



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη Προστασίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Ηλεκτρονόμους Κατεύθυνσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΓΚΟΡΙΤΣΑΣ

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

Αθήνα , Μάρτιος 2009





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη Προστασίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Ηλεκτρονόμους Κατεύθυνσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΓΚΟΡΙΤΣΑΣ

**Επιβλέπων :** Κορρές Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Γ. Κορρές  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Κ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ. Παπαθανασίου  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Μάρτιος 2009

.....  
Άγγελος Γ. Γκορίτσας

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

Copyright © Άγγελος Γ. Γκορίτσας

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.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση, η ανάλυση και η αξιολόγηση διαφόρων τύπων ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε 6 κεφάλαια. Στο πρώτο και εισαγωγικό παρουσιάζεται ο σκοπός και ο ρόλος του συστήματος προστασίας, καθώς επίσης και οι βασικές αρχές λειτουργίας του. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της θεωρίας υπολογισμού των σφαλμάτων και μια κατηγοριοποίηση αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγική περιγραφή του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης. Συγκεκριμένα συζητούνται ο ρόλος της προστασίας κατεύθυνσης και η αναγκαιότητα χρήσης του, οι μεταβλητές εισόδου, διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη, και οι αρχές ανίχνευσης του εξοπλισμού αυτού. Επίσης συζητείται η εφαρμογή τους τόσο σε ακτινικά όσο και σε δίκτυα κλειστού βρόχου. Και τέλος παρουσιάζονται οι νέες τεχνολογίες για τον εξοπλισμό αυτό.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται και αξιολογούνται διάφοροι τύποι στοιχείων κατεύθυνσης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται η εξίσωση ροπής, οι μεταβλητές πόλωσης και λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός από αυτούς. Επίσης αξιολογούνται διάφοροι συνδυασμοί εισόδου των στοιχείων αυτών, και πώς με αυτούς τους συνδυασμούς λειτουργούν στα απλά και στα σύνθετα σφάλματα. Επιπλέον αναλύονται νέες και παραδοσιακές επιλογές εισόδου, κλασικά προβλήματα και η λύση τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται οι διάφορες πηγές πόλωσης των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης γης. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή των πηγών πόλωσης, των διαφορετικών σχημάτων που είναι διαθέσιμα, καθώς επίσης και η ανάλυση των προβλημάτων που προκύπτουν σε καθένα από αυτά.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία και η απόδοση των δημοφιλών στοιχείων απόστασης και κατεύθυνσης για διαφορετικές διαμορφώσεις συστήματος. Πιο συγκεκριμένα γίνεται η αξιολόγηση της απόκρισης των στοιχείων κατεύθυνσης και απόστασης, όταν οι μετασχηματιστές μέτρησης εγκαθίστανται είτε στην υψηλή, είτε στην χαμηλή τάση του μετασχηματιστή ισχύος. Για την αξιολόγηση αυτή επιλύεται μια σειρά από παραδείγματα διαφόρων διαμορφώσεων. Η αναλυτική επίλυση των παραδειγμάτων αυτών παρουσιάζεται στο παράρτημα Β.

Τελειώνοντας, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Κορρέ Γεώργιο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ουσιαστική καθοδήγηση και πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας

### **Λέξεις Κλειδιά**

Συστήματα προστασίας, ηλεκτρονόμος, σφάλματα, προστασία κατεύθυνσης, προστασία αποστάσεως, , συμμετρικές συνιστώσες,.

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is the presentation, the analysis and the evaluation of several directional relay types that are used in modern protection systems.

This thesis is divided into six chapters. In the first and introductory chapter the aim and the role of directional protection equipment is presented, as well as the fundamental principles of its operation. Chapter two presents the theory of short circuit calculations and also provides a grouping of them.

In the third chapter there is an introductive description of directional protection equipment. In particular it is discussed the role of directional protection equipment and its necessity of use, the inputs variables, various characteristic quantities and its principles of operation. It is also discussed the application of directional protection equipment on radial networks as well as on close rings. Finally the new technologies for this equipment are presented.

In the fourth chapter several types of directional elements are analyzed and evaluated. In particular are presented the torque equation, the polarizing and operating quantities, and their advantages and disadvantages of each of them. There is also an evaluation of various directional element input combinations and how these combinations operate on simple and complex system faults. Moreover, new and traditional input choices, classical security problems and their solutions it is analyzed.

In the fifth chapter various polarizing sources for directional ground relays, are presented and analyzed. The aim of this chapter is to discuss polarizing sources, the different schemes available and the problem pertinent to each.

Finally in the sixth chapter it is analyzed the operation and the performance of popular distance and directional elements for several system configurations. In particular, this chapter addresses the application of distance and directional relays when instrument transformer inputs (CTs and VTs) are located on the low side of power transformer or on the opposite sides of the transformer bank. For this evaluation we solve, various configurations examples. The analytic solution of these examples is presented in Appendix B.

Concluding, I would like to thank my supervisor George Korres, Associate Professor of N.T.U.A for his substantial directions and valuable contributions for completion this diploma thesis.

### **Key Words**

Protection systems, faults, short circuit, directional overcurrent protection, distance protection, protective relays, symmetrical component.

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

1	Εισαγωγή.....	14
1.1	Σκοπός και Ρόλος του Συστήματος Προστασίας.....	14
1.2	Βασικές Αρχές Λειτουργίας.....	15
1.2.1	Ζώνες Προστασίας.....	15
1.2.2	Λειτουργία Χαρακτηριστικά του Συστήματος Προστασίας.....	16
1.2.3	Τύποι Ηλεκτρονόμων.....	17
2	Βραχυκυκλώματα.....	19
2.1	Κατηγορίες Σφαλμάτων.....	19
2.2	Υπολογισμός Σφαλμάτων.....	20
2.2.1	Σύστημα Συμμετρικών Συνιστωσών.....	20
2.2.2	Μονοφασικό ως προς γη Βραχυκύκλωμα.....	21
2.2.3	Διφασικό Βραχυκύκλωμα.....	22
2.2.4	Διφασικό ως προς Γη Βραχυκύκλωμα.....	23
2.2.5	Τριφασικό Βραχυκύκλωμα με ή χωρίς Γη.....	24
2.2.6	Κυκλώματα Ακολουθίας στους Μετασχηματιστές Ισχύος.....	25
3	Εξοπλισμός Προστασίας Κατεύθυνσης.....	27
3.1	Εισαγωγή.....	27
3.1.1	Ο Ρόλος της Προστασίας Κατεύθυνσης.....	27
3.1.2	Εφαρμογές.....	28
3.1.3	Κωδικοί και Συμβολισμοί Διαφόρων Τύπων Ηλεκτρονόμων.....	29
3.2	Περιγραφή των Ηλεκτρονόμων Κατεύθυνσης.....	30
3.2.1	Προστασία Κατεύθυνσης Σφαλμάτων Γης.....	31
3.2.2	Προστασία Κατεύθυνσης Φάσης.....	36
3.2.3	Ηλεκτρονόμοι Ισχύος.....	38
3.3	Εφαρμογές του Εξοπλισμού Προστασίας Κατεύθυνσης.....	39
3.3.1	Προστασία Ακτινικών Δικτύων.....	39
3.3.2	Προστασία Κλειστών Βρόχων.....	46
3.3.3	Προστασία Εναλλακτών.....	50
3.4	Χρήση.....	53
3.4.1	Διαβάθμιση των Μετασχηματιστών Έντασης και Τάσης.....	53
3.4.2	Επιλογή Μεταξύ Διφασικής ή Τριφασικής Προστασίας.....	54
3.4.3	Προστασία Παράλληλων Συνδεδεμένων Μετασχηματιστών.....	55
3.5	Νέες Τεχνολογίες.....	56
3.5.1	Νέες Τεχνολογίες στην Τεχνολογία Εξοπλισμού Προστασίας.....	56

3.5.2	Νέες Τεχνολογίες Αισθητήρων .....	57
3.5.3	Συμπεράσματα.....	57
4	Σχεδίαση και Αξιολόγηση Ηλεκτρονόμων Κατεύθυνσης.....	58
4.1	Εισαγωγή.....	58
4.2	Λόγοι Χρήσης Στοιχείων Κατεύθυνσης; .....	58
4.2.1	Καθορισμός Κατεύθυνσης Σφάλματος .....	59
4.2.2	Επιτήρηση Στοιχείων Αποστάσεως .....	59
4.3	Σχεδίαση Στοιχείων Κατεύθυνσης Φάσης .....	60
4.3.1	Στοιχείο Κατεύθυνσης Φάσης Σύνδεσης $90^\circ$ .....	60
4.3.2	Βελτιωμένο Στοιχείο Κατεύθυνσης Φάσης – Στοιχείο Κατεύθυνσης Θετικής Ακολουθίας .....	69
4.3.3	Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας.....	76
4.4	Σχεδίαση Στοιχείων Κατεύθυνσης Γης.....	83
4.4.1	Επιλογές εισόδου των στοιχείων κατεύθυνσης γης .....	83
4.4.2	Μεταβλητές Ακολουθίας ως Είσοδοι για τα Στοιχεία Κατεύθυνσης Γης.....	83
4.4.3	Στοιχείο Κατεύθυνσης Γης Πόλωσης Τάσης Μηδενικής Ακολουθίας.....	83
4.4.4	Στοιχείο Κατεύθυνσης Γης Πόλωσης Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας.....	84
4.4.5	Στοιχείο Κατεύθυνσης Διπλής Πόλωσης Μηδενικής Ακολουθίας.....	84
4.4.6	Στοιχεία Κατεύθυνσης Πόλωσης Μηδενικής Ακολουθίας σε Εφαρμογές Γραμμών Μεταφοράς Διπλού Κυκλώματος. ....	85
4.4.7	Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας για Σφάλματα Γης .....	89
4.4.8	Συνδυασμός Φασικών και Υπόλοιπων Ρευμάτων (residual) στα Στοιχεία Κατεύθυνσης Γης .....	94
4.4.9	Στοιχεία Κατεύθυνσης Γης σε Ασύμμετρες Καταστάσεις του Δικτύου.....	97
4.5	Απόδοση των Στοιχείων Κατεύθυνσης.....	98
4.5.1	Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας σε Εφαρμογές Αντιστάθμισης Σειράς Γραμμών Μεταφοράς .....	98
4.5.2	Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας σε Γραμμή Μεταφοράς χωρίς Αντιμετάθεση Φάσεων.....	100
4.5.3	Σύγκριση του Στοιχείου Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας με το Στοιχείο Κατεύθυνσης Δέλτα Σύνθετης Αντίστασης Θετικής Ακολουθίας (Delta Positive-Sequence) .....	102
5	Πηγές Πόλωσης για τους Ηλεκτρονόμους Κατεύθυνσης Γης.....	106
5.1	Εισαγωγή.....	106
5.2	Πόλωση ρεύματος .....	107
5.2	Πόλωση Τάσης.....	117
5.3	Διπλή Πόλωση Ρεύματος και Τάσης.....	121
5.4	Η Προσέγγιση Αρνητικής Ακολουθίας.....	121



6	Αξιολόγηση Στοιχείων Απόστασης και Κατεύθυνσης σε Γραμμές Μεταφοράς με Μετασχηματιστές Ισχύος Διαφόρων Συνδεσμολογιών.....	122
6.1	Εισαγωγή.....	122
6.2	Περιγραφή των Στοιχείων και του προς Αξιολόγηση Συστήματος.....	122
6.2.1	Στοιχεία Απόστασης.....	122
6.2.2	Στοιχεία Κατεύθυνσης.....	126
6.2.3	Περιγραφή του Συστήματος.....	127
6.3	Προστασία Γραμμής Μεταφοράς Υψηλής Τάσης με Ηλεκτρονόμους Απόστασης με ΜΕ και ΜΤ στην πλευρά Χαμηλής Τάσης.....	127
6.3.1	Μετασχηματιστής Γειωμένου Αστέρα – Τριγώνου με το Τύλιγμα Τριγώνου στην Υψηλή Τάση.....	127
6.3.2	Μετασχηματιστής Τριγώνου - Γειωμένου Αστέρα με το Τύλιγμα Αστέρα στην Υψηλή Τάση.....	129
6.3.3	Μετασχηματιστής Γειωμένου Αστέρα – Τριγώνου με το Τύλιγμα Αστέρα στην Χαμηλή Τάση και $Z_{TR} \gg Z_{Line}$ .....	129
6.4	Προστασία Γραμμής Μεταφοράς με Ηλεκτρονόμους Απόστασης με ΜΤ στην Χαμηλή και ΜΕ στην Υψηλή Τάση.....	130
6.4.1	Μετασχηματιστής Γειωμένου Αστέρα – Τριγώνου με το Τύλιγμα Τριγώνου στην Υψηλή Τάση.....	130
6.4.2	Μετασχηματιστής Τριγώνου - Γειωμένου Αστέρα με το Τύλιγμα Αστέρα στην Υψηλή Τάση.....	131
6.5	Προστασία Γραμμής Μεταφοράς με Ηλεκτρονόμους Κατεύθυνσης.....	132
	Παράρτημα Α.....	136
	Παράρτημα Β.....	138
	Βιβλιογραφία.....	229

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 1.1 Ζώνες Προστασίας.....	15
Σχήμα 1.2 Ζώνες Προστασίας και ΜΕ .....	16
Σχήμα 1.3 Κύρια συστατικά ενός ψηφιακού ηλεκτρονόμου .....	18
Σχήμα 2.1 Κυκλώματα ακολουθίας για μονοφασικό ως προς γη σφάλμα. ....	21
Σχήμα 2.2 Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό σφάλμα. ....	22
Σχήμα 2.3 Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό ως προς γη σφάλμα .....	23
Σχήμα 2.4 Κυκλώματα ακολουθίας για τριφασικό σφάλμα. ....	24
Σχήμα 2.5 Κυκλώματα ακολουθίας για τους μετασχηματιστές αστέρα –τριγώνου. ....	25
Σχήμα 3.1: Παρουσίαση εφαρμογής του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης .....	27
Σχήμα 3.2: Ροή ρεύματος και Φορά ανίχνευσης του εξοπλισμού προστασίας.....	28
Σχήμα 3.3: Ανίχνευση χωρητικών ρευμάτων. ....	29
Σχήμα 3.5: Μέτρηση του υπόλοιπου ρεύματος με την χρήση τριών ΜΕ.....	31
Σχήμα 3.6: Μέτρηση υπόλοιπου ρεύματος με την χρήση δακτυλιοειδούς ΜΕ.....	32
Σχήμα 3.7: Μέτρηση υπόλοιπης τάσης με την χρήση τριών ΜΤ .....	32
Σχήμα 3.8: Μέτρηση της υπόλοιπης τάσης με την χρήση βοηθητικών ΜΤ .....	32
Σχήμα 3.9: Δυο τρόποι πόλωσης για την προστασία κατεύθυνσης ως προς γη. ....	33
Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστική λειτουργίας του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης υπερέντασης. ....	35
Σχήμα 3.11: Εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης με μέτρηση της προβολής ρεύματος....	35
Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστική λειτουργίας του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης, ο οποίος μετρά την ενεργό ισχύ μηδενικής ακολουθίας. ....	36
Σχήμα 3.13: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N με το ρεύμα $I_a$ ως μεταβλητή λειτουργίας και την τάση $V_a-V_b$ ως μεταβλητή πόλωσης .....	37
Σχήμα 3.14: Χαρακτηριστική λειτουργίας εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης υπερέντασης .....	38
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα μέτρησης ισχύος .....	39
Σχήμα 3.16: Χωρητικότητα καλωδίου. ....	39
Σχήμα 3.17: Κυκλοφορία των χωρητικών ρευμάτων κατά την διάρκεια ενός μονοφασικού ως προς γη βραχυκυκλώματος .....	40
Σχήμα 3.18: Δίκτυο απομονωμένου ουδετέρου (ανίχνευση σφαλμάτων γης).....	42
Σχήμα 3.19: Δίκτυο γείωσης ουδετέρου ωμικής αντίστασης (ανίχνευση σφαλμάτων γης) .	43
Σχήμα 3.20: Δίκτυο γείωσης ουδετέρου αντιστάθμισης (ανίχνευση σφαλμάτων γης) .....	44
Σχήμα 3.21: Δίκτυο απευθείας γειωμένου ουδετέρου (ανίχνευση σφαλμάτων γης).....	44
Σχήμα 3.22: Προστασία σφαλμάτων γης ενός γειωμένου σε διάφορα σημεία.....	45
δικτύου. ....	45
Σχήμα 3.23: Προστασία σφαλμάτων φάσεων σε ένα δίκτυο πολλαπλών πηγών .....	46
Σχήμα 3.24: Διάγραμμα κλειστού βρόχου .....	47
Σχήμα 3.25: Προστασία παράλληλων συνδεδεμένων γραμμών .....	48
Σχήμα 3.26: Προστασία κλειστού βρόχου με επιλογικότητα βασισμένη σε χρόνο. ....	49
Σχήμα 3.27: Προστασία κλειστού βρόχου με την χρήση λογικής επιλογικότητας.....	49
Σχήμα 3.28: Προστασία έναντι απώλειας διέγερσης με ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης άεργης ισχύος .....	50
Σχήμα 3.29: Ανίχνευση λειτουργίας κινητήρα με ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης ενεργού ισχύος .....	51
Σχήμα 3.30: Παράδειγμα εξοπλισμού προστασίας απόζευξης (decoupling protection equipment).....	52
Σχήμα 3.31: Σφάλμα γωνίας μετρούμενου ρεύματος στους ΜΕ. ....	53
Σχήμα 3.32: Ορισμός της γωνίας $\alpha$ .....	54

Σχήμα 3.33: Προστασία δυο παράλληλα συνδεδεμένων μετασχηματιστών .....	55
Σχήμα 3.34: SEPAM 2000, Ένας ψηφιακός ηλεκτρονόμος πολλαπλών λειτουργιών. ....	56
Σχήμα 4.1 Σύστημα του παραδείγματος 4.1.....	61
Σχήμα 4.2 Κύκλωμα θετικής ακολουθίας του συστήματος του σχήματος 4.1 .....	62
Σχήμα 4.3 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων.....	63
Σχήμα 4.4 Δίκτυο για το παράδειγμα 4.2.....	64
Σχήμα 4.5 Κυκλώματα ακολουθίας του δικτύου του σχήματος 4.4 .....	65
Σχήμα 4.6 Μεταβλητές πόλωσης και λειτουργίας στον ηλεκτρονόμο 1 .....	67
Σχήμα 4.7 Μεταβλητές πόλωσης και λειτουργίας στον ηλεκτρονόμο 2 .....	68
Σχήμα 4.8 Δίκτυο του παραδείγματος 4.3.....	71
Σχήμα 4.9 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.8 .....	72
Σχήμα 4.10 Υπολογισμός τάσης Thevenin .....	73
Σχήμα 4.11 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων του H/N 1 .....	75
Σχήμα 4.12 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων του H/N 2.....	75
Σχήμα 4.13 Δίκτυο του παραδείγματος 4.4.....	79
Σχήμα 4.14 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.13 .....	80
Σχήμα 4.15 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων.....	82
Πίνακας 4.5: Διαθέσιμες μεταβλητές ακολουθίας για σφάλματα ως προς γη .....	83
Σχήμα 4.16 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με κοινό ζυγό αναχώρησης και άφιξης .....	85
Σχήμα 4.17 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.16.....	85
Σχήμα 4.18 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με διαφορετικούς ζυγούς αναχώρησης και άφιξης.....	86
Σχήμα 4.19 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.18.....	87
Σχήμα 4.20 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με διαφορετικούς ζυγούς αναχώρησης και κοινό ζυγό άφιξης.....	88
Σχήμα 4.21 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.20. Ο διακόπτης ισχύος του ζυγού 1 κλειστός .....	88
Σχήμα 4.22 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.20. Ο διακόπτης ισχύος του ζυγού 1 ανοικτός .....	89
Σχήμα 4.23 Τάση αρνητικής ακολουθίας συναρτήσει της θέσης του σφάλματος.....	90
Σχήμα 4.24 Δίκτυο για τον υπολογισμό της σταθεράς $a$ .....	91
Σχήμα 4.25 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.26 .....	92
Σχήμα 4.26 Αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας που βλέπει το στοιχείο αρνητικής ακολουθίας για ορθής και αντίστροφης φοράς σφάλματα.....	93
Σχήμα 4.27 Δίκτυο του παραδείγματος 4.5.....	94
Σχήμα 4.28 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.27 .....	95
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα της διαφοράς των ορισμάτων $\theta$ των μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας συναρτήσει της γωνίας φορτίου $\delta$ . ....	97
Σχήμα 4.30 Σφάλμα σε γραμμή μεταφοράς 239.68 μιλίων. ....	98
Σχήμα 4.31 Τάσεις και ρεύματα για ένα σφάλμα της Β φάσης σε απόσταση 108 μιλίων από την θέση του ηλεκτρονόμου.....	99
Σχήμα 4.32 Δυναμική απόκριση του στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας για το σφάλμα του σχήματος 4.31 .....	99
Σχήμα 4.33 Ρυθμίσεις και υπολογισμοί σύνθετων αντιστάσεων σε ένα στοιχείο κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας.....	100
Σχήμα 4.34 Τυπική διαμόρφωση πυλώνα γραμμής μεταφοράς 400kV .....	101
Σχήμα 4.35 Διφασικό σφάλμα κοντά στον απομακρυσμένο ζυγό.....	102
Σχήμα 4.36 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.35 .....	103
Σχήμα 5.1: Τυπικό σύστημα μεταφοράς .....	107

Σχήμα 5.2 Διαφορές διαμορφώσεις μετασχηματιστών δυο τυλιγμάτων .....	108
Σχήμα 5.3 Μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων .....	110
Σχήμα 5.4 Συνδέσεις ΜΕ σε μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων .....	111
Σχήμα 5.5 Αυτομετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων .....	112
Σχήμα 5.6 Συνδέσεις ΜΕ σε αυτομετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων.....	116
Σχήμα 5.7 Μεταβολή της τάσης αρνητικής ακολουθίας συναρτήσει της θέσης του σφάλματος.....	118
Σχήμα 5.8 Συνδεσμολογία ΜΤ με δυο δευτερεύοντα τυλίγματα.....	118
Σχήμα 5.9 Συνδεσμολογία ΜΤ με βοηθητικούς ΜΤ .....	119
Σχήμα 5.10 Συνδεσμολογία ΜΤ στην χαμηλή και την υψηλή τάση.....	120
Σχήμα 6.1Α και 6.1Β Λειτουργία διφασικού αντισταθμιστικού στοιχείου απόστασης στην κανονική λειτουργία και σε διφασικό σφάλμα εκτός ζώνης.....	123
Σχήμα 6.1Γ και 6.1Δ Λειτουργία διφασικού αντισταθμιστικού στοιχείου απόστασης σε διφασικό σφάλμα κοντά στο σημείο ισορροπίας και σε διφασικό σφάλμα εντός ζώνης ...	124
Σχήμα 6.2 Λειτουργία τριφασικού αντισταθμιστικού στοιχείου απόστασης .....	124
Σχήμα 6.3Α και 6.3Β Λειτουργία στοιχείου απόστασης φάσης σε σφάλμα ορθής φοράς εκτός ζώνης και σε ορθής φοράς σφάλμα κοντά στο σημείο ισορροπίας .....	125
Σχήμα 6.3Γ Λειτουργία στοιχείου απόστασης φάσης σε σφάλμα ορθής φοράς εντός ζώνης .....	126
Σχήμα 6.4 Δίκτυο της παραγράφου 6.3.1 .....	128
Σχήμα 6.5 Δίκτυο της παραγράφου 6.3.2.....	129
Σχήμα 6.6 Δίκτυο της παραγράφου 6.3.3.....	130
Σχήμα 6.7 Δίκτυο της παραγράφου 6.4.1.....	130
Σχήμα 6.8 Δίκτυο της παραγράφου 6.4.2.....	132
Σχήμα 6.9 Μετασχηματιστές μετρήσεων στην πλευρά υψηλής τάσης.....	133
Σχήμα 6.10 Μετασχηματιστές μετρήσεων στην πλευρά χαμηλής τάσης .....	134
Σχήμα 6.11 ΜΕ στην πλευρά υψηλής τάσης και ΜΤ στην πλευρά χαμηλής τάσης .....	134

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 2.1 Κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας για διάφορες συνδεσμολογίες μετασχηματιστών .....	26
Πίνακας 3.1 Κωδικοί ANSI, συμβολισμοί και εφαρμογές .....	30
Πίνακας 1: Είσοδοι του στοιχείου κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης 90° .....	60
Πίνακας 2: Είσοδοι του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας .....	70
Πίνακας 4.3: Διαθέσιμες μεταβλητές ακολουθίας για μη συμμετρικά σφάλματα μεταξύ φάσεων .....	77
Πίνακας 4.4: Είσοδοι του στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας.....	77
Πίνακας 4.6: Είσοδοι σε ένα απλό στοιχείο κατεύθυνσης γης .....	94
Πίνακας 4.7 Σύνθετες αντιστάσεις $\delta Z_1$ και $z_2$ για διαφορετικές συνθήκες σφάλματος.....	105
Πίνακας 6.1 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.3.1 .....	128
Πίνακας 6.2 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.3.2 .....	129
Πίνακας 6.3 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.3.3 .....	130
Πίνακας 6.5 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.4.1 .....	131
Πίνακας 6.6 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.4.2 .....	132
Πίνακας 6.7 Απόκριση των στοιχείων κατεύθυνσης για σφάλματα του δικτύου του σχήματος 6.9.....	133
Πίνακας 6.8 Απόκριση των στοιχείων κατεύθυνσης για σφάλματα του δικτύου του σχήματος 6.10.....	134
Πίνακας 6.9 Απόκριση των στοιχείων κατεύθυνσης για σφάλματα του δικτύου του σχήματος 6.11.....	135

# 1 Εισαγωγή

Κατά την λειτουργία του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εμφανίζονται πολλές φορές βραχυκυκλώματα, που οφείλονται είτε σε βλάβες του ίδιου του συστήματος, είτε σε εξωτερικά τυχαία αίτια ή σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Με τον προσεκτικό σχεδιασμό και την προσεκτική λειτουργία και συντήρηση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η εμφάνιση των βραχυκυκλωμάτων, δεν είναι όμως δυνατόν να εξαλειφθούν τελείως.

Βραχυκύκλωμα ή απλώς σφάλμα ονομάζεται η επαφή οποιουδήποτε υπό τάση τμήματος του συστήματος προς γη, ή προς γειωμένα μεταλλικά μέρη των εγκαταστάσεων ή των συσκευών, όπως επίσης και η επαφή δύο διαφορετικών φάσεων μεταξύ τους. Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να διακριθούν σε μονοφασικά αν γίνονται μεταξύ μιας φάσης και της γης ή πολυφασικά (διφασικά ή τριφασικά) αν σε αυτά εμπλέκονται περισσότερες φάσεις. Η συνηθέστερη κατηγορία βραχυκυκλωμάτων είναι τα μονοφασικά ως προς γη.

Τα βραχυκυκλώματα εκδηλώνονται ως απότομες υπερεντάσεις πολλαπλάσιες των κανονικών ρευμάτων φορτίου και αν επιτραπεί η ροή τους μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στην μόνωση, τήξη των αγωγών, πυρκαγιές και εκρήξεις. Επίσης τα τυλίγματα (γεννητριών, μετασχηματιστών, κ.α.) και οι ζυγοί των υποσταθμών μπορεί να υποστούν μηχανικές καταπονήσεις και βλάβες λόγω των υψηλών μαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται από την ροή των μεγάλων ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Επομένως τα βραχυκυκλώματα πρέπει γρήγορα να απομακρύνονται από το σύστημα. Ένας τυπικός εξοπλισμός προστασίας υψηλής τάσης είναι σχεδιασμένος να εκκαθαρίζει το σφάλμα μέσα σε τρεις κύκλους, ενώ αυτός της χαμηλής τάσης μέσα σε 5 έως 20 κύκλους. [1, 20]

## 1.1 Σκοπός και Ρόλος του Συστήματος Προστασίας

Κάθε στοιχείο του ΣΗΕ στο οποίο έχει εντοπισθεί βλάβη πρέπει να απομονωθεί το ταχύτερο ώστε:

- Να περιορισθεί κατά το δυνατόν η βλάβη του στοιχείου στο οποίο εκδηλώθηκε.
- Να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στο υπόλοιπο σύστημα και ιδιαίτερα να αποφευχθεί η θέση εκτός λειτουργίας και άλλων στοιχείων αυτού.
- Να αποφευχθεί η δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων για τα πρόσωπα (ηλεκτροπληξία) και πράγματα (πυρκαγιά).

Επιπρόσθετα, κάθε υπέρβαση των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας ενός συστήματος (π.χ. της τάσης) ή της ικανότητας φόρτισής του, μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη του.

Έτσι ο ρόλος του συστήματος προστασίας είναι η ανίχνευση και η απομόνωση ενός σφάλματος και ο περιορισμός κατά το δυνατόν των επιπτώσεών του στο υπόλοιπο σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με μέσα προστασίας τα οποία συνίστανται από:

- Μετασχηματιστές Μετρήσεων
- Ηλεκτρονόμους (Relays)
- Διακόπτες Ισχύος (Circuit breakers)

Οι ηλεκτρονόμοι που είναι το κύριο μέσο προστασίας αφού ανιχνεύσουν ένα σφάλμα με την βοήθεια των μετασχηματιστών μετρήσεων, δίνουν εντολή ανοίγματος στους διακόπτες ισχύος. Ένα άλλο μέσο προστασίας είναι οι ασφάλειες οι οποίες ανιχνεύουν και διακόπτουν ταυτόχρονα το σφάλμα. [1.22,23]

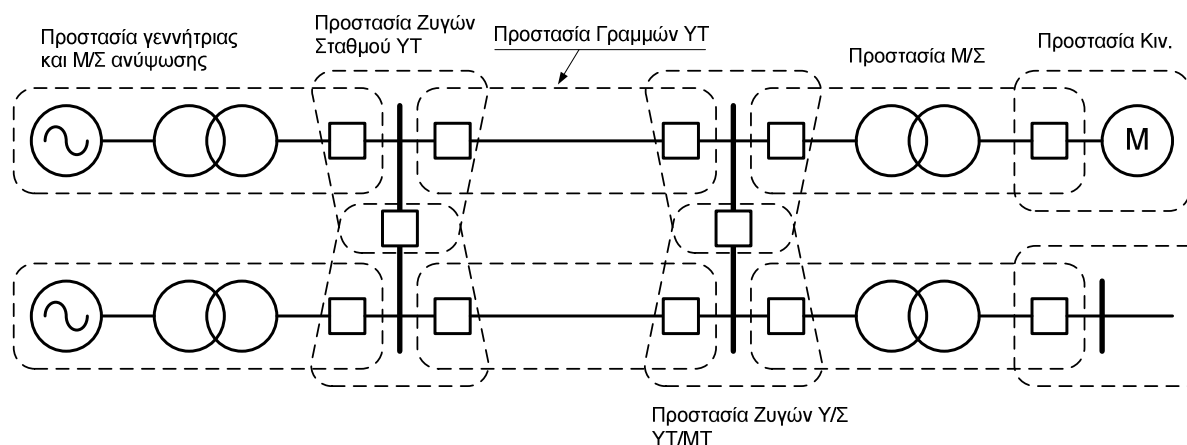
## 1.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας

### 1.2.1 Ζώνες Προστασίας

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας διαιρείται σε ζώνες προστασίας η οποίες ορίζονται από τον εξοπλισμό και τους διαθέσιμους διακόπτες ισχύος. Σε κάθε ΣΗΕ είναι δυνατή η ύπαρξη έξι κατηγοριών ζωνών προστασίας:

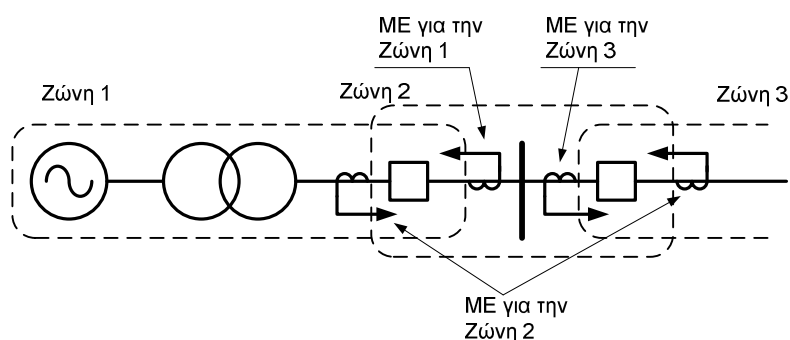
1. Γεννήτριες και μετασχηματιστές γεννητριών
2. Μετασχηματιστές Ισχύος
3. Ζυγοί
4. Γραμμές (Μεταφοράς, υπομεταφοράς, και διανομής)
5. Βοηθητικού εξοπλισμού (κινητήρες, στατικά φορτία)
6. Σταθμοί πυκνωτών ή πηνίων (όταν προστατεύονται ξεχωριστά)

Στο σχήμα 1.1 φαίνονται οι περισσότερες από τις παραπάνω ζώνες. Αν και οι βασικές αρχές προστασίας είναι παρόμοιες, κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες έχει ηλεκτρονόμους προστασίας ειδικά σχεδιασμένους για προστασία πρώτης βαθμίδας (primary protection), η οποία βασίζεται στα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που προστατεύεται. Η προστασία της κάθε ζώνης συνήθως περιλαμβάνει ηλεκτρονόμους που παρέχουν προστασία δεύτερης βαθμίδας (backup protection) για τους ηλεκτρονόμους των γειτονικών ζωνών.



Σχήμα 1.1 Ζώνες Προστασίας

Οι γειτονικές ζώνες επικαλύπτονται για να αποφεύγονται οι απροστάτευτες περιοχές. Χωρίς την επικάλυψη μια μικρή περιοχή μεταξύ των δυο ζωνών δεν ανήκει σε καμία από τις γειτονικές της ζώνες και έτσι δεν προστατεύεται. Δεδομένου ότι η απομόνωση κατά την διάρκεια των σφαλμάτων γίνεται από τους διακόπτες ισχύος, θα πρέπει να εγκαθίστανται στην σύνδεση της κάθε ζώνης με το υπόλοιπό σύστημα. Έτσι οι διακόπτες ισχύος θα πρέπει να εγκαθίστανται σε κάθε επικαλυπτόμενη περιοχή, ορίζοντας επομένως τα όρια των ζωνών προστασίας. Η επικάλυψη των ζωνών επιτυγχάνεται με την κατάλληλη τοποθέτηση των μετασχηματιστών μέτρησης. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.2 ένα σφάλμα μέσα στην επικαλυπτόμενη περιοχή των ζωνών 1 και 2 έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων και των δυο ζωνών, οι οποίοι δίνουν εντολή ανοίγματος στον διακόπτη ισχύος. [1,2,23]



Σχήμα 1.2 Ζώνες Προστασίας και ME

### 1.2.2 Λειτουργία Χαρακτηριστικά του Συστήματος Προστασίας

Οι κυριότεροι παράγοντες που χαρακτηρίζουν ποιοτικά ένα σύστημα προστασίας είναι οι ακόλουθοι:

- **Αξιοπιστία (Reliability):** Αξιόπιστη λειτουργία όταν εμφανιστούν οι συνθήκες σφάλματος ακόμα και αν αυτός παραμείνει ανενεργός για μήνες ή για χρόνια. Η μη ορθή λειτουργία του μπορεί να προκαλέσει ζημίες πολλαπλάσιες του κόστους της.
- **Επιλογικότητα (Selectivity):** Αποφυγή των μη αναγκαίων και εσφαλμένων διακοπών.
- **Διαβάθμιση (Coordination):** Κατάλληλες κλιμακωτές ρυθμίσεις για την επίτευξη της επιλογικότητας.
- **Εναισθησία (Sensitivity):** Η ικανότητα του συστήματος προστασίας να αναγνωρίζει μια διαταραχή που υπερβαίνει τις ονομαστικές συνθήκες διέγερσης και να θέτει το σύστημα αυτό σε λειτουργία.
- **Ταχύτητα Λειτουργίας (Operating time):** Γρήγορη ενεργοποίηση για την ελαχιστοποίηση της διάρκειας του σφάλματος και των ζημιών του εξοπλισμού. Κάθε σκόπιμη χρονική καθυστέρηση θα πρέπει να είναι ακριβής.
- **Διακριτικότητα (Discrimination):** Η ικανότητα ενός ηλεκτρονόμου (H/N) να διακρίνει μεταξύ ενός σφάλματος ή μιας υπερβάσης οφειλόμενη σε μεταβατική κατάσταση.



- **Οικονομία (Economy):** Παροχή της καλύτερης δυνατής προστασίας στο ελάχιστο κόστος.
- **Απλότητα (Simplicity):** Ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου εξοπλισμού προστασίας και της απαιτούμενης καλωδίωσης. [1,22,23]

### 1.2.3 Τύποι Ηλεκτρονόμων

Οι ηλεκτρονόμοι (H/N) μπορούν να διακριθούν με βάση την τεχνολογία κατασκευής τους σε τρεις κατηγορίες:

1. Ηλεκτρομαγνητικοί H/N
2. Στατικοί ή Ηλεκτρονικοί H/N
3. Ψηφιακοί ή Αριθμητικοί H/N

Οι ηλεκτρομαγνητικοί H/N μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε: (α) H/M Ηλεκτρομαγνητικής Έλξης (β) H/M επαγωγής και (γ) H/N με ζυγό ισορροπίας. Οι H/N ηλεκτρομαγνητικής έλξης δέχονται μια είσοδο (τάση ή ρεύμα) και ενεργοποιούνται κλείνοντας την επαφή εξόδου τους, όταν η είσοδος ξεπεράσει το όριο διέγερσης. Οι επαγωγικοί H/N δέχονται μια ή δυο εισόδους και ενεργοποιούνται όταν η ροπή που αναπτύσσεται στο κινητό τους μέρος είναι θετική και ξεπερνά την ροπή συγκράτησης. Οι επαγωγικοί H/N μιας εισόδου χρησιμοποιούνται κυρίως ως H/N υπερέντασης, ενώ αυτοί των δύο εισόδων ως H/N κατεύθυνσης. Οι H/N με ζυγό ισορροπίας δέχονται δυο εισόδους. Όταν και οι δυο εισοδοί είναι ρεύματα, τότε η ροπή του H/N είναι ανάλογη της διαφοράς των ρευμάτων αυτών και χρησιμοποιείται ως διαφορικός H/N. Αν η μια από τις δυο εισόδους είναι τάση και η δεύτερη ρεύμα τότε προκύπτει ο H/N απόστασης. Ο H/N αυτός μετρά το λόγο  $Z_F = \frac{V_F}{I_F}$ , την αντίσταση δηλαδή που βλέπει την στιγμή του σφάλματος. Αν αυτή είναι μικρότερη από τιμή, ο H/N ενεργοποιείται.

Οι βασικές λειτουργίες των H/N που υλοποιούνται με τους ηλεκτρομαγνητικούς H/N μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση στατικών (ηλεκτρονικών) H/N, η αρχή λειτουργίας των οποίων είναι η επεξεργασία αναλογικών σημάτων με ηλεκτρονικά κυκλώματα. Τα πλεονεκτήματα των στατικών H/N έναντι των ηλεκτρομαγνητικών είναι:

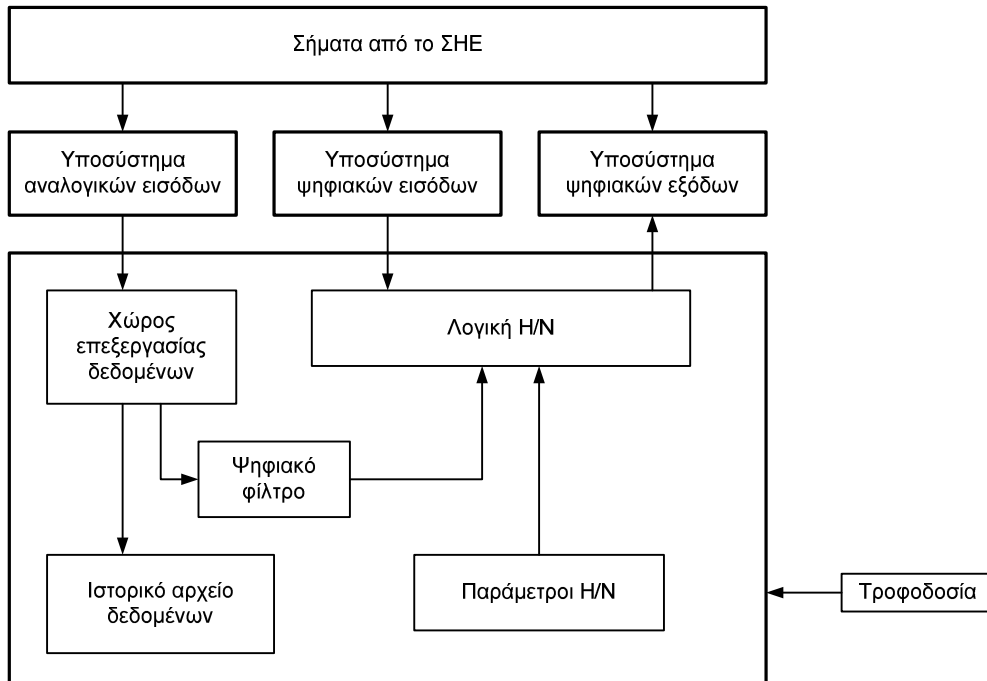
- πολύ μικρότερη κατανάλωση ισχύος
- μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα λειτουργίας
- μεγαλύτερη ευκαμψία στη διαμόρφωση των κυκλωμάτων προστασίας
- δεν απαιτούν συντήρηση

Οι ψηφιακοί ή οι αριθμητικοί H/N αποτελούν την τελευταία εξέλιξη στην τεχνική των H/N, η οποία δίδει πολύ μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά την ακρίβεια, την ευκαμψία διαμόρφωσης τους, την αξιοπιστία λειτουργίας καθώς και τον συνδυασμό με άλλες λειτουργίες ελέγχου. Η αρχή λειτουργίας των H/N αυτών είναι η δειγματοληψία αναλογικών σημάτων και η ψηφιακή τους επεξεργασία (Άλγεβρα Boole). Τα κύρια στοιχεία τους φαίνονται στο σχήμα 1.3

Ανάλογα με την αρχή ανίχνευσης και τρόπο λειτουργίας οι H/N μπορούν να διακριθούν σε:

- Η/Ν Υπερέντασης
- Διαφορικοί Η/Ν
- Η/Ν απόστασης
- Η/Ν κατεύθυνσης

Σε αυτήν την εργασία ασχολούμαστε με την τελευταία κατηγορία, τους Η/Ν κατεύθυνσης. [22,23]



Σχήμα 1.3 Κύρια συστατικά ενός ψηφιακού ηλεκτρονόμου

## 2 Βραχυκυκλώματα

Σφάλμα ονομάζουμε κάθε ανώμαλη κατάσταση η οποία εμφανίζεται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), και οφείλεται είτε σε βλάβες αυτού, είτε σε εξωτερικά τυχαία αίτια ή ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Ο όρος σφάλμα συχνά ταυτίζεται με τον όρο βραχυκύκλωμα, αν και είναι γενικότερος αυτού, αφού καλύπτει και άλλες μη ομαλές καταστάσεις.

### 2.1 Κατηγορίες Σφαλμάτων

Μια πρώτη διάκριση των σφαλμάτων μπορεί να γίνει ανάλογα με την διάρκεια και τον τρόπο σβέσης του τόξου τους. Έτσι στα εναέρια δίκτυα στα οποία η μόνωση τους είναι κυρίως ο αέρας, μπορούν να διακριθούν σε **παροδικά σφάλματα**, στα οποία αρκεί η διακοπή της τάσης για μικρό χρονικό διάστημα για την εξάλειψή τους. Ορισμένα από αυτά τα σφάλματα μπορεί να σβέννυνται μόνα τους χωρίς την διακοπή της τάσης και ονομάζονται **παροδικά αυτοσβενύμενα**. Σε άλλα σφάλματα που οφείλονται κυρίως σε εξωτερικά αίτια απαιτείται, για την απαλοιφή τους, χρονικό διάστημα τουλάχιστον μερικών δευτερολέπτων. Τα σφάλματα αυτά ονομάζονται **ημιμόνιμα**. Και τέλος **μόνιμα** ονομάζονται τα σφάλματα στα οποία είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση για την απαλοιφή τους. Στα υπόγεια δίκτυα, στα οποία η μόνωση τους είναι ένα στερεό μονωτικό, η διάσπασή του κατά την εκδήλωση ενός σφάλματος οδηγεί στην καταστροφή του. Έτσι τα σφάλματα στα υπόγεια δίκτυα είναι κυρίως μόνιμα αφού απαιτείται η ανθρώπινη παρέμβαση για την απαλοιφή τους.

Επίσης τα σφάλματα μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων που εμπλέκονται σε αυτό. Έτσι, τα σφάλματα διακρίνονται σε **τριφασικά** όταν εμπλέκονται και οι τρεις φάσεις, σε **διφασικά ως προς γη** όταν εμπλέκονται δυο φάσεις και η γη, σε **διφασικά** και σε **μονοφασικά ως προς γη**. Υπάρχουν επίσης και τα **εξελισσόμενα** σφάλματα τα οποία ξεκινούν ως μονοφασικά ως προς γη και στην συνέχεια εμπλέκονται περισσότερες φάσεις σε αυτό.

Τα σφάλματα οφείλονται σε εξωτερικά και εσωτερικά αίτια. Τα εξωτερικά είναι τα κυριότερα αίτια για τα εναέρια δίκτυα και συνίστανται κυρίως σε σφάλματα από εξωτερικές υπερτάσεις (κεραυνοί), ξένα αντικείμενα, την ρύπανση των μονωτήρων, και την επιφόρτιση των γραμμών (άνεμος, χιόνι). Το κυριότερο εξωτερικό αίτιο για τα υπόγεια δίκτυα είναι οι εκσκαφές που γίνονται δίπλα ή πάνω από αυτά. Τα εσωτερικά αίτια συνίστανται κυρίως σε σφάλματα λόγω γήρανσης της μόνωσης, κατασκευαστικής αδυναμίας και αστοχίας υλικού. Τα σφάλματα που οφείλονται σε εσωτερικά αίτια είναι κυρίως μόνιμα. [20,22,23]

## 2.2 Υπολογισμός Σφαλμάτων

### 2.2.1 Σύστημα Συμμετρικών Συνιστωσών

Κάθε τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων μπορεί να αναλυθεί σε τρία συστήματα, δυο συμμετρικά τριφασικά, το ευθύ (θετικής ακολουθίας) και το αντίστροφο (αρνητικής ακολουθίας) και ένα ομοπολικό (μηδενικής ακολουθίας). Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών και οι σχέσεις που τον διέπουν είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{bmatrix} E_{\alpha 0} \\ E_{\alpha 1} \\ E_{\alpha 2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{\alpha} \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} E_{\alpha} \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{\alpha 0} \\ E_{\alpha 1} \\ E_{\alpha 2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

όπου  $\alpha = 1 \angle 120^\circ$

$E_{\alpha}, E_b, E_c$  τα φασικά διανύσματα του τριφασικού συστήματος.

$E_{\alpha 0}, E_{\alpha 1}, E_{\alpha 2}$  οι συμμετρικές συνιστώσες της  $E_{\alpha}$

Κυκλώματα ακολουθίας είναι τα κυκλώματα στα οποία ρέουν τα αντίστοιχα ρεύματα ακολουθίας. Έτσι το κύκλωμα στο οποίο ρέουν τα ρεύματα θετικής ακολουθίας ονομάζεται κύκλωμα θετικής ακολουθίας, περιλαμβάνει μόνο τις αντιστάσεις θετικής ακολουθίας και εμφανίζει τάσεις θετικής ακολουθίας. Τα αντίστοιχα ισχύουν για τα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.

Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

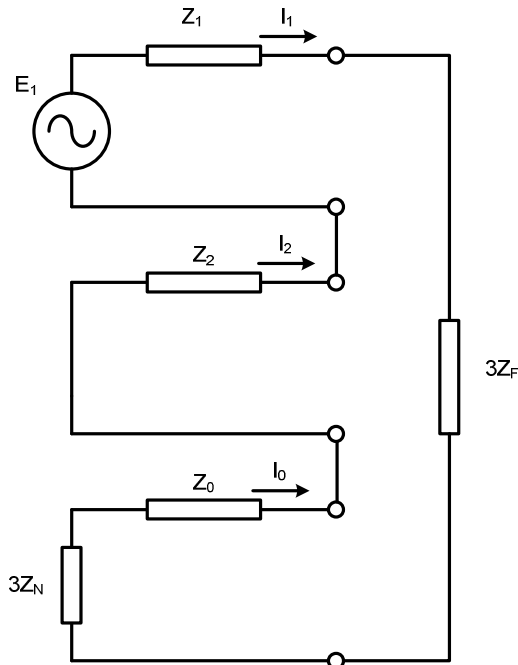
1. Κατασκευή των τριών κυκλωμάτων ακολουθίας και διασύνδεση τους το σημείο του σφάλματος.
2. Υπολογισμός των ρευμάτων και των τάσεων ακολουθίας.
3. Μετασχηματισμός των παραπάνω σε φασικά ρεύματα και τάσεις του τριφασικού συστήματος.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται πως διασυνδέονται τα κυκλώματα ακολουθίας για τα παρακάτω σφάλματα που εξετάζουμε:

- Μονοφασικό ως προς γη βραχυκύκλωμα
- Διφασικό βραχυκύκλωμα
- Διφασικό ως προς γη βραχυκύκλωμα
- Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

## 2.2.2 Μονοφασικό ως προς γη Βραχυκύκλωμα

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1 Κυκλώματα ακολουθίας για μονοφασικό ως προς γη σφάλμα.

Από το παραπάνω σχήμα έχουμε:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F}$$

επίσης

$$I_1 = I_2 = I_0$$

Για τις τάσεις ακολουθίας έχουμε:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

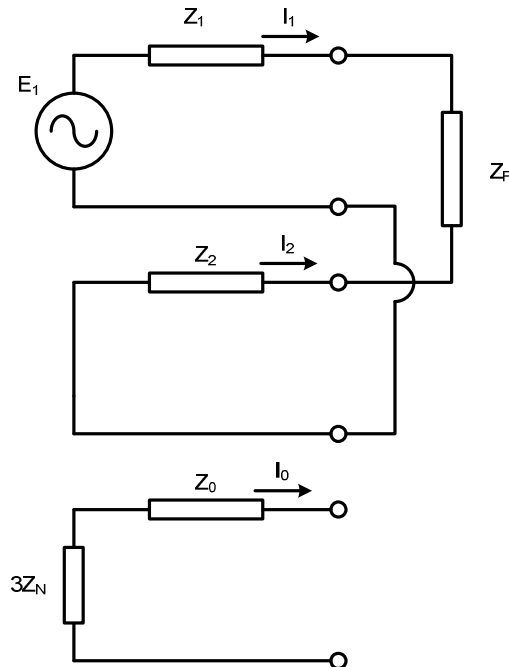
$$V_2 = -I_2 Z_2$$

$$V_0 = -I_0 (Z_0 + 3Z_N)$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό (2.2) βρίσκουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του τριφασικού συστήματος.

### 2.2.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2 Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό σφάλμα.

Από το παραπάνω σχήμα έχουμε:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

επίσης

$$I_1 = -I_2$$

$$I_0 = 0$$

Για τις τάσεις ακολουθίας έχουμε:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

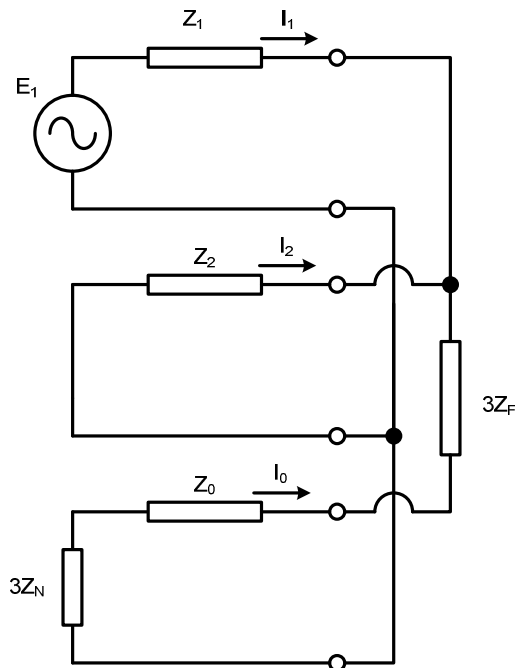
$$V_2 = -I_2 Z_2$$

$$V_0 = 0$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό (2.2) βρίσκουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του τριφασικού συστήματος.

## 2.2.4 Διφασικό ως προς Γη Βραχυκύκλωμα

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3



Σχήμα 2.3 Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό ως προς γη σφάλμα

Από το παραπάνω σχήμα έχουμε:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + [Z_2 // (Z_0 + 3Z_N + 3Z_F)]} = \frac{E_1}{Z_1 + \left[ \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_N + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F} \right]}$$

επίσης

$$I_2 = (-I_1) \frac{Z_0 + 3Z_N + 3Z_F}{Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F}$$

$$I_0 = (-I_1) \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F}$$

Για τις τάσεις ακολουθίας έχουμε:

$$V_1 = E_1 - I_1 \cdot Z_1$$

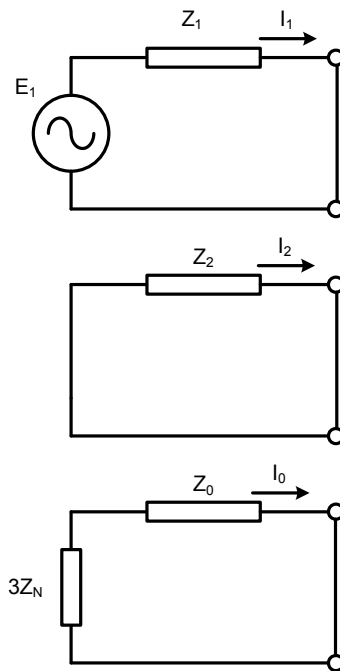
$$V_2 = -I_2 \cdot Z_2$$

$$V_0 = -I_0 \cdot (Z_0 + 3Z_N)$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό (2.2) βρίσκουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του τριφασικού συστήματος.

### 2.2.5 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα με ή χωρίς Γη

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4 Κυκλώματα ακολουθίας για τριφασικό σφάλμα.

Από το παραπάνω σχήμα έχουμε:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1}$$

επίσης

$$I_2 = 0$$

$$I_0 = 0$$

Για τις τάσεις ακολουθίας έχουμε:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

$$V_2 = 0$$

$$V_0 = 0$$

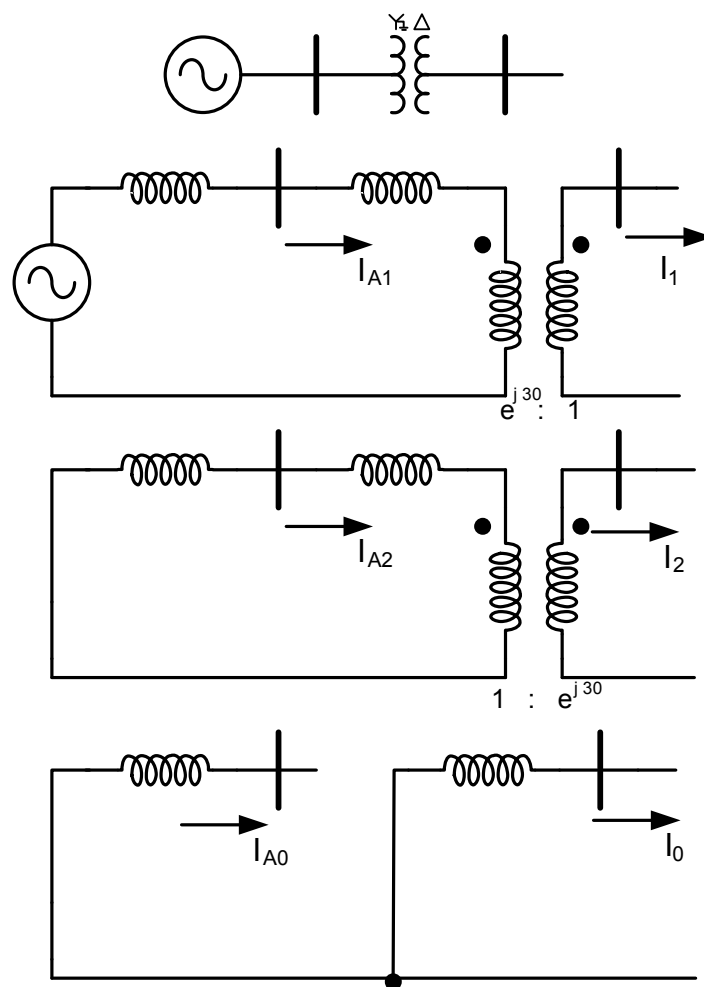
Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό (2.2) βρίσκουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του τριφασικού συστήματος.



### 2.2.6 Κυκλώματα Ακολουθίας στους Μετασχηματιστές Ισχύος.

Στους μετασχηματιστές αστέρα – τριγώνου προκαλείται πάντοτε στροφή γωνίας των διανυσμάτων. Στους μετασχηματιστές αυτούς, δηλαδή, οι μεταβλητές θετικής ακολουθίας στρέφονται κατά  $+30^\circ$  από το τύλιγμα τριγώνου στο τύλιγμα αστέρα, ενώ οι μεταβλητές αρνητικής ακολουθίας κατά  $-30^\circ$  από το τύλιγμα τριγώνου στο τύλιγμα αστέρα. Το αντίθετο συμβαίνει αν πηγαίνουμε από το τύλιγμα αστέρα στο τύλιγμα τριγώνου. Στις μεταβλητές του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, αντίθετα, δεν γίνεται καμία στροφή γωνίας.

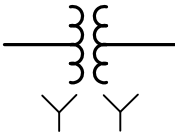
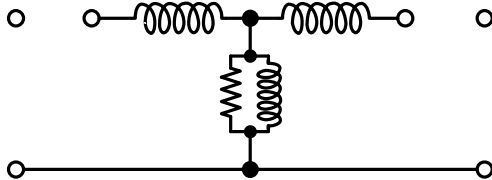
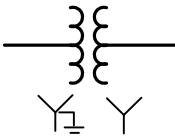
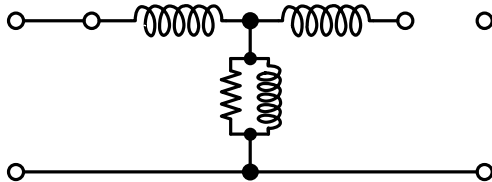
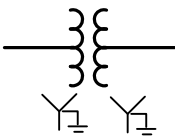
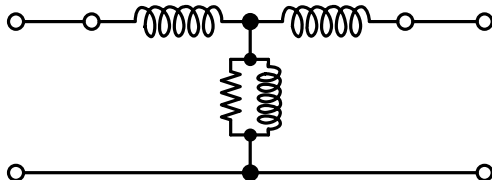
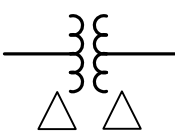
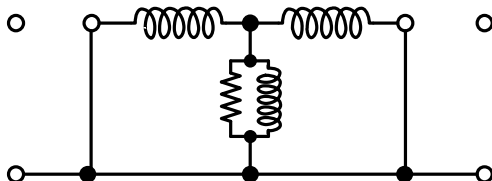
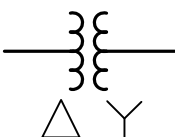
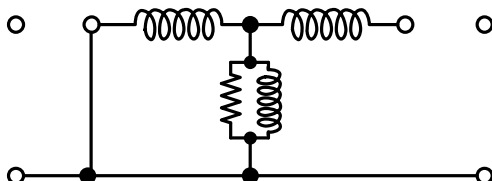
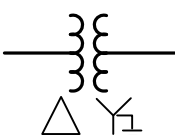
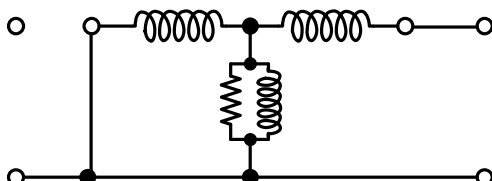
Την παραπάνω επίδραση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή στις μεταβλητές ακολουθίας τη μοντελοποιούμε προσθέτοντας στα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας μετασχηματιστές γωνίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5 Κυκλώματα ακολουθίας για τους μετασχηματιστές αστέρα –τριγώνου.

Τέλος στον Πίνακα 2.1 φαίνονται τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας διάφορων τριφασικών μετασχηματιστών.

Πίνακας 2.1 Κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας για διάφορες συνδεσμολογίες μετασχηματιστών

Μονογραμμικό Διάγραμμα	Κύκλωμα Μηδενικής Ακολουθίας
	
	
	
	
	
	

## 3 Εξοπλισμός Προστασίας Κατεύθυνσης

### 3.1 Εισαγωγή

#### 3.1.1 Ο Ρόλος της Προστασίας Κατεύθυνσης

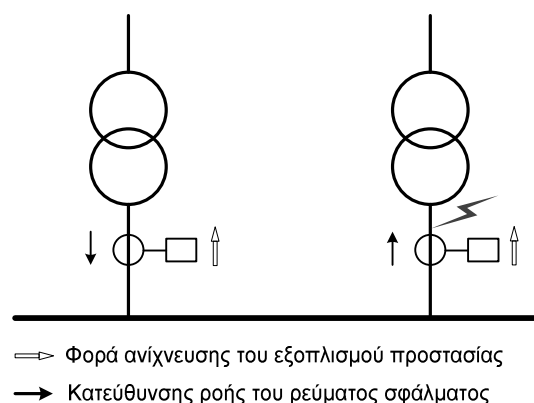
Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης έχει ως βασικό ρόλο την ανίχνευση ενός ηλεκτρικού σφάλματος και την αποσύνδεση του τμήματος του δικτύου στο οποίο εμφανίζεται το σφάλμα αυτό, περιορίζοντας το μέγεθος του αποσυνδεδεμένου τμήματος στο μικρότερο δυνατόν.

