{Rb}V_{Sb} - I_{Rb}V_{Sc} - I_{Rc}V_{Sb} + I_{Rc}V_{Sc}$

Και εδώ γίνεται αποδεκτή η τιμή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ακολουθώντας ελαφρώς διαφορετική ανάλυση για το κύκλωμα της *Εικόνας 1.19* προκύπτει δεύτερη πιθανή λύση με διαφορετικές αλγοριθμικές παραμέτρους:

$$m = \frac{b_6}{b_5 + b_6} \quad (1.27)$$

Όπου είναι:

- $b_5 = \text{real}(B_7 \overline{B_8})$
- $b_6 = \text{real}(B_9 \overline{B_8})$
- $B_7 = I_{Sc}V_{Sb} - I_{Sc}V_{Rc} - I_{Sb}V_{Sc} + I_{Sb}V_{Rb}$
- $B_8 = V_{Rb}V_{Sb} - V_{Rc}V_{Sc}$
- $B_9 = I_{Rb}V_{Sb} - I_{Rb}V_{Rc} - I_{Rc}V_{Sc} + I_{Rc}V_{Rb}$

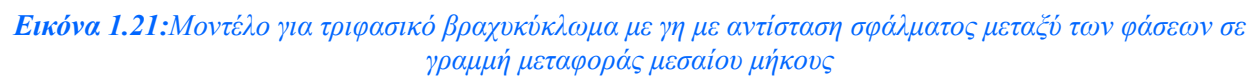
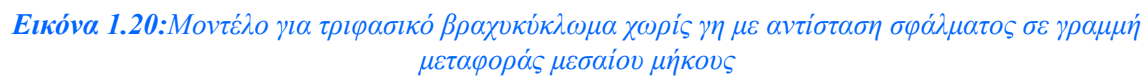
Και εδώ γίνεται αποδεκτή η τιμή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

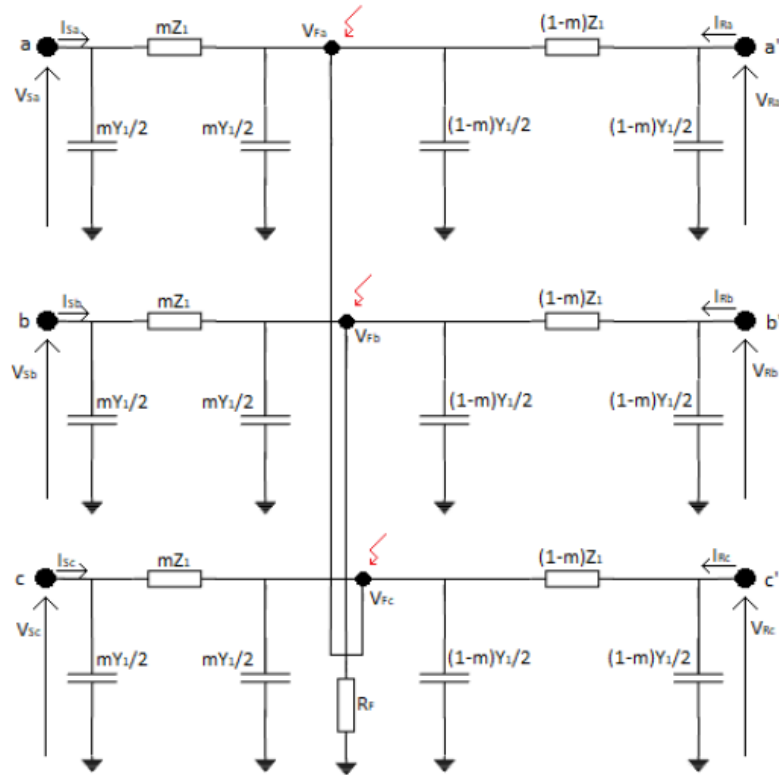
1.5.3 Αλγόριθμος για τριφασικό βραχυκύκλωμα

Παρακάτω φαίνονται τρία μοντέλα για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε απόσταση m από το ζυγό αναχώρησης S της γραμμής μεταφοράς μοντέλου μεσαίου μήκους.

Στην *Εικόνα 1.20* φαίνεται το μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος, στην *Εικόνα 1.21* φαίνεται το μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ των τριών φάσεων και στην *Εικόνα 1.22* φαίνεται το μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ του βραχυκυκλώματος και της γης.

Η μελέτη για τα κυκλώματα των *Εικόνων 1.20* και *1.21* είναι πανομοιότυπη και συνεπώς ο αλγόριθμος που προκύπτει από την ανάλυση των δύο κυκλωμάτων είναι ο ίδιος.





Εικόνα 1.22: Μοντέλο για τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ βραχυκυκλώματος και γης σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους

Η ανάλυση των κυκλωμάτων της Εικόνας 1.20 και 1.21 για μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος αποφέρει απόσταση σφάλματος m ως εξής:

$$m = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \quad (1.28)$$

Όπου είναι:

$$m_1 = \frac{c_2}{c_1 + c_2} \quad (1.29)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $c_1 = \text{real}(C_1 \overline{C_2})$
- $c_2 = \text{real}(C_3 \overline{C_2})$
- $C_1 = I_{sb}V_{sa} - I_{sb}V_{ra} - I_{sa}V_{sb} + I_{sa}V_{rb}$
- $C_2 = V_{rb}V_{sa} - V_{ra}V_{sb}$
- $C_3 = I_{ra}V_{rb} - I_{ra}V_{sb} + I_{rb}V_{sa} - I_{rb}V_{ra}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ομοίως:

$$m_2 = \frac{c_4}{c_3 + c_4} \quad (1.30)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $c_3 = \text{real}(C_4 \overline{C_5})$
- $c_4 = \text{real}(C_6 \overline{C_5})$
- $C_4 = I_{Sc} V_{Sb} - I_{Sc} V_{Rb} - I_{Sb} V_{Sc} + I_{Sb} V_{Rc}$
- $C_5 = V_{Rc} V_{Sb} - V_{Rb} V_{Sc}$
- $C_6 = I_{Rb} V_{Rc} - I_{Rb} V_{Sc} + I_{Rc} V_{Sb} - I_{Rc} V_{Rb}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ομοίως:

$$m_3 = \frac{c_6}{c_5 + c_6} \quad (1.31)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $c_5 = \text{real}(C_7 \overline{C_8})$
- $c_6 = \text{real}(C_9 \overline{C_8})$
- $C_7 = I_{Sc} V_{Sa} - I_{Sc} V_{Ra} - I_{Sa} V_{Sc} + I_{Sa} V_{Rc}$
- $C_8 = V_{Rc} V_{Sa} - V_{Ra} V_{Sc}$
- $C_9 = I_{Ra} V_{Rc} - I_{Ra} V_{Sc} + I_{Rc} V_{Sa} - I_{Rc} V_{Ra}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ουσιαστικά, τα αποτελέσματα για την απόσταση m_1 , m_2 και m_3 προκύπτουν συνδυάζοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις φάσεων ανά δύο, δηλαδή $A-B$, $B-C$ και $C-A$, με το τελικό αποτέλεσμα m να δίνεται από τη μέση τιμή των τριών.

Στη συνέχεια, η μελέτη του κυκλώματος της *Εικόνας 1.20*, δηλαδή τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ βραχυκυκλώματος και γης, αντιστοιχεί με την προηγούμενη ανάλυση αλλά για μηδενική αντίσταση σφάλματος. Αυτό συμβαίνει επειδή για το σύστημα έχει γίνει η υπόθεση πως είναι συμμετρικό και στις δύο αυτές περιπτώσεις ισχύει $V_{Fa}=V_{Fb}=V_{Fc}=V_F$.

Η ανάλυση λοιπόν του μοντέλου αυτού αποφέρει απόσταση σφάλματος m ως εξής:

$$m = \frac{m_4 + m_5 + m_6}{3} \quad (1.32)$$

Όπου είναι:

$$m_4 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} \quad (1.33)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $d_1 = \text{real}(D_1 \overline{D_2})$
- $d_2 = \text{real}(D_3 \overline{D_2})$
- $D_1 = I_{Sa} V_{Ra} - I_{Sa} V_{Rb} - I_{Sb} V_{Ra} + I_{Sb} V_{Rb}$
- $D_2 = V_{Ra} V_{Sa} - V_{Ra} V_{Sb} + V_{Rb} V_{Sb} - V_{Rb} V_{Sa}$
- $D_3 = I_{Ra} V_{Sa} - I_{Ra} V_{Sb} - I_{Rb} V_{Sa} + I_{Rb} V_{Sb}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ομοίως:

$$m_5 = \frac{d_4}{d_3 + d_4} \quad (1.34)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $d_3 = \text{real}(D_4 \overline{D_5})$
- $d_4 = \text{real}(D_6 \overline{D_5})$
- $D_4 = I_{Sb} V_{Rb} - I_{Sb} V_{Rc} - I_{Sc} V_{Rb} + I_{Sc} V_{Rc}$
- $D_5 = V_{Rb} V_{Sb} - V_{Rb} V_{Sc} + V_{Rc} V_{Sc} - V_{Rc} V_{Sb}$
- $D_6 = I_{Rb} V_{Sb} - I_{Rb} V_{Sc} - I_{Rc} V_{Sb} + I_{Rc} V_{Sc}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ομοίως:

$$m_6 = \frac{d_6}{d_5 + d_6} \quad (1.35)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $d_5 = \text{real}(D_7 \overline{D_8})$
- $d_6 = \text{real}(D_9 \overline{D_8})$
- $D_7 = I_{Sa} V_{Ra} - I_{Sa} V_{Rc} - I_{Sc} V_{Ra} + I_{Sc} V_{Rc}$
- $D_8 = V_{Ra} V_{Sa} - V_{Ra} V_{Sc} + V_{Rc} V_{Sc} - V_{Rc} V_{Sa}$
- $D_9 = I_{Ra} V_{Sa} - I_{Ra} V_{Sc} - I_{Rc} V_{Sa} + I_{Rc} V_{Sc}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Και εδώ, με το τελικό αποτέλεσμα m να δίνεται από τη μέση τιμή των m_4 , m_5 και m_6 .

Για την απόσταση m για το μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος με γη με αντίσταση σφάλματος μεταξύ βραχυκυκλώματος και γης δίνεται μία δεύτερη προσέγγιση που προκύπτει από όμοια ανάλυση, αλλά με διαφορετικές συσχετίσεις μεταξύ των θεμελιωδών εξισώσεων του μοντέλου.

Η ανάλυση αυτή αποφέρει απόσταση σφάλματος m ως εξής:

$$m = \frac{m_7 + m_8 + m_9}{3} \quad (1.36)$$

Όπου είναι:

$$m_7 = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \quad (1.37)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $h_1 = \text{real}(H_1 \overline{H_2})$
- $h_2 = \text{real}(H_3 \overline{H_2})$
- $H_1 = I_{Sb} V_{Sa} - I_{Sb} V_{Rb} - I_{Sa} V_{Rb} + I_{Sa} V_{Ra}$
- $H_2 = V_{Ra} V_{Sa} - V_{Rb} V_{Sb}$
- $H_3 = I_{Ra} V_{Sa} - I_{Ra} V_{Rb} - I_{Rb} V_{Sb} + I_{Rb} V_{Ra}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ομοίως:

$$m_5 = \frac{h_4}{h_3 + h_4} \quad (1.38)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $h_3 = \text{real}(H_4 \overline{H_5})$
- $h_4 = \text{real}(H_6 \overline{H_5})$
- $H_4 = I_{Sc} V_{Sb} - I_{Sc} V_{Rc} - I_{Sb} V_{Sc} + I_{Sb} V_{Rb}$
- $H_5 = V_{Rb} V_{Sb} - V_{Rc} V_{Sc}$
- $H_6 = I_{Rb} V_{Sb} - I_{Rb} V_{Rc} - I_{Rc} V_{Sc} + I_{Rc} V_{Rb}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Ομοίως:

$$m_6 = \frac{h_6}{h_5 + h_6} \quad (1.39)$$

Για την οποία σχέση είναι:

- $h_5 = \text{real}(H_7 \overline{H_8})$
- $h_6 = \text{real}(H_9 \overline{H_8})$
- $H_7 = I_{Sc} V_{Sa} - I_{Sc} V_{Rc} - I_{Sa} V_{Sc} + I_{Sa} V_{Ra}$
- $H_8 = V_{Ra} V_{Sa} - V_{Rc} V_{Sc}$
- $H_9 = I_{Ra} V_{Sa} - I_{Ra} V_{Rc} - I_{Rc} V_{Sc} + I_{Rc} V_{Ra}$

Η τιμή γίνεται αποδεκτή αν είναι στο διάστημα $[0,1]$, αλλιώς η απόσταση είναι ίση με 0.5.

Και εδώ, με το τελικό αποτέλεσμα m να δίνεται από τη μέση τιμή των m_7 , m_8 και m_9 .

1.6 Προσομοιωτής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας RTDS

Το εργαλείο RTDS είναι ένας ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου από την εταιρία RTDS Technologies Inc. Ψηφιακοί προσομοιωτές πραγματικού χρόνου ή Real Time Digital Simulators (RTDS) χρησιμοποιούνται ευρέως για προσομοίωση, ανάπτυξη και δοκιμή αλγορίθμων προστασίας ΣΗΕ. Όπως φαίνεται στις εργασίες [13], [14] και [15] οι ικανότητες της συσκευής RTDS μπορούν και έχουν εκμεταλλευτεί για την εφαρμογή και επικύρωση συστημάτων προστασίας υπερέντασης, απόστασης και διαφορικής προστασίας. [12]



*Εικόνα 1.23: Real Time Digital Simulator (RTDS) control panel (αριστερά) και
πύργος στέγασης hardware (δεξιά)*

Το εργαλείο αυτό μοντελοποιεί προσομοιώσεις ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής συμπεριφοράς (Electro Magnetic Transient – EMT) πραγματικού χρόνου και παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από εξωτερικές συσκευές. Αυτό είναι δυνατόν καθώς το RTDS αποτελείται από επεξεργαστή υψηλής ταχύτητας και διαθέτει κάρτες αναλογικών και ψηφιακών εξόδων οι οποίες επιτρέπουν επικοινωνία με τις εν λόγω συσκευές. [16] Η προσομοίωση του συστήματος γίνεται σε διακριτό χρόνο με το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμών (time-step) να είναι εξαιρετικά μικρό. Τυπικές τιμές time-step είναι 30-50μsec. Για πολύ γρήγορα φαινόμενα, όπως είναι τα σφάλματα που αφορούν την παρούσα εργασία, το time-step μπορεί να λάβει τιμές έως και 1-4μsec. Προσομοιώνει, ακόμα, λειτουργίες όπως σύνδεση microgrid σε μεγαλύτερο σύστημα ισχύος, λεπτομερή μοντέλα μηχανών, κτλ. [16][17]



Εικόνα 1.24: Real Time Digital Simulator (RTDS) αναλογικές κάρτες (αριστερά) και ψηφιακές κάρτες (δεξιά)

Εσωτερικά το RTDS για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων κάνει χρήση της μεθόδου Hardware-In-the-Loop (HIL), η οποία είναι μια σύγχρονη τεχνική προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη και τη δοκιμή πολύπλοκων ενσωματωμένων συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Συνδιάζει τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών πραγματικών συσκευών. Τα τελευταία χρόνια το HIL χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της λειτουργίας, της ευστάθειας και της ανοχής σε σφάλματα συστημάτων ισχύος μεγάλης κλίμακας. Οι πλατφόρμες επεξεργασίας παρούσας γενιάς έχουν τη δυνατότητα να μοντελοποιούν εκτενή συστήματα μεγάλου πλήθους ζυγών, με τις σχετικές γεννήτριες, φορτία, συσκευές διόρθωσης συντελεστή ισχύος και διασυνδέσεις δικτύου. [18] Επιπλέον, η μέθοδος HIL έχει χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση ενοποίησης καταναμημένων πόρων, συστημάτων SCADA επόμενης γενιάς και μονάδων διαχείρισης ενέργειας, μεταξύ άλλων εφαρμογών. [19]

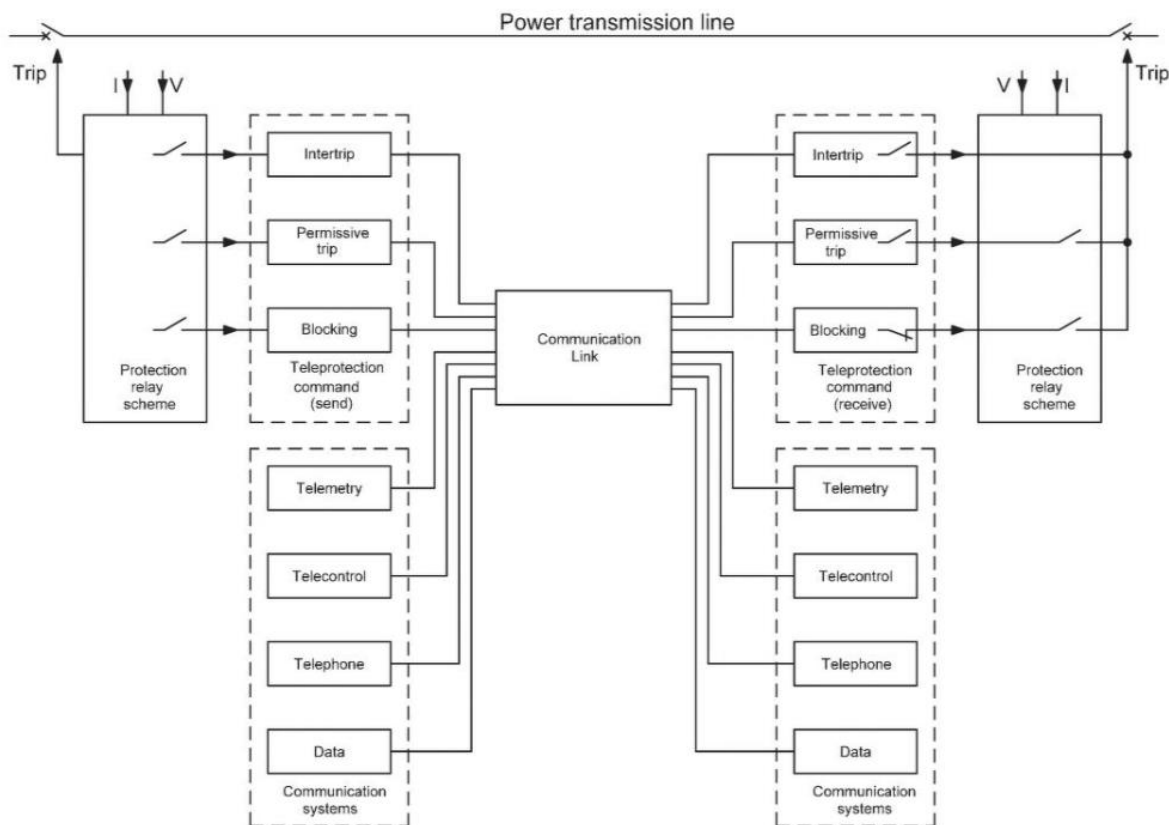
Το εργαλείο RTDS χρησιμοποιεί πληθώρα επικοινωνιακών πρωτοκόλλων για την εφαρμογή HIL testing προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα: [17]

- Aurora
- IEC 61850
- SCADA
- PMU (IEEE C37.118)
- MODBUS
- TCP/UDP

1.7 Ηλεκτρονόμοι και συμβατικά συστήματα προστασίας

Για την επίτευξη της υλοποίησης ενός αποτελεσματικού συστήματος προστασίας επιλέγεται και εγκαθίσταται ο κατάλληλος εξοπλισμός προστασίας, ο οποίος συνδέεται με τα κυκλώματα ελέγχου και τα δίκτυα επικοινωνιών. Ο εξοπλισμός αυτός πρέπει να περάσει ακόμα από απαραίτητους ελέγχους βάσει πρωτοκόλλου πρωτού τεθεί σε λειτουργία. Βασικές συνιστώσες των συστημάτων προστασίας είναι οι ηλεκτρονόμοι προστασίας, οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος, οι μετασχηματιστές τάσης και έντασης, τα κυκλώματα ελέγχου ΣΡ, οι ηλεκτρονόμοι μανδάλωσης και τα δίκτυα επικοινωνιών. [20]

Όσον αφορά τους ηλεκτρονόμους, οι βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται βασή της λειτουργίας τους είναι έξι. Αυτές είναι ηλεκτρονόμοι προστασίας (protection relays), επιτήρησης (monitoring relays), επαναφοράς (reclosing relays), ρυθμιστές (regulating relays), βοηθητικοί (auxiliary relays) και ελέγχου συγχρονισμού (synchro-check relays). [21] Από τις κατηγορίες αυτές η παρούσα εργασία πραγματεύεται κυρίως τους ηλεκτρονόμους προστασίας, παρόλο που οι σύγχρονες συσκευές που ήταν διαθέσιμες στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκαν διαθέτουν εργαλεία που επιτελούν και τις λειτουργίες άλλων κατηγοριών.



Εικόνα 1.25: Σύστημα Προστασίας Γραμμής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας αποτελούν κρίσιμο στοιχείο των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος, καθώς διασφαλίζουν την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία τους. Πρωταρχικός ρόλος τους είναι η ανίχνευση ανωμαλιών όπως είναι τα βραχυκυκλώματα που αναλύθηκαν προηγουμένως μεταξύ άλλων, όπως για παράδειγμα υπερφορτίσεις, και στη συνέχεια η άμεση ενεργοποίηση των αντίστοιχων συστημάτων προστασίας για την απομόνωση των

προβληματικών τμημάτων του δικτύου. [4] Οι Η/Ν προστασίας δέχονται ως είσοδο σήματα ελέγχου, συνήθως από μετασχηματιστές τάσεως (VTs ή PTs) και εντάσεως (CTs), και έπειτα από κατάλληλους υπολογισμούς και εάν πληρούνται τα επιθυμητά κριτήρια, στέλνουν εντολές λειτουργίας στους αντίστοιχους διακόπτες ισχύος, ή γενικά στην κατάλληλη συσκευή προστασίας. [20]

Η χρήση των Η/Ν προστασίας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας χρονολογείται περίπου εκατό έτη πίσω. Από τότε η τεχνολογία των Η/Ν έχει εξελιχθεί σημαντικά αυξάνοντας σε εκπληκτικό βαθμό την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία τους. Ως προς την τεχνολογία τους οι Η/Ν προστασίας διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: [22]

- Ηλεκτρομηχανικοί: η παλαιότερη μορφή ηλεκτρονόμων. Αποτελούνται από κινούμενα μέρη και λειτουργούν εφαρμόζοντας μηχανική δύναμη σε μια επαφή ως απόκριση της διέγερσης.
- Στατικοί: οι Η/Ν αυτοί δεν έχουν κινούμενα μέρη αλλά λειτουργούν με βάση αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα.
- Ψηφιακοί: οι ψηφιακοί Η/Ν αποτελούνται από επεξεργαστές και μικροελεγκτές οι οποίοι αντικαθιστούν τα αναλογικά κυκλώματα των στατικών. Παρόλο που οι πρώτοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι εμφανίστηκαν το 1980, χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε πληθώρα εφαρμογών.
- Αριθμητικοί: η πιο εξελιγμένη μορφή ψηφιακών ηλεκτρονόμων. Αποτελούνται από έναν ή περισσότερους ψηφιακούς επεξεργαστές σημάτων και έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 1.26:Ψηφιακός Ηλεκτρονόμος Προστασίας [23]



Εικόνα 1.27:Ηλεκτρομηχανικός Ηλεκτρονόμος Προστασίας [24]

2^ο Κεφάλαιο

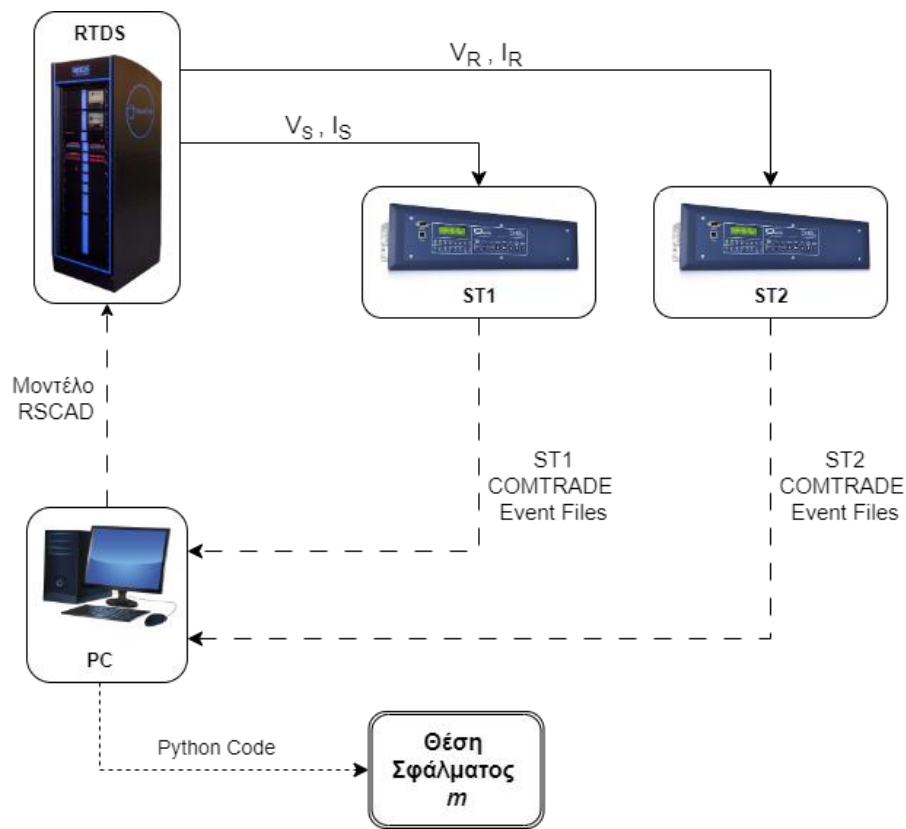
Εργαστηριακή διάταξη προσομοίωσης και λήψης μετρήσεων

Σκοπός της εργασίας είναι να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων στα άκρα αναχώρησης και άφιξης της γραμμής τη στιγμή του σφάλματος και αφού από αυτές εξαχθούν οι φασιθέτες, να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή των αλγορίθμων θέσης σφάλματος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς και των σφαλμάτων επί αυτής, καθώς και για την λήψη των αντίστοιχων μετρήσεων από τις προσομοιώσεις. Ουσιαστικά η διαδικασία αποτελείται από δύο μέρη:

- Προσομοίωση των σφαλμάτων επί γραμμής με χρήση εργαλείου RTDS
- Λήψη αναλογικών σημάτων από τους ηλεκτρονόμους SEL-351A

Έπειτα από την λήψη των σημάτων τάσεων και ρευμάτων τη στιγμή του σφάλματος, τα επεξεργάζεται κώδικας σε python ο οποίος θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Στην *Εικόνα 2.1* φαίνεται μια διαγραμματική αναπαράσταση της συνολικής διάταξης:

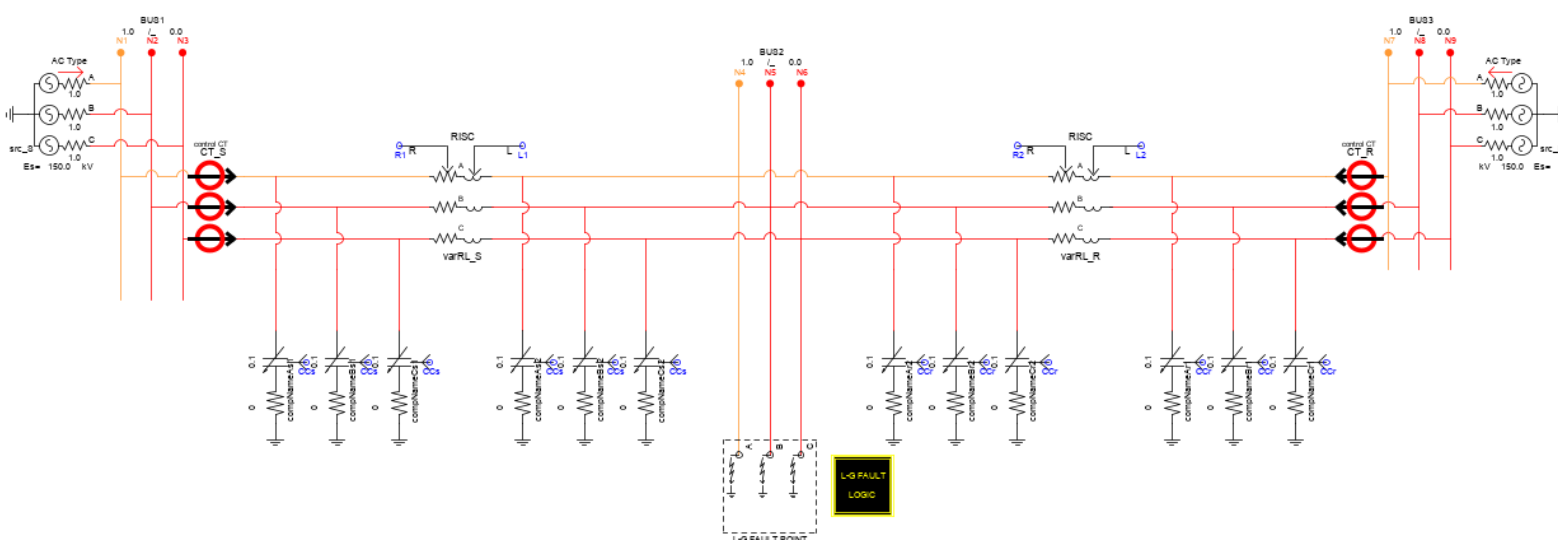


Εικόνα 2.1: Διάγραμμα ροής εργαστηριακής διάταξης

Όπως αποτυπώνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η διαδικασία ξεκινάει από τον υπολογιστή όπου έχει σχεδιαστεί το μοντέλο γραμμής στο λογισμικό RSCAD, το οποίο θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν ασύρματη σύνδεση, συνεπώς ο υπολογιστής επικοινωνεί ασύρματα με την κεντρική μονάδα του RTDS η οποία εκτελεί την προσομοίωση του μοντέλου στο RSCAD. Ακολουθώς, ενσύρματα, όπως υποδεικνύουν οι συνεχείς γραμμές στο διάγραμμα, οι τάσεις και τα ρεύματα στους ζυγούς αναχώρισης (V_S και I_S) και άφιξης (V_R και I_R) διαβάζονται από τους ηλεκτρονόμους ST1 και ST2 αντίστοιχα. Οι ηλεκτρονόμοι είναι ρυθμισμένοι κατάλληλα, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, ώστε να αντιλαμβάνονται τα σφάλματα των προσομοιώσεων. Κάθε φορά που ανιχνεύουν σφάλμα οι ηλεκτρονόμοι παράγουν έκαστος ένα αρχείο με τις κυματομορφές των τάσεων και ρευμάτων (event file). Τα αρχεία αυτά ανακτώνται από το λογισμικό εποπτείας και ελέγχου των ηλεκτρονόμων, ασύρματα, σε μορφή COMTRADE στον υπολογιστή. Τέλος, τα αρχεία COMTRADE αυτά διαβάζονται και επεξεργάζονται από κώδικα σε Python και τα προκύπτοντα δεδομένα χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για τους αλγορίθμους θέσης σφάλματος.

2.1 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους σε RSCAD

Στην *Εικόνα 2.2* φαίνεται το τριφασικό μοντέλο γραμμής μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων στο σχεδιαστικό πρόγραμμα RSCAD. Όπως αναφέρθηκε και στο *Κεφάλαιο 1* η ανάλυση επιλέχθηκε να γίνει με βάση το μοντέλο γραμμής μεσαίου μήκους, δηλαδή συμπεριλαμβάνοντας τις εγκαρσίες αγωγιμότητες της γραμμής.



Εικόνα 2.2: Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους στο λογισμικό RSCAD

Αναλυτικά, το μοντέλο είναι συμμετρική τριφασική γραμμή και στους δύο ζυγούς, αναχώρησης (Bus 1) και άφιξης (Bus 3), προσομοιώνουμε την τάση που αυτοί θα έβλεπαν από ένα άπειρο ΣΗΕ με συμμετρική τριφασική γεννήτρια τάσης 150kV, 50Hz. Όπως φαίνεται στο μοντέλο η γραμμή δεν εξυπηρετεί κάποιο φορτίο και είναι χωρισμένη σε δύο τμήματα με τον ζυγό «Bus 2» να λειτουργεί ως το σημείο επί αυτής όπου θα συμβεί το σφάλμα.

Πάνω στο ζυγό «Bus 2» έχει τοποθετηθεί ένα Fault Point Module το οποίο μπορούμε να ελέγξουμε σε πραγματικό χρόνο όσο εκτελείται η προσομοίωση. Μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγχουμε ενώ εκτελείται η προσομοίωση τον τύπο του σφάλματος (L-G, L-L, L-L-G, L-L-L), τις εμπλεκόμενες φάσεις, τη χρονική στιγμή που θα συμβεί το σφάλμα και τη διάρκειά του. Πριν γίνει compile το μοντέλο και εκτελεστεί η προσομοίωση ορίζεται στο παράθυρο ελέγχου του Fault Point αρχικά εάν το σφάλμα θα είναι σφάλμα φάσης ή γης και έπειτα η αντίσταση σφάλματος μεταξύ των φάσεων ή κάθε φάσης και της γης, αντίστοιχα. Ενδεικτικά στην *Εικόνα 2.3* παρουσιάζεται το παράθυρο ελέγχου για τα δεδομένα σφάλματος της φάσης A σε περίπτωση σφάλματος φάσης-γης.

rtds_sharc_slid_FAULT					
B Phase - Ground Fault Branch Data			C Phase - Ground Fault Branch Data		
CONFIGURATION		L-G PARAMETERS		A Phase - Ground Fault Branch Data	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Agnam	A Phase - Ground Fault Name	AG			
AgRon	A Phase - Ground Fault Resistance	10	ohm	1E-9	
Agholdi	Extinguish Arc for abs(I) at or below:	0.0	kA	0.0	10.0
Asig	Signal Name to control fault	LGFLT			
Abit	Active bit number in Asig to trigger fault	1		1	32
Amon	Monitor fault current	No			
IAgnam	Fault Current Signal Name	Iag		0	0

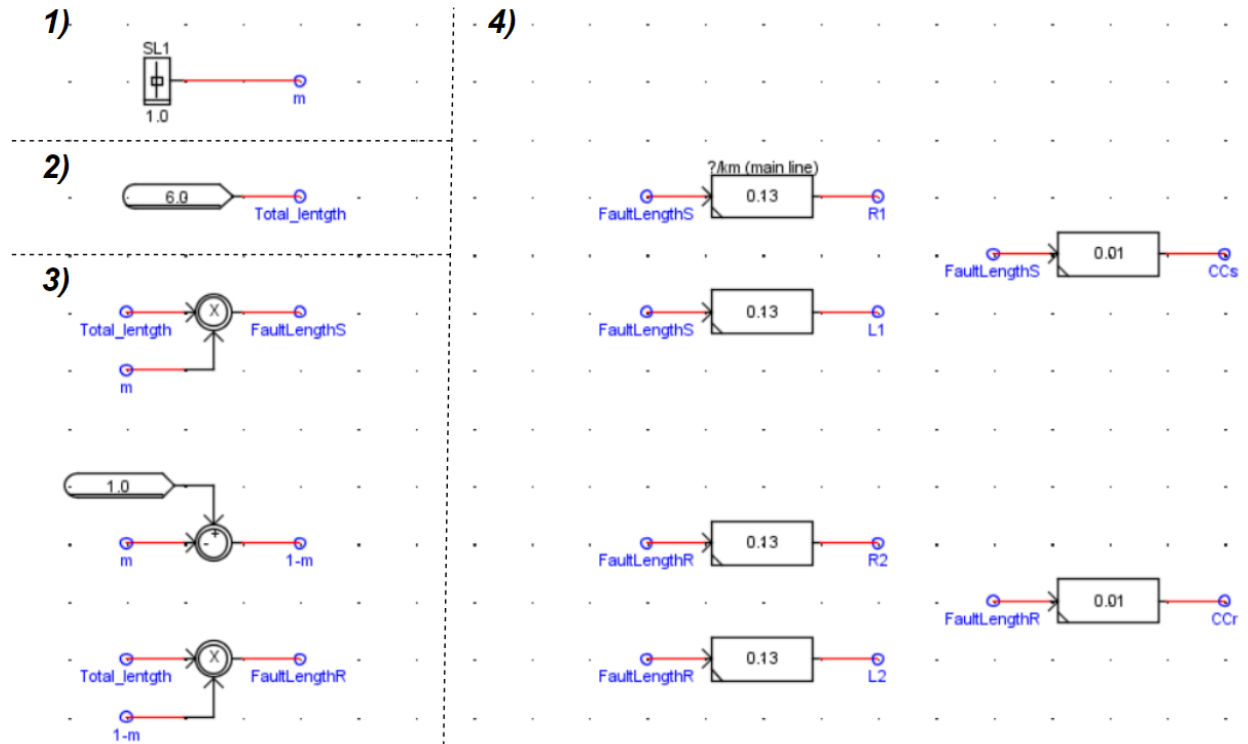
Update
Cancel
Cancel All

Εικόνα 2.3: Παράθυρο ελέγχου Fault Point

Η σειρά «A Phase – Ground Fault Name», που έχει τιμή «AG», υποδεικνύει την ονομασία του σφάλματος που συμβαίνει στην φάση A. Ακριβώς από κάτω, στη σειρά «A Phase – Ground Fault Resistance» ορίζεται η αντίσταση σφάλματος μεταξύ της φάσης A και γης. Όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για αντίσταση σφάλματος 0 ohm, 1 ohm και 10 ohm, για κάθε περίπτωση σφάλματος με την αντίσταση σφάλματος να είναι ίδια και για τις τρεις φάσεις σε κάθε περίπτωση. Επιλέχθηκε να μην υφίσταται ηλεκτρικό τόξο επί της φάσης κατά το σφάλμα, όπως φαίνεται στη γραμμή «Extinguish Arc for abs(I) at or below:», όπου επιλέγεται η απόλυτη τιμή σε Amperes πάνω από την οποία σβήνεται το τόξο. Αφού έχει επιλεγεί να σβήνεται πάνω από τα 0.0kA, δεν υφίσταται ποτέ ηλεκτρικό τόξο κατά το σφάλμα. Οι τιμές «Signal Name to control fault» και «Active bit number in Asig to trigger fault» αφορούν τις μονάδες ελέγχου του σφάλματος όσο εκτελείται η προσομοίωση και θα αναλυθούν παρακάτω.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η γραμμή έχει σχεδιαστεί σε δύο τμήματα μεταξύ των οποίων παρεμβάλεται το σημείο όπου συμβαίνει το σφάλμα. Η μοντελοποίηση αυτή είναι βασισμένη στα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο *Κεφάλαιο 1*. [11] Χρησιμοποιήθηκαν μεταβλητά στοιχεία γραμμής και εγκάρσιες αγωγιμότητες σε κάθε τμήμα τα οποία είναι πάντα συμπληρωματικά. Αυτό σημαίνει ότι εάν η συνολική ειδική αντίσταση γραμμής είναι Z, τότε αριστερά του σφάλματος ισούται με mZ ενώ δεξιά με $(1-m)Z$, όπου m είναι η απόσταση στην οποία συμβαίνει το σφάλμα από το ζυγό αναχώρησης της γραμμής. Στην

Εικόνα 2.4 φαίνεται η μοντελοποίηση που υπολογίζει τα στοιχεία των τμημάτων της γραμμής στο RSCAD.



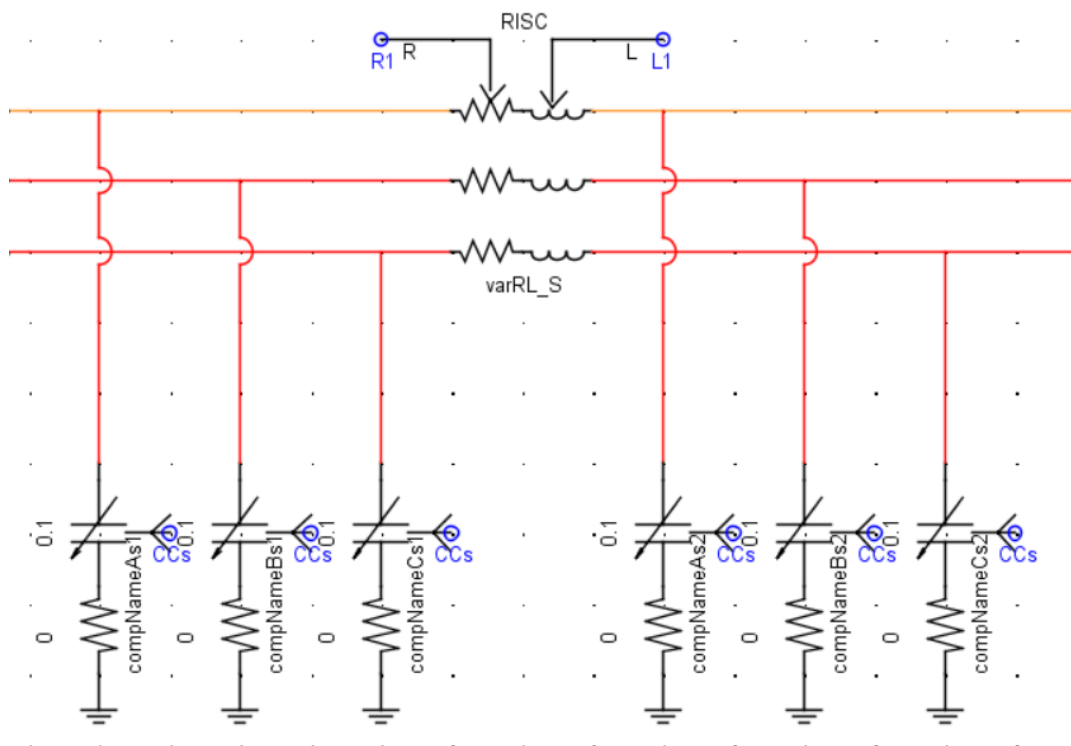
Εικόνα 2.4: Μοντελοποίηση Τμηματοποίησης της γραμμής στο RSCAD

Η παραπάνω εικόνα αποτελείται από τέσσερα τμήματα. Στο τμήμα (1) έχει τοποθετηθεί ο ελεγκτής με τον οποίο ελέγχεται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης η απόσταση στην οποία συμβαίνει το σφάλμα και επιτρέπει τιμές για την απόσταση m στο διάστημα $[0,1]$. Στο τμήμα (2) ορίζεται το συνολικό μήκος της γραμμής, έστω l , έχει επιλεγεί ίσο με 6 km και αποθηκεύεται στη μεταβλητή «Total_length». Στο τμήμα (3) υπολογίζεται το μήκος γραμμής από το ζυγό αναχώρησης S μέχρι το σημείο σφάλματος, δηλαδή η τιμή ml , πολλαπλασιάζοντας τις μεταβλητές «Total_length» και m , και αποθηκεύεται στην μεταβλητή «FaultLengthS». Στη συνέχεια με έναν αθροιστή υπολογίζεται η τιμή $(1-m)$ και πολλαπλασιάζοντας τη με το «Total_length» υπολογίζεται η τιμή $(1-m)l$. Αυτή αντιστοιχεί στο μήκος γραμμής από το σημείο του σφάλματος μέχρι το ζυγό άφιξης R και αποθηκεύεται στη μεταβλητή «FaultLengthR». Τέλος, στο τμήμα (4) οι μεταβλητή «FaultLengthS» πολλαπλασιάζεται με τα στοιχεία γραμμής εκφρασμένα σε Ohm/km , ώστε τα προκύπτων $R1$, $L1$ και CCs να δίνονται από τις εξισώσεις:

- $R1[\text{Ohm}] = \text{FaultLengthS}[\text{km}]R_{\text{line}}[\text{Ohm/km}]$
- $L1[\text{Ohm}] = \text{FaultLengthS}[\text{km}]L_{\text{line}}[\text{Ohm/km}]$
- $CCs[\text{Ohm}] = \text{FaultLengthS}[\text{km}]CCs_{\text{line}}[\text{Ohm/km}]$

Ως τιμές των στοιχείων γραμμής σε Ohm/km επιλέχθηκαν $R_{\text{line}}=0.13\text{Ohm/km}$, $L_{\text{line}}=0.13\text{Ohm/km}$ και $CCs_{\text{line}}=0.01\text{Ohm/km}$.

Οι παραπάνω τιμές οδηγούνται στο μοντέλο στα αντίστοιχα μεταβλητά στοιχεία γραμμής $R1$, $L1$ και CCs , αριστερά του σημείου του σφάλματος.



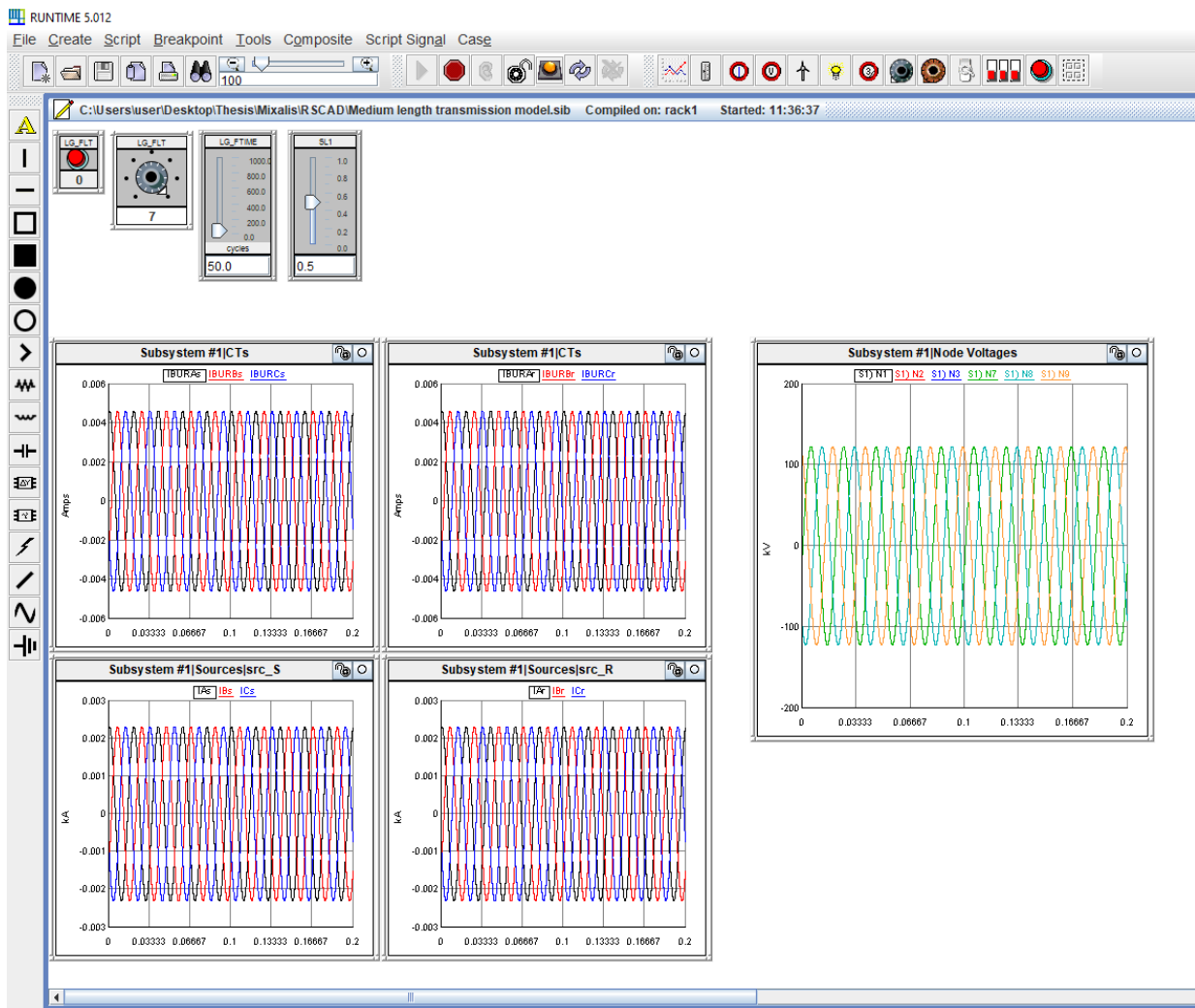
Εικόνα 2.5: Μεταβλητά στοιχεία γραμμής μεταξύ ζυγού αναχώρησης S και θέσης σφάλματος

Πλήρως αντίστοιχη είναι η διαδικασία για τα στοιχεία γραμμής από τη θέση σφάλματος έως το ζυγό άφιξης R , δηλαδή για τις τιμές $R2$, $L2$ και CCr .

2.2 Εκτέλεση προσομοίωσης μοντέλου σε πραγματικό χρόνο

Μόλις ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση της γραμμής μεταφοράς στο RSCAD το μοντέλο γίνεται compile και έπειτα φορτώνεται στην κεντρική μονάδα του RTDS, η οποία εκτελεί την προσομοίωση. Η εποπτεία της προσομοίωσης και ο έλεγχος διαφόρων μεταβλητών (πχ. απόσταση σφάλματος m) και λειτουργιών (πχ. εκτέλεση σφάλματος επί της γραμμής) γίνονται από το *Runtime Window* του RSCAD. Στο *Runtime Window* εισάγονται τα επιθυμητά όργανα εποπτείας και ελέγχου της προσομοίωσης και επιλέγεται για το καθένα το μέγεθος που θα εποπτεύει ή θα ελέγχει σε πραγματικό χρόνο. Τα όργανα εποπτείας μπορούν να είναι σχέδια (plot), μετρητικά όργανα (meter), λάμπες (light), κτλ. Τα όργανα ελέγχου μπορούν να είναι ολισθητές (slider), κουμπιά (push button), διακόπτες (switch), κτλ.

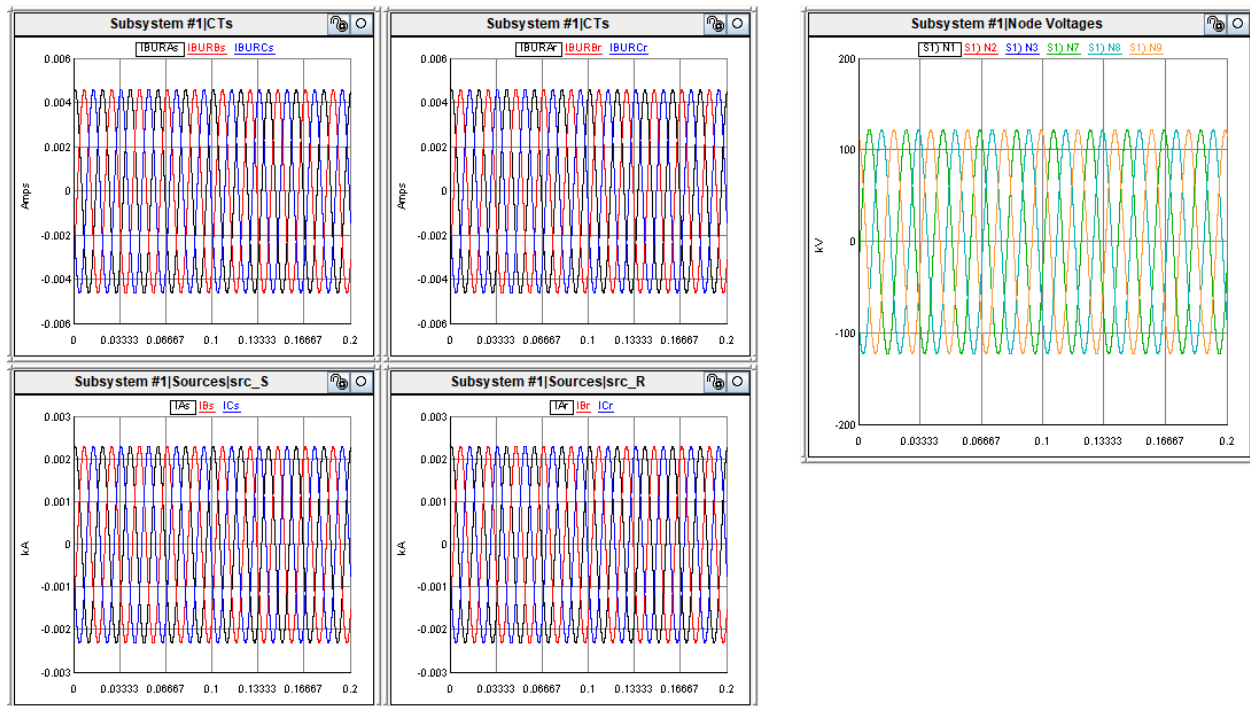
Στην *Εικόνα 2.6* φαίνεται το *Runtime Window* για την προσομοίωση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους με όλα τα κατάλληλα εποπτικά όργανα και όργανα ελέγχου για την πραγματοποίηση σφαλμάτων πάνω στη γραμμή σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 2.6: Runtime Window προσομοίωσης στο RSCAD

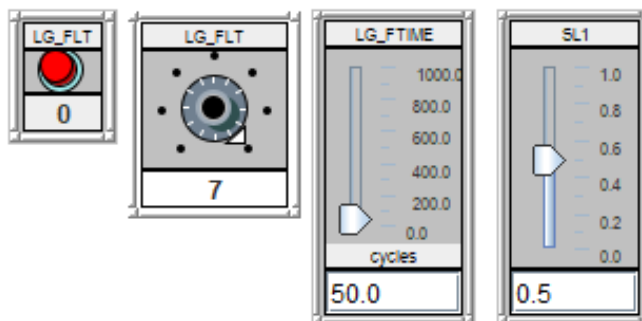
Τα γραφήματα που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα επιτελούν εποπτεία των φασικών τάσεων και ρευμάτων στους ζυγούς Bus 1 και Bus 3, αναχώρησης και άφιξης της γραμμής αντίστοιχα. Οι τάσεις ζυγών (σε kV) φαίνονται στο γράφημα «Node Voltages» ενώ στα γραφήματα «Sources|src_S» και «Sources|src_R» φαίνονται τα ρεύματα πρωτεύοντος (σε kA). Στα γραφήματα ακριβώς πάνω από αυτά, «CTs», φαίνονται τα ρεύματα δευτερεύοντος (σε A). Ο υποβιβασμός των ρευμάτων και τάσεων σε τιμές δευτερεύοντος για την ανάγνωση τους από τους ηλεκτρονόμους θα παρουσιαστούν παρακάτω. Ακόμα, στην πάνω αριστερά γωνία του παραθύρου έχουν τοποθετηθεί τα όργανα ελέγχου του Fault Point module του μοντέλου, με αυτά γίνεται δηλαδή ο έλεγχος του σφάλματος.