Με την προστασία κατεύθυνσης έχουμε την δυνατότητα καλύτερης διάκρισης του τμήματος του δικτύου, στο οποίο έχει συμβεί ένα σφάλμα από ότι με την προστασία υπερέντασης.

Είναι αναγκαίος να χρησιμοποιείται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- σε συστήματα με πολλές πηγές
- σε συστήματα κλειστού βρόχου ή παράλληλων καλωδίων
- σε συστήματα με απομονωμένο ουδέτερο για την ανάδραση των χωρητικών ρευμάτων
- για την ανίχνευση αντικανονικής ροής ενεργής και άεργης ισχύος (γεννήτριες)

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μια περίπτωση στην οποία και οι δυο πηγές ισχύος θα διακοπούν αν χρησιμοποιηθεί απλή προστασία υπερέντασης.



**Σχήμα 3.1: Παρουσίαση εφαρμογής του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης**

Με τον εξοπλισμό προστασίας κατεύθυνσης έχουμε την δυνατότητα για διακοπή των διακλαδώσεων μόνο, στις οποίες έχει συμβεί σφάλμα.

Η κατεύθυνση του σφάλματος ανιχνεύεται με την μέτρηση της κατεύθυνσης ροής του ρεύματος, ή με άλλα λόγια με την μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης.

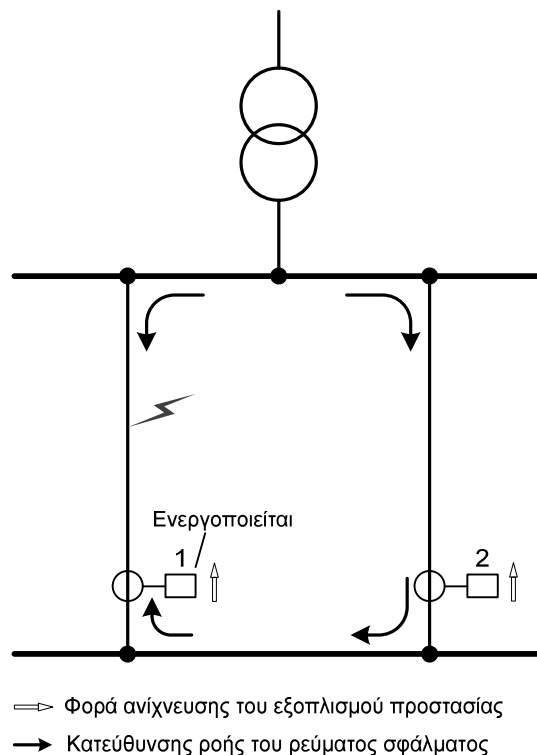
Ο εξοπλισμός προστασίας ισχύος, μετρά είτε την ενεργή, είτε την άεργο ισχύ που ρέει μέσω της σύνδεσης, στην οποία βρίσκονται οι αισθητήρες ρεύματος. Ο εξοπλισμός προστασίας λειτουργεί αν η ισχύς είναι μεγαλύτερη από ένα κατώτερο όριο (κατώφλι) και όταν αυτή ρέει στην κατεύθυνση διακοπής.

Οι εξοπλισμοί προστασίας κατεύθυνσης ισχύος και ρεύματος απαιτούν την μέτρηση ρεύματος και τάσης.

### 3.1.2 Εφαρμογές

Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης είναι χρήσιμος για όλα τα τμήματα του δικτύου στα οποία η κατεύθυνση ροής της ισχύος είναι πιθανόν να αλλάξει, ειδικότερα στην περίπτωση διαφασικού ή μονοφασικού ως προς γη βραχυκυκλώματος.

- Η προστασία κατεύθυνσης φάσης εγκαθίσταται για την προστασία παράλληλων συνδέσεων: ενός κλειστού βρόχου ή ενός τμήματος δικτύου που είναι συνδεδεμένο σε δυο πηγές ισχύος (βλέπε Σχήμα 3.2).
- Η προστασία κατεύθυνσης γης (e/f) είναι ευαίσθητη στην κατεύθυνση ροής του ρεύματος προς ή από την γη. Είναι αναγκαίο να εγκατασταθεί αυτός ο τύπος εξοπλισμού προστασίας όταν το ρεύμα φάσης – γης διαιρείται μεταξύ διαφόρων γειώσεων του συστήματος.



Σχήμα 3.2: Ροή ρεύματος και Φορά ανίχνευσης του εξοπλισμού προστασίας.

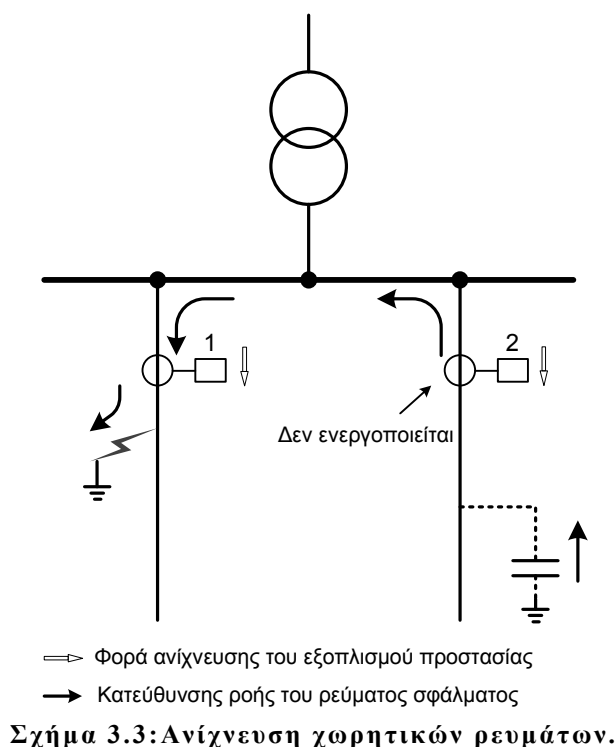
Ωστόσο, αυτή η ροή ρεύματος δεν οφείλεται μόνο στην γείωση του ουδετέρου του δικτύου, αλλά επίσης και στην χωρητικότητα μεταξύ φάσης και γης των γραμμών και των καλωδίων (1 km καλωδίου 20 kV προκαλεί ροή χωρητικού ρεύματος 3 με 4 A περίπου).

Η προστασία κατεύθυνσης υπερέντασης υπόλοιπου ρεύματος (residual), όπως επίσης και η προστασία ενεργού ισχύος μηδενικής ακολουθίας, χρησιμοποιείται για την προστασία γραμμών τροφοδοσίας (feeders), που έχουν χωρητικό ρεύμα της ίδιας τάξης μεγέθους με το ρεύμα σφάλματος ως προς γη.

Σε αυτές τις γραμμές τροφοδοσίας (feeders), όταν εμφανιστεί ένα σφάλμα ως προς γη, σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, η χωρητικότητα φάσης – γης έχει τέτοια τιμή ώστε το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας είναι μεγάλο, και έτσι ανιχνεύεται από την απλή προστασία υπερέντασης σφαλμάτων γης, η οποία προκαλεί διακοπή της γραμμής αυτής, ενώ κανονικά δεν θα έπρεπε, διότι το σφάλμα έχει συμβεί στην άλλη γραμμή. (βλέπε σχήμα 3.3).

Η προστασία κατεύθυνσης είναι επομένως συμπληρωματική της προστασίας υπερέντασης, δίνοντας την δυνατότητα καλύτερης διάκρισης του τμήματος του δικτύου στο οποίο έχει συμβεί σφάλμα, για όλες τις παραπάνω αναφερθείσες περιπτώσεις.

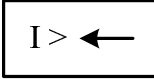
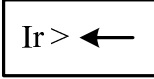
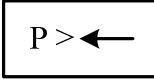
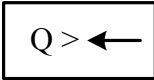
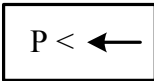
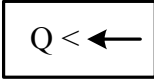
Ο εξοπλισμός προστασίας ενεργού ή άεργου ισχύος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση μιας αντικανονικής ροής ισχύος, πέρα από αυτήν που οφείλεται σε ένα βραχυκύκλωμα π.χ. αν συμβεί βλάβη στην κινητήρια μηχανή, η γεννήτρια θα συνεχίσει να περιστρέφεται ως σύγχρονος κινητήρας, απορροφώντας ισχύ από το δίκτυο.



### 3.1.3 Κωδικοί και Συμβολισμοί Διαφόρων Τύπων Ηλεκτρονόμων

Στον πίνακα 3.1, παρουσιάζονται, για κάθε κώδικα ANSI ένας ή περισσότεροι τύποι εξοπλισμού προστασίας καθώς επίσης τα συνήθη ονόματα και τα πεδία εφαρμογής τους.

Πίνακας 3.1 Κωδικοί ANSI, συμβολισμοί και εφαρμογές

Σύμβολο	Κώδικας ANSI(C37-2)	Συνήθη Ονόματα	Πεδία Εφαρμογής
	67	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υπερέντασης κατεύθυνσης (directional overcurrent)</li> <li>Κατεύθυνσης φάσεων (phase directional)</li> </ul>	Ανίχνευση ενός βραχυκυκλώματος μεταξύ φάσεων μαζί με την κατεύθυνσή του
	67N	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υπερέντασης κατεύθυνσης παραμένουτος ρεύματος (directional residual overcurrent)</li> <li>Κατεύθυνσης σφάλματος ως προς γη (directional earth fault)</li> <li>Ενεργής ισχύος μηδενικής ακολουθίας. (zero sequence active power)</li> </ul>	Ανίχνευση ενός σφάλματος ως προς γη μαζί με την κατεύθυνση του.
	32P	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ενεργής Υπερισχύος (active overpower)</li> <li>Ενεργής Ισχύος αντίθετης φοράς (active reverse power)</li> </ul>	Προστασία των γεννητριών και των σύγχρονων κινητήρων ή για ανίχνευση μιας αντικανονικής ροής ισχύος.
	32Q	<ul style="list-style-type: none"> <li>Άεργης Υπερισχύος (reactive overpower)</li> <li>Άεργης Ισχύος αντίθετης φοράς (reactive reverse power)</li> </ul>	
	32P	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ενεργής Υπο ισχύος</li> </ul>	
	32Q	<ul style="list-style-type: none"> <li>Άεργης Υπο ισχύος</li> </ul>	

### 3.2 Περιγραφή των Ηλεκτρονόμων Κατεύθυνσης

Για να μετρηθεί η τιμή της ισχύος ή για να καθοριστεί αν το σφάλμα είναι ορθής ή αντίστροφης φοράς, στο σημείο όπου μετράται το ρεύμα, θα πρέπει να προσδιοριστεί η διαφορά φάσης μεταξύ του μετρούμενου ρεύματος και μιας μεταβλητής αναφοράς: η πολική τάση για την προστασία κατεύθυνσης φάσης και η υπόλοιπη τάση (residual) για την προστασία κατεύθυνσης σφαλμάτων γης.

Αυτή η μεταβλητή αναφοράς καλείται μεταβλητή πόλωσης.

## 3.2.1 Προστασία Κατεύθυνσης Σφαλμάτων Γης

Μεταβλητές Εισόδου

Στην προστασία κατεύθυνσης γης μετράται το υπόλοιπο ρεύμα (residual), ενώ η υπόλοιπη τάση (residual), συχνά χρησιμοποιείται ως μεταβλητή πόλωσης. Δεν θα πρέπει να συγχέεται με την τάση μηδενικής ακολουθίας. Υπενθυμίζεται ότι για κάθε τριφασικό σύστημα  $F_a, F_b, F_c$ , στην θεωρία συμμετρικών συνιστωσών ορίζεται η μεταβλητή μηδενικής ακολουθίας ως :

$$\vec{F}_0 = \frac{1}{3} (\vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c)$$

ενώ η υπόλοιπη μεταβλητή (residual):

$$F_r = \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c$$

είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την μεταβλητή μηδενικής ακολουθίας  $F_0$

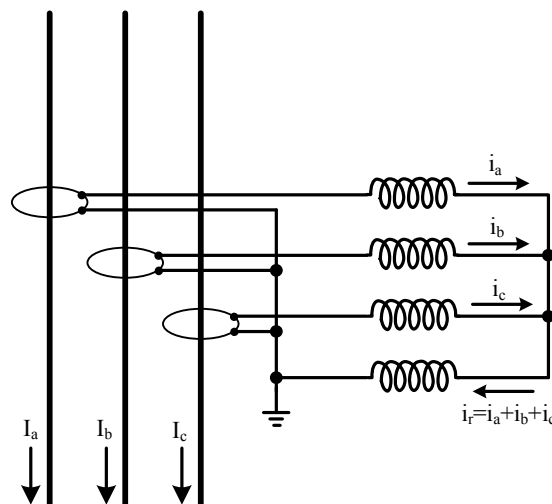
Το υπόλοιπο ρεύμα (residual) μπορούμε να το μετρήσουμε είτε με τρεις μετασχηματιστές έντασης (ME), ένας για κάθε φάση, είτε με ένα δακτυλιοειδές πηνίο (ring CT) τυλιγμένο γύρω από τις τρεις φάσεις.

- Η χρήση των τριών ME (βλ σχήμα 3.5) έχει ορισμένα πλεονεκτήματα:

- ο Οι ME είναι γενικά αξιόπιστοι.
- ο Έχουν την δυνατότητα να μετρούν μεγάλα ρεύματα

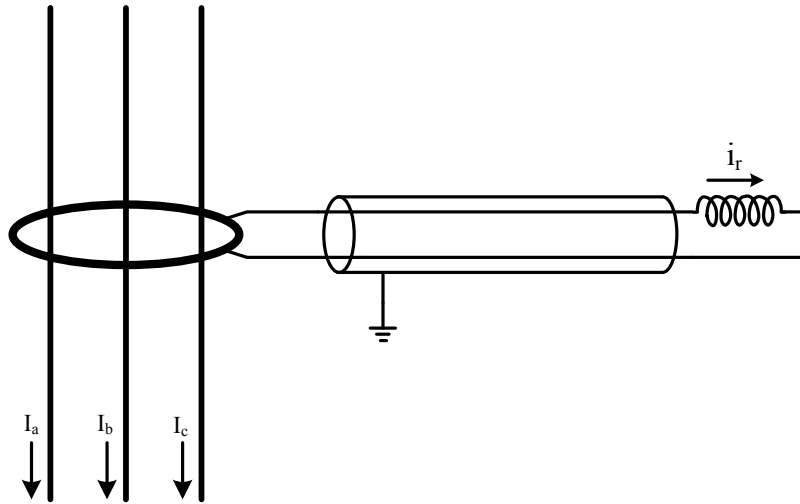
Αλλά επίσης έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα:

- ο Ο κορεσμός των ME τη στιγμή του βραχυκυκλώματος ή τη στιγμή που ο μετασχηματιστής ισχύος συνδέεται στο δίκτυο, παράγει ένα εσφαλμένο υπόλοιπο ρεύμα (residual).
- ο Πρακτικά η ρύθμιση (κατώφλι) του ηλεκτρονόμου δεν μπορεί να τεθεί κάτω από το 10% του ονομαστικού ρεύματος των ME



Σχήμα 3.5: Μέτρηση του υπόλοιπου ρεύματος με την χρήση τριών ME

- Η μέτρηση με την χρήση δακτυλιοειδούς ME (βλ σχήμα 3.6)
  - ο έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ ευαίσθητη
  - ο και το μειονέκτημα του πηνίου, το οποίο έχει μόνωση χαμηλής τάσης και είναι εγκατεστημένο γύρω από γυμνούς αγωγούς.

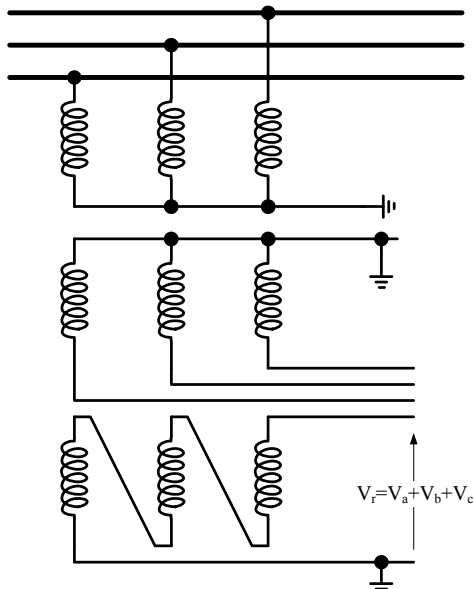


Σχήμα 3.6: Μέτρηση υπόλοιπου ρεύματος με την χρήση δακτυλιοειδούς ΜΕ

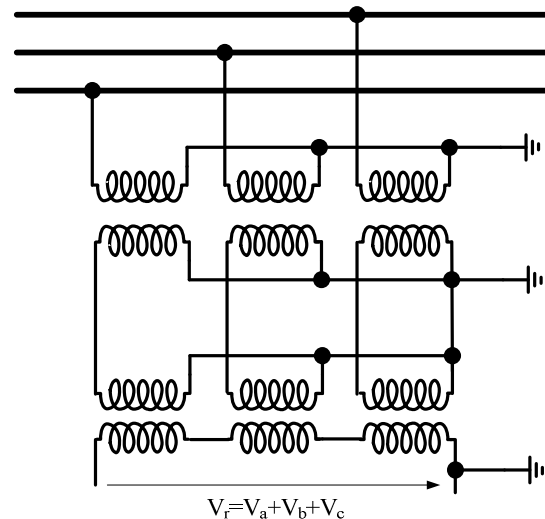
Η υπόλοιπη τάση (residual) μετράται από τρεις μετασχηματιστές τάσης (MT): συχνά χρησιμοποιούνται MT με δυο δευτερεύοντα τυλίγματα (βλ. Σχήμα 3.7) το ένα σε σύνδεση αστέρα, με το οποίο μπορούμε να μετρήσουμε τόσο τις φασικές όσο και τις πολικές τάσεις, και το άλλο σε σύνδεση ανοικτού τριγώνου, με το οποίο μπορούμε να μετρήσουμε την υπόλοιπη τάση (residual).

Αν οι MT έχουν μόνο ένα δευτερεύον τυλίγμα, αυτό είναι συνδεδεμένο σε γειωμένο αστέρα. Σε αυτούς τους MT μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ομάδα βοηθητικών MT για την μέτρηση της υπόλοιπη τάσης (residual) (βλέπε Σχήμα 3.8). Αυτή η περίπτωση συναντάται συχνά όταν αναβαθμίζεται το σύστημα προστασίας των υπαρχουσών εγκαταστάσεων.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ο εξοπλισμός κύριας προστασίας δεν απαιτεί βοηθητικούς MT, ο εξοπλισμός από μόνος του λαμβάνει την τιμή της υπόλοιπης τάσης (residual) από τις τρεις φασικές τάσεις.



Σχήμα 3.7: Μέτρηση υπόλοιπης τάσης με την χρήση τριών MT



Σχήμα 3.8: Μέτρηση της υπόλοιπης τάσης με την χρήση βοηθητικών MT



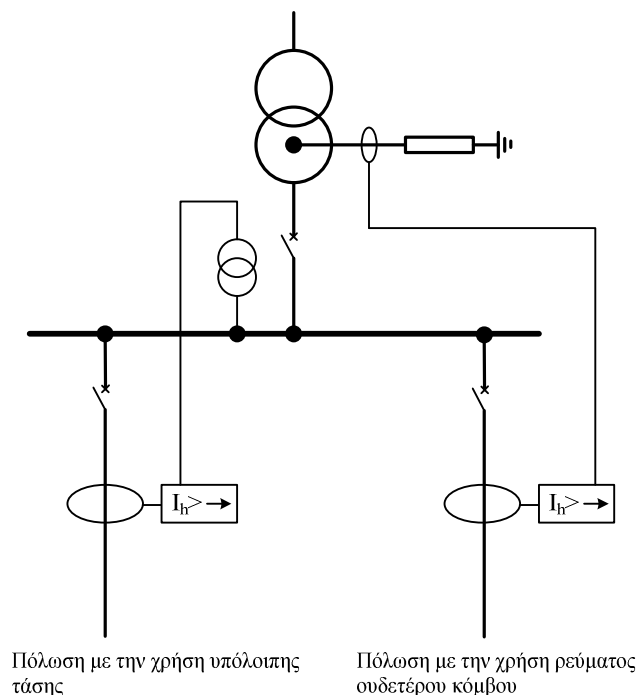
Η μεταβλητή πόλωσης που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε έναν ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης γης είναι η υπόλοιπη τάση (residual), ωστόσο η μεταβλητή πόλωσης μπορεί επίσης να ληφθεί από το ρεύμα ουδετέρου του μετασχηματιστή ισχύος. (βλέπε Σχήμα 3.9)

Θεωρητικά οι δυο τρόποι πόλωσης του εξοπλισμού προστασίας είναι ισοδύναμοι. Αν  $Z_0$  είναι η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας του μετασχηματιστή και  $Z_n$  η σύνθετη αντίσταση της γείωσης ουδετέρου κόμβου, η υπόλοιπη τάση  $V_r$  (residual) και το ρεύμα του ουδετέρου κόμβου,  $I_n$  σχετίζονται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_r = (Z_0 + Z_n)I_n$$

Στην πράξη, μόνο η πόλωση με την χρήση του ρεύματος ουδετέρου χρησιμοποιείται σε δίκτυα, όπου το ρεύμα σφάλματος ως προς γη είναι, και μεγάλο (μερικές εκατοντάδες A) και ταυτόχρονα πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα που οφείλεται στην παράσιτη χωρητικότητα (parasite capacitance) του δικτύου.

Αυτήν την στιγμή η μέτρηση του ρεύματος ουδετέρου είναι πιο ακριβής από ότι αυτή της υπόλοιπης τάσης (residual), ή οποία έχει πολύ μικρή τιμή την στιγμή του βραχυκυκλώματος. Η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο σε υποσταθμούς που βρίσκονται κοντά στην σύνδεση γείωσης του ουδετέρου κόμβου.



Σχήμα 3.9: Δυο τρόποι πόλωσης για την προστασία κατεύθυνσης ως προς γη.

### Χαρακτηριστική γωνία

Για να καθοριστεί η κατεύθυνση του σφάλματος, ο εξοπλισμός προστασίας μετρά την διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της μεταβλητής πόλωσης. Αν η μεταβλητή πόλωσης δεν βρίσκεται πάνω στον άξονα μέγιστης ροπής του ηλεκτρονόμου (χαρακτηριστικός άξονας, βλέπε Σχήμα 3.10), είναι αναγκαίο, να επανατοποθετηθεί σε φάση με αυτόν, ρυθμίζοντας την χαρακτηριστική του γωνία.

Κατά τον σχεδιασμό της διαβάθμισης των ηλεκτρονόμων προστασίας κατεύθυνσης, η χαρακτηριστική γωνία του εξοπλισμού προστασίας πρέπει να καθοριστεί έτσι ώστε κάθε σφάλμα στην κατεύθυνση διακοπής να προκαλεί ένα ρεύμα το οποίο να πέφτει μέσα ζώνη διακοπής, ενώ ένα σφάλμα της αντίθετης κατεύθυνσης να προκαλεί ένα ρεύμα το οποίο να πέφτει έξω από αυτήν την ζώνη.

Η χαρακτηριστική γωνία εξαρτάται από την επιλογή της μεταβλητής πόλωσης και από την μέθοδο γείωσης των ουδετέρων κόμβων του δικτύου ( για τους ηλεκτρονόμους γης).

Επομένως η χαρακτηριστική γωνία επιδέχεται συχνά ρύθμιση. Οι κύριες εφαρμογές και οι αντίστοιχες ρυθμίσεις της εξετάζονται στην παράγραφο 3.3.

Για να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ του ρεύματος και της μεταβλητής πόλωσης είναι βασικό για την τελευταία να έχει αρκετά μεγάλη τιμή, (γενικά 0,5 έως 2% της ονομαστικής τιμής της μεταβλητής αυτής). Αν η μεταβλητή πόλωσης είναι μικρότερη από αυτό το όριο ο εξοπλισμός προστασίας δεν θα ενεργοποιηθεί για οποιοδήποτε ρεύμα και αν μετρηθεί.

### Μέθοδοι ανίχνευσης

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι ανίχνευσης, οι οποίες αντιστοιχούν σε διάφορες απαιτήσεις και μερικές φορές σε διάφορες πρακτικές:

- υπερένταση κατεύθυνσης
- μέτρηση της προβολής του ρεύματος
- μέτρηση της υπόλοιπης ενεργής ισχύος (residual)

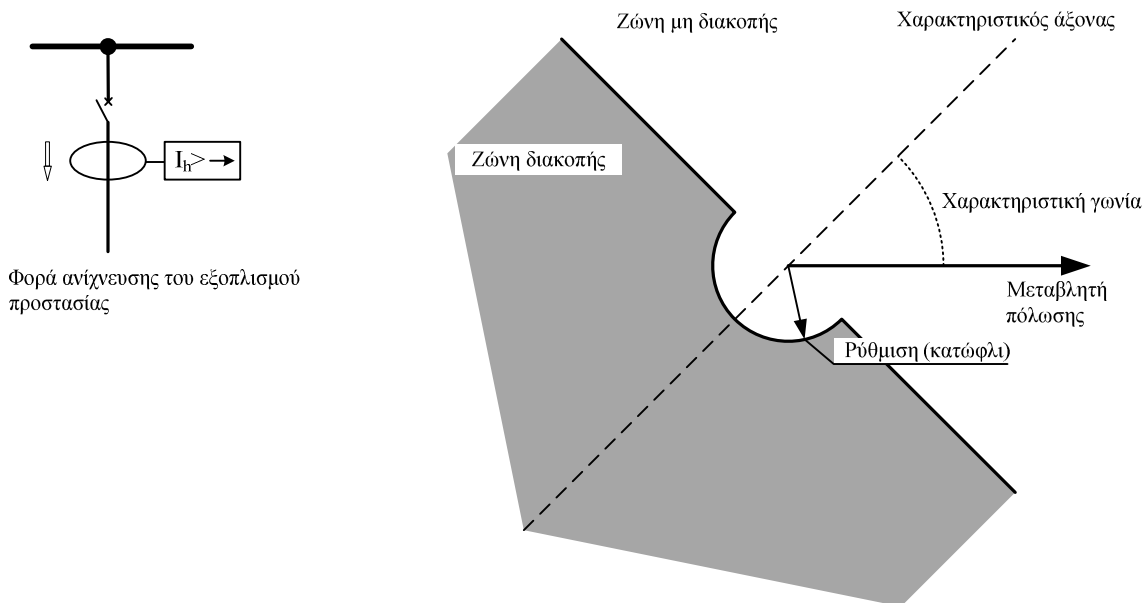
Οι πρώτες δυο χρησιμοποιούνται για ανίχνευση σφαλμάτων μεταξύ των φάσεων και μεταξύ φάσης- γης, ενώ η τελευταία χρησιμοποιείται ειδικά για την ανίχνευση σφαλμάτων ως προς γη σε συστήματα με ειδικού τύπου μέθοδο γείωσης ουδετέρου κόμβου.

### Υπερένταση κατεύθυνσης (βλέπε Σχήμα 3.10)

Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης κατασκευάζεται με τον συνδυασμό του εξοπλισμού προστασίας υπερέντασης με έναν εξοπλισμό ο οποίος μετρά την διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και μεταβλητής πόλωσης.

Ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται όταν πληρούνται οι δυο παρακάτω συνθήκες:

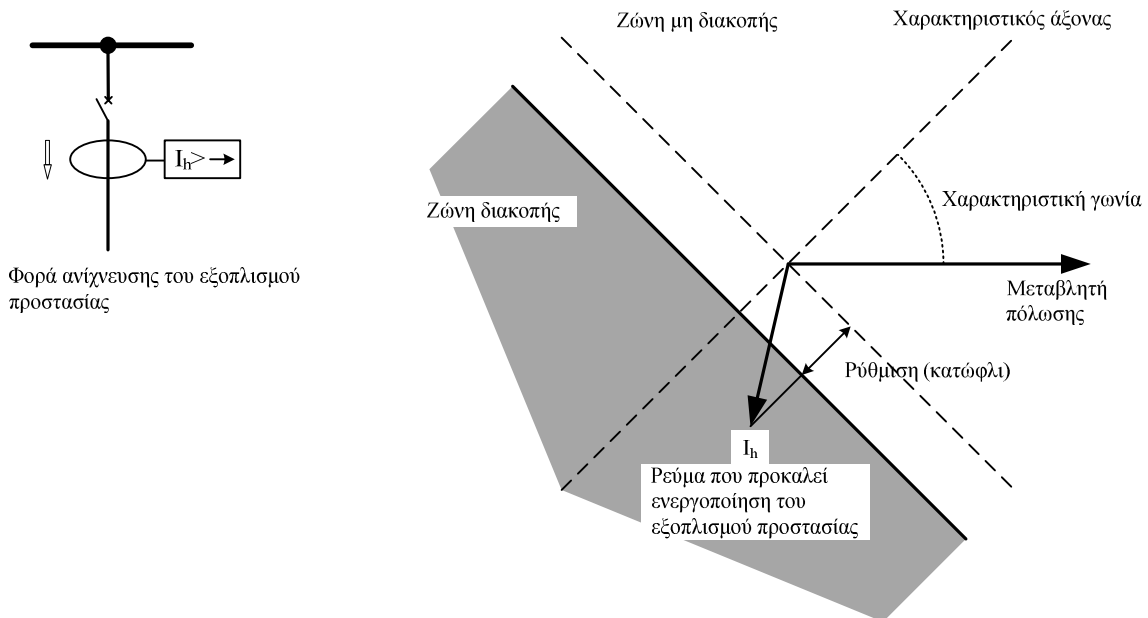
- το ρεύμα είναι μεγαλύτερο από τη ρύθμιση (κατώφλι) του ηλεκτρονόμου
- η διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και του χαρακτηριστικού άξονα, ο οποίος καθορίζεται από την γωνία της μεταβλητής πόλωσης συν την χαρακτηριστική γωνία, να είναι στην ζώνη των  $+90^\circ$  και  $-90^\circ$  από αυτόν.



**Σχήμα 3.10:** Χαρακτηριστική λειτουργίας του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης υπερέντασης.

Μέτρηση της προβολής ρεύματος (βλέπε Σχήμα 3.11)

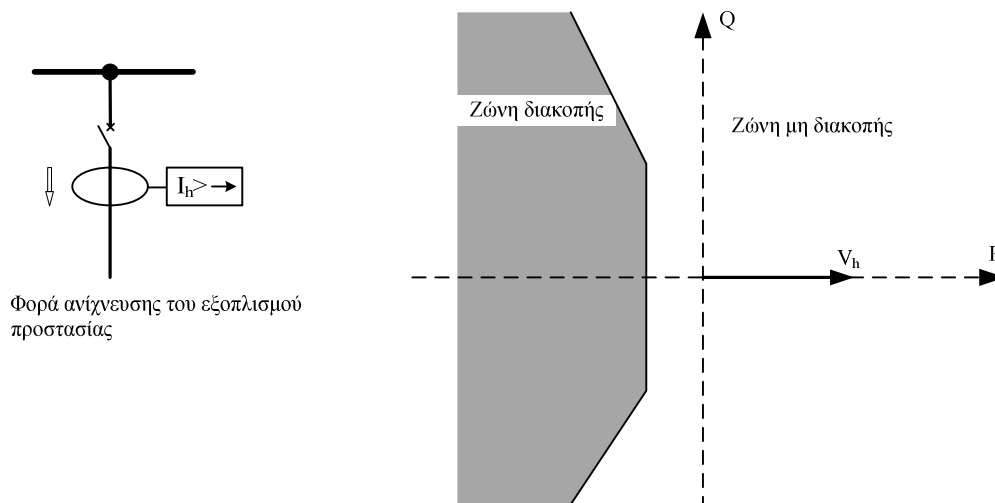
Σε αυτόν τον εξοπλισμό προστασίας γίνεται ο υπολογισμός της προβολής του ρεύματος πάνω στον χαρακτηριστικό άξονα. Το αποτέλεσμα έπειτα συγκρίνεται με την ρύθμιση (κατώφλι) του για να καθοριστεί αν θα δοθεί εντολή διακοπής ή όχι.



**Σχήμα 3.11:** Εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης με μέτρηση της προβολής ρεύματος

Μέτρηση της υπόλοιπης ενεργής ισχύος (residual active power)

Αυτός ο τύπος εξοπλισμού προστασίας, στην πραγματικότητα μετρά την υπόλοιπη ενεργό ισχύ (residual), έτσι το κατώφλι του είναι εκφρασμένο σε watt. Για να αποφεύγονται ανεπιθύμητες διακοπές που προκαλούνται από μη ακριβείς μετρήσεις κατά την διάρκεια ισχυρών χωρητικών υπόλοιπων ρευμάτων (residual) (υψηλή άεργη ισχύς ουδετέρου κόμβου), η ζώνη διακοπής περιορίζεται στα άκρα της, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12



**Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστική λειτουργία του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης, ο οποίος μετρά την ενεργό ισχύ μηδενικής ακολουθίας.**

Για την ανίχνευση σφαλμάτων γης, η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή της μέτρησης προβολής του ρεύματος.

Η χρήση των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης υπερέντασης δεν είναι κατάλληλη για όλες τις μεθόδους γείωσης ουδετέρου. (Στην παράγραφο 3, αναλύεται ότι αυτή η μέθοδος μέτρησης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύστημα με μέθοδο γείωσης ουδετέρου με αντιστάθμιση (compensated neutral point)). Η χρήση του εξοπλισμού προστασίας που μετρά την υπόλοιπη ενεργή ισχύ (residual) είναι περιορισμένη και χρησιμοποιείται μόνο σε διατάξεις γείωσης ουδετέρου με αντιστάθμιση, αντίθετα από ότι αυτή των ηλεκτρονόμων τύπου προβολής ρεύματος.

### 3.2.2 Προστασία Κατεύθυνσης Φάσης

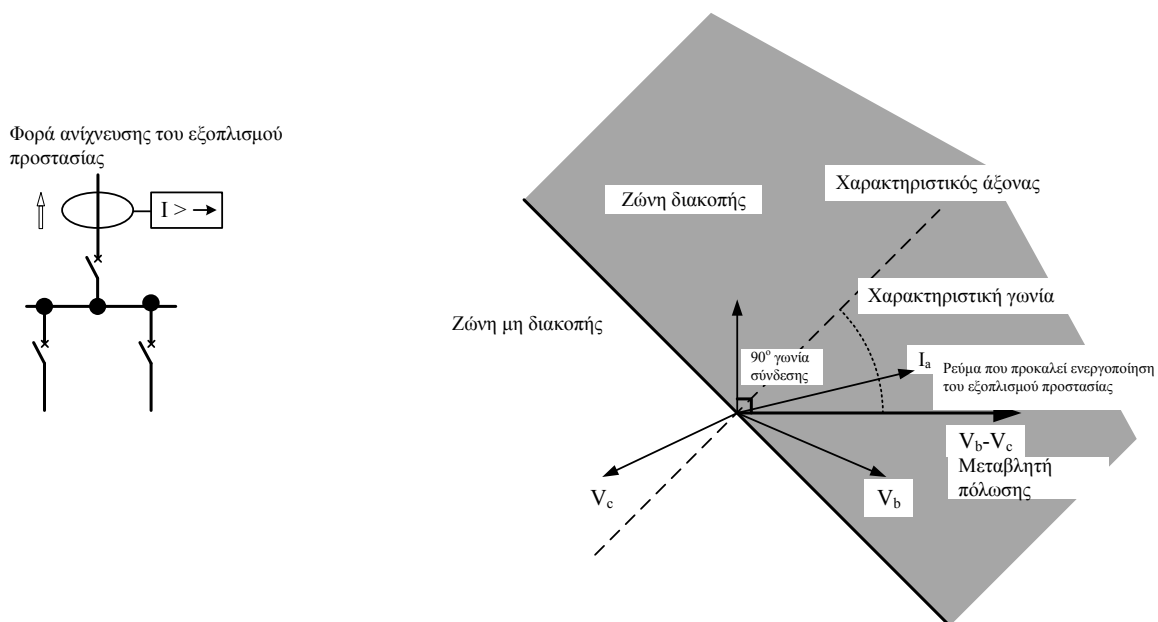
#### Γωνία σύνδεσης, χαρακτηριστική γωνία

Τις πιο πολλές φορές, αυτός ο τύπος εξοπλισμού προστασίας, είναι διφασικός και αποτελείται από δυο ανεξάρτητα μονοφασικά στοιχεία. Μερικές φορές όμως πρέπει να χρησιμοποιείται τριφασικός εξοπλισμός προστασίας. Σε αυτόν για κάθε φάση που επιτηρείται, ο ηλεκτρονόμος μετρά το ρεύμα της, και χρησιμοποιεί ως μεταβλητή πόλωσης, την πολική τάση. Η φασική τάση δεν χρησιμοποιείται εδώ επειδή μεταβάλλεται σημαντικά κατά την διάρκεια του σφάλματος ως προς γη, διότι εξαρτάται από την υπόλοιπη τάση (residual voltage).

- Όταν ο ηλεκτρονόμος μετρά το ρεύμα στην φάση  $a$ , η τάση πόλωσης που χρησιμοποιείται συχνά είναι η  $V_b - V_c$ . Η γωνία σύνδεσης του εξοπλισμού λέμε τότε ότι είναι  $90^\circ$  (βλέπε Σχήμα 3.13).
- Όπως και στον ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης γης, η χαρακτηριστική γωνία του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης φάσης ορίζει την γωνία της ζώνης διακοπής. Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κάθετο στο επίπεδο διακοπής και την μεταβλητή πόλωσης.

- Για να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης του ρεύματος, η μεταβλητή πόλωσης (ή τάση) πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη τιμή. Ειδικότερα, όταν ένα τριφασικό σφάλμα γίνεται πολύ κοντά στον ηλεκτρονόμο, δεν ανιχνεύεται επειδή όλες οι πολικές τάσεις είναι σχεδόν μηδέν.

Για να καθοριστεί η κατεύθυνση αυτού του σφάλματος, ο ηλεκτρονόμος προστασίας πρέπει να χρησιμοποιεί τάσης μνήμης.

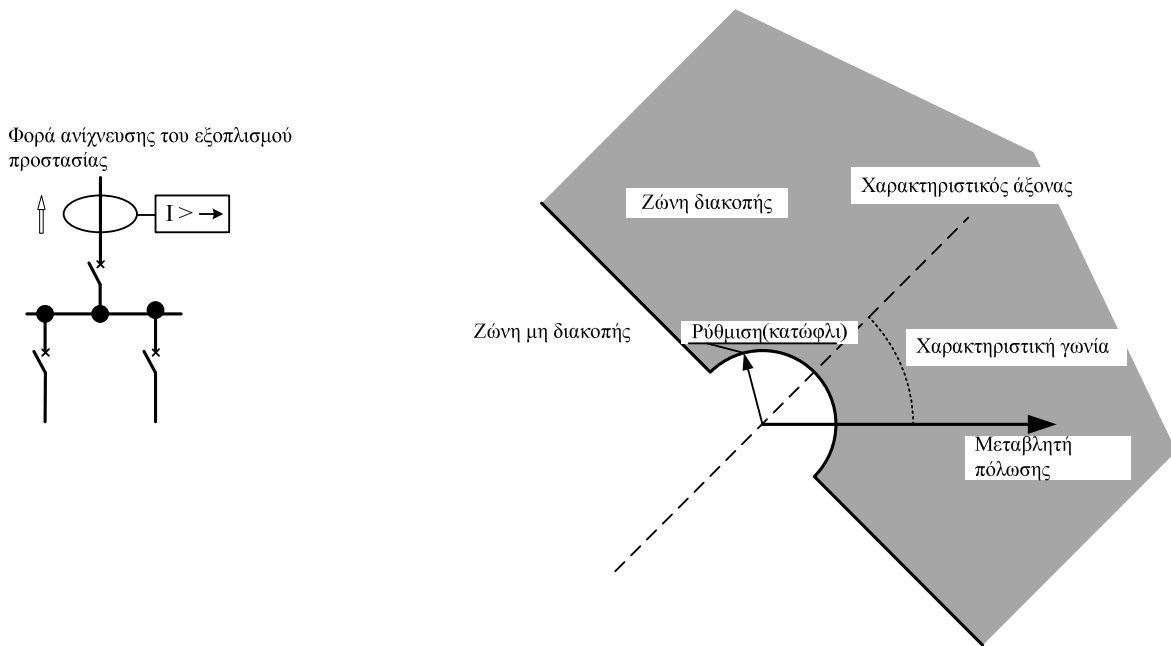


**Σχήμα 3.13:** Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N με το ρεύμα  $I_a$  ως μεταβλητή λειτουργίας και την τάση  $V_a-V_b$  ως μεταβλητή πόλωσης

### Μέθοδοι ανίχνευσής

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης φάσης λειτουργούν, είτε ως στοιχεία υπερέντασης κατεύθυνσης (βλέπε σχήμα 3.14), είτε μετρούν την προβολή του ρεύματος πάνω στον χαρακτηριστικό άξονα. Αν και υπάρχουν στην αγορά, ηλεκτρονόμοι που λειτουργούν και με τις δυο μεθόδους ανίχνευσής, θα πρέπει να προτιμάται ο ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης υπερέντασης. Η διαβάθμιση του εξοπλισμού προστασίας υπερέντασης είναι ευκολότερη επειδή η ρύθμιση (κατώφλι) του ηλεκτρονόμου είναι ανεξάρτητη από την φάση του μετρούμενου ρεύματος.

Η μέτρηση ισχύος δεν χρησιμοποιείται για την ανίχνευση βραχυκυκλωμάτων, διότι η ισχύς δεν είναι καλό κριτήριο ανίχνευσης, επειδή την στιγμή του σφάλματος μεταξύ των φάσεων, αυτή όσο πλησιάζουμε το σημείο του σφάλματος παίρνει την μικρότερη τιμή της.



Σχήμα 3.14: Χαρακτηριστική λειτουργίας εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης υπερέντασης

### 3.2.3 Ηλεκτρονόμοι Ισχύος

Αυτός ο τύπος εξοπλισμού προστασίας συχνά χρησιμοποιεί την μέθοδο διπλού βαττομέτρου (dual wattmeter) για την μέτρηση της ενεργού ισχύος, μια παραλλαγή αυτού, την οποία θα ονομάσουμε μέθοδο διπλού βαρμετρου (dual VARmeter), με την οποία μετρά την άεργο ισχύ.

Υπενθυμίζεται ότι αυτή η μέθοδος καθιστά δυνατή την μέτρηση ισχύος με την χρήση δυο μετρητών ρεύματος και δυο μετρητών πολικής τάσης (βλέπε σχήμα 3.15). Εφαρμόζεται σε ένα τριφασικό δίκτυο, είτε είναι ισορροπημένο, είτε όχι, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ροή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας στο κύκλωμα. Η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για δίκτυα χαμηλής τάσης τεσσάρων αγωγών, σε δίκτυα δηλαδή όπου διανέμεται ο ουδέτερος, τροφοδοτώντας με ισχύ μονοφασικά φορτία, τα οποία συνδέονται μεταξύ φάσης και ουδετέρου.

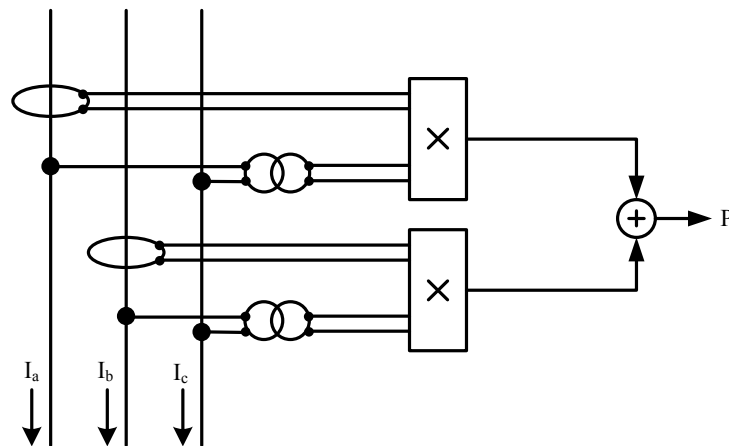
Η ενεργός ισχύς δίνεται από τον τύπο:

$$P = I_a V_{ca} \cos(I_a, V_{ca}) + I_b V_{cb} \cos(I_b, V_{cb})$$

Όμοια, η άεργος ισχύς δίνεται από:

$$Q = I_a V_{ca} \sin(I_a, V_{ca}) + I_b V_{cb} \sin(I_b, V_{cb})$$

Η μετρούμενη ισχύς είναι επομένως μια βαθμωτή μεταβλητή, της οποίας η κατεύθυνση ροής προσδιορίζεται από το πρόσημό της. Επομένως ο εξοπλισμός προστασίας ισχύος είναι εκ φύσεως κατεύθυνσης. Μερικοί ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούν τρεις μονοφασικούς μετρητές για τον καθορισμό της ισχύος, οι οποίοι είναι χρήσιμοι σε δίκτυα τεσσάρων αγωγών. Έχουν ωστόσο το μειονέκτημα ότι απαιτούν την εγκατάσταση τριών μετασχηματιστών τάσης και τριών μετασχηματιστών έντασης.



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα μέτρησης ισχύος

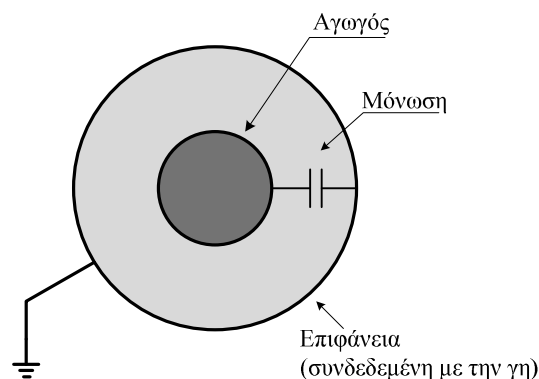
### 3.3 Εφαρμογές του Εξοπλισμού Προστασίας Κατεύθυνσης

#### 3.3.1 Προστασία Ακτινικών Δικτύων

##### Γενικά

##### α. Χωρητικό ρεύμα

Κάθε (ενεργό) τμήμα καλώδιο ή γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται υπό τάση, σχηματίζει ένα πυκνωτή ως προς γη (βλέπε σχήμα 3.16). Αυτό ισχύει για τα καλώδια, των οποίων η χωρητικότητα ανά χιλιόμετρο είναι συνήθως της τάξης των μερικών  $\mu\text{F}$ . Ισχύει επίσης και για τις γραμμές μεταφοράς, όμως με μια τιμή χωρητικότητας περίπου 100 φορές μικρότερη.

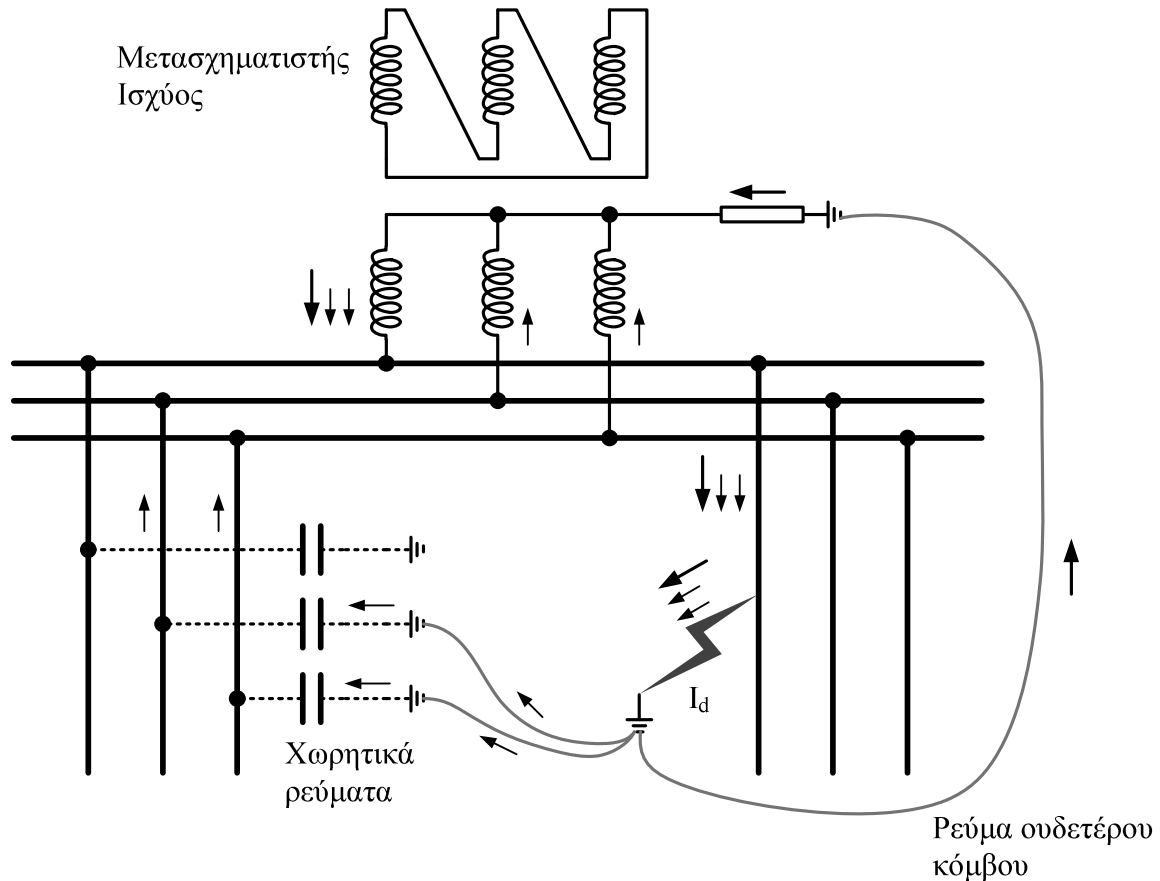


Σχήμα 3.16: Χωρητικότητα καλωδίου.

Η χωρητικότητα των καλωδίων είναι τέτοια ώστε αν τροφοδοτήσουμε με ισχύ ένα καλώδιο 50 km κάτω από συνθήκες μη φόρτισης στα 20 kV, είναι ισοδύναμη με την σύνδεση 3 MVAR πυκνωτών μεταξύ του δικτύου και γης.

Αν το καλώδιο τροφοδοτείται με μια ισορροπημένη τριφασική πηγή τάσης, το άθροισμα των χωρητικών ρευμάτων των τριών φάσεων είναι σχεδόν μηδέν. Την στιγμή που

συμβεί ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα στο δίκτυο, μια από τις φασικές τάσεις είναι χαμηλότερη από τις άλλες, οπότε τα χωρητικά ρεύματα δεν είναι πλέον ισορροπημένα και ένα χωρητικό υπόλοιπο ρεύμα (residual) ρέει στο δίκτυο. Τα ρεύματα αυτά παρουσιάζονται διαγραμματικά στο σχήμα 3.17.



**Σχήμα 3.17:**Κυκλοφορία των χωρητικών ρευμάτων κατά την διάρκεια ενός μονοφασικού ως προς γη βραχυκυκλώματος

Κατά την εγκατάσταση του εξοπλισμού προστασίας, είναι αναγκαίο να υπολογιστεί για μια δεδομένη γραμμή (feeder), η μέγιστη τιμή του χωρητικού υπόλοιπου ρεύματος (residual). Αυτό είναι το ρεύμα που θα μετρηθεί από έναν ΜΕ που είναι τοποθετημένος σε αυτήν την γραμμή (feeder), όταν η μια της φάση, είναι βραχυκυκλωμένη ως προς γη ανάντη αυτού, ενώ οι δύο άλλες φάσεις έχουν την ονομαστική πολική τάση του δικτύου.

Γενικά αυτό ονομάζεται χωρητικό ρεύμα γραμμής (feeder). Η τιμή του ρεύματος αυτού δίνεται από τον τύπο:

$$I_c = 3C\omega V$$

όπου:

- $C$  η χωρητικότητα ως προς γη της κάθε φάσης
- $V$  η φασική τάση
- $\omega$  η γωνιακή συχνότητα του δικτύου



### β. Μέθοδοι γείωσης ουδετέρου κόμβου

Η επιλογή του τρόπου με τον οποίον θα γίνει η σύνδεση μεταξύ ουδετέρου και γης είναι ένα σημαντικό στάδιο στην σχεδίαση του ηλεκτρικού δικτύου. Είναι πάντα το αποτέλεσμα συμβιβασμού διαφόρων παραγόντων.

Ένας παράγοντας που λαμβάνεται συχνά υπόψη είναι η επιθυμία να μειωθεί το ρεύμα το σφάλματος προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια των ανθρώπων (περιορίζοντας την τάση στα σημεία που συμβαίνει το ως προς γη σφάλμα) , και η ασφάλεια του εξοπλισμού (περιορίζοντας την ενέργεια που απελευθερώνεται μέσω του ηλεκτρικού τόξου του βραχυκυκλώματος). Ο περιορισμός του ρεύματος σφάλματος, καθιστά πιο δύσκολη την ανίχνευσή του, οπότε εδώ είναι απαραίτητη η χρήση ενός συστήματος προστασίας κατεύθυνσης γης. Αν το ρεύμα του σφάλματος είναι αρκετά μικρό, δεν είναι αναγκαίο πλέον η ακαριαία διακοπή της παροχής ισχύος. Έτσι έχουμε μια σημαντική βελτίωση στην συνέχεια της τροφοδότησης.

Κατά την διάρκεια ενός ως προς γη βραχυκυκλώματος, στο ρεύμα που ρέει μέσω της σύνθετης αντίστασης γείωσης του ουδετέρου κόμβου προστίθεται το χωρητικό ρεύμα, με αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Συνεπώς, στα δίκτυα που έχουν μεγάλα χωρητικά ρεύματα, ο μόνος τρόπος να περιορίσουμε τα ρεύματα σφάλματος είναι να επιλέξουμε μια επαγωγική σύνθετη αντίσταση γείωσης, η οποία να έχει τέτοια τιμή ώστε το ρεύμα της να αντισταθμίζει τα χωρητικά ρεύματα. Όταν αυτή η σύνθετη αντίσταση ουδέτερου κόμβου είναι ρυθμιζόμενη για να διατηρεί την ισορροπία αυτή ( $3LC\omega^2 = 1$ ), ονομάζεται πηνίο Petersen. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα σφάλματος είναι θεωρητικά μηδέν.

### Προστασία σφαλμάτων γης

Η προστασία κατεύθυνσης γης χρησιμοποιείται σε ακτινικά δίκτυα όταν:

- το χωρητικό ρεύμα της γραμμής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ρύθμιση (κατώφλι) ρεύματος του εξοπλισμού προστασίας (η οποία πρέπει να τίθεται αρκετά χαμηλή προκειμένου να ανιχνεύονται σφάλματα ωμικού χαρακτήρα.).
- ο ουδέτερος είναι γειωμένος σε διάφορα σημεία.

#### α. Δίκτυα με γραμμές (feeders) μεγάλου μήκους.

Όταν η γραμμή έχει μεγάλο χωρητικό ρεύμα – κατά κανόνα μεγαλύτερο από το 10% του ρεύματος που ρέει από μέσω της σύνθετης αντίστασης γείωσης ουδετέρου – ο απλός ηλεκτρονόμος υπερέντασης υπόλοιπου ρεύματος (residual) δεν είναι κατάλληλος να προσφέρει προστασία με την απαιτούμενη ευαισθησία και επιλογικότητα.

Αν η ρύθμιση του (κατώφλι) τεθεί σε μια τιμή κάτω από το χωρητικό ρεύμα της προστατευόμενης γραμμής μεταφοράς, θα προκληθούν εσφαλμένες διακοπές στο δίκτυο όταν συμβεί ένα ως προς γη σφάλμα σε αυτό.

Για αυτήν την περίπτωση, ένα κατάλληλο σύστημα προστασίας για την γραμμή θα αποτελείται από έναν ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης γης του οποίου η ρύθμιση (κατώφλι) μπορεί να τεθεί κάτω από το χωρητικό ρεύμα.

Η χαρακτηριστική γωνία του εξοπλισμού προστασίας τίθεται σύμφωνα με την μέθοδο γείωσης του ουδετέρου της εγκατάστασης:

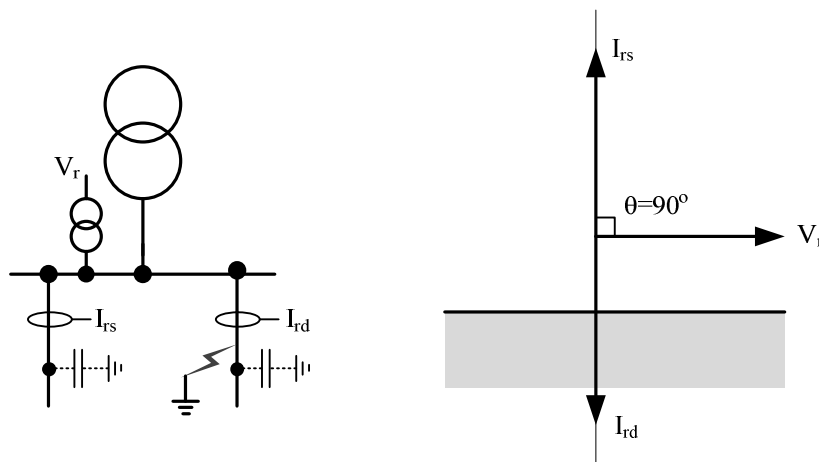
## 1. Δίκτυο απομονωμένου ουδετέρου (Isolated neutral network)

## Λειτουργία

- Η γενική προστασία του δικτύου επιτελείται από την συνεχή παρακολούθηση του επίπεδου μόνωσης ή από τον εξοπλισμό προστασίας υπόλοιπης υπερτάσης (residual) (μετατόπιση του ουδετέρου κόμβου).
- Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης γης ανιχνεύει την γραμμή που έχει το σφάλμα.
- Η χαρακτηριστική γωνία επιλέγεται,  $\theta = 90^\circ$  (βλέπε Σχήμα 3.18)

## Παρατηρήσεις

Λειτουργεί μόνο όταν το χωρητικό ρεύμα είναι αρκετά μεγάλο. Στην πράξη η ελάχιστη τιμή του είναι 1A



Σχήμα 3.18: Δίκτυο απομονωμένου ουδετέρου (ανίχνευση σφαλμάτων γης)

## 2. Δίκτυο γείωσης ουδετέρου ωμικής αντίστασης (Resistance earthed neutral network)(βλέπε Σχήμα 3.19).

Στην γραμμή που έχει γίνει το σφάλμα, το υπόλοιπο ρεύμα (residual), που είναι ωμικού χαρακτήρα, προστίθεται στο χωρητικό ρεύμα των υγιών γραμμών μεταφοράς. Αν η ωμική αντίσταση του ουδετέρου κόμβου έχει τέτοια τιμή έτσι ώστε το ρεύμα ωμικού χαρακτήρα να είναι δυο φορές μεγαλύτερο από το χωρητικό ρεύμα της εγκατάστασης δεν είναι απαραίτητη η χρήση προστασίας κατεύθυνσης.

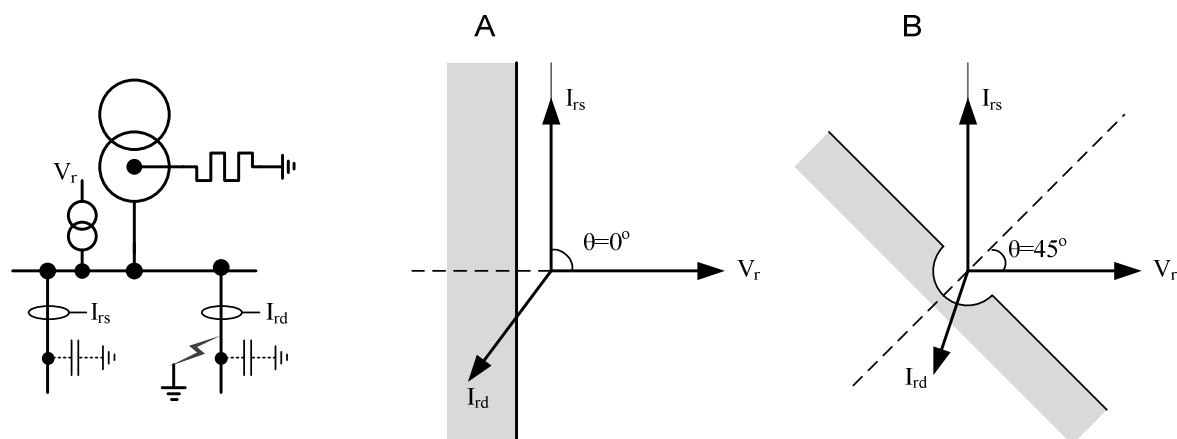
Η παρακάτω χαρακτηριστική γωνία επιλέγεται:

- A.  $\theta = 0^\circ$ , για τους ηλεκτρονόμους τύπου προβολής ρεύματος. (projection type) (Με αυτήν την ρύθμιση, ο ηλεκτρονόμος ανιχνεύει το ωμικό υπόλοιπο ρεύμα (residual), αλλά όχι το χωρητικό ρεύμα.
- B.  $\theta = 45^\circ$ , για τους ηλεκτρονόμους υπερέντασης κατεύθυνσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την χαρακτηριστική γωνία των  $45^\circ$ , το υπόλοιπο ρεύμα (residual) (κυρίως χωρητικό) των υγιών γραμμών είναι καθαρά μέσα στην ζώνη μη διακοπής του ηλεκτρονόμου, και επομένως είναι κατάλληλες όλες οι μέθοδοι προστασίας.

Με την χαρακτηριστική γωνία των  $0^\circ$ , το υπόλοιπο ρεύμα (residual) (κυρίως χωρητικό) της υγιούς γραμμή είναι πάνω στο σύνορο της ζώνης διακοπής, επομένως είναι απαραίτητο, να γίνει η χρήση ηλεκτρονόμου τύπου προβολής ρεύματος (projection type) σ'

αυτήν την περίπτωση. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι ο ηλεκτρονόμος είναι εξολοκλήρου αναισθητός στο χωρητικό ρεύμα.



Σχήμα 3.19: Δίκτυο γείωσης ουδέτερου ωμικής αντίστασης (ανίχνευση σφαλμάτων γης)

### 3. Δίκτυο γείωσης ουδέτερου με αντιστάθμιση (Compensated neutral network)

#### Λειτουργία

Το ρεύμα στην γραμμή που έχει σφάλμα, προκύπτει από την επαλληλία:

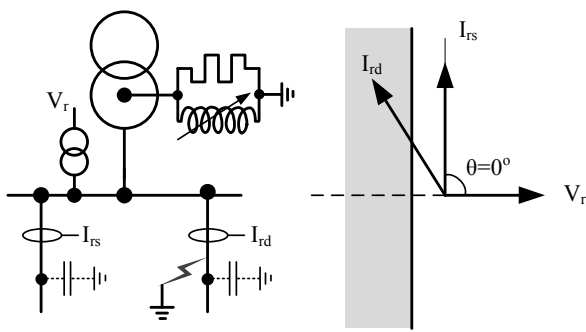
- των χωρητικών ρευμάτων των υγιών γραμμών τροφοδοσίας.
- του ρεύματος του πηνίου που αντισταθμίζει το συνολικό χωρητικό ρεύμα του δικτύου.
- του ρεύματος της ωμικής αντίστασης του ουδέτερου κόμβου, το οποίο είναι γενικά κάτω από το 10% του ρεύματος του πηνίου (υπάρχουν δίκτυα στα οποία δεν εγκαθίσταται η ωμική αντίσταση στον ουδέτερο κόμβο, όμως αυτή η περίπτωση δεν εξετάζεται εδώ).

Η χαρακτηριστική γωνία επιλέγεται ως  $\theta = 0^\circ$

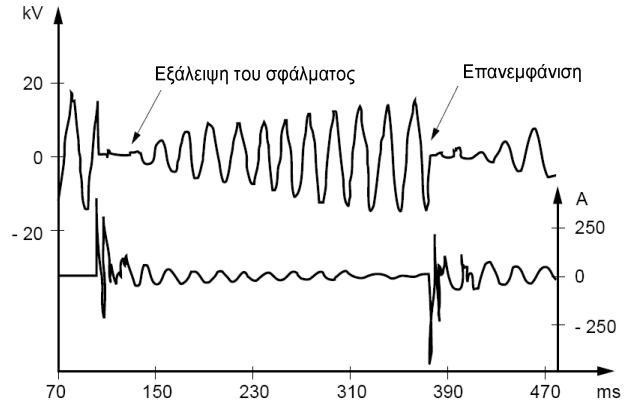
#### Παρατηρήσεις

Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός προστασίας τύπου προβολής ρεύματος, διότι με την χρήση του εξοπλισμού προστασίας υπέρεντασης κατεύθυνσης υπάρχει κίνδυνος να προκληθούν εσφαλμένες διακοπές.

Με αυτόν τον τύπο δικτύου γείωσης, τα σφάλματα μόνωσης είναι επαναλαμβανόμενα στην φύση τους, δηλαδή το ηλεκτρικό τόξο του βραχυκυκλώματος θα σβήσει έπειτα από μερικά msec και θα επανεμφανιστεί μερικές περιόδους μετά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20β. Ο εξοπλισμός προστασίας πρέπει ειδικά να σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί και για αυτόν τον τύπου σφάλματος.



α Μόνιμο σφάλμα



β. Επαναλαμβανόμενο σφάλμα

(τάσης της βραχυκυκλωμένης φάσης και παραμένον ρεύμα.)

Σχήμα 3.20: Δίκτυο γείωσης ουδέτερου αντιστάθμισης (ανίχνευση σφαλμάτων γης)

#### 4. Δίκτυα απευθείας γειωμένου ουδέτερου (βλέπε Σχήμα 3.21)

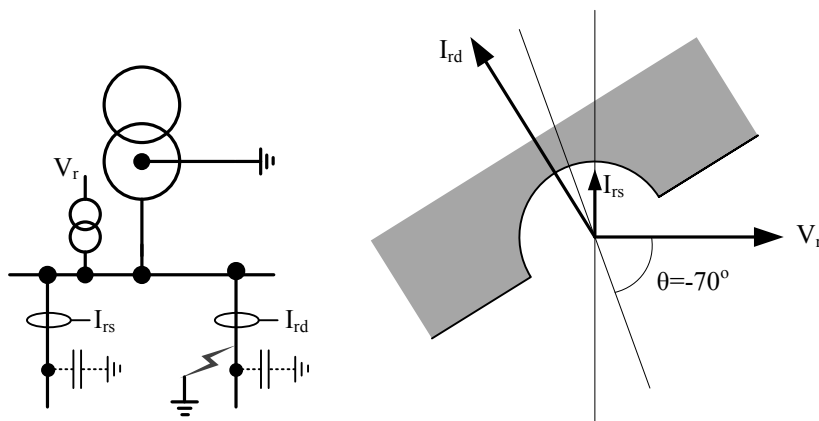
##### Λειτουργία

Το ρεύμα ουδέτερου είναι κυρίως επαγωγικό. Είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το χωρητικό ρεύμα του δικτύου.

Η χαρακτηριστική γωνία επιλέγεται να είναι  $\theta = -45^\circ$  έως  $\theta = -90^\circ$ .

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ένας απλός ηλεκτρονόμος υπερέντασης μηδενικής ακολουθίας είναι αρκετός για την ανίχνευση σφαλμάτων σε μια γραμμή, αφού έχουμε θέσει την ρύθμισή (κατώφλι) του σε τιμή μεγαλύτερη από το χωρητικό ρεύμα της προστατευόμενης γραμμής.

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης χρησιμοποιούνται μόνο σε δίκτυα ή κλειστού βρόχου σε αυτά που έχουν πολλούς ουδέτερους κόμβους.



Σχήμα 3.21: Δίκτυο απευθείας γειωμένου ουδέτερου (ανίχνευση σφαλμάτων γης)

##### β. Δίκτυα με πολλαπλά σημεία γείωσης (Multiple earthing points).

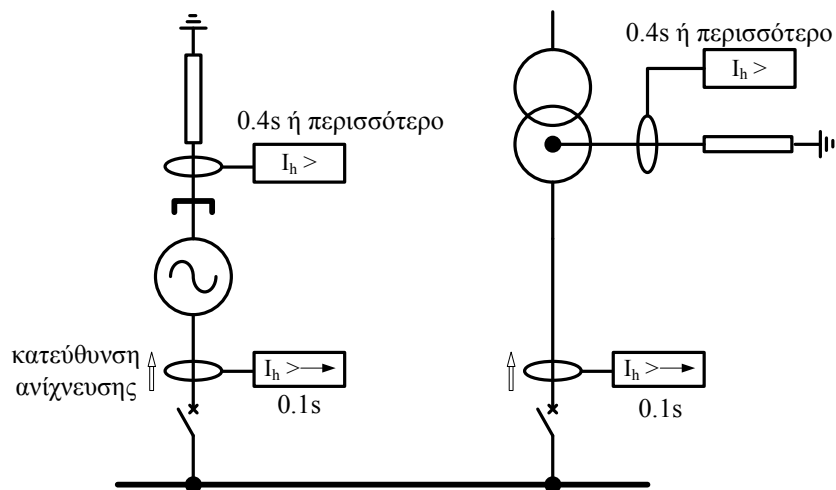
Ορισμένα δίκτυα μπορούν να λειτουργούν με τον ουδέτερο γειωμένο σε διάφορα σημεία. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν ο ουδέτερος είναι γειωμένος σε κάθε γεννήτρια ή

μετασχηματιστή ισχύος. Η παράλληλη σύνδεση των συσκευών αυτών οδηγεί στην παράλληλη σύνδεση και των γειώσεών τους.

Σε αυτήν την περίπτωση, για την προστασία των συσκευών αυτών, έναντι των σφαλμάτων ως προς γη, απαιτείται η εγκατάσταση εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης γης στην είσοδο κάθε συσκευής.

Στο σχήμα 3.22 φαίνεται μια τυπική διάταξη του εξοπλισμού προστασίας γης. Το βέλος δείχνει την κατεύθυνση ανίχνευσης του σφάλματος για κάθε ηλεκτρονόμο. Επίσης φαίνονται οι χρονικές καθυστερήσεις του κάθε ηλεκτρονόμου.

Η χαρακτηριστική γωνία επιλέγεται σύμφωνα με την μέθοδο γείωσης του ουδετέρου κόμβου, αυτή του εξοπλισμού προστασίας που είναι τοποθετημένος στην γεννήτρια σύμφωνα με την μέθοδο γείωσης του μετασχηματιστή και αυτή του εξοπλισμού προστασίας που έχει εγκατασταθεί στην είσοδο του μετασχηματιστή σύμφωνα με την μέθοδο γείωσης της γεννήτριας.



Σχήμα 3.22: Προστασία σφαλμάτων γης ενός γειωμένου σε διάφορα σημεία δικτύου.

### Προστασία σφαλμάτων μεταξύ φάσεων

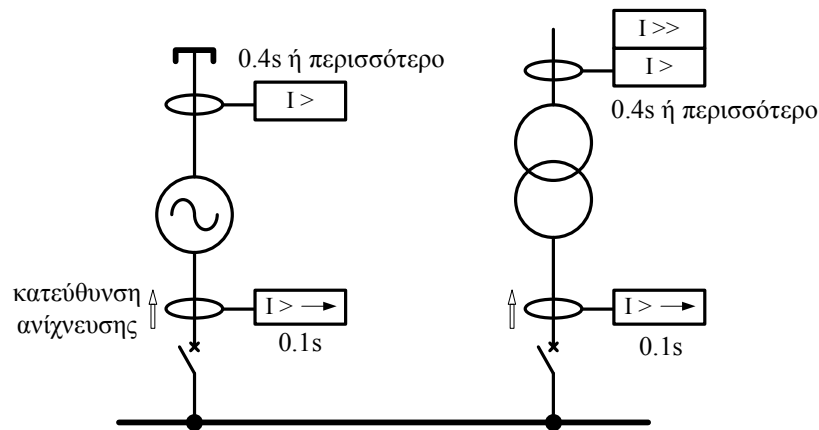
Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης φάσης χρησιμοποιείται σε ακτινικά δίκτυα για υποσταθμούς που τροφοδοτούνται ταυτόχρονα από πολλές πηγές.

Για να επιτευχθεί καλή συνέχεια τροφοδότησης ισχύος, είναι σημαντικό για ένα σφάλμα που επηρεάζει την μια πηγή, να μην προκαλεί διακοπή όλων των άλλων. Η επιθυμητή επιλογικότητα επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης φάσης στην είσοδο της κάθε πηγής.

Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη εξοπλισμού προστασίας σφαλμάτων φάσεων. Σε αυτό το σχήμα, το βέλος δείχνει την κατεύθυνση ανίχνευσης σφάλματος του κάθε ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης φάσης.

Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης φάσης γενικά είναι διφασικός. Οι περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται η χρήση τριφασικού εξοπλισμού περιγράφονται στην παράγραφο 3.4.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι αν η ισχύς βραχυκύκλωσης της γεννήτριας είναι χαμηλή σε σύγκριση με αυτή του δικτύου, ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης που έχει εγκατασταθεί στην είσοδο της μπορεί να αντικατασταθεί από ένα απλό εξοπλισμό προστασίας υπέρτασης στο οποίο η ρύθμιση του (κατώφλι) να έχει τεθεί μεγαλύτερη από το ρεύμα βραχυκύκλωσης της γεννήτριας και μικρότερη από το ρεύμα βραχυκύκλωσης του δικτύου.



Σχήμα 3.23: Προστασία σφαλμάτων φάσεων σε ένα δίκτυο πολλαπλών πηγών

### 3.3.2 Προστασία Κλειστών Βρόχων

Σε αυτά τα δίκτυα ένας ή περισσότεροι βρόχοι είναι στην κανονική λειτουργία τους κλειστοί. (βλέπε Σχήμα 3.24)

Το πλεονέκτημα αυτής της δομής δικτύου είναι ότι εξασφαλίζεται άριστη αξιοπιστία ισχύος σε όλους τους καταναλωτές που είναι εγκατεστημένοι στον βρόχο, δηλαδή δίνεται η δυνατότητα της αποσύνδεσης του ελαττωματικού τμήματος από το δίκτυο, χωρίς να διακοπεί η παροχή ισχύος στους καταναλωτές.

Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι το κόστος. Απαιτεί την εγκατάσταση ενός διακόπτη ισχύος στο τέλος της κάθε σύνδεσης, και επιπλέον ο εξοπλισμός προστασίας γίνεται πιο πολύπλοκος.

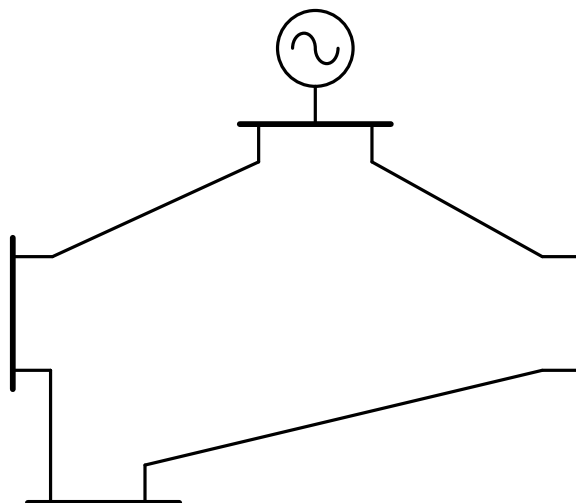
Δύο από τις μεθόδους προστασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής:

- Διαφορική προστασία
- Προστασία κατεύθυνσης

Η τελευταία λειτουργεί αν, στον βρόχο ένας υποσταθμός είναι συνδεδεμένος με μια ή περισσότερες πηγές και επίσης έχει γειωμένο τον ουδέτερο του. Στην πράξη, η επιλογικότητα του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης εξασφαλίζεται από τα συστήματα λογικής επιλογικότητας.

Συγκρινόμενη με την διαφορική προστασία, η οποία έχει το πλεονέκτημα ότι είναι γρήγορη, η προστασία κατεύθυνσης είναι οικονομικότερη και ευκολότερη στην εγκατάστασή της. Σημειώστε ότι τα σφάλματα ως προς γη ανιχνεύονται ανεξάρτητα με το ποια μέθοδο γείωσης ουδέτερου κόμβου έχει η εγκατάσταση, ενώ ο εξοπλισμός διαφορικής

προστασίας γραμμών μεταφοράς έχει περιορισμένη ευαισθησία γι' αυτόν τον τύπο σφαλμάτων



Σχήμα 3.24: Διάγραμμα κλειστού βρόχου

#### Παράλληλα συνδεδεμένες γραμμές

Δυο παράλληλα συνδεδεμένες γραμμές είναι το απλούστερο παράδειγμα κλειστού βρόχου. Το σύστημα προστασίας πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ένα σφάλμα στην μια γραμμή να μην προκαλεί διακοπή της άλλης γραμμής.

Ένα τυπικό σύστημα προστασίας εμφανίζεται στο σχήμα 3.25. Σε αυτήν τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση ανίχνευσης σφάλματος του κάθε ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης.

Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης φάσης είναι διφασικού τύπου και η χαρακτηριστική του γωνία τίθεται ανάλογα με την επιλογή της γωνίας σύνδεσης ( $45^\circ$  για γωνία σύνδεσης των  $90^\circ$ )

Η χαρακτηριστική γωνία του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης γης τίθεται σύμφωνα με την μέθοδο γείωσης του ουδέτερου κόμβου όπως εξηγείται στις προηγούμενες παραγράφους.

Οι χρόνοι καθυστέρησης του εξοπλισμού προστασίας επίσης εμφανίζονται στο σχήμα 3.25. Οι απλοί ηλεκτρονόμοι υπέρεντασης που χρησιμοποιούνται στις γραμμές του πάνω υποσταθμού, καθυστερούν τόσο ώστε να είναι διαβαθμισμένοι χρονικά με τους ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης που βρίσκονται στις εισόδους του κάτω υποσταθμού.

Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα στην μία από τις δυο γραμμές, το ρεύμα διαιρείται σύμφωνα με την σύνθετη αντίσταση της κάθε γραμμής. Ένα μέρος του ρέει κατευθείαν από τον πάνω υποσταθμό στην γραμμή που έχει το σφάλμα, και το υπόλοιπο πέρνα μέσω του κάτω υποσταθμού στο σημείο του σφάλματος.

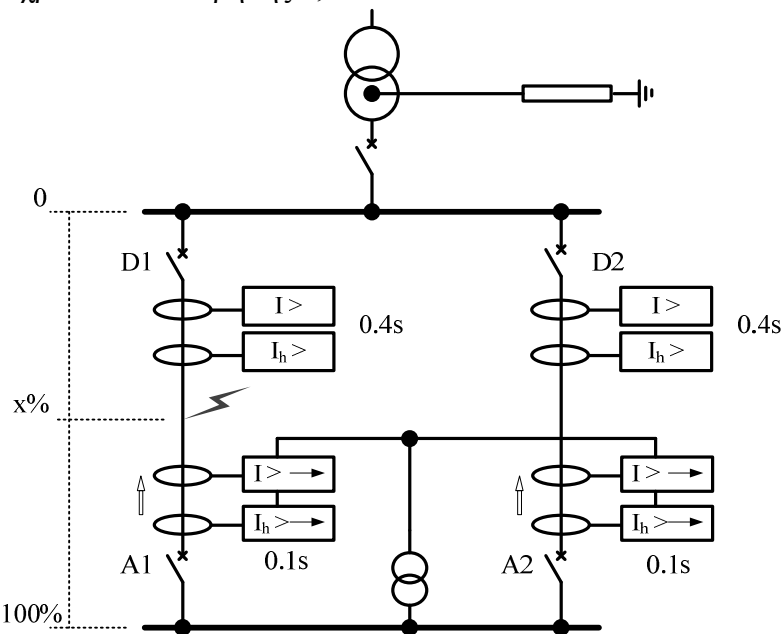
Ο εξοπλισμός προστασίας ενεργοποιείται με την ακόλουθη σειρά:

- A1, D1 και D2 ανιχνεύουν το σφάλμα.
- A1, ανοίγει ( χρόνος καθυστέρησης 0,1s)
- D2, τίθεται στην αρχική του κατάσταση πριν παρέλθει ο χρόνος καθυστέρησης του.(reset)
- D1, ανοίγει (χρόνος καθυστέρησης 0.4s)

Όταν εμφανιστεί ένα βραχυκύκλωμα κοντά στους ζυγούς του πάνω υποσταθμού, το ποσοστό του ρεύματος που περνά μέσω του κάτω υποσταθμού στο σημείο του σφάλματος είναι πολύ χαμηλό, μικρότερο από την τιμή ρύθμισης (κατωφλίου) του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης φάσης.

Αυτό συμβαίνει, όταν η θέση “x” του σφάλματος είναι μεταξύ 0 έως 2 φορές του λόγου  $\frac{I_s}{I_{sc}}$  (μεταξύ της ρύθμισης (κατωφλίου) του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης). Σε αυτήν την περίπτωση ο εξοπλισμός προστασίας υπερέντασης της γραμμής που έχει το σφάλμα (D1) ενεργοποιείται πρώτος ( χρονική καθυστέρηση 0,4s) με τον A1 να ενεργοποιείται μετά.

Ο συνολικός χρόνος για την εξάλειψη του σφάλματος επομένως παρατείνεται. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με την εγκατάσταση ενός δεύτερου ηλεκτρονόμου υπερέντασης στις γραμμές D1 και D2 ο οποίος θα έχει μεγαλύτερη τιμή ρύθμισης (κατώφλι) (εντολή διακοπής για  $I_{sc}$  που αντιστοιχεί σε μικρότερο από το 90% του μήκους της γραμμής) με χρόνο καθυστέρησης 0,1s.



Σχήμα 3.25: Προστασία παράλληλων συνδεδεμένων γραμμών

### Κλειστός βρόχος

Κάθε διακόπτης ισχύος είναι εφοδιασμένος με δυο συστήματα προστασίας κατεύθυνσης, καθένα από οποία ανιχνεύει σφάλματα αντίθετων κατευθύνσεων (εκτός από τους διακόπτες στην αρχή του κάθε βρόχου, οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με απλά συστήματα προστασίας υπερέντασης).

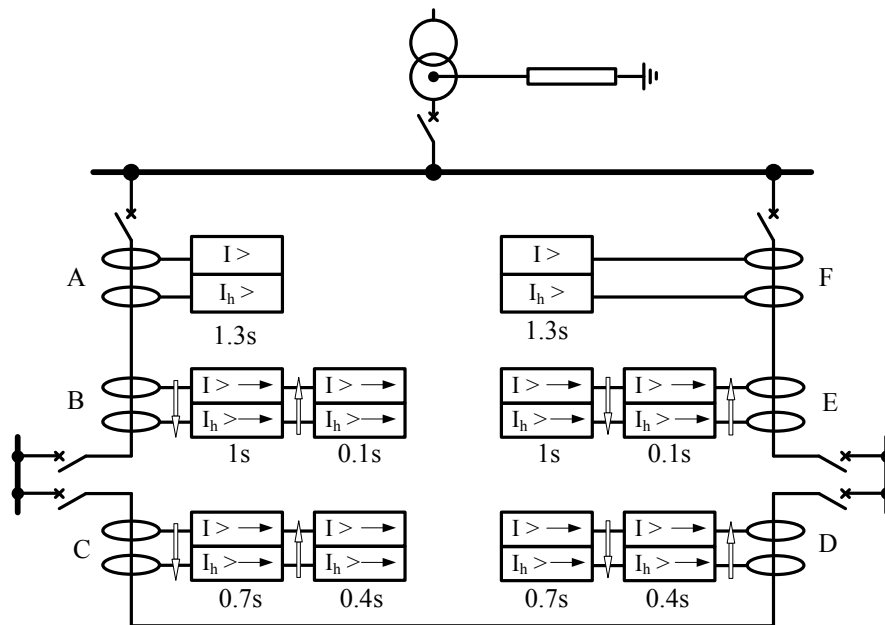
Η διάταξη αυτή εμφανίζεται στο σχήμα 3.26. Κάθε σύστημα προστασίας αποτελείται από δυο ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης φάσης και δύο ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης γης.

Η κατεύθυνση ανίχνευσης του κάθε συστήματος προστασίας δείχνεται με το βέλος. Σχηματίζονται έτσι δυο αλληλουχίες επιλογικότητας, μια για κάθε κατεύθυνση στην οποία μπορεί να ρέει το ρεύμα.

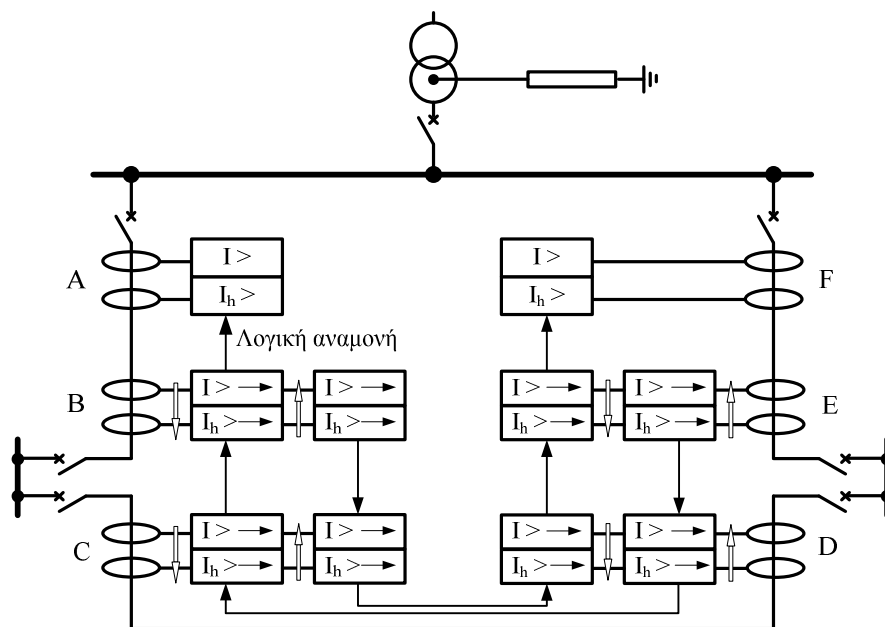
- A > B > C > D > E
- F > E > D > C > B



Αν η επιλογικότητα είναι βασισμένη καθαρά στο χρόνο, οι χρόνοι διακοπής γρήγορα γίνονται απαγορευτικοί. Στην πράξη, η διάταξη αυτή υλοποιείται με λογική επιλογικότητα ( βλέπε σχήμα 3.27) , με την οποία είναι δυνατόν να επιτευχθούν πολύ μικροί χρόνοι διακοπής (0,1s), χρησιμοποιώντας γραμμές διασύνδεσης μεταξύ κάθε υποσταθμού



Σχήμα 3.26: Προστασία κλειστού βρόχου με επιλογικότητα βασισμένη σε χρόνο.



Σχήμα 3.27: Προστασία κλειστού βρόχου με την χρήση λογικής επιλογικότητας

### 3.3.3 Προστασία Εναλλακτών

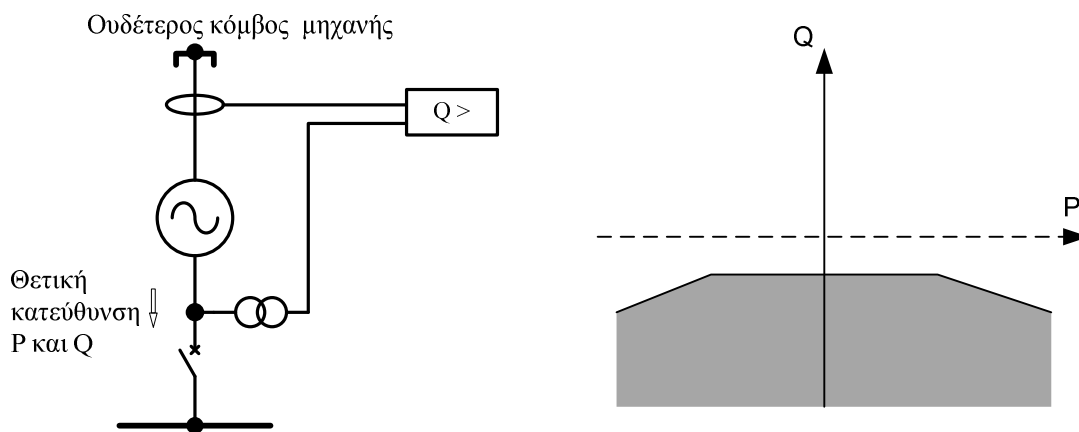
#### Ανίχνευση απώλειας διέγερσης

Η διακοπή ή η βραχυκύκλωση του πηνίου διέγερσης ενός εναλλακτήρα είναι ένα σοβαρό σφάλμα. Προκαλεί είτε την λειτουργία του εναλλακτήρα ως ασύγχρονη γεννήτρια, είτε την διακοπή παραγωγής ενέργειας η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του δρομέα.

Η πρώτη περίπτωση εμφανίζεται όταν το κύκλωμα διέγερσης είναι βραχυκυκλωμένο ή όταν ο δρομέας διαθέτει τυλίγματα απόσβεσης. Η κατάσταση αυτή είναι σταθερή όμως η μηχανή δεν είναι σχεδιασμένη να την αποδέχεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην δεύτερη περίπτωση, η κατάσταση είναι ασταθής και η κινητήρια μηχανή πρέπει να σταματήσει όσο γρηγορότερα γίνεται.

Είναι επομένως αναγκαίο να παρακολουθείται το κύκλωμα διέγερσης. Δυστυχώς αυτό είναι συχνά δυσπρόσιτο, τοποθετημένο εξολοκλήρου μέσα στον δρομέα (εναλλακτήρας χωρίς δακτύλιους ή ψήκτρες). Οπότε σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε την μέτρηση άεργης ισχύος, που απορροφάται από την μηχανή ή την μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος διέγερσης. (βλέπε Σχήμα 3.28).

Η μέτρηση άεργης ισχύος είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την προστασία μηχανών μέσης και χαμηλής ισχύος. Ανιχνεύει κάθε στιγμή που η μηχανή απορροφά άεργη ισχύ και επομένως κάθε στιγμή που λειτουργεί ως ασύγχρονη γεννήτρια. Πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να τεθεί η ρύθμισή του (κατώφλι) σε τιμή κάτω του  $S_n$  ( η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της μηχανής). Τυπικά τίθεται  $0,4 \cdot S_n$ .



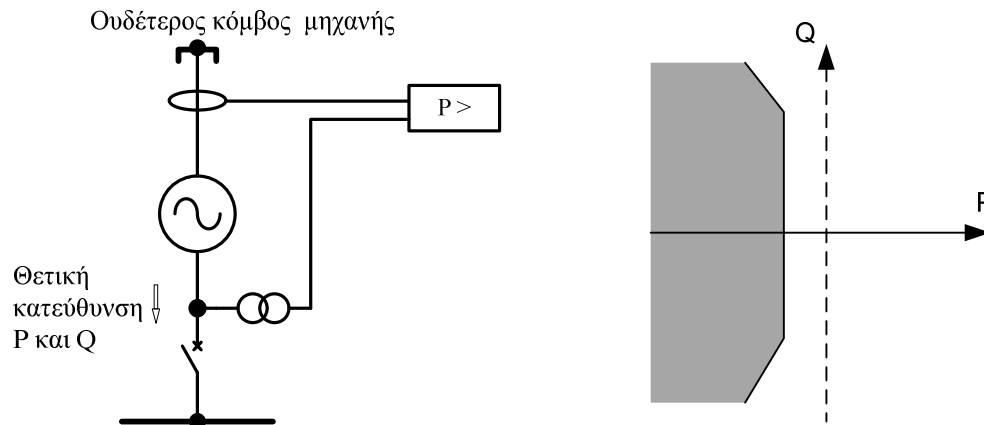
Σχήμα 3.28: Προστασία έναντι απώλειας διέγερσης με ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης άεργης ισχύος

#### Ανίχνευση λειτουργίας κινητήρα

Μια γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο ισχύος συνεχίζει να περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα ακόμα και αν η κινητήρια μηχανή (ντίζελ ή αεροστρόβιλος ή ατμοστρόβιλος) δεν παρέχει ισχύ σε αυτήν. Η κατάσταση αυτή μπορεί να είναι επιζήμια για την κινητήρια μηχανή. Για να ανιχνεύεται μια τέτοια κατάσταση θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης ενεργού ισχύος ( βλέπε Σχήμα 3.29).

Η ρύθμιση (κατώφλι) αυτού του εξοπλισμού προστασίας τίθεται σε χαμηλή τιμή συγκρινόμενη με την ονομαστική φαινόμενη ισχύ του εναλλακτήρα, τυπικά μεταξύ 5 και 20% αυτής και μερικές φορές μπορεί να είναι πιο μικρή για τους στροβιλοεναλλακτήρες.

Ειδική προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό αυτού του πολύ ευαίσθητου ηλεκτρονόμου προκειμένου να εξασφαλισθεί σταθερότητα κάτω από όλες τις κανονικές καταστάσεις λειτουργίας του εναλλακτήρα.



Σχήμα 3.29: Ανίχνευση λειτουργίας κινητήρα με ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης ενεργού ισχύος

### Προστασία για παράλληλη λειτουργία γεννητριών

Όταν μια βιομηχανική εγκατάσταση έχει μια ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ισχύος, σχεδιασμένες να λειτουργούν παράλληλα με την κύρια παροχή του δικτύου, είναι σκόπιμο να εφοδιαστεί με ένα ειδικό σύστημα προστασίας.

Ο εξοπλισμός αυτός προστασίας έχει δυο στόχους:

- την ασφάλεια των μονάδων παραγωγής του ιδιωτικού σταθμού ισχύος
- την ασφάλεια του κυρίου δικτύου, το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί από τον ιδιωτικό βιομηχανικό σταθμό παράγωγης.

Αυτός ο εξοπλισμός προστασίας είναι γενικά εγκατεστημένος στον διακόπτη ισχύος που βρίσκεται στην είσοδο του βιομηχανικού δικτύου, και ελέγχει το άνοιγμά του. Επίσης μπορεί να ελέγχει τον διακόπτη ισχύος του ιδιωτικού σταθμού παραγωγής μέσω σύζευξης των δυο τμημάτων της εγκατάστασης.

Ένας από τους ρόλους του εξοπλισμού προστασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.30. Περιλαμβάνει την ανίχνευση ενός σφάλματος που συμβαίνει στην γραμμή τροφοδοσίας της βιομηχανικής εγκατάστασης με διπλό στόχο:

- την ασφάλεια του δικτύου: διακόπτοντας την παροχή προς το σφάλμα
- την ασφάλεια του εναλλακτήρα του ιδιωτικού σταθμού : αποφεύγοντας την επανασύνδεση της γραμμής τροφοδοσίας με τον υποσταθμό του δικτύου όταν δεν ισχύουν οι συνθήκες συγχρονισμού, αποφεύγεται έτσι μια επικίνδυνη σύνδεση.

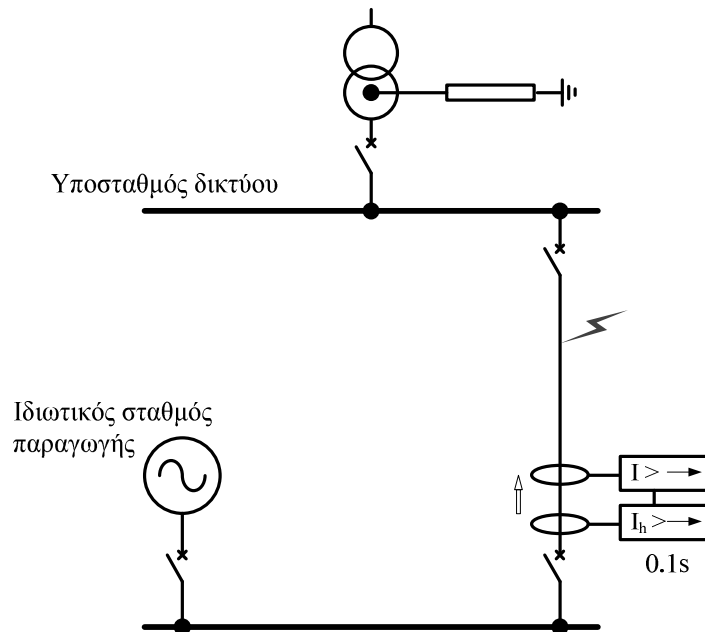
Η ανίχνευση του σφάλματος εξασφαλίζεται με την χρήση εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης φάσης και γης:

- Η προστασία κατεύθυνσης γης ανιχνεύει το υπόλοιπο ρεύμα (residual) που ρέει μέσω της χωρητικότητας φάσης - γης της εγκατάστασης ή (και) από το ρεύμα που ρέει μέσω της γείωσης του ιδιωτικού σταθμού παραγωγής.
- Η προστασία κατεύθυνσης φάσης ανιχνεύει ένα σφάλμα μεταξύ φάσεων πάνω από την βιομηχανική εγκατάσταση στην γραμμή τροφοδοσίας.

Επειδή είναι κατεύθυνσης, αυτή η προστασία δεν ενεργοποιείται για ένα σφάλμα που γίνεται μέσα στην βιομηχανική εγκατάσταση.

Πέρα από τον εξοπλισμό προστασίας κατεύθυνσης, η προστασία για την παράλληλη λειτουργία συχνά αποτελείται από ένα ηλεκτρονόμο ρυθμού μεταβολής συχνότητας  $\frac{df}{dt}$ : η εσφαλμένη αύξηση ζήτησης ισχύος στον ιδιωτικό σταθμό παραγωγής στην περίπτωση απώλειας της παροχής ισχύος από το δίκτυο, προκαλεί διακύμανση στην συχνότητα των γεννητριών του ιδιωτικού σταθμού παραγωγής.

Τέλος, μπορεί επίσης να εγκατασταθεί ένα σύστημα προστασίας κατεύθυνσης ενεργού ισχύος, προκειμένου να ανιχνεύεται η αντικανονική κατεύθυνση ροής ισχύος.



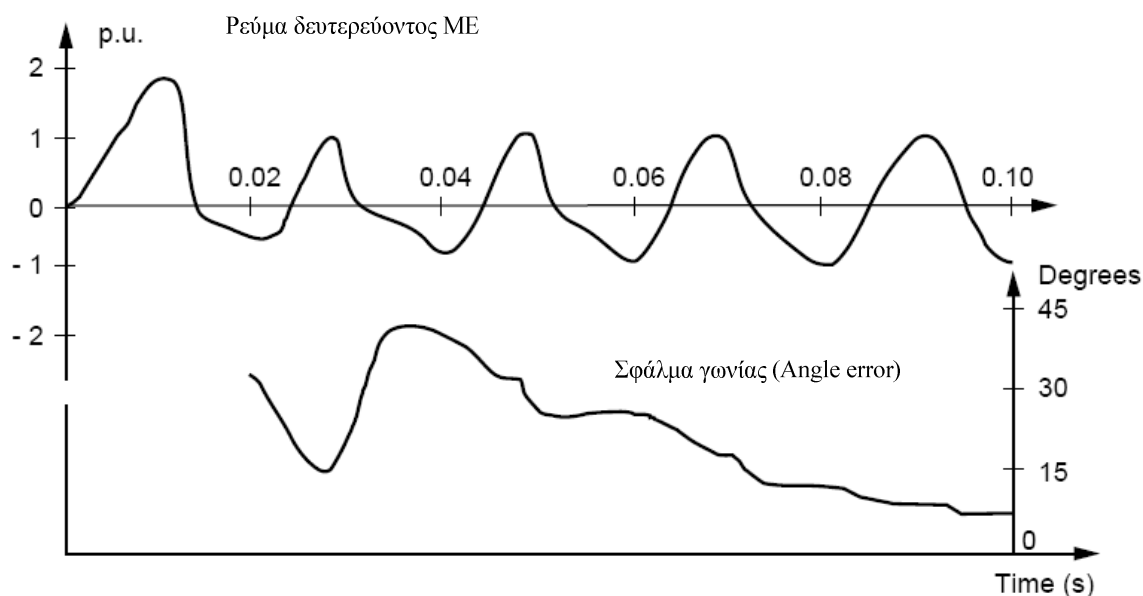
Σχήμα 3.30: Παράδειγμα εξοπλισμού προστασίας απόζευξης (decoupling protection equipment)

## 3.4 Χρήση

### 3.4.1 Διαβάθμιση των Μετασχηματιστών Έντασης και Τάσης

Η επιλογή των μετασχηματιστών τάσης (MT) δεν είναι κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα. Οι MT που εγκαθίσταται στα δίκτυα διανομής είναι ή της κλάσης 0,5 ή της κλάσης 1: οι οποίοι ταιριάζουν απόλυτα για την τροφοδοσία του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης εφόσον το άθροισμα των φορτίων που συνδέονται σε αυτούς, δεν είναι ούτε μεγαλύτερο από ονομαστικό φορτίο τους, ούτε πολύ μικρό, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι κίνδυνοι σιδηροσυντονισμού (ferro-resonance).

Η επιλογή των μετασχηματιστών έντασης (ME) είναι πιο περίπλοκη. Εάν δεν έχει γίνει κατάλληλη επιλογή, την στιγμή του βραχυκυκλώματος το ρεύμα θα έχει μια απεριοδική συνιστώσα με υψηλή σταθερά χρόνου, με αποτέλεσμα οι ME να φθάνουν στον κόρο. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί την λαθεμένη μέτρηση του φασικού ρεύματος κατά την διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31: Σφάλμα γωνίας μετρούμενου ρεύματος στους ME.

Το παραπάνω σφάλμα υπολογίζεται κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες:

- Το σφάλμα περιέχει μια απεριοδική συνιστώσα των 100% και σταθεράς χρόνου των 40%
- Ο κορεσμός των ME είναι διπλάσιος από το ρεύμα βραχυκυκλώματος

Το ρεύμα που μετράται στο δευτερεύον τύλιγμα του ME προπορεύεται πάντοτε του ρεύματος του πρωτεύοντος.

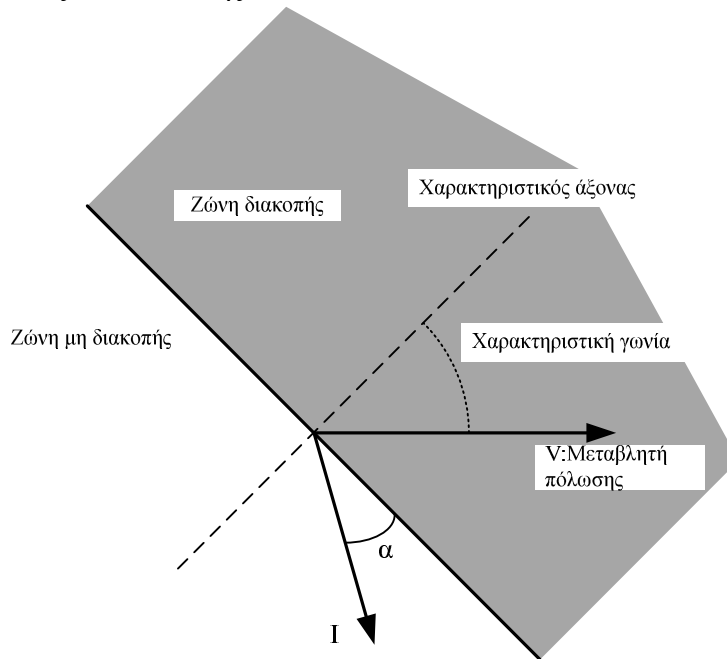
Η εσφαλμένη επιλογή ME είναι πιθανόν να έχει δυο συνέπειες:

- μπορεί να προκληθεί εσφαλμένη διακοπή – ένας κίνδυνος που μειώνει την διάρκεια της καθυστέρησης χρόνου του εξοπλισμού προστασίας

- μπορεί να προκληθεί καθυστερημένη διακοπή – ένας κίνδυνος που είναι ανεξάρτητος από την επιλεγμένη καθυστέρηση χρόνου.

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά του εξοπλισμού προστασίας είναι η διαφορά φάσης  $\alpha$  μεταξύ του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της συνοριακής γραμμής της ζώνης διακοπής του εξοπλισμού προστασίας όπως ορίζεται στο σχήμα 3.32.

Πρακτικά, οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για τους ΜΕ δεν είναι τόσο αυστηρές, αν η γωνία  $\alpha$  είναι μεγαλύτερη από  $45^\circ$  (περίπτωση που συναντάται συχνά, όταν έχουν τεθεί οι συνιστώμενες ρυθμίσεις). Η επιλογή του συντελεστή ορίου ακρίβειας (accuracy limit factor) για τους ΜΕ ( όπως ορίζεται στην αναφορά [4]) πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 0,3 της τιμής του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης που παρατηρείται από τον εξοπλισμό προστασίας κατεύθυνσης.



Σχήμα 3.32: Ορισμός της γωνίας  $\alpha$

### 3.4.2 Επιλογή Μεταξύ Διφασικής ή Τριφασικής Προστασίας

Με την αναλογική τεχνολογία, ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης είναι συχνά μονοφασικός, μετρά το ρεύμα δηλαδή σε μια φάση. Με αυτήν υπάρχει η δυνατότητα να εφοδιαστεί ο ηλεκτρονόμος με την μια, τις δυο ή και με τις τρεις φάσεις.

Με την ψηφιακή τεχνολογία πολλές λειτουργίες προστασίας είναι ενσωματωμένες μέσα στο κύκλωμα του εξοπλισμού : ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης είναι τις περισσότερες φορές διφασικός και μερικές φορές τριφασικός.

Γενικά, η αντικανονική ροή ισχύος ( προστασία μηχανών), είναι φαινόμενο ισορροπημένο στις τρεις φάσεις, επομένως εδώ αρκεί η χρήση ενός μονοφασικού ηλεκτρονόμου. Τουλάχιστον μια από τις δυο φάσεις θα εμπλακεί στο σφάλμα.

Για την ανίχνευση σφάλματος φάσης – γης απαιτείται, είτε τριφασικός εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης, είτε εξοπλισμός προστασίας γης. Αν ο ουδέτερος της εγκατάστασης είναι απευθείας γειωμένος, η πρώτη λύση είναι συχνά καταλληλότερη. Για τις υπόλοιπες μεθόδους γείωσης του ουδέτερου κόμβου, επιλέγεται η δεύτερη.

## 3.4.3 Προστασία Παράλληλων Συνδεδεμένων Μετασχηματιστών

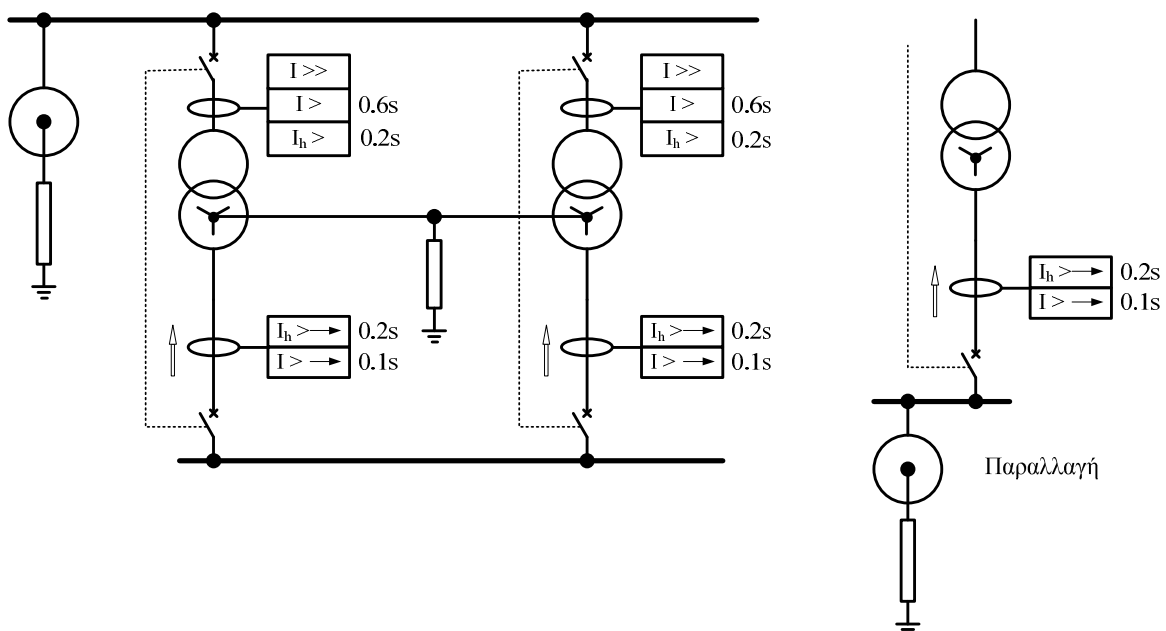
Ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης φάσης μπορεί να επιλεγεί για τον εξοπλισμό διαφορικής προστασίας προκειμένου να προστατευθούν δυο παράλληλα συνδεδεμένοι μετασχηματιστές, ειδικά εάν οι ζυγοί τους είναι σε πολύ μακρινή απόσταση (πρακτικά είναι αδύνατον να γίνει σύνδεση των δευτερευόντων τυλιγμάτων των ΜΕ για απόσταση άνω των εκατό μέτρων).

Το σύστημα προστασίας που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εφαρμογή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.33, στην οποία πρέπει να ακολουθηθούν οι παρακάτω ρυθμίσεις.

- η ρύθμιση (κατώφλι) του εξοπλισμού προστασίας ακαριαίας υπερέντασης τίθεται έτσι ώστε να ανιχνεύονται σφάλματα στο πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, μόνο.
- ταυτόχρονη εντολή ανοίγματος των διακοπών ισχύος πρωτεύοντος – δευτερεύοντος
- ο εξοπλισμός προστασίας κατεύθυνσης φάσης τίθεται έτσι ώστε να ανιχνεύονται σφάλματα στο δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, μόνο.

Ανάλογα με τον ουδέτερο κόμβο, οποίος βρίσκεται στο δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή υπάρχουν δυο παραλλαγές:

- Αν ο ουδέτερος κόμβος του δευτερεύοντος βρίσκεται πάνω στους ζυγούς, η προστασία κατεύθυνσης σφαλμάτων γης αντικαθίσταται με απλή προστασία υπερέντασης υπολοίπου ρεύματος ( residual ).
- Αν κάθε μετασχηματιστής έχει τον δικό του ουδέτερο κόμβο και αν οι ζυγοί του δευτερεύοντος κυκλώματος και οι μετασχηματιστές βρίσκονται μέσα στον ίδιο υποσταθμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί προστασία περιορισμού του σφάλματος γης (restricted earth fault protection), αντί της προστασίας κατεύθυνσης σφαλμάτων γης.



Σχήμα 3.33: Προστασία δυο παράλληλα συνδεδεμένων μετασχηματιστών

### 3.5 Νέες Τεχνολογίες

#### 3.5.1 Νέες Τεχνολογίες στην Τεχνολογία Εξοπλισμού Προστασίας

Η γενικευμένη χρήση του στατικού (ηλεκτρονικού) και ψηφιακού εξοπλισμού προστασίας καθιστά τον εξοπλισμό κατεύθυνσης απλό και σχετικά ανέξοδο στην χρήση του. Αυτός ο τύπος προστασίας επομένως φαίνεται να είναι μια άριστη ευκαιρία να βελτιωθεί και η μεταφορά ισχύος μέσω του δικτύου και η ποιότητα υπηρεσίας.

Για παράδειγμα, αν έχουμε δυο γραμμές, από τις οποίες η μια για την παροχή ισχύος, ενώ η δεύτερη είναι εφεδρική, μπορούν να λειτουργούν τώρα παράλληλα με την χρήση του εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης.

Ο συνδυασμός λογικής επιλογικότητας (αναφορά [5]) και εξοπλισμού προστασίας κατεύθυνσης δίνει την δυνατότητα στα συστήματα να σχεδιαστούν έτσι ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία της ηλεκτρικής ισχύος.

Η εμφάνιση στην αγορά των ηλεκτρονόμων πολλαπλών λειτουργιών (με άλλα λόγια αυτοί που συνδυάζουν όλες τις λειτουργίες προστασίας συν την απαιτούμενη λογική ελέγχου) που αφιερώνονται σε κάθε εφαρμογή απλοποιεί τον σχεδιασμό και την ένταξη του συστήματος προστασίας (βλέπε σχήμα 3.34).



Σχήμα 3.34: SEPAM 2000, Ένας ψηφιακός ηλεκτρονόμος πολλαπλών λειτουργιών.



### 3.5.2 Νέες Τεχνολογίες Αισθητήρων

Η έλευση του ψηφιακού εξοπλισμού προστασίας, που απαιτεί πολύ μικρή ποσότητα ισχύος για τις μετρήσεις, καθιστά δυνατή την χρήση νέων ειδών αισθητήρων. Τα πηνία Rogowski (ΜΕ χωρίς πυρήνα) επειδή δεν φθάνουν στο κόρο, δίνουν την δυνατότητα στον εξοπλισμό κατεύθυνσης να διατηρεί την ακρίβεια των μετρήσεων και έτσι να αποφεύγονται οι λάθος μετρήσεις γωνίας για οποιοδήποτε είδος σφάλματος. Έτσι το πρόβλημα της διαβάθμισης των ΜΕ εξαλείφεται.

Αυτοί οι μετασχηματιστές μετρήσεων, που περιλαμβάνουν έναν τύλιγμα μεγάλου αριθμού ελιγμάτων γύρω από ένα μη μαγνητικό πυρήνα, περιγράφονται στην αναφορά [6]

Οι καταμεριστές τάσης (ωμικοί διαιρέτες τάσης), με το χαμηλό τους κόστος και τις χαμηλές απαιτήσεις τους σε όγκο, είναι εγκατεστημένοι σε θαλάμους κοντά στον εξοπλισμό προστασίας κατεύθυνσης: το κύκλωμα του καταμεριστή τάσης είναι πολύ πιο αξιόπιστο από ότι όταν χρησιμοποιούνται ΜΤ: οι ΜΤ δεν είναι πλέον η κύρια αιτία αποτυχίας για το σύστημα προστασίας.

Η εξέλιξη των αισθητήρων προχωρά περαιτέρω στην ενίσχυση του ενδιαφέροντος για τον εξοπλισμό προστασίας κατεύθυνσης, με την βελτίωση της ενσωμάτωσής τους καθώς και των επιπέδων απόδοσης τους.

### 3.5.3 Συμπεράσματα

Οι τεχνολογική πρόοδος (εξοπλισμός ψηφιακής προστασίας, νέοι αισθητήρες κ.α), καθώς επίσης και η λογική επιλογικότητα καθιστούν τον εξοπλισμό προστασίας κατεύθυνσης ευκολότερο στην χρήση.

Σήμερα, η υψηλή τους απόδοση και η ευκολία στη ένταξή του εξοπλισμού προστασίας αποδεικνύεται ανεκτίμητη στην βελτίωση της αξιοπιστίας της παροχής ηλεκτρικής ισχύος.

Χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την προστασία δικτύων και μηχανών για προστασία είτε σφαλμάτων μεταξύ φάσεων, είτε σφαλμάτων γης.

Οι αναγνώστες που ενδιαφέρονται για περισσότερες γενικές πληροφορίες στους διάφορους τύπους εξοπλισμού προστασίας που χρησιμοποιείται στην κλίμακα των ΜV μπορούν να αναφερθούν στην αναφορά [7].

## 4 Σχεδίαση και Αξιολόγηση Ηλεκτρονόμων Κατεύθυνσης

### 4.1 Εισαγωγή

Τα στοιχεία κατεύθυνσης είναι βασικά για την ασφάλεια και την επιλογικότητα του συστήματος προστασίας, επιτελώντας κρίσιμες λειτουργίες, όπως η επιτήρηση των στοιχείων απόστασης και ο έλεγχος των στοιχείων υπερέντασης. Οι αριθμητικοί (numerical) ηλεκτρονόμοι, η νεώτερη πλατφόρμα για τα στοιχεία κατεύθυνσης, διαμορφώνουν χαρακτηριστικά κατεύθυνσης από μεγέθη τύπου ροπής και από μετρήσεις σύνθετης αντίστασης ακολουθίας.

Αυτοί οι νέοι ηλεκτρονόμοι ενσωματώνουν πολλά στοιχεία κατεύθυνσης στο ηλεκτρονικό τους κύκλωμα προκειμένου να ορίσουν την κατεύθυνση σφαλμάτων όλων των τύπων. Η ενσωμάτωση επιτρέπει σε αυτούς τους νέους ηλεκτρονόμους να εκτελούν υπολογισμούς κατεύθυνσης και να αξιολογούν τα αποτελέσματά αυτά για να λάβουν την καλύτερη απόφαση για την κατεύθυνση του σφάλματος. Αντίθετα, στην ηλεκτρομηχανική υλοποίηση, το στοιχείο κατεύθυνσης δε γνωρίζει τις αποφάσεις που λαμβάνονται από τα άλλα στοιχεία κατεύθυνσης μέσα στον ίδιο ηλεκτρονόμο.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά σχέδια των στοιχείων κατεύθυνσης. Αξιολογούνται διάφοροι συνδυασμοί εισόδου των στοιχείων κατεύθυνσης και αναλύονται πως αυτοί οι συνδυασμοί λειτουργούν στα απλά και σύνθετα σφάλματα.

Επίσης αναλύονται:

- Νέες και παραδοσιακές επιλογές εισόδου στοιχείων κατεύθυνσης.
- Κλασικά προβλήματα και λύσεις στοιχείων κατεύθυνσης.
- Ένα βελτιωμένο στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας με το οποίο ξεπερνάμε τα προβλήματα που παρουσιάζονται στα παραδοσιακά στοιχεία κατεύθυνσης σε δύσκολες εφαρμογές.
- Την απόδοση του στοιχείου κατεύθυνσης επαλληλίας θετικής ακολουθίας (superposition directional element).

Τέλος, εξετάζεται η απόδοση του νέου στοιχείου κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας για ένα σφάλμα ως προς γη σε μια γραμμή μεταφοράς 345 kV με αντιστάθμιση σειράς.

### 4.2 Λόγοι Χρήσης Στοιχείων Κατεύθυνσης;

Χρησιμοποιούμε στοιχεία κατεύθυνσης για να:

- καθορίσουμε την κατεύθυνση του σφάλματος
- επιτηρήσουμε στοιχεία αποστάσεως

- για να διαμορφώσουμε την χαρακτηριστική τετραπλεύρου σύνθετης αντίστασης R-X των στοιχείων απόστασης γης.

#### 4.2.1 Καθορισμός Κατεύθυνσης Σφάλματος

Όταν εφαρμόζουμε έναν ηλεκτρονόμο υπερέντασης σε κλειστό βρόγχο ή σε ένα τμήμα του δικτύου, τότε αυτός χρειάζεται ένα στοιχείο κατεύθυνσης για να καθορίσει την κατεύθυνση του σφάλματος.

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης υπερέντασης μπορεί να ρυθμιστούν να είναι πιο ευαίσθητοι από ότι τους απλούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης. Επιπρόσθετα η διαδικασία χρονικής διαβάθμισης απλοποιείται επειδή τα στοιχεία κατεύθυνσης περιορίζουν τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου προς την μια κατεύθυνση.

Τα στοιχεία υπερέντασης κατεύθυνσης παρέχουν υψηλής ταχύτητας πρωτεύουσα προστασία γραμμών μεταφοράς με την βοήθεια καναλιών επικοινωνίας. Τα στοιχεία υπερέντασης κατεύθυνσης λειτουργούν συχνά παράλληλα με στοιχεία αποστάσεως, δημιουργώντας έτσι σχήματα, όπως επιτρεπτή μεταφορά υπέρβασης ορίου διακοπής (Permissive Overreaching Transfer Trip) (POTT) και αποκλεισμός σύγκρισης κατεύθυνσης (Directional Comparison Blocking) (DCB). Αυτά τα στοιχεία υπερέντασης κατεύθυνσης περιλαμβάνονται σε σχέδια διακοπών υποβοηθούμενα με επικοινωνία για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που επιβάλλει η αντίσταση σφάλματος στα στοιχεία κατεύθυνσης γης.

#### 4.2.2 Επιτήρηση Στοιχείων Αποστάσεως

Τα στοιχεία κατεύθυνσης προσθέτουν ασφάλεια σε όλα τα στοιχεία αποστάσεως.

##### Αντίστροφης φοράς σφάλματα γης και στοιχεία αποστάσεως γης

Οι μεταβλητές λειτουργίας για τα στοιχεία αποστάσεως γης περιλαμβάνουν το υπόλοιπο ρεύμα (residual) ( $I_R$ ). Τα στοιχεία αυτά όταν έχουν ρύθμιση (κατώφλι), σφάλματος ορθής φοράς, μεγάλης τιμής, μπορεί να ενεργοποιηθούν για σφάλματα ως προς γη αντίστροφης φοράς, των άλλων φάσεων, που συμβαίνουν κοντά στον ηλεκτρονόμο εξαιτίας της ύπαρξης του  $I_R$  στην μεταβλητή λειτουργίας. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιτήρηση των στοιχείων αποστάσεως γης από ένα ξεχωριστό στοιχείο κατεύθυνσης.

##### Αντίστροφης φοράς σφάλματα φάσεων και στοιχεία αποστάσεως φάσης

Οι μεταβλητές λειτουργίας για τα στοιχεία αποστάσεως φάσης χρησιμοποιούν φασικά ρεύματα, δηλαδή το στοιχείο αποστάσεως φάσεων BC χρησιμοποιεί το ρεύμα ( $I_B - I_C$ ) ως μεταβλητή λειτουργίας, όπου  $I_B$  και  $I_C$  είναι τα ρεύματα της B και της C φάσης αντίστοιχα. Για ένα κοντινό αντίστροφης φοράς σφάλμα μεταξύ των φάσεων C- A, το ορθής φοράς ρυθμισμένο (forward reaching) στοιχείο αποστάσεως BC της φάσης μπορεί να ανιχνεύσει το σφάλμα εξαιτίας της επίδρασης του ρεύματος της φάσης C. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας για να επιτηρούμε τα στοιχεία αποστάσεως φάσης ώστε να αποφεύγονται τέτοιες αντικανονικές ενεργοποιήσεις του ηλεκτρονόμου.

Αντίστροφης φοράς τριφασικά σφάλματα και στοιχεία αποστάσεως φάσης

Τα στοιχεία αποστάσεως τύπου mho που είναι ρυθμισμένα για σφάλματα ορθής φοράς (forward reaching) στερούνται ασφάλειας στα αντίστροφης φοράς τριφασικά σφάλματα όταν συμβαίνουν όλα τα παρακάτω:

- ρέει ένα σημαντικό ρεύμα φορτίου στον ζυγό από μια αδύναμη πηγή (πηγή με μεγάλη σύνθετη αντίσταση).
- το σφάλμα έχει μια μικρή άλλα υπολογίσιμη αντίσταση σφάλματος.
- η μνήμη της τάσης πόλωσης έχει λήξει.

Υπό από αυτές τις συνθήκες, η γωνία μεταξύ των μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας είναι μικρότερη των  $90^\circ$  για τα ορθής φοράς ρυθμιζόμενα (forward reaching) στοιχεία αποστάσεως [9]. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιτήρηση των τριφασικών στοιχείων αποστάσεως από ένα στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

Διαμόρφωση χαρακτηριστικής τετραπλεύρου σύνθετης αντίστασης R-X των στοιχείων αποστάσεως γης.

Τα στοιχεία αποστάσεως χαρακτηριστικής τετραπλεύρου είναι ένας συνδυασμός των παρακάτω τεσσάρων στοιχείων:

- στοιχείο κατεύθυνσης (κάτω πλευρά)(directional element)
- στοιχείο επαγωγικής αντίστασης (πάνω πλευρά)(reactance element)
- στοιχείο αντίστασης δεξιάς πλευράς (resistance element)
- στοιχείο αντίστασης αριστερής πλευράς (resistance element)

Τα στοιχεία επαγωγικής αντίστασης και αντίστασης είναι απλά, δηλαδή μη – κατεύθυνσης και απαιτούν ένα ανεξάρτητο στοιχείο κατεύθυνσης για να δημιουργήσουν την χαρακτηριστική αποστάσεως κατεύθυνσης.