Προτού πραγματοποιηθεί το σφάλμα επί της γραμμής το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Οι τάσεις στους ζυγούς είναι σταθερές και ίσες με την τιμή της τάσης των γεννητριών. Αφού η γραμμή δεν εξυπηρετεί κάποιο φορτίο και οι γεννήτριες στα άκρα της είναι πανομοιότυπες το ρεύμα γραμμής είναι μηδενικό. Οι κυματομορφές που παρατηρούνται στο Runtime της προσομοίωσης επιδεικνύουν πολύ μικρά πλάτη. Δεν είναι πλήρως μηδενικό το ρεύμα προσομοίωσης εξαιτίας θορύβου και τυχόντων απωλειών, πρακτικά όμως το ρεύμα που ανιχνεύεται είναι αμελητέο.



Εικόνα 2.7:Γραφήματα εποπτείας τάσεων και ρευμάτων ζυγών Bus1 και Bus3 στη μόνιμη κατάσταση

Στην Εικόνα 2.8 φαίνονται τα όργανα ελέγχου πραγματικού χρόνου του σφάλματος στο Runtime Window της προσομοίωσης.



Εικόνα 2.8:Όργανα ελέγχου σφάλματος προσομοίωσης

Από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε αρχικά το κουμπί (push button) «LG_FLT» το οποίο όταν πατηθεί πραγματοποιεί σφάλμα επί της γραμμής τη στιγμή που πατήθηκε. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεγεί στον Fault Point του μοντέλου σφάλμα φάσης-γης αλλά η ανάλυση που ακολουθεί είναι εντελώς αντίστοιχη για σφάλματα φάσης-φάσης.

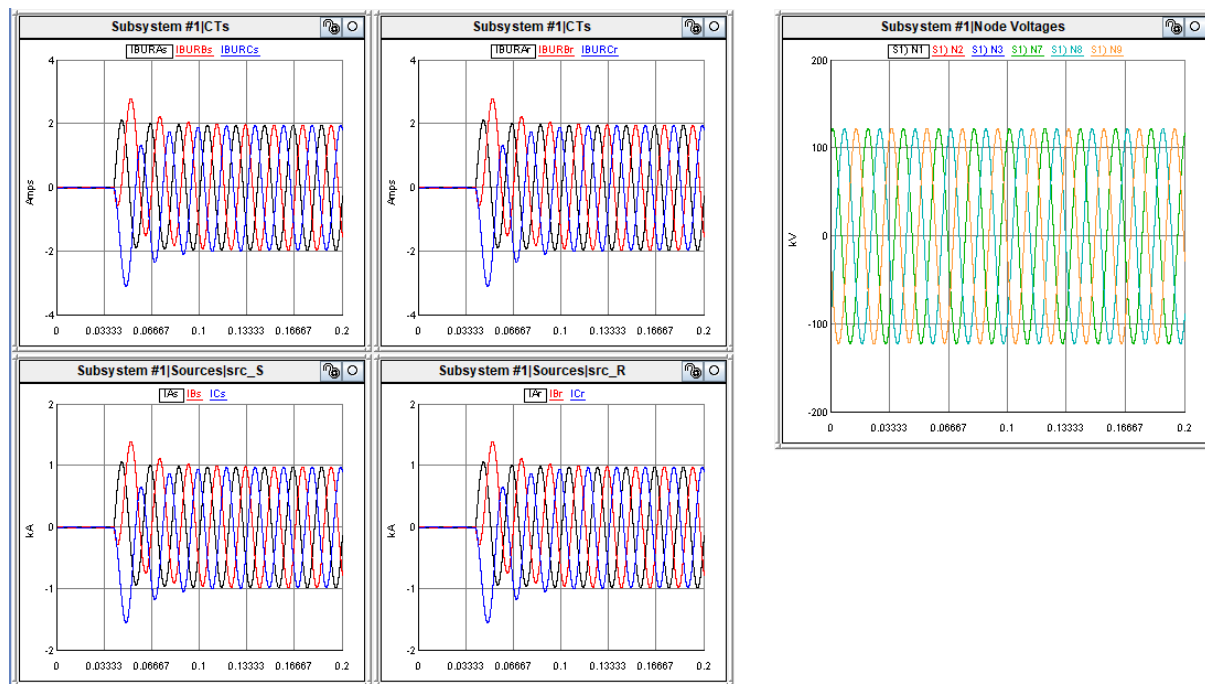
Στη συνέχεια, ο επιλογέας (dial) «LG_FLT» λαμβάνει τιμές από το 1 έως και το 7, με κάθε τιμή να αντιστοιχεί σε διαφορετικό τύπο σφάλματος. Η τιμή που λαμβάνει το dial αντιστοιχεί σε έναν αριθμό στο δυαδικό σύστημα, όπου κάθε bit του δυαδικού αριθμού αντιστοιχεί σε μία φάση και η τιμή του κάθε bit (0 ή 1) στο εάν η αντίστοιχη φάση συμβάλλει στο σφάλμα που συμβαίνει (bit =1) ή όχι (bit=0). Εφόσον το σύστημα είναι τριφασικό οι φάσεις αντιπροσωπεύονται από 3 bit και το dial μπορεί να λάβει τιμές [001 , 111] ή σε δεκαδικό σύστημα [1,7]. Στην Εικόνα 2.3, η γραμμή με όνομα «Active bit number in Asig to trigger fault» έχει την τιμή 1. Η αντίστοιχη

επιλογή για τις φάσεις B και C έχει τις τιμές 2 και 3 αντίστοιχα. Τα bit αριθμούνται από δεξιά προς τα αριστερά συνεπώς το LSB (Least Significant Bit) αντιστοιχεί στη φάση A, το επόμενο στην B και το MSB (Most Significant Bit) στη φάση C. Οι τύποι σφαλμάτων που μπορούν να πραγματοποιηθούν ακολουθούν, συνεπώς, την κωδικοποίηση:

- Dial = 1 → Binary = 001 → Μονοφασικό σφάλμα με γη (L-G) στη φάση A
- Dial = 2 → Binary = 010 → Μονοφασικό σφάλμα με γη (L-G) στη φάση B
- Dial = 3 → Binary = 011 → Διφασικό σφάλμα με γη (L-L-G) στις φάσεις A και B
- Dial = 4 → Binary = 100 → Μονοφασικό σφάλμα με γη (L-G) στη φάση C
- Dial = 5 → Binary = 101 → Διφασικό σφάλμα με γη (L-L-G) στις φάσεις A και C
- Dial = 6 → Binary = 110 → Διφασικό σφάλμα με γη (L-L-G) στις φάσεις B και C
- Dial = 7 → Binary = 111 → Τριφασικό σφάλμα (L-L-L)

Προφανώς, δεν υπάρχει επιλογή Dial = 0 (ή 000 σε δυαδικό) καθώς αυτή θα σήμαινε πως δεν εμπλέκεται καμία φάση στο σφάλμα.

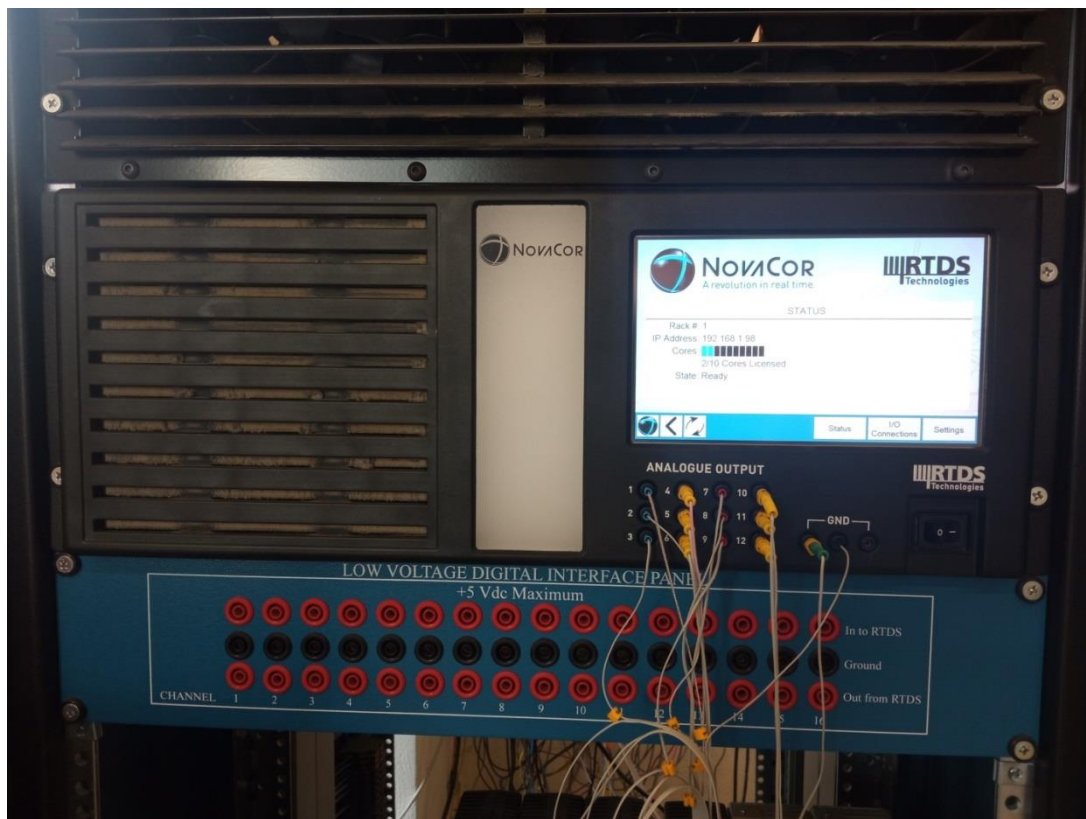
Έπειτα, φαίνεται ο ολισθητής (slider) «LG_FTIME» με τον οποίο ορίζεται η διάρκεια του σφάλματος. Όλα τα σφάλματα επιλέχθηκε να διαρκέσουν 50 κύκλους. Για συχνότητα 50Hz, που είναι η συχνότητα του δικτύου, αυτό αντιστοιχεί σε χρόνο διάρκειας σφάλματος 1sec. Τέλος, ο ολισθητής (slider) «SL1» ελέγχει τη θέση στην οποία επιλέγεται να γίνει το σφάλμα. Λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,1] και η τιμή του αντιστοιχεί στη μεταβλητή θέσης σφάλματος m . Παραδείγματος χάρη εάν τεθεί στην τιμή 0.5 η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε σφάλμα στο 50% του συνολικού μήκους γραμμής.



Εικόνα 2.9:Γραφήματα εποπτείας τάσεων και ρευμάτων ζυγών Bus1 και Bus3 κατά την εκτέλεση σφάλματος

2.3 Υποβιβασμός μεγεθών προσομοίωσης στο δευτερεύον και οδήγηση εξόδων προσομοίωσης στους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους

Τα μεγέθη της προσομοίωσης, που είναι επιθυμητό να οδηγηθούν στους ηλεκτρονόμους είναι οι φασικές τάσεις και ρεύματα στους ζυγούς Bus 1 και Bus 3. Η οδήγηση των μεγεθών αυτών γίνεται με χρήση των αναλογικών εξόδων της κεντρικής μονάδας του RTDS, οι οποίες φαίνονται στην *Εικόνα 2.10*.



Εικόνα 2.10: Αναλογικές έξοδοι κεντρικής μονάδας RTDS

Οι αναλογικές έξοδοι επιλέχθηκαν ως εξής:

- Analogue output [1, 2, 3] = [I_{Sa} , I_{Sb} , I_{Sc}] (ρεύμα δευτερεύοντος φάσης A, B και C αντίστοιχα στο ζυγό Bus 1)
- Analogue output [4, 5, 6] = [I_{Ra} , I_{Rb} , I_{Rc}] (ρεύμα δευτερεύοντος φάσης A, B και C αντίστοιχα στο ζυγό Bus 3)
- Analogue output [7, 8, 9] = [V_{Sa} , V_{Sb} , V_{Sc}] (τάση δευτερεύοντος φάσης A, B και C αντίστοιχα στο ζυγό Bus 1)
- Analogue output [10, 11, 12] = [V_{Ra} , V_{Rb} , V_{Rc}] (τάση δευτερεύοντος φάσης A, B και C αντίστοιχα στο ζυγό Bus 3)

Τα σήματα αυτά οδηγούνται μέσω ηλεκτρικών ακίδων (pins) στις αναλογικές εισόδους των ψηφιακών ηλεκτρονόμενων *SEL-351A* που διαθέτει το εργαστήριο. Οι δύο ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται και τα καλώδια σημάτων εισόδων τους φαίνονται στην *Εικόνα 2.11*. Τα σήματα φασικών ρευμάτων και τάσεων του ζυγού αναχώρησης (Bus 1) οδηγούνται στον Η/Ν

ST1 ενώ τα αντίστοιχα σήματα του ζυγού άφιξης (Bus 3) οδηγούνται στον H/N ST2.



Εικόνα 2.11: Ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι SEL-351A

Τα pins εισόδου των ηλεκτρονόμων ακολουθούν συγκεκριμένη διαδοχή σημάτων η οποία αντιστοιχίζεται με τις κατάλληλες αναλογικές εξόδους του RTDS. Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από το καλώδιο που είναι σηματοδεδεμένο με ροζ καλώδιο ως το δεξιότερο και έπειτα προς τα αριστερά η διαδοχή που πρέπει να ακολουθηθεί είναι η εξής: [25]

- Καλώδιο 1 (ροζ) → ρεύμα φάσης A → Analogue Output [1](ST1), [4](ST2)
- Καλώδιο 2 → ρεύμα φάσης B → Analogue Output [2](ST1), [5](ST2)
- Καλώδιο 3 → ρεύμα φάσης C → Analogue Output [3](ST1), [6](ST2)
- Καλώδιο 4 → τάση φάσης A → Analogue Output [7](ST1), [10](ST2)
- Καλώδιο 5 → τάση φάσης B → Analogue Output [8](ST1), [11](ST2)
- Καλώδιο 6 → τάση φάσης C → Analogue Output [9](ST1), [12](ST2)

Οι αναλογικές εξόδους του RTDS παρέχουν σήμα στο εύρος $[-5V, 5V]$ και επιλέγεται κατά το σχεδιασμό του μοντέλου η μέγιστη τιμή κάθε εξόδου η οποία αντιστοιχεί σε έξοδο 5V και οι υπόλοιπες τιμές τις εξόδους ορίζονται σε αναλογία με την τιμή αυτή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12, ενδεικτικά για την έξοδο [7] αλλά ομοίως για όλες, στην επιλογή «Floating Point Value <-> 5 Volts» έχει επιλεγεί η τιμή να είναι ίση με 5 (η μονάδα μέτρησης εξαρτάται απ' τη φύση του αντίστοιχου μεγέθους). Με άλλα λόγια, οι αναλογικές εξόδους του RTDS έχουν αναλογία 1:1 με τα αντίστοιχα μεγέθη του μοντέλου που οδηγούνται σε αυτές.

rtds_sharc_ctl_AOUT					
Parameters					
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
DA	Analogue Output Channel	7		1	12
SC	Floating Point Value <--> 5 volts	5		1.0e-6	
DisplayNC	Show Details On NovaCor Display	Yes ▼		0	1
Desc	Description of signal being monitored (NovaCor Display)			0	0
Units	Units (NovaCor Display)			0	0
Icon	Show component icons as	La... ▼			
Proc	Assigned Controls Processor	1		1	54
Pri	Priority Level	61		1	

Εικόνα 2.12: Ρυθμίσεις αναλογικής εξόδου RTDS

Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι SEL-351A εφαρμόζουν στα σήματα που δέχονται κλιμακοποίηση, συγκεκριμένα μετασχηματίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα των εισόδων σε σήματα μερικών *mV* στην έξοδο των ηλεκτρονόμων. Για να επιτευχθεί η ανάγνωση των αναλογικών σημάτων δίχως αλλοίωση από την επεξεργασία αυτή, προτού οδηγηθούν τα σήματα του μοντέλου στις αναλογικές εξόδους πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον κατάλληλο συντελεστή. Για τα σήματα ρευμάτων ο συντελεστής κλιμακοποίησης του H/N «*Scale Factor (Input/Output)*» είναι ίσος με 110.60 A/V, συνεπώς τα αναλογικά σήματα ρευμάτων πρέπει να πολλαπλασιαστούν με συντελεστή $\frac{1}{110.60} = 0.0090416$ προτού οδηγηθούν στην αντίστοιχη έξοδο. Για τα σήματα τάσεων το *Scale Factor* είναι ίσο με 223.97 V/V, συνεπώς τα αναλογικά σήματα τάσεων πρέπει να πολλαπλασιαστούν με συντελεστή $\frac{1}{223.97} = 0.0044649$ προτού οδηγηθούν στην αντίστοιχη έξοδο. [25]

Κατά τη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων εισάγονται οι τιμές των λόγων μετασχηματισμού των μετασχηματιστών ρεύματος (CTR) και τάσεως (PTR ή VTR), των οποίων τα δευτερεύοντα οδηγούνται στις εισόδους των ηλεκτρονόμων. Προφανώς κατά τη σχεδίαση του μοντέλου και τη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων έχουν επιλεγεί M/Σ ρευμάτων και τάσεων με ίδιους λόγους μετασχηματισμού ώστε να μη χρειάζεται περαιτέρω μετασχηματισμός των μεγεθών ώστε να αναπαράγουν ορθά δεδομένα οι H/N. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.13*, ενδεικτικά για τον ηλεκτρονόμο ST1 και όμοια για τον ST2, στις γενικές ρυθμίσεις H/N έχουν οριστεί το «CTR phase» (λόγος μετασχηματισμού CT) ίσος με 500 και το «PTR phase» (λόγος μετασχηματισμού PT ή VT) ίσος με 288.67.

Συνεπώς, στο μοντέλο γραμμής του RSCAD έχει επιλεχθεί ο μετασχηματιστής ρεύματος στους ζυγούς Bus 1 και Bus 3 να έχει λόγο μετασχηματισμού 500 και τα σήματα δευτερεύοντος αυτών είναι που πολλαπλασιάζονται με το αντίστροφο *Scale Factor* και οδηγούνται στην έξοδο. Οι τάσεις των ζυγών λαμβάνονται απευθείας ως μέτρηση από τα αντίστοιχα nodes των ζυγών. Για το λόγο αυτό πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον αντίστροφο λόγο μετασχηματισμού *PTR phase*, δηλαδή με την τιμή $\frac{1}{288.67} = 0.00346$, ώστε να αναχθούν σε τιμή δευτερεύοντος. Τέλος, οι μετρήσεις τάσης πολλαπλασιάζονται επί 1000 καθώς οι τιμές απευθείας από τους ζυγούς είναι σε μονάδα [kV] και έτσι μετατρέπονται σε [Volt].

General Settings

Relay Identifier Labels

RID Relay Identifier (30 chars)

ST1

TID Terminal Identifier (30 chars)

ST1

Current and Potential Transformer Ratios

CTR Phase (IA,IB,IC) CT Ratio

500

Range = 1 to 6000

CTRN Neutral (IN) CT Ratio

1

Range = 1 to 10000

PTR Phase (VA,VB,VC) PT Ratio

288,67

Range = 1,00 to 10000,00

PTRS Synch. Voltage (VS) PT Ratio

1,00

Range = 1,00 to 10000,00

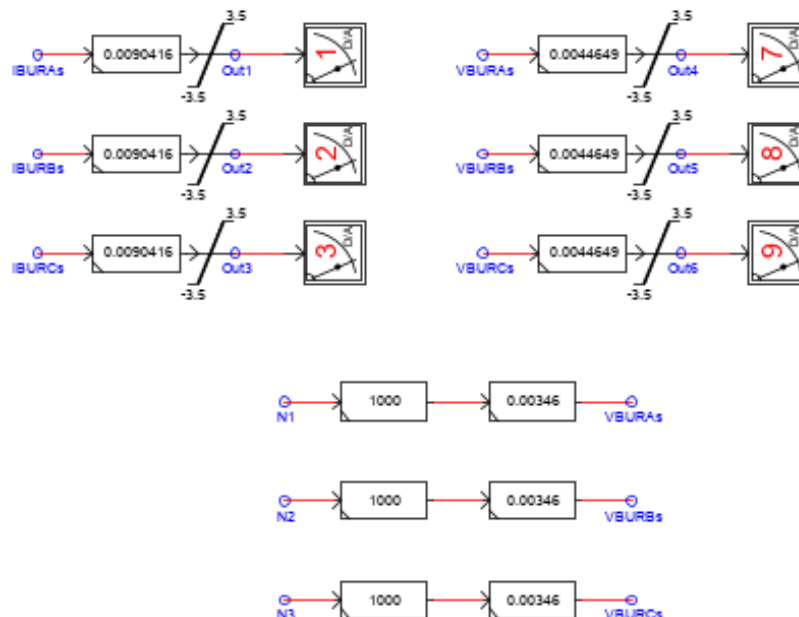
VNOM Phase Nominal Voltage L-N (V,sec)

300,00

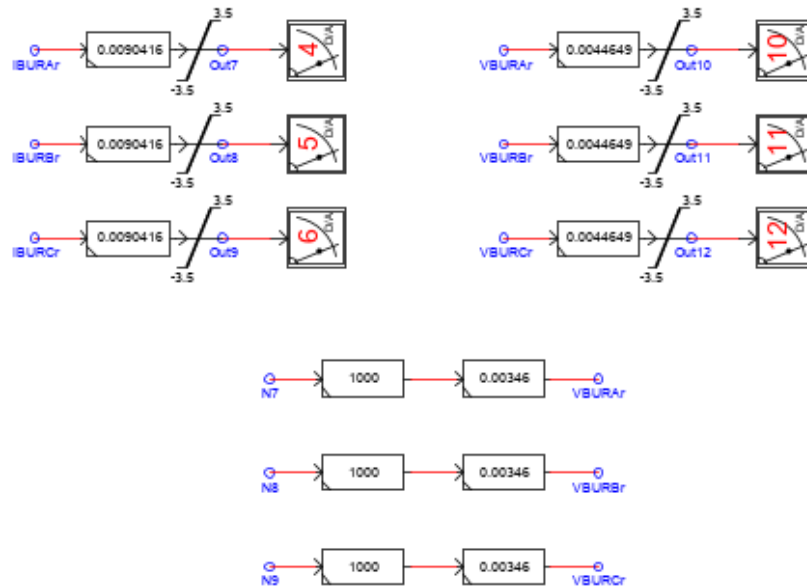
Range = 25,00 to 300,00, OFF

Εικόνα 2.13: Γενικές ρυθμίσεις ηλεκτρονόμου ST1

Η πλήρης διαδικασία κλιμακοποίησης και οδήγησης των σημάτων στις εξόδους του συστήματος φαίνεται στις *Εικόνες 2.14* (για τα μεγέθη του ζυγού αναχώρησης Bus 1) και 2.15 (για τα μεγέθη του ζυγού άφιξης Bus 3).