### 4.3 Σχεδίαση Στοιχείων Κατεύθυνσης Φάσης

#### 4.3.1 Στοιχείο Κατεύθυνσης Φάσης Σύνδεσης $90^\circ$

Όπως περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο είναι αναγκαίο σε ένα στοιχείο κατεύθυνσης να έχει οριστεί μια μεταβλητή αναφοράς, έτσι ώστε να είναι ικανός να καθορίζει την κατεύθυνσης του σφάλματος. Η μεταβλητή αυτή ονομάζεται μεταβλητή πόλωσης. Έναντι αυτής της μεταβλητής η μεταβλητή λειτουργίας συγκρίνεται. Ο Sommenarn [10] περιγράφει το δημοφιλές στοιχείο κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$ . Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι μεταβλητές λειτουργίας και πόλωσης των στοιχείων αυτών.

Πίνακας 1: Είσοδοι του στοιχείου κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$

Φάση	Μεταβλητή Λειτουργίας $I_{OP}$	Μεταβλητή Πόλωσης $V_{POL}$
A	$I_A$	$V_{POLA} = V_{BC}$
B	$I_B$	$V_{POLB} = V_{CA}$
C	$I_C$	$V_{POLC} = V_{AB}$

Οι ροπές ( $T_{PHASE}$ ) του καθενός στοιχείου κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$  υπολογίζονται με τους παρακάτω τύπους:

$$T_A = |V_{BC}| |I_A| \cos(\angle V_{BC} - \angle I_A) \quad (4.1)$$

$$T_B = |V_{CA}| |I_B| \cos(\angle V_{CA} - \angle I_B) \quad (4.2)$$

$$T_C = |V_{AB}| |I_C| \cos(\angle V_{BC} - \angle I_C) \quad (4.3)$$

όπου:

$I_A, I_B, I_C$  = Το ρεύμα της φάσης A, B και C αντίστοιχα.

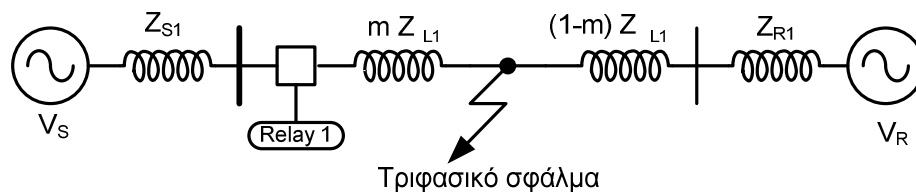
$V_A, V_B, V_C$  = Η τάση της φάσης A, B και C αντίστοιχα.

$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}$  = Οι διαφορές τάσεων  $V_A - V_B$ ,  $V_B - V_C$  και  $V_C - V_A$  αντίστοιχα.

Κάθε στοιχείο κατεύθυνσης ορίζει κατάσταση σφάλματος ορθής φοράς αν το πρόσημο της ροπής είναι θετικό και κατάσταση σφάλματος αντίστροφης φοράς αν το πρόσημο της ροπής είναι αρνητικό.

#### Παράδειγμα 4.1

Ας εξετάσουμε τώρα την απόκριση του στοιχείου κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$  για ένα τριφασικό σφάλμα ορθής φοράς στο σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 4.1. Στο παράδειγμα αυτό, το τριφασικό σφάλμα συμβαίνει σε απόσταση  $m=0,3$ , όπου  $m$  είναι η ανά μονάδα απόσταση του σφάλματος στην γραμμή από την θέση του ηλεκτρονόμου.



Σχήμα 4.1 Σύστημα του παραδείγματος 4.1

Η λύση του παραδείγματος αυτού γίνεται με την βοήθεια του MathCad.

#### Ορισμοί

$$VA := W$$

$$pu := 1.0$$

$$a := e^{\frac{2\pi i}{3}}$$

$$KVA := 1000W$$

$$MW := MVA$$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$$

$$MVA := 1000KVA$$

$$MVAr := MVA$$

$$a = -0.5 + 0.866i$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

#### Δεδομένα

$$V_S := \frac{116}{\sqrt{3}} V$$

$$V_R := \frac{116}{\sqrt{3}} V$$

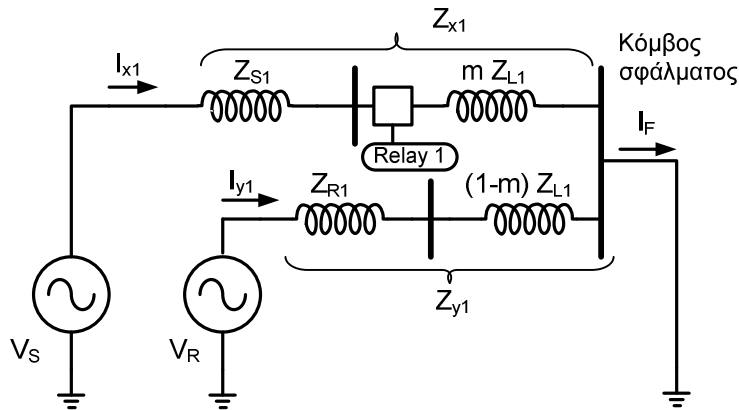
$$Z_{S1} := 0.8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega$$

$$Z_{R1} := Z_{S1}$$

$$Z_{L1} := 4 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega$$

$$m := 0.3$$

Κατασκευάζουμε το κύκλωμα θετικής ακολουθίας που αντιστοιχεί στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.2 Κόκλωμα θετικής ακολουθίας του συστήματος του σχήματος 4.1

Στο παραπάνω σχήμα ορίζουμε:

$$Z_{x1} := Z_{S1} + m \cdot Z_{L1} \quad Z_{y1} := Z_{R1} + (1 - m) \cdot Z_{L1}$$

Βρίσκουμε το ισοδύναμο Thevenin ως προς τον κόμβο του σφάλματος.

$$Z_{th} := \frac{Z_{x1} \cdot Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_{th} := V_S$$

Με την βοήθεια του ισοδυνάμου Thevenin υπολογίζουμε το ρεύμα σφάλματος. Μετά με την χρήση διαιρέτη ρεύματος υπολογίζουμε το ρεύμα που ρέει στον ηλεκτρονόμο.

$$I_F := \frac{V_{th}}{Z_{th}} \quad I_F = -52.09i \text{ A}$$

$$I_{x1} := I_F \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad I_{x1} = -33.486i \text{ A}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{x1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad I_{abc} := A_1 \cdot I_{012} \quad I_a := I_{abc_0} \quad I_b := I_{abc_1} \quad I_c := I_{abc_2}$$

Αφού έχουμε υπολογίσει τα ρεύματα των φάσεων που ρέουν στην θέση του ηλεκτρονόμου, ορίζουμε τώρα τις μεταβλητές λειτουργίας για τα στοιχεία κατεύθυνσης.

$$I_{OPA} := I_a \quad I_{OPA} = 33.486 \text{ A} \quad \arg(I_{OPA}) = -90 \cdot \text{deg}$$

$$I_{OPB} := I_b \quad I_{OPB} = 33.486 \text{ A} \quad \arg(I_{OPB}) = 150 \cdot \text{deg}$$

$$I_{OPC} := I_c \quad I_{OPC} = 33.486 \text{ A} \quad \arg(I_{OPC}) = 30 \cdot \text{deg}$$

Τώρα με την χρήση του ρεύματος  $I_{x1}$  υπολογίζουμε την τάση στον ηλεκτρονόμο.

$$V_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{relay}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad V_{abc} := A_1 \cdot V_{012} \quad V_{abc} = \begin{pmatrix} 40.184 \\ -20.092 - 34.8i \\ -20.092 + 34.8i \end{pmatrix} \text{ V} \quad \arg(V_{abc}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -120 \\ 120 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$V_a := V_{abc_0} \quad V_b := V_{abc_1} \quad V_c := V_{abc_2}$$

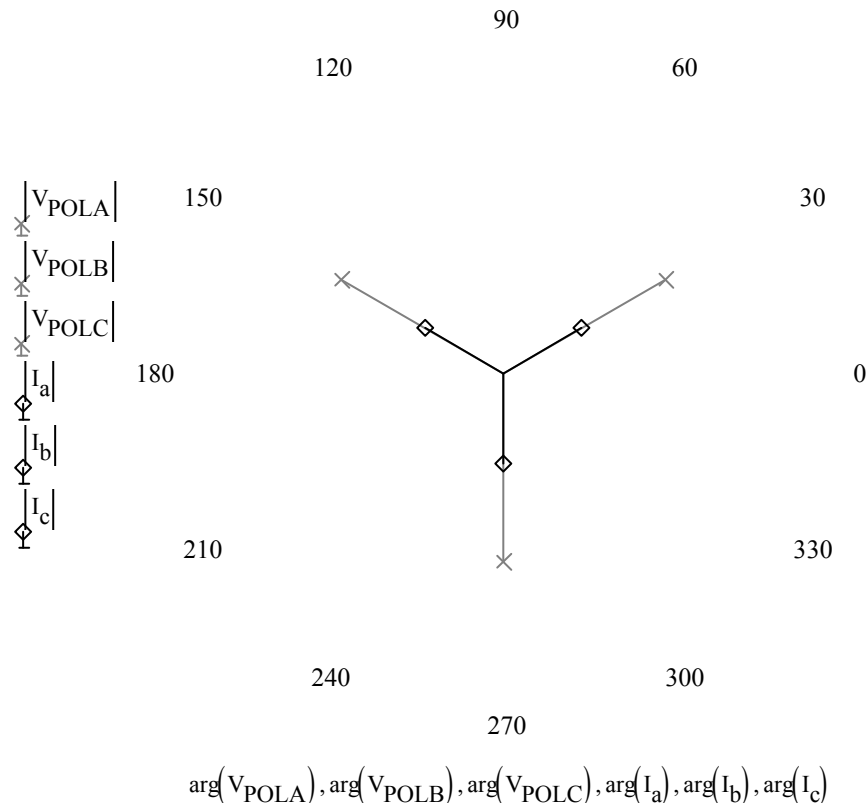
Μετά ορίζουμε τις μεταβλητές πόλωσης των στοιχείων κατεύθυνσης:

$$V_{POLA} := V_b - V_c \quad V_{POLA} = 69.6 \text{ V} \quad \arg(V_{POLA}) = -90 \cdot \text{deg}$$

$$V_{POLB} := V_c - V_a \quad V_{POLB} = 69.6 \text{ V} \quad \arg(V_{POLB}) = 150 \cdot \text{deg}$$

$$V_{POLC} := V_a - V_b \quad V_{POLC} = 69.6 \text{ V} \quad \arg(V_{POLC}) = 30 \cdot \text{deg}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα των μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας των στοιχείων κατεύθυνσης.



Σχήμα 4.3 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων.

Και τέλος υπολογίζουμε τις ροπές του καθενός στοιχείου κατεύθυνσης σύνδεσης  $90^\circ$

$$T_A := V_{POLA} \cdot I_a \cdot \cos(\arg(V_{POLA}) - \arg(I_a)) \quad T_A = 2.331 \times 10^3 \text{ W}$$

$$T_B := V_{POLB} \cdot I_b \cdot \cos(\arg(V_{POLB}) - \arg(I_b)) \quad T_B = 2.331 \times 10^3 \text{ W}$$

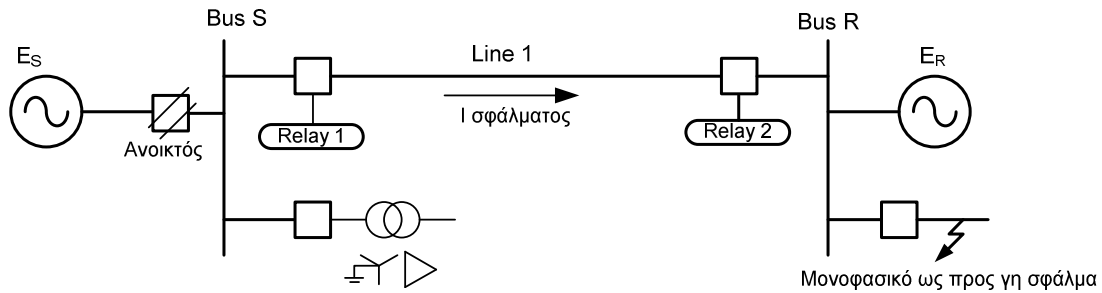
$$T_C := V_{POLC} \cdot I_c \cdot \cos(\arg(V_{POLC}) - \arg(I_c)) \quad T_C = 2.331 \times 10^3 \text{ W}$$

Επειδή οι παραπάνω ροπές είναι μεγαλύτερες από το μηδέν (θετικό πρόσημο) όλα τα στοιχεία κατεύθυνσης ορίζουν την κατεύθυνση του σφάλματος ως ορθης φοράς.

Για συμμετρικά σφάλματα, όλα τα στοιχεία κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$  συμφωνούν στην κατεύθυνση του σφάλματος. Αυτή η συμφωνία κατεύθυνσης συμβαίνει πάντοτε για συμμετρικά σφάλματα. Συμφωνούν όμως, αυτά τα στοιχεία κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$  αν το σφάλμα είναι μη συμμετρικό;

Παράδειγμα 4.2

Ο Warrington [11] προσδιορίζει μια περίπτωση σφάλματος εξαρτώμενη από το σύστημα, στην οποία τα στοιχεία κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$  λειτουργούν αντικανονικά. Η περίπτωση αυτή (σχήμα 4.4) είναι ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα αντίστροφης φοράς, όπου το εισερχόμενο ρεύμα στον ζυγό S είναι κυρίως μηδενικής ακολουθίας.



Σχήμα 4.4 Δίκτυο για το παράδειγμα 4.2

Η λύση του παραδείγματος αυτού γίνεται με την βοήθεια του MathCad.

Ορισμοί

$$\begin{aligned} V_A &:= W & KVA &:= 1000W & MVA &:= 1000KVA \\ \mu &:= 1.0 & MW &:= MVA & MVAr &:= MVA \end{aligned}$$

$$a := e^{\frac{2\pi i}{3}} \quad A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad a = -0.5 + 0.866i \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Δεδομένα

$$V_S := \frac{116}{\sqrt{3}} V \quad V_R := \frac{116}{\sqrt{3}} V$$

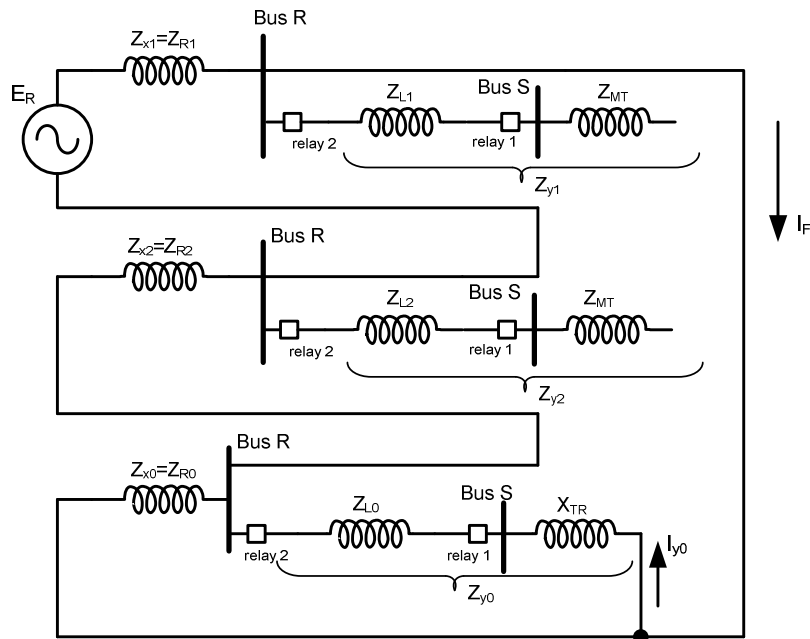
$$Z_{S1} := 0.8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega \quad Z_{R1} := Z_{S1} \quad Z_{L1} := 8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega$$

$$Z_{S0} := 2.4 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega \quad Z_{R0} := Z_{S0} \quad Z_{L0} := 24 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega$$

$$Z_{S2} := Z_{S1} \quad Z_{R2} := Z_{R1} \quad Z_{L2} := Z_{L1} \quad X_{TR} := 2.4 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega$$

Απο το κύκλωμα του σχήματος 4.4 κατασκευάζουμε τα κυκλώματα ακολουθίας, τα οποία και τα συνδέουμε στο σημείο του σφάλματος για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Τα κυκλώματα αυτά φαίνονται στο σχήμα 4.5.





Σχήμα 4.5 Κυκλώματα ακολουθίας του δικτύου του σχήματος 4.4

Στο παραπάνω σχήμα ορίζουμε:

$$Z_{x1} := Z_{R1} \quad Z_{x2} := Z_{x1} \quad Z_{x0} := Z_{R0} \quad Z_{y0} := X_{TR} + Z_{L0}$$

$$Z_1 := Z_{x1} \quad Z_2 := Z_{x2} \quad Z_0 := \frac{Z_{x0} \cdot Z_{y0}}{Z_{x0} + Z_{y0}}$$

Βρίσκουμε το ισοδύναμο Thevenin ως προς τον κόμβο του σφάλματος

$$Z_{th} := Z_1 + Z_2 + Z_0 \quad V_{th} := V_R$$

Με την βοήθεια του ισοδύναμου Thevenin υπολογίσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Μετά με την χρήση διαιρέτη ρεύματος υπολογίζουμε το ρεύμα που ρέει στους δυο ηλεκτρονόμους.

$$I_F := \frac{V_{th}}{Z_{th}} \quad I_F = -17.624iA$$

$$I_{y0} := I_F \cdot \frac{Z_{x0}}{Z_{x0} + Z_{y0}} \quad I_{y0} = -1.469iA$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} I_{y0} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad I_{abc} := A_1 \cdot I_{012} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} -1.469i \\ -1.469i \\ -1.469i \end{pmatrix} A \quad \arg(I_{abc}) = \begin{pmatrix} -90 \\ -90 \\ -90 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$I_a := I_{abc_0} \quad I_b := I_{abc_1} \quad I_c := I_{abc_2}$$

Αφού έχουμε υπολογίσει τα ρεύματα των φάσεων που ρέουν στην θέση του ηλεκτρονόμου, ορίζουμε τώρα τις μεταβλητές λειτουργίας για τα στοιχεία κατεύθυνσης.

$$\begin{aligned} I_{OPA1} &:= I_a & I_{OPA1} &= 1.469 \text{ A} & \arg(I_{OPA1}) &= -90 \cdot \text{deg} \\ I_{OPB1} &:= I_b & I_{OPB1} &= 1.469 \text{ A} & \arg(I_{OPB1}) &= -90 \cdot \text{deg} \\ I_{OPC1} &:= I_c & I_{OPC1} &= 1.469 \text{ A} & \arg(I_{OPC1}) &= -90 \cdot \text{deg} \end{aligned}$$

Με την χρήση του ρεύματος σφάλματος  $I_F$  υπολογίζουμε την τάση θετικής και αρνητικής ακολουθίας του ηλεκτρονόμου 1. Επειδή δεν έχουμε ροή ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας στην γραμμή 1 η τάση στον ηλεκτρονόμο 1 θα είναι ίση με την τάση στον ζυγό R.

$$V_{\text{relay1}} := V_R - I_F \cdot Z_1 \quad V_{\text{relay1}} = 52.873 \text{ V}$$

$$V_{\text{relay2}} := -I_F \cdot Z_2 \quad V_{\text{relay2}} = -14.1 \text{ V}$$

Ενώ για την τάση μηδενικής ακολουθίας έχουμε:

$$V_{\text{relay0}} := -I_{y0} \cdot X_{TR} \quad V_{\text{relay0}} = -3.525 \text{ V}$$

Αφού έχουμε υπολογίσει τις τάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, υπολογίζουμε τώρα την τάση στον ηλεκτρονόμο 1.

$$V_{012} := \begin{pmatrix} V_{\text{relay0}} \\ V_{\text{relay1}} \\ V_{\text{relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{abc}} := A_1 \cdot V_{012} \quad \arg(V_{\text{abc}}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -111.555 \\ 111.555 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$V_a := V_{\text{abc}_0} \quad V_b := V_{\text{abc}_1} \quad V_c := V_{\text{abc}_2}$$

Μετά ορίζουμε τις μεταβλητές πόλωσης των στοιχείων κατεύθυνσης:

$$V_{POLA1} := V_b - V_c \quad V_{POLA1} = 116 \text{ V} \quad \arg(V_{POLA1}) = -90 \cdot \text{deg}$$

$$V_{POLB1} := V_c - V_a \quad V_{POLB1} = 82.138 \text{ V} \quad \arg(V_{POLB1}) = 135.079 \cdot \text{deg}$$

$$V_{POLC1} := V_a - V_b \quad V_{POLC1} = 82.138 \text{ V} \quad \arg(V_{POLC1}) = 44.921 \cdot \text{deg}$$

Υπολογίζουμε τώρα το ρεύμα στον ηλεκτρονόμο 2.

$$I_{012} := \begin{pmatrix} -I_{y0} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 1.469i \\ 1.469i \\ 1.469i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \arg(I_{\text{abc}}) = \begin{pmatrix} 90 \\ 90 \\ 90 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$I_a := I_{\text{abc}_0} \quad I_b := I_{\text{abc}_1} \quad I_c := I_{\text{abc}_2}$$

Αφού έχουμε υπολογίσει τα ρεύματα των φάσεων που ρέουν στην θέση του ηλεκτρονόμου, ορίζουμε τώρα τις μεταβλητές λειτουργίας για τα στοιχεία κατεύθυνσης.

$$I_{OPA2} := I_a \quad I_{OPA2} = 1.469 \text{ A} \quad \arg(I_{OPA2}) = 90 \cdot \text{deg}$$

$$I_{OPB2} := I_b \quad I_{OPB2} = 1.469 \text{ A} \quad \arg(I_{OPB2}) = 90 \cdot \text{deg}$$

$$I_{OPC2} := I_c \quad I_{OPC2} = 1.469 \text{ A} \quad \arg(I_{OPC2}) = 90 \cdot \text{deg}$$

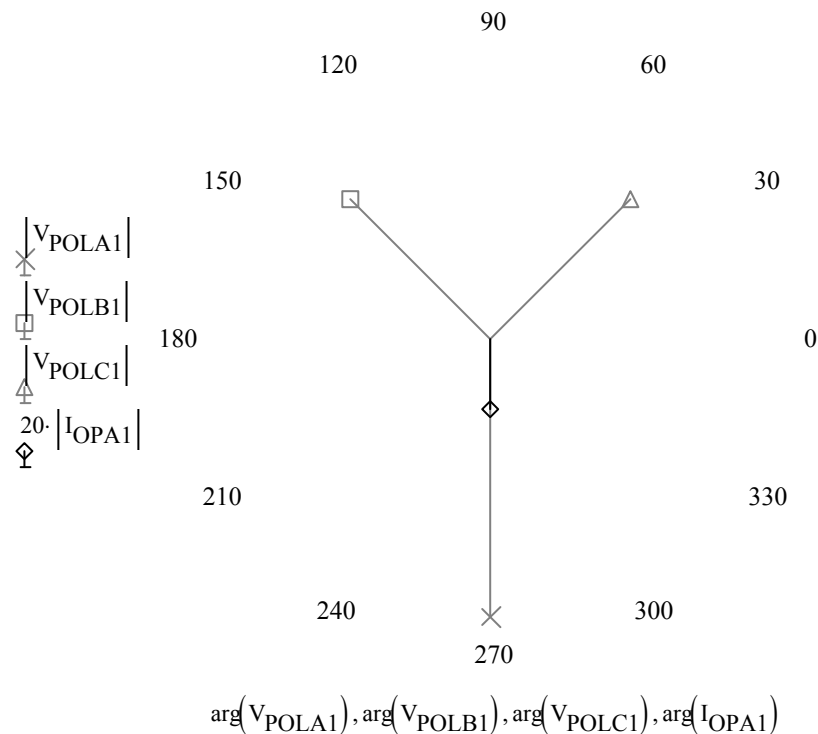
Ομοία με τον υπολογισμό της τάσης στον ηλεκτρονόμο 1, υπολογίζουμε την τάση στον ηλεκτρονόμο 2.

$$\begin{aligned}
 V_{\text{relay1}} &:= V_R - I_F \cdot Z_1 & V_{\text{relay1}} &= 52.873\text{V} \\
 V_{\text{relay2}} &:= -I_F \cdot Z_2 & V_{\text{relay2}} &= -14.1\text{V} \\
 V_{\text{relay0}} &:= -I_{y0} \cdot Z_{y0} & V_{\text{relay0}} &= -38.774\text{V} \\
 V_{012} &:= \begin{pmatrix} V_{\text{relay0}} \\ V_{\text{relay1}} \\ V_{\text{relay2}} \end{pmatrix} & V_{\text{abc}} &:= A_1 \cdot V_{012} & \arg(V_{\text{abc}}) &= \begin{pmatrix} 8.481 \times 10^{-15} \\ -135.079 \\ 135.079 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \\
 V_a &:= V_{\text{abc}_0} & V_b &:= V_{\text{abc}_1} & V_c &:= V_{\text{abc}_2}
 \end{aligned}$$

Μέτα ορίζουμε τις μεταβλητές πόλωσης των στοιχείων κατεύθυνσης:

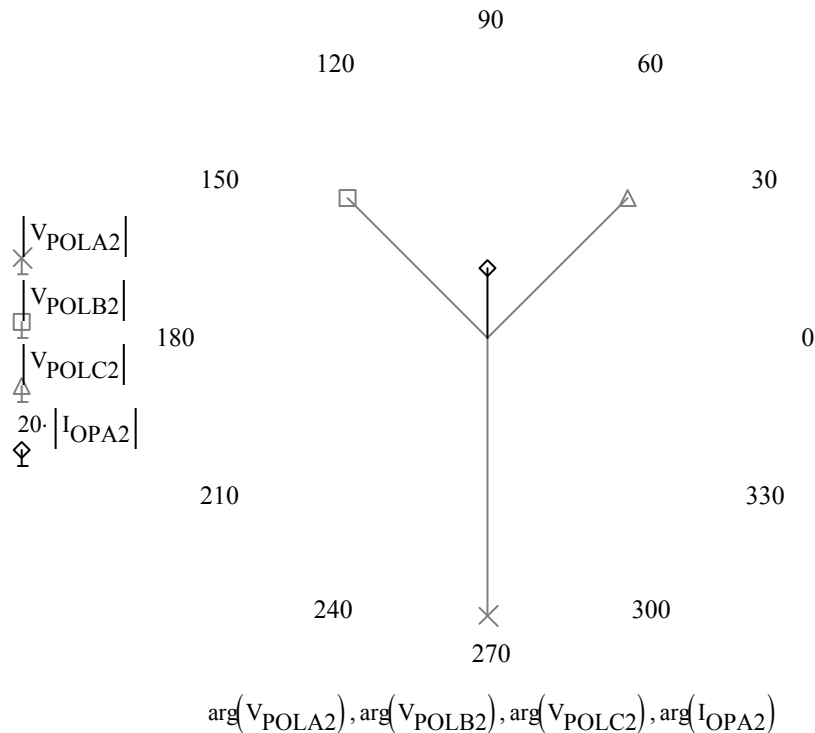
$$\begin{aligned}
 V_{\text{POLA2}} &:= V_b - V_c & V_{\text{POLA2}} &= 116\text{ V} & \arg(V_{\text{POLA2}}) &= -90 \cdot \text{deg} \\
 V_{\text{POLB2}} &:= V_c - V_a & V_{\text{POLB2}} &= 82.138\text{ V} & \arg(V_{\text{POLB2}}) &= 135.079 \cdot \text{deg} \\
 V_{\text{POLC2}} &:= V_a - V_b & V_{\text{POLC2}} &= 82.138\text{ V} & \arg(V_{\text{POLC2}}) &= 44.921 \cdot \text{deg}
 \end{aligned}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα των μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας των στοιχείων κατεύθυνσης.



Σχήμα 4.6 Μεταβλητές πόλωσης και λειτουργίας στον ηλεκτρονόμο 1

Στο σχήμα 4.7 φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα των μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας των στοιχείων κατεύθυνσης.



Σχήμα 4.7 Μεταβλητές πόλωσης και λειτουργίας στον ηλεκτρονόμο 2

Και τέλος υπολογίζουμε τις ροπές του καθενός στοιχείου κατεύθυνσης σύνδεσης 90° στον ηλεκτρονόμο 1.

$$T_A := V_{POLA1} \cdot I_{OPA1} \cdot \cos(\arg(V_{POLA1}) - \arg(I_{OPA1})) \quad T_A = 170.369 \text{ W}$$

$$T_B := V_{POLB1} \cdot I_{OPB1} \cdot \cos(\arg(V_{POLB1}) - \arg(I_{OPB1})) \quad T_B = -85.184 \text{ W}$$

$$T_C := V_{POLC1} \cdot I_{OPC1} \cdot \cos(\arg(V_{POLC1}) - \arg(I_{OPC1})) \quad T_C = -85.184 \text{ W}$$

Και στον ηλεκτρονόμο 2.

$$T_A := V_{POLA2} \cdot I_{OPA2} \cdot \cos(\arg(V_{POLA2}) - \arg(I_{OPA2})) \quad T_A = -170.369 \text{ W}$$

$$T_B := V_{POLB2} \cdot I_{OPB2} \cdot \cos(\arg(V_{POLB2}) - \arg(I_{OPB2})) \quad T_B = 85.184 \text{ W}$$

$$T_C := V_{POLC2} \cdot I_{OPC2} \cdot \cos(\arg(V_{POLC2}) - \arg(I_{OPC2})) \quad T_C = 85.184 \text{ W}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς των ροπών βλέπουμε ότι το στοιχείο της φάσης A του ηλεκτρονόμου 1 καθώς επίσης και τα στοιχεία των φάσεων B και C του ηλεκτρονόμου 2 ορίζουν λάθος κατεύθυνσης σφάλματος.

Για το σφάλμα που φαίνεται στο σχήμα 4.6, ο ορισμός της κατεύθυνσης πρέπει να είναι ορθής φοράς για τα στοιχεία του ζυγού S και αντίστροφης για τα στοιχεία του ζυγού R.

Στα πολικά διαγράμματα των σχημάτων 4.6 και 4.7 η φάση A του ηλεκτρονόμου 1 και οι φάσεις B και C του ηλεκτρονόμου 2 ορίζουν την κατεύθυνση του σφάλματος ως ορθής φοράς. Επίσης οι φάσεις B και C του ηλεκτρονόμου 1 και η φάση A του ηλεκτρονόμου 2 ορίζουν την κατεύθυνση του σφάλματος ως αντίστροφης φοράς. Παρατηρήστε ότι τα στοιχεία κατεύθυνσης φάσης σε κάθε ζυγό δεν συμφωνούν στην κατεύθυνση του σφάλματος.

Αυτή η ασυμφωνία οφείλεται στην μεγάλη διαφορά φάσης των μεταβλητών πόλωσης. Με αυτές τις μεταβλητές πόλωσης και λειτουργίας, τουλάχιστον ένα στοιχείο κατεύθυνσης σε κάθε ζυγό παίρνει λάθος απόφαση κατεύθυνσης.

Οι εσφαλμένες αποφάσεις κατεύθυνσης των στοιχείων των φάσεων B και C μπορεί να προκαλέσουν μια ανεπιθύμητη διακοπή της υγιούς γραμμής αν το ρεύμα του σφάλματος είναι πάνω από την ρύθμιση (κατώφλι) του ηλεκτρονόμου υπερέντασης φάσης. Σε αυτό το παράδειγμα, το ρεύμα σφάλματος είναι κάτω από την ρύθμιση (κατώφλι) ενός τυπικού στοιχείου υπερέντασης φάσης. Ωστόσο, σε γραμμές μικρού μήκους το ρεύμα σφάλματος αυξάνεται αρκετά, με αποτέλεσμα το στοιχείο υπερέντασης φάσης να ενεργοποιείται.

#### 4.3.2 Βελτιωμένο Στοιχείο Κατεύθυνσης Φάσης – Στοιχείο Κατεύθυνσης Θετικής Ακολουθίας

Για τα τριφασικά σφάλματα που συζητήθηκαν παραπάνω, όλοι οι ορισμοί κατεύθυνσης των στοιχείων αυτών συμφωνούν, όμως για τα εκτός ζώνης μονοφασικά ως προς γη σφάλματα διαφωνούν. Πως μπορούμε να εξαλείψουμε την ασυμφωνία αυτή των στοιχείων κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$ ;

Παρακάτω παρατίθενται τρεις πιθανές λύσεις σε αυτό το πρόβλημα:

Λύση 1η Να απαιτηθεί συμφωνία όλων των στοιχείων κατεύθυνσης φάσης πριν τον ορισμό της κατεύθυνσης του σφάλματος.

Η λύση 1 προσφέρει την επιθυμητή ασφάλεια στην περίπτωση των μονοφασικών ως προς γη σφαλμάτων, όμως με αυτήν εμποδίζεται η λειτουργία των στοιχείων κατεύθυνσης φάσης στα διφασικά σφάλματα. Απαιτείται λοιπόν ένα ανεξάρτητο στοιχείο κατεύθυνσης για την ανίχνευση της κατεύθυνσης των διφασικών σφαλμάτων.

Λύση 2η Να γίνεται επιτήρηση του κάθε ορισμού κατεύθυνσης από ένα διφασικό στοιχείο υπερέντασης (Στην περίπτωση του μονοφασικού ως προς γη σφάλματος, το ρεύμα μεταξύ φάσεων είναι μηδέν).

Ενώ είναι εφικτή αυτή η λύση σε ένα αριθμητικό (numerical) ηλεκτρονόμο, δεν είναι εφαρμόσιμη σε έναν ηλεκτρομηχανικό ηλεκτρονόμο.

Λύση 3η Να δεσμεύονται οι ορισμοί κατεύθυνσης των τριφασικών στοιχείων κατεύθυνσης, από στοιχεία κατεύθυνσης φάσης αν το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας είναι πάνω από κάποιο όριο.

Η τρίτη λύση είναι ικανοποιητική αν δεν υπάρχει η απαίτηση να λειτουργούν οι ηλεκτρονόμοι φάσης για διφασικά ως προς γη σφάλματα.

Ας εξετάσουμε τώρα μια τέταρτη λύση, η οποία στηρίζεται στην πρώτη απαιτεί όμως λιγότερα στοιχεία κατεύθυνσης για να λειτουργήσει.

Οι τάσεις και τα ρεύματα θετικής ακολουθίας είναι οι μόνες μεταβλητές ακολουθίας που είναι παρούσες στα συμμετρικά σφάλματα. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μεταβλητές αυτές για να υλοποιήσουμε ένα απλό τριφασικό στοιχείο κατεύθυνσης και να αντικαταστήσουμε τα τρία ανεξάρτητα στοιχεία κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$ . Η χρήση ενός στοιχείου κατεύθυνσης συμμετρικού σφάλματος, για την επιτήρηση στοιχείων φάσης αποστάσεως ή υπερέντασης, δεν απαιτεί ένα ανεξάρτητο στοιχείο κατεύθυνσης για τα μη συμμετρικά σφάλματα. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των στοιχείων κατεύθυνσης φάσης μειώνεται σε ένα.

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις εισόδους για το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

**Πίνακας 2: Είσοδοι του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας**

Φάση	Μεταβλητή Λειτουργίας $I_{10P}$	Μεταβλητή πάλωσης $V_{1POL}$
Τριφασικό	$3I_1(1\angle Z_{L1})$	$3V_1$

Με την εξίσωση (4.4) υπολογίζεται η ροπή ( $T_{32P}$ ) του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας:

$$T_{32P} = |3V_1||3I_1|\cos[\angle 3V_1 - (\angle 3I_1 + \angle Z_{L1})] \quad (4.4)$$

όπου:

$3I_1$  = Το ρεύμα θετικής ακολουθίας:

$3V_1$  = Η τάσης θετικής ακολουθίας:

$a$  =  $1\angle 120^\circ$

$\angle Z_{L1}$  = Η γωνία της σύνθετης αντίστασης θετικής ακολουθίας της γραμμής.

Το πρόσημο της ροπής  $T_{32P}$  είναι θετικό για τα ορθής φοράς και αρνητικό για τα αντίστροφης φοράς τριφασικά σφάλματα. Ως ένα επιπρόσθετο μέτρο ασφάλειας, η τιμή της  $T_{32P}$  πρέπει να υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο πριν το στοιχείο θεωρήσει τον ορισμό της κατεύθυνσης σωστό. Αυτή η απαίτηση προλαμβάνει εσφαλμένες αποφάσεις κατεύθυνσης όταν, το  $|V_{1POL}|$  ή το  $|I_{10P}|$  είναι τόσο μικρά ώστε να είναι αναξιόπιστα τα γωνιακά ορίσματά τους.

Απόκριση της  $T_{32P}$  στο μονοφασικό ως προς γη σφάλμα που φαίνεται στο σχήμα 4.4.

Πως αντιδρά το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας που βρίσκεται στο ζυγό R στο αντίστροφης φοράς μονοφασικό σφάλμα που παρουσιάστηκε νωρίτερα; Υπενθυμίζεται ότι η τιμή της  $T_{32P}$  πρέπει να υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο ροπής. Επειδή το  $I_{10P}$  είναι

μηδέν για αυτό το μονοφασικό σφάλμα αντίθετης φοράς το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας δεν θα δώσει έξοδο.

#### Απόκριση της $T_{32P}$ σε τριφασικά σφάλματα μηδενικής τάσης

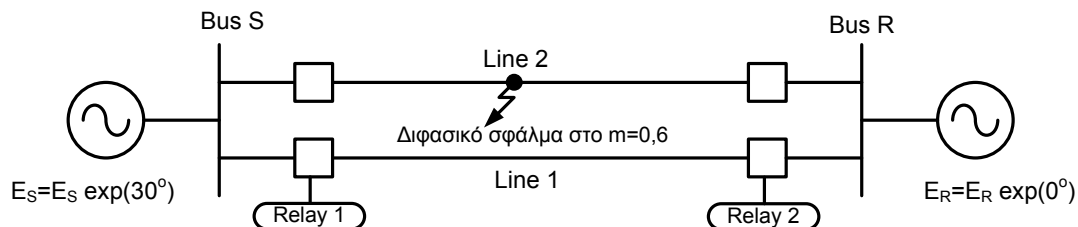
Αν η μεταβλητή πόλωσης του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας δεν αποθηκεύεται σε μνήμη, το στοιχείο αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει για τριφασικά σφάλματα όπου οι τιμές των τάσεων και των τριών φάσεων είναι σχεδόν μηδέν (ούτε τα στοιχεία κατεύθυνσης φάσης σύνδεσης  $90^\circ$  μπορούν). Με την χρήση μνήμης τάσης θετικής ακολουθίας ( $V_{1MEM}$ ) αντί της  $V_{1POL}$ , εξαλείφεται το πρόβλημα της παρουσίας χαμηλής τάσης στον ηλεκτρονόμο για ένα τριφασικό σφάλμα που συμβαίνει πολύ κοντά στον ζυγό όπου είναι εγκατεστημένος ο ηλεκτρονόμος αυτός. Με την αντικατάσταση της  $V_{1POL}$  από την  $V_{1MEM}$  στην εξίσωση (4.4), το στοιχείο  $T_{32P}$  μπορεί να λειτουργεί ορθά, για ένα τριφασικό σφάλμα πολύ κοντά στον ζυγό, μέχρι την λήξη της μνήμης.

#### Το εκτός ζώνης διφασικό σφάλμα με υψηλό φορτίο επηρεάζει δυσμενώς το στοιχείο $T_{32P}$ .

Το στοιχείο  $T_{32P}$  μπορεί να χρειαστεί κάποια επιπρόσθετη επιτήρηση αν το σφάλμα δεν εμπλέκει και τις τρεις φάσεις, και οι τιμές των ρευμάτων σφάλματος προσεγγίζουν αυτά του φορτίου. Αυτό αναλύεται στο παρακάτω παράδειγμα.

#### Παράδειγμα 4.3

Το σχήμα 4.8 παρουσιάζει την απόκρισή ενός στοιχείου  $T_{32P}$  για ένα διφασικό σφάλμα μεταξύ των φάσεων BC (σύνθετες αντιστάσεις πηγών  $Z_{S1} = Z_{R1} = j \cdot 0.8 \Omega$  και σύνθετες αντιστάσεις γραμμών  $Z_{L1} = Z_{L2} = j \cdot 4 \Omega$ ). Για αυτό το παράδειγμα, το φορτίο ρέει από τα αριστερά προς τα δεξιά ( $\delta = 30^\circ$ ) και η τιμή του φορτίου πριν το σφάλμα είναι 4.8 A στο δευτερεύον του ΜΕ.



Σχήμα 4.8 Δίκτυο του παραδείγματος 4.3

Η λύση του παραδείγματος αυτού γίνεται με την βοήθεια του MathCad.

#### Ορισμοί

VA := W

KVA := 1000W

MVA := 1000KVA

pu := 1.0

MW := MVA

MVA<sub>r</sub> := MVA

$a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$$

$a = -0.5 + 0.866i$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Δεδομένα

$$V_S := \frac{116}{\sqrt{3}} \cdot e^{j \cdot 30 \text{deg}} \text{V} \quad V_R := \frac{116}{\sqrt{3}} \text{V}$$

$$Z_{S1} := 0.8 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}} \Omega \quad Z_{R1} := Z_{S1} \quad Z_{L1\_1} := 4 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}} \Omega \quad Z_{L2\_1} := Z_{L1\_1}$$

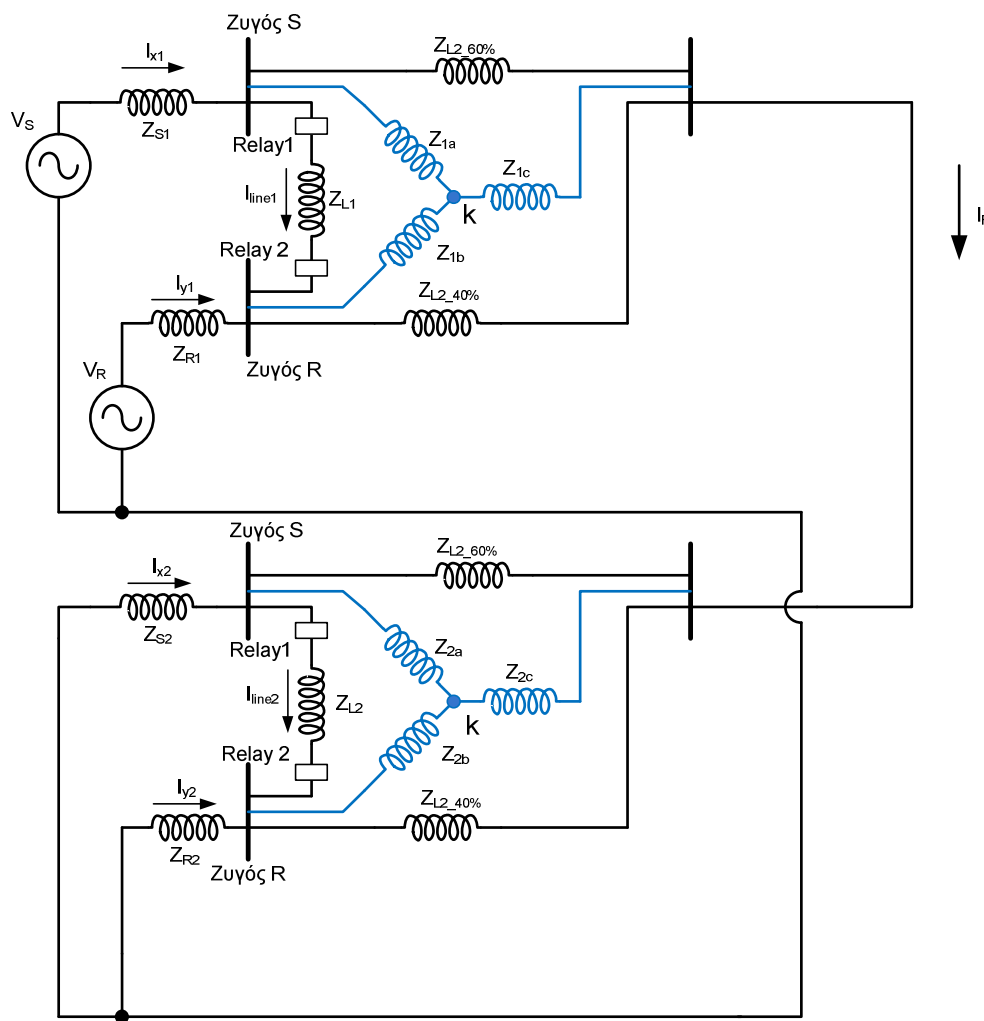
$$Z_{S2} := Z_{S1} \quad Z_{R2} := Z_{R1} \quad Z_{L1\_2} := Z_{L1\_1} \quad Z_{L2\_2} := Z_{L2\_1} \quad m := 0.6$$

Υπολογισμός ρεύματος φορτίου

$$\text{Είναι } I_{\text{gen\_load}} := \left( \frac{V_S - V_R}{Z_{S1} + Z_{R1} + \frac{Z_{L1\_1} \cdot Z_{L2\_1}}{Z_{L1\_1} + Z_{L2\_1}}} \right) \quad |I_{\text{gen\_load}}| = 9.63 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{gen\_load}}) = 15 \cdot \text{deg}$$

$$I_{\text{line\_load}} := I_{\text{gen\_load}} \cdot \frac{Z_{L2\_1}}{Z_{L1\_1} + Z_{L2\_1}} \quad |I_{\text{line\_load}}| = 4.815 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{line\_load}}) = 15 \cdot \text{deg}$$

Από το κύκλωμα του σχήματος 4.8 κατασκευάζουμε τα κυκλώματα ακολουθίας τα οποία και τα συνδέουμε στο σημείο του σφάλματος για να υπολογίσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Τα κυκλώματα αυτά φαίνονται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.8



Μετατρέπουμε τις αντιστάσεις που είναι σε τρίγωνο σε αστέρα, για να βρούμε στις αντιστάσεις  $Z_{x1}$  και  $Z_{y1}$  που είναι αριστερα και δεξια του σφάλματος. Οπότε έχουμε:

$$Z_{1\text{trig}60\%} := m \cdot Z_{L1\_1} \quad Z_{1\text{trig}40\%} := (1 - m) \cdot Z_{L1\_1} \quad Z_{1\text{trig\_SR}} := Z_{L2\_1}$$

$$Z_{1a} := \frac{(Z_{1\text{trig}60\%} \cdot Z_{1\text{trig\_SR}})}{Z_{1\text{trig}60\%} + Z_{1\text{trig\_SR}} + Z_{1\text{trig}40\%}} \quad Z_{1b} := \frac{(Z_{1\text{trig}40\%} \cdot Z_{1\text{trig\_SR}})}{Z_{1\text{trig}40\%} + Z_{1\text{trig\_SR}} + Z_{1\text{trig}60\%}}$$

$$Z_{1c} := \frac{(Z_{1\text{trig}60\%} \cdot Z_{1\text{trig}40\%})}{Z_{1\text{trig}60\%} + Z_{1\text{trig\_SR}} + Z_{1\text{trig}40\%}}$$

$$Z_{1a} = 1.2i \Omega \quad Z_{1b} = 0.889i \Omega \quad Z_{1c} = 0.48i \Omega$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι σύνθετες αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας. Οπότε έχουμε:

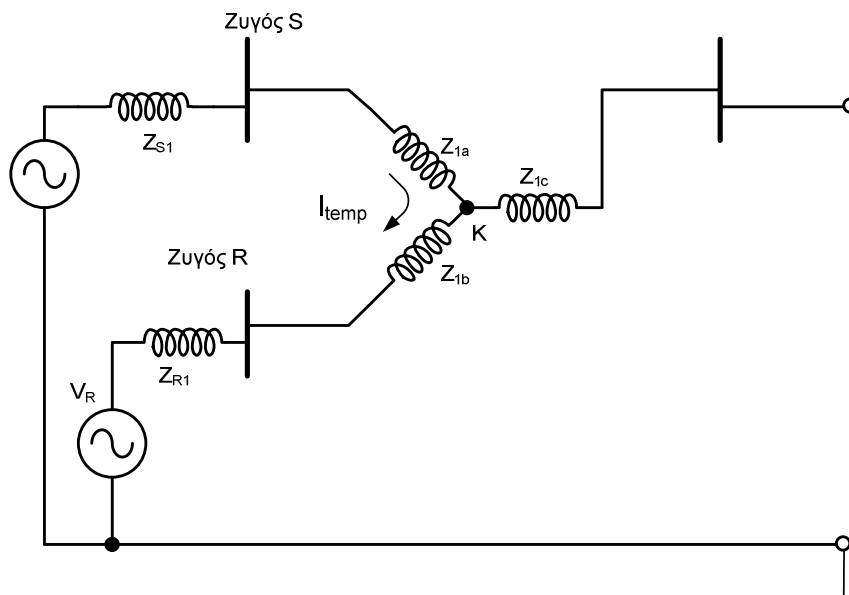
$$Z_{2a} := Z_{1a} \quad Z_{2b} := Z_{1b} \quad Z_{2c} := Z_{1c}$$

Στην συνέχεια ορίζουμε τις παρακάτω αντιστάσεις:

$$Z_{x1} := Z_{S1} + Z_{1a} \quad Z_{y1} := Z_{R1} + Z_{1b}$$

$$Z_{x2} := Z_{S2} + Z_{2a} \quad Z_{y2} := Z_{R2} + Z_{2b}$$

Μετά βρίσκουμε το ισοδύναμο Thevenin ως προς τον κόμβο του σφάλματος.



Σχήμα 4.10 Υπολογισμός τάσης Thevenin

$$Z_{th} := 2 \cdot Z_{1c} + 2 \cdot \frac{Z_{x1} \cdot Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$I_{temp} := \frac{V_S - V_R}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_{th} := V_S - I_{temp} \cdot Z_{x1}$$

Με την βοήθεια του ισοδυνάμου Thevenin υπολογίζουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

$$I_F := \frac{V_{th}}{Z_{th}} \quad I_F = 23.182 \text{ A}$$

Μετά υπολογίζουμε την τάση θετικής ακολουθίας του κόμβου k. Στην συνέχεια με την χρήση της τάσης αυτής υπολογίζουμε τα ρεύματα  $I_{x1}$  και  $I_{y1}$ . Με την βοήθεια αυτών των ρευμάτων υπολογίζουμε τις τάσεις θετικής ακολουθίας στους ηλεκτρονόμους 1 και 2. Και με αυτές τις τάσεις στην συνέχεια υπολογίζουμε τα ρεύματα θετικής ακολουθίας της γραμμής 1.

$$V_k := I_F \cdot \left( 2Z_{1c} + \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \right) \quad I_{y1} := \frac{V_R - V_k}{Z_{y1}} \quad V_{\text{relayR1}} := V_R - I_{y1} \cdot Z_{R1}$$

$$I_{x1} := \frac{V_S - V_k}{Z_{x1}} \quad V_{\text{relayS1}} := V_S - I_{x1} \cdot Z_{S1}$$

$$I_{\text{line1}} := \frac{V_{\text{relayS1}} - V_{\text{relayR1}}}{Z_{L2\_1}} \quad |I_{\text{line1}}| = 4.914 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{line1}}) = 10.438 \text{ deg}$$

$$I_{\text{relayS1}} := I_{\text{line1}} \quad I_{\text{relayR1}} := -I_{\text{line1}}$$

Επομένως τα ρεύματα και οι τάσεις θετικής ακολουθίας των ηλεκτρονόμων 1 και 2 είναι:

$$V_{\text{relayS1}} = 57.086 \text{ V} \quad \arg(V_{\text{relayS1}}) = 25.096 \cdot \text{deg} \quad V_{\text{relayR1}} = 55.473 \text{ V} \quad \arg(V_{\text{relayR1}}) = 5.047 \cdot \text{deg}$$

$$I_{\text{relayS1}} = 4.914 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{relayS1}}) = 10.438 \cdot \text{deg} \quad I_{\text{relayR1}} = 4.914 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{relayR1}}) = -169.562 \cdot \text{deg}$$

Τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας τα υπολογίζουμε με την χρήση διαιρέτη ρεύματος. Στην συνέχεια με αυτά τα ρεύματα υπολογίζουμε τις τάσεις αρνητικής ακολουθίας στους ηλεκτρονόμους 1 και 2. Και τέλος με την χρήση των τάσεων αυτών το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας της γραμμής 1.

$$I_{x2} := -I_F \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{y2} + Z_{x2}} \quad V_{\text{relayS2}} := -I_{x2} \cdot Z_{S2} \quad I_{y2} := -I_F \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{y2} + Z_{x2}} \quad V_{\text{relayR2}} := -I_{y2} \cdot Z_{R2}$$

$$I_{\text{line2}} := \frac{V_{\text{relayS2}} - V_{\text{relayR2}}}{Z_{L2\_2}} \quad I_{\text{line2}} = 0.391 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{line2}}) = 103.705 \cdot \text{deg}$$

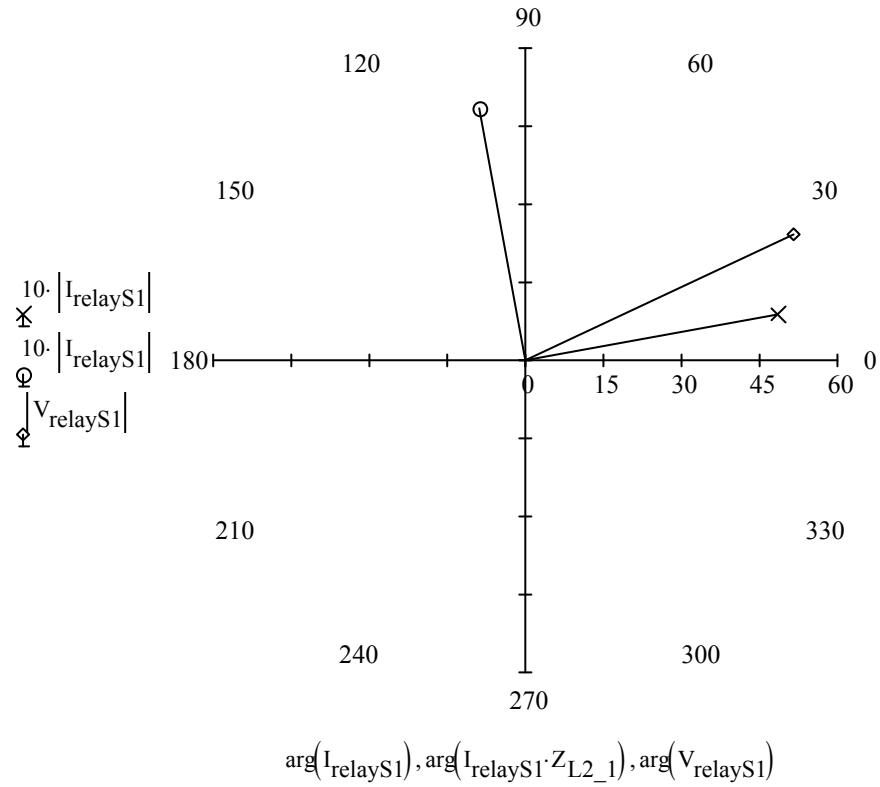
$$I_{\text{relayS2}} := I_{\text{line2}} \quad I_{\text{relayR2}} := -I_{\text{line2}}$$

Επομένως τα ρεύματα και οι τάσεις αρνητικής ακολουθίας των ηλεκτρονόμων 1 και 2 είναι:

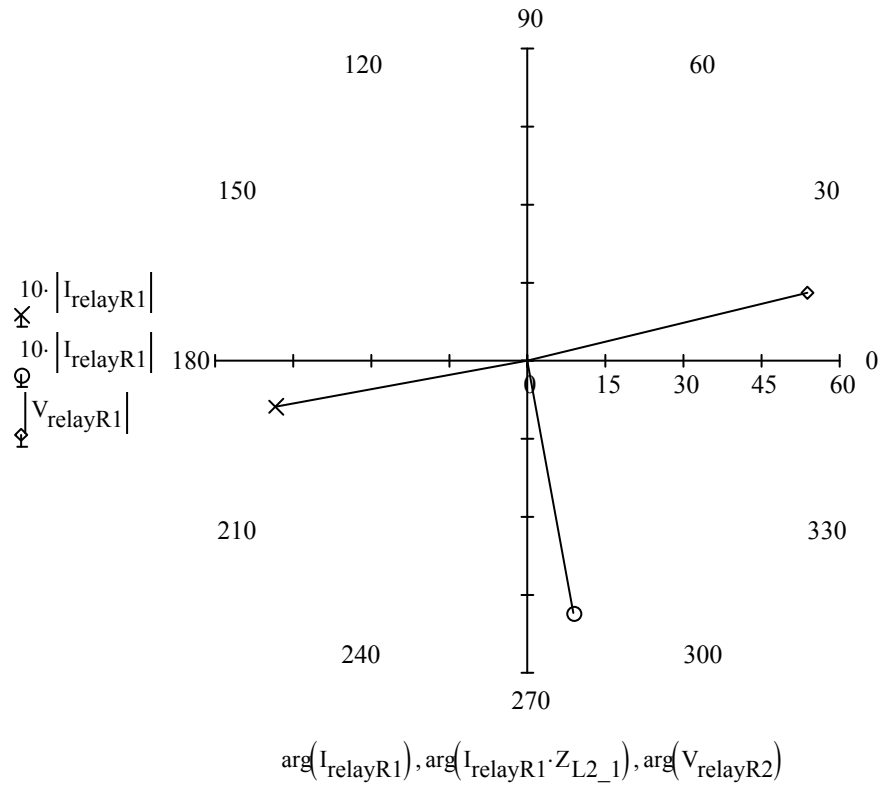
$$V_{\text{relayS2}} = 8.491 \text{ V} \quad \arg(V_{\text{relayS2}}) = 13.705 \cdot \text{deg} \quad V_{\text{relayR2}} = 10.055 \text{ V} \quad \arg(V_{\text{relayR2}}) = 13.705 \cdot \text{deg}$$

$$I_{\text{relayS2}} = 0.391 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{relayS2}}) = 103.705 \cdot \text{deg} \quad I_{\text{relayR2}} = 0.391 \text{ A} \quad \arg(I_{\text{relayR2}}) = -76.295 \cdot \text{deg}$$

Παρακάτω στα σχήματα 4.11 και 4.12 φαίνονται τα διανυσματικά διαγράμματα των ρευμάτων και τάσεων θετικής ακολουθίας των ηλεκτρονόμων 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.11 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων του Η/Ν 1



Σχήμα 4.12 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων του Η/Ν 2

Υπολογισμός ροπών ηλεκτρονόμου 1

$$T_{32P} := |3V_{\text{relayS1}}| \cdot |3I_{\text{relayS1}}| \cdot \cos[\arg(3V_{\text{relayS1}}) - (\arg(3I_{\text{relayS1}}) + \arg(Z_{L2\_1}))]$$

$$T_{32P} = 638.959W$$

$$T_{32Q} := |3V_{\text{relayS2}}| \cdot |3I_{\text{relayS2}}| \cdot \cos[\arg(-3V_{\text{relayS2}}) - (\arg(3I_{\text{relayS2}}) + \arg(Z_{L2\_2}))]$$

$$T_{32Q} = 29.879W$$

Υπολογισμός ροπών ηλεκτρονόμου 2

$$T_{32P} := |3V_{\text{relayR1}}| \cdot |3I_{\text{relayR1}}| \cdot \cos[\arg(3V_{\text{relayR1}}) - (\arg(3I_{\text{relayR1}}) + \arg(Z_{L2\_1}))]$$

$$T_{32P} = 230.524W$$

$$T_{32Q} := |3V_{\text{relayR2}}| \cdot |3I_{\text{relayR2}}| \cdot \cos[\arg(-3V_{\text{relayR2}}) - (\arg(3I_{\text{relayR2}}) + \arg(Z_{L2\_2}))]$$

$$T_{32Q} = -35.383W$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς ροπών βλέπουμε ότι στο στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας του ηλεκτρονόμου 2 ορίζει λάθος την κατεύθυνση του σφάλματος. Βλέπουμε επίσης ότι το πρόβλημα αυτό εξαλείφεται με την χρήση στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας το οποίο ορίζει την κατεύθυνση του σφάλματος σωστά.

Το στοιχείο  $T_{32P}$  για τον ηλεκτρονόμο 2 ορίζει εσφαλμένα το σφάλμα ως ορθής φοράς  $T_{32P} = 230.524$ . Το στοιχείο δεν λειτουργεί ορθά επειδή η γωνία μεταξύ  $V_{\text{relayR1}}$  και  $I_{\text{relayR1}} \cdot 1 \angle Z_{L1}$  είναι μικρότερη των  $90^\circ$  (Σχήμα 4.12). Αυτός ο εσφαλμένος ορισμός κατεύθυνσης οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές των ρευμάτων του σφάλματος και του φορτίου είναι σχεδόν ίσες στην γραμμή 1. Μετακινώντας το σφάλμα στην γραμμή 2 πιο κοντά στον ζυγό R το στοιχείο  $T_{32P}$  του ηλεκτρονόμου 2 αναγνωρίζει ορθά το σφάλμα ως αντίθετης φοράς.

### 4.3.3 Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας

#### Στοιχεία κατεύθυνσης φάσης για μη συμμετρικά σφάλματα.

Χρειαζόμαστε ένα ανεξάρτητο στοιχείο κατεύθυνσης για να προσδιορίσουμε την κατεύθυνση ενός μη συμμετρικού σφάλματος. Ο ορισμός κατεύθυνσης αυτού του στοιχείου πρέπει να υπερισχύει του ορισμού του στοιχείου  $T_{32P}$  στα μη συμμετρικά σφάλματα.

Ποιες μεταβλητές πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ως είσοδο σε ένα στοιχείο κατεύθυνσης μη συμμετρικού σφάλματος; Πρέπει επομένως να προσδιορίζουμε ποιες μεταβλητές ακολουθίας είναι παρούσες στα διφασικά και στα διφασικά ως προς γη σφάλματα (βλέπε πίνακα 4.3).

Από τον Πίνακα 4.3, βλέπουμε ότι μόνο οι μεταβλητές θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι διαθέσιμες και για τους δυο τύπους μη συμμετρικών σφαλμάτων. Το φορτίο είναι ποσότητα θετικής ακολουθίας και παραπλανά το στοιχείο κατεύθυνσης όταν

συμβαίνουν μη συμμετρικά σφάλματα. Έτσι μόνο οι μεταβλητές αρνητικής ακολουθίας είναι κατάλληλες εισόδοι για ένα στοιχείο κατεύθυνσης μη συμμετρικών σφαλμάτων.

Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τις εισόδους για ένα παραδοσιακό στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας και με την εξίσωση (4.5) υπολογίζεται η ροπή του ( $T_{32Q}$ ).

**Πίνακας 4.3: Διαθέσιμες μεταβλητές ακολουθίας για μη συμμετρικά σφάλματα μεταξύ φάσεων**

Μεταβλητή Ακολουθίας	Διφασικό Σφάλμα	Διφασικό ως προς γη Σφάλμα.
$V_1$	NAI	NAI
$V_2$	NAI	NAI
$V_0$	OXI	OXI
$I_1$	NAI	NAI
$I_2$	NAI	NAI
$I_0$	OXI	OXI

**Πίνακας 4.4: Είσοδοι του στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας**

Μεταβλητή Λειτουργίας ( $I_{OP}$ )	Μεταβλητή Πόλωσης ( $V_{POL}$ )
$3I_1 \angle Z_{L1}$	$-3V_2$

$$T_{32Q} = |3V_2| |3I_2| \cos[\angle(-3V_2) - (\angle 3I_2 + \angle Z_{L1})] \quad (4.5)$$

όπου :

$$3I_2 = \text{Ρεύμα αρνητικής ακολουθίας: } 3I_2 = I_A + a^2 I_B + a I_C$$

$$-3V_2 = \text{Τάση αρνητικής ακολουθίας: } 3V_2 = V_A + a^2 V_B + a V_C$$

Η ροπή  $T_{32Q}$  είναι θετική για σφάλματα ορθής φοράς και αρνητική για σφάλματα αντίστροφης φοράς. Όπως και με το στοιχείο  $T_{32P}$ , η τιμή της  $T_{32Q}$  πρέπει να υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο. Χρησιμοποιώντας την  $V_2$  και το  $I_2$  από το κύκλωμα του σχήματος 4.8 στην εξίσωση (4.5) υπολογίζουμε την  $T_{32Q} = -35.383$  για τον ηλεκτρονόμο 2. Με το αρνητικό πρόσημο της  $T_{32Q}$  ορίζεται σωστά το σφάλμα ως αντίστροφης φοράς.

**Σημείωση:** Η ποσότητα  $3V_2$  που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (4.5) είναι πολλαπλασιασμένη με -1 για γίνει η ροπή θετική για σφάλματα ορθής φοράς.

Αν συνδυάσουμε τις ροπές των στοιχείων κατεύθυνσης αρνητικής και θετικής ακολουθίας δημιουργείται ένα στοιχείο ωφέλιμης ροπής κατεύθυνσης φάσης (net-phase directional element). Με την συνδυαζόμενη ροπή των  $T_{32P}$  και  $T_{32Q}$ , αντικαθιστούμε τα ξεχωριστά στοιχεία κατεύθυνσης φάσης. Ονομάζουμε το στοιχείο αυτό, στοιχείο ωφέλιμης ροπής φάσης  $T_{32PQ}$ . Ωστόσο, με την απλή πρόσθεση των ροπών των στοιχείων κατεύθυνσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας δεν εξαλείφουμε ικανοποιητικά την εσφαλμένη λειτουργία του ηλεκτρονόμου για το εκτός ζώνης διφασικό σφάλμα του σχήματος 4.8, εξαιτίας της δράσης τους στοιχείου  $T_{32P}$ . Για αυτό πρέπει να δώσουμε

μεγαλύτερη βαρύτητα στην ροπή  $T_{32Q}$  από ότι στην  $T_{32P}$  για να αποκτήσουμε την απαιτούμενη ασφάλεια.

Μπορούμε να διαιρέσουμε την ροπή θετικής ακολουθίας με κάποιον αριθμό μεγαλύτερο του 1 και να προσθέσουμε αυτή την σταθμισμένη ροπή  $T_{32P}$  στην ροπή  $T_{32Q}$ . Για παράδειγμα, μπορούμε να διαιρέσουμε την ροπή  $T_{32P}$  με 8. Χρησιμοποιώντας το στοιχείο ωφέλιμης ροπής φάσης για τον ηλεκτρονόμο 2 στον ζυγό R, έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$T_{32PQ} = T_{32Q} + \frac{1}{8}T_{32P} = -35,38 + 28,81 = -6,57$$

Επειδή  $T_{32PQ} < 0$ , ο ηλεκτρονόμος 2 ορίζει το σφάλμα ως αντίστροφης φοράς.

Είδαμε το στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας να συνδυάζεται με το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας για να διαμορφώσει ένα ασφαλές αποτέλεσμα ωφέλιμης ροπής φάσης. Αν ο ηλεκτρονόμος προστασίας δεν χρησιμοποιεί στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας, το στοιχείο  $T_{32Q}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ανεξάρτητο στοιχείο κατεύθυνσης για προστασία από μη συμμετρικά σφάλματα.

#### Εναλλακτική παράσταση του στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας

Η εξίσωση (4.5) χρησιμοποιεί έναν όρο συνημιτόνου για τον υπολογισμό της ροπής του παραδοσιακού στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας. Με τον όρο συνημιτόνου ορίζεται κατάλληλα η μέγιστη και η ελάχιστη ροπή. Δεδομένων δυο εισόδων  $A$  και  $B$ , που έχουν διαφορά φάσης  $\theta$  μοίρες, το  $\cos\theta$  είναι 1 (μέγιστο θετικό) όταν οι  $A$  και  $B$  σε φάση και μηδέν όταν οι  $A$  και  $B$  έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$ .

Ο όρος  $Re(A B^*)$  είναι μια ισοδύναμη απεικόνιση του παραπάνω όρου συνημιτόνου. Και οι δύο όροι παριστάνουν την ροπή που παράγεται από ένα στοιχείο επαγωγικού τύπου με εισόδους  $A$  και  $B$ . Στην υλοποίηση με αριθμητικό (numerical) ηλεκτρονόμο, ο χρόνος εκτέλεσης του υπολογισμού του όρου  $Re(A B^*)$  είναι πολύ μικρότερος από ότι αυτός του όρου συνημιτόνου (στην πραγματικότητα, ο όρος συνημιτόνου μπορεί να μην είναι απευθείας διαθέσιμος σε όλους τους μικροεπεξεργαστές). Η παρακάτω συζήτηση βασίζεται στο γεγονός ότι το στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας υλοποιείται σε έναν αριθμητικό (numerical) ηλεκτρονόμο.

Λαμβάνοντας υπόψη τα διανύσματα  $A_2$  και  $B_2$  εξετάζουμε το παρακάτω μιγαδικό γινόμενο ροπής αρνητικής ακολουθίας,  $[DIGT_2]$ :

$$\begin{aligned} DIGT_2 &= A_2 B_2^* \\ &= (A_{2x} + jB_{2y})(B_{2x} - jB_{2y}) \\ &= A_{2x}B_{2x} + A_{2y}B_{2y} + j(A_{2y}B_{2x} - A_{2x}B_{2y}) \end{aligned}$$

όπου :

$$\begin{aligned} * &= \text{ο συζυγής μιγαδικός (αλλάζει το πρόσημο της γωνίας)} \\ A_2 &= I_2 (1 \angle Z_{L1}) \\ B_2 &= V_2 \end{aligned}$$

Η γωνία του γινομένου ( $A_2 B_2^*$ ) είναι η γωνία του  $A/B$  δηλαδή η γωνία με την οποία το  $A_2$  προηγείται του  $B_2$ .

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, υποθέτουμε ότι η μεταβλητή αναφοράς είναι το διάνυσμα  $B$ , και ότι το διάνυσμα  $A$  προηγείται του  $B$  με γωνιά  $\theta$ . Με αυτό το πλαίσιο αναφοράς έχουμε:

$$B_{2x} = |B_2| \quad B_{2y} = 0$$

$$A_{2x} = |A_2| \cos \theta \quad A_{2y} = |A_2| \sin \theta$$

και

$$DIGT_2 = |A_2||B_2| \cos \theta + j|A_2||B_2| \sin \theta$$

Χωρίζοντας το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του  $DIGT_2 = P_2 + jQ_2$  έχουμε:

$$P_2 = |A_2||B_2| \cos \theta = Re(A_2 B_2^*)$$

$$Q_2 = |A_2||B_2| \sin \theta = Im(A_2 B_2^*)$$

Το  $P_2$  και το  $Q_2$  είναι συγκριτές δυο εισόδων διαφοράς φάσης. Ο  $P$  – συγκριτής παρουσιάζει μέγιστη ροπή όταν το  $A_2$  και το  $B_2$  είναι σε φάση και μηδενική όταν έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$ .

Παράδειγμα 4.4

Θεωρούμε ένα διφασικό BC σφάλμα στο σημείο  $m = 0$  του συστήματος του σχήματος 4.13. Όπως μετράται από τον ηλεκτρονόμο 1, η  $V_2$  καθυστερεί του  $I_2$  κατά την γωνία της σύνθετης αντίστασης της πηγής ( $Z_{S2} = 0.8 \angle 90^\circ \Omega$ ). Μετά την διόρθωση (προσαρμογή) του  $I_2$  με την γωνία μέγιστης ροπής ( γωνία της σύνθετης αντίστασης πηγής) και την αλλαγή του πρόσημου (με την χρήση του μιγαδικού συζυγές όρου), τα διανύσματα  $A_2$  και  $B_2^*$  είναι  $180^\circ$  εκτός φάσης. Από τους δυο συγκριτές  $P_2$  και  $Q_2$  μόνο ο  $P_2$  έχει μη μηδενική τιμή, δείχνοντας μας έτσι ότι θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε αυτόν και ότι επίσης τα σφάλματα ορθής φοράς υποδεικνύονται με το αρνητικό πρόσημο του  $DIGT_2$ . Παρακάτω παρατίθεται η λύση του παραδείγματος αυτού στο MathCad.

Ορισμοί

VA := W

KVA := 1000W

MVA := 1000KVA

pu := 1.0

MW := MVA

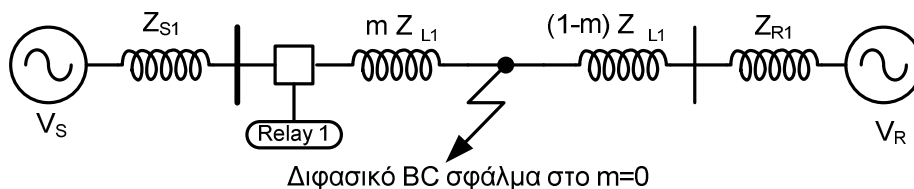
MVAr := MVA

$a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$$

$a = -0.5 + 0.866i$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$



Σχήμα 4.13 Δίκτυο του παραδείγματος 4.4

Δεδομένα

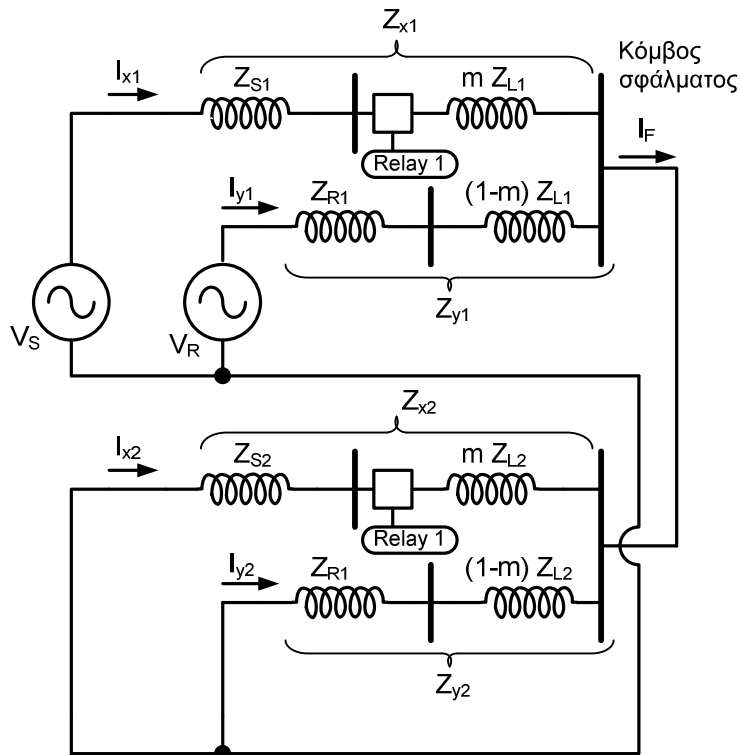
$$V_S := \frac{116}{\sqrt{3}} \cdot V$$

$$V_R := \frac{116}{\sqrt{3}} V$$

$$Z_{S1} := 0.8 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}} \Omega \quad Z_{R1} := Z_{S1} \quad Z_{L1\_1} := 4 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}} \Omega$$

$$Z_{S2} := Z_{S1} \quad Z_{R2} := Z_{R1} \quad Z_{L1\_2} := Z_{L1\_1} \quad m := 0$$

Από το κύκλωμα του σχήματος 4.13 κατασκευάζουμε τα κυκλώματα ακολουθίας τα οποία και τα συνδέουμε στο σημείο του σφάλματος για να υπολογίσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Τα κυκλώματα αυτά φαίνονται στο σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.13

Στο παραπάνω σχήμα ορίζουμε:

$$Z_{x1} := Z_{S1} + m \cdot Z_{L1\_1} \quad Z_{y1} := Z_{R1} + (1 - m) \cdot Z_{L1\_1}$$

$$Z_{x2} := Z_{S2} + m \cdot Z_{L1\_2} \quad Z_{y2} := Z_{R2} + (1 - m) \cdot Z_{L1\_2}$$

Βρίσκουμε το ισοδύναμο Thevenin ως προς τον κόμβο του σφάλματος.

$$Z_{th} := \frac{Z_{x1} \cdot Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} + \frac{Z_{x2} \cdot Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad V_{th} := V_S$$

Με την βοήθεια του ισοδυνάμου Thevenin υπολογίζουμε το ρεύμα σφάλματος. Μετά με την χρήση διαίρετη ρεύματος υπολογίζουμε το ρεύμα που ρέει στον ηλεκτρονόμο.



$$I_F := \frac{V_{th}}{Z_{th}} \quad I_F = -48.834iA$$

$$I_{x1} := I_F \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad I_{x1} = -41.858iA \quad \arg(I_{x1}) = -90 \text{ deg}$$

$$I_{x2} := -I_F \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad I_{x2} = 41.858iA \quad \arg(I_{x2}) = 90 \text{ deg}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{x1} \\ I_{x2} \end{pmatrix} \quad I_{abc} := A_1 \cdot I_{012} \quad I_a := I_{abc_0} \quad I_b := I_{abc_1} \quad I_c := I_{abc_2}$$

Οπότε τα μέτρα και οι γωνίες των ρευμάτων των φάσεων είναι:

$$I_a = 0 \text{ A}$$

$$I_b = 72.5 \text{ A} \quad \arg(I_b) = 180 \cdot \text{deg}$$

$$I_c = 72.5 \text{ A} \quad \arg(I_c) = -1.615 \times 10^{-14} \cdot \text{deg}$$

Αφού έχουμε υπολογίσει τα ρεύματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας υπολογίζουμε τώρα τις τάσεις  $V_1$  και  $V_2$  για τον ηλεκτρονόμο 1.

$$V_{\text{relay1}} := V_S - I_{x1} \cdot Z_{S1} \quad V_{\text{relay1}} = 33.486 \text{ V} \quad \arg(V_{\text{relay1}}) = 0 \text{ deg}$$

$$V_{\text{relay2}} := -I_{x2} \cdot Z_{S1} \quad V_{\text{relay2}} = 33.486 \text{ V} \quad \arg(V_{\text{relay2}}) = 0 \text{ deg}$$

$$V_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{relay1}} \\ V_{\text{relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{abc} := A_1 \cdot V_{012} \quad V_a := V_{abc_0} \quad V_b := V_{abc_1} \quad V_c := V_{abc_2}$$

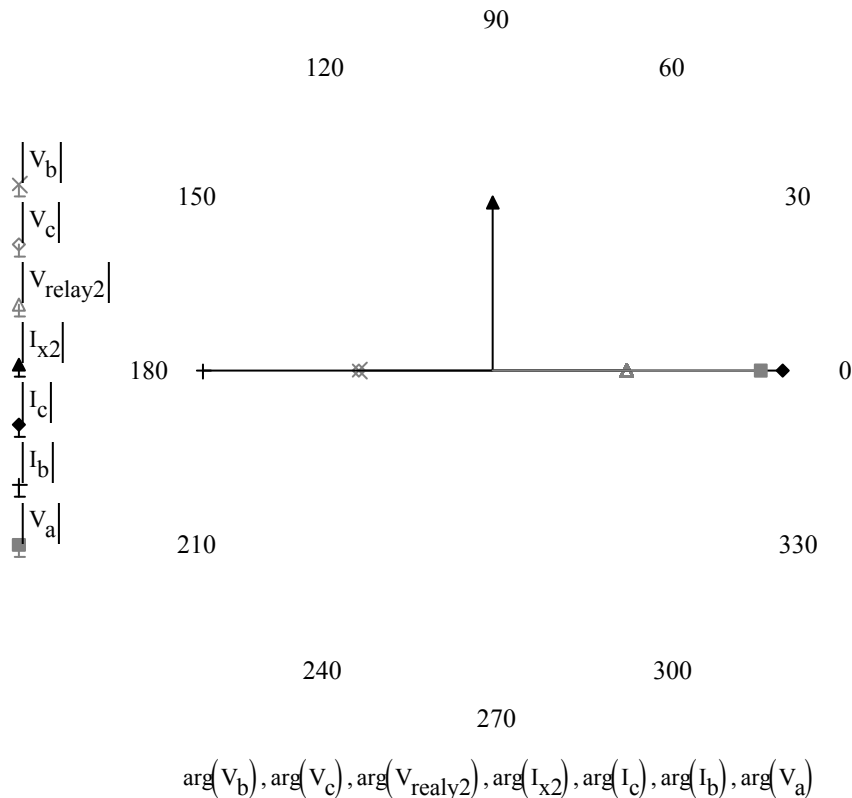
Οπότε τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων των φάσεων είναι:

$$V_a = 66.973 \text{ V} \quad \arg(V_a) = 0 \text{ deg}$$

$$V_b = 33.486 \text{ V} \quad \arg(V_b) = 180 \cdot \text{deg}$$

$$V_c = 33.486 \text{ V} \quad \arg(V_c) = 180 \cdot \text{deg}$$

Το διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων και τάσεων φαίνεται στο σχήμα 4.15.



**Σχήμα 4.15** Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων

Τέλος υπολογίζουμε την ροπή  $T_{32Q}$  και το γινόμενο  $DIGT_2$  από το οποίο παίρνουμε τον  $P_2$ - συγκριτή και τον  $Q_2$ - συγκριτή

$$T_{32Q} := 3V_{\text{relay2}} \cdot 3I_{x2} \cdot \cos(\arg(-3V_{\text{relay2}}) - (\arg(3I_{x2}) + \arg(Z_{L1\_2})))$$

$$T_{32Q} = 1.262 \times 10^4 \text{ W}$$

$$DIGT_2 := 3 \cdot I_{x2} \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \arg(Z_{S1})} \cdot 3 \cdot V_{\text{relay2}} \quad DIGT_2 = -1.262 \times 10^4 \text{ W}$$

$$P_2 := \text{Re}(DIGT_2) \quad P_2 = -1.262 \times 10^4 \text{ W}$$

$$Q_2 := \text{Im}(DIGT_2) \quad Q_2 = 0 \text{ W}$$

Η σύμβαση αυτή κατεύθυνσης σφάλματος – πρόσημου είναι αντίθετη από αυτήν των στοιχείων κατεύθυνσης που περιγράφηκαν νωρίτερα. Αν χρησιμοποιήσουμε το  $-V_2$  αντί της  $V_2$  η σύμβαση πρόσημου για το  $P_2$  είναι η ίδια όπως και στο παραδοσιακό στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας.

#### 4.4 Σχεδίαση Στοιχείων Κατεύθυνσης Γης

Τα στοιχεία κατεύθυνσης γης επιτηρούν τα ευαίσθητα στοιχεία υπερέντασης και απόστασης που χρησιμοποιούν υπόλοιπες μεταβλητές (residual). Η ρύθμιση διακοπής (pick up threshold) ενός στοιχείου υπερέντασης γης τυπικά τίθεται σε μια χαμηλή τιμή για να ανιχνεύονται σφάλματα μεγάλης αντίστασης. Επειδή τα στοιχεία προστασίας γης είναι ευαίσθητα, η λειτουργία τους θα πρέπει να είναι ασφαλής.

##### 4.4.1 Επιλογές εισόδου των στοιχείων κατεύθυνσης γης

Ποιες μεταβλητές πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ως εισόδους σε ένα στοιχείο κατεύθυνσης γης; Όμοια με την συζήτηση για το στοιχείο κατεύθυνσης μη συμμετρικού σφάλματος, πρέπει να εξετάσουμε και εδώ ποιες μεταβλητές είναι παρούσες στα σφάλματα ως προς γη. Τα μονοφασικά ως προς γη, και τα διφασικά ως προς γη σφάλματα είναι οι μόνοι τύποι σφαλμάτων που χρειάζεται να εξετάσουμε. Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει τις διαθέσιμες μεταβλητές ακολουθίας γι' αυτά τα σφάλματα.

Πίνακας 4.5: Διαθέσιμες μεταβλητές ακολουθίας για σφάλματα ως προς γη

Μεταβλητή Ακολουθίας	Διφασικά ως προς Γη Σφάλματα	Μονοφασικά ως προς Γη Σφάλματα
$V_1$	NAI	NAI
$V_2$	NAI	NAI
$V_0$	NAI	NAI
$I_1$	NAI	NAI
$I_2$	NAI	NAI
$I_0$	NAI	NAI

##### 4.4.2 Μεταβλητές Ακολουθίας ως Είσοδοι για τα Στοιχεία Κατεύθυνσης Γης

Όπως βλέπουμε από τον Πίνακα 4.5 όλες οι μεταβλητές ακολουθίας είναι διαθέσιμες για τα ως προς γη σφάλματα. Όμως οι μεταβλητές θετικής ακολουθίας επηρεάζονται δυσμενώς από το φορτίο και γι' αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται. Μένουν έτσι μόνο οι μεταβλητές μηδενικής και αρνητικής ακολουθίας ως πιθανές εισοδοί για ένα στοιχείο κατεύθυνσης γης.

##### 4.4.3 Στοιχείο Κατεύθυνσης Γης Πόλωσης Τάσης Μηδενικής Ακολουθίας

Ένα στοιχείο κατεύθυνσης γης πόλωσης μηδενικής ακολουθίας χρησιμοποιεί την τάση μηδενικής ακολουθίας  $V_0$  ή την υπόλοιπη τάση (residual)  $3V_0$  ως μεταβλητή πόλωσης. Με την εξίσωση 4.6 υπολογίζεται η ροπή του.

$$T_{32V} = |3V_0||I_R| \cos[\angle -3V_0 - (\angle I_R + \angle Z_{L0})] \quad (4.6)$$

όπου:

$3V_0$  = Υπόλοιπη τάση (residual)

$I_R$  = Υπόλοιπό ρεύμα (residual)

$\angle Z_{L0}$  = Γωνία της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας της γραμμής.

Το πρόσημο της  $T_{32V}$  είναι θετικό για σφάλματα ορθής φοράς και αρνητικό για σφάλματα αντίστροφης φοράς.

Αν το μέτρο της τάσης πόλωσης γίνει πολύ μικρό, η γωνία της είναι αναξιόπιστη. Η περίπτωση αυτή συναντάται στα απομακρυσμένα σφάλματα γης τα οποία παρουσιάζονται στον ηλεκτρονόμο με την μικρότερη σε μέτρο τάσης πόλωσης.

Η παραδοσιακή λύση για το χαμηλό μέτρο της τάσης πόλωσης είναι η χρήση ενός στοιχείου κατεύθυνσης πόλωσης ρεύματος. Επίσης παρουσιάζεται μια εναλλακτική λύση για αυτό το πρόβλημα, αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο.

#### 4.4.4 Στοιχείο Κατεύθυνσης Γης Πόλωσης Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας

Ένα στοιχείο κατεύθυνσης γης πόλωσης ρεύματος μηδενικής ακολουθίας μετρά την διαφορά φάσης μεταξύ του υπόλοιπου ρεύματος (residual)  $I_R$  και του ρεύματος μιας εξωτερικής πηγής πόλωσης  $I_{POL}$ .

Το στοιχείο αυτό διαφέρει από τα στοιχεία κατεύθυνσης αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στο ότι δεν απαιτείται διόρθωση της φάσης του  $I_R$  κατά την γωνία της σύνθετης αντίστασης γραμμής. Με την εξίσωση (4.7) υπολογίζεται η ροπή του στοιχείου αυτού.

$$T_{32I} = |I_{POL}||I_R| \cos[\angle I_{POL} - \angle I_R] \quad (4.7)$$

Η ροπή  $T_{32I}$  είναι θετική για σφάλματα ορθής φοράς και αρνητική για σφάλματα αντίστροφης φοράς.

#### 4.4.5 Στοιχείο Κατεύθυνσης Διπλής Πόλωσης Μηδενικής Ακολουθίας

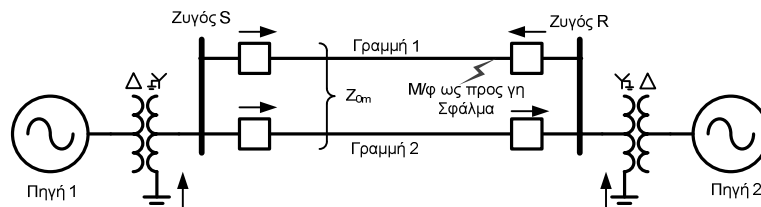
Ένα στοιχείο κατεύθυνσης διπλής πόλωσης μηδενικής ακολουθίας είναι ο συνδυασμός ενός στοιχείου κατεύθυνσης πόλωσης τάσης και ενός στοιχείου πόλωσης ρεύματος. Το στοιχείο αυτό παρέχει περισσότερη ευελιξία από ότι οι απλές μέθοδοι πόλωσης μηδενικής ακολουθίας.

Για παράδειγμα, αν το μέτρο της τάσης μηδενικής ακολουθίας που παρουσιάζεται στον ηλεκτρονόμο για ένα απομακρυσμένο σφάλμα είναι πολύ χαμηλό, η ροπή που παράγεται από το στοιχείο κατεύθυνσης πόλωσης τάσης είναι πολύ χαμηλή και δεν υπερβαίνει το ελάχιστο όριο (κατώφλι) ροπής του. Αν γινόταν χρήση ηλεκτρονόμενων διπλής πόλωσης σε αυτήν την περίπτωση, θα χρησιμοποιούσαμε το στοιχείο με πόλωση ρεύματος μηδενικής ακολουθίας για προστασία. Αν η πηγή του ρεύματος πόλωσης μηδενικής ακολουθίας έχει τεθεί εκτός υπηρεσίας και ταυτόχρονα ένα απομακρυσμένο σφάλμα ως προς γη δεν παράγει επαρκή τάση πόλωσης μηδενικής ακολουθίας, τότε θα πρέπει να εξετάσουμε μια εναλλακτική τεχνική πόλωσης.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των πηγών πόλωσης για τους παραπάνω ηλεκτρονόμους πόλωσης μηδενικής ακολουθίας (τάσης και ρεύματος).

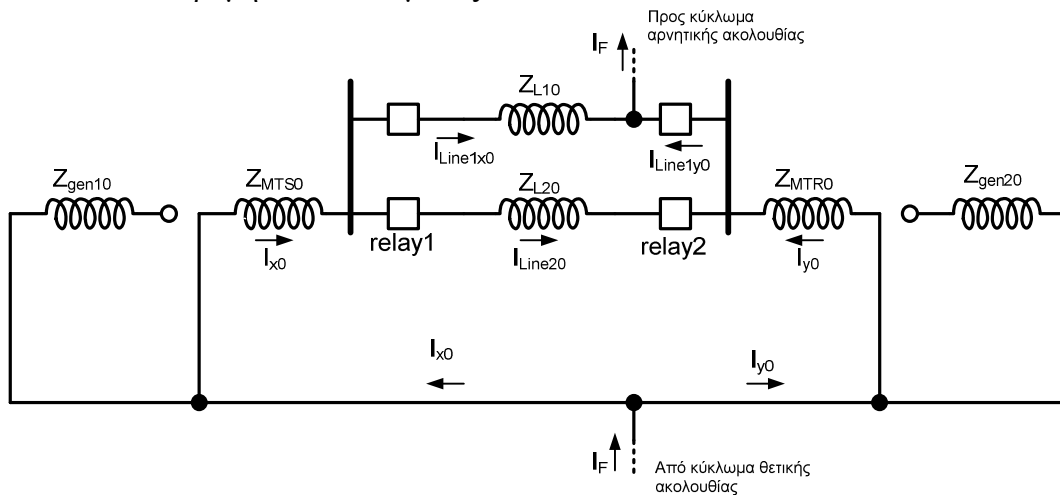
**4.4.6 Στοιχεία Κατεύθυνσης Πόλωσης Μηδενικής Ακολουθίας σε Εφαρμογές Γραμμών Μεταφοράς Διπλού Κυκλώματος.**

Οι γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με κοινούς ζυγούς και στα δύο τους άκρα δεν προκαλούν εσφαλμένους ορισμούς κατεύθυνσης σφάλματος στα στοιχεία κατεύθυνσης πόλωσης μηδενικής ακολουθίας. Τα στοιχεία αυτά είναι αξιόπιστα σε αυτές τις εφαρμογές (υποτίθεται ότι όλες οι μεταβλητές μηδενικής ακολουθίας υπερβαίνουν την ελάχιστη ρύθμιση (κατώφλι) για όλους του τύπους σφαλμάτων). Στο σχήμα 4.16 φαίνεται ένα δίκτυο στο οποίο δυο γραμμές ξεκινούν από ένα κοινό ζυγό (S) και καταλήγουν επίσης σε ένα κοινό ζυγό (R). Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνεται ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα το οποίο συμβαίνει πολύ κοντά στο ζυγό (R).



**Σχήμα 4.16 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με κοινό ζυγό αναχώρησης και άφιξης**

Στο σχήμα 4.17 φαίνεται το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το παραπάνω σφάλμα. Επίσης στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας που ρέουν σε κάθε διαδρομή του κυκλώματος.



**Σχήμα 4.17 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.16**

Ας υπολογίσουμε την τάση μηδενικής ακολουθίας  $V_0$  και το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας  $I_0$  στους ηλεκτρονόμους 1 και 2 της γραμμής 2. Από το σχήμα 4.17 έχουμε:

$$I_{relay10} = I_{Line20} \text{ και } I_{relay20} = -I_{Line20}$$

Επίσης:

$$I_{Line20} = \frac{I_{x0}}{2} \text{ με την χρήση διαιρέτη ρεύματος και επειδή } Z_{L10} = Z_{L20}.$$

Τα ρεύματα που οφείλονται στην αλληλεπαγωγική σύζευξη (mutual coupling) των γραμμών 1 και 2 ( $Z_{0m}$ ) είναι μηδέν διότι στις γραμμές ρέουν ίσα ρεύματα ( $\frac{I_{x0}}{2}$ ).

Η τάση στον ηλεκτρονόμο 1 είναι:

$$\begin{aligned} V_{relay10} &= -I_{relay10}Z_{MTS0} \\ &= -I_{x0}Z_{MTS0} \end{aligned}$$

Ενώ η τάση στον ηλεκτρονόμο 2:

$$\begin{aligned} V_{relay20} &= -I_{relay10}Z_{MTS0} - I_{Line20}Z_{L20} \\ &= -I_{x0} \left( Z_{MTS0} + \frac{1}{2}Z_{L20} \right) \end{aligned}$$

Την κατεύθυνση που ορίζουν οι ηλεκτρονόμοι της γραμμής 2 μπορούμε να την διαπιστώσουμε υπολογίζοντας το πρόσημό του λόγου  $\frac{V_0}{I_0}$ , όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.3.3 και στην αναφορά [12]. Αν το πρόσημο του λόγου αυτού είναι αρνητικό (αρνητική σύνθετη αντίσταση) το σφάλμα ορίζεται ως ορθής φοράς, ενώ αν είναι θετικό, αντίστροφης φοράς. Έτσι για τον ηλεκτρονόμο 1 έχουμε:

$$\frac{V_{relay10}}{I_{relay10}} = \frac{-I_{x0}Z_{MTS0}}{\frac{I_{x0}}{2}} = -2Z_{MTS0} < 0$$

άρα ο ηλεκτρονόμος 1 ορίζει κατεύθυνση ορθής φοράς.

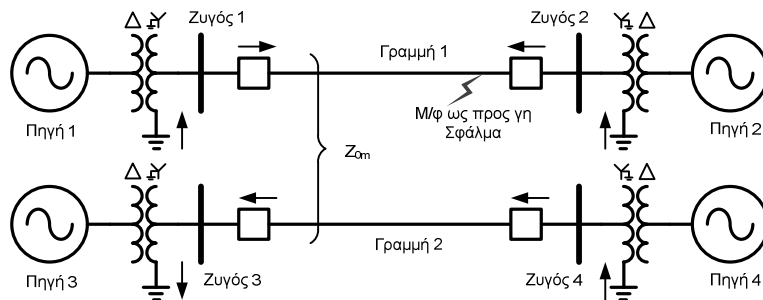
Ενώ για τον ηλεκτρονόμο 2:

$$\frac{V_{relay20}}{I_{relay20}} = \frac{-I_{x0} \left( Z_{MTS0} + \frac{1}{2}Z_{L20} \right)}{-\frac{I_{x0}}{2}} = 2 \left( Z_{MTS0} + \frac{1}{2}Z_{L20} \right) > 0$$

άρα ο ηλεκτρονόμος 2 ορίζει κατεύθυνση αντίστροφης φοράς.

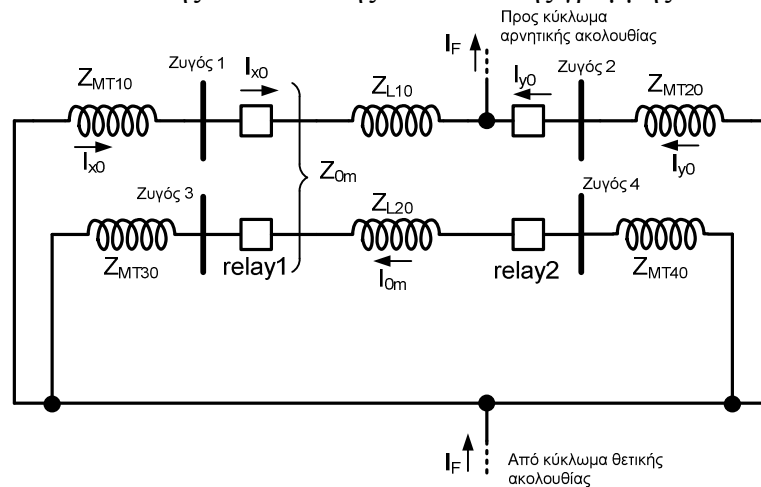
Τώρα επειδή ο πρώτος ηλεκτρονόμος ορίζει σφάλμα ορθής φοράς και ο δεύτερος αντίστροφης το σύστημα λογικής επιλογικότητας θα θεωρήσει το σφάλμα ως εξωτερικό της γραμμής και ο ηλεκτρονόμος 1 της γραμμής 2 θα ενεργοποιηθεί μόνο αν ο ηλεκτρονόμος 2 της γραμμής 1 δεν ενεργοποιηθεί λόγω βλάβης στο μηχανισμό του.

Τα στοιχεία κατεύθυνσης πόλωσης μηδενικής ακολουθίας μπορεί να μην ορίσουν σωστά την κατεύθυνση του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος που έχουν υψηλή αλληλεπαγωγική σύζευξη (mutual coupling) ( $Z_{0m}$ ) και απομονωμένες πηγές μηδενικής ακολουθίας. Στο σχήμα 4.18 φαίνεται ένα δίκτυο στο οποίο δυο γραμμές ξεκινούν από διαφορετικούς ζυγούς και καταλήγουν σε διαφορετικούς ζυγούς. Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνεται και ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα το οποίο συμβαίνει πολύ κοντά στον ζυγό 2.



Σχήμα 4.18 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με διαφορετικούς ζυγούς αναχώρησης και άφιξης

Στο σχήμα 4.19 φαίνεται το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το σφάλμα αυτό. Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνονται τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας καθώς επίσης και το ρεύμα ( $I_{0m}$ ) στην γραμμή 2 που οφείλεται στην αλληλεπαγωγική σύζευξη των γραμμών 1 και 2 ( $Z_{0m}$ ), το οποίο είναι αντίθετης κατεύθυνσης από αυτό της γραμμής 1.



Σχήμα 4.19 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.18

Από το σχήμα 4.19 έχουμε :

$$I_{relay10} = -I_{0m} \text{ και } I_{relay20} = I_{0m}$$

Επίσης:

$$V_{relay10} = I_{0m}Z_{MT30} \text{ και } V_{relay20} = -I_{0m}Z_{MT40}$$

Οπότε για την κατεύθυνση που ορίζει ο ηλεκτρονόμος 1 είναι:

$$\frac{V_{relay10}}{I_{relay10}} = \frac{I_{0m}Z_{MT30}}{-I_{0m}} = -Z_{MT30}$$

αρά ο ηλεκτρονόμος 1 ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς.

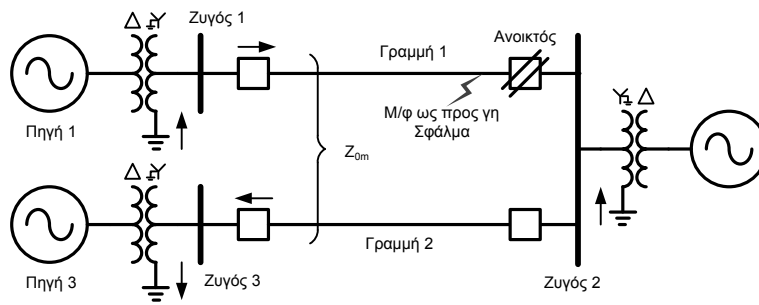
Για τον ηλεκτρονόμο 2 έχουμε:

$$\frac{V_{relay20}}{I_{relay20}} = \frac{-I_{0m}Z_{MT40}}{I_{0m}} = -Z_{MT40}$$

αρά και ο ηλεκτρονόμος 2 ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς.

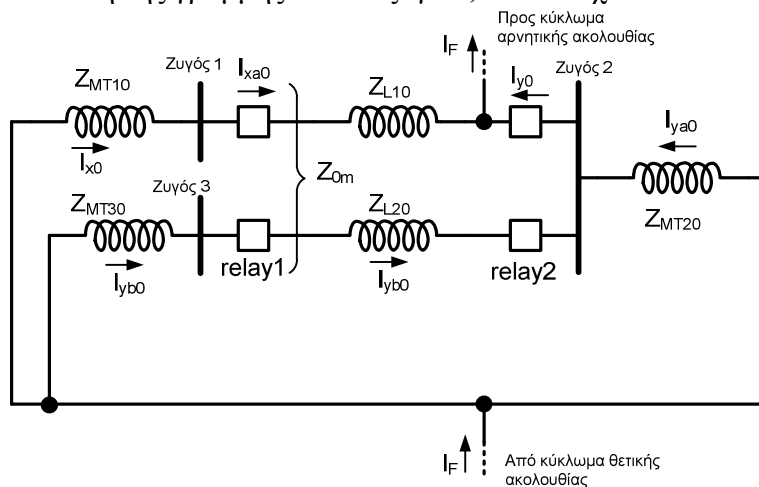
Αφού και οι δυο ηλεκτρονόμοι ορίζουν κατεύθυνση σφάλματος ορθής φοράς, το σύστημα λογικής επιλογικότητας θα θεωρήσει το σφάλμα ως εσωτερικό της γραμμής 2 με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων και την διακοπή της υγιούς αυτής γραμμής.

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται άλλη μια περίπτωση όπου έχουμε απομόνωση πηγής μηδενικής ακολουθίας μετά το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος που βρίσκεται κοντά στο σφάλμα. Σε αυτό το σχήμα φαίνονται δυο γραμμές που ξεκινούν από διαφορετικούς ζυγούς και καταλήγουν σε έναν κοινό ζυγό. Επίσης σε αυτό το σχήμα φαίνεται και το μονοφασικό ως προς γη σφάλμα που συμβαίνει στην γραμμή 1 πολύ κοντά στον κοινό ζυγό



Σχήμα 4.20 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με διαφορετικούς ζυγούς αναχώρησης και κοινό ζυγό άφιξης

Στα σχήματα 4.21 και 4.22 φαίνεται το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας πριν και μετά το άνοιγμα του διακόπτη της γραμμής 1 στον ζυγό 2, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.21 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.20. Ο διακόπτης ισχύος του ζυγού 1 κλειστός

Για το κύκλωμα του σχήματος 4.21 έχουμε:

$$I_{relay10} = I_{yb0} \text{ και } I_{relay20} = -I_{yb0}$$

Επίσης:

$$V_{relay10} = -I_{yb0}Z_{MT30} \text{ και } V_{relay20} = -I_{yb0}(Z_{MT30} + Z_{L20})$$

Οπότε για την κατεύθυνση που ορίζει ο ηλεκτρονόμος 1 είναι:

$$\frac{V_{relay10}}{I_{relay10}} = \frac{-I_{yb0}Z_{MT30}}{I_{yb0}} = -Z_{MT30}$$

αρά ο ηλεκτρονόμος 1 ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς.

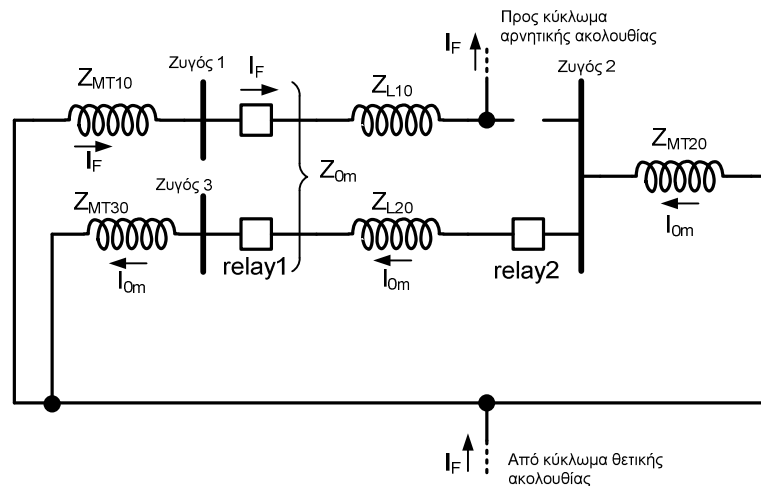
Για τον ηλεκτρονόμο 2 έχουμε:

$$\frac{V_{relay20}}{I_{relay20}} = \frac{-I_{yb0}(Z_{MT30} + Z_{L20})}{-I_{yb0}} = (Z_{MT30} + Z_{L20})$$

αρά ο ηλεκτρονόμος 2 ορίζει το σφάλμα ως αντίστροφής φοράς.

Επομένως πριν το άνοιγμα του διακόπτη το σύστημα λογικής επιλογικότητας ορίζει το σφάλμα ως εξωτερικό της γραμμής 2, οπότε δεν ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι της γραμμής αυτής. Λόγω όμως της θέσης του σφάλματος το διακόπτης της γραμμής 1 που βρίσκεται κοντά σε αυτό ανοίγει, και έτσι διαμορφώνονται δυο χωριστά κυκλώματα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22.





Σχήμα 4.22 Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.20. Ο διακόπτης ισχύος του ζυγού 1 ανοικτός

Η κατάσταση που φαίνεται στο σχήμα 4.22 είναι ανάλογη με αυτήν του δικτύου απομονωμένων πηγών των σχημάτων 4.18 και 4.19 και επομένως η υγιής γραμμή 2 μπορεί να διακοπεί, επειδή και οι δύο ηλεκτρονόμοι ορίζουν κατάσταση σφάλματος ορθής φοράς.

#### 4.4.7 Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας για Σφάλματα Γης

Το στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας, που περιγράφηκε προηγουμένως ως ένα στοιχείο κατεύθυνσης φάσης μη συμμετρικών σφαλμάτων, είναι επίσης αποτελεσματικό και ως στοιχείο κατεύθυνσης γης.

##### Αναγκαιότητα χρήσης μεταβλητών αρνητικής ακολουθίας για πόλωση κατεύθυνσης γης:

Τα στοιχεία κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα συγκρινόμενα με τα στοιχεία κατεύθυνσης πόλωσης τάσης αρνητικής ακολουθίας:

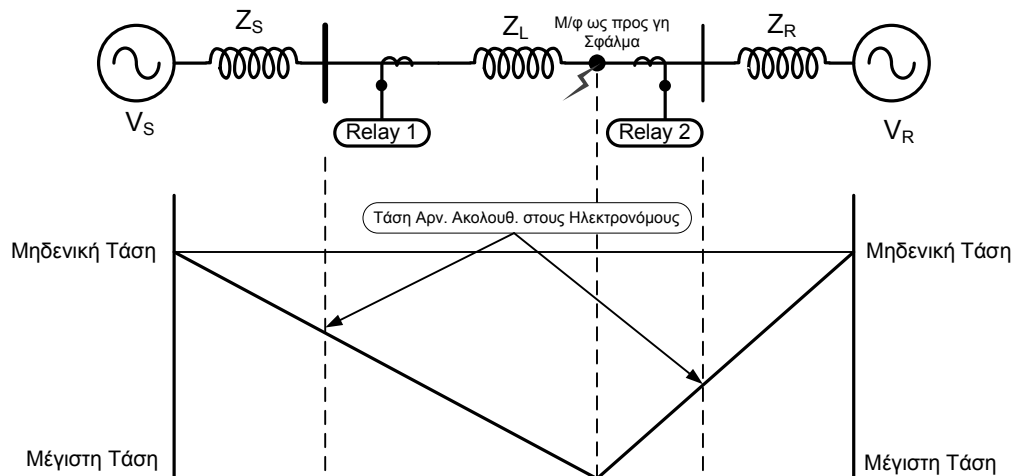
- Τα στοιχεία κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας δεν επηρεάζονται από την αλληλεπαγωγική σύζευξη μηδενικής ακολουθίας (mutual coupling) που σχετίζεται με τις εφαρμογές γραμμών μεταφοράς διπλού κυκλώματος. Είναι επομένως κατάλληλα για συστήματα απομονωμένων πηγών μηδενικής ακολουθίας.
- Αν ο ζυγός πίσω από την θέση του ηλεκτρονόμου είναι μια ισχυρή πηγή μηδενικής ακολουθίας, (μικρή αντίσταση μηδενικής ακολουθίας) η τάση αρνητικής ακολουθίας που είναι διαθέσιμη στην θέση του ηλεκτρονόμου είναι υψηλότερη από ότι η τάση μηδενικής ακολουθίας.

##### Αντιστάθμιση χαμηλής τάσης πόλωσης

Το παραδοσιακό στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας (32Q) λειτουργεί σωστά στις περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, όταν η πηγή αρνητικής ακολουθίας πίσω από την θέση του ηλεκτρονόμου είναι ισχυρή (έχει δηλαδή χαμηλή σύνθετη αντίσταση), η

τάση αρνητικής ακολουθίας που μετράται από τον ηλεκτρονόμο για ένα απομακρυσμένο σφάλμα μπορεί να είναι πολύ χαμηλή, έτσι ώστε να πολωθεί κατάλληλα αυτό το στοιχείο κατεύθυνσης. Παρόμοια παρατήρηση μπορεί να γίνει και για τους ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης πόλωσης τάσης μηδενικής ακολουθίας.

Η μειωμένη τιμή της τάσης πόλωσης παρατηρείται περισσότερο στα τα απομακρυσμένα σφάλματα. Στο σχήμα 4.23 φαίνεται η μεταβολή της τάσης αρνητικής ακολουθίας για ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα κοντά στον απομακρυσμένο ζυγό.



Σχήμα 4.23 Τάση αρνητικής ακολουθίας συναρτήσει της θέσης του σφάλματος

Ενώ το μέτρο της  $V_2$  στη θέση του ηλεκτρονόμου 1 είναι μικρό για το απομακρυσμένο σφάλμα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το μέτρο του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας είναι μεγάλο. Αν ο ηλεκτρονόμος μπορούσε να μετακινηθεί προς την θέση του σφάλματος, το μέτρο της  $V_2$  που θα ήταν διαθέσιμη στον ηλεκτρονόμο αυτό θα αυξανόταν. Δεδομένου ότι δεν μπορούμε να μετακινήσουμε τον ηλεκτρονόμο, χρειάζεται να ακολουθήσουμε μια διαφορετική προσέγγιση.

Για να εξαλείψουμε το πρόβλημα της χαμηλής τάσης  $V_2$  στον ηλεκτρονόμο 1, χρησιμοποιούμε ένα τύπο ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης στον οποίο προστίθεται μια αντισταθμιστική ποσότητα ( $-aZ_{L2}I_2$ ), στην τάση αρνητικής ακολουθίας  $V_2$ . Η ποσότητα της αντιστάθμισης (ή της ενίσχυσης της  $V_2$ ) ελέγχεται από την σταθερά  $a$ . Με την προσθήκη αυτή της αντισταθμιστικής ποσότητας στο στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας δημιουργείται το αντισταθμιστικό στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας (compensated negative sequence directional element).

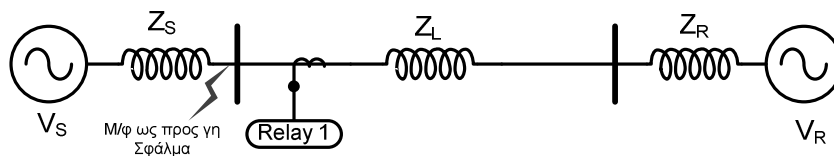
Με την εξίσωση 4.8 υπολογίζουμε την ροπή για το στοιχείο αυτό.

$$T_{32Q} = \text{Re}[(V_2 - aZ_{L2}I_2)(Z_{L2}I_2)^*] \quad (4.8)$$

Για σφάλματα ορθής φοράς η ποσότητα  $-aZ_{L2}I_2$  προστίθεται στην  $V_2$  με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση αρνητικής ακολουθίας που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της κατεύθυνσης του σφάλματος. Για σφάλματα αντίστροφης φοράς η ποσότητα  $-aZ_{L2}I_2$  αφαιρείται από την μετρούμενη  $V_2$ . Η σταθερά  $a$  δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη για

σφάλματα ορθής φοράς. Μπορεί να πάρει τέτοια τιμή ώστε τα σφάλματα αντίστροφης φοράς να φαίνονται ως ορθής. Αυτός ο εσφαλμένος ορισμός κατεύθυνσης οφείλεται στην ποσότητα  $-\alpha Z_{L2} I_2$  η οποία έχει μεγάλη τιμή και αφαιρείται από την μετρούμενη τάση  $V_2$  στα σφάλματα αντίστροφης φοράς. Επομένως, όταν εφαρμόζουμε ένα αντισταθμιστικό στοιχείο κατεύθυνσης πρέπει να δώσουμε μεγάλη προσοχή στον ορισμό της σταθεράς  $\alpha$ , για να εξασφαλίσουμε τον σωστό ορισμό κατεύθυνσης του σφάλματος.

Ποιες τιμές μπορεί να πάρει η σταθερά  $\alpha$ ; Γι' αυτό υπολογίζουμε την μέγιστη τιμή της σταθεράς  $\alpha$ , θεωρώντας ένα σφάλμα αντίστροφης φοράς, το οποίο συμβαίνει πολύ κοντά τον ηλεκτρονόμο, στο σύστημα δυο πηγών που φαίνεται στο σχήμα 4.24. Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτό το σφάλμα φαίνονται στο σχήμα 4.25. Το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας ( $I_2$ ) που μετράται από τον ηλεκτρονόμο για αυτό το σφάλμα είναι το  $-I_{R2}$ .



Σχήμα 4.24 Δίκτυο για τον υπολογισμό της σταθεράς  $\alpha$

Υπολογίζουμε την μέγιστη σταθερά  $\alpha$  ή όπου ισχύει:  $(V_2 - \alpha Z_{L2} I_2) = 0$ .

$$(V_2 - \alpha Z_{L2} I_2) = 0$$

$$V_2 = \alpha Z_{L2} I_2$$

Για αυτό το σφάλμα, η  $V_2$  που μετράται είναι ίση με  $[I_{R2}(Z_{R2} + Z_{L2})]$ . Αντικαθιστώντας:

$$I_{R2}(Z_{R2} + Z_{L2}) = \alpha Z_{L2} I_2$$

$$(Z_{R2} + Z_{L2}) = \alpha Z_{L2}$$

$$\alpha = \frac{Z_{R2}}{Z_{L2}} + 1$$

Έτσι, σταθερά  $\alpha$  πρέπει να είναι μικρότερη από  $\frac{Z_{R2}}{Z_{L2}} + 1$ , ή αλλιώς το ποσοστό της αντιστάθμισης ορθής φοράς δεν πρέπει να τεθεί μεγαλύτερο από  $Z_{R2} + Z_{L2}$ . Αυτή είναι μια σημαντική παρατήρηση για το στοιχείο κατεύθυνσης που περιγράφεται πιο κάτω.

#### Σχέση της μετρούμενης $Z_2$ με την κατεύθυνση του ρεύματος

Το αντισταθμιστικό στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας χρησιμοποιεί ποσότητες τάσης. Αυτές οι ποσότητες τάσης επηρεάζονται από το μετρούμενο ρεύμα  $I_2$ . Από το σχήμα 4.25, ο ηλεκτρονόμος μετρά το ρεύμα  $I_{S2}$  για σφάλματα ορθής φοράς και το  $I_{R2}$  για σφάλματα αντίστροφης φοράς. Με βάση τον νόμο του Ohm, αν μετρήσουμε την τάση στα άκρα μιας σύνθετης αντίστασης, και ρεύμα που ρέει μέσα από αυτήν μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της. Από την  $V_2$  και το  $I_2$  υπολογίζουμε την μετρούμενη σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας και την ονομάζουμε  $Z_{2MEASURED}$ .

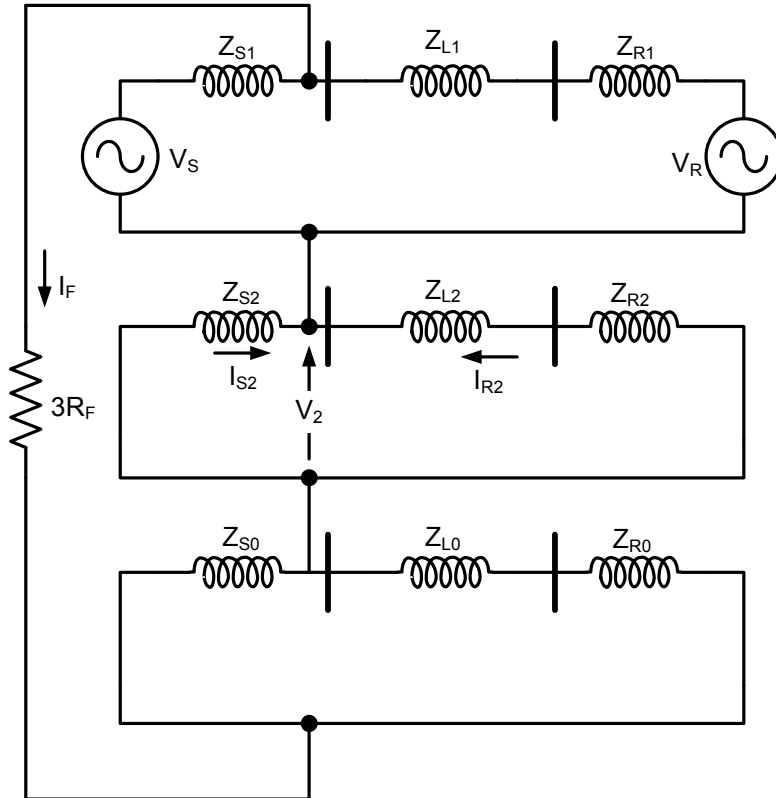
Μονοφασικό ως προς γη σφάλμα ορθής φοράς:

$$Z_{2MEASURED} = \frac{-V_2}{I_{S2}} = -Z_{S2}$$

Μονοφασικό ως προς γη σφάλμα αντίστροφης φοράς:

$$Z_{2MEASURED} = \frac{-V_2}{I_{R2}} = +(Z_{L2} + Z_{R2})$$

Αυτή η σχέση φαίνεται στο σχήμα 4.26.



Σχήμα 4.25 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.26

Υπάρχει ένα νέο στοιχείο το οποίο μετρά την σύνθετη αντίσταση  $z_2$  και την συγκρίνει με απλές ρυθμίσεις (κατώφλια) για ορίσει την κατεύθυνση του σφάλματος. Από την εξίσωση (4.8), με την οποία υπολογίζουμε την ροπή του αντισταθμιστικού στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας, η συνθήκη ισορροπίας ορθής - αντίστροφης φοράς για αυτό το στοιχείο είναι όταν ροπή είναι ίση με το μηδέν:

$$0 = \text{Re}[(V_2 - \alpha Z_{L2} I_2)(Z_{L2} I_2)^*]$$

Θέτουμε:

$$\alpha = z_2$$

$$Z_{L2} = 1 \angle \theta \text{ όπου } \theta \text{ η γωνία της } Z_{L2}$$

Αντικαθιστώντας:

$$0 = \text{Re}[(V_2 - z_2 1 \angle \theta \cdot I_2)(1 \angle \theta \cdot I_2)^*]$$

Λύνοντας ως προς  $z_2$  παίρνουμε μια εξίσωση που αντιστοιχεί στην συνθήκη μηδενικής ροπής:

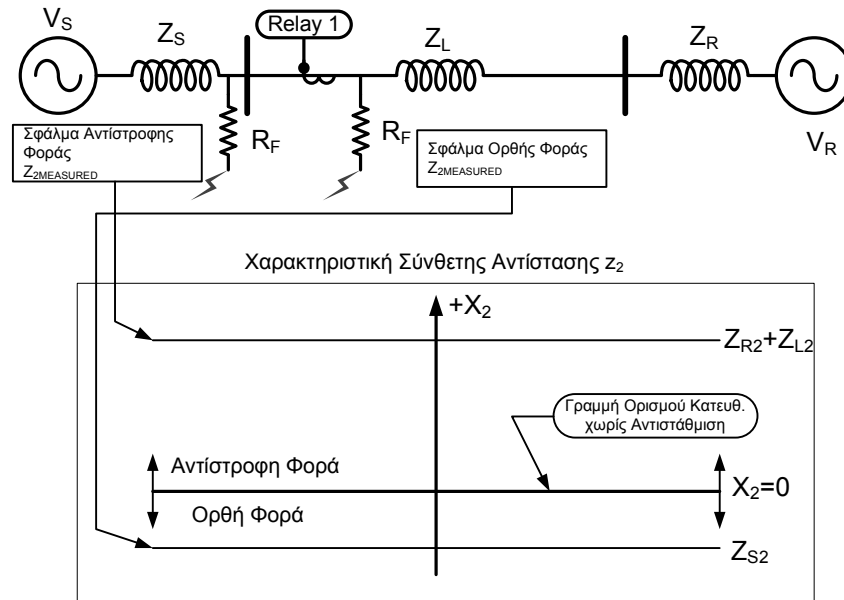
$$z_2 = \frac{\text{Re}[V_2 (I_2 1 \angle \theta)^*]}{\text{Re}[(I_2 1 \angle \theta)(I_2 1 \angle \theta)^*]}$$

$$z_2 = \frac{\text{Re}[V_2 (I_2 1 \angle \theta)^*]}{|I_2|^2} \quad (4.9)$$

όπου:

$z_2$  = η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας

$\theta$  = η γωνία της σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας



Σχήμα 4.26 Αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας που βλέπει το στοιχείο αρνητικής ακολουθίας για ορθής και αντίστροφης φοράς σφάλματα.

Η  $z_2$  της εξίσωσης (4.9) είναι ισοδύναμη με την  $Z_{2MEASURED}$ . Τα κριτήρια για τον ορισμό σφαλμάτων ορθής και αντίστροφης φοράς σφάλματος είναι:

$z_2 < Z_{2F}$  ρύθμιση (κατώφλι) σφάλματος ορθής φοράς

$z_2 > Z_{2R}$  ρύθμιση (κατώφλι) σφάλματος αντίστροφης φοράς.

Η  $Z_{2F}$  πρέπει να είναι μικρότερη από την  $Z_{2R}$  για να αποφεύγεται οποιαδήποτε επικάλυψη όταν η  $z_2$  ικανοποιεί και την συνθήκη ορθής και αντίστροφης φοράς ταυτόχρονα. Αν η τιμή της μετρούμενης  $V_2$  είναι τόσο μικρή ώστε η τιμή που παίρνουμε για την  $z_2$  είναι κοντά στο μηδέν, αλλά αυξάνουμε την ρύθμιση (κατώφλι)  $Z_{2F}$  για να αυξήσουμε την ασφάλεια ορισμού της κατεύθυνσης.

Υπενθυμίζεται ότι στο σχήμα 4.23 βλέπουμε ότι με την ποσότητα  $(-aZ_{L2}I_2)$  αυξάνεται η τιμή της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας της πηγής πίσω από τη θέση του ηλεκτρονόμου. Το ίδιο έργο επιτελείται με την αύξηση του κατωφλίου ορθής φοράς ( $Z_{2F}$ ).

Το στοιχείο κατεύθυνσης  $z_2$  έχει όλα τα πλεονεκτήματα, και του παραδοσιακού και του αντισταθμιστικού στοιχείου αρνητικής ακολουθίας. Επίσης παρέχει καλύτερη αντίληψη της ποσότητας αντιστάθμισης που απαιτείται και είναι ασφαλής. Οι ρυθμίσεις σύνθετης αντίστασης ορθής και αντίστροφης φοράς τίθενται με βάση τις συνθήκες ισχυρότερης πηγής.

#### 4.4.8 Συνδυασμός Φασικών και Υπόλοιπων Ρευμάτων (residual) στα Στοιχεία Κατεύθυνσης Γης

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι μεταβλητές λειτουργίας και πόλωσης ενός νέου στοιχείου κατεύθυνσης το οποίο συνδυάζει φασικά και υπόλοιπα ρεύματα (residual) Απαιτούνται τρία ανεξάρτητα στοιχεία κατεύθυνσης γης, ένα για κάθε φάση.