Εικόνα 2.14: Οδήγηση σημάτων εξόδου του ζυγού Bus 1

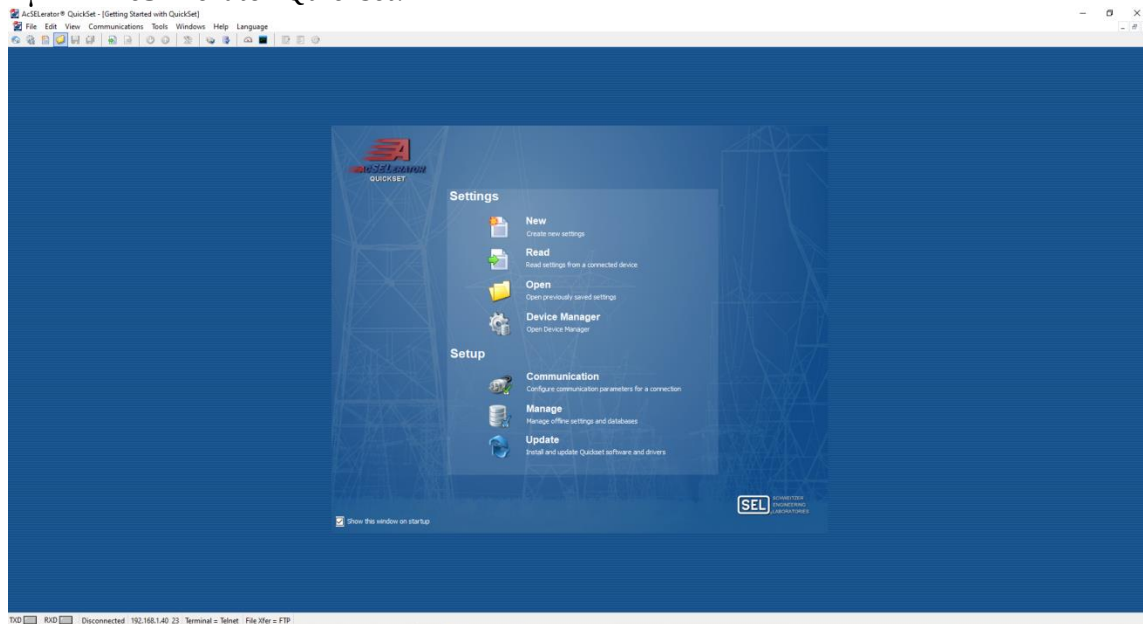


Εικόνα 2.15: Οδήγηση σημάτων εξόδου του ζυγού Bus 3

Οι περιοριστές (limiters) που έχουν τοποθετηθεί πριν τις εξόδους και περιορίζουν τα σήματα σε διάστημα $[-3.5V, 3.5V]$ διασφαλίζουν την ασφάλεια του εξοπλισμού των ηλεκτρονόμων καθώς τάση εισόδου τιμής ≥ 9 Volt Peak-Peak διακινδυνεύει βλάβη των συσκευών.

2.4 Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων και λήψη αναλογικών μετρήσεων

Η ρύθμιση και εποπτεία της λειτουργίας των ηλεκτρονόμων SEL-351A γίνεται μέσω του λογισμικού AcSELerator Quickset.



Εικόνα 2.16: Κύριο μενού λογισμικού AcSELerator Quickset

Στην *Εικόνα 2.16* φαίνεται το κύριο μενού του λογισμικού AcSELerator από το οποίο παρέχεται πρόσβαση στις διάφορες λειτουργίες επικοινωνίας και ελέγχου των ηλεκτρονόμων του εργαστηρίου. Αρχικά, από το μενού «Setup» και την επιλογή «Communication» γίνεται επιλογή του ηλεκτρονόμου με τον οποίο είναι επιθυμητή η σύνδεση, στην παρούσα περίπτωση τον ST1 ή τον ST2, και έπειτα εδραιώνεται η σύνδεση αυτή μεταξύ υπολογιστή και Η/Ν. Οι ηλεκτρονόμοι λειτουργούν με βάση τις ρυθμίσεις που επιλέγονται από τον χειριστή και μπορούν να ανατεθούν εκ νέου με την επιλογή «New», στο μενού «Settings», ή να χρησιμοποιηθούν ήδη υπάρχουσες ρυθμίσεις που έχουν αποθηκευτεί στον υπολογιστή με την επιλογή «Open». Έπειτα, οι ρυθμίσεις στέλνονται στον Η/Ν που επικοινωνεί με τον Η/Υ με την επιλογή «Send». Ακόμα, σημειώνεται πως η επιλογή «Read» ενεργοποιεί τις ρυθμίσεις με τις οποίες λειτουργεί ο Η/Ν.

Οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τους Η/Ν ST1 και ST2 είναι πανομοιότυπες και παρουσιάζονται παρακάτω. Οι γενικές ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων, με τα κατάλληλα CTR και PTR, παρουσιάστηκαν προηγουμένως στην *Εικόνα 2.13*.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι επιθυμητό οι ηλεκτρονόμοι να λειτουργούν ως μετρητικά όργανα από τα οποία εξάγονται οι αναλογικές μετρήσεις τη στιγμή που συμβαίνει ένα σφάλμα επί της γραμμής που προσομοιώνεται. Προς επίτευξη αυτού, οι συσκευές ρυθμίζονται ώστε να παράγουν ένα αρχείο «Event File» όταν ενεργοποιούνται συγκεκριμένες προστασίες. Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται σε πραγματικό χρόνο την στιγμή που ενεργοποιείται η προστασία και περιέχει τις επιθυμητές αναλογικές μετρήσεις των ρευμάτων και των τάσεων. Οι προστασίες που επιλέχθηκαν φαίνονται στην *Εικόνα 2.17* στην γραμμή «SER1 Sequential Events Recorder 1 Trigger List». Οι άλλες δύο λίστες δεν αφορούν τα σφάλματα που εξετάζονται.

Sequential Events Recorder Trigger Lists

SER1 Sequential Events Recorder 1 Trigger List, 24 elements max. (enter NA or 0 to null)
 ...

SER2 Sequential Events Recorder 2 Trigger List, 24 elements max. (enter NA or 0 to null)
 ...

SER3 Sequential Events Recorder 3 Trigger List, 24 elements max. (enter NA or 0 to null)
 ...

Εικόνα 2.17: Λίστες προστασιών η ενεργοποίηση των οποίων παράγει «Event File»

Οι προστασίες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των σφαλμάτων από τους ηλεκτρονόμους είναι προστασίες υπερέντασης. Συγκεκριμένα: [25]

- 51P: Phase Time-Overcurrent Element
- 51G: Residual-Ground Time-Overcurrent Element
- 50P1: Instantaneous Overcurrent Element

Στις Εικόνες 2.18 και 2.19 φαίνονται οι ρυθμίσεις για τις προστασίες *Phase Overcurrent Elements (50P1)* και *Phase Time-Overcurrent Elements (51P, 51G)*.

Phase Overcurrent Elements

Phase Overcurrent Element Settings

E50P Phase
1 Select: N, 1-6

Phase Instantaneous Overcurrent Elements

50P1P Level 1 (A,sec)
0,25 Range = 0,25 to 100,00, OFF

50P2P Level 2 (A,sec)
OFF Range = 0,25 to 100,00, OFF

50P3P Level 3 (A,sec)
OFF Range = 0,25 to 100,00, OFF

50P4P Level 4 (A,sec)
OFF Range = 0,25 to 100,00, OFF

50P5P Level 5 (A,sec)
OFF Range = 0,25 to 100,00, OFF

50P6P Level 6 (A,sec)
OFF Range = 0,25 to 100,00, OFF

Εικόνα 2.18: Ρυθμίσεις των Phase Overcurrent Elements ηλεκτρονόμων

Phase Time-Overcurrent Elements

Phase Time-Overcurrent Element Settings

E51P Phase
1 Select: N, 1, 2

Phase Time-Overcurrent Element

51PP Pickup (A,sec)
0,25 Range = 0,25 to 16,00, OFF

51PC Curve
U3 Select: U1-U5, C1-C5

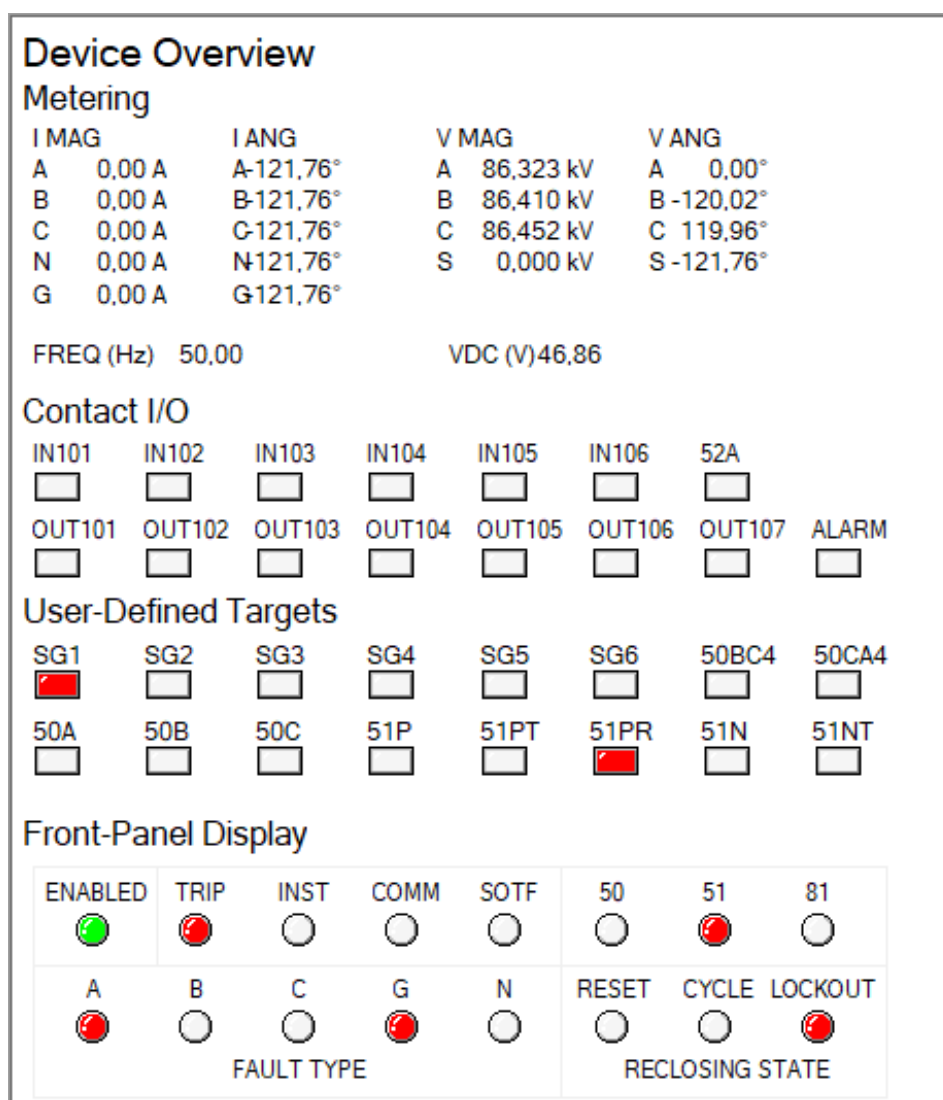
51PTD Time Dial
3,00 Range = 0,50 to 15,00

51PRS EM Reset Delay
N Select: Y, N

Εικόνα 2.19: Ρυθμίσεις των Phase Time-Overcurrent Elements ηλεκτρονόμων

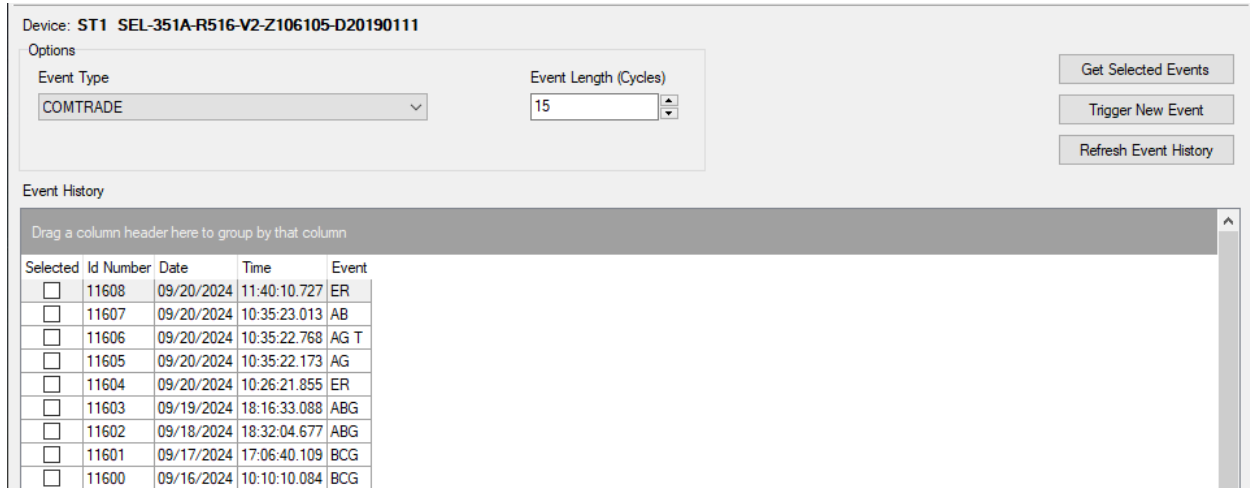
Τα ρεύματα I_p (pickup currents) των προστασιών έχουν επιλεχθεί στην ελάχιστη δυνατή τιμή που επιτρέπει το λογισμικό ώστε να ενεργοποιούνται για κάθε πιθανό σφάλμα που συμβαίνει σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στη γραμμή. Δεν υπάρχει κίνδυνος να ενεργοποιηθεί κάποια προστασία από ρεύμα μόνιμης κατάστασης καθώς, εφόσον δεν εξυπηρετείται κάποιο φορτίο στην προσομοίωση και οι τάσεις των ζυγών Bus 1 και Bus 3 είναι ίσες, αυτό είναι πρακτικά μηδενικό.

Από τη στιγμή που έχει εδραιωθεί επικοινωνία με τον ηλεκτρονόμο και έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες ρυθμίσεις, το λογισμικό AcSELerator παρέχει την δυνατότητα εποπτείας του H/N σε πραγματικό χρόνο μέσω της λειτουργίας «Human Machine Interface» ή «HMI». Στην *Εικόνα 2.20* φαίνεται το παράθυρο του HMI το οποίο δίνει πληροφορίες για τους φασιθέτες ρευμάτων και τάσεων που διαβάζει ο H/N, την κατάσταση των διαφόρων προστασιών, καθώς και τις ενδείξεις στην μπροστινή οθόνη του H/N.



Εικόνα 2.20: Παράθυρο εποπτικού εργαλείου Human Machine Interface

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως όταν ενεργοποιείται μία από τις προστασίες των ηλεκτρονόμων αυτοί παράγουν ένα *Event File* το οποίο περιέχει τις αναλογικές μετρήσεις των μεγεθών του σφάλματος. Χρησιμοποιώντας τη λειτουργία «*Get Event Files*» του λογισμικού AcSELerator είναι δυνατόν να προβληθούν και να αποθηκευτούν τα αρχεία αυτά.



Device: **ST1 SEL-351A-R516-V2-Z106105-D20190111**

Options

Event Type: **COMTRADE**

Event Length (Cycles): **15**

Buttons: Get Selected Events, Trigger New Event, Refresh Event History

Event History

Drag a column header here to group by that column

Selected	Id Number	Date	Time	Event
☐	11608	09/20/2024	11:40:10.727	ER
☐	11607	09/20/2024	10:35:23.013	AB
☐	11606	09/20/2024	10:35:22.768	AG T
☐	11605	09/20/2024	10:35:22.173	AG
☐	11604	09/20/2024	10:26:21.855	ER
☐	11603	09/19/2024	18:16:33.088	ABG
☐	11602	09/18/2024	18:32:04.677	ABG
☐	11601	09/17/2024	17:06:40.109	BCG
☐	11600	09/16/2024	10:10:10.084	BCG

Εικόνα 2.21: Παράθυρο ανάκτησης Event Files ηλεκτρονόμων

Στην *Εικόνα 2.21* φαίνεται το παράθυρο ανάκτησης των αρχείων Event File του ηλεκτρονόμου ST1 (φαίνεται από το αναγνωριστικό συσκευής «*Device*»), από όπου πραγματοποιείται η αποθήκευση των επιθυμητών αρχείων για ένα σφάλμα γραμμής. Αρχικά, από τις επιλογές «*Options*» ορίζουμε το «*Event Type*» να δίνεται στη μορφή COMTRADE και το μέγεθος του κάθε Event, «*Event Length (Cycles)*», ίσο με 15 κύκλους. Στη συνέχεια, από τη λίστα «*Event History*» επιλέγεται το αρχείο που αντιστοιχεί στην ώρα («*Time*») όπου πραγματοποιήθηκε το σφάλμα σε πραγματικό χρόνο στην προσομοίωση. Έπειτα, επιλέγεται το «*Get Selected Events*» και αποθηκεύεται το αρχείο στο ορισμένο directory. Τέλος, από το κεντρικό μενού του AcSELerator πραγματοποιείται αποσύνδεση, «*Disconnect*», από τον H/N ST1 και πραγματοποιείται σύνδεση στον H/N ST2 και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία. Με αυτόν τον τρόπο έχουν αποθηκευτεί τα αρχεία COMTRADE με τις αναλογικές μετρήσεις ρευμάτων και τάσεων των δύο ζυγών, Bus 1 και Bus 3, τα οποία θα τα επεξεργαστεί στη συνέχεια κώδικας σε Python.

Μια ακόμα λειτουργία που χρησιμοποιήθηκε είναι η ρύθμιση του «*Fault Locator*» των ηλεκτρονόμων. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στον H/N να πραγματοποιεί εκτίμηση για τη θέση στην οποία συμβαίνει ένα σφάλμα επί της γραμμής. Η ρύθμιση του Fault Locator απαιτεί εισαγωγή των στοιχείων γραμμής, όπως επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό του μοντέλου. Τα στοιχεία γραμμής υπολογίστηκαν ως εξής:

- $Z1MAG = l \sqrt{R_{line}^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{line})^2} = 424.44 \Omega$
- $Z1ANG = \arctan\left(\frac{2\pi f L_{line}}{R_L}\right) = 89.82 \deg$
- $Z0MAG = Z1MAG$
- $Z0ANG = Z1ANG$

Line Settings and Fault Locator

Line Settings	
Z1MAG Pos-Seq Line Impedance Mag. (Ohm,sec)	
424,44	Range = 0,10 to 510,00
Z1ANG Pos-Seq Line Impedance Angle (deg)	
89,82	Range = 5,00 to 90,00
Z0MAG Zero-Seq Line Impedance Mag. (Ohm,sec)	
424,44	Range = 0,10 to 510,00
Z0ANG Zero-Seq Line Impedance Angle (deg)	
89,82	Range = 5,00 to 90,00
Z0SMAG Zero-Seq Source Impedance Mag. (Ohm,sec)	
0,36	Range = 0,10 to 510,00
Z0SANG Zero-Seq Source Impedance Angle (deg)	
84,61	Range = 0,00 to 90,00
LL Line Length - unitless	
100,00	Range = 0,10 to 999,00
Fault Locator	
EFLOC Fault Location	
Y	Select: Y, N

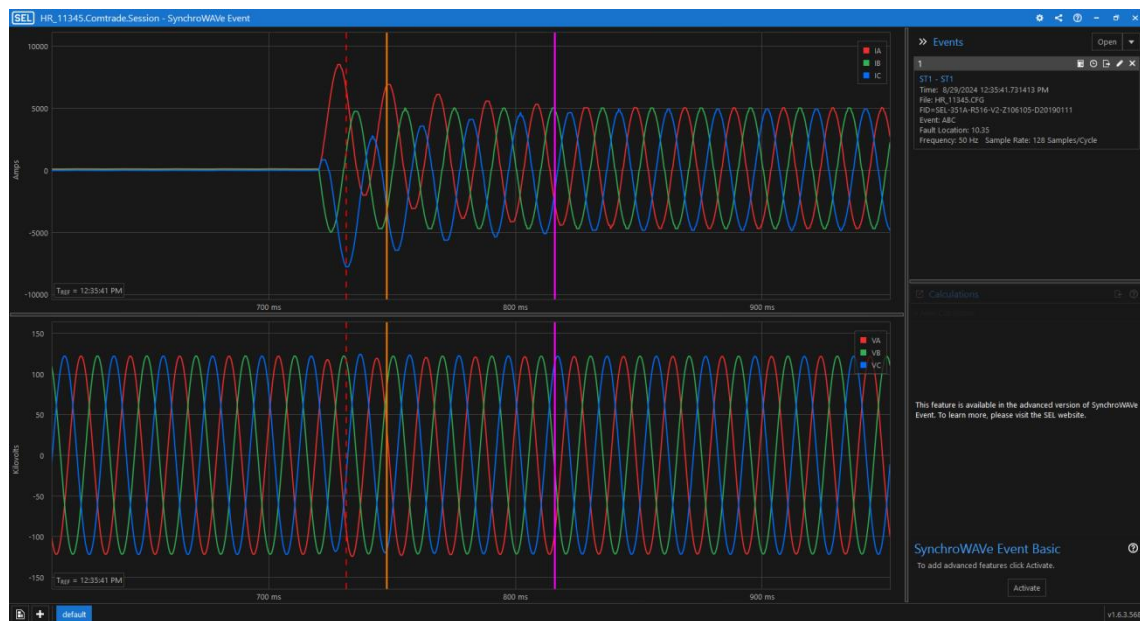
Εικόνα 2.22: Ρυθμίσεις στοιχείων γραμμής και ανίχνευσης θέσης σφάλματος

Ο ηλεκτρονόμος SEL-351A πραγματοποιεί εκτίμηση της θέσης σφάλματος από δεδομένα σφάλματος στο ένα άκρο με χρήση μεθόδου βασισμένης στην σύνθετη αντίσταση. [25]

Αρχικά, ο ηλεκτρονόμος υπολογίζει την απόσταση της γραμμής έως τη θέση του σφάλματος χρησιμοποιώντας δείγματα δεδομένων τάσης και ρεύματος από το εκάστοτε event report για να προσδιορίσει την σύνθετη αντίσταση μέχρι το σφάλμα. Για τον υπολογισμό αξιοποιείται υποσύνολο δεδομένων των event report διάρκειας 15 κύκλων. Η μονάδα χρησιμοποιεί έναν αριθμό σειρών του event report από το υποσύνολο των 15 κύκλων οι οποίες αντιπροσωπεύουν τον επικρατούντα τύπο σφάλματος που αναγνωρίζει ο H/N. Στη συνέχεια ο ηλεκτρονόμος κλιμακώνει την σύνθετη αντίσταση αυτή σε σχέση με τις γνωστές τιμές εμπέδησης γραμμής που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. [25]

Σημειώνεται ακόμα πως ο υπολογισμός της θέσης σφάλματος έχει σχεδιαστεί ώστε να ελαχιστοποιεί την επίδραση διαφόρων επιπέδων πολυπλοκότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά περιλαμβάνουν τη συνεισφορά στο σφάλμα από απομακρυσμένες πηγές, μη-ομογενείς σύνθετες αντιστάσεις πηγών, ροή φορτίου και αντίσταση σφάλματος. [25]

Οι κυματομορφές από τα αρχεία COMTRADE που αποθηκεύονται και η εκτίμηση Fault Location των ηλεκτρονόμων μπορούν να προβληθούν με χρήση του λογισμικού *Synchrowave*.



Εικόνα 2.23: Προβολή κυματομορφής σφάλματος σε λογισμικό Synchrowave

3^ο Κεφάλαιο

Επεξεργασία αναλογικών μετρήσεων με κώδικα Python και εφαρμογή αλγορίθμων fault location

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο κώδικας σε Python που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των αναλογικών μετρήσεων των αρχείων COMTRADE από τους δύο ηλεκτρονόμους. Ο κώδικας αποτελείται από τρία προγράμματα. Το πρώτο ονομάζεται «*Trigger_test*» και υπολογίζει το διάστημα μέσα στο οποίο περιλαμβάνονται οι μετρήσεις του εκάστοτε σφάλματος, καθώς το κάθε αρχείο COMTRADE περιλαμβάνει εκτός από το σφάλμα και μετρήσεις πριν την εκτέλεσή του και μετά την εκκαθάρισή του. Το δεύτερο ονομάζεται «*read_event_filter*» και είναι το πρόγραμμα που εξάγει τις αναλογικές μετρήσεις από τα COMTRADE αρχεία και παράγει τις RMS τιμές και γωνίες των τάσεων και των ρευμάτων στους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης της γραμμής. Το τελικό πρόγραμμα ονομάζεται «*Fault_Location*» και μετατρέπει τις τιμές που υπολογίστηκαν από τα αρχεία σε φασιθέτες, τους οποίους χρησιμοποιεί στη συνέχεια ως εισόδους για τους αλγορίθμους θέσης σφάλματος και δίνει την εκτίμηση θέσης σφάλματος πάνω στη γραμμή σε μορφή ποσοστού του μήκους.

3.1 Υπολογισμός διαστήματος εξέλιξης σφάλματος

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα αρχεία COMTRADE που λαμβάνονται και τα οποία περιλαμβάνουν τις αναλογικές μετρήσεις των τάσεων και των ρευμάτων κατά την εξέλιξη του σφάλματος περιέχουν επίσης και ανεπιθύμητες μετρήσεις μόνιμης κατάστασης, όπως για παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 2.23. Αυτό συμβαίνει διότι οι μετρήσεις των αρχείων συλλέγονται με δειγματοληψία των μεγεθών η οποία εξελίσσεται συνεχώς και όταν ανιχνεύεται σφάλμα ο ηλεκτρονόμος δημιουργεί ένα αρχείο το οποίο περιλαμβάνει και μερικά στιγμιότυπα πριν την ανίχνευση του σφάλματος. Εάν το σφάλμα είναι πολύ μικρής διάρκειας υπάρχει πιθανότητα να περιλαμβάνονται και στιγμιότυπα μετά την εκκαθάρισή του καθώς τα αρχεία έχουν προκαθορισμένο μέγεθος. Για την εξαγωγή των ορθών μετρήσεων τάσεων και ρευμάτων σφάλματος είναι επιθυμητή η απομόνωση του διαστήματος δειγματοληψίας που περιλαμβάνει μόνο το σφάλμα όσο αυτό εξελίσσεται. Παρακάτω αναλύεται ο κώδικας του προγράμματος «*Trigger_test*» το οποίο επιτελεί αυτή την λειτουργία.

Αρχικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, φορτώνουμε τα αρχεία COMTRADE των δύο ηλεκτρονόμων σε δύο μεταβλητές, στην «*rec*» το αρχείο του H/N ST1 και στην «*rec_r*» του ST2, με χρήση της εντολής:

- `x = comtrade.load("αρχείο".cfg, "αρχείο".dat, use_numpy_array=True)`

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται πως κάθε αρχείο COMTRADE αποτελείται από τρία επιμέρους αρχεία τα οποία είναι τα ακόλουθα:

1. «αρχείο».cfg
2. «αρχείο».dat
3. «αρχείο».hdr

Αυτά περιλαμβάνουν διάφορες πληροφορίες οι οποίες με την παραπάνω εντολή μεταφορτώνονται στην νέα μεταβλητή που δημιουργήθηκε.

```
1 import comtrade
2 import numpy as np
3 from scipy.signal import hilbert
4
5 # Read event from relay ST1
6 rec = comtrade.load( cfg_or_cff_file_path: "HR_11320.cfg", dat_file_path: "HR_11320.dat", use_numpy_arrays=True)
7
8 # Read event from relay ST2
9 rec_r = comtrade.load( cfg_or_cff_file_path: "HR_10766.cfg", dat_file_path: "HR_10766.dat", use_numpy_arrays=True)
10
```

Εικόνα 3.1: Φόρτωση αρχείων COMTRADE

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η χρονική διαφορά μεταξύ της λήψης δύο στιγμιοτύπων δειγματοληψίας. Αυτό υπολογίζεται ορίζοντας τη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών της χρονοσειράς «rec.time» η οποία περιλαμβάνει την κλίμακα του χρόνου για τις μετρήσεις ή με άλλα λόγια τα στιγμιότυπα του χρόνου όπου λαμβάνεται κάθε δείγμα των μετρούμενων μεγεθών. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων βρίσκεται πως είναι 0.00015626 sec και αποθηκεύεται στη μεταβλητή «timediff».

Τα αρχεία COMTRADE παράγονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τους δύο H/N, ειδικά για σφάλματα που δεν είναι στο μέσον της γραμμής. Πάντα θα υπάρχει κάποια διαφορά αρκετών msec τη χρονική στιγμή που παράγεται το αρχείο από τον κάθε H/N και αποστέλλεται στη βάση δεδομένων όπου αποθηκεύεται. Καθώς όμως ο χρόνος δειγματοληψίας είναι συγκρίσιμος με την χρονική διαφορά παραγωγής των αρχείων, αυτή η διαφορά οδηγεί σε σημαντική ολίσθηση στην αρίθμηση των δειγμάτων που αντιστοιχούν στο σφάλμα μέσα στις χρονοσειρές των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται με βάση τη διαφορά του χρόνου παραγωγής των αρχείων η ολίσθηση που εμφανίζουν μεταξύ τους στην αρίθμηση τα δείγματα των δύο αρχείων. Οι παραπάνω διαδικασίες φαίνονται στον κώδικα της Εικόνας 3.2.

```
11 # Calculation of the time difference between signal samples
12 timediff = rec.time[1] - rec.time[0]
13 # print("Sample time difference ", timediff)
14
15 # Calculate the sample drift between the comtrade files
16 com_data_diff = int((10**-6)*(rec.trigger_timestamp.microsecond-rec_r.trigger_timestamp.microsecond)//timediff)
17
```

Εικόνα 3.2: Υπολογισμός χρόνου δειγματοληψίας και ολίσθησης δειγμάτων μεταξύ των αρχείων

Η διαφορά που παρουσιάζουν τα αρχεία στα δείγματα αποθηκεύεται στην μεταβλητή «com_data_diff» και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά του χρόνου δημιουργίας σε microsecond που εμφανίζουν τα αρχεία. Αυτή πολλαπλασιάζεται επί 10^{-6} , για να μετατραπεί η τιμή «rec.trigger_timestamp.microsecond» σε msec και διαιρείται με την μεταβλητή «timediff», δηλαδή με το χρόνο δειγματοληψίας. Με αυτόν τον τρόπο η διαφορά χρόνου μετατρέπεται σε διαφορά (ολίσθηση) δειγμάτων που παρουσιάζουν τα δύο αρχεία.

Από το debug menu για τις μεταβλητές όπου φορτώνονται τα COMTRADE αρχεία μπορεί να ληφθεί ο συνολικός αριθμός δειγμάτων σε κάθε χρονοσειρά αναλογικών μετρήσεων (προφανώς είναι ίδιος για όλα τα μεγέθη). Αυτός ο αριθμός διαιρείται με το μέγεθος σε κύκλους όπου επιλέχθηκε να έχει το κάθε αρχείο πριν αποθηκευτεί. Το αποτέλεσμα είναι ο αριθμός δειγμάτων

ανά κύκλο, ο οποίος υπολογίζεται ίσος με 128 δείγματα και αποθηκεύεται στη μεταβλητή «interval». Για την εύρεση του κατάλληλου διαστήματος δειγμάτων, όπου περιλαμβάνονται οι μετρήσεις σφάλματος, θα χρησιμοποιηθεί το κανάλι που περιλαμβάνει τα δεδομένα για το ρεύμα της φάσης A στο ζυγό αναχώρησης. Όλα τα πιθανά σφάλματα έχουν προσομοιωθεί ώστε να συμπεριλαμβάνεται η φάση A, συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το RMS πλάτος της κυματομορφής του ρεύματος I_{as} ως ένδειξη για την εκκίνηση και την εκκαθάριση του σφάλματος. Ο κώδικας που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.3* μετατρέπει τις μετρήσεις του ρεύματος I_{as} σε RMS πλάτος ανά κύκλο του αρχείου, δηλαδή ανά 128 δείγματα, και αποθηκεύει τις νέες χρονοσειρές ως ξεχωριστά διανύσματα στην μεταβλητή «rms_amplitudes».

```

18 # Initialize lists to store RMS amplitude and angle time series
19 rms_amplitudes = []
20
21 interval = 128
22
23 # Calculate RMS amplitude and angle for channel 0 (Ia)
24 i = 0
25 while i < rec.analog[0].shape[0]:
26     signal = rec.analog[0][i:i+interval]
27     analytic_signal = hilbert(signal)
28     amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
29     rms_amplitudes.append(amplitude_envelope)
30     i += interval
31

```

Εικόνα 3.3: Μετατροπή μετρήσεων ρεύματος I_{as} σε RMS πλάτος ανά κύκλο μετρήσεων

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω κώδικα, η μετατροπή των μετρήσεων σε πλάτος RMS έγινε με χρήση μετασχηματισμού Hilbert στο αναλογικό σήμα. Ο μετασχηματισμός Hilbert αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και τη μοντελοποίηση σημάτων. Παρέχει πληροφορίες και ακρίβεια σε σημεία που αδυνατεί ο μετασχηματισμός Fourier, με ένα από αυτά να είναι μεταβατικές περίοδοι που εμφανίζονται στα σφάλματα γραμμής. [26]

Δεδομένου ενός χρονικά μεταβλητού πραγματικού σήματος $x(t)$ ο μετασχηματισμός Hilbert $H(\cdot)$ ορίζεται ως:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3.1)$$

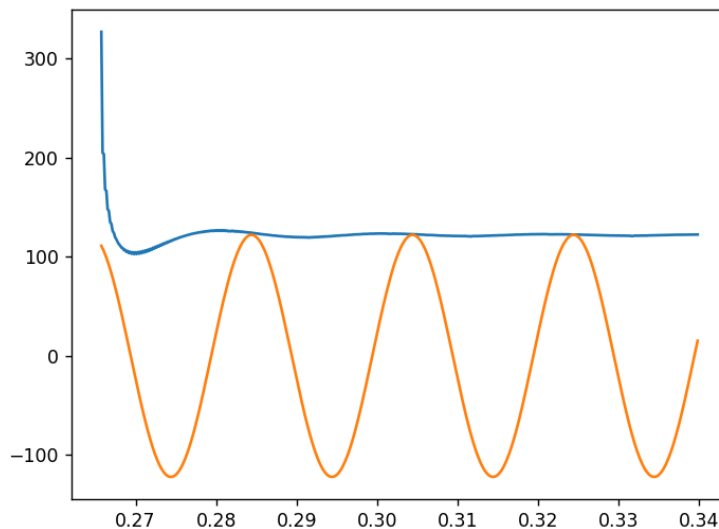
Όσον αφορά την επεξεργασία των σημάτων μέσω κώδικα, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση «hilbert» από τη βιβλιοθήκη «scipy.signal», η οποία επιτρέπει το μετασχηματισμό των χρονοσειρών των σημάτων. Χρησιμοποιείται η εντολή:

- analytic_signal = hilbert(signal)

Με την εντολή αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή «*analytic_signal*» η χρονοσειρά του αρχικού σήματος «*signal*» μετασχηματισμένη κατά Hilbert. Στη συνέχεια μπορούν να εξαχθούν οι χρονοσειρές για το πλάτος και τη γωνία φασιθέτη του αρχικού σήματος με τις εντολές:

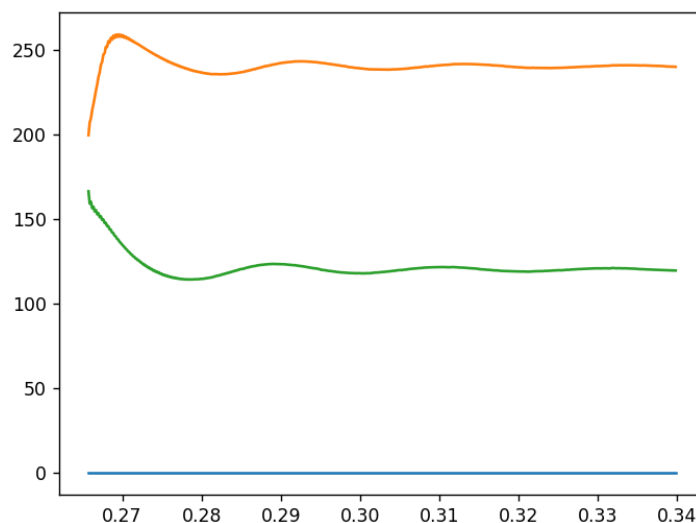
- `amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)` , για το πλάτος και
- `instantaneous_phase = np.unwrap(np.angle(analytic_signal))` , για τη γωνία

Στην *Εικόνα 3.4* φαίνεται η κυματομορφή ενός σήματος τάσης από αρχείο COMTRADE (πορτοκαλί) και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός του Hilbert (μπλε) .



Εικόνα 3.4: Κυματομορφή τάσης (πορτοκαλί) και μετασχηματισμός Hilbert αυτής (μπλε)

Στην *Εικόνα 3.5* φαίνονται οι γωνίες για τις τρεις φάσεις τάσεων του συμμετρικού τριφασικού συστήματος της προσομοίωσης, όπως αυτές προκύπτουν από τον μετασχηματισμό Hilbert.



Εικόνα 3.5: Φασικές γωνίες τάσεων συμμετρικού τριφασικού συστήματος όπως προκύπτουν από μετασχηματισμό Hilbert

Συνεχίζοντας τη διαδικασία του κώδικα, υπολογίζεται για κάθε κύκλο η μέση τιμή πλάτους από τις νέες χρονοσειρές που προέκυψαν από το μετασχηματισμό Hilbert. Αυτό γίνεται για να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στο πλάτος του σήματος σε κάθε κύκλο, αντί να λαμβάνεται ένα στιγμιότυπο πλάτους ανά κύκλο. Οι τιμές του μέσου πλάτους ανά κύκλο αποθηκεύονται στη συνέχεια στον πίνακα «R_amp».

```

33 # Initialize lists to store the median values for RMS amplitude
34 R_amp = []
35
36 # Calculate and store the median values for RMS amplitude
37 for rms_val in rms_amplitudes:
38     I_amp_mean = np.mean(rms_val)
39     R_amp.append(I_amp_mean)
40

```

Εικόνα 3.6: Υπολογισμός μέσου πλάτους ανά κύκλο και αποθήκευση των τιμών

Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης του κύκλου στον οποίο πραγματοποιείται το σφάλμα και του κύκλου που αυτό εκκαθαρίζεται.

```

41 safeguard = abs(com_data_diff)
42 threshold = 500
43 start = -1
44 end = -1
45 prev = R_amp[0]
46 for i in range(1, len(R_amp)):
47     amp = R_amp[i]
48     diff = amp - prev
49     #print(i, amp, diff)
50     if abs(diff) > threshold:
51         if diff > 0:
52             start = i * 128 + safeguard
53         elif diff < 0:
54             end = i * 128 - safeguard
55     prev = amp
56
57 if start < 0:
58     start = safeguard
59
60 if end < 0:
61     # 16 * 128
62     end = len(R_amp) * 128 - safeguard
63

```

Εικόνα 3.7: Διαδικασία υπολογισμού κύκλου εκκίνησης και εκκαθάρισης σφάλματος

Καταρχάς, ορίζεται μια μεταβλητή «*threshold*» η οποία προσδιορίζεται πειραματικά και μπορεί να διαφέρει η κατάλληλη τιμή της ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος. Αυτή αποτελεί το κριτήριο για τις συγκρίσεις που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Ακόμα, ορίζονται οι μεταβλητές «*start*» και «*end*» οι οποίες αρχικοποιούνται στην τιμή -1, για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω, και οι οποίες αντιστοιχούν στο σημείο εκκίνησης και εκκαθάρισης σφάλματος αντίστοιχα. Με άλλα λόγια οι μεταβλητές αυτές ορίζουν το παράθυρο του σφάλματος μέσα στις χρονοσειρές δεδομένων του αρχείου. Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία του βρόχου *for* που ακολουθεί ουσιαστικά συγκρίνει το μέσο πλάτος του σήματος ρεύματος σε κάθε κύκλο (μεταβλητή «*amp*») με αυτό του προηγούμενου κύκλου (μεταβλητή «*prev*») και αποθηκεύει τη διαφορά τους στην μεταβλητή «*diff*». Όπως έχει ήδη αναφερθεί τις στιγμές εκκίνησης και εκκαθάρισης του σφάλματος αναμένεται μεγάλη μεταβολή του ρεύματος γραμμής. Συνεπώς, όταν η μεταβλητή *diff* λάβει θετική τιμή και μεγαλύτερη από το *threshold* ο παρών κύκλος του βρόχου, που αντιστοιχεί και στον κύκλο του σήματος, ορίζεται ως νέα τιμή για την μεταβλητή *start*. Αντίστοιχα, όταν η μεταβλητή *diff* λάβει αρνητική τιμή και μεγαλύτερη από το *threshold* ο παρών κύκλος του βρόχου ορίζεται ως νέα τιμή για τη μεταβλητή *end*. Το *threshold* πρέπει σε κάθε περίπτωση να οριστεί επαρκώς μεγάλο ώστε να μην αναγνωρίζεται η διαφορά πλάτους που οφείλεται στην εκκαθάριση του μεταβατικού DC-offset κατά την εξέλιξη του σφάλματος ως νέο σφάλμα. Ταυτόχρονα, δεν πρέπει να λαμβάνει τιμή που ξεπερνάει την διαφορά του πλάτους μόνιμης κατάστασης σφάλματος με το πλάτος μόνιμης κατάστασης ηρεμίας, καθώς δε θα ικανοποιηθεί ορθά η συνθήκη:

- if $\text{abs}(\text{diff}) > \text{threshold}$

Δεδομένου ότι η μεταβλητή *threshold* έχει οριστεί ορθά, εάν δεν ικανοποιηθεί η παραπάνω συνθήκη, είτε για την εκκίνηση είτε για την εκκαθάριση του σφάλματος, αυτό σημαίνει πως η κυματομορφή του σήματος περιγράφει ήδη εξελισσόμενο σφάλμα ή το σφάλμα βρίσκεται σε εξέλιξη και μετά το πέρας του διαθέσιμου σήματος. Για αυτό το λόγο, εάν μετά την εκτέλεση του βρόχου η τιμή των μεταβλητών *start* ή *end* είναι ίση με -1 αυτές ορίζονται στον πρώτο (0) και τον τελευταίο ($\text{len}(\text{R_amp})$) κύκλο του σήματος αντίστοιχα.

- if $\text{start} < 0$:
 $\text{start} = 0 + \text{safeguard}$

 if $\text{end} < 0$:
 $\text{end} = \text{len}(\text{R_amp}) * 128 - \text{safeguard}$

Οι τιμές *start* και *end* πολλαπλασιάζονται επί 128 ώστε το τελικό αποτέλεσμα να δίνει την αρίθμηση του δείγματος χρονοσειράς όπου εκκινεί και εκκαθαρίζεται το σφάλμα αντίστοιχα.

Η μεταβλητή «*safeguard*» ορίζεται ίση με την απόλυτη τιμή του *com_data_diff*, που παρουσιάστηκε προηγουμένως, με το σκοπό να μην βγαίνουν τυχόν χρονοσειρές σημάτων εκτός ορίων. Ο λόγος που υπάρχει κίνδυνος να συμβεί αυτό είναι επειδή στο σκέλος του κώδικα που γίνονται οι υπολογισμοί των φασισθετών των σημάτων πραγματοποιείται και ο συγχρονισμός των μετρήσεων των δύο ηλεκτρονόμων. Για να γίνουν ορθά οι υπολογισμοί λαμβάνεται υπόψη η ολίσθηση δειγμάτων που περιγράφηκε νωρίτερα σε αυτή την παράγραφο και τα δεδομένα του H/N ST2 ολισθαίνουν με βάση την τιμή *com_data_diff*. Συνεπώς, για να βρίσκονται πάντα εντός πλαισίων τα δεδομένα και των δύο H/N προστίθεται η τιμή *safeguard* στο σημείο εκκίνησης

σφάλματος και αφαιρείται από το σημείο εκκαθάρισης.

Τέλος, εκτυπώνουμε τα αποτελέσματα για τους κύκλους και τα bit εκκίνησης και εκκαθάρισης σφάλματος.

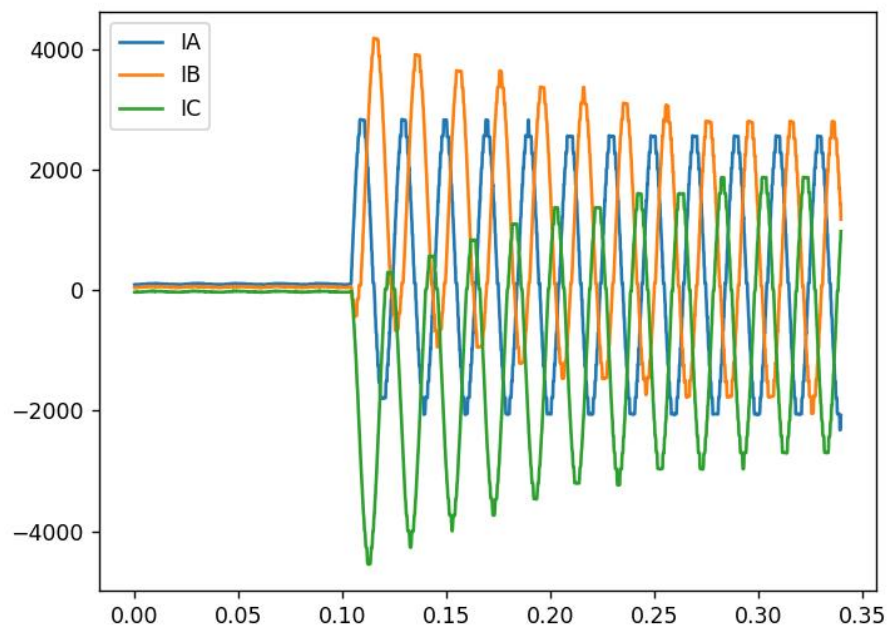
```
64 print(f"Start cycle = {int(start/128)} ", f"End cycle = {int(end/128)}")  
65 print(f"Start bit = {start} ", f"End bit = {end}")
```

Εικόνα 3.8: Εντολές εκτύπωσης αποτελεσμάτων start και end

Στην Εικόνα 3.9 φαίνεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης του κώδικα για τριφασικό σφάλμα, με τα φασικά ρεύματα σφάλματος να φαίνονται στην Εικόνα 3.10.

```
Start cycle = 5 End cycle = 16  
Start bit = 662 End bit = 2154
```

Εικόνα 3.9: Αποτελέσματα κώδικα Trigger_test για τριφασικό σφάλμα



Εικόνα 3.10: Φασικά ρεύματα κατά την εξέλιξη τριφασικού σφάλματος

3.2 Υπολογισμός πλάτους και γωνίας φασικών μεγεθών

Στο σημείο αυτό θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση του προγράμματος «*read_event_filter*» το οποίο χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των αρχείων COMTRADE υπολογίζει τα πλάτη και τις γωνίες των φασικών τάσεων και ρευμάτων στους δύο ζυγούς.

Ο κώδικας ξεκινάει όπως και προηγουμένως, δηλαδή φορτώνοντας τα δεδομένα των αρχείων COMTRADE σε δύο μεταβλητές. Αυτή τη φορά επιλέγεται η ονομασία «*rec_s*» και «*rec_r*» για τα στοιχεία του ζυγού αναχώρησης και άφιξης, αντιστοίχως.

```
12 # Read event from relay no1
13 rec_s = comtrade.load( cfg_or_cff_file_path: "HR_11533.cfg", dat_file_path: "HR_11533.dat", use_numpy_arrays=True)
14
15 # Read event from relay no2
16 rec_r = comtrade.load( cfg_or_cff_file_path: "HR_10986.cfg", dat_file_path: "HR_10986.dat", use_numpy_arrays=True)
17 print("Trigger time = {}".format(rec_s.trigger_time))
18
```

*Εικόνα 3.11: Φόρτωση αρχείων COMTRADE εκ νέου στις μεταβλητές «*rec_s*» και «*rec_r*»*

Ακόμα, από το πρόγραμμα «*Trigger_test*» έχουν μεταφορτωθεί οι μεταβλητές «*start*» και «*end*» για την οριοθέτηση των υπολογισμών στο παράθυρο εμφάνισης του σφάλματος.

Πριν πραγματοποιηθούν οι όποιοι υπολογισμοί, στα σήματα ρευμάτων εφαρμόζεται υπερπαρατό φίλτρο (High Pass Filter). Η ενέργεια αυτή είναι απαραίτητη και αποσκοπεί να αφαιρέσει τη συνιστώσα DC που εμφανίζεται στους πρώτους κύκλους του σφάλματος (DC offset).

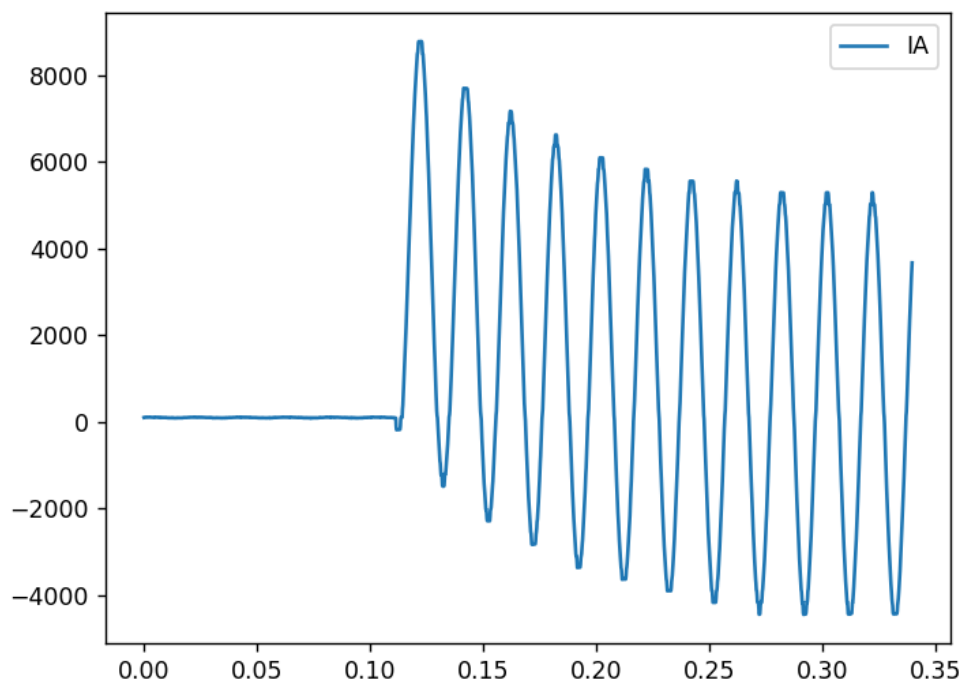
```
2 usages
34 def high_pass_filter(data, cutoff_frequency, sampling_rate, order=4):
35     """
36     Apply a high-pass filter to the signal to remove low-frequency components including DC offset.
37
38     Parameters:
39     signal (numpy array): Input signal to be filtered.
40     cutoff_frequency (float): Cutoff frequency for the high-pass filter in Hz. = 1Hz
41     sampling_rate (int): Sampling rate of the signal in samples per second. = 6400
42     order (int): Order of the filter.
43
44     Returns:
45     numpy array: Filtered signal with low-frequency components removed.
46     """
47     nyquist_frequency = 0.5 * sampling_rate
48     normalized_cutoff = cutoff_frequency / nyquist_frequency
49
50     # Design the high-pass filter
51     b, a = signal.butter(order, normalized_cutoff, btype='high', analog=False)
52
53     # Apply the high-pass filter
54     filtered_signal = signal.filtfilt(b, a, data)
55
56     return filtered_signal
57
```

Εικόνα 3.12: Υπερπαρατό φίλτρο για αφαίρεση DC offset συνιστώσας

Πιο συγκεκριμένα, οι κυματομορφές ρευμάτων των φάσεων που εμπλέκονται στο εκάστοτε σφάλμα μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις περιόδους: [27]

- υπομεταβατική περίοδος (subtransient period)
- μεταβατική περίοδος (transient period)
- μόνιμη κατάσταση (steady-state period)

Οι υπολογισμοί για το πλάτος και τη γωνία των ρευμάτων σφάλματος πρέπει να γίνουν με βάση τη μόνιμη κατάσταση σφάλματος, καθώς και οι αλγόριθμοι εύρεσης θέσης σφάλματος θεωρούν μόνιμη κατάσταση. Η υπομεταβατική και μεταβατική περίοδος εμφανίζουν μια αποσβεννύμενη συνιστώσα DC η οποία είναι ανεπιθύμητη και αλλοιώνει τους υπολογισμούς για το πλάτος και τη γωνία των ρευμάτων.



Εικόνα 3.13: Ρεύμα σφάλματος φάσης Α με εμφανές DC offset

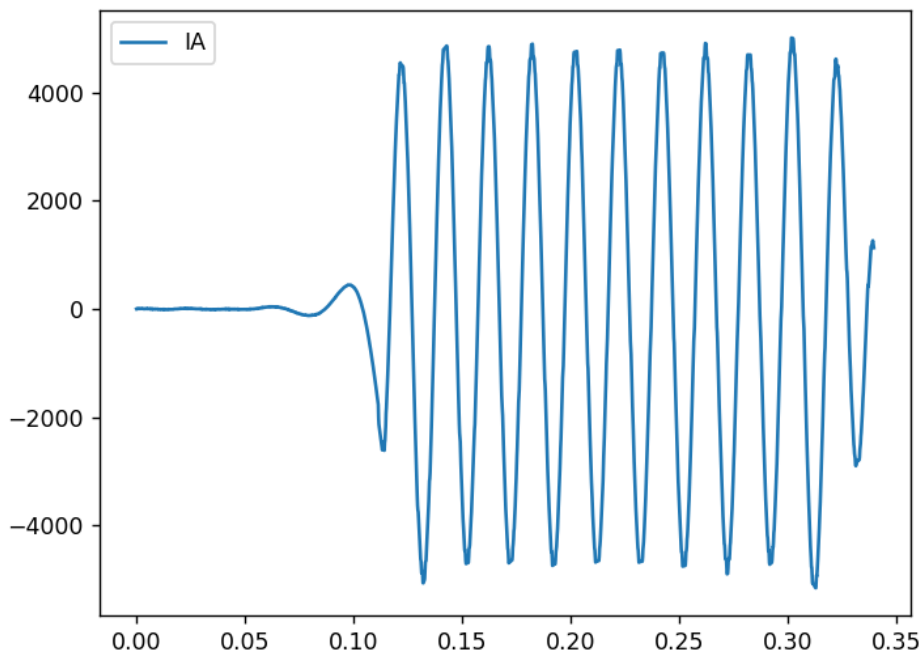
Εύκολα φαίνεται από την *Εικόνα 3.13* πως για σφάλματα που διαρκούν μόνο μερικούς κύκλους υπάρχει πιθανότητα να μην φτάσουν ποτέ στη μόνιμη κατάσταση σφάλματος όπου η DC συνιστώσα έχει αποσβεστεί. Για το λόγο αυτό τα σήματα ρευμάτων των αρχείων COMTRADE (index [0, 1, 2]) αντικαθιστώνται με τα σήματα από τα οποία έχει φιλτραριστεί η συνιστώσα DC των μεταβατικών περιόδων.

```
59 # Removing the DC offset of the analog signals using the high-pass filter
60 for i in [0, 1, 2]:
61     rec_s.analog[i] = high_pass_filter(np.array(rec_s.analog[i]), cutoff_frequency: 30, sampling_rate: 6400, order: 4)
62     rec_r.analog[i] = high_pass_filter(np.array(rec_r.analog[i]), cutoff_frequency: 30, sampling_rate: 6400, order: 4)
63
```

Εικόνα 3.14: Αντικατάσταση αρχικών σημάτων ρευμάτων με φιλτραρισμένη DC συνιστώσα

Οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους του φίλτρου προσδιορίστηκαν πειραματικά με δοκιμές.

Στην *Εικόνα 3.15* φαίνεται το αντίστοιχο ρεύμα σφάλματος της *Εικόνας 3.13* μετά την εφαρμογή του υπερπυκνωτικού φίλτρου στο σήμα.



Εικόνα 3.15: Ρεύμα σφάλματος φάσης Α με φιλτραρισμένη DC συνιστώσα

Όπως και προηγουμένως, θα γίνει χρήση του μετασχηματισμού Hilbert για τον υπολογισμό των πλάτων και γωνιών των σημάτων. Αρχικά, ορίζονται οι λίστες στις οποίες θα αποθηκευτούν οι χρονοσειρές για τα πλάτη και τις γωνίες που προκύπτουν από το μετασχηματισμό των αναλογικών σημάτων. Επίσης, επειδή οι μετρήσεις των δύο ηλεκτρονόμων δεν είναι συγχρονισμένες ορίζεται ένα σήμα αναφοράς. Οι γωνίες των υπόλοιπων σημάτων θα υπολογιστούν σε σχέση με τη γωνία του σήματος αυτού. Ως σήμα αναφοράς επιλέχθηκε η τάση της φάσης Α του ζυγού αναχώρησης.

```

64 # Initialize lists to store RMS amplitude and angle time series
65 rms_amplitudes_s = []
66 angles_s = []
67 rms_amplitudes_r = []
68 angles_r = []
69
70 # Create reference signal [Va]
71 signal1 = rec_s.analog[5][start:end]
72 analytic_signal = hilbert(signal1)
73 amplitude_envelope_0 = np.abs(analytic_signal)
74 instantaneous_phase_0 = np.unwrap(np.angle(analytic_signal))
75

```

Εικόνα 3.16: Λίστες χρονοσειρών και ορισμός σήματος αναφοράς

Στη συνέχεια, υπολογίζονται με χρήση μετασχηματισμού Hilbert οι χρονοσειρές για τα πλάτη και τις γωνίες των σημάτων τάσεων και ρευμάτων και αποθηκεύονται στις λίστες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Οι γωνίες όλων των σημάτων ορίζονται ως η διαφορά που εμφανίζει το κάθε σήμα από την γωνία του σήματος αναφοράς.

```
76 # Calculate RMS amplitude and angle for each channel
77 for i in [0, 1, 2, 5, 6, 7]:
78     signal1 = rec_s.analog[i][start:end]
79     analytic_signal = hilbert(signal1)
80     amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
81     instantaneous_phase = np.unwrap(np.angle(analytic_signal))-instantaneous_phase_0
82     rms_amplitudes_s.append(amplitude_envelope)
83     angles_s.append(instantaneous_phase)
84
85     signal1 = rec_r.analog[i][(start+com_data_diff):(end+com_data_diff)]
86     analytic_signal = hilbert(signal1)
87     amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
88     instantaneous_phase = np.unwrap(np.angle(analytic_signal)) - instantaneous_phase_0
89     rms_amplitudes_r.append(amplitude_envelope)
90     angles_r.append(instantaneous_phase)
```

Εικόνα 3.17:Υπολογισμός χρονοσειρών RMS πλάτους και γωνίας για τα σήματα τάσεων και ρευμάτων

Για το εύρος των δεδομένων από τις λίστες αναλογικών μετρήσεων των αρχείων χρησιμοποιούνται οι τιμές start και stop, που υπολογίστηκαν στο πρόγραμμα «Trigger_test», ως αρχική και τελική τιμή. Ακόμα, όπως περιγράφηκε και νωρίτερα υπολογίζεται και λαμβάνεται υπόψη η διαφορά δειγμάτων που παρουσιάζουν οι δύο ηλεκτρονόμοι. Συγκεκριμένα, για τα δεδομένα του H/N ST2 προστίθεται στην αρχική και τελική τιμή η μεταβλητή «com_data_diff».

Από τις χρονοσειρές των μεγεθών που υπολογίστηκαν θα εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα από τη μέση τιμή των τιμών των χρονοσειρών, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα τελικά αποτελέσματα αποθηκεύονται στις λίστες που ορίζονται στην *Εικόνα 3.18*. Οι λίστες αυτές θα περιέχουν τα δεδομένα με τον εξής τρόπο:

- S_amp: περιλαμβάνει το RMS πλάτος των φασικών μεγεθών στο ζυγό αναχώρησης (S)
- S_angle: περιλαμβάνει τη γωνία των φασικών μεγεθών στο ζυγό αναχώρησης (S)
- R_amp: περιλαμβάνει το RMS πλάτος των φασικών μεγεθών στο ζυγό άφιξης (R)
- R_angle: περιλαμβάνει τη γωνία των φασικών μεγεθών στο ζυγό άφιξης (R)

```
98 # Initialize lists to store the median values for RMS amplitude and angle
99 S_amp = []
100 S_angle = []
101 R_amp = []
102 R_angle = []
```

Εικόνα 3.18:Λίστες τελικών αποτελεσμάτων

Στις *Εικόνες 3.19* και *3.20* φαίνεται ο υπολογισμός και αποθήκευση των μέσων τιμών πλάτους και γωνιών για τις χρονοσειρές ρευμάτων και τάσεων αντίστοιχα.

```
104 # Calculate and store the median values for RMS amplitude and angle for Currents(index:0,1,2) and Voltages(index:3,4,5)
105 for i in [0, 1, 2]:
106     I_amp_mean = np.mean(rms_amplitudes_s[i][82:(end-start-83)])
107     S_amp.append(I_amp_mean)
108     print("RMS amplitude of current", i, "s", " = ", I_amp_mean/np.sqrt(2))
109     I_angle_mean = np.mean(angles_s[i][82:(end-start-83)]*180/pi)
110     S_angle.append(I_angle_mean)
111     print("Angle of current", i, "s", " = ", I_angle_mean)
112
113 for i in [0, 1, 2]:
114     I_amp_mean = np.mean(rms_amplitudes_r[i][82:(end-start-83)])
115     R_amp.append(I_amp_mean)
116     print("RMS amplitude of current", i, "r", " = ", I_amp_mean/np.sqrt(2))
117     I_angle_mean = np.mean(angles_r[i][82:(end-start-83)]*180/pi)
118     R_angle.append(I_angle_mean)
119     print("Angle of current", i, "r", " = ", I_angle_mean)
```

Εικόνα 3.19: Υπολογισμός και αποθήκευση μέσων τιμών για χρονοσειρές ρευμάτων

```
121 for i in [3, 4, 5]:
122     V_amp_mean = np.mean(rms_amplitudes_s[i][82:(end-start-83)])
123     S_amp.append(V_amp_mean)
124     print("RMS amplitude of voltage", i-3, "s", " = ", V_amp_mean/np.sqrt(2))
125     V_angle_mean = np.mean(angles_s[i][82:(end-start-83)]*180/pi)
126     S_angle.append(V_angle_mean)
127     print("Angle of voltage", i-3, "s", " = ", V_angle_mean)
128
129 for i in [3, 4, 5]:
130     V_amp_mean = np.mean(rms_amplitudes_r[i][82:(end-start-83)])
131     R_amp.append(V_amp_mean)
132     print("RMS amplitude of voltage", i-3, "r", " = ", V_amp_mean/np.sqrt(2))
133     V_angle_mean = np.mean(angles_r[i][82:(end-start-83)]*180/pi)
134     R_angle.append(V_angle_mean)
135     print("Angle of voltage", i-3, "r", " = ", V_angle_mean)
```

Εικόνα 3.20: Υπολογισμός και αποθήκευση μέσων τιμών για χρονοσειρές τάσεων

Σημειώνουμε πως αφαιρούνται από την αρχή και το πέρας του παραθύρου εκμετάλλευσης δεδομένων μερικές δεκάδες δείγματα, πειραματικά βρέθηκε πως 82 δείγματα είναι ικανοποιητική τιμή. Αυτό γίνεται για να μην συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς τυχών ανεπιθύμητες οριακές καταστάσεις εξαιτίας του μετασχηματισμού Hilbert ή του υψηλερατού φίλτρου.

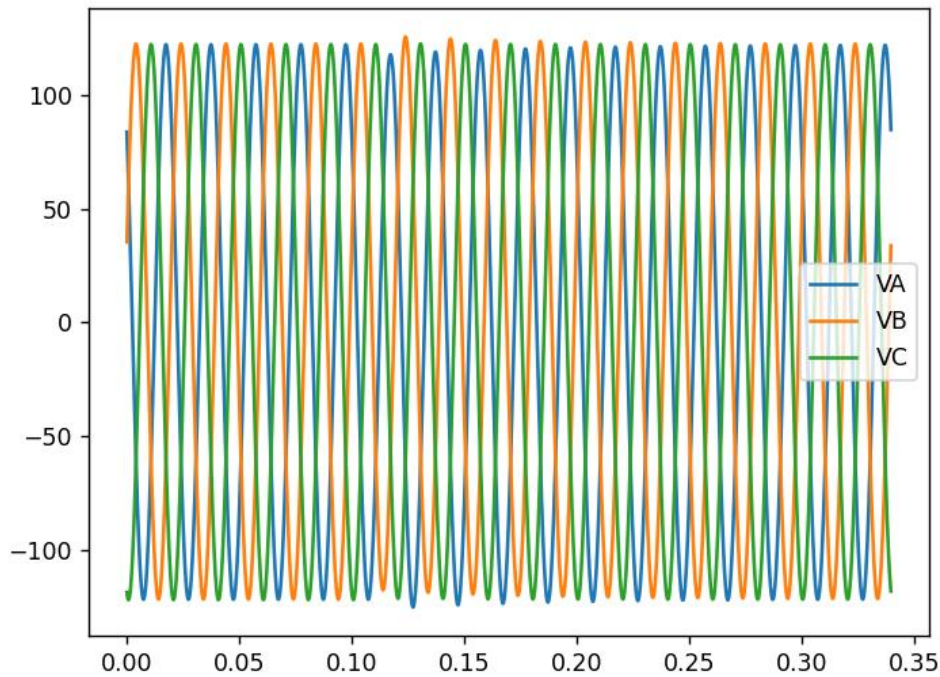
Στην *Εικόνα 3.21* παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του κώδικα για την κυματομορφή φασικών τάσεων του ζυγού αναχώρησης (μετρήσεις από H/N ST1) που φαίνεται στην *Εικόνα 3.22*. Σημειώνεται πως στα αποτελέσματα του κώδικα με «voltage 0» συμβολίζεται η τάση της φάσης A, με «voltage 1» της φάσης B και με «voltage 2» της φάσης C. Η αρίθμηση επιλέχθηκε ώστε να αντιστοιχεί με τα index numbers των τιμών στις λίστες που αποθηκεύονται.

```

RMS amplitude of voltage 0 s = 86.1792323847375
Angle of voltage 0 s = 0.0
RMS amplitude of voltage 1 s = 86.40867847933166
Angle of voltage 1 s = -120.212585
RMS amplitude of voltage 2 s = 86.15539817331721
Angle of voltage 2 s = 119.77887

```

Εικόνα 3.21: Αποτελέσματα RMS πλάτους και γωνίας για φασικές τάσεις ζυγού αναχώρησης



Εικόνα 3.22: Φασικές τάσεις στο ζυγό αναχώρησης

3.3 Εκτέλεση αλγορίθμων εύρεσης θέσης σφάλματος

Το τελικό στάδιο του κώδικα αποτελείται από το πρόγραμμα «*Fault_Location*» το οποίο εφαρμόζει τους αλγορίθμους θέσης σφάλματος που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και αναλύεται σε αυτή την ενότητα.

Από το πρόγραμμα «*read_event_filter*» εισάγονται οι λίστες που περιλαμβάνουν τα δεδομένα που υπολογίστηκαν για τα RMS πλάτη και τις γωνίες των σημάτων ρευμάτων και τάσεων στους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης της γραμμής. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των φασιθετών των φασικών μεγεθών. Ακόμα, γίνεται μετασχηματισμός των φασικών μεγεθών σε ακολουθιακά. Οι φασιθέτες αυτοί χρησιμοποιούνται για να εκτελεστούν οι υπολογισμοί των αλγορίθμων. Τέλος, πραγματοποιείται από τον χειριστή επιλογή του τύπου σφάλματος και ο κώδικας εμφανίζει την αντίστοιχη εκτίμηση θέσης σφάλματος από τους αλγορίθμους.

Στην *Εικόνα 3.23* φαίνεται ο ορισμός των φασιθετών με χρήση των τιμών που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα «*read_event_filter*» και ο μετασχηματισμός σε ακολουθιακά μεγέθη.

```

5 # Global Voltage and Current measurements and transposition to sequential units
6 a = -0.5 + 0.866j
7
8 Vsa = complex(S_amp[3] * np.cos(S_angle[3]), S_amp[3] * np.sin(S_angle[3]))
9 Vsb = complex(S_amp[4] * np.cos(S_angle[4]), S_amp[4] * np.sin(S_angle[4]))
10 Vsc = complex(S_amp[5] * np.cos(S_angle[5]), S_amp[5] * np.sin(S_angle[5]))
11 Vs1, Vs2, Vs0 = (Vsa + a * Vsb + (a * a) * Vsc) / 3, (Vsa + (a * a) * Vsb + a * Vsc) / 3, (Vsa + Vsb + Vsc) / 3
12
13 Vra = complex(R_amp[3] * np.cos(R_angle[3]), R_amp[3] * np.sin(R_angle[3]))
14 Vrb = complex(R_amp[4] * np.cos(R_angle[4]), R_amp[4] * np.sin(R_angle[4]))
15 Vrc = complex(R_amp[5] * np.cos(R_angle[5]), R_amp[5] * np.sin(R_angle[5]))
16 Vr1, Vr2, Vr0 = (Vra + a * Vrb + (a * a) * Vrc) / 3, (Vra + (a * a) * Vrb + a * Vrc) / 3, (Vra + Vrb + Vrc) / 3
17
18 Isa = complex(S_amp[0] * np.cos(S_angle[0]), S_amp[0] * np.sin(S_angle[0]))
19 Isb = complex(S_amp[1] * np.cos(S_angle[1]), S_amp[1] * np.sin(S_angle[1]))
20 Isc = complex(S_amp[2] * np.cos(S_angle[2]), S_amp[2] * np.sin(S_angle[2]))
21 Is1, Is2, Is0 = (Isa + a * Isb + (a * a) * Isc) / 3, (Isa + (a * a) * Isb + a * Isc) / 3, (Isa + Isb + Isc) / 3
22
23 Ira = complex(R_amp[0] * np.cos(R_angle[0]), R_amp[0] * np.sin(R_angle[0]))
24 Irb = complex(R_amp[1] * np.cos(R_angle[1]), R_amp[1] * np.sin(R_angle[1]))
25 IRC = complex(R_amp[2] * np.cos(R_angle[2]), R_amp[2] * np.sin(R_angle[2]))
26 Ir1, Ir2, Ir0 = (Ira + a * Irb + (a * a) * IRC) / 3, (Ira + (a * a) * Irb + a * IRC) / 3, (Ira + Irb + IRC) / 3
27

```

Εικόνα 3.23: Ορισμός φασιθετών φασικών τάσεων και ρευμάτων και αντίστοιχων ακολουθιακών μεγεθών

Στις *Εικόνες 3.24* και *3.25* φαίνεται η υλοποίηση των αλγορίθμων για μονοφασικό σφάλμα με γη (L-G) από τους τύπους (1.23) και (1.24), αντίστοιχα.

```

28 # Single Phase L-G fault
29 A1 = Is2 * Vs1 - Is2 * Vr1 - Is1 * Vs2 + Is1 * Vr2
30 A2 = Vr2 * Vs1 - Vr1 * Vs2
31 A3 = Ir1 * Vr2 - Ir1 * Vs2 + Ir2 * Vs1 - Ir2 * Vr1
32
33 a1 = (A1 * A2.conjugate()).real
34 a2 = (A2 * A3.conjugate()).real
35
36 m1 = a2 / (a1 + a2)
37
38 if 0 <= m1 <= 1:
39     m_lg = m1
40 else:
41     m_lg = 0.5

```

Εικόνα 3.24: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.23) για μονοφασικό βραχυκύκλωμα

```

43 # Single Phase L-G fault RF=0
44 A4 = Isa * Vra
45 A5 = Vra * Vsa
46 A6 = Ira * Vsa
47
48 a3 = (A4 * A5.conjugate()).real
49 a4 = (A6 * A5.conjugate()).real
50
51 m1_0 = a4 / (a3 + a4)
52
53 if 0 <= m1_0 <= 1:
54     m_lg_0 = m1_0
55 else:
56     m_lg_0 = 0.5
57

```

Εικόνα 3.25:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.24) για μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Στην Εικόνα 3.26 φαίνεται η υλοποίηση του αλγορίθμου για διφασικό σφάλμα χωρίς γη (L-L) από τον τύπο (1.25).

```

58 # L-L fault with Rf!=0
59 B1 = Isc * Vsb - Isc * Vrb - Isb * Vsc + Isb * Vrc
60 B2 = Vrc * Vsb - Vrb * Vsc
61 B3 = Irb * Vrc - Irb * Vsc + IRC * Vsb - IRC * Vrb
62
63 b1 = (B1 * B2.conjugate()).real
64 b2 = (B3 * B2.conjugate()).real
65
66 m2 = b2 / (b1 + b2)
67
68 if 0 <= m2 <= 1:
69     m_ll = m2
70 else:
71     m_ll = 0.5
72

```

Εικόνα 3.26:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.25) για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Στις Εικόνες 3.27 και 3.28 φαίνεται η υλοποίηση των αλγορίθμων για διφασικό σφάλμα με γη (L-L-G) από τους τύπους (1.26) και (1.27), αντίστοιχα.

```

73      # L-L-G fault with Rf!=0
74      B4 = Isb * Vrb - Isb * Vrc - Isc * Vrb + Isc * Vrc
75      B5 = Vrb * Vsb - Vrb * Vsc + Vrc * Vsc - Vrc * Vsb
76      B6 = Irb * Vsb - Irb * Vsc - Irc * Vsb + Irc * Vsc
77
78      b3 = (B4 * B5.conjugate()).real
79      b4 = (B6 * B5.conjugate()).real
80
81      m2_0 = b4 / (b3 + b4)
82
83      if 0 <= m2_0 <= 1:
84          m_llg = m2_0
85      else:
86          m_llg = 0.5
87

```

Εικόνα 3.27: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.26) για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

```

88      # L-L-G fault with Rf!=0 (different approx.)
89      B7 = Isc * Vsb - Isc * Vrc - Isb * Vsc + Isb * Vrb
90      B8 = Vrb * Vsb - Vrc * Vsc
91      B9 = Irb * Vsb - Irb * Vrc - Irc * Vsc + Irc * Vrb
92
93      b5 = (B7 * B8.conjugate()).real
94      b6 = (B9 * B8.conjugate()).real
95
96      m2_0n = b6 / (b5 + b6)
97
98      if 0 <= m2_0n <= 1:
99          m_llgn = m2_0n
100     else:
101         m_llgn = 0.5
102

```

Εικόνα 3.28: Υλοποίηση αλγορίθμου (1.27) για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Στις Εικόνες 3.29, 3.30 και 3.31 φαίνεται η υλοποίηση των αλγορίθμων για τριφασικό σφάλμα από τους τύπους (1.28)-(1.31).

```

103 # 3-phase fault with and without ground and Rf!=0 for each phase
104 # Using Phase a and b
105 C1 = Isb * Vsa - Isb * Vra - Isa * Vsb + Isa * Vrb
106 C2 = Vrb * Vsa - Vra * Vsb
107 C3 = Ira * Vrb - Ira * Vsb + Irb * Vsa - Irb * Vra
108
109 c1 = (C1 * C2.conjugate()).real
110 c2 = (C3 * C2.conjugate()).real
111
112 m3_ab = c2 / (c1 + c2)
113
114 if 0 <= m3_ab <= 1:
115     m_3ph_ab = m3_ab
116 else:
117     m_3ph_ab = 0.5
118

```

Εικόνα 3.29:Υλοποίηση αλγορίθμων (1.28)-(1.31) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - B]

```

118
119 # Using Phase b and c
120 C4 = Isc * Vsb - Isc * Vrb - Isb * Vsc + Isb * Vrc
121 C5 = Vrc * Vsb - Vrb * Vsc
122 C6 = Irb * Vrc - Irb * Vsc + IRC * Vsb - IRC * Vrb
123
124 c3 = (C4 * C5.conjugate()).real
125 c4 = (C6 * C5.conjugate()).real
126
127 m3_bc = c4 / (c3 + c4)
128
129 if 0 <= m3_bc <= 1:
130     m_3ph_bc = m3_bc
131 else:
132     m_3ph_bc = 0.5

```

Εικόνα 3.30:Υλοποίηση αλγορίθμων (1.28)-(1.31) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις B - C]

```

134 # Using Phase a and c
135 C7 = Isc * Vsa - Isc * Vra - Isa * Vsc + Isa * Vrc
136 C8 = Vrc * Vsa - Vra * Vsc
137 C9 = Ira * Vrc - Ira * Vsc + Irc * Vsa - Irc * Vra
138
139 c5 = (C7 * C8.conjugate()).real
140 c6 = (C9 * C8.conjugate()).real
141
142 m3_ac = c6 / (c5 + c6)
143
144 if 0 <= m3_ac <= 1:
145     m_3ph_ac = m3_ac
146 else:
147     m_3ph_ac = 0.5
148
149 # For best approximation we use the median of the three
150 m_3ph = (m_3ph_ab + m_3ph_bc + m_3ph_ac) / 3
151

```

Εικόνα 3.31:Υλοποίηση αλγορίθμων (1.28)-(1.31) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - C]

Στις Εικόνες 3.32, 3.33 και 3.34 φαίνεται η υλοποίηση των αλγορίθμων για τριφασικό σφάλμα από τους τύπους (1.32)-(1.35).

```

152 # 3-phase fault with Rf=0
153 # Using Phase a and b
154 D1 = Isa * Vra - Isa * Vrb - Isb * Vra + Isb * Vrb
155 D2 = Vra * Vsa - Vra * Vsb + Vrb * Vsb - Vrb * Vsa
156 D3 = Ira * Vsa - Ira * Vsb - Irb * Vsa + Irb * Vsb
157
158 d1 = (D1 * D2.conjugate()).real
159 d2 = (D3 * D2.conjugate()).real
160
161 m4_ab = d2 / (d1 + d2)
162
163 if 0 <= m4_ab <= 1:
164     m_rf0_ab = m4_ab
165 else:
166     m_rf0_ab = 0.5

```

Εικόνα 3.32:Υλοποίηση αλγορίθμων (1.32)-(1.35) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - B]

```

168 # Using Phase b and c
169 D4 = Isb * Vrb - Isb * Vrc - Isc * Vrb + Isc * Vrc
170 D5 = Vrb * Vsb - Vrb * Vsc + Vrc * Vsc - Vrc * Vsb
171 D6 = Irb * Vsb - Irb * Vsc - IRC * Vsb + IRC * Vsc
172
173 d3 = (D4 * D5.conjugate()).real
174 d4 = (D6 * D5.conjugate()).real
175
176 m4_bc = d4 / (d3 + d4)
177
178 if 0 <= m4_bc <= 1:
179     m_rf0_bc = m4_bc
180 else:
181     m_rf0_bc = 0.5
182

```

Εικόνα 3.33:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.32)-(1.35) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις B - C]

```

183 # Using Phase a and c
184 D7 = Isa * Vra - Isa * Vrc - Isc * Vra + Isc * Vrc
185 D8 = Vra * Vsa - Vra * Vsc + Vrc * Vsc - Vrc * Vsa
186 D9 = Ira * Vsa - Ira * Vsc - IRC * Vsa + IRC * Vsc
187
188 d5 = (D7 * D8.conjugate()).real
189 d6 = (D9 * D8.conjugate()).real
190
191 m4_ac = d6 / (d5 + d6)
192
193 if 0 <= m4_ac <= 1:
194     m_rf0_ac = m4_ac
195 else:
196     m_rf0_ac = 0.5
197
198 # For best approximation we use the median of the three
199 m_rf0 = (m_rf0_ab + m_rf0_bc + m_rf0_ac) / 3
200