Πίνακας 4.6: Είσοδοι σε ένα απλό στοιχείο κατεύθυνσης γης

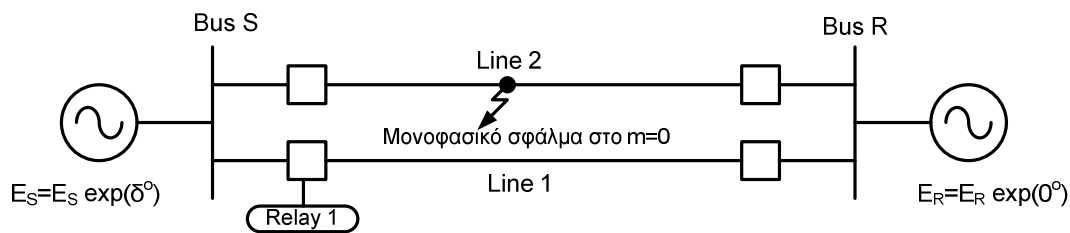
Φάση	Μεταβλητή Πόλωσης ( $V_{POL}$ )	Μεταβλητή Λειτουργίας ( $V_{OP}$ )
A	$V_A + jV_{BC}$	$Z_{L1} \cdot (I_A + k_0 3I_0)$
B	$V_B + jV_{CA}$	$Z_{L1} \cdot (I_B + k_0 3I_0)$
C	$V_C + jV_{AB}$	$Z_{L1} \cdot (I_C + k_0 3I_0)$

όπου:  $k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$  :αντισταθμιστική σταθερά μηδενικής ακολουθίας (zero – sequence. compensation factor).

Αυτός ο τύπος στοιχείου κατεύθυνσης έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Το υπόλοιπο ρεύμα (residual) αποτελείται από το άθροισμα των ρευμάτων και των τριών φάσεων, και παίρνει μέρος στην μεταβλητή λειτουργίας του κάθε ξεχωριστού στοιχείου φάσης. Έτσι ένα στοιχείο κατεύθυνσης σε μια υγιή φάση μπορεί δώσει λάθος ορισμό κατεύθυνσης του σφάλματος.

#### Παράδειγμα 4.5

Θεωρούμε στο σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 4.27. Στην γραμμή 2 συμβαίνει ένα σφάλμα της φάσης A ως προς την γη, με αντίσταση σφάλματος  $1 \Omega$ , κοντά στον ζυγό S. Στην ιδανική περίπτωση ο ηλεκτρονόμος πρέπει να ορίζει την κατεύθυνση του σφάλματος ως αντίστροφης φοράς.



Σχήμα 4.27 Δίκτυο του παραδείγματος 4.5

Το παράδειγμα αυτό λύνεται με την βοήθεια του Mathcad.

Ορισμοί

$$\begin{aligned} VA &:= W & KVA &:= 1000W & MVA &:= 1000KVA \\ pu &:= 1.0 & MW &:= MVA & MVAr &:= MVA \end{aligned}$$

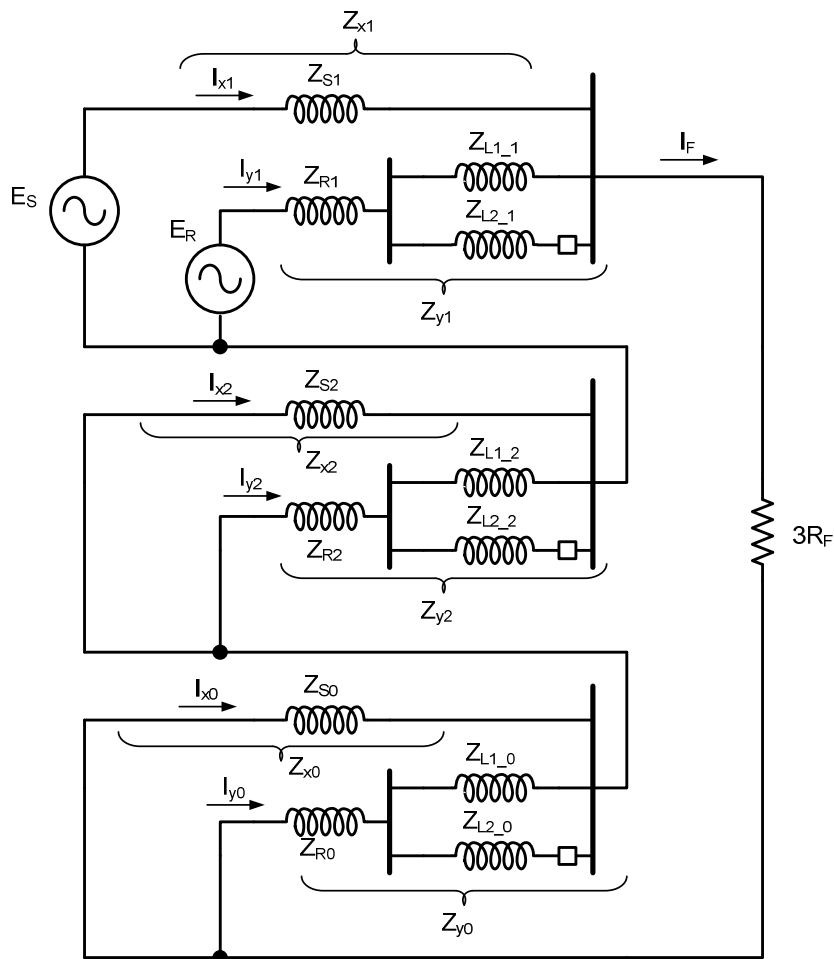
$$a := e^{\frac{2\pi i}{3}} \quad A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad a = -0.5 + 0.866i \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Δεδομένα

$$V_S := \frac{116}{\sqrt{3}} V \quad V_R := \frac{116}{\sqrt{3}} V$$

$$\begin{aligned} Z_{S1} &:= 0.8 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}} \Omega & Z_{R1} &:= Z_{S1} & Z_{L1\_1} &:= 8 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}} \Omega & Z_{L2\_1} &:= Z_{L1\_1} \\ Z_{S2} &:= Z_{S1} & Z_{R2} &:= Z_{R1} & Z_{L1\_2} &:= Z_{L1\_1} & Z_{L2\_2} &:= Z_{L2\_1} \\ Z_{S0} &:= 2.4 \cdot e^{j \cdot 90 \cdot \text{deg}} \Omega & Z_{R0} &:= Z_{S0} & Z_{L1\_0} &:= 24 \cdot e^{j \cdot 90 \cdot \text{deg}} \Omega & Z_{L2\_0} &:= Z_{L1\_0} & R_F &:= 1 \Omega \end{aligned}$$

Κατασκευάζουμε τα κύκλωμα ακολουθίας και τα συνδέουμε προκειμένου να υπολογίσουμε τα ρεύμα και τις τάσεις σφάλματος. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 4.28.



Σχήμα 4.28 Κυκλώματα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.27

Στο παραπάνω σχήμα ορίζουμε:

$$Z_{x1} := Z_{S1} \quad Z_{y1} := Z_{R1} + \frac{Z_{L1\_1} \cdot Z_{L2\_1}}{Z_{L1\_1} + Z_{L2\_1}}$$

$$Z_{x2} := Z_{S2} \quad Z_{y2} := Z_{R2} + \frac{Z_{L1\_2} \cdot Z_{L2\_2}}{Z_{L1\_2} + Z_{L2\_2}}$$

$$Z_{x0} := Z_{S0} \quad Z_{y0} := Z_{R0} + \frac{Z_{L1\_0} \cdot Z_{L2\_0}}{Z_{L1\_0} + Z_{L2\_0}}$$

Βρίσκουμε τον συντελεστή αντιστάθμισης μηδενικής ακολουθίας

$$k_0 := \frac{Z_{L1\_0} - Z_{L1\_1}}{3Z_{L1\_1}} \quad k_0 = 0.667$$

Ορίζουμε την συνάρτηση με την βοήθεια της οποίας θα λύσουμε το κύκλωμα, βάζοντας διαφορετικές τιμές στην γωνία  $\delta$  (delta) που ορίζει την ροή φορτίου προκειμένου να πάρουμε την γραφική παράσταση των διαφορών των γωνιών της μεταβλητής αναφοράς και λειτουργίας του κάθε στοιχείου κατεύθυνσης.

```
solve_circuit(VS, VR, RF, Zx1, Zy1, Zx2, Zy2, Zx0, Zy0, delta, A1, ZL1_1, k0)
```

Ο κώδικας της συνάρτησης αυτής φαίνεται στο παράρτημα Α.

Για γωνία  $\delta = 0^\circ$  υπολογίζουμε με την βοήθεια της παραπάνω συνάρτησης τις γωνίες των στοιχείων κατεύθυνσης. Αν αυτές είναι στην περιοχή μεταξύ των  $90^\circ$  και  $-90^\circ$  τότε το στοιχείο ορίζει κατάσταση σφάλματος ορθής φοράς.

```
delta := 0
```

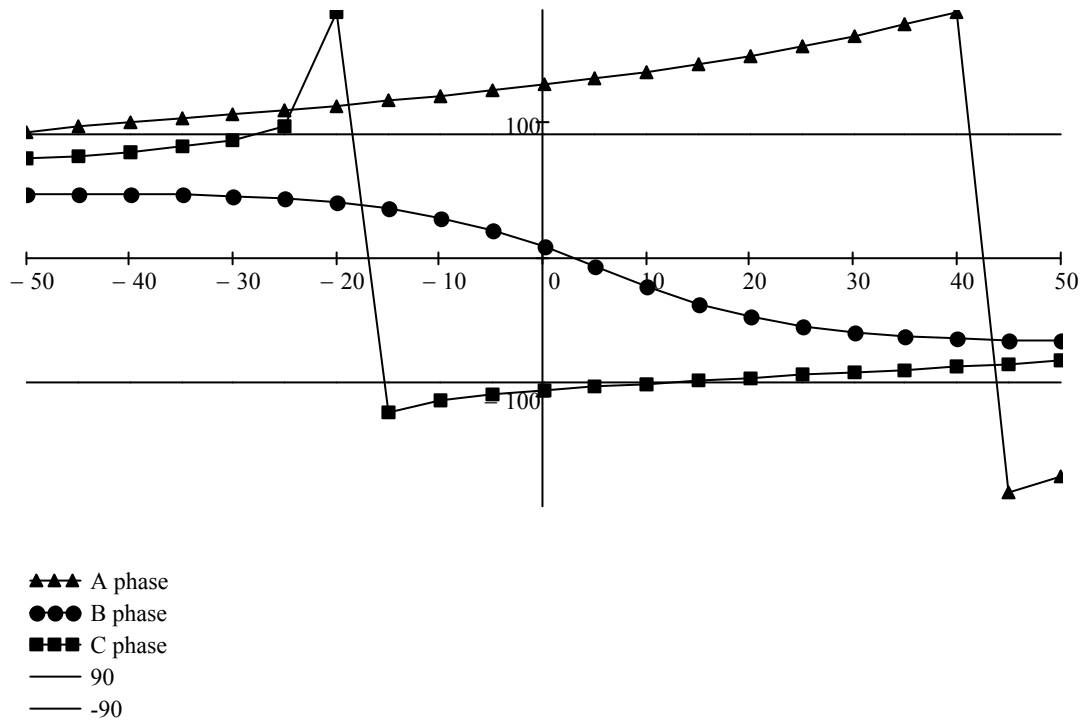
```
Theta := solve_circuit(VS, VR, RF, Zx1, Zy1, Zx2, Zy2, Zx0, Zy0, delta, A1, ZL1_1, k0)
```

$$\text{Theta} = \begin{pmatrix} 125.925 \\ 8.462 \\ -95.866 \end{pmatrix}$$

Τέλος παίρνουμε την γραφική παράσταση των διαφορών των γωνιών μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας του κάθε στοιχείου η οποία φαίνεται στο σχήμα 4.29.

```
delta := -50, -49.. 50
```





Σχήμα 4.29 Διάγραμμα της διαφοράς των ορισμάτων  $\theta$  των μεταβλητών πόλωσης και λειτουργίας συναρτήσει της γωνίας φορτίου  $\delta$ .

Στην περίπτωση όπου το φορτίο είναι μηδενικό ( $\delta = 0^\circ$ ), τα ρεύματα  $I_B$  και  $I_C$  είναι μηδέν και όλες οι μεταβλητές λειτουργίας (οι τάσεις  $V_{OP}$ ) είναι σε φάση. Μόνο το στοιχείο κατεύθυνσης γης της φάσης B ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς για  $\delta = 0^\circ$ . Καθώς αυξάνουμε το φορτίο τόσο του ζυγού S όσο και των άλλων μακριά από αυτόν, το στοιχείο κατεύθυνσης γης της φάσης C ορίζει επίσης το σφάλμα αντίστροφης φοράς ως ορθής (Σχήμα 4.29)

Από το σχήμα 4.29 βλέπουμε ότι, το στοιχείο κατεύθυνσης γης της φάσης B θα ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς, ενώ ορισμός κατεύθυνσης του στοιχείου της φάση C εξαρτάται από την κατεύθυνση ροής του φορτίου.

Η αδυναμία των τριών ανεξάρτητων στοιχείων κατεύθυνσης γης να συμφωνήσουν στην κατεύθυνση του σφάλματος καθιστούν αυτά τα στοιχεία μη ελκυστικά.

#### 4.4.9 Στοιχεία Κατεύθυνσης Γης σε Ασύμμετρες Καταστάσεις του Δικτύου

Θεωρούμε την περίπτωση ενός στοιχείου κατεύθυνσης γης που του επιτρέπεται να λειτουργεί χωρίς περιορισμούς κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Το στοιχείο αυτό μπορεί να ενεργοποιηθεί κατά την διάρκεια μιας κανονικής ασυμμετρίας του συστήματος που οφείλεται στην ασυμμετρία του φορτίου. Η κατεύθυνση που ορίζεται από αυτό το στοιχείο δεν λαμβάνεται υπόψη μέχρις ότου εμφανιστεί ένα σφάλμα ως προς γη.

Έπειτα, υποθέτουμε ότι στο σύστημα, στην άμεση γειτνίαση αυτού του στοιχείου κατεύθυνσης, συμβαίνει ένα σφάλμα. Αν το φορτίο που προκαλεί τον παραπάνω ορισμό

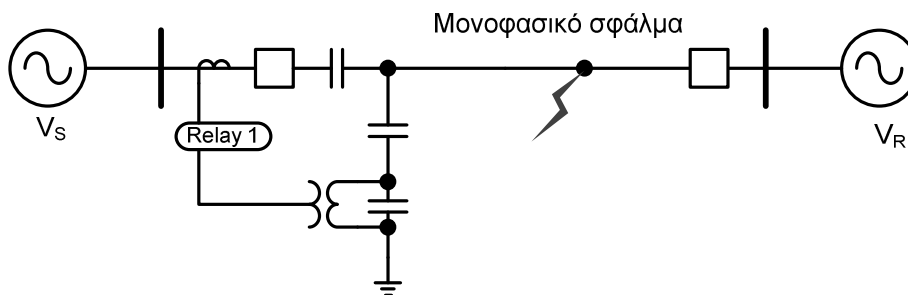
κατεύθυνσης είναι αντίθετης φοράς από αυτή της κατεύθυνσης σφάλματος, δημιουργείται ένας ανταγωνισμός μεταξύ του ενεργοποίησης του στοιχείου υπερέντασης κατεύθυνσης και του μηδενισμού (reset) της κατεύθυνσης που είχε οριστεί λόγω του ασύμμετρου φορτίου (το στοιχείο κατεύθυνσης πρέπει πρώτα να μηδενίσει την κατεύθυνση λόγω του ασύμμετρου φορτίου πριν ορίσει κατεύθυνση αντίθετης φοράς).

Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης ανταγωνισμού, το στοιχείο κατεύθυνσης πρέπει να ελέγχεται από ένα στοιχείο υπερέντασης. Πρέπει να θέσουμε την ευαισθησία του στοιχείου υπερέντασης ελέγχου πάνω από το ρεύμα κανονικής ασυμμετρίας του συστήματος. Με την απαίτηση να ενεργοποιείται το στοιχείο υπερέντασης ελέγχου πριν την ενεργοποίηση του στοιχείου κατεύθυνσης αποφεύγουμε να επηρεάζεται ο ορισμός κατεύθυνσης από το ρεύμα ασύμμετρου φορτίου.

## 4.5 Απόδοση των Στοιχείων Κατεύθυνσης

### 4.5.1 Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας σε Εφαρμογές Αντιστάθμισης Σειράς Γραμμών Μεταφοράς

Το σχήμα 4.30 παρουσιάζει μια γραμμή μεταφοράς 345 kV μήκους 239,68 μιλίων με αντιστάθμιση σειράς στο 42,5% της γραμμής. Το σχήμα 4.31 δείχνει τις τάσεις και τα ρεύματα για ένα σφάλμα της φάσης B ως προς γη, που συμβαίνει σε απόσταση 108 μιλίων από την θέση του ηλεκτρονόμου.



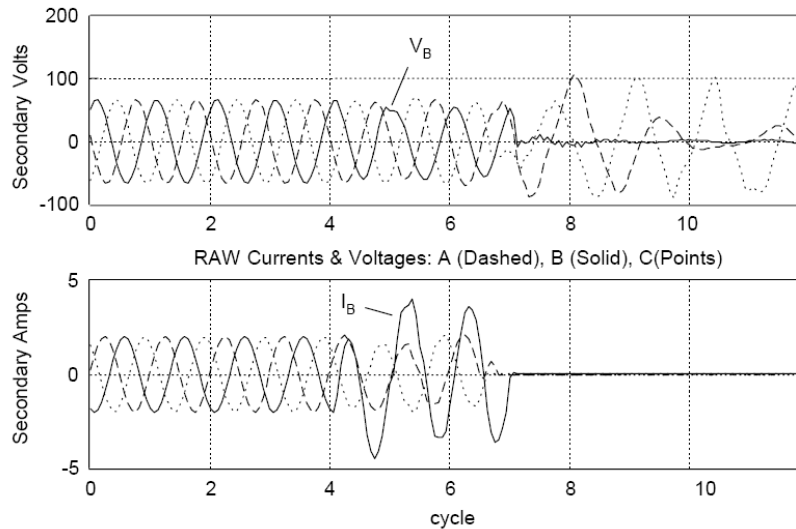
Σχήμα 4.30 Σφάλμα σε γραμμή μεταφοράς 239.68 μιλίων.

Για το παραπάνω σχήμα έχουμε:

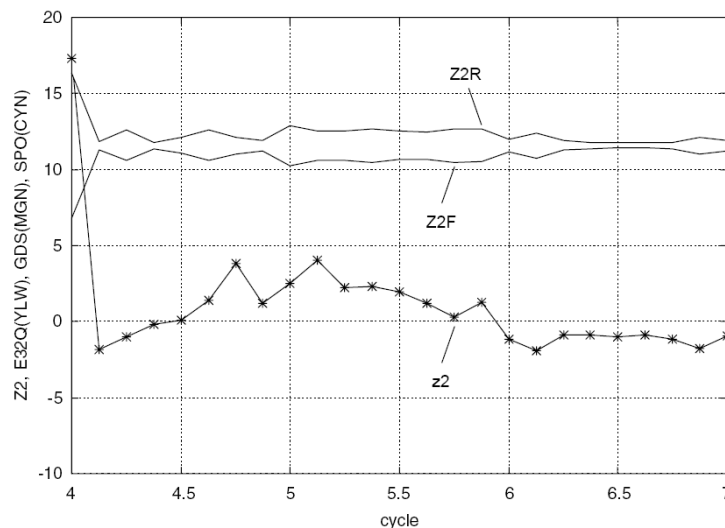
$$Z_{L1} = 134.33 \angle 86^\circ \Omega \quad Z_{L0} = 464 \angle 76.9^\circ \Omega \quad Z_C = 57 \angle -90^\circ \Omega$$

Το σχήμα 4.32 δείχνει την δυναμική απόκριση ( $z_2$ ) του στοιχείου κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας που αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Από το σχήμα 4.32, βλέπουμε ότι η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας ( $z_2$ ) έχει θετικές τιμές την στιγμή που εμφανίζεται το σφάλμα. Για αυτό το σφάλμα η  $z_2$  είναι πάντοτε μικρότερη από την ρύθμιση (κατώφλι) ορθής φοράς  $Z_{2F}$  (όταν δηλαδή  $z_2 < Z_{2F}$  έχουμε κατάσταση σφάλματος ορθής φοράς).



Σχήμα 4.31 Τάσεις και ρεύματα για ένα σφάλμα της Β φάσης σε απόσταση 108 μιλίων από την θέση του ηλεκτρονόμου



Σχήμα 4.32 Δυναμική απόκριση του στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας για το σφάλμα του σχήματος 4.31

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα υπολογισμού των ρυθμίσεων ( $Z_{2F}$  και  $Z_{2R}$ ) για την εφαρμογή αυτή.

#### Παράδειγμα 4.6

Οι σύνθετες αντιστάσεις δευτερεύοντος αρνητικής ακολουθίας του συστήματος που φαίνεται στο σχήμα 4.33 είναι:

Ισχυρότερη τοπική πηγή:  $Z_{S2} = j2.9 \Omega$

Πυκνωτής σειράς:  $Z_C = -j7.6 \Omega$

Γραμμή μεταφοράς:  $Z_{L2} = j17.9 \Omega$

Ισχυρότερη απομακρυσμένη πηγή  $Z_{R2} = j1.8 \Omega$

Σε αυτήν την εφαρμογή, οι μετασηματιστές τάσης βρίσκονται στην πλευρά της γραμμής του πυκνωτή σειράς. Για αυτήν την θέση των ΜΤ η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή σειράς

πρέπει να περιλαμβάνεται στον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας για σφάλματα ορθής φοράς.

Η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας για σφάλματα ορθής φοράς είναι:

$$Z_{2F} = -(Z_{S2} + Z_C) = -(j2.9 - j7.6) = j4.7 \Omega$$

Όμοια για σφάλματα αντίστροφης φοράς έχουμε:

$$Z_{2F} = Z_{R2} + Z_{L2} = j1.8 + j17.9 = j19.7 \Omega$$

Θέτουμε της ρυθμίσεις (κατώφλια) ορθής και αντίστροφης φοράς μεταξύ των σύνθετων αντιστάσεων που υπολογίστηκαν παραπάνω ( $Z_{2F}$  και  $Z_{2R}$ ). Η διαφορά του  $Z_{2F}$  από το  $Z_{2R}$  ορίζει την περιοχή ρύθμισης. Η ρύθμιση ορθής φοράς ( $Z_{2F}$ ) πρέπει να τεθεί πάνω από το  $Z_{2F}$  και η ρύθμιση αντίστροφης φοράς  $Z_{2R}$  κάτω από το  $Z_{2R}$ .

$$Z_{2REGION} = Z_{2R} + Z_{2F} = j19.7 - j4.7 = j15.0 \Omega$$

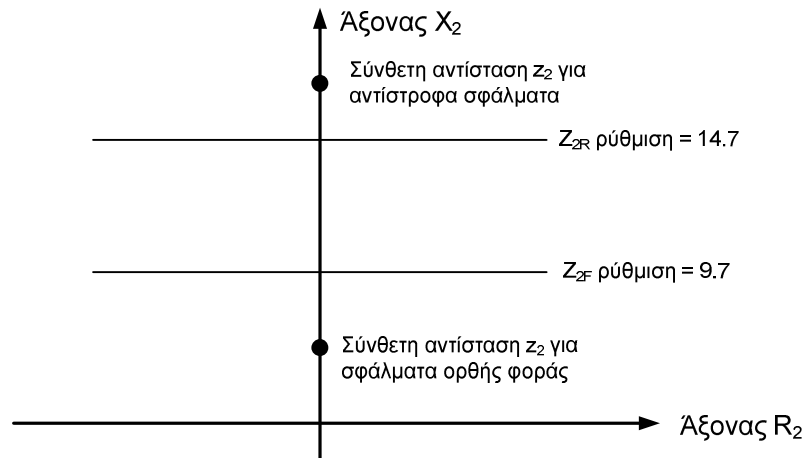
Οι παρακάτω εκφράσεις καθορίζουν της ρυθμίσεις ορθής και αντίστροφης φοράς:

$$Z_{2F} = z_{2F} + \frac{Z_{2REGION}}{3} = j4.7 + j5.0 = j9.7 \Rightarrow Z_{2F} = 9.7$$

$$Z_{2R} = z_{2R} - \frac{Z_{2REGION}}{3} = j19.7 - j5.0 = j14.7 \Rightarrow Z_{2F} = 14.7$$

Το σχήμα 4.33 δείχνει το διάγραμμα R – X σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας με της ρυθμίσεις ορθής και αντίστροφης φοράς καθώς επίσης και τους υπολογισμούς ( $Z_{2F}$  και  $Z_{2R}$ ) για σφάλματα ορθής και αντίστροφης φοράς.

Η σύνθετη αντίσταση  $Z_{2F}$  είναι μικρότερη από την ρύθμιση  $Z_{2F}$  για σφάλματα ορθής φοράς, και η σύνθετη αντίσταση  $Z_{2R}$  είναι μεγαλύτερη από την ρύθμιση  $Z_{2R}$  για σφάλματα αντίστροφης φοράς.



Σχήμα 4.33 Ρυθμίσεις και υπολογισμοί σύνθετων αντιστάσεων σε ένα στοιχείο κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας

#### 4.5.2 Στοιχείο Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας σε Γραμμή Μεταφοράς χωρίς Αντιμετάθεση Φάσεων.

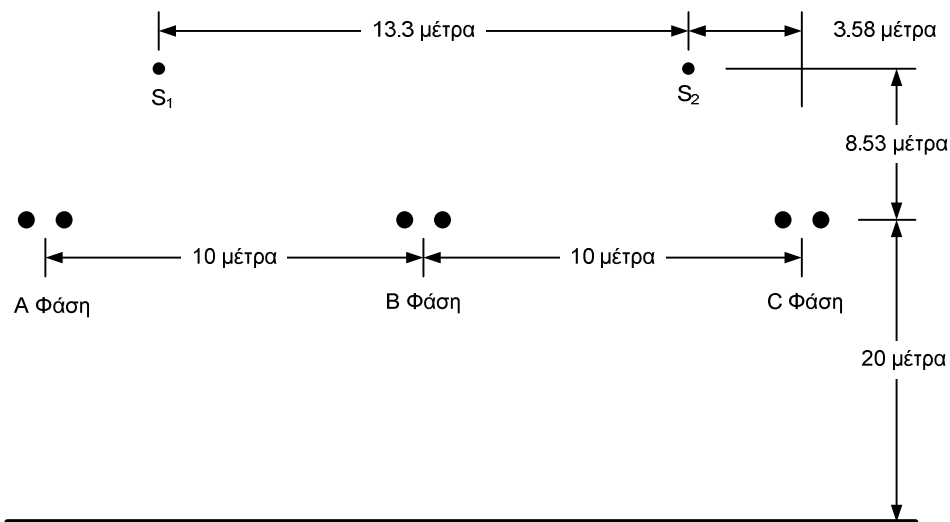
Οι γραμμές μεταφοράς χωρίς αντιμετάθεση φάσεων μπορεί να έχουν διαφορετικές σύνθετες αντιστάσεις γραμμής και αλληλεπαγωγής (μεταξύ των φάσεων). Τα τριφασικά σφάλματα σε αυτές τις γραμμές μεταφοράς παράγουν ρεύματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Μπορεί να εμφανιστεί μια ανεπιθύμητη ενεργοποίηση του στοιχείου

κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας λόγω του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας το οποίο παράγεται από το τριφασικό σφάλμα σε αυτές τις γραμμές.

Οι παρακάτω τιμές είναι οι σύνθετες αντιστάσεις γραμμής και αλληλεπαγωγής μιας γραμμής μεταφοράς 400 kV μήκους 110 km με δέσμη αγωγών ACSR 1113 Blujay. Η διαμόρφωση του πυλώνα των 400 kV φαίνεται στο σχήμα 4.34.

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.07 + j63.10 & 9.25 + j22.08 & 8.93 + j17.01 \\ 9.25 + j22.08 & 12.07 + j63.10 & 9.25 + j22.08 \\ 8.93 + j17.01 & 9.25 + j22.08 & 12.07 + j63.10 \end{bmatrix}$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις γραμμής ( $Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc}$ ) και οι σύνθετες αντιστάσεις αλληλεπαγωγής ( $Z_{ab}, Z_{ba}, Z_{ac}, Z_{ca}, Z_{bc}, Z_{cb}$ ) διαφέρουν επειδή οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών φάσεων A, B και C είναι διαφορετικές.



Σχήμα 4.34 Τυπική διαμόρφωση πυλώνα γραμμής μεταφοράς 400kV

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε μηδενική σύνθετη αντίσταση πηγής και ακτινικό σύστημα, ο ηλεκτρονόμος 1 μετρά τα παρακάτω ρεύματα ακολουθίας για ένα τριφασικό σφάλμα στο τέλος της γραμμής μεταφοράς των 400kV.

$$I_{A0} = 74.21 \angle -19.14^\circ \text{ A}$$

$$I_{A1} = 5483.74 \angle -85.84^\circ \text{ A}$$

$$I_{A2} = 486.26 \angle -36.82^\circ \text{ A}$$

Στα παραπάνω ρεύματα ακολουθίας βλέπουμε ότι ο λόγος  $\frac{I_{A2}}{I_{A1}}$  είναι μικρός στα τριφασικά σφάλματα. Ο ίδιος λόγος προσεγγίζει την μονάδα στα διφασικά και στα μονοφασικά ως προς γη σφάλματα. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το λόγο αυτό για να επιτηρήσουμε το στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας, ενεργοποιώντας το, αν  $\frac{|I_{A2}|}{|I_{A1}|} > \alpha_2$ . Ονομάζουμε αυτήν την μεταβλητή  $\alpha_2$  παράγοντα συγκράτησης θετικής ακολουθίας (restraint factor).

Για την γραμμή μεταφοράς των 400 kV χωρίς αντιμετάθεση φάσεων που περιγράφηκε παραπάνω, υπολογίζουμε τον ελάχιστο παράγοντα  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \frac{|I_{A2}|}{|I_{A1}|} = \frac{486.26}{5484.74} = 0.09$$

Αυτός ο παράγοντας συγκράτησης θετικής ακολουθίας πρέπει να είναι ρυθμιζόμενος ώστε να προσαρμόζεται σε οποιαδήποτε διαμόρφωση της γραμμής. Για αυτήν την γραμμή των 400 kV θέτοντας  $\alpha_2 > 0.09$  αποτρέπουμε το στοιχείο κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας να ενεργοποιηθεί για τριφασικά σφάλματα.

#### 4.5.3 Σύγκριση του Στοιχείου Κατεύθυνσης Αρνητικής Ακολουθίας με το Στοιχείο Κατεύθυνσης Δέλτα Σύνθετης Αντίστασης Θετικής Ακολουθίας (Delta Positive-Sequence)

Ο McLaren και οι λοιποί στην αναφορά [13] προτείνουν ένα νέο στοιχείο κατεύθυνσης για τον καθορισμό της κατεύθυνσης του σφάλματος, ανεξάρτητα από τον τύπο του. Το προτεινόμενο αυτό στοιχείο κατεύθυνσης υπολογίζει πρώτα την  $\delta Z_1$ , την δέλτα σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας, και μετά εξετάζει σε ποιο τεταρτημόριο του διαγράμματος σύνθετης αντίστασης R – X βρίσκεται το αποτέλεσμα, για να καθοριστεί η κατεύθυνση του σφάλματος.

Αν η τιμή  $\delta Z_1$  βρίσκεται στο τρίτο τεταρτημόριο, το σφάλμα θεωρείται ορθής φοράς, ενώ αν βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο θεωρείται αντίστροφης φοράς.

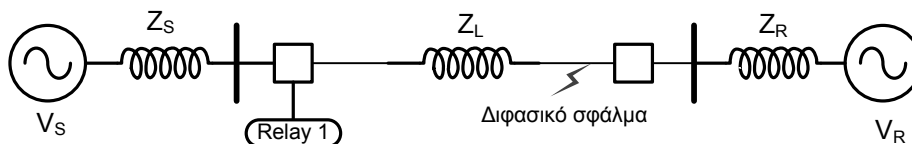
Με την παρακάτω εξίσωση υπολογίζουμε την  $\delta Z_1$ :

$$\delta Z_1 = \frac{V_1 - V_{PRE1}}{I_1 - I_{PRE1}} \quad (4.10)$$

όπου:

$V_1$	= Τάση σφάλματος θετικής ακολουθίας
$V_{PRE1}$	= Τάση προ του σφάλματος θετικής ακολουθίας
$I_1$	= Ρεύμα σφάλματος θετικής ακολουθίας
$I_{PRE1}$	= Ρεύμα προ σφάλματος θετικής ακολουθίας

Στον Πίνακα 4.7 συγκρίνεται το στοιχείο κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας με το στοιχείο κατεύθυνσης δέλτα σύνθετης αντίστασης θετικής ακολουθίας για την θέση του σφάλματος που φαίνεται στο σχήμα 4.35. Στο παρακάτω παράδειγμα υπολογίζονται για επίδειξη οι σύνθετες αντιστάσεις  $\delta Z_1$  και  $z_2$  στην περίπτωση του διφασικού σφάλματος και για γωνία  $\delta = 30^\circ$ .



Σχήμα 4.35 Διφασικό σφάλμα κοντά στον απομακρυσμένο ζυγό

Παράδειγμα 4.7

Στο παράδειγμα αυτό υπολογίζονται για επίδειξη οι σύνθετες αντιστάσεις  $\delta Z_1$  και  $\delta Z_2$  στην περίπτωση του διαφασικού σφάλματος με αντίσταση  $R_F = 1\Omega$  και για γωνία  $\delta = 30^\circ$ . Το παράδειγμα αυτό λύνεται με την βοήθεια του MathCad.

Ορισμοί

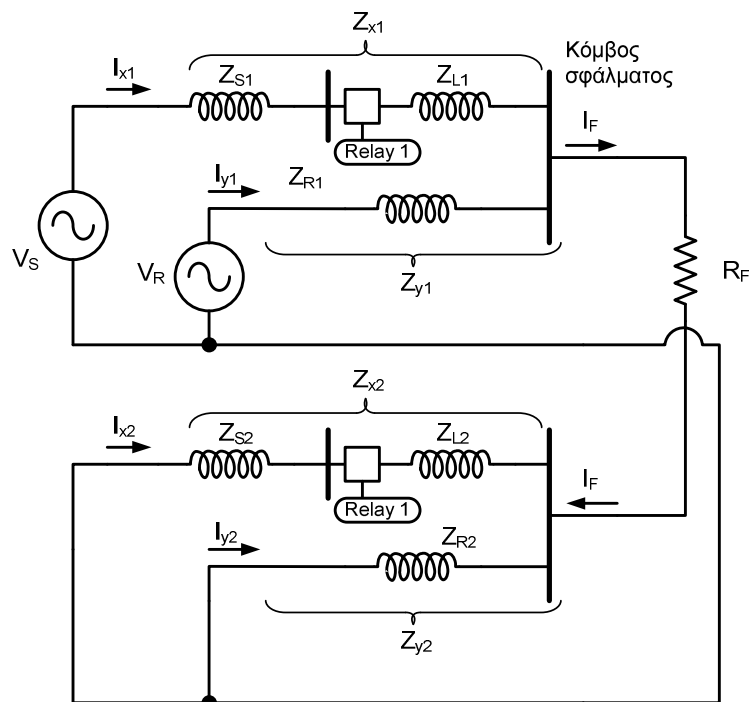
$$\begin{aligned} VA &:= W & KVA &:= 1000W & MVA &:= 1000KVA \\ \rho &:= 1.0 & MW &:= MVA & MVAr &:= MVA \end{aligned}$$

$$a := e^{\frac{2\pi i}{3}} \quad A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad a = -0.5 + 0.866i \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Δεδομένα

$$\begin{aligned} V_S &:= \frac{116}{\sqrt{3}} e^{j \cdot 30 \text{deg}} \cdot V & V_R &:= \frac{116}{\sqrt{3}} V \\ Z_{S1} &:= 0.8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega & Z_{R1} &:= Z_{S1} & Z_{L1} &:= 8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega \\ Z_{S2} &:= 0.8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega & Z_{R2} &:= Z_{S2} & Z_{L2} &:= 8 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega \\ Z_{S0} &:= 2.4 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega & Z_{R0} &:= Z_{S0} & Z_{L0} &:= 24 \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \Omega & R_F &:= 1\Omega \end{aligned}$$

Κατασκευάζουμε τα κύκλωμα ακολουθίας που αντιστοιχεί στο σχήμα 4.35 για διαφασικό σφάλμα κοντά στον ζυγό R.



Σχήμα 4.36 Κύκλωμα ακολουθίας για το δίκτυο του σχήματος 4.35

Στο παραπάνω σχήμα ορίζουμε:

$$Z_{x1} := Z_{S1} + Z_{L1} \quad Z_{y1} := Z_{R1}$$

$$Z_{x2} := Z_{S2} + Z_{L2} \quad Z_{y2} := Z_{R2}$$

Βρίσκουμε το ισοδύναμο Thevenin ως προς τον κόμβο του σφάλματος.

$$Z_{th} := \frac{Z_{x1} \cdot Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} + \frac{Z_{x2} \cdot Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad I_{temp} := \frac{V_S - V_R}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_{th} := V_S - I_{temp} \cdot Z_{x1}$$

Με την βοήθεια του ισοδύναμου Thevenin υπολογίζουμε το ρεύμα σφάλματος. Μετά με την χρήση διαιρέτη ρεύματος υπολογίζουμε το ρεύμα που ρέει στον ηλεκτρονόμο.

$$I_F := \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_F} \quad I_F = (22.315 - 29.938i) \text{ A}$$

$$I_{x1} := I_F \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$I_{x2} := -I_F \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad I_{x2} = (-1.86 + 2.495i) \text{ A}$$

Οι τάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας στον ηλεκτρονόμο είναι:

$$V_{relay1} := V_S - I_{x1} \cdot Z_{S1} \quad V_{relay2} := -I_{x2} \cdot Z_{S2}$$

Το ρεύμα (θετικής ακολουθίας) πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$I_{PRE1} := \frac{V_S - V_R}{Z_{R1} + Z_{S1} + Z_{L1}} \quad V_{PRE1} := V_S - I_{PRE1} \cdot Z_{S1}$$

Η δέλτα σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας είναι:

$$\delta Z_1 := \frac{V_{relay1} - V_{PRE1}}{I_{x1} - I_{PRE1}} \quad \delta Z_1 = -0.8i \Omega$$

Και η συνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας:

$$z_2 := \frac{\text{Re} \left[ V_{relay2} \cdot \left( I_{x2} \cdot e^{j \cdot \arg(Z_{L1})} \right) \right]}{\left( |I_{x2}| \right)^2} \quad z_2 = -0.8 \Omega$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και τα υπόλοιπα σφάλματα που αναφέρονται στον πίνακα 4.7.

Στον πίνακα 4,7, βλέπουμε ότι και τα δύο στοιχεία λειτουργούν σωστά για τις συνθήκες σφάλματος που φαίνονται. Όμως, το στοιχείο κατεύθυνσης δέλτα σύνθετης αντίστασης θετικής ακολουθίας απαιτεί έγκυρα δεδομένα τάσης και ρεύματος πριν την εμφάνιση του σφάλματος, έτσι ώστε να είναι σωστός ορισμός κατεύθυνσης που κάνει.



Πίνακας 4.7 Σύνθετες αντιστάσεις  $\delta Z_1$  και  $z_2$  για διαφορετικές συνθήκες σφάλματος

Σφάλμα	$\delta$	$z_2$	$\delta Z_1$
A-G	$0^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
B-C	$0^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
B-C-G	$0^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
A-G	$30^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
B-C	$30^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
B-C-G	$30^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
A-G	$-30^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
B-C	$-30^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$
B-C-G	$-30^\circ$	-0.8	$0.8\angle -90^\circ$

Αντίθετα με το στοιχείο κατεύθυνσης δέλτα σύνθετης αντίστασης θετικής ακολουθίας, η μέθοδος υπολογισμού της κατεύθυνσης σφάλματος του στοιχείου αρνητικής ακολουθίας είναι η ίδια για όλους τους τύπους σφαλμάτων, δεν χρειάζεται δεδομένα πριν την εμφάνιση του σφάλματος και δεν εξαρτάται από την κατάσταση φορτίου. Ένας απλός έλεγχος του αποτελέσματος είναι αρκετός για να καθοριστεί αν το σφάλμα είναι ορθής ή αντίστροφης κατεύθυνσης.

## 5 Πηγές Πόλωσης για τους Ηλεκτρονόμους Κατεύθυνσης Γης

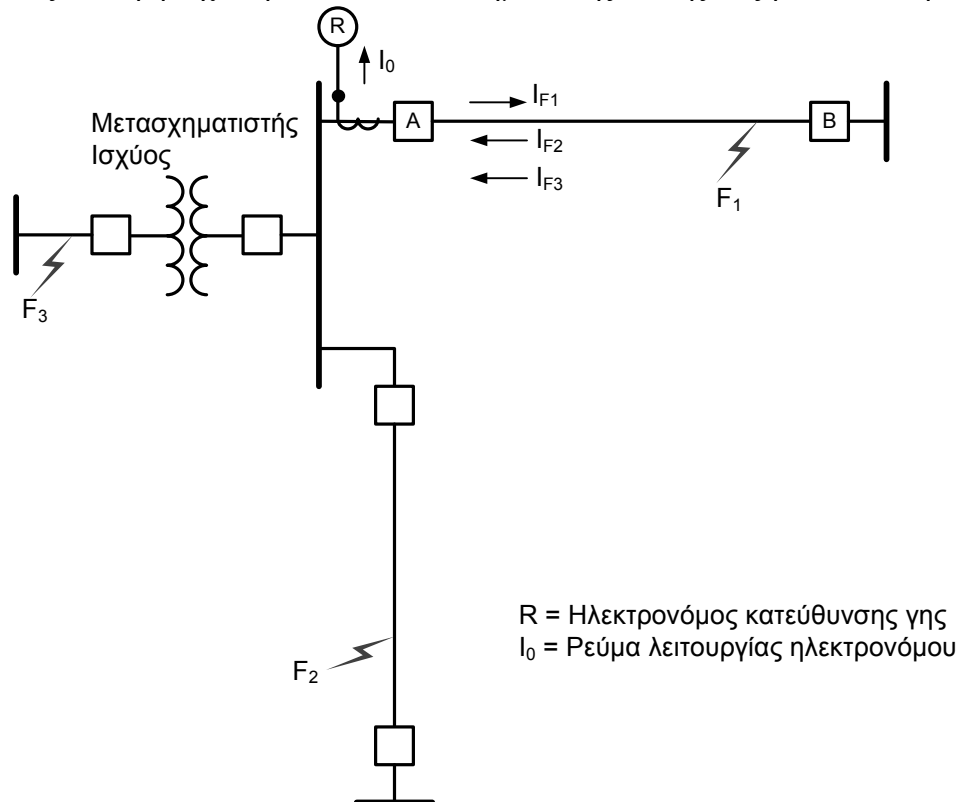
### 5.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης απαιτούν να έχει οριστεί μια μεταβλητή αναφοράς ώστε να είναι ικανοί να καθορίζουν την κατεύθυνση του σφάλματος στη θέση όπου αυτοί βρίσκονται. Αυτή η μεταβλητή αναφοράς ονομάζεται μεταβλητή πόλωσης και για τους ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης γης μπορεί να είναι είτε το ρεύμα, είτε η τάση μηδενικής ακολουθίας. Έναντι αυτής της αναφοράς η μεταβλητή λειτουργίας συγκρίνεται. Η μεταβλητή λειτουργίας προέρχεται και είναι ανάλογη του ρεύματος γραμμής, που μετράται στην θέση του ηλεκτρονόμου. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα μεταφοράς, στο οποίο φαίνονται επίσης τα ρεύματα της γραμμής στον διακόπτη ισχύος  $A$  για σφάλματα που συμβαίνουν σε διαφορετικές θέσεις του συστήματος αυτού. Το ρεύμα γραμμής για ένα σφάλμα στο σημείο  $F1$  εμφανίζεται να έχει αντίθετη κατεύθυνση από ότι αυτό για ένα σφάλμα στο σημείο  $F2$  ή στο σημείο  $F3$ . Τα ρεύματα γραμμής αλλάζουν κατεύθυνση ανάλογα με την θέση του σφάλματος, επομένως είναι αναγκαίο να παραμένει σταθερή η κατεύθυνση της μεταβλητής πόλωσης προκειμένου να είναι αξιόπιστη η λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Αν η κατεύθυνση της μεταβλητής πόλωσης, αλλάζει φορά είναι πιθανόν να παραπλανηθεί ο ηλεκτρονόμος με αποτέλεσμα την εσφαλμένη ενεργοποίησή του. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην εγκατάσταση των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης γης έγκειται επομένως στην επιλογή μιας σταθερής ως προς την κατεύθυνση μεταβλητής πόλωσης. Είναι αναγκαίο επίσης να εξασφαλισθεί ότι η μεταβλητή αυτή θα έχει ικανοποιητική τιμή έτσι ώστε να είναι δυνατή η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των πηγών πόλωσης, των διαφορετικών σχημάτων προστασίας που είναι διαθέσιμα, επίσης να αναλυθούν τα προβλήματα που προκύπτουν σε κάθε ένα από αυτά και τέλος να γίνει μια συνοπτική ομαδοποίηση των συνήθων χρησιμοποιούμενων σχημάτων.

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης γης μηδενικής ακολουθίας, που σχεδιάστηκαν αρχικά, χρησιμοποιούσαν ή μόνο πόλωση ρεύματος, ή μόνο πόλωση τάσης. Οι νεότεροι, οι στατικοί καθώς επίσης και οι ηλεκτρομαγνητικοί ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης γης σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν ή πόλωση ρεύματος, ή πόλωση τάσης ή και τα δύο. Όταν χρησιμοποιείται μόνο το ρεύμα ως μεταβλητή πόλωσης λέμε ότι ο ηλεκτρονόμος είναι πολωμένος με ρεύμα (current polarizing). Όταν χρησιμοποιείται μόνο η τάση ως μεταβλητή πόλωσης λέμε ότι ο ηλεκτρονόμος είναι πολωμένος με τάση (voltage polarizing). Όταν χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι πόλωσης λέμε ότι ο ηλεκτρονόμος είναι διπλά πολωμένος (dual polarizing). Μερικά πλεονεκτήματα, τα οποία συζητούνται στην συνέχεια, αποκομίζονται με την χρήση διπλής πόλωσης.

Οι σύγχρονοι στατικοί, αναλογικοί και ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι πολλαπλών λειτουργιών προσφέρουν λειτουργίες κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας οι οποίες

χρησιμοποιούνται για παρέχουν έλεγχο κατεύθυνσης στα στοιχεία υπερέντασης μηδενικής ακολουθίας. Αυτή η τεχνική και τα πλεονεκτήματά της επίσης συζητούνται στην συνέχεια.



Σχήμα 5.1: Τυπικό σύστημα μεταφοράς

## 5.2 Πόλωση ρεύματος

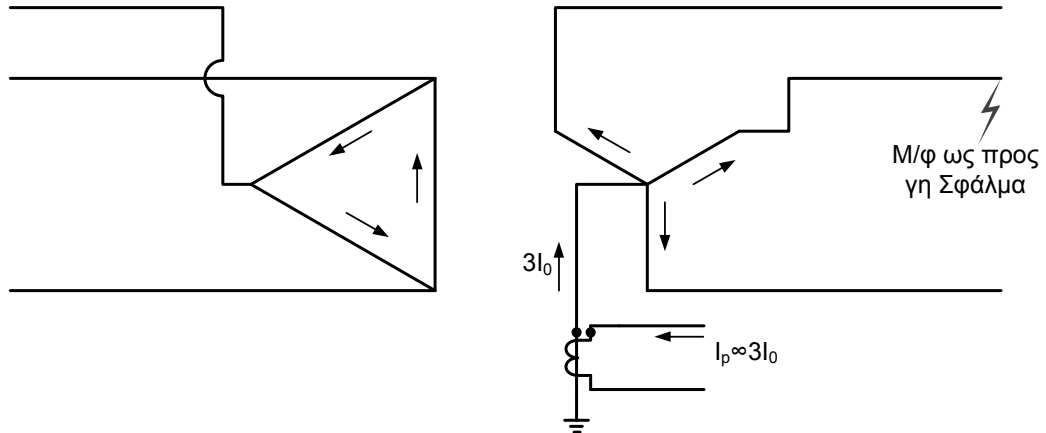
Η πόλωση ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα σημεία του συστήματος, που βρίσκονται οι μετασχηματιστές ισχύος, και στους ουδέτερους τους γειώνεται με διάφορες μεθόδους. Η πόλωση ρεύματος μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους μεταξύ των οποίων είναι:

- Μετασχηματιστής έντασης (ME) στον ουδέτερο του μετασχηματιστή ισχύος
- Μετασχηματιστής έντασης (ME) στον τριτεύον του μετασχηματιστή ισχύος.
- Διάφοροι συνδυασμοί ME που είναι τοποθετημένοι στην υψηλή τάση, ή στην χαμηλή τάση ή στον ουδέτερο του μετασχηματιστή ισχύος.

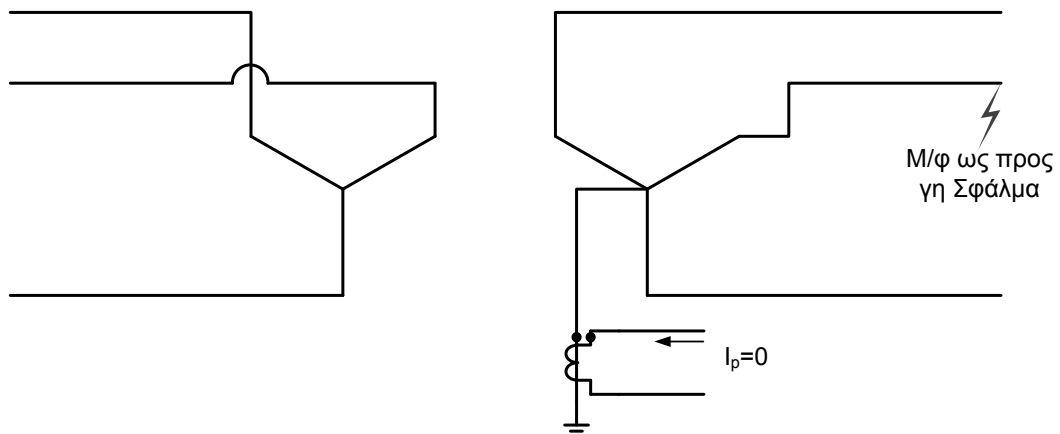
Πρέπει να σημειωθεί αν και μπορεί να υπάρχει διαθέσιμος μετασχηματιστής με γειωμένο ουδέτερο, δεν όμως είναι σίγουρο ότι αυτός είναι μια κατάλληλη πηγή πόλωσης ρεύματος και αυτό εξαρτάται από την διάταξη του μετασχηματιστή ή/και από τις συνθήκες του συστήματος.

Στο σχήμα 5.2 φαίνονται τυπικές διατάξεις μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων. Για το ρεύμα ουδέτερου στην διάταξη τριγώνου – αστέρα που φαίνεται στο σχήμα 5.2Α, αποδεικνύεται ότι είναι κατάλληλος ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Ένας απλός μετασχηματιστής έντασης, στον ουδέτερο του μετασχηματιστή ισχύος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθεί το ρεύμα πόλωσης από το υπόλοιπο ρεύμα (residual) . Για

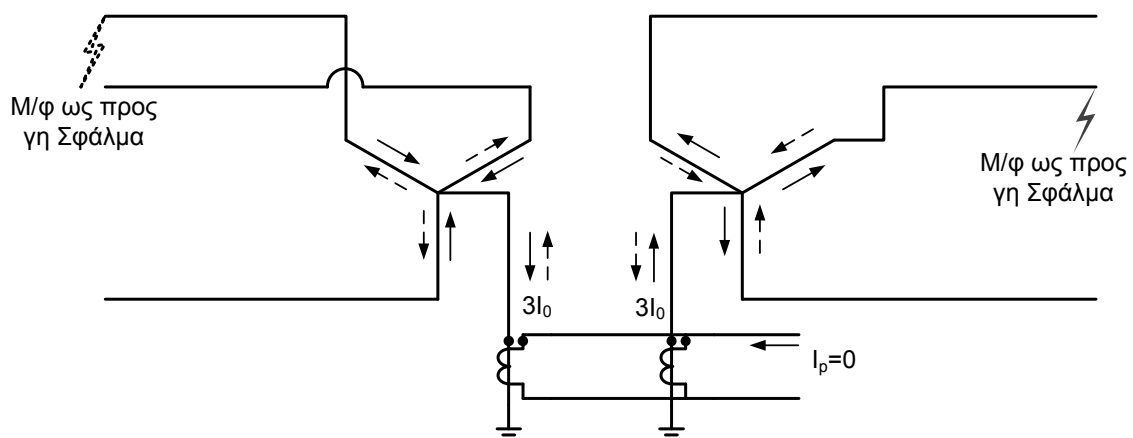
σφάλματα ως προς γη στο σύστημα, στην πλευρά του αστέρα, το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας θα ρέει προς τα πάνω στον ουδέτερο. Για σφάλματα στο σύστημα στην πλευρά του τριγώνου δεν θα δημιουργηθεί ρεύμα μηδενικής ακολουθίας στον ουδέτερο του τυλίγματος αστέρα.



**A. Μετασχηματιστής τριγώνου - γειωμένου αστέρα, κατάλληλος για πόλωση ρεύματος**



**B. Μετασχηματιστής αγείωτου αστέρα - γειωμένου αστέρα, ακατάλληλος για πόλωση ρεύματος**



**Γ. Μετασχηματιστής γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα, ακατάλληλος για πόλωση ρεύματος**

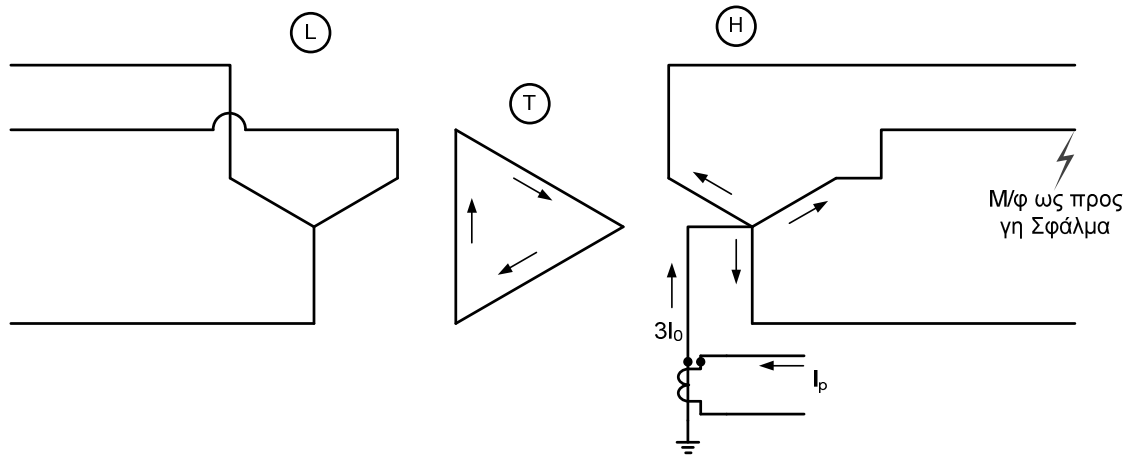
**Σχήμα 5.2 Διαφορές διαμορφώσεις μετασχηματιστών δυο τυλιγμάτων**

Ένας μετασχηματιστής σύνδεσης αγείωτου αστέρα – γειωμένου αστέρα φαίνεται στο σχήμα 5.2B. Η διάταξη αυτή δεν είναι κατάλληλη πηγή για ρεύματα πόλωσης επειδή δεν υπάρχει ροή, ούτε είναι ο μετασχηματιστής αυτός πηγή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας. Στον μετασχηματιστή του σχήματος 5.2B έχει θεωρηθεί ότι δεν διαθέτει τριτεύον τύλιγμα. Ωστόσο, αν ο μετασχηματιστής είναι κατασκευής τύπου πυρήνα, ένα φανταστικό τριτεύον μπορεί να δημιουργηθεί, με την εμφάνιση του οποίου μπορεί να γίνει ο ουδέτερος ικανός για πόλωση.

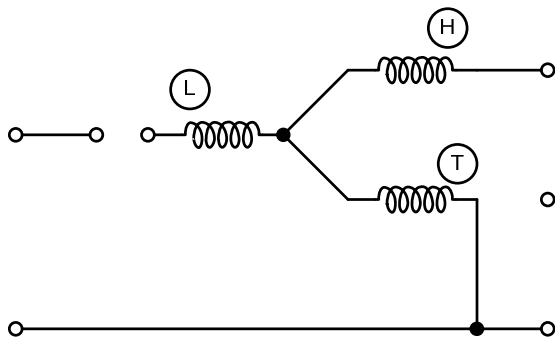
Στο σχήμα 5.2Γ φαίνεται ένας μετασχηματιστής γειωμένου αστέρα – γειωμένου αστέρα ο οποίος δεν διαθέτει τριτεύον τύλιγμα. Σε αυτόν τον μετασχηματιστή, για σφάλματα ως προς γη που μπορεί να συμβούν στην μία ή στην άλλη πλευρά του μετασχηματιστή, υπάρχει ροή ρευμάτων και στους δυο ουδέτερους. Οι μετασχηματιστές αυτοί δεν είναι κατάλληλοι ως πηγές ρευμάτων πόλωσης των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης γης μηδενικής ακολουθίας. Για την απόδειξη αυτού θεωρούμε ένα σφάλμα στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή στον οποίο το ρεύμα ρέει προς τα πάνω στον ουδέτερο της υψηλής τάσης και προς τα κάτω στον ουδέτερο της χαμηλής τάσης. Τώρα θεωρούμε ένα σφάλμα στην πλευρά χαμηλής τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρεύμα ρέει προς τα κάτω στον ουδέτερο της υψηλής τάσης και προς τα πάνω στον ουδέτερο της χαμηλής. Αυτό είναι ακριβώς το αντίθετο από αυτό που συμβαίνει για σφάλματα στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή. Έτσι, τα ρεύματα ουδετέρου και στις δυο πλευρές του μετασχηματιστή έχουν διαφορετική κατεύθυνση για σφάλματα που συμβαίνουν στην μία ή στην άλλη πλευρά του, με αποτέλεσμα ο ηλεκτρονόμος που είναι συνδεδεμένος με έναν ΜΕ που βρίσκεται σε έναν από τους δυο ουδέτερους αν μην έχει την δυνατότητα να καθορίσει σωστά την κατεύθυνση του σφάλματος. Σε μερικές περιπτώσεις μετασχηματιστών ισχύος που έχουν δυο γειωμένους ουδέτερους, είναι δυνατόν να ληφθεί ένα κατάλληλο ρεύμα πόλωσης με την παράλληλη σύνδεση των ΜΕ οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι και στους δυο ουδέτερους. Ο λόγος μετασχηματισμού των ΜΕ πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου του αριθμού των ελιγμάτων των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή ισχύος. Ωστόσο, οι λόγοι μετασχηματισμού που επιλέγονται με αυτόν τον τρόπο θα έχουν ως αποτέλεσμα, στην περίπτωση του μετασχηματιστή δυο τυλιγμάτων που φαίνεται στο σχήμα 5.2Γ, να μην ρέει ρεύμα στο κύκλωμα πόλωσης του ηλεκτρονόμου για όλα τα είδη σφαλμάτων του συστήματος. Έτσι, τα ρεύματα του ουδετέρου του μετασχηματιστή αυτού δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ρευμάτων πόλωσης. Εδώ πάλι, αν ο μετασχηματιστής είναι κατασκευής τύπου πυρήνα ένα φανταστικό τριτεύον μπορεί να δημιουργηθεί. Ο μετασχηματιστής τότε είναι παρόμοιος με τον μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων που συζητείται παρακάτω και φαίνεται στο σχήμα 5.4. Επομένως υπάρχει η δυνατότητα να ληφθεί ένα κατάλληλο ρεύμα πόλωσης με τους ΜΕ να βρίσκονται στους δυο ουδέτερους και να είναι συνδεδεμένοι παράλληλα

Οι μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων οι οποίοι συναντώνται συχνά σε υποσταθμούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης ως πηγές ρευμάτων πόλωσης. Το σχήμα 5.3 δείχνει μια τυπική διάταξη μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων, που είναι κατάλληλος για χρήση ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Αυτό που φαίνεται στο σχήμα είναι ένας μετασχηματιστής αγείωτου αστέρα – τριγώνου – γειωμένου αστέρα καθώς επίσης και οι απαιτούμενες συνδέσεις των ΜΕ για την λήψη των ρευμάτων πόλωσης. Για σφάλματα ως προς γη, στην

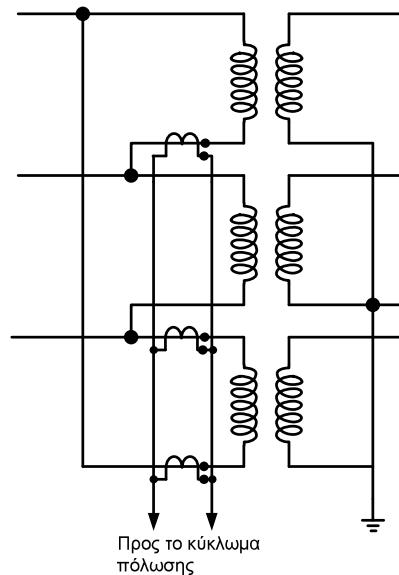
πλευρά του γειωμένου αστέρα, το ρεύμα ουδέτερου θα ρέει πάντα προς τα πάνω στον ουδέτερο του τυλίγματος αυτού. Το τυλίγμα τριγώνου του τριτεύοντος παρέχει μια διαδρομή για την κυκλοφορία του ρεύματος αυτού. Δεν μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος στον ουδέτερο του τυλίγματος γειωμένου αστέρα, για σφάλματα στην πλευρά του αγειώτου αστέρα ή στην πλευρά του τριγώνου.



**A. Μετασχηματιστής αγειώτου αστέρα - τριγώνου - γειωμένου αστέρα**



**B. Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για τον παραπάνω μετασχηματιστή**

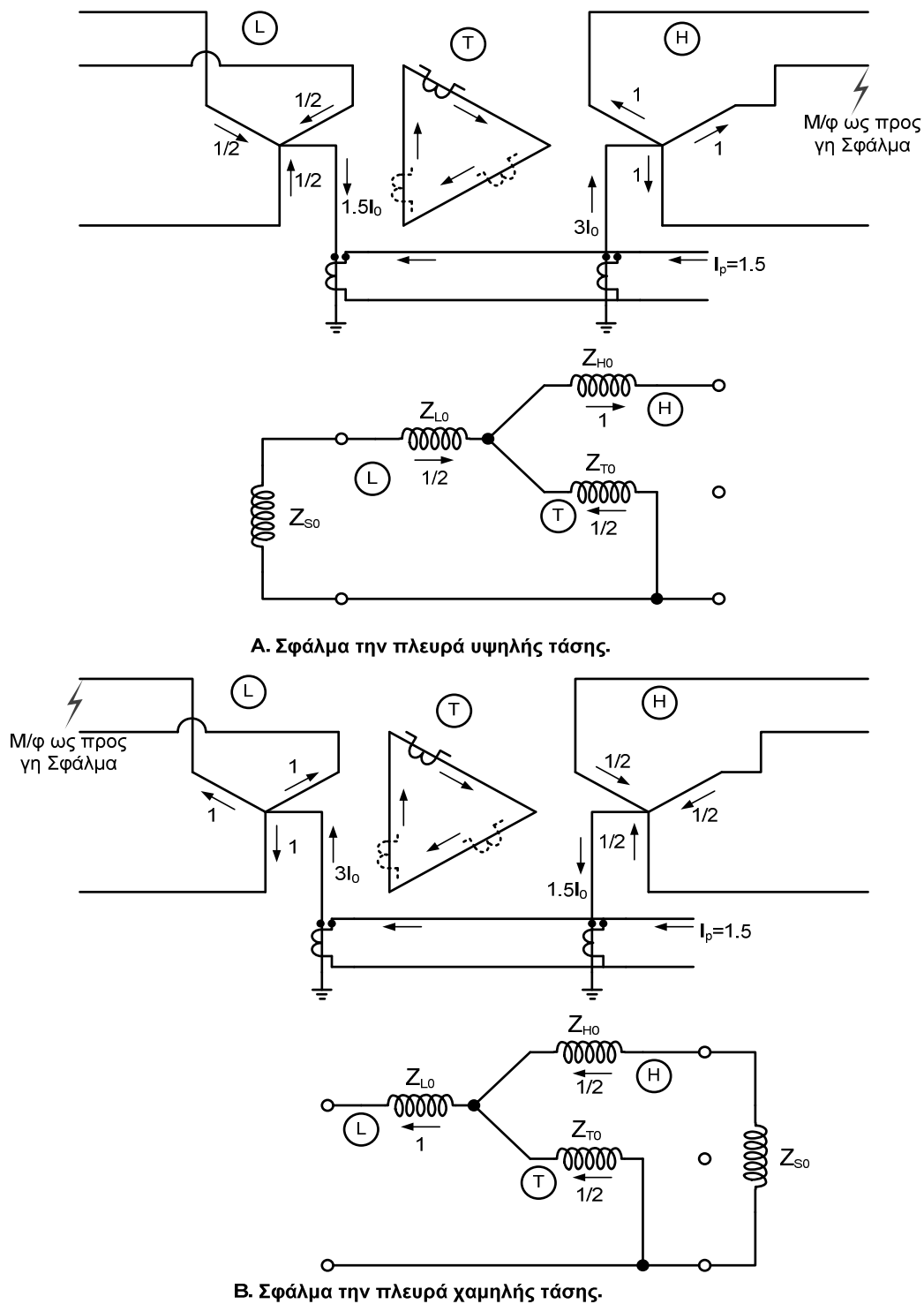


**Γ. Παράλληλη σύνδεση των ΜΕ όταν το τριτεύον λειτουργεί υπό φορτίο**

**Σχήμα 5.3 Μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων**

Στα σχήματα 5.4A και 5.4B φαίνεται ένας μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων, στον οποίο δυο από αυτά τα τυλίγματα είναι συνδεδεμένα σε γειωμένο αστέρα ενώ το τρίτο είναι σε σύνδεση τριγώνου. Θα δείξουμε ότι αυτή η διάταξη μετασχηματιστή είναι κατάλληλη ως πηγή πόλωσης ακόμα και αν τα ρεύματα σε κάθε ουδέτερο αντιστρέφονται για σφάλματα που γίνονται στην μία ή την άλλη πλευρά του μετασχηματιστή. Απαιτούνται δυο ΜΕ συνδεδεμένοι παράλληλα, ένας σε κάθε ουδέτερο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Οι λόγοι μετασχηματισμού των ΜΕ θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να είναι αντιστρόφως ανάλογοι του λόγου των αριθμού των ελιγμάτων των τυλιγμάτων στα οποία εμπλέκονται.

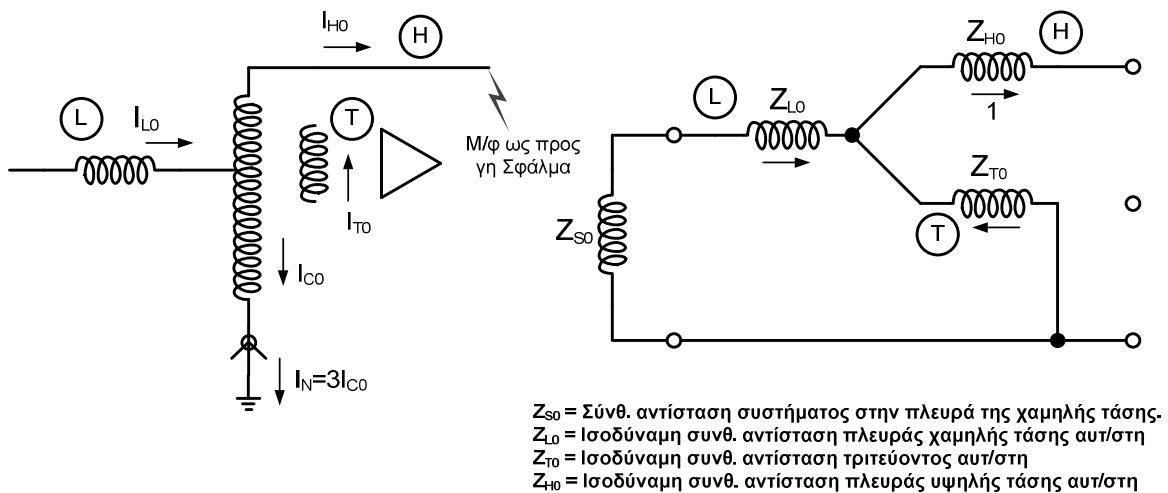
Για παράδειγμα, αν η ονομαστική τάση της μιας πλευράς είναι 230 kV με ΜΕ ουδετέρου 1000/5 και η ονομαστική τάση της άλλης πλευράς είναι 115 kV τότε ο λόγος μετασχηματισμού του ΜΕ του ουδετέρου που βρίσκεται στην πλευρά των 115 kV πρέπει να τεθεί ίσος με 2000/5. Οι λόγοι μετασχηματισμού των ΜΕ που δεν επιλέγονται με το παραπάνω κριτήριο οδηγούν σε αλλαγή κατεύθυνσης του ρεύματος πόλωσης στον ηλεκτρονόμο (το άθροισμα των ρευμάτων των παράλληλων ΜΕ) με αποτέλεσμα να μην έχει την δυνατότητα να διακρίνει σωστά την κατεύθυνση του σφάλματος .



Σχήμα 5.4 Συνδέσεις ΜΕ σε μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων

**Σημείωση:** Η διαίρεση των ρευμάτων στο σχήμα 5.4 βασίζεται στο ότι οι σύνθετες αντιστάσεις μηδενικής ακολουθίας των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή είναι ίσες. Η πραγματική διαίρεση γενικά δεν θα είναι ισόποση, όμως το ρεύμα πόλωσης θα έχει πάντα την ίδια κατεύθυνση.

Άλλη μια διάταξη μετασχηματιστή που συναντάται συχνά είναι ο αυτομετασχηματιστής σύνδεσης γειωμένου αστέρα με τριτεύον τύλιγμα σύνδεσης τριγώνου που φαίνεται στο σχήμα 5.5. Με μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι ο ουδέτερος αυτού του τύπου μετασχηματιστή είναι κατάλληλος ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Στην πραγματικότητα το ρεύμα ουδέτερου μπορεί να έχει ή μπορεί να μην έχει την ίδια κατεύθυνση για σφάλματα που συμβαίνουν στην μια ή στην άλλη πλευρά του αυτομετασχηματιστή. Για σφάλματα στην πλευρά χαμηλής τάσης, μπορεί να αποδειχθεί ότι το ρεύμα στον ουδέτερο θα ρέει πάντα προς τα πάνω. Για σφάλματα συστήματος στην πλευρά υψηλής τάσης, το ρεύμα θα μπορούσε να είναι προς τα πάνω, μηδέν ή προς τα κάτω στον ουδέτερο ανάλογα με την τιμή του λόγου ελιγμάτων των τυλιγμάτων υψηλής – χαμηλής τάσης του αυτομετασχηματιστή, των τιμών ισοδύναμων σύνθετων αντιστάσεων του και της τιμής της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας του συστήματος της πλευράς χαμηλής τάσης. Αν μπορεί να εξασφαλισθεί ότι το ρεύμα θα ρέει πάντα προς τα πάνω στον ουδέτερο για όλα τα είδη σφαλμάτων στην πλευρά υψηλής τάσης, τότε ένας ΜΕ που βρίσκεται στον ουδέτερο του αυτομετασχηματιστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πόλωση.



**A. Μονογραμμικό διάγραμμα**

**B. Ανά μονάδα απεικόνιση σε κοινή βάση ισχύος του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας.**

**Σχήμα 5.5 Αυτομετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων**

Στο σχήμα 5.5 φαίνονται μόνο τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίδειξη της επίδρασης των παραπάνω αναφερόμενων παραμέτρων στην κατεύθυνση του ρεύματος ουδέτερου για σφάλματα στην πλευρά υψηλής τάσης του αυτομετασχηματιστή. Για την σύμβαση προσήμου που ακολουθείται στο σχήμα 5.5, μπορεί να δειχθεί ότι ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:



$$I_N \alpha \left[ \frac{\overline{Z_{T0}}}{\overline{Z_{S0}} + \overline{Z_{L0}} + \overline{Z_{T0}}} - N \right] I_{H0} \quad (5.1)$$

όπου:  $I_N$  = το πραγματικό ρεύμα ουδετέρου.

$N$  = ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή

$\overline{Z_{T0}}$  = Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του τριτεύοντος

$\overline{Z_{L0}}$  = Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή στην πλευρά χαμηλής τάσης

$\overline{Z_{S0}}$  = Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του συστήματος στην πλευρά χαμηλής τάσης

$I_{H0}$  = το ρεύμα της πλευράς υψηλής τάσης.

Οι παραπάνω σύνθετες αντιστάσεις είναι ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα με κοινή βάση ισχύος.

Από το σχήμα 5.5 και την εξίσωση (5.1) ισχύουν τα παρακάτω:

1. Το ρεύμα ουδετέρου θα ρέει πάντα προς τα κάτω αν ο όρος μέσα στις αγκύλες είναι μεγαλύτερος από το μηδέν.
2. Το ρεύμα ουδετέρου θα ρέει πάντα προς τα πάνω αν ο όρος μέσα στις αγκύλες είναι μικρότερος από το μηδέν.
3. Το ρεύμα ουδετέρου θα είναι μηδέν αν ο όρος μέσα στις αγκύλες είναι ίσος με το μηδέν.

Από την συνθήκη 2 παραπάνω και την εξίσωση (5.1) το ρεύμα ουδετέρου θα ρέει πάντα προς τα πάνω στον ουδέτερο για όλους τους τύπους σφαλμάτων συστήματος στην πλευρά υψηλής τάσης, αν ισχύει ο παρακάτω περιορισμός:

$$N > \frac{\overline{Z_{T0}}}{\overline{Z_{S0}} + \overline{Z_{L0}} + \overline{Z_{T0}}} \quad (5.2)$$

Συνεπώς, αν ο περιορισμός αυτός ισχύει για όλες τις πιθανές καταστάσεις του συστήματος, το ρεύμα ουδετέρου για όλα τα είδη σφαλμάτων στην πλευρά υψηλής τάσης θα ρέει, πάντα προς τα πάνω, και ο ΜΕ που βρίσκεται στον ουδέτερο είναι μια κατάλληλη πηγή πόλωσης. Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι η σύνθετη αντίσταση της πηγής στην πλευρά χαμηλής τάσης θα μεταβάλλεται με τις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος καθώς και με την συνεχή ανάπτυξή του. Για αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι ο ΜΕ που βρίσκεται στον ουδέτερο ενός αυτομετασχηματιστή δεν συστήνεται για χρήση ως πηγή ρεύματος πόλωσης.

Μέχρι αυτό το σημείο έχει συζητηθεί μόνο η πόλωση ρεύματος η οποία λαμβάνεται από το υπόλοιπο ρεύμα (residual) στον ουδέτερο ή στους ουδέτερους του μετασχηματιστή ισχύος. Έχουν επίσης περιγραφεί διάφορες διατάξεις μετασχηματιστών ισχύος και έχουν επισημανθεί αυτές που είναι κατάλληλες για πόλωση από τον ουδέτερο. Από τα σχήματα 5.3, 5.4 και 5.5 βλέπουμε ότι ένα ρεύμα μηδενικής ακολουθίας ρέει και στο τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ισχύος. Συνεπώς, προκύπτει η δυνατότητα της χρήσης του τυλίγματος αυτού ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Όπως έχει σημειωθεί παραπάνω, δεν είναι συνήθως επιτρεπτό, στους αυτομετασχηματιστές, να χρησιμοποιηθεί το ρεύμα ουδετέρου

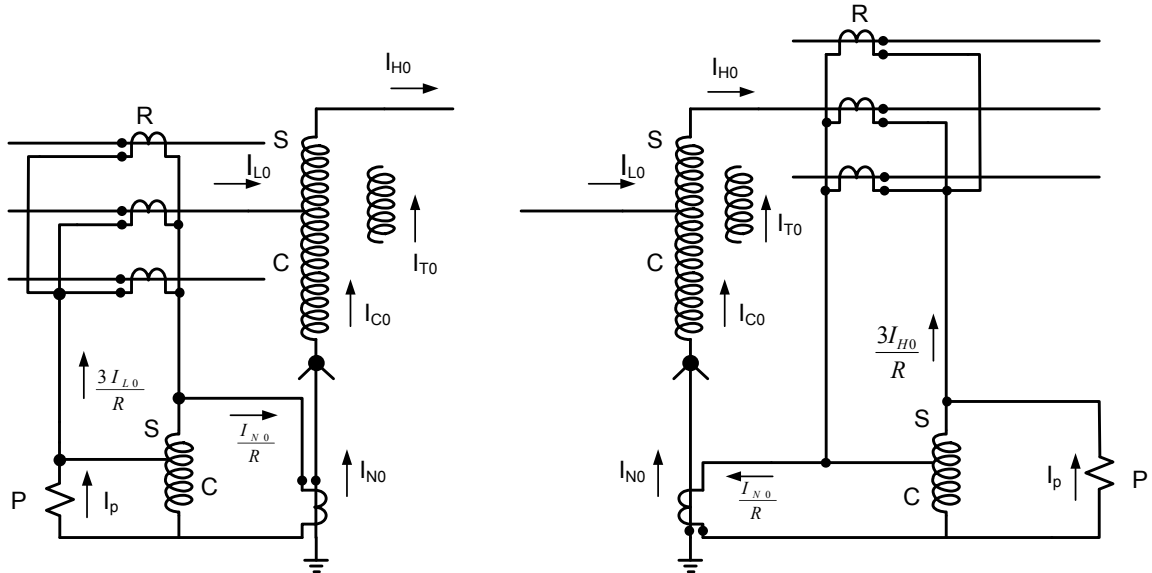
για πόλωση, επομένως σε αυτές τις εφαρμογές το ρεύμα τριτεύοντος είναι συνήθως το καταλληλότερο. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως στον μετασχηματιστή γειωμένου αστέρα – τριγώνου – γειωμένου αστέρα, που φαίνεται στο σχήμα 5.4, είναι δυνατή η χρήση του ρεύματος τριτεύοντος ως πηγή πόλωσης. Αν το τριτεύον πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ρεύματος πόλωσης, ο αριθμός των ΜΕ που απαιτούνται για την παροχή ρεύματος στον ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης εξαρτάται από αν σε αυτό έχει ή δεν έχει συνδεθεί φορτίο. Για τριτεύον χωρίς φορτίο, μόνο ένας ΜΕ είναι αρκετός, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται σε ένα από τρία σκέλη του τριτεύοντος. Αν το τριτεύον πρόκειται να λειτουργεί υπό φορτίο, τότε απαιτούνται τρεις ΜΕ, ένας σε κάθε σκέλος του, συνδεδεμένοι παράλληλα όπως στο σχήμα 5.3Γ. Οι τρεις ΜΕ απαιτούνται για να εξαιρεθεί η επίδραση του ρεύματος φορτίου, το άθροισμα δηλαδή των συνιστωσών θετικής και αρνητικής ακολουθίας του ρεύματος θα είναι μηδέν και μόνο η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας τροφοδοτείται στον ηλεκτρονόμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το τριτεύον είναι κατάλληλο ως πηγή ρεύματος πόλωσης ωστόσο, υπάρχουν μερικές στις οποίες ακόμα και το ρεύμα τριτεύοντος υπόκειται σε αλλαγές κατεύθυνσης, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλο για χρήση ως πηγή πόλωσης. Το πρόβλημα αυτό προκύπτει όταν η σύνθετη αντίσταση του ενός από τους κλάδους του μετασχηματιστή πάρει αρνητική τιμή. Για παράδειγμα, θεωρούμε το ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας του αυτομετασχηματιστή που φαίνεται στον σχήμα 5.5 και υποθέτουμε ότι η σύνθετη αντίσταση της πλευράς χαμηλής τάσης  $\overline{Z}_{L0}$  είναι αρνητική. Ανάλογα με την τιμή της σύνθετης αντίστασης της πηγής  $\overline{Z}_{S0}$  η συνολική σύνθετη αντίσταση ( $\overline{Z}_{S0} + \overline{Z}_{L0}$ ) του κλάδου μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν. Αν αυτή είναι θετική, η ανάλυση του κυκλώματος που φαίνεται στο σχήμα 5.5B δείχνει ότι το ρεύμα του τριτεύοντος θα έχει την κατεύθυνση που φαίνεται στο σχήμα. Διαφορετικά, αν η συνολική σύνθετη αντίσταση του κλάδου είναι αρνητική το ρεύμα τριτεύοντος θα έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που φαίνεται στο σχήμα. Τέλος το ρεύμα τριτεύοντος είναι μηδέν αν η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι μηδέν. Συνεπώς, επειδή ο συνδυασμός της σύνθετης αντίστασης της πηγής και του μετασχηματιστή είναι κατά την διάρκεια κάποιων συνθηκών του συστήματος θετικός, ενώ για κάποιες άλλες αρνητικός, το τριτεύον είναι ακατάλληλο για πόλωση ρεύματος λόγω του ότι εμφανίζονται αλλαγές στην κατεύθυνση του ρεύματος τριτεύοντος. Αν το ρεύμα αυτό έχει την ίδια κατεύθυνση σε όλες τις συνθήκες του συστήματος, τότε ανεξάρτητα τι φορά έχει η κατεύθυνση αυτή, το τριτεύον είναι κατάλληλο ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Γενικά, το τριτεύον είναι κατάλληλο για πόλωση ρεύματος μόνο στις περιπτώσεις όπου η συνολική σύνθετη αντίσταση του κλάδου είναι θετική. Η παραπάνω ανάλυση έγινε για ένα αυτομετασχηματιστή, ο ίδιος συλλογισμός όμως μπορεί να γίνει και στην περίπτωση του μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων γειωμένου αστέρα – τριγώνου – γειωμένου αστέρα που φαίνεται στο σχήμα 5.4. Στην περίπτωση του αυτομετασχηματιστή με τριτεύον σε σύνδεση τριγώνου, το πρόβλημα της αντιστροφής του ρεύματος στο τριτεύον δεν είναι τόσο κυρίαρχο όσο το πρόβλημα της αντιστροφής ρεύματος στον ουδέτερο. Επομένως το τριτεύον σχεδόν πάντοτε χρησιμοποιείται ως πηγή ρεύματος πόλωσης σε αυτούς του τύπους μετασχηματιστών.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει συχνά είναι η έλλειψη ΜΕ ή προβλήματα εγκατάστασης ΜΕ στο τριτεύον όταν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί αυτό ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Στις περιπτώσεις όπου οι ΜΕ του τριτεύοντος δεν είναι διαθέσιμοι,

υπάρχουν ειδικά σχήματα με τα οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι ΜΕ της πλευράς υψηλής τάσης, χαμηλής τάσης ή οι ΜΕ του ουδετέρου με διάφορους συνδυασμούς για να ληφθεί ένα ρεύμα, το οποίο είναι ανάλογο του ρεύματος τριτεύοντος [15]. Τα σχήματα που συζητούνται στην αναφορά [15] και φαίνονται στο σχήμα 5.6, βασίζονται στην προϋπόθεση ότι τα ολικά αμπερελίγματα μεταξύ των τυλιγμάτων μετασχηματιστή ισχύος πρέπει να είναι μηδέν, και επίσης ότι οι λόγοι μετασχηματισμού των ΜΕ πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να συμβαδίζουν με το γεγονός αυτό. Σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται από τις εξισώσεις του σχήματος 5.6 το ρεύμα πόλωσης είναι ανάλογο του ρεύματος τριτεύοντος και για την πλειονότητα των σφαλμάτων θα έχει την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την θέση του σφάλματος. Αν ωστόσο ένας από τους κλάδους του ισοδύναμου κυκλώματος έχει αρνητική τιμή, τότε όπως περιγράφεται παραπάνω, το ρεύμα τριτεύοντος αλλάζει κατεύθυνση, οπότε το ρεύμα πόλωσης λαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στα σχήματα. Επίσης όπως περιγράφεται στην αναφορά, προκύπτουν και άλλα προβλήματα όταν χρησιμοποιούνται τα σχήματα του σχήματος 5.6, τα οποία πρέπει να εξεταστούν αν πρόκειται να γίνει η εφαρμογή τους. Εν συντομία, τα σχήματα που φαίνονται στα σχήματα 5.6B και 5.6Γ παρουσιάζουν προβλήματα απόδοσης επειδή το ρεύμα πόλωσης μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση για εσωτερικά σφάλματα του μετασχηματιστή ισχύος, δηλαδή για σφάλματα μέσα στην ζώνη προστασίας του ΜΕ. Αυτά τα προβλήματα μπορεί να είναι αποδεκτά αν η προστασία του μετασχηματιστή είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να δίνει εντολή ανοίγματος σε όλους τους διακόπτες ισχύος που τον περιβάλλουν. Εάν, από την λειτουργία των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης, υπό από αυτές τις συνθήκες, επηρεάζονται αρνητικά, ο εξοπλισμός λογικής επιλογικότητας (“καναλιών”), όπως επίσης και οι απομακρυσμένοι διακόπτες ισχύος ή άλλοι μηχανισμοί, όπως ένας αυτόματος επαναληπτικός διακόπτης (recloser), τότε θα πρέπει να εξεταστούν όλα τα παραπάνω προβλήματα. Το σχήμα του σχήματος 5.6A χρησιμοποιείται πιο συχνά από τα τρία, επειδή το ρεύμα πόλωσης δεν αλλάζει κατεύθυνση, για εσωτερικά σφάλματα του μετασχηματιστή. Ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να σημειωθεί είναι ο κορεσμός των ΜΕ κατά την διάρκεια διαφασικών σφαλμάτων. Εάν για παράδειγμα κατά την διάρκεια ενός ισχυρού διαφασικού σφάλματος ένας από τους τρεις ΜΕ φάσης είναι περισσότερο κορεσμένος από τους άλλους, τότε το ρεύμα της διαφοράς αυτής, μπορεί να τροφοδοτήσει και το κυκλώματα λειτουργίας και το κύκλωμα πόλωσης του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης γης, με αποτέλεσμα την εσφαλμένη ενεργοποίησή του.

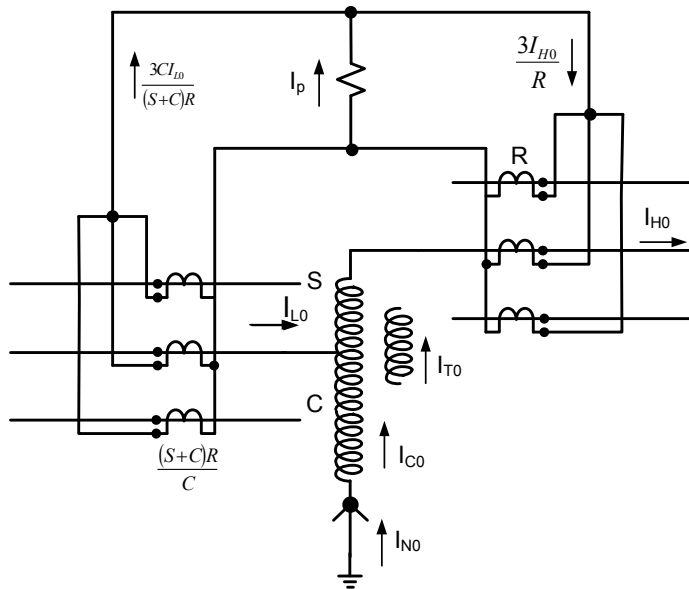
Τα σχήματα, που φαίνονται στο σχήμα 5.6, προσαρμόζονται εύκολα σε εφαρμογές μετασχηματιστών ισχύος, που δεν έχουν τυλίγματα σύνδεσης τριγώνου, και είναι κατασκευής τύπου πυρήνα, επειδή σε αυτά δεν απαιτούνται ΜΕ τριτεύοντος. Σε αυτόν τον τύπο κατασκευής, δημιουργείται ένα ισοδύναμο ή φανταστικό τριτεύον. Η επίδραση αυτού του φανταστικού τυλίγματος καθιστά τον μετασχηματιστή κατάλληλο ως πηγή ρεύματος πόλωσης. Επειδή το τριτεύον δεν υπάρχει στην πραγματικότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα σχέδια του σχήματος 5.6 για να ληφθεί ένα ρεύμα πόλωσης ανάλογο του ρεύματος τριτεύοντος. Για παράδειγμα, θεωρούμε έναν αυτομετασχηματιστή σύνδεσης γειωμένου αστέρα ο οποίος δεν διαθέτει τριτεύον σύνδεσης τριγώνου, είναι όμως κατασκευής τύπου πυρήνα. Ο ουδέτερος αυτού του μετασχηματιστή μπορεί να μην είναι κατάλληλος ως πηγή πόλωσης, όμως λόγω του τύπου κατασκευής του, μπορεί να

δημιουργηθεί ένα φανταστικό τριτεύον, με αποτέλεσμα να είναι διαθέσιμο το ρεύμα τριτεύοντος για πόλωση. Αν αυτό το ρεύμα έχει επαρκή τιμή, τότε ένα από τα σχήματα του σχήματος 5.6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθεί το ρεύμα πόλωσης για τους ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης γης.



(A)  $I_p = \frac{(-3T)}{CR} I_{T0}$

(B)  $I_p = \frac{(-3T)}{CR+SR} I_{T0}$



(Γ)  $I_p = \frac{(-3T)}{CR+SR} = I_{T0}$

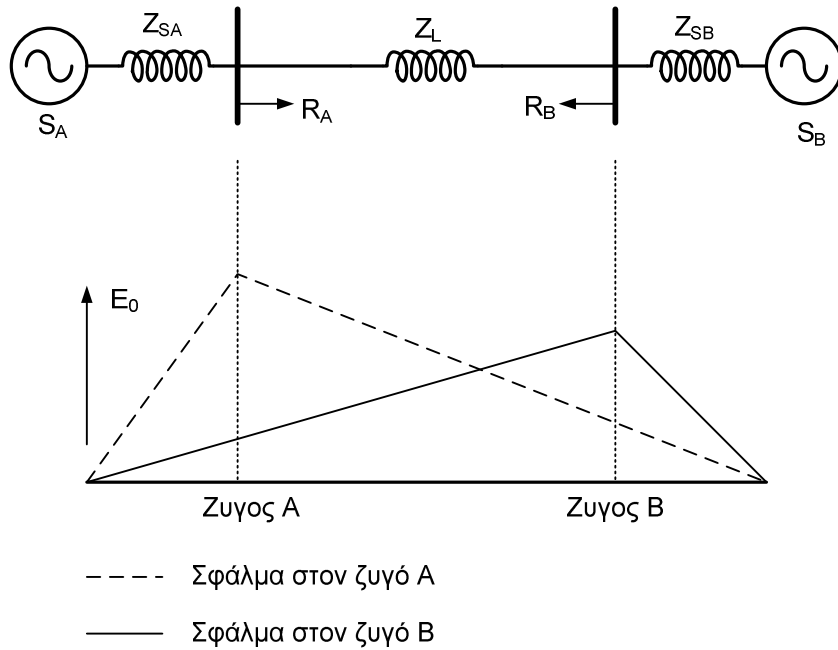
- P = Κύκλωμα πόλωσης
- IP = Ρεύμα πόλωσης
- S = Αμπερελίγματα σειράς
- C = Κοινά αμπερελίγματα
- T = Αμπερελίγματα τριτεύοντος

Σχήμα 5.6 Συνδέσεις ΜΕ σε αυτομετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων

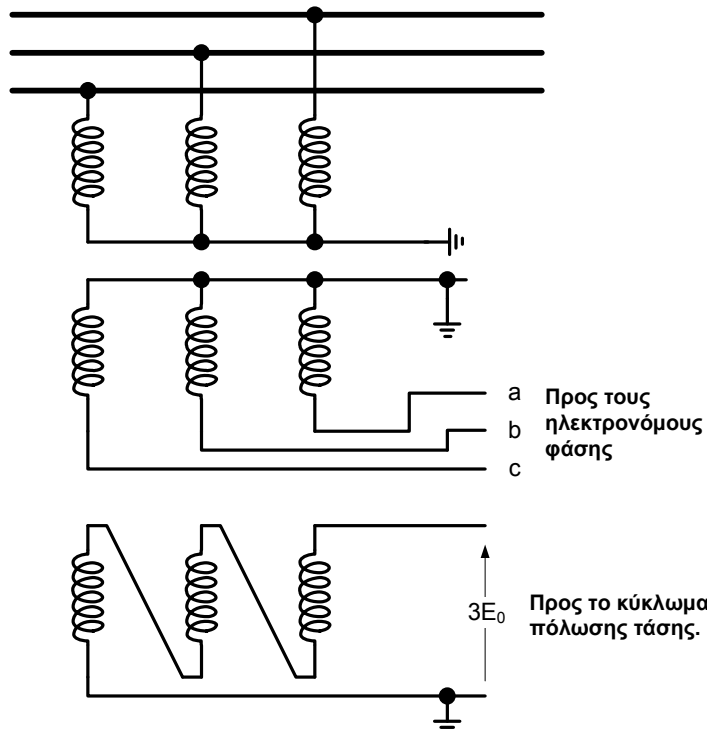
## 5.2 Πόλωση Τάσης

Η πόλωση τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου η πόλωση ρεύματος ή δεν είναι διαθέσιμη ή δεν είναι κατάλληλη ή όπου είναι επιθυμητή η χρήση διπλής πόλωσης. Η τάση που χρησιμοποιείται ως ποσότητα πόλωσης σε έναν ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης γης είναι ανάλογη της τάσης μηδενικής ακολουθίας στην θέση του ηλεκτρονόμου. Η τιμή της τάσης μηδενικής ακολουθίας και επομένως η τάση πόλωσης, μπορεί να ποικίλει σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα τιμών. Η τάση μηδενικής ακολουθίας που εμφανίζεται σε όλο το σύστημα είναι συνάρτηση της συνολικής σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας του συστήματος, είναι μέγιστη στο σημείο του σφάλματος και το μέτρο της μειώνεται καθώς πλησιάζουμε στην πηγή. Στην θέση του ηλεκτρονόμου, η τάση μηδενικής ακολουθίας είναι ανάλογη της σύνθετης αντίστασης του συστήματος πίσω από την θέση του ηλεκτρονόμου και είναι μικρότερη ή ίση της τάσης στο σημείο του σφάλματος ανάλογα της θέσης που αυτό συμβαίνει. Η μέγιστη τάση πόλωσης που παρουσιάζεται στον ηλεκτρονόμο λαμβάνεται για σφάλματα που συμβαίνουν στην θέση του ηλεκτρονόμου και το μέτρο της μειώνεται καθώς το σημείο του σφάλματος μετακινείται μακριά από αυτόν. Το σχήμα 5.7 παρουσιάζει γραφικά την μεταβολή της τάσης μηδενικής ακολουθίας για σφάλματα που συμβαίνουν και στα δυο άκρα της γραμμής στο απλό σύστημα που φαίνεται. Σημειώστε ότι η τάση στον ηλεκτρονόμο είναι στην μέγιστη τιμή της για σφάλματα στην θέση του ηλεκτρονόμου και μειώνεται καθώς το σφάλμα μετακινείται προς το άλλο άκρο της γραμμής. Κάθε αλλαγή στην σύνθετη αντίσταση της πηγής οδηγεί σε αντίστοιχη αλλαγή στην τάση μηδενικής ακολουθίας που φαίνεται στον ηλεκτρονόμο. Η τάση μηδενικής ακολουθίας παίρνει την μικρότερη της τιμή σε μετασχηματιστές με απευθείας γείωση, και ακόμη μικρότερη όταν επίσης υπάρχουν γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους. Μια κοινή μέθοδος μέτρησης, χρησιμοποιεί μετασχηματιστές τάσης (MT) που έχουν δυο δευτερεύοντα τυλίγματα, από τα οποία το ένα χρησιμοποιείται για μέτρηση και παροχή των φασικών τάσεων στους ηλεκτρονόμους φάσης ενώ το άλλο για παροχή τάσης πόλωσης στον ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης γης. Αυτή η διάταξη φαίνεται στο σχήμα 5.8. Η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του ανοικτού τριγώνου είναι ίση με  $E_a + E_b + E_c$ , η οποία σε όρους συμμετρικών συνιστωσών είναι ίση με  $3E_0$ . Σε συμμετρικά σφάλματα, τριφασικά ή διφασικά, η τάση ανοικτού τριγώνου και συνεπώς η τάση πόλωσης είναι μηδέν. Για σφάλματα ως προς γη, η ποσότητα πόλωσης θα είναι ανάλογη του  $3E_0$  και η τιμή της είναι συνάρτηση της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας του συστήματος, της διαμόρφωσης συστήματος, της θέσης του σφάλματος και του λόγου μετασχηματισμού των MT που χρησιμοποιούνται.

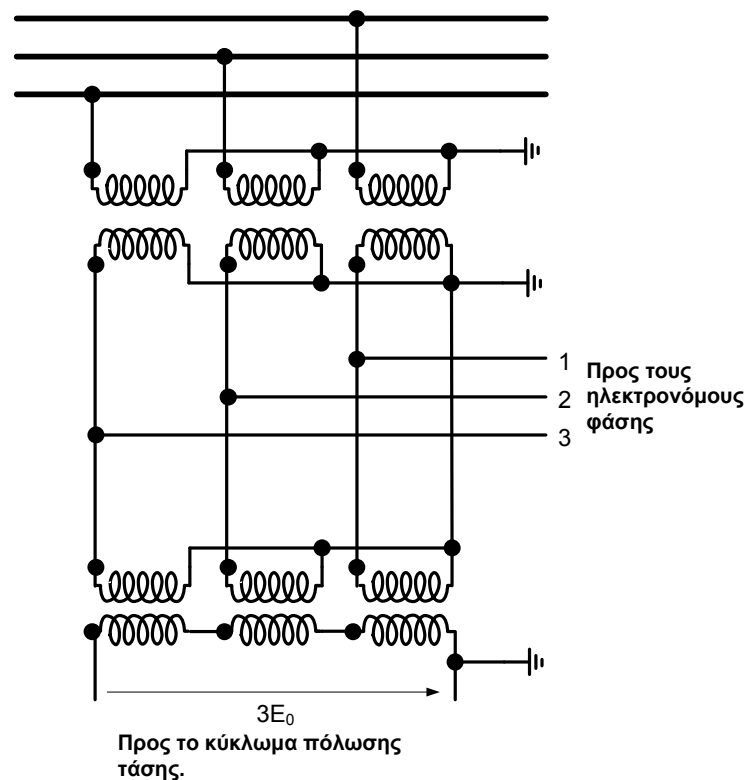
Σε μια άλλη μια μέθοδο μέτρησης χρησιμοποιούνται βοηθητικοί MT σε συνδυασμό με τους κύριους MT που έχουν ένα απλό δευτερεύον τύλιγμα. Στην διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 5.9 οι βοηθητικοί MT χρησιμοποιούνται για την παροχή της σύνδεσης ανοικτού τριγώνου, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα του MT χρησιμοποιείται για την παροχή φασικών τάσεων. Αυτή η σύνδεση, παρέχει επίσης τάση πόλωσης ανάλογη του  $3E_0$ .



Σχήμα 5.7 Μεταβολή της τάσης αρνητικής ακολουθίας συναρτήσει της θέσης του σφάλματος



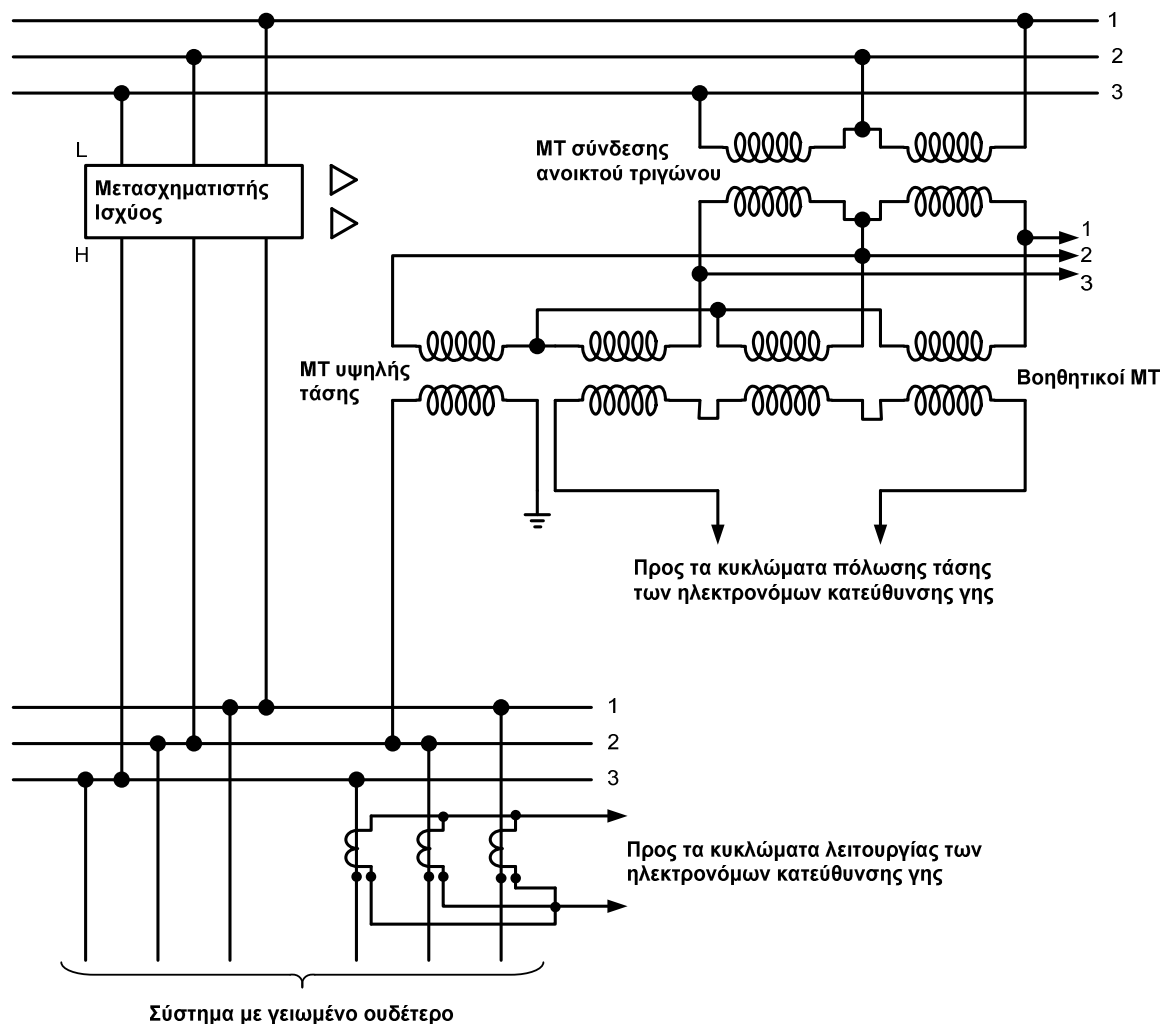
Σχήμα 5.8 Συνδεσμολογία MT με δυο δευτερεύοντα τυλίγματα



Σχήμα 5.9 Συνδεσμολογία MT με βοηθητικούς MT

Θεωρούμε την γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης που είναι συνδεδεμένη με έναν μετασχηματιστή ισχύος σύνδεσης τριγώνου – τριγώνου όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10. Στον μετασχηματιστή αυτό δεν υπάρχει ροή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας. Είναι δυνατόν όμως να ρέουν ρεύματα μηδενικής ακολουθίας στις γραμμές, ως αποτέλεσμα της ύπαρξης γειώσεων στα άλλα σημεία του συστήματος υψηλής τάσης. Αν πρόκειται να γίνει εγκατάσταση ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης γης σε αυτήν την γραμμή για να ανιχνεύονται σφάλματα ως προς γη στο σύστημα υψηλής τάσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πόλωση τάσης επειδή ο μετασχηματιστής αυτός δεν παρέχει ρεύματα μηδενικής ακολουθίας. Ωστόσο, αν είναι διαθέσιμοι στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή MT, είναι δυνατόν να ληφθεί η ποσότητα πόλωσης με την χρήση ενός μόνο MT στην πλευρά υψηλής τάσης σε συνδυασμό με τους MT της πλευράς χαμηλής τάσης [16]. Στο σχήμα 5.10 φαίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις. Σε αυτήν την διάταξη η φασική τάση που λαμβάνεται από τον MT της πλευράς υψηλής τάσης εγκαθίσταται στον ουδέτερο των MT της πλευράς χαμηλής τάσης, καθιστώντας έτσι διαθέσιμες τις φασικές τάσεις εκεί. Η τάση μηδενικής ακολουθίας λαμβάνεται από την σύνδεση ανοικτού τριγώνου των βοηθητικών MT. Υπάρχει μια επιπλέον συνιστώσα μέσα σε αυτήν την τάση που προκύπτει από την πτώση τάσης στο μετασχηματιστή λόγω της ροής ρεύματος φορτίου ή από την ροή ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας προς το σφάλμα αν υπάρχει γεννήτρια στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή. Αυτή η επιπλέον συνιστώσα, η οποία είναι ανεπιθύμητη, είναι γενικά μικρή για μεγάλες τιμές της τάσης μηδενικής ακολουθίας, όμως μπορεί να είναι υπολογίσιμη όταν η τάση μηδενικής ακολουθίας είναι μικρή, πράγμα που μπορεί να προκαλέσει εσφαλμένη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης γης. Είναι πιθανόν ο ηλεκτρονόμος αυτός να μην λειτουργήσει σωστά στην μαγνητίζων εισροή (magnetizing

inrush) αν ο ηλεκτρονόμος είναι υψηλής ταχύτητας. Γενικά αυτή η μέθοδος πόλωσης δεν θεωρείται κατάλληλη για ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης γης υψηλής ταχύτητας, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί με τους χρονικούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης κατεύθυνσης. Οι συνδέσεις του σχήματος 5.10 ισχύουν για έναν μετασχηματιστή ισχύος σύνδεσης τριγώνου – τριγώνου, όμως παρόμοια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τους μετασχηματιστές σύνδεσης αστέρα – τριγώνου ή τριγώνου – αστέρα εφαρμόζοντας βοηθητικούς ΜΤ οι οποίοι είναι ρυθμιζόμενοι έτσι ώστε να αντισταθμίζουν την γωνιακή μετατόπιση στις τάσεις που προκύπτει από την σύνδεση του μετασχηματιστή ισχύος. Ανεξάρτητα από το ποίο σχέδιο πόλωσης τάσης έχει επιλεγεί πρέπει να ελεγχθεί η τάση πόλωσης στην θέση του ηλεκτρονόμου για να καθοριστούν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της για σφάλματα μέσα στην επιθυμητή ζώνη προστασίας. Μπορεί να απαιτηθούν βοηθητικοί είτε ανύψωσης, είτε υποβίβασμού ΜΤ για την παροχή τάσης μέσα στα επιθυμητά όρια.



Σχήμα 5.10 Συνδεσμολογία ΜΤ στην χαμηλή και την υψηλή τάση



### 5.3 Διπλή Πόλωση Ρεύματος και Τάσης

Οι σύγχρονοι στατικοί καθώς επίσης και ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης γης είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν, για την πόλωση τους, ή μόνο ρεύμα, ή μόνο τάση ή ένα συνδυασμό αυτών των δυο.. Η δυνατότητα πόλωσης του ηλεκτρονόμου από δυο πηγές ταυτόχρονα προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα πέρα από τους ηλεκτρονόμους που μπορούν να πολωθούν από μια απλή πηγή μόνο. Επειδή ο ηλεκτρονόμος μπορεί να εγκατασταθεί με μια από τις δυο πηγές αποσυνδεδεμένη, εξαλείφεται η ανάγκη για παραγγελία και αποθήκευση δυο διαφορετικών τύπων ηλεκτρονόμων. Σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας συχνά απαιτείται να λειτουργούν, αυτοί οι ηλεκτρονόμοι, με πόλωση ρεύματος, ενώ η πόλωση τάσης θα είναι πιο κατάλληλη σε άλλες συνθήκες. Έτσι με την χρήση ηλεκτρονόμων με δυνατότητα διπλής πόλωσης εξαλείφεται η ανάγκη για τοποθέτηση δύο τύπων ηλεκτρονόμων στην ίδια θέση. Η ευαισθησία ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης γης εξαρτάται από την μεταβλητή πόλωσης. Με την χρήση διπλής πόλωσης, επιτυγχάνεται μέγιστη ευαισθησία επειδή γενικά το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας είναι υψηλό όταν η τάση μηδενικής ακολουθίας είναι χαμηλή και αντίστροφα.

### 5.4 Η Προσέγγιση Αρνητικής Ακολουθίας

Όπως περιγράφεται στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο η χρήση στοιχείων αρνητικής ακολουθίας είναι πιο πλεονεκτική απ' ότι η χρήση των στοιχείων πόλωσης μηδενικής ακολουθίας ρεύματος ή τάσης. Μέσα σε αυτά τα πλεονεκτήματα συγκαταλέγεται η αναισθησία των στοιχείων αρνητικής ακολουθίας στην αλληλεπαγωγική σύζευξη (mutual coupling) που σχετίζεται με τις γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, και επίσης το γεγονός ότι η τάση αρνητικής ακολουθίας που είναι διαθέσιμη στον ηλεκτρονόμο είναι υψηλότερη από ότι η τάση μηδενικής ακολουθίας.

Επίσης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.4.7 του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου μπορούμε να αντισταθμίσουμε την χαμηλή αυτή τάση, είτε με την χρήση του αντισταθμιστικού στοιχείου κατεύθυνσης αρνητικής ακολουθίας (compensated negative sequence directional element):

$$T_{32Q} = \text{Re}[(V_2 - a \cdot Z_{L2} \cdot I_2) \cdot (Z_{L2} \cdot I_2)^*]$$

είτε με την χρήση του στοιχείου κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας:

$$z_2 = \frac{\text{Re}[V_2 \cdot (I_2 \cdot 1\angle\theta)^*]}{|I_2|^2}$$

Με την χρήση των παραπάνω στοιχείων μπορούμε να καθορίσουμε την κατεύθυνση του σφάλματος, απλά ελέγχοντας ,στην πρώτη περίπτωση το πρόσημο της ροπής  $T_{32Q}$  ενώ στην δεύτερη το πρόσημο της σύνθετης αντίστασης  $z_2$ , που προκύπτει από τον παραπάνω τύπο.

## 6 Αξιολόγηση Στοιχείων Απόστασης και Κατεύθυνσης σε Γραμμές Μεταφοράς με Μετασχηματιστές Ισχύος Διαφόρων Συνδεσμολογιών

### 6.1 Εισαγωγή

Σε πολλές εφαρμογές εγκαθίστανται ηλεκτρονόμοι για την προστασία γραμμών μεταφοράς οι οποίοι χρησιμοποιούν εναλλακτικές εισόδους, για παράδειγμα η χρήση MT και ME στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή ισχύος ή η χρήση δύο MT αντί των τριών. Αυτό οφείλεται συχνά σε οικονομικούς παράγοντες, όπως η μείωση του κόστους του έργου, χωρίς υποχωρήσεις στην προστασία. Επιπρόσθετα, μερικές διαμορφώσεις συστήματος (πχ μετασχηματιστές με πολλές λήψεις) μπορούν να αλλάξουν την απόδοση του συστήματος προστασίας της γραμμής.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η απόδοση των δημοφιλών στοιχείων απόστασης και κατεύθυνσης για διάφορες διαμορφώσεις του συστήματος. Συγκεκριμένα ασχολούμαστε με τις εφαρμογές στοιχείων κατεύθυνσης και απόστασης για προστασία γραμμών μεταφοράς όταν οι μετασχηματιστές μετρήσεων (MT και ME) είναι τοποθετημένοι στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή ή όταν οι ME είναι τοποθετημένοι στην πλευρά υψηλής και οι MT στην πλευρά της χαμηλής τάσης.

Επίσης εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας των στοιχείων που αξιολογούνται. Σε αυτό το κεφάλαιο αξιολογούμε δυο τύπους στοιχείων απόστασης φάσης:

1. Στοιχεία απόστασης φάσης που χρησιμοποιούν ζεύγη φάσεων (Phase distance elements using phase-pairs) και πόλωση μνήμης τάσης θετικής ακολουθίας.
2. Αντισταθμιστικά στοιχεία απόστασης (Compensator distance elements)

Για προστασία σφαλμάτων φάσεων με την χρήση στοιχείων υπερέντασης κατεύθυνσης αξιολογούμε τους παρακάτω τύπους:

1. Στοιχείο κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας όταν ρέει επαρκές ρεύμα αρνητικής ακολουθίας για την ενεργοποίησή του (μη συμμετρικά σφάλματα).
2. Χρησιμοποιούμε το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας για την επιτήρηση των στοιχείων κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας.

### 6.2 Περιγραφή των Στοιχείων και του προς Αξιολόγηση Συστήματος

#### 6.2.1 Στοιχεία Απόστασης

Η θεωρία για την αρχή λειτουργίας των στοιχείων μπορεί να βρεθεί στις αναφορές [17] και [9]. Η αναφορά [17] παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για το αντισταθμιστικό ηλεκτρονόμο απόστασης. Ο ηλεκτρονόμος αυτός διαθέτει ένα τριφασικό και ένα διφασικό

στοιχείο. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόδοσης του διφασικού στοιχείου για διφασικά και διφασικά ως προς γη σφάλματα εκφράζεται στις εξισώσεις (6.1), (6.2) και (6.3). Η ροπή του στοιχείου αυτού είναι ίση με το φανταστικό μέρος του γινομένου του μιγαδικού αριθμού  $A_{pp}$  και του συζυγή μιγαδικού  $B_{pp}$ .

$$T_{pp} = \text{Im}(A_{pp}B_{pp}^*) \quad (6.1)$$

$$A_{pp} = V_{ab} - Z1R I_{ab} \quad (6.2)$$

$$B_{pp} = V_{bc} - Z1R I_{bc} \quad (6.3)$$

$$Z1R = r Z_1 \text{ ang} \quad (6.3)$$

όπου  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  είναι οι μετρούμενες πολικές τάσεις και όπου  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  είναι τα μετρούμενα ρεύματα. Η σύνθετη αντίσταση  $Z1R$  είναι η ρύθμιση (κατώφλι) του στοιχείου αυτού. Εδώ όπου  $Z_1 \cdot \text{ang}$  είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής στο σημείο ισορροπίας του (balance point). Η τιμή του συντελεστή  $r$  δείχνει την ανά μονάδα ρύθμιση (σύνθετη αντίσταση) που χρειάζεται για να ενεργοποιηθεί το στοιχείο.

Με τις εξισώσεις (6.4),(6.5) και (6.6) εκφράζεται το μαθηματικό μοντέλο για το τριφασικό στοιχείο αντιστάθμισης απόστασης.

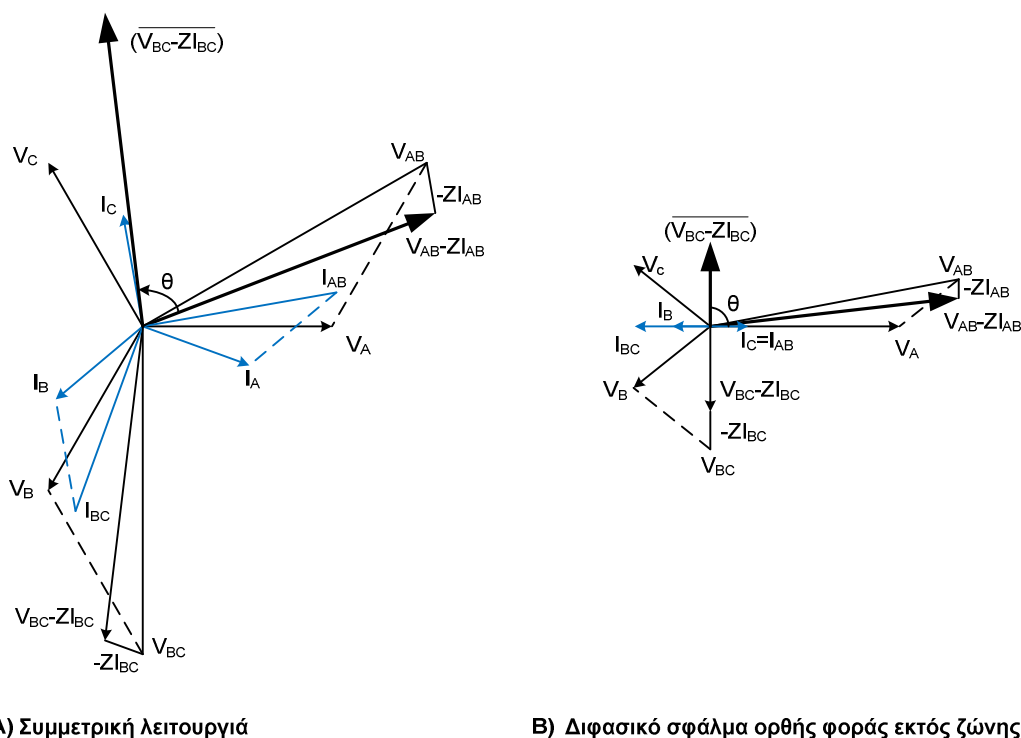
$$T_{3p} = \text{Im}(A_{3p}B_{3p}^*) \quad (6.4)$$

$$A_{3p} = V_{ab} - Z1R I_{ab} \quad (6.5)$$

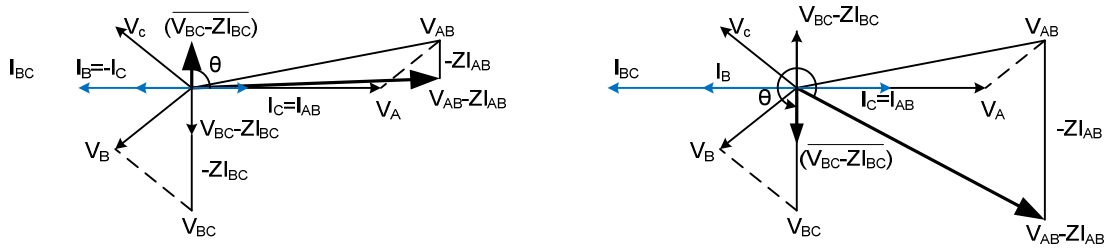
$$B_{3p} = -jV_{ab} - 0,25V_{Cmem} \quad (6.5)$$

όπου  $V_{Cmem}$  είναι η τάση μνήμης ή η τάση πριν την εμφάνιση του σφάλματος, της φάσης C. Και εδώ την σύνθετη αντίσταση την παίρνουμε από την εξίσωση (6.3).

Στα σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας των παραπάνω στοιχείων [18].



Σχήμα 6.1A και 6.1B Λειτουργία διφασικού αντισταθμιστικού στοιχείου απόστασης στην κανονική λειτουργία και σε διφασικό σφάλμα εκτός ζώνης

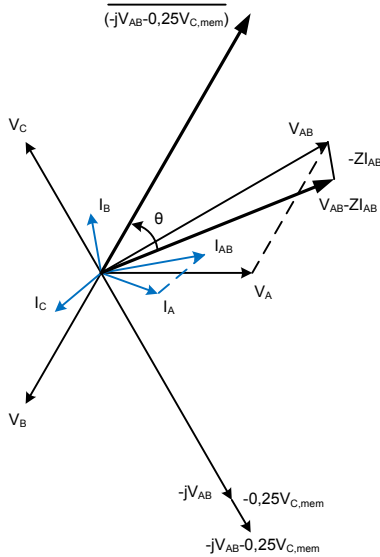


Γ) Σφάλμα κοντά στο σημείο ισορροπίας

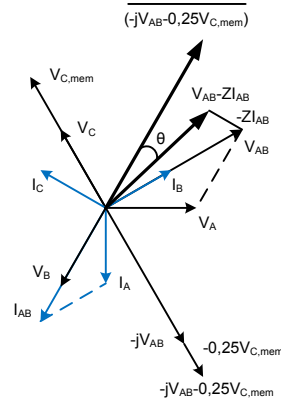
Δ) Διφασικό σφάλμα ορθής φοράς εντός ζώνης

Σχήμα 6.1Γ και 6.1Δ Λειτουργία διφασικού αντισταθμιστικού στοιχείου απόστασης σε διφασικό σφάλμα κοντά στο σημείο ισορροπίας και σε διφασικό σφάλμα εντός ζώνης

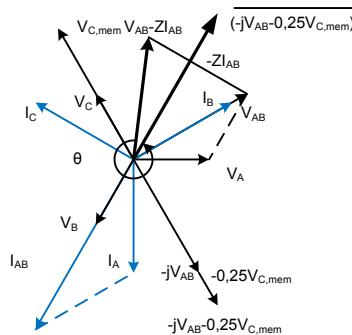
Το διφασικό αντισταθμιστικό στοιχείο ενεργοποιείται αν το φανταστικό μέρος του γινομένου  $A_{pp} \cdot B_{pp}^*$  είναι αρνητικό. Με άλλα λόγια ενεργοποιείται αν η διαφορά των γωνιών  $\theta$ , μεταξύ του  $A_{pp}$  και του  $B_{pp}^*$  είναι μεγαλύτερη από  $180^\circ$  ή αν  $\sin \theta < 0$ .



A) Συμμετρική λειτουργία



B) Τριφασικό σφάλμα εκτός ζώνης



Γ) Τριφασικό σφάλμα εντός ζώνης

Σχήμα 6.2 Λειτουργία τριφασικού αντισταθμιστικού στοιχείου απόστασης

Όπως και το διαφασικό, έτσι και το τριφασικό αντισταθμιστικό στοιχείο απόστασης ενεργοποιείται όταν το φανταστικό μέρος του γινομένου  $A_{pp} \cdot B_{pp}^*$  είναι αρνητικό ή όταν η διαφορά των γωνιών  $\theta$  είναι μεγαλύτερη από  $180^\circ$  ή όταν  $\sin \theta < 0$ .

Η ροπή του στοιχείου απόστασης φάσης  $p\chi$ , για το στοιχείο φάσης BC, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_{BC} = \text{Re}[(M_{BC} Z1 I_{BC} - V_{BC})V_{BC,mem}^*]$$

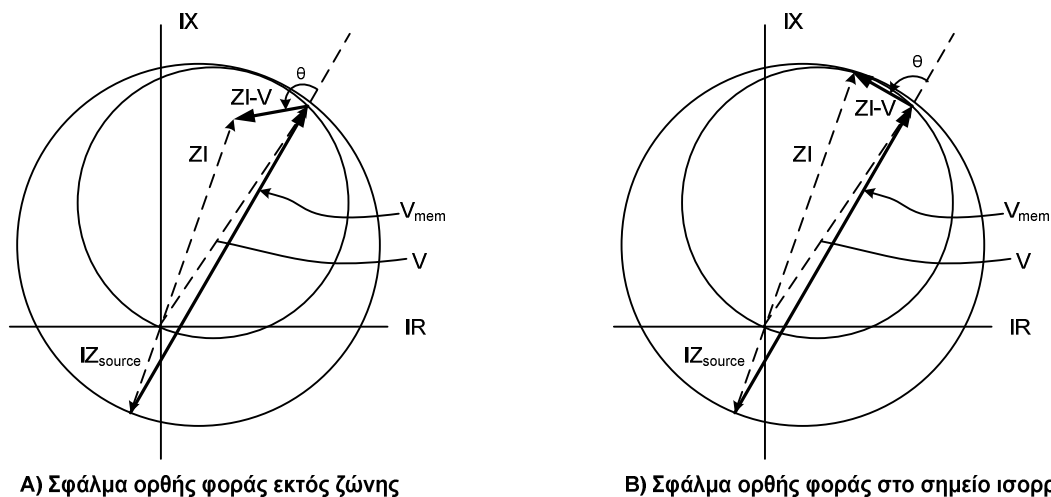
Το στοιχείο αυτό συγκρίνει, δηλαδή, την διαφορά των γωνιών μεταξύ της αντισταθμισμένης πτώσης τάσης της γραμμής ( $M_{BC} Z1 I_{BC} - V_{BC}$ ) και της τάσης μνήμης ή διαφορετικά την τάση πριν την εμφάνιση του σφάλματος  $V_{BC,mem}^*$ .