```

Εικόνα 3.34:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.32)-(1.35) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - C]

Στις Εικόνες 3.35, 3.36 και 3.37 φαίνεται η υλοποίηση των αλγορίθμων για τριφασικό σφάλμα από τους τύπους (1.36)-(1.39).

```

201 # 3-phase with Rf=0 (different method of approximation)
202 # Using phase a and b
203 H1 = Isb * Vsa - Isb * Vrb - Isa * Vsb + Isa * Vra
204 H2 = Vra * Vsa - Vrb * Vsb
205 H3 = Ira * Vsa - Ira * Vrb - Irb * Vsb + Irb * Vra
206
207 h1 = (H1 * H2.conjugate()).real
208 h2 = (H3 * H2.conjugate()).real
209
210 m5_ab = h2 / (h1 + h2)
211
212 if 0 <= m5_ab <= 1:
213     m_rf0n_ab = m5_ab
214 else:
215     m_rf0n_ab = 0.5
216

```

Εικόνα 3.35:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.36)-(1.39) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - B]

```

217 # Using phase b and c
218 H4 = Isc * Vsb - Isc * Vrc - Isb * Vsc + Isb * Vrb
219 H5 = Vrb * Vsb - Vrc * Vsc
220 H6 = Irb * Vsb - Irb * Vrc - IRC * Vsc + IRC * Vrb
221
222 h3 = (H4 * H5.conjugate()).real
223 h4 = (H6 * H5.conjugate()).real
224
225 m5_bc = h4 / (h3 + h4)
226
227 if 0 <= m5_bc <= 1:
228     m_rf0n_bc = m5_bc
229 else:
230     m_rf0n_bc = 0.5
231

```

Εικόνα 3.36:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.36)-(1.39) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις B - C]

```

232 # Using phase a and c
233 H7 = Isc * Vsa - Isc * Vrc - Isa * Vsc + Isa * Vra
234 H8 = Vra * Vsa - Vrc * Vsc
235 H9 = Ira * Vsa - Ira * Vrc - IRC * Vsc + IRC * Vra
236
237 h5 = (H7 * H8.conjugate()).real
238 h6 = (H9 * H8.conjugate()).real
239
240 m5_ac = h6 / (h5 + h6)
241
242 if 0 <= m5_ac <= 1:
243     m_rf0n_ac = m5_ac
244 else:
245     m_rf0n_ac = 0.5
246
247 # For best approximation we use the median of the three
248 m_rf0n = (m_rf0n_ab + m_rf0n_bc + m_rf0n_ac) / 3
249

```

Εικόνα 3.37:Υλοποίηση αλγορίθμου (1.36)-(1.39) για τριφασικό βραχυκύκλωμα [φάσεις A - C]

Στην Εικόνα 3.38 φαίνεται ο επιλογέας τύπου σφάλματος. Η επιλογή γίνεται από τον χειριστή κατά την εκτέλεση του κώδικα.

```

251 # User selection of fault type
252 print("Select fault type.")
253 print("Single Phase L-G: 1")
254 print("L-L fault: 2")
255 print("L-L-G fault: 3")
256 print("3-phase fault: 4")
257 fault_type = int(input("Fault type no.: "))
258
259 if fault_type == 1:
260     print("Fault Location m = ", m_lg, "RF=0 approx. m = ", m_lg_0)
261 elif fault_type == 2:
262     print("Fault Location m = ", m_ll)
263 elif fault_type == 3:
264     print("Fault Location m = ", m_llg, "or (different approx.)", m_llgn)
265 elif fault_type == 4:
266     print("Fault Location m1 = ", m_3ph)
267     print("Fault Location (RF=0 m2) = ", m_rf0, "or (different approx.)", m_rf0n)
268 else:
269     print("Invalid input.")
270

```

Εικόνα 3.38:Επιλογέας τύπου σφάλματος

4^ο Κεφάλαιο

Αποτελέσματα αλγορίθμων θέσης σφάλματος

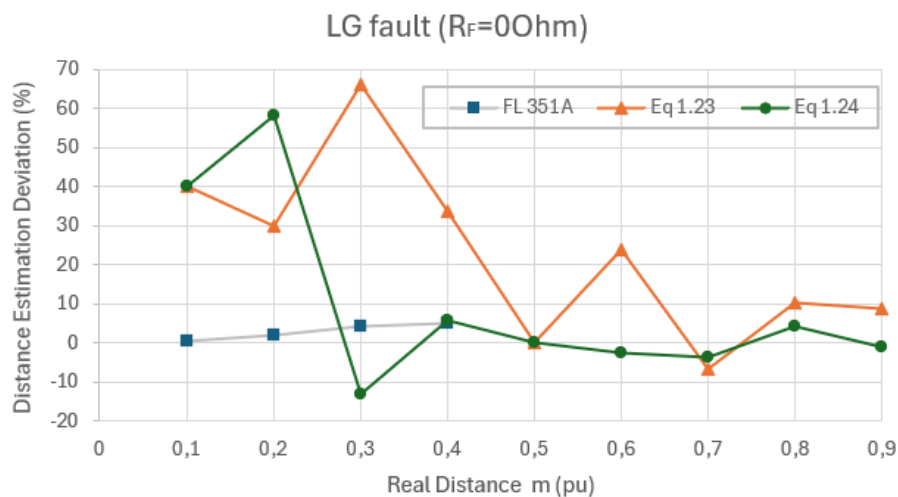
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αλγορίθμων εύρεσης θέσης σφάλματος από τον κώδικα Python που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για μονοφασικό σφάλμα με γη (L-G), διφασικό σφάλμα χωρίς γη (L-L), διφασικό σφάλμα με γη (L-L-G) και συμμετρικό/τριφασικό σφάλμα (L-L-L). Κάθε σφάλμα πραγματοποιήθηκε εννέα φορές, προοδευτικά κατά μήκος της γραμμής. Συγκεκριμένα, σε ποσοστό 10% ($m=0.1$) του μήκους της γραμμής, από το ζυγό αναχώρησης, έως και 90% ($m=0.9$), με βήμα 10% ($m_1=0.1$, $m_2=0.2$, κλπ). Ακόμα, κάθε προσομοίωση εκτελέστηκε τρεις φορές για προοδευτικά μεγαλύτερη τιμή αντίστασης σφάλματος. Αρχικά, το σύστημα προσομοιώθηκε με αντίσταση σφάλματος ίση με μηδέν, στη συνέχεια με αντίσταση σφάλματος ίση με 1Ω και τέλος ίση με 10Ω .

Σε κάθε περίπτωση έχουν συλλεχθεί, επίσης, οι εκτιμήσεις θέσης σφάλματος που πραγματοποιούν οι ηλεκτρονόμοι SEL 351A και οι οποίες θα αναλυθούν και θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις των αλγορίθμων.

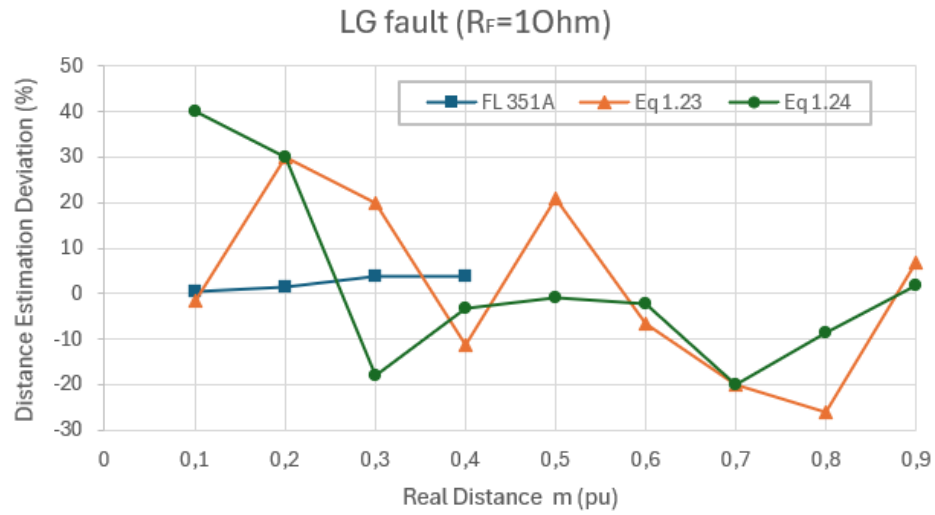
4.1 Μονοφασικό σφάλμα με γη (L-G)

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι εκτιμήσεις θέσης σφάλματος των ηλεκτρονόμων SEL 351A και των αλγορίθμων θέσης σφάλματος, καθώς και η απόκλιση από την πραγματική τιμή για κάθε περίπτωση, για μονοφασικό σφάλμα γραμμής με γη.

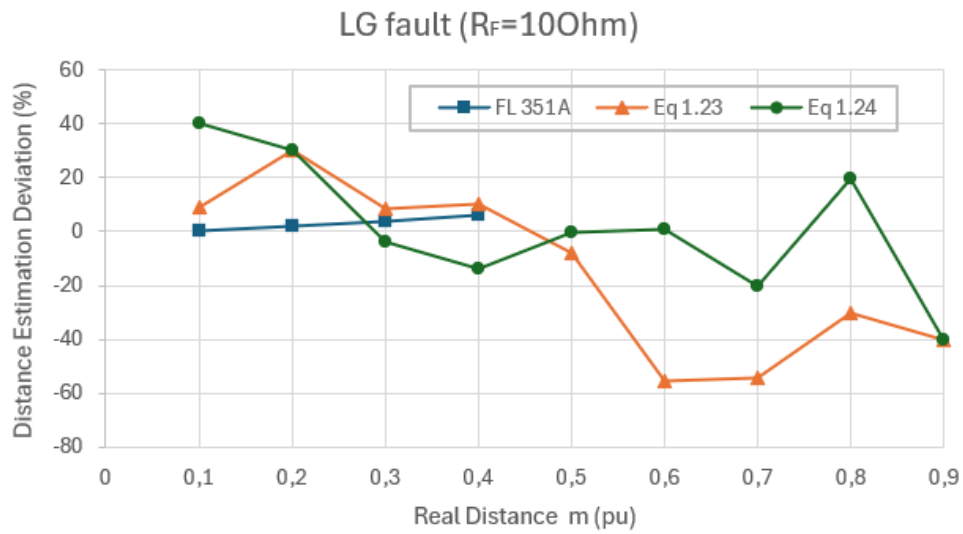
Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκτιμήσεων από την πραγματική απόσταση για μηδενική αντίσταση σφάλματος. Ομοίως, οι ποσοστιαίες αποκλίσεις για αντίσταση σφάλματος 1Ω και 10Ω απεικονίζονται στην Εικόνα 4.2 και 4.3 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα ($R_F=0\Omega$)



Εικόνα 4.2: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα ($R_F=1\Omega$)



Εικόνα 4.3: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα ($R_F=10\Omega$)

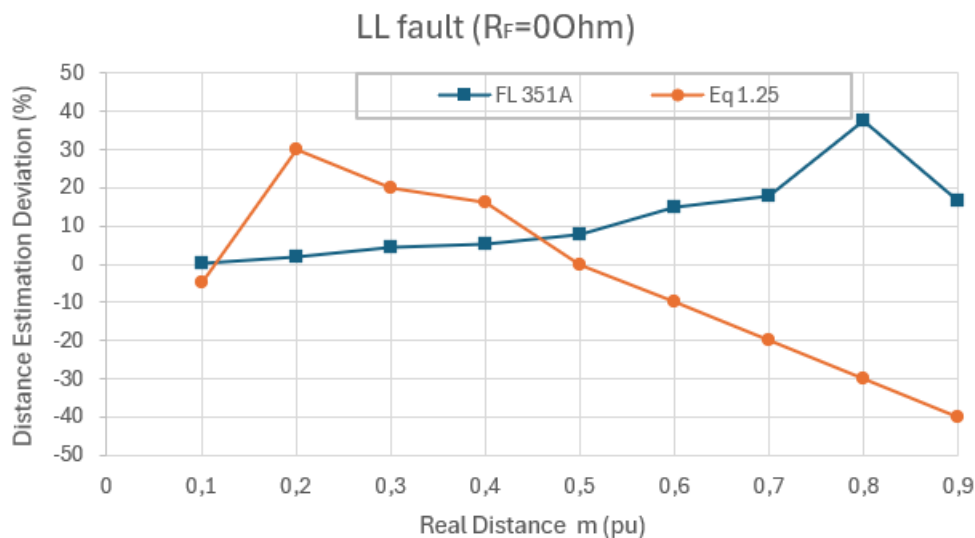
Αντίσταση Σφάλματος	Πραγματική απόσταση m	Εκτίμηση FL 351A	Απόκλιση (%) για την FL 351A	Εκτίμηση (1.23)	Απόκλιση (%) για την (1.23)	Εκτίμηση (1.24)	Απόκλιση (%) για την (1.24)
R_F=0Ω	0.1	0.1048	0.48	0.5	40	0.5	40
	0.2	0.2185	1.85	0.5	30	0.78195	58.195
	0.3	0.3417	4.17	0.95987	65.987	0.16859	-13.141
	0.4	0.4483	4.83	0.73741	33.741	0.45722	5.722
	0.5	Error	Error	0.5	0	0.5	0
	0.6	Error	Error	0.83786	23.786	0.57538	-2.462
	0.7	Error	Error	0.63479	-6.521	0.66479	-3.521
	0.8	Error	Error	0.90132	10.132	0.84066	4.066
	0.9	Error	Error	0.98716	8.716	0.88794	-1.206
R_F=1Ω	0.1	0.1037	0.37	0.08469	-1.531	0.5	40
	0.2	0.215	1.5	0.5	30	0.5	30
	0.3	0.3381	3.81	0.5	20	0.11859	-18.141
	0.4	0.4377	3.77	0.28566	-11.434	0.36763	-3.237
	0.5	Error	Error	0.70835	20.835	0.49250	-0.75
	0.6	Error	Error	0.53493	-6.507	0.57637	-2.363
	0.7	Error	Error	0.5	-20	0.5	-20
	0.8	Error	Error	0.53868	-26.132	0.71319	-8.681
	0.9	Error	Error	0.96978	6.978	0.91950	1.95
R_F=10Ω	0.1	0.1046	0.46	0.1931	9.31	0.5	40
	0.2	0.2186	1.86	0.5	30	0.5	30
	0.3	0.3375	3.75	0.38424	8.424	0.26417	-3.583
	0.4	0.4598	5.98	0.5	10	0.26097	-13.903
	0.5	Error	Error	0.41812	-8.188	0.49903	-0.097
	0.6	Error	Error	0.04326	-55.674	0.60909	0.909
	0.7	Error	Error	0.15799	-54.201	0.5	-20
	0.8	Error	Error	0.5	-30	0.99899	19.899
	0.9	Error	Error	0.5	-40	0.5	-40

Πίνακας 4.1: Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα γραμμής με γη

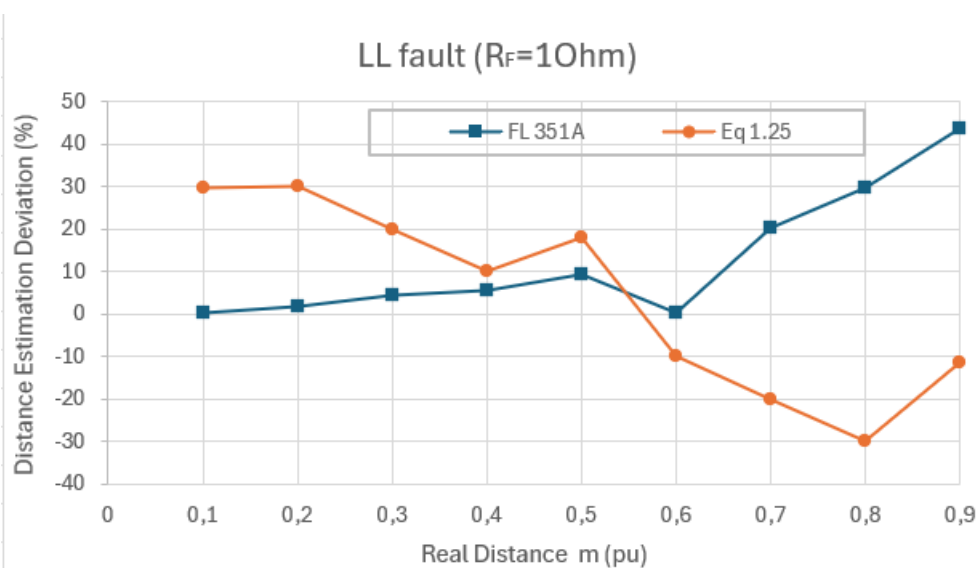
4.2 Διφασικό σφάλμα χωρίς γη (L-L)

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται οι εκτιμήσεις θέσης σφάλματος των ηλεκτρονόμων SEL 351A και των αλγορίθμων θέσης σφάλματος, καθώς και η απόκλιση από την πραγματική τιμή για κάθε περίπτωση, για διφασικό σφάλμα γραμμής χωρίς γη.

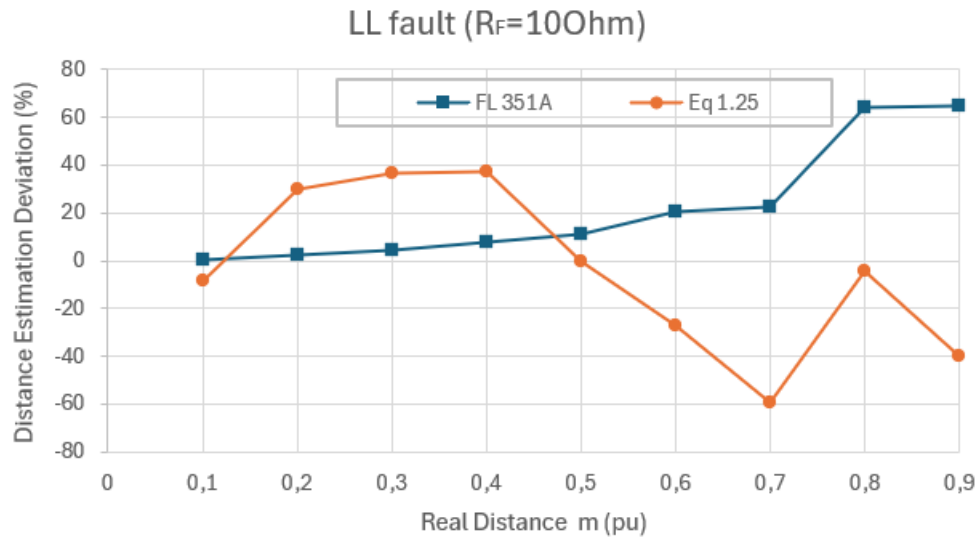
Στην Εικόνα 4.4 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκτιμήσεων από την πραγματική απόσταση για μηδενική αντίσταση σφάλματος. Ομοίως, οι ποσοστιαίες αποκλίσεις για αντίσταση σφάλματος 1Ω και 10Ω απεικονίζονται στην Εικόνα 4.5 και 4.6 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.4: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη ($R_F=0\Omega$)



Εικόνα 4.5: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη ($R_F=1\Omega$)



Εικόνα 4.6: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη ($R_F=10\Omega$)

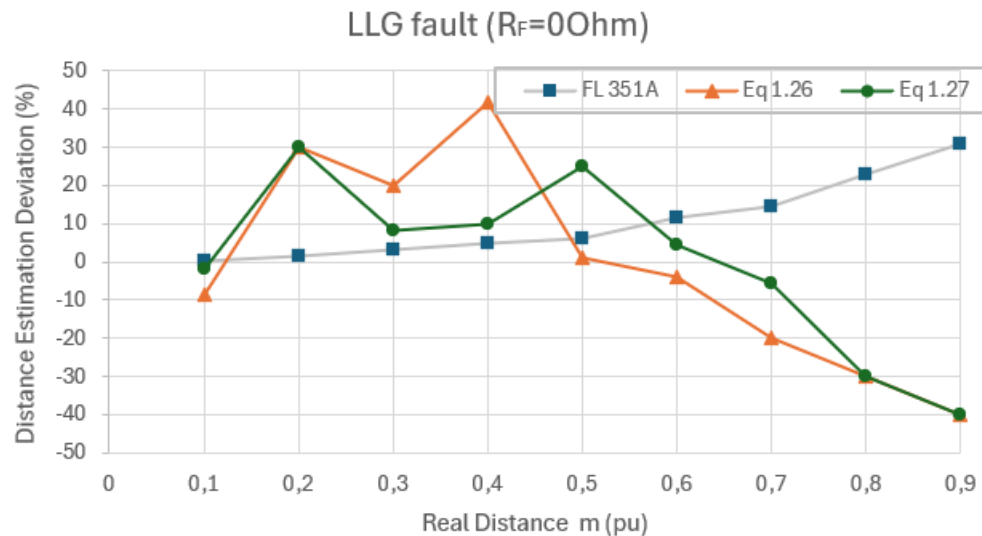
Αντίσταση Σφάλματος	Πραγματική απόσταση m	Εκτίμηση FL 351A	Απόκλιση (%) για την FL 351A	Εκτίμηση (1.25)	Απόκλιση (%) για την (1.25)
$R_F=0\Omega$	0.1	0.1042	0.42	0.05026	-4.974
	0.2	0.2171	1.71	0.5	30
	0.3	0.3449	4.49	0.5	20
	0.4	0.4532	5.32	0.56262	16.262
	0.5	0.5786	7.86	0.5	0
	0.6	0.7482	14.82	0.5	-10
	0.7	0.8768	17.68	0.5	-20
	0.8	1.1774	37.74	0.5	-30
	0.9	1.0647	16.47	0.5	-40
$R_F=1\Omega$	0.1	0.1045	0.45	0.39607	29.607
	0.2	0.2169	1.69	0.5	30
	0.3	0.3454	4.54	0.5	20
	0.4	0.4564	5.64	0.5	10
	0.5	0.5924	9.24	0.6821	18.21
	0.6	0.6028	0.28	0.5	-10
	0.7	0.9047	20.47	0.5	-20
	0.8	1.0967	29.67	0.5	-30
	0.9	1.3356	43.56	0.7866	-11.34
$R_F=10\Omega$	0.1	0.1046	0.46	0.01413	-8.587
	0.2	0.2206	2.06	0.5	30
	0.3	0.3428	4.28	0.6678	36.78
	0.4	0.4773	7.73	0.77318	37.318
	0.5	0.6088	10.88	0.5	0
	0.6	0.8044	20.44	0.32847	-27.153
	0.7	0.9261	22.61	0.10928	-59.072
	0.8	1.4423	64.23	0.75668	-4.332
	0.9	1.5475	64.75	0.5	-40

Πίνακας 4.2: Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα γραμμής χωρίς γ

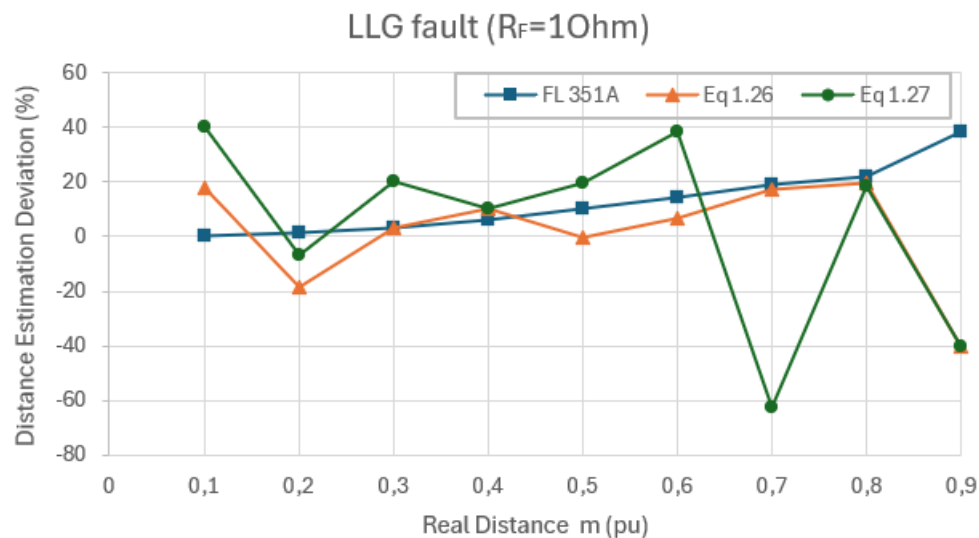
4.3 Διφασικό σφάλμα με γη (L-L-G)

Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται οι εκτιμήσεις θέσης σφάλματος των ηλεκτρονόμων SEL 351A και των αλγορίθμων θέσης σφάλματος, καθώς και η απόκλιση από την πραγματική τιμή για κάθε περίπτωση, για διφασικό σφάλμα γραμμής με γη.

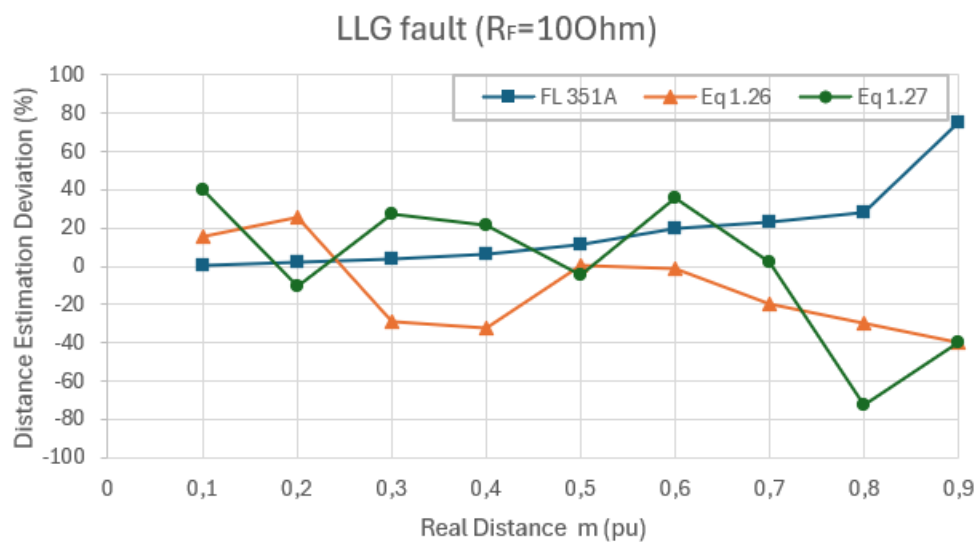
Στην Εικόνα 4.7 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκτιμήσεων από την πραγματική απόσταση για μηδενική αντίσταση σφάλματος. Ομοίως, οι ποσοστιαίες αποκλίσεις για αντίσταση σφάλματος 1Ω και 10Ω απεικονίζονται στην Εικόνα 4.8 και 4.9 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.7: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα με γη ($R_F=0\Omega$)



Εικόνα 4.8: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα με γη ($R_F=1\Omega$)



Εικόνα 4.9: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα με γη ($R_F=10\Omega$)

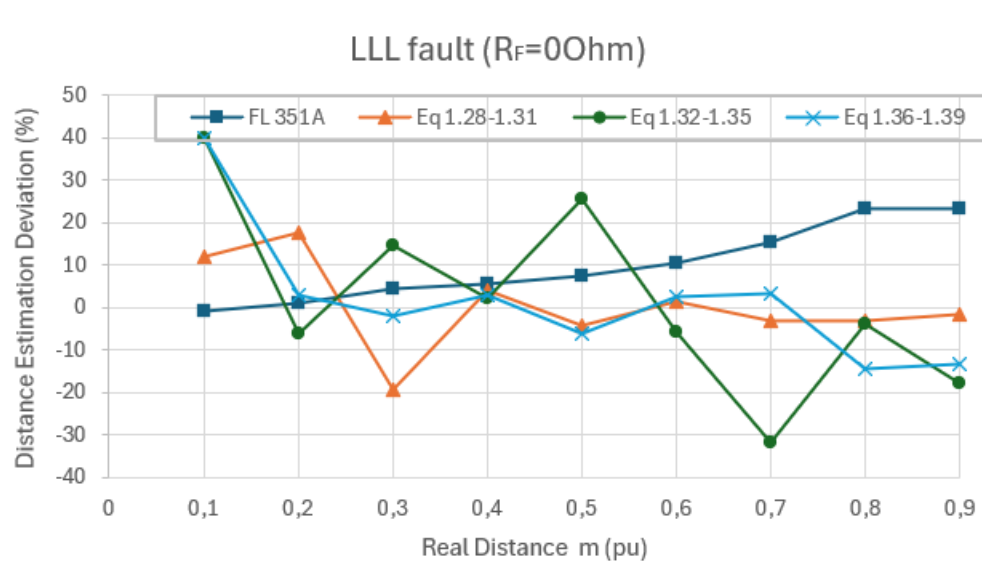
Αντίσταση Σφάλματος	Πραγματική απόσταση m	Εκτίμηση FL 351A	Απόκλιση (%) για την FL 351A	Εκτίμηση (1.26)	Απόκλιση (%) για την (1.26)	Εκτίμηση (1.27)	Απόκλιση (%) για την (1.27)
$R_F=0\Omega$	0.1	0.1038	0.38	0.01562	-8.438	0.08152	-1.848
	0.2	0.2144	1.44	0.5	30	0.5	30
	0.3	0.33	3	0.5	20	0.38368	8.368
	0.4	0.4483	4.83	0.81613	41.613	0.50031	10.031
	0.5	0.5629	6.29	0.51044	1.044	0.75032	25.032
	0.6	0.7165	11.65	0.56097	-3.903	0.64384	4.384
	0.7	0.8435	14.35	0.5	-20	0.64298	-5.702
	0.8	1.0289	22.89	0.5	-30	0.5	-30
	0.9	1.2083	30.83	0.5	-40	0.5	-40
$R_F=1\Omega$	0.1	0.1038	0.38	0.27965	17.965	0.5	40
	0.2	0.2148	1.48	0.01243	-18.7571	0.13431	-6.569
	0.3	0.3332	3.32	0.33020	3.02	0.5	20
	0.4	0.4618	6.18	0.5	10	0.5	10
	0.5	0.602	10.2	0.49830	-0.17	0.69376	19.376
	0.6	0.7439	14.39	0.66505	6.505	0.98684	38.684
	0.7	0.8888	18.88	0.87084	17.084	0.07486	-62.514
	0.8	1.0187	21.87	0.99505	19.505	0.98489	18.489
	0.9	1.2831	38.31	0.5	-40	0.5	-40
$R_F=10\Omega$	0.1	0.1047	0.47	0.25244	15.244	0.5	40
	0.2	0.2197	1.97	0.46017	26.017	0.09634	-10.366
	0.3	0.3401	4.01	0.01006	-28.994	0.57537	27.537
	0.4	0.4647	6.47	0.07612	-32.388	0.61348	21.348
	0.5	0.6104	11.04	0.50141	0.141	0.45459	-4.541
	0.6	0.7955	19.55	0.58848	-1.152	0.95635	35.635
	0.7	0.9223	23.23	0.5	-20	0.72000	2
	0.8	1.0805	28.05	0.5	-30	0.07234	-72.7659
	0.9	1.6535	75.35	0.5	-40	0.5	-40

Πίνακας 4.3: Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για διφασικό σφάλμα γραμμής με γη

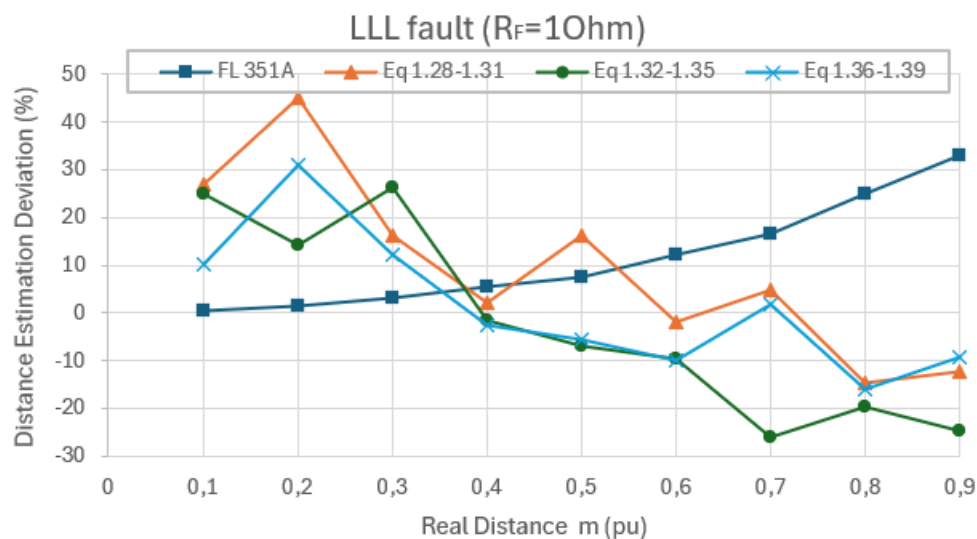
4.4 Τριφασικό σφάλμα (L-L-L)

Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι εκτιμήσεις θέσης σφάλματος των ηλεκτρονόμων SEL 351A και των αλγορίθμων θέσης σφάλματος, καθώς και η απόκλιση από την πραγματική τιμή για κάθε περίπτωση, για τριφασικό σφάλμα γραμμής.

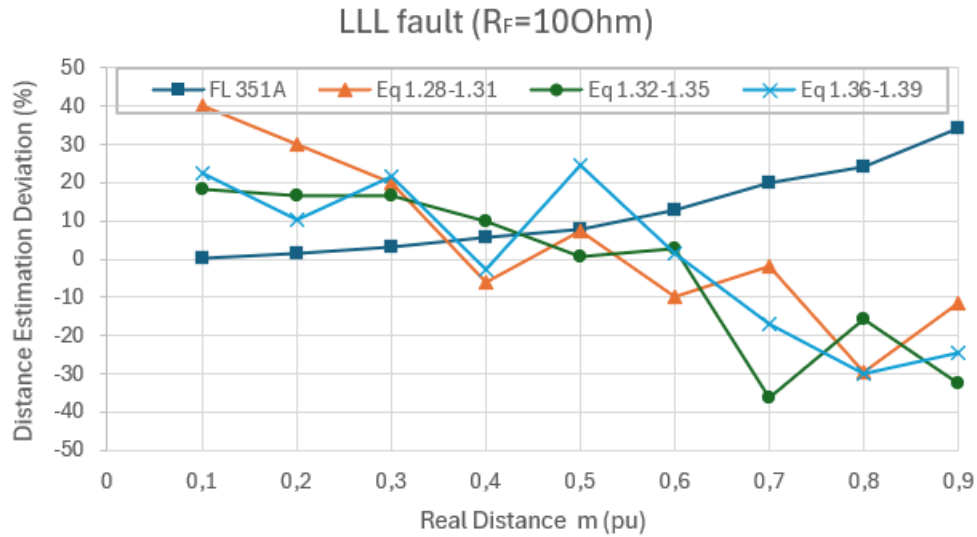
Στην Εικόνα 4.10 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκτιμήσεων από την πραγματική απόσταση για μηδενική αντίσταση σφάλματος. Ομοίως, οι ποσοστιαίες αποκλίσεις για αντίσταση σφάλματος 1Ω και 10Ω απεικονίζονται στην Εικόνα 4.11 και 4.12 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.10: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα ($R_f=0\Omega$)



Εικόνα 4.11: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα ($R_f=1\Omega$)



Εικόνα 4.12: Ποσοστιαίες αποκλίσεις εκτιμήσεων θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα ($R_F=10\Omega$)

Αντ. Σφάλ.	Πραγ. Απ. m	Εκτίμ. FL 351A	Απόκλ. (%) για την FL 351A	Εκτίμ. (1.28)-(1.31)	Απόκλ. (%) για (1.28)-(1.31)	Εκτ. (1.32)-(1.35)	Απόκλ. (%) για (1.32)-(1.35)	Εκτίμ. (1.36)-(1.39)	Απόκλ. (%) για (1.36)-(1.39)
$R_F=0\Omega$	0.1	0.0924	-0.76	0.2200	12	0.5	40	0.5	40
	0.2	0.2119	1.19	0.3751	17.51	0.1386	-6.14	0.2294	2.94
	0.3	0.3425	4.25	0.1058	-19.42	0.4449	14.49	0.2808	-1.92
	0.4	0.4556	5.56	0.4414	4.14	0.4219	2.19	0.4275	2.75
	0.5	0.575	7.5	0.4565	-4.35	0.7567	25.67	0.437	-6.3
	0.6	0.7045	10.45	0.6155	1.55	0.5434	-5.66	0.627	2.7
	0.7	0.8555	15.55	0.667	-3.3	0.3801	-31.99	0.7337	3.37
	0.8	1.0321	23.21	0.7677	-3.23	0.7596	-4.04	0.6562	-14.38
	0.9	1.1318	23.18	0.8847	-1.53	0.7203	-17.97	0.767	-13.3
$R_F=1\Omega$	0.1	0.1035	0.35	0.3684	26.84	0.3481	24.81	0.2028	10.28
	0.2	0.2132	1.32	0.6501	45.01	0.3418	14.18	0.511	31.1
	0.3	0.3319	3.19	0.4632	16.32	0.5631	26.31	0.4215	12.15
	0.4	0.4549	5.49	0.4207	2.07	0.3845	-1.55	0.3749	-2.51
	0.5	0.5761	7.61	0.6605	16.05	0.4302	-6.98	0.4434	-5.66
	0.6	0.7232	12.32	0.5796	-2.04	0.5027	-9.73	0.5	-10
	0.7	0.8649	16.49	0.7493	4.93	0.4404	-25.96	0.7186	1.86
	0.8	1.0477	24.77	0.6526	-14.74	0.6027	-19.73	0.6396	-16.04
	0.9	1.2312	33.12	0.7772	-12.26	0.6527	-24.73	0.8075	-9.25
$R_F=10\Omega$	0.1	0.1035	0.35	0.5	40	0.2837	18.37	0.3228	22.28
	0.2	0.2129	1.29	0.5	30	0.3662	16.62	0.3032	10.32
	0.3	0.3306	3.06	0.5	20	0.4664	16.64	0.5146	21.46
	0.4	0.4574	5.74	0.3402	-5.98	0.5	10	0.3732	-2.68
	0.5	0.5787	7.87	0.5715	7.15	0.5044	0.44	0.7458	24.58
	0.6	0.7279	12.79	0.5	-10	0.628	2.8	0.6160	1.6
	0.7	0.8987	19.87	0.6810	-1.9	0.3367	-36.33	0.5291	-17.09
	0.8	1.0424	24.24	0.5024	-29.76	0.6416	-15.84	0.5	-30
	0.9	1.2412	34.12	0.7858	-11.42	0.5757	-32.43	0.6544	-24.56

Πίνακας 4.4: Εκτιμήσεις θέσης σφάλματος για τριφασικό σφάλμα γραμμής

5^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αποτίμηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων για τις εκτιμήσεις θέσης σφάλματος που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Ακόμα, παρουσιάζονται μελλοντικές προοπτικές για επέκταση της έρευνας και βελτιστοποίηση της μεθόδου που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία.

Αρχικά, για όλους τους τύπους σφαλμάτων που εξετάστηκαν (μονοφασικό, διφασικό χωρίς γη, διφασικό με γη και τριφασικό) η εκτίμηση της συνάρτησης Fault Location του ηλεκτρονόμου SEL 351A εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, όταν το σφάλμα εμφανίζεται σε αποστάσεις κοντά στον ζυγό που εμποτεύει ο ηλεκτρονόμος ($m=0.1 - 0.4$) η εκτίμηση που πραγματοποιεί έχει πολύ καλή ακρίβεια. Όσο αυξάνεται η απόσταση από τον ζυγό οι εκτιμήσεις θέσης σφάλματος γίνονται προοδευτικά πιο ανακριβείς. Μάλιστα, όταν το σφάλμα πραγματοποιείται πολύ κοντά στον ζυγό άφιξης ($m=0.8 - 0.9$) η λειτουργία Fault Location του ηλεκτρονόμου δίνει τιμές για την απόσταση m μεγαλύτερες της μονάδας, δηλαδή εκτιμά ότι το σφάλμα εξελίσσεται μετά το πέρας της γραμμής! Η αδυναμία της συνάρτησης Fault Location του ηλεκτρονόμου για μεγάλες αποστάσεις θέσης σφάλματος γίνεται εμφανής και για μονοφασικό σφάλμα όπου για απόσταση $m>0.5$, δηλαδή μετά το μέσον της γραμμής, εμφανίζει «Error» και αποτυγχάνει να πραγματοποιήσει κάποια εκτίμηση. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί πως η αύξηση της αντίστασης σφάλματος επιφέρει χειροτέρευση των εκτιμήσεων της συνάρτησης Fault Location.

Όσον αφορά τους αλγόριθμους θέσης σφάλματος της εργασίας [11] που εξετάστηκαν η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι ασαφής και ποικίλει ανά περίπτωση. Στην περίπτωση του μονοφασικού σφάλματος ο αλγόριθμος (1.23) φαίνεται να εμφανίζει σημαντική ανακρίβεια για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις, με ελάχιστες εξαιρέσεις. Για αντίσταση σφάλματος διάφορη του μηδενός όμοια ανακρίβεια παρουσιάζει ο αλγόριθμος (1.24), ενώ για μηδενική αντίσταση σφάλματος φαίνεται να δίνει ικανοποιητικές εκτιμήσεις, απόκλιση στο διάστημα $[-5\%, +5\%]$, για αποστάσεις σφάλματος $m \geq 0.4$. Στην περίπτωση του διφασικού σφάλματος χωρίς γη ο αλγόριθμος (1.25) αποτυγχάνει πλήρως να παράσει ικανοποιητικές εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος, ανεξάρτητα από απόσταση και τιμή αντίστασης σφάλματος. Στην περίπτωση του διφασικού σφάλματος με γη οι εκτιμήσεις που παράγει ο αλγόριθμος (1.27) εμφανίζουν πολύ μεγάλη και ακανόνιστη διακύμανση με μικρή ακρίβεια στην πλειονότητα των καταστάσεων. Το ίδιο αληθεύει και για τον αλγόριθμο (1.26) με εξαίρεση την περίπτωση που το σφάλμα εμφανίζει μικρή αντίσταση σφάλματος ($R_F = I\Omega$), όπου για αποστάσεις σφάλματος $0.3 \leq m \leq 0.8$ παράγει εκτιμήσεις όμοιες με τη συνάρτηση Fault Location του ηλεκτρονόμου, με διαφορά έως 10% το μέγιστο. Στην περίπτωση του τριφασικού σφάλματος για μηδενική αντίσταση σφάλματος ο αλγόριθμος (1.28)-(1.31) παράγει αρκετά ικανοποιητικές εκτιμήσεις για αποστάσεις σφάλματος $m \geq 0.4$, απόκλιση στο διάστημα $[-5\%, +5\%]$. Οι αντίστοιχες εκτιμήσεις του αλγορίθμου (1.32)-(1.35) παρουσιάζουν ελαφρά μειωμένη ακρίβεια, ενώ ο αλγόριθμος (1.36)-(1.39) εμφανίζει μεγάλη ανακρίβεια και σημαντική διασπορά, ακόμα και για εκτιμήσεις διαδοχικών αποστάσεων σφάλματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε, η συνάρτηση Fault Location όσο απομακρύνεται το σφάλμα από τον ζυγό που εμποτεύει ο ηλεκτρονόμος

τίνει να υπερεκτιμά, διαδοχικά, όλο και περισσότερο την απόσταση m . Αντιθέτως, οι αλγόριθμοι της εργασίας [11] συστηματικά φαίνεται να υπερεκτιμούν τη θέση σφάλματος όταν αυτό εξελίσσεται κοντά στον ζυγό αναχώρησης (Bus 1), αλλά να υποεκτιμούν τη θέση σφάλματος όταν αυτό εξελίσσεται κοντά στο ζυγό (Bus 3). Αυτό φαίνεται εύκολα από τις γραφικές απεικονίσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου, στις περισσότερες περιπτώσεις, για απόσταση $m < 0.5$ η απόκλιση λαμβάνει συστηματικά θετικές τιμές ενώ για απόσταση $m > 0.5$ η απόκλιση λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Σε γενικές γραμμές οι αλγόριθμοι που εξετάστηκαν εμφανίζουν σημαντική ανακρίβεια και παράγουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος μόνο για συγκεκριμένες περιπτώσεις και θέσεις πάνω στη γραμμή. Για την αδυναμία των αλγορίθμων πιθανώς να ευθύνεται η μεγάλη ευαισθησία τους. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι προϊόν δειγματοληψίας η οποία δέχεται επεξεργασία από κώδικα ο οποίος χρησιμοποιεί επιλεκτικά διαστήματα των σημάτων. Κάθε βήμα της διαδικασίας έχει την πιθανότητα να εισάγει ένα ποσοστό σφάλματος στο αρχικό σήμα. Εάν οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν εμφανίζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία ακόμα και μικρό σφάλμα μπορεί να αλλοιώσει σημαντικά το αποτέλεσμα. Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται, προφανώς, και από την ποιότητα της αρχικής κυματομορφής που παράγεται από την προσομοίωση και την οποία ανιχνεύει και αναπαράγει ο ηλεκτρονόμος στα αρχεία COMTRADE. Καταρχάς υπάρχει περιορισμός στην δειγματοληψία που μπορεί να πραγματοποιηθεί από τους ηλεκτρονόμους και συνεπώς στο πλήθος των διαθέσιμων δειγμάτων προς επεξεργασία και χρήση για την εξαγωγή των δεδομένων. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο κάθε ηλεκτρονόμος παράγει *Event Files* με κυματομορφές χαμηλότερης ποιότητας όσο πιο μακριά πραγματοποιείται το σφάλμα από τον ζυγό τον οποίο εποπτεύει. Παραδείγματος χάρη, ο H/N ST1 παράγει κυματομορφές καλύτερης ποιότητας για απόσταση $m < 0.5$ και χειρότερης για απόσταση $m > 0.5$, ενώ το αντίθετο ήταν αληθές για τον H/N ST2. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως και στις θεωρητικές δοκιμές που έγιναν στην εργασία [11] οι αλγόριθμοι σε πολλές περιπτώσεις έδωσαν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σε ότι αφορά τις μελλοντικές προοπτικές της παρούσας εργασίας, υπάρχει περιθώριο για διάφορες βελτιώσεις της μεθόδου που αναλύθηκε για την εξέταση των αλγορίθμων. Αρχικά, με επεξεργασία του μοντέλου γραμμής στο RSCAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πιο ακριβές μοντέλο, παραδείγματος χάρη μοντέλο μεγάλου μήκους γραμμής μεταφοράς, ή ακόμα και ολόκληρα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, με χρήση πιο αποδοτικών καρτών εξόδων του RTDS μπορεί να γίνει βελτίωση των σημάτων εξόδου που παράγει η προσομοίωση και συνεπώς των σημάτων που ανιχνεύουν οι ηλεκτρονόμοι. Επιπροσθέτως, ο κώδικας Python μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί και να υλοποιηθούν διαφορετικοί αλγόριθμοι θέσης σφάλματος που είναι επιθυμητό να εξεταστούν. Καταληκτικά, αξίζει να αναφερθεί πως η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα, πέρα από την μελέτη κατάστασης σφάλματος, για την εξαγωγή φασισθετών και μελέτη μεγεθών του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση, παραδείγματος χάρη σε μελέτη ροής φορτίου. Αρκεί να παρέχουν οι ηλεκτρονόμοι αρχεία COMTRADE με τα αντίστοιχα δεδομένα, το οποίο επιτυγχάνεται εύκολα με χειροκίνητη παραγωγή *Event File* από τον χειριστή του λογισμικού.

Βιβλιογραφία

- [1] Γεωργιάκης, Παύλος Σ. (2015) *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*.
- [2] Liao, Y., "Transmission line fault location algorithms without requiring line parameters," *Elect. Power Compon. Syst.*, Vol. 36, pp. 1218–1225, 2008.
- [3] Wanjing Xiu & Yuan Liao (2011) *Accurate transmission line fault location considering shunt capacitances without utilizing line parameters*, *Electric Power Components and Systems*, 39:16, 1783-1794.
- [4] Μ.Π.Παπαδόπουλος, Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Αθήνα: ΕΜΠ, 1997.
- [5] Protection of Electricity Distribution Networks (J. M. Gers, E. J. Holmes)
- [6] Fault Location on Transmission and Distribution Lines_ Principles and Applications (S. Das, etal, Wiley-IEEE Press)
- [7] Saha, M. M., Izykowski, J., and Rosolowski, E. (2010) *Fault Location on Power Networks*. London: Springer
- [8] Stringfield TW, Marihat DJ, Stevens RF (1957) Fault location methods for overhead lines. *Trans of the AIEE, Part III, PAS 76(3):518–530*
- [9] Tang Y, Wang HF, Aggarwal RK et al. (2000) Fault indicators in transmission and distribution systems In: *Proc of Int Conf on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies – DRPT*, pp 238–243
- [10] Jan Izykowski, Eugeniusz Rosolowski, Przemyslaw Balcerek, Marek Fulczyk, and Murari Mohan Saha. *Accurate noniterative fault –location algorithm utilizing two –end unsynchronized measurements*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 2, pp. 547-555, April 2011.
- [11] Μουδούρης Θεόδωρος, Εντοπισμός Θέσης Σφάλματος σε Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας χωρίς Θεώρηση των Παραμέτρων τους μέσω Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθετών, Ιανουάριος 2024
- [12] Uttam Adhikari, Thomas H. Morris, Nischal Dahal, Shengyi Pan, Roger L. King, Nicolas H. Younan and Vahid Madani, Development of Power System Test Bed for Data Mining of Synchrophasors Data, CyberAttack and Relay Testing in RTDS 978-1-4673-2729-9/12 ©2012 IEEE
- [13] Chenfeng Zhang, Vamsi K Vijapurapu, Anurag K Srivastava, Noel N. Schulz, Jimena Bastos Hardware-in-the-Loop Simulation of Distance Relay Using RTDS. January 2007
- [14] Saran, A.; Palla, S.K.; Srivastava, A.K.; Schulz, N.N.; , "Real time power system simulation using RTDS and NI PXI," *Power Symposium*, 2008. NAPS '08. 40th North American, pp.1-6, 28-30 Sept. 2008
- [15] Tang, J.; Sloderbeck, M.; Ouellette, D.; Forsyth, P.; Langston, J.; McLaren, P.; "In System Emulation (ISE) of a New Current Differential Back-Up Protection Relay," *Developments in Power System Protection*, 2008. DPSP 2008. IET 9th International Conference on , pp.400-405, 17-20 March 2008
- [16] RTDS, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rtds.com/about-rtds-technologies/>.
- [17] RTDS Technologies inc, NovaCore Hardware Manual.
- [18] "ePHASORSim Real-Time Transient Stability Simulator" (PDF). Retrieved 23 November 2013.
- [19] Al-Hammouri, A.T; Nordstrom, L.; Chenine, M.; Vanfretti, L.; Honeth, N.; Leelaruiji, R. (22 July 2012). "Virtualization of synchronized phasor measurement units within real-time

- simulators for smart grid applications". 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. pp. 1–7. doi:10.1109/PESGM.2012.6344949. ISBN 978-1-4673-2729-9. S2CID 10605905.
- [20] Β. Παπασπηλιωτόπουλος, Βελτιστοποίηση Ρυθμίσεων Στοιχείων Υπερέντασης σε Προσαρμοστικά ή μη Συστήματα Προστασίας Σύγχρονων Δικτύων Διανομής και Συστημάτων Μεταφοράς, Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα, 2020.
 - [21] W.A.Elmore, Protective relaying theory and applications, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA 2004
 - [22] Alstom, Network protection & automation guide, 2011.
 - [23] <https://selinc.com/products/351A/> [Online]
 - [24] <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/electromechanical-and-solid-state-relays/electromechanical-relays> [Online]
 - [25] SEL-351A, -1 Protection System Instruction Manual, 20240709, Schweitzer Engineering Laboratories
 - [26] Beyond Phasors: Modeling of Power System Signals Using the Hilbert Transform, Asja Derviskadic, Member, IEEE, Guglielmo Frigo, Member, IEEE, Mario Paolone, Senior Member, IEEE, 0885-8950 (c) 2019 IEEE
 - [27] Power System Stability and Control, Prabha Kundur © 1994 by McGraw-Hill Inc.