Στο σημείο ισορροπίας ισχύει:

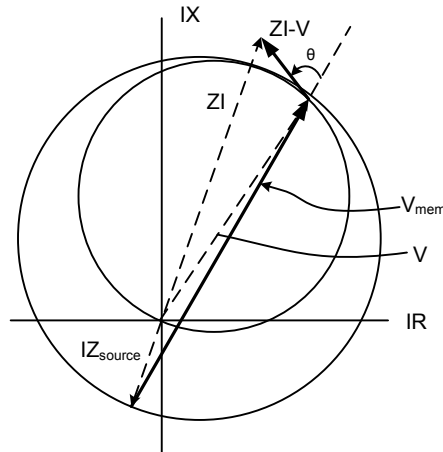
$$\begin{aligned} 0 &= \text{Re}[(M_{BC} Z1 I_{BC} - V_{BC})V_{BC,mem}^*] \Rightarrow \\ 0 &= \text{Re}[M_{BC} Z1 I_{BC} V_{BC,mem}^* - V_{BC} V_{BC,mem}^*] \Rightarrow \\ \text{Re}[M_{BC} Z1 I_{BC} V_{BC,mem}^*] &= \text{Re}[V_{BC} V_{BC,mem}^*] \Rightarrow \\ M_{BC} &= \frac{\text{Re}[V_{BC} V_{BC,mem}^*]}{\text{Re}[Z1 I_{BC} V_{BC,mem}^*]} \Rightarrow \\ M_{BC} &= \frac{\text{Re}[V_{BC} (V_{B1,mem} - V_{C1,mem})^*]}{\text{Re}[Z1 I_{BC} (V_{B1,mem} - V_{C1,mem})^*]} \end{aligned}$$

Η τιμή του  $M_{BC}$  δείχνει την ανά μονάδα ρύθμιση που απαιτείται για την ενεργοποίηση του στοιχείου με τάση  $V_{BC}$  και ρεύμα  $I_{BC}$  βραχυκύκλωσης. Η  $Z1$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της προστατευόμενης γραμμής μεταφοράς και  $V_{B1,mem}$ ,  $V_{C1,mem}$  είναι οι τάσεις θετικής ακολουθίας, των φάσεων B και C αντίστοιχα, πριν την εμφάνιση του σφάλματος.

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η αρχή λειτουργίας του στοιχείου αυτού.



Σχήμα 6.3Α και 6.3Β Λειτουργία στοιχείου απόστασης φάσης σε σφάλμα ορθής φοράς εκτός ζώνης και σε ορθής φοράς σφάλμα κοντά στο σημείο ισορροπίας



Γ) Σφάλμα ορθής φοράς εντός ζώνης

**Σχήμα 6.3Γ** Λειτουργία στοιχείου απόστασης φάσης σε σφάλμα ορθής φοράς εντός ζώνης

Συγκεντρωτικά οι ρυθμίσεις των στοιχείων απόστασης φάση φαίνονται στις εξισώσεις 6.6:

$$\begin{aligned}
 M_{AB} &= \frac{\operatorname{Re}[V_{AB} (V_{A1,\text{mem}} - V_{B1,\text{mem}})^*]}{\operatorname{Re}[Z1 I_{AB} (V_{A1,\text{mem}} - V_{B1,\text{mem}})^*]} \\
 M_{BC} &= \frac{\operatorname{Re}[V_{BC} (V_{B1,\text{mem}} - V_{C1,\text{mem}})^*]}{\operatorname{Re}[Z1 I_{BC} (V_{B1,\text{mem}} - V_{C1,\text{mem}})^*]} \\
 M_{CA} &= \frac{\operatorname{Re}[V_{CA} (V_{A1,\text{mem}} - V_{A1,\text{mem}})^*]}{\operatorname{Re}[Z1 I_{CA} (V_{C1,\text{mem}} - V_{A1,\text{mem}})^*]}
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

### 6.2.2 Στοιχεία Κατεύθυνσης

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται και αξιολογούνται τα κυριότερα στοιχεία κατεύθυνσης που χρησιμοποιούνται στους σύγχρονους ηλεκτρονόμους. Πιο συγκεκριμένα στην παράγραφο 4.4.7 περιγράφεται το στοιχείο κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$ . Με την εξίσωση (4.9), την οποία ξαναγράφουμε παρακάτω, υπολογίζουμε την σύνθετη αντίσταση  $z_2$ , η οποία όταν είναι αρνητική δείχνει, για όλους τους τύπους μη συμμετρικών σφαλμάτων, ένα σφάλμα ορθής φοράς, ενώ όταν είναι θετική, αντίστροφη.

$$z_2 = \frac{\operatorname{Re}[V_2 (I_2 1 \angle Z_{L2})^*]}{|I_2|^2} \quad \text{ή} \quad z_2 = \frac{\operatorname{Re}[V_2 \cdot [I_2 (\cos(\angle Z_{L2}) - j \sin(\angle Z_{L2}))]^*]}{|I_2|^2}$$

όπου  $V_2$  και  $I_2$  είναι η τάση και το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας που υπολογίζονται από τα μετρούμενα φασικά μεγέθη (τάσεις και ρεύματα)

Τέλος, όταν δεν υπάρχει ροή επαρκούς ρεύματος αρνητικής ακολουθίας (τριφασικά σφάλματα) ο ηλεκτρονόμος χρησιμοποιεί το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας για να καθορίσει την κατεύθυνση του σφάλματος. Το στοιχείο αυτό περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.2 και η ροπή λειτουργίας του δίνεται από την εξίσωση (4.4), η οποία ξαναγράφεται παρακάτω. Σε αυτήν οι  $V_1$  και  $I_1$  είναι η τάση και το ρεύμα θετικής ακολουθίας, ενώ η  $Z_{L1}$  είναι η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της προστατευόμενης γραμμής. Αν η ροπή είναι θετική τότε το στοιχείο αυτό ορίζει κατεύθυνση ορθής φοράς, ενώ αν είναι αρνητική αντίστροφης.

$$T_{32P} = |3V_1| |3I_1| \cos[\angle 3V_1 - (\angle 3I_1 + \angle Z_{L1})]$$

Στην περίπτωση ενός τριφασικού σφάλματος κοντά στην θέση του ηλεκτρονόμου τότε η τάση που εμφανίζεται σε αυτόν θα πλησιάζει το μηδέν και το στοιχείο δεν μπορεί να δώσει έξοδο. Αν χρησιμοποιήσουμε τάση μνήμης θετικής ακολουθίας  $V_{1mem}$  αντί της  $V_1$  τότε το στοιχείο μπορεί να καθορίζει την κατεύθυνση στου σφάλματος.

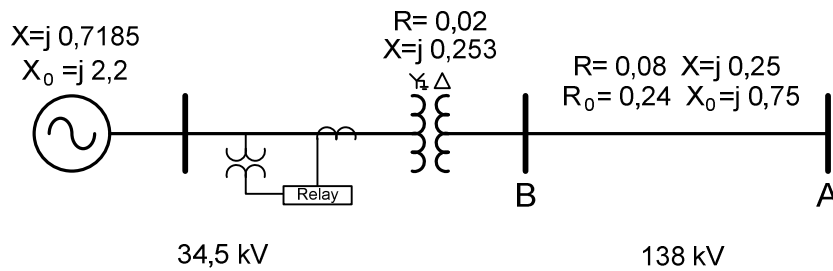
### 6.2.3 Περιγραφή του Συστήματος

Το σύστημα στο οποίο αξιολογούμε τα παραπάνω στοιχεία, είναι ένα σύστημα δυο δικτύων, το πρώτο στα 34.5 kV και το δεύτερο στα 138 kV, τα οποία είναι συνδεδεμένα μέσω ενός μετασχηματιστή. Σε αυτό το σύστημα δοκιμάζουμε διάφορες σύνθετες αντιστάσεις και συνδεσμολογίες μετασχηματιστή για να εξομοιώσουμε διάφορες συνθήκες του συστήματος αυτού.

## 6.3 Προστασία Γραμμής Μεταφοράς Υψηλής Τάσης με Ηλεκτρονόμους Απόστασης με ΜΕ και ΜΤ στην πλευρά Χαμηλής Τάσης.

### 6.3.1 Μετασχηματιστής Γειωμένου Αστέρα – Τριγώνου με το Τύλιγμα Τριγώνου στην Υψηλή Τάση.

Στις εφαρμογές όπου οι ΜΕ και οι ΜΤ δεν είναι διαθέσιμοι στην πλευρά υψηλής τάσης, εφαρμόζονται, σε μερικές εγκαταστάσεις, ηλεκτρονόμοι απόστασης, οι οποίοι χρησιμοποιούν ΜΕ και ΜΤ που είναι εγκατεστημένοι στην πλευρά χαμηλής τάσης. Στην παρακάτω εξομοίωση, ο ηλεκτρονόμος είναι εγκατεστημένος για να προστατεύει την γραμμή των 138 kV χρησιμοποιώντας μετρήσεις από το δίκτυο των 34 kV. Ο μετασχηματιστής είναι σύνδεσης γειωμένου αστέρα – τρίγωνου με το τύλιγμα αστέρα να βρίσκεται στην χαμηλή τάση.



Σχήμα 6.4 Δίκτυο της παραγράφου 6.3.1

Εξομοιώνουμε σφάλματα στον ζυγό υψηλής τάσης του μετασχηματιστή και στον απομακρυσμένο ζυγό με βάση την θεωρία υπολογισμού βραχυκυκλωμάτων. Μετά τον υπολογισμό των βραχυκυκλωμάτων, χρησιμοποιούμε το μαθηματικό μοντέλο των στοιχείων απόστασης που περιγράφηκαν παραπάνω, για να καθορίσουμε τις ρυθμίσεις (reach) τους. Δεν εξομοιώνουμε μονοφασικά ως προς γη σφάλματα, σε αυτήν την συνδεσμολογία μετασχηματιστή, λόγω του ότι δεν υπάρχει ροή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας από το τύλιγμα τριγώνου στο τύλιγμα αστέρα.

Πίνακας 6.1 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.3.1

Τύπος Σφάλματος	Θέση Σφάλματος	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$M_{CA}$	$r$
B-C	B	1.987	2.723	*	1,01
B-C-G	B	1.987	2.723	*	1,01
3LG	B	1.007	1.007	1.007	1
B-C	A	3.283	3.993	*	2
B-C-G	A	3.283	3.993	*	2
3LG	A	1.993	1.993	1.993	1.98

Στον Πίνακα 6.1 οι  $M_{AB}$ ,  $M_{BC}$ , και  $M_{CA}$  είναι οι ρυθμίσεις (reach) που απαιτούνται από τα στοιχεία απόστασης φάσης να ενεργοποιηθούν. Η απαιτούμενη ρύθμιση για το αντισταθμιστικό στοιχείο απόστασης είναι το  $r$ . Για ευκολία μοντελοποιήσαμε αρχικά τις σύνθετες αντιστάσεις του μετασχηματιστή και τις γραμμής μεταφοράς σε περίπου ίδιες τιμές.

Οι ρυθμίσεις (οι  $M_{AB}$ ,  $M_{BC}$ ,  $M_{CA}$  και  $r$ ) στους πίνακες 6.1 έως 6.6 είναι εκφρασμένες σε ανά μονάδα τιμή της σύνθετης αντίστασης της γραμμής. Έτσι, σφάλμα, θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα μια μετρούμενη αντίσταση 1 ανά μονάδα στον ζυγό υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, και 2 ανά μονάδα στον απομακρυσμένο ζυγό.

Από τον Πίνακα 6.1 φαίνεται ότι οι ρυθμίσεις των στοιχείων απόστασης φάσης είναι σωστές μόνο στα τριφασικά σφάλματα. Το αντισταθμιστικό στοιχείο απόστασης  $r$  παρέχει μια πιο ακριβής ρύθμιση για όλους τους τύπους σφαλμάτων.

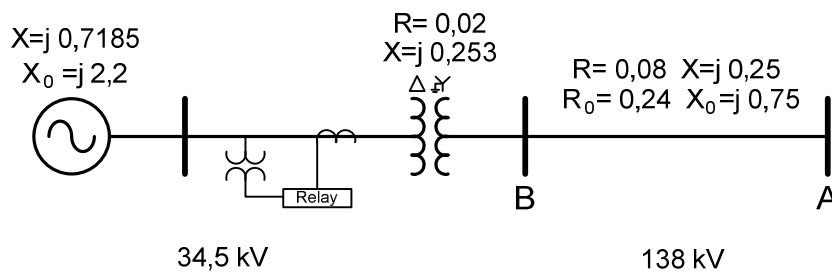
Στα διφασικά και στα διφασικά ως προς γη σφάλματα, η ρύθμιση των στοιχείων φάσης είναι κατά πολύ υψηλότερη για σφάλματα της πλευράς υψηλής τάσης του μετασχηματιστή. Αυτό είναι αναμενόμενο επειδή η μέτρηση εξαρτάται από την γωνία και η



στροφή γωνίας λόγω της συνδεσμολογίας του μετασχηματιστή επιδρά στις μετρούμενες ποσότητες. Σε αυτό το παράδειγμα η ρύθμιση που θα πρέπει να θέσουμε είναι περίπου 1.98 της σύνθετης αντίστασης γραμμής για να ανιχνεύονται όλα τα διαφασικά και τα διαφασικά ως προς γη σφάλματα της πλευράς υψηλής τάσης του μετασχηματιστή.

### 6.3.2 Μετασχηματιστής Τριγώνου - Γειωμένου Αστήρα με το Τύλιγμα Αστήρα στην Υψηλή Τάση.

Εδώ εξομοιώνουμε τα ίδια σφάλματα με την προηγούμενη παράγραφο, αλλά με την πλευρά χαμηλής τάσης συνδεδεμένη σε τρίγωνο. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.2 οι ρυθμίσεις είναι παρόμοιες.



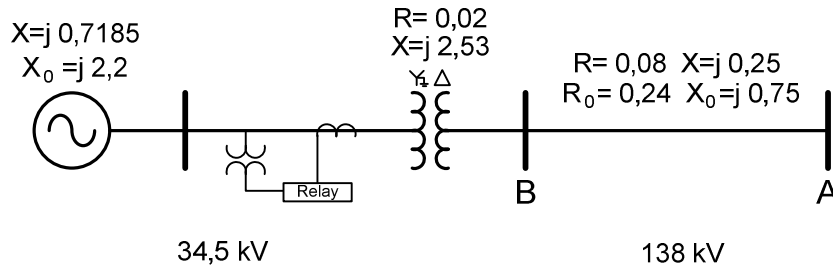
Σχήμα 6.5 Δίκτυο της παραγράφου 6.3.2

Πίνακας 6.2 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.3.2

Τύπος Σφάλματος	Θέση Σφάλματος	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$M_{CA}$	$r$
B-C	B	*	1.987	2.729	1.01
B-C-G	B	3.007	1.29	1.456	1.03
3LG	B	1.007	1.007	1.007	1
B-C	A	*	3.283	3.993	2
B-C-G	A	9.904	2.646	3.168	1.99
3LG	A	1.993	1.993	1.993	1.98

### 6.3.3 Μετασχηματιστής Γειωμένου Αστήρα – Τριγώνου με το Τύλιγμα Αστήρα στην Χαμηλή Τάση και $Z_{TR} \gg Z_{Line}$ .

Προκειμένου να ελέγξουμε τα παραπάνω αποτελέσματα, αυξάνουμε την σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή  $Z_{TR}$  περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της γραμμής  $Z_{Line}$ . Σε αυτήν την περίπτωση περιμένουμε μια ρύθμιση περίπου 10.9 ανά μονάδα για σφάλματα στον απομακρυσμένο ζυγό.



Σχήμα 6.6 Δίκτυο της παραγράφου 6.3.3

Πίνακας 6.3 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.3.3

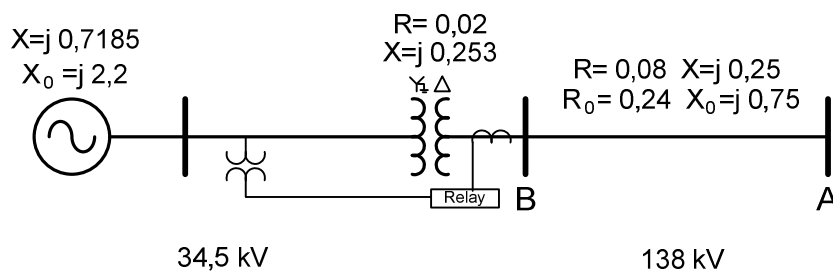
Τύπος Σφάλματος	Θέση Σφάλματος	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$M_{CA}$	$r$
B-C	A	13.46	18.733	*	11.04
B-C-G	A	13.46	18.733	*	11.04
3LG	A	11.031	11.031	11.031	11.02

Από τον Πίνακα 6.3 φαίνεται ότι το αντισταθμιστικό στοιχείο απόστασης  $r$  μετρά σωστά (11.02) την σύνθετη αντίσταση του σφάλματος για όλους τους τύπους σφαλμάτων. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και για την συνδεσμολογία μετασχηματιστή τριγώνου – γειωμένου αστέρα με τον αστέρα στην υψηλή τάση.

## 6.4 Προστασία Γραμμής Μεταφοράς με Ηλεκτρονόμους Απόστασης με ΜΤ στην Χαμηλή και ΜΕ στην Υψηλή Τάση.

### 6.4.1 Μετασχηματιστής Γειωμένου Αστέρα – Τριγώνου με το Τύλιγμα Τριγώνου στην Υψηλή Τάση.

Μερικές φορές στους ηλεκτρονόμους απόστασης, που χρησιμοποιούνται για την προστασία γραμμών μεταφοράς, οι ΜΕ είναι διαθέσιμοι από την υψηλή τάση, ενώ οι τάσεις λαμβάνονται από την χαμηλή τάση. Στο σχήμα 6.7 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα.



Σχήμα 6.7 Δίκτυο της παραγράφου 6.4.1

Η προφανής επιπλοκή αυτής της σύνδεσης είναι ότι τα ρεύματα και οι τάσεις, των δυο πλευρών του μετασχηματιστή, είναι  $30^\circ$  εκτός φάσης, με αποτέλεσμα οι τάσεις που εφαρμόζονται στον ηλεκτρονόμο εμφανίζονται να υφίστανται μια πτώση τάσης μέσω του μετασχηματιστή. Στον πίνακα 6.5 φαίνεται η απόδοση των στοιχείων απόστασης για το σύστημα αυτό.

Οι τιμές στις παρενθέσεις δείχνουν τις ρυθμίσεις που υπολογίστηκαν με τους MT να είναι συνδεδεμένοι σε αστέρα – τρίγωνο για να εξομοιώσουν τον μετασχηματιστή. Δηλαδή, αν ο μετασχηματιστής ισχύος είναι συνδεδεμένος σε γειωμένο αστέρα – τρίγωνο με το τρίγωνο στην υψηλή τάση, συνδέουμε του MT στην πλευρά χαμηλής τάσης σε γειωμένο αστέρα – τρίγωνο για να αναιρέσουμε την επίδραση του μετασχηματιστή.

Πίνακας 6.5 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.4.1

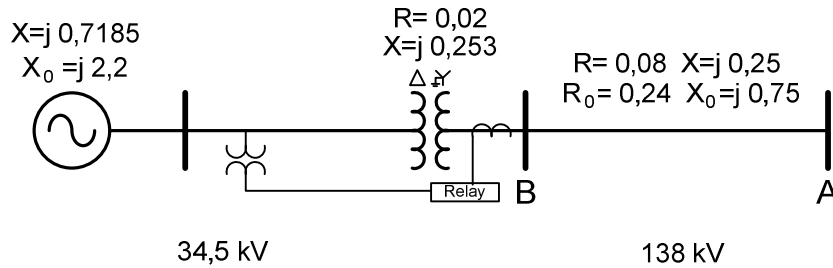
Τύπος Σφάλματος	Θέση Σφάλματος	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$M_{CA}$	$r$
B-C	B	3.442	2.364 (1.007)	2.729	1.21 (1.01)
B-C-G	B	3.442	2.364 (1.007)	2.729	1.21 (1.01)
3LG	B	1.404 (1.007)	1.404 (1.007)	1.404 (1.007)	1.36 (1)
B-C	A	5.686	3.458 (1.993)	-41.311	2.37 (2)
B-C-G	A	5.686	3.458 (1.993)	-41.311	2.37 (2)
3LG	A	2.657 (1.993)	2.657 (1.993)	2.657 (1.993)	2.49 (1.98)

Όπως βλέπουμε από τον Πίνακα 6.5 το αντισταθμιστικό στοιχείο απόστασης έχει ένα 20% σφάλμα, αν δεν γίνει διόρθωση στις συνδέσεις των MT. Όταν οι συνδέσεις τροποποιούνται σε τρίγωνο – αστέρα, για την εξομοίωση της σύνδεσης του μετασχηματιστή ισχύος, το στοιχείο αυτό λειτουργεί ικανοποιητικά.

Η απόδοση των στοιχείων απόστασης φάσης είναι πολύ ανώμαλη και θα πρέπει να ελέγχονται αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αυτήν την συνδεσμολογία MT και ME.

#### 6.4.2 Μετασχηματιστής Τριγώνου - Γειωμένου Αστέρα με το Τύλιγμα Αστέρα στην Υψηλή Τάση.

Η σύνδεση τριγώνου – γειωμένου αστέρα με το τύλιγμα αστέρα στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ισχύος παράγει τα ίδια αποτελέσματα με αυτά του προηγούμενου δικτύου, όπως φαίνονται στον Πίνακα 6.6.



Σχήμα 6.8 Δίκτυο της παραγράφου 6.4.2

Πίνακας 6.6 Ρυθμίσεις στοιχείων απόστασης για το δίκτυο της παραγράφου 6.4.2

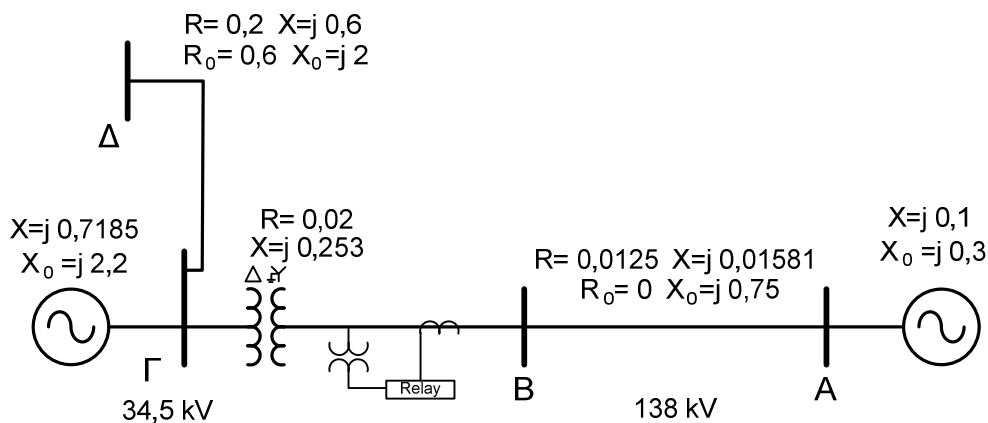
Τύπος Σφάλματος	Θέση Σφάλματος	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$M_{CA}$	$r$
B-C	B	25.70	1.721 (1.007)	4.727	1.13 (1.01)
B-C-G	B	6.783	1.429 (1.007)	2.879	1.13 (1)
3LG	B	0.992	0.992	0.992	1.01
B-C	A	41.311	2.843 (1.993)	6.916	2.24 (2)
B-C-G	A	8.455	2.494 (1.993)	4.22	2.35 (1.99)
3LG	A	2.029	2.029	2.029	2.11

## 6.5 Προστασία Γραμμής Μεταφοράς με Ηλεκτρονόμους Κατεύθυνσης

Στα παρακάτω σχήματα και στους παρακάτω Πίνακες αναλύεται η απόδοση των στοιχείων κατεύθυνσης φάσης. Σε αυτήν την παράγραφο εξετάζεται ένα σχέδιο προστασίας το οποίο ακολουθεί τα παρακάτω κριτήρια:

1. Αν ρέει επαρκές ρεύμα αρνητικής ακολουθίας (πάνω από την ρύθμιση (κατώφλι) του), ένα στοιχείο κατεύθυνσης σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας ( $z_2$ ) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της κατεύθυνσης του σφάλματος. Αν μετρούμενη αντίσταση  $z_2$  είναι αρνητική, το σφάλμα ορίζεται ως ορθής φοράς, ενώ αν είναι θετική αντίστροφης.
2. Αν το μέτρο του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας είναι πολύ χαμηλό, ένα στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας παίρνει προτεραιότητα. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί τάση μνήμης στην περίπτωση ενός τριφασικού σφάλματος που συμβαίνει πολύ κοντά στον ηλεκτρονόμο. Το στοιχείο αυτό είναι πάντοτε ενεργό, λειτουργεί όμως μόνο αν δεν ενεργοποιηθεί το στοιχείο αρνητικής ακολουθίας.

Σε αυτήν την ανάλυση, εξομοιώνουμε δυο τύπους σφαλμάτων: διφασικά και τριφασικά σφάλματα. Στους πίνακες 6.7, 6.8 και 6.9 φαίνονται δυο τιμές: η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  σε ανά μονάδα τιμή, για διφασικά σφάλματα και η ροπή  $T_{32P}$  για τριφασικά σφάλματα. Στο σχήμα 6.9 φαίνεται ένα σύστημα με τους ΜΕ και τους ΜΤ στην πλευρά των 138 kV του μετασχηματιστή ισχύος. Από τον Πίνακα 6.7 φαίνεται ότι αυτό τα στοιχεία κατεύθυνσης λειτουργούν σωστά για όλους τους τύπους και για όλες τις θέσεις σφάλματος που εξετάζουμε. Η τιμή στην παρένθεση για το στοιχείο κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας είναι υπολογισμένη με την χρήση τάσης μνήμης θετικής ακολουθίας, στην περίπτωση σφάλματος στο σημείο Β.

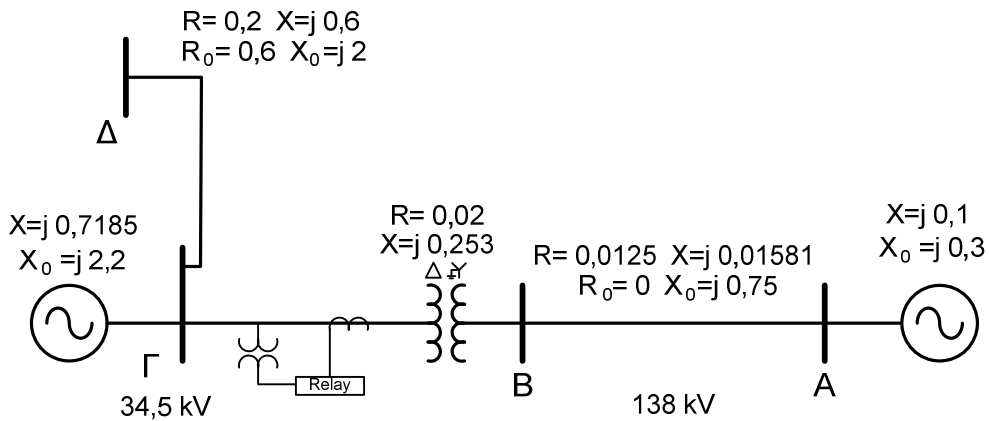


Σχήμα 6.9 Μετασχηματιστές μετρήσεων στην πλευρά υψηλής τάσης

Πίνακας 6.7 Απόκριση των στοιχείων κατεύθυνσης για σφάλματα του δικτύου του σχήματος 6.9

Θέση Σφάλματος	$z_2$ (Ανά μονάδα) Αρνητική τιμή δείχνει ορθής φοράς	$T_{32P}$ Τριφασικό Σφάλμα Θετική τιμή δείχνει ορθής φοράς
A	-0.97	0.146
B	-0.97	$3.08 \cdot 10^{-15}$ (9.246)
Γ	0.116	-16.737
Δ	0.105	-6.123

Στο σχήμα 6.10 και στον πίνακα 6.8 φαίνονται το δίκτυο και η απόδοση των στοιχείων κατεύθυνσης αντίστοιχα, με τους ΜΕ και ΜΤ να είναι τοποθετημένοι στην πλευρά των 34.5 kV του μετασχηματιστή. Και εδώ τα στοιχεία κατεύθυνσης λειτουργούν σωστά για όλους τους τύπους και για όλες τις θέσεις σφάλματος που εξετάζουμε.

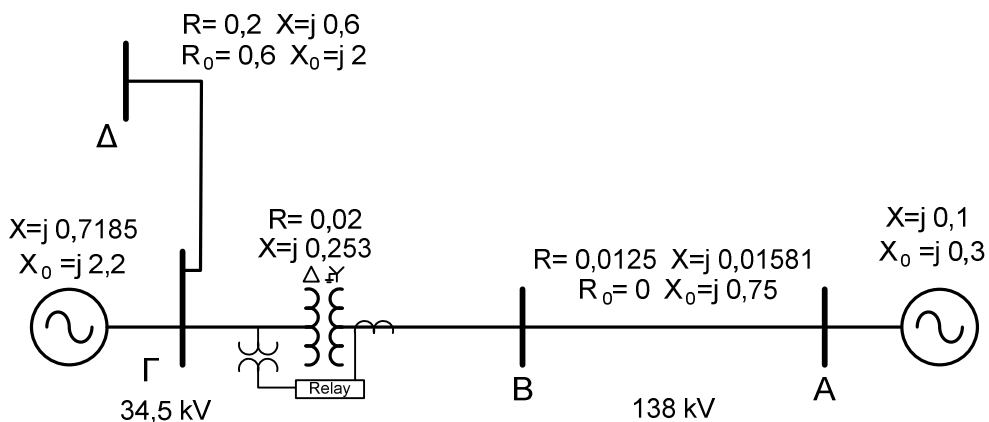


Σχήμα 6.10 Μετασχηματιστές μετρήσεων στην πλευρά χαμηλής τάσης

Πίνακας 6.8 Απόκριση των στοιχείων κατεύθυνσης για σφάλματα του δικτύου του σχήματος 6.10

Θέση Σφάλματος	$z_2$ (Ανά μονάδα) Αρνητική τιμή δείχνει ορθής φοράς	$T_{32P}$ Τριφασικό Σφάλμα Θετική τιμή δείχνει ορθής φοράς
A	-0.73	2.488
B	-0.718	2.419
Γ	0.369	0 (-24.357)
Δ	0.342	-4.804

Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται μια ενδιαφέρουσα περίπτωση στην οποία οι ΜΕ έχουν τοποθετηθεί στην πλευρά χαμηλής τάσης και οι ΜΤ στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ισχύος. Η θέση των ΜΕ καθορίζει την κατεύθυνση του ρεύματος. Έτσι, για το σύστημα του σχήματος 6.11, για ένα σφάλμα στο μετασχηματιστή, τα στοιχεία κατεύθυνσης θα ορίσουν την κατεύθυνση του σφάλματος ως αντίστροφης φοράς.



Σχήμα 6.11 ΜΕ στην πλευρά υψηλής τάσης και ΜΤ στην πλευρά χαμηλής τάσης

Πίνακας 6.9 Απόκριση των στοιχείων κατεύθυνσης για σφάλματα του δικτύου του σχήματος 6.11

Θέση Σφάλματος	$z_2$ (Ανά μονάδα) Αρνητική τιμή δείχνει ορθής φοράς	T32P Τριφασικό Σφάλμα Θετική τιμή δείχνει ορθής φοράς
A	-0.609	2.155
B	-0.608	2.095
Γ	0.316	0 (-21.354)
Δ	0.366	-3.516

Αν και όλα τα αποτελέσματα εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές, οι περισσότερες ρυθμίσεις (κατώφλια) των ηλεκτρονόμων για την σύνθετη αντίσταση  $z_2$  τίθενται σε Ohm. Έτσι οι λόγοι μετασχηματισμού των MT και ME θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον καθορισμό των ρυθμίσεων αυτών.

Στο Παράρτημα Β επιλύονται αναλυτικά όλα τα παραπάνω παραδείγματα.

## Παράρτημα Α.

### Ορισμός Συνάρτησης *solve\_circuit()* για την Επίλυση του Κυκλώματος του Παραδείγματος 4.5

Με αυτήν την συνάρτηση επιλύεται το κύκλωμα του σχήματος 4.27 για μονοφασικό ως προς γη σφάλμα στον ζυγό S. Δέχεται ως ορίσματα τις αντιστάσεις που ορίζονται στο σχήμα 4.28 καθώς επίσης τις τάσεις των πηγών και την γωνία  $\delta$ .

$$\text{solve\_circuit}(V_S, V_R, R_F, Z_{x1}, Z_{y1}, Z_{x2}, Z_{y2}, Z_{x0}, Z_{y0}, \delta, A1, Z_{L1\_1}, k_0) := \begin{cases} V_S \leftarrow V_S \cdot e^{j \cdot \delta} \\ I_{\text{temp}} \leftarrow \frac{V_S - V_R}{Z_{x1} + Z_{y1}} \\ V_{\text{th}} \leftarrow V_S - I_{\text{temp}} \cdot Z_{x1} \\ Z_{\text{th}} \leftarrow \frac{Z_{x1} \cdot Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} + \frac{Z_{x2} \cdot Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} + \frac{Z_{x0} \cdot Z_{y0}}{Z_{x0} + Z_{y0}} \\ I_F \leftarrow \frac{V_{\text{th}}}{Z_{\text{th}} + 3R_F} \\ V_{\text{relay1}} \leftarrow I_F \left[ 3R_F + \left( \frac{Z_{x2} \cdot Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} + \frac{Z_{x0} \cdot Z_{y0}}{Z_{x0} + Z_{y0}} \right) \right] \\ V_{\text{relay0}} \leftarrow -I_F \cdot \frac{Z_{x0} \cdot Z_{y0}}{Z_{x0} + Z_{y0}} \\ V_{\text{relay2}} \leftarrow -I_F \cdot \frac{Z_{x2} \cdot Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \\ I_{\text{relay0}} \leftarrow -I_F \cdot \frac{Z_{x0}}{Z_{x0} + Z_{y0}} \cdot \frac{1}{2} \\ I_{\text{relay2}} \leftarrow -I_F \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \cdot \frac{1}{2} \\ I_{\text{relay1}} \leftarrow \frac{-1}{2} \cdot \frac{V_R - V_{\text{relay1}}}{Z_{y1}} \\ I_{012} \leftarrow \begin{pmatrix} I_{\text{relay0}} \\ I_{\text{relay1}} \\ I_{\text{relay2}} \end{pmatrix} \\ V_{012} \leftarrow \begin{pmatrix} V_{\text{relay0}} \\ V_{\text{relay1}} \\ V_{\text{relay2}} \end{pmatrix} \\ I_{\text{abc}} \leftarrow A1 \cdot I_{012} \\ V_{\text{abc}} \leftarrow A1 \cdot V_{012} \\ I_a \leftarrow I_{\text{abc}_0} \\ I_b \leftarrow I_{\text{abc}_1} \\ I_c \leftarrow I_{\text{abc}_2} \\ V_a \leftarrow V_{\text{abc}_0} \\ V_b \leftarrow V_{\text{abc}_1} \\ V_c \leftarrow V_{\text{abc}_2} \end{cases}$$



```

V_POLA ← Va + j · (Vb - Vc)
V_POLB ← Vb + j · (Vc - Va)
V_POLC ← Vc + j · (Va - Vb)
V_OPA ← ZL1_1 · (Ia + k0 · 3 · Irelay0)
V_OPB ← ZL1_1 · (Ib + k0 · 3 · Irelay0)
V_OPB ← ZL1_1 · (Ic + k0 · 3 · Irelay0)
V_OPB ← ZL1_1 · (Ic + k0 · 3 · Irelay0)

ThA ← | val ←  $\frac{\arg(V_{POLA})}{\text{deg}} - \frac{\arg(V_{OPA})}{\text{deg}}$ 
      | val - 360 if val > 180
      | val + 360 if val < -180

ThB ← | val ←  $\frac{\arg(V_{POLB})}{\text{deg}} - \frac{\arg(V_{OPB})}{\text{deg}}$ 
      | val - 360 if val > 180
      | val + 360 if val < -180

ThC ← | val ←  $\frac{\arg(V_{POLC})}{\text{deg}} - \frac{\arg(V_{OPC})}{\text{deg}}$ 
      | val - 360 if val > 180
      | val + 360 if val < -180

Theta ←  $\begin{pmatrix} \text{ThA} \\ \text{ThB} \\ \text{ThC} \end{pmatrix}$ 

return Theta

```

## Παράρτημα Β

### Αναλυτική Επίλυση των Συστημάτων με Η/Ν Απόστασης του 6ου Κεφαλαίου

#### Ορισμοί

$$\begin{aligned} VA &:= W & KVA &:= 1000W & MVA &:= 1000KVA \\ pu &:= 1.0 & MW &:= MVA & MVAr &:= MVA \end{aligned}$$

$$a := e^{\frac{2\pi i}{3}} \quad A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad a = -0.5 + 0.866i \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

#### Λεδομένα

$$X_{gen\_d\_pu} := 0.7185 \quad X_{gen\_2\_pu} := X_{gen\_d\_pu} \quad X_{gen\_0\_pu} := 2.2i$$

$$Z_{MT\_pu} := 0.02 + 0.253 \quad Z_{L1\_pu} := 0.08 + 0.25 \quad Z_{L2\_pu} := Z_{L1\_pu}$$

$$Z_{L0\_pu} := 0.24 + 0.75$$

#### **Ορισμός Συνάρτησης Υπολογισμού reach για το compensator Distance Element**

```

find_R(Z1, ang, maxR, Vab, Iab, Vbc, Ibc, Vcpre) :=
  r ← round(maxR 100) / 100 - 8
  r ← 0 if r < 0
  while r < maxR + 8
    Z1R ← r · Z1 · ang
    A_pp ← Vab - Z1R · Iab
    B_pp ← Vbc - Z1R · Ibc
    T_pp ← Im(A_pp · B_pp)
    return r if T_pp < 0
    r ← r + 0.01
  r ← round(maxR 100) / 100 - 8
  r ← 0 if r < 0
  while r < maxR + 8
    Z1R ← r · Z1 · ang
    A_3p ← Vab - Z1R · Iab
    B_3p ← -j · Vab - 0.25 · Vcpre
    T_3p ← Im(A_3p · B_3p)
    return r if T_3p < 0
    r ← r + 0.01
  return -1

```

**Υπολογισμός Βασικών τιμών**

$$V_1 := 34.5\text{kV} \quad V_2 := 138\text{kV}$$

$$V_{\text{base1}} := 34.5\text{kV} \quad V_{\text{base2}} := 138\text{kV} \quad V_{\text{gen\_pu}} := 1$$

$$S_{\text{base}} := 100\text{MVA} \quad Z_{\text{base2}} := \frac{(V_{\text{base2}})^2}{S_{\text{base}}} \quad Z_{\text{base1}} := \frac{(V_{\text{base1}})^2}{S_{\text{base}}} \quad I_{\text{base1}} := \frac{S_{\text{base}}}{(\sqrt{3} \cdot V_{\text{base1}})}$$

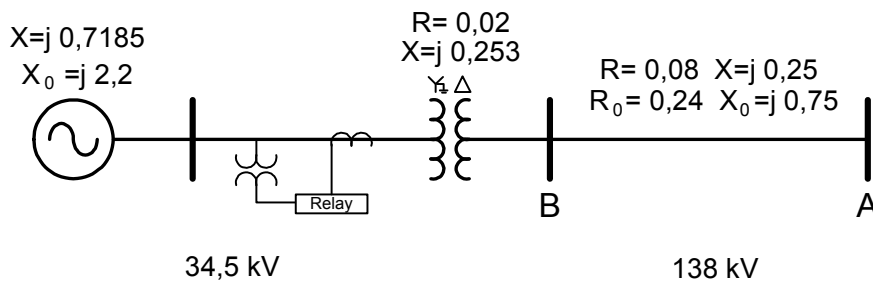
$$Z_{\text{base2}} = 190.44\Omega \quad I_{\text{base2}} := \frac{S_{\text{base}}}{(\sqrt{3} \cdot V_{\text{base2}})}$$

$$X_{\text{gen\_d}} := X_{\text{gen\_d\_pu}} \cdot Z_{\text{base1}} \quad Z_{\text{MT}} := Z_{\text{MT\_pu}} \cdot Z_{\text{base1}} \quad Z_{\text{L1}} := Z_{\text{L1\_pu}} \cdot Z_{\text{base1}}$$

$$Z_{\text{L0}} := Z_{\text{L0\_pu}} \cdot Z_{\text{base1}}$$

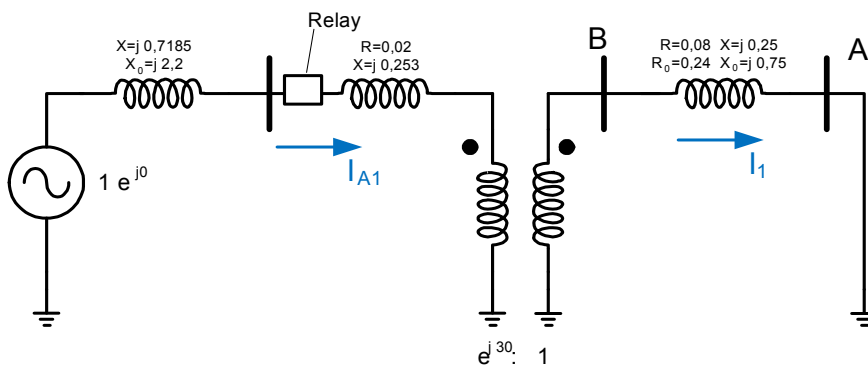
**Α Μετασχηματιστής γειωμένου αστέρα - τριγώνου με το τύλιγμα τριγώνου στην υψηλή τάση (παράγραφος 6.3.1)**

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



**1. Τριφασικό σφάλμα**

α. Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}}}{Z_1} \quad I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0} \quad I_b := I_{\text{abc}}_{1,0} \quad I_c := I_{\text{abc}}_{2,0} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0.067 - 0.813i \\ -0.738 + 0.349i \\ 0.671 + 0.464i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.365 \text{ kA} \quad \arg(I_a) = -85.32 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.416 - 0.048i \\ -0.249 - 0.336i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{\text{ab}} := I_a - I_b \quad V_{\text{ab}} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{\text{ab}} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{\text{ab}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad \text{MAB} = 1.993$$

$$I_{\text{bc}} := I_b - I_c \quad V_{\text{bc}} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{\text{bc}} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{\text{bc}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]} \quad \text{MBC} = 1.993$$

$$I_{\text{ca}} := I_c - I_a \quad V_{\text{ca}} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 1.993$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.98$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

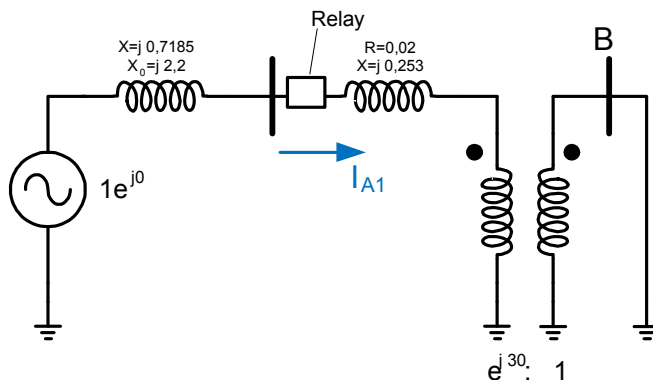
$$T_{pp} := \operatorname{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = 2.384 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -9.893 \times 10^5 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z1 := X_{gen\_d\_pu} + Z_{MT\_pu}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}}{Z_1} \quad I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0} \quad I_b := I_{\text{abc}}_{1,0} \quad I_c := I_{\text{abc}}_{2,0} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0.021 - 1.029i \\ -0.902 + 0.496i \\ 0.88 + 0.533i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.722 \text{ kA}$$

Υπολογισμός τάσεων:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.261 - 0.015i \\ -0.144 - 0.218i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{\text{ab}} := I_a - I_b \quad V_{\text{ab}} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{\text{ab}} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{\text{ab}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad MAB = 1.007$$

$$I_{\text{bc}} := I_b - I_c \quad V_{\text{bc}} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{\text{bc}} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{\text{bc}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad MBC = 1.007$$

$$I_{\text{ca}} := I_c - I_a \quad V_{\text{ca}} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot (\overline{V_{C1} - V_{A1}})\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (\overline{V_{C1} - V_{A1}})\right]} \quad MCA = 1.007$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

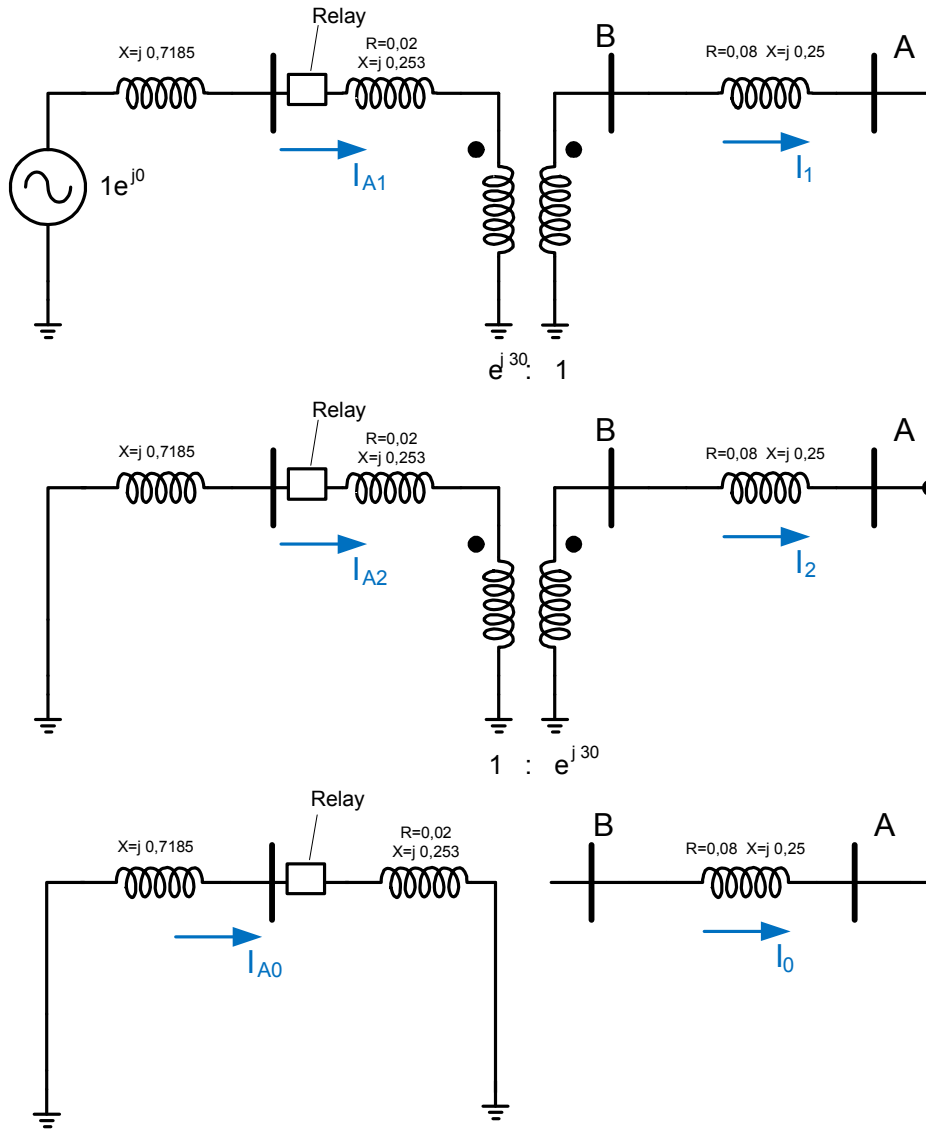
$$T_{pp} := \operatorname{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = 3.94 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -2.44 \times 10^5 \text{ V}^2$$

## 2. Διφασικό ως προς γη σφάλμα

α. Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}} \quad Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left( \frac{-\pi}{6} \right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left( \frac{\pi}{6} \right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$



$$I_a := I_{abc_{0,0}} \quad I_b := I_{abc_{1,0}} \quad I_c := I_{abc_{2,0}} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} 0.369 - 0.174i \\ -0.738 + 0.349i \\ 0.369 - 0.174i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 0.683 \text{ kA}$$

Υπολογισμός τάσεων:

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu}$$

$$V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_2\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix}$$

$$V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.875 - 0.265i \\ -0.249 - 0.336i \\ -0.625 + 0.601i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc_{0,0}}$$

$$V_b := V_{Relayabc_{1,0}}$$

$$V_c := V_{Relayabc_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]}$$

$$MAB = 3.283$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]}$$

$$MBC = 3.993$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}[V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}]}{\text{Re}[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}]}$$

$$MCA = -3.272 \times 10^{16}$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0$$

$$\text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg})$$

$$\text{ang} = 1$$

$$\max R := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \max R, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 2$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

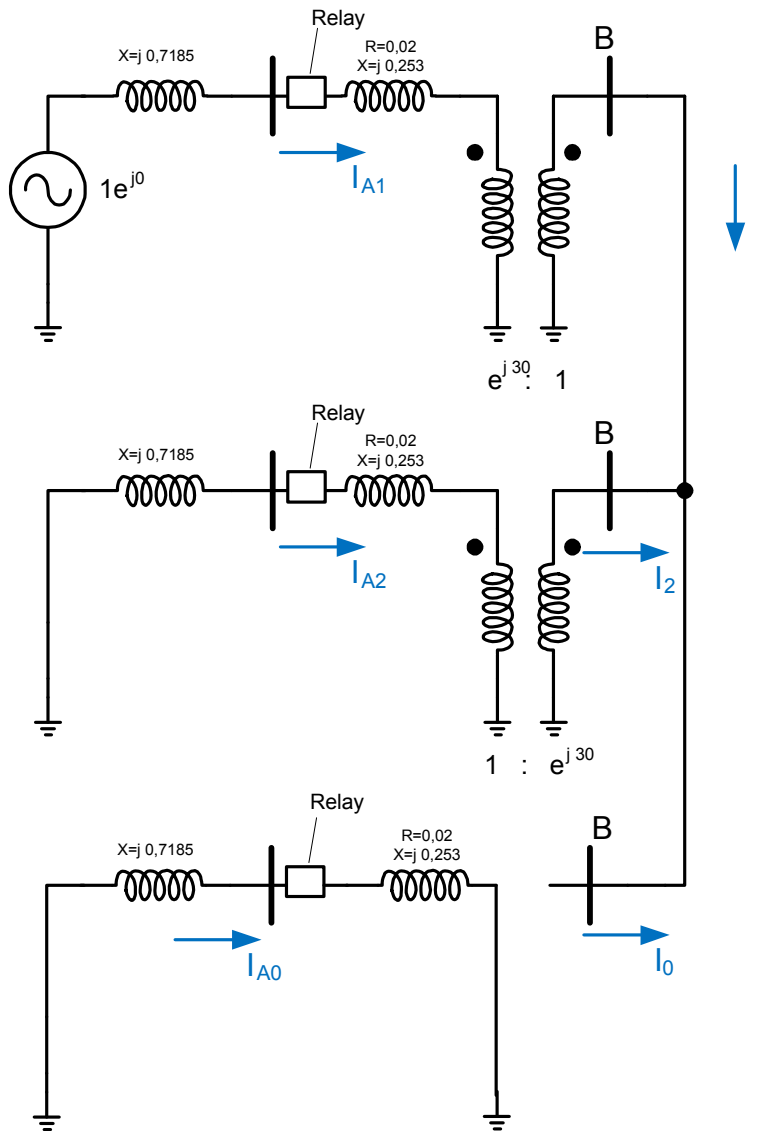
$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -1.603 \times 10^6 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 3.334 \times 10^8 \text{V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc_{0,0}} \quad I_b := I_{abc_{1,0}} \quad I_c := I_{abc_{2,0}} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} 0.451 - 0.248i \\ -0.902 + 0.496i \\ 0.451 - 0.248i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 0.861 \cdot \text{kA}$$

Υπολογισμός τάσεων:

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu} \quad V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_2\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.822 - 0.324i \\ -0.144 - 0.218i \\ -0.678 + 0.542i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc_{0,0}} \quad V_b := V_{Relayabc_{1,0}} \quad V_c := V_{Relayabc_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad MAB = 1.987$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad MBC = 2.729$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad MCA = -2.703 \times 10^{16}$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\max R := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \max R, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.01$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang}$$

$$\text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.972 \times 10^5 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

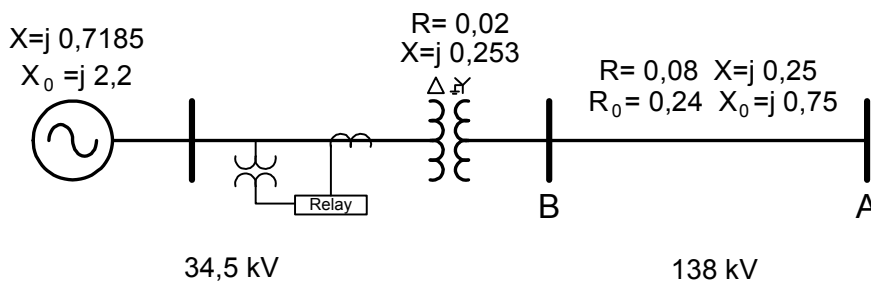
$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 3.103 \times 10^8 \text{V}^2$$

### 3 Διφασικό χωρίς γη σφάλμα

Η περίπτωση αυτή είναι ίδια με την προηγούμενη (διφασικό ως προς γη). Εκεί λόγω του τυλίγματος τριγώνου στην υψηλή τάση, η αντίσταση  $Z_0$  είναι άπειρη και έτσι η ροή των ρευμάτων ακολουθίας γινόταν στα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Το ίδιο γίνεται και στην περίπτωση αυτή, αφού εδώ έχουμε σύνδεση του κυκλώματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας σε σειρά.

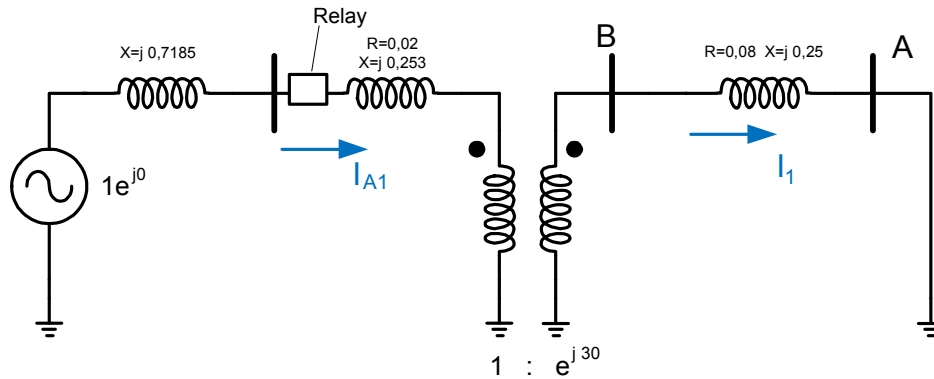
### Β Μετασηματιστής τριγώνου - γειωμένου αστέρα με το τύλιγμα αστέρα στη υψηλή τάση (παράγραφος 6.3.2)

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



## 1. Τριφασικό σφάλμα

α. Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_1}$$

$$I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}_{0,0}} \quad I_b := I_{\text{abc}_{1,0}} \quad I_c := I_{\text{abc}_{2,0}} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0.067 - 0.813i \\ -0.738 + 0.349i \\ 0.671 + 0.464i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.365 \text{ kA}$$

$$\arg(I_a) = -85.32 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.416 - 0.048i \\ -0.249 - 0.336i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}}$$

$$V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}}$$

$$V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ab} \cdot (V_{A1} - V_{B1})\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (V_{A1} - V_{B1})\right]} \quad \text{MAB} = 1.993$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{bc} \cdot (V_{B1} - V_{C1})\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (V_{B1} - V_{C1})\right]} \quad \text{MBC} = 1.993$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot (V_{C1} - V_{A1})\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (V_{C1} - V_{A1})\right]} \quad \text{MCA} = 1.993$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.98$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

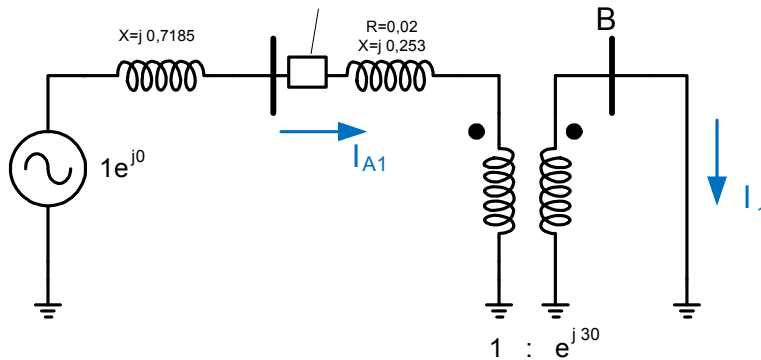
$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = 2.384 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -9.893 \times 10^5 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_1}$$

$$I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0}$$

$$I_b := I_{\text{abc}}_{1,0}$$

$$I_c := I_{\text{abc}}_{2,0}$$

$$I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0.021 - 1.029i \\ -0.902 + 0.496i \\ 0.88 + 0.533i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.722 \text{ kA}$$

$$\arg(I_a) = -88.821 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.261 - 0.015i \\ -0.144 - 0.218i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$



$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}\left[V_{ab} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}}\right]}{\text{Re}\left[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}}\right]} \quad MAB = 1.007$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}\left[V_{bc} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]}{\text{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]} \quad MBC = 1.007$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\text{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 1.007$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{\text{cpre}})$$

$$r = 1$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = 3.94 \times 10^6 \text{V}^2$$

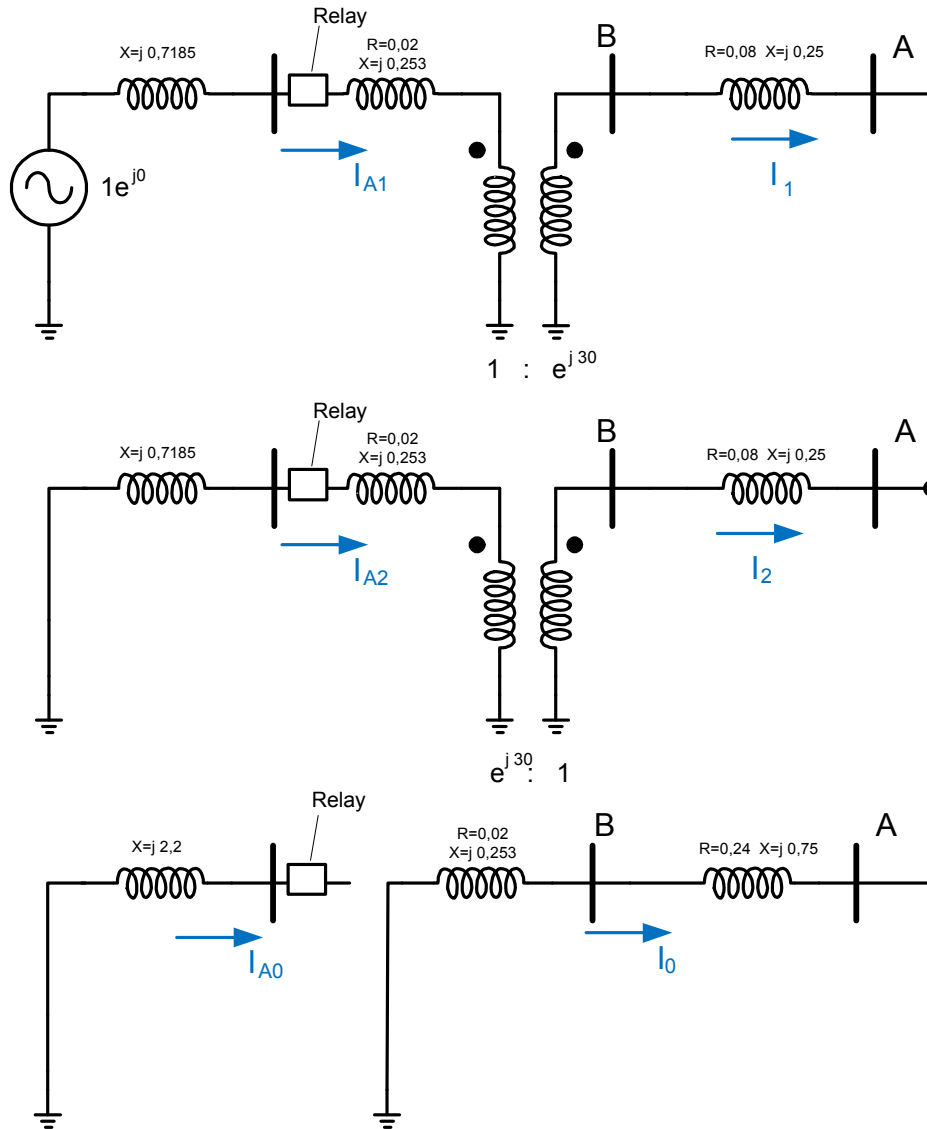
$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -2.44 \times 10^5 \text{ V}^2$$

## 2. Διφασικό ως προς γη σφάλμα

α. Στο σημείο Α.



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_0 := Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L0\_pu}}$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}} \quad I_2 := -I_1 \cdot \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad I_0 := -I_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0} \quad I_b := I_{\text{abc}}_{1,0} \quad I_c := I_{\text{abc}}_{2,0} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} -0.163 - 0.431i \\ -0.508 - 0.033i \\ 0.671 + 0.464i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 0.772 \text{ kA}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.69 + 0.117i \\ -0.524 - 0.501i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{\text{ab}} := I_a - I_b \quad V_{\text{ab}} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{\text{ab}} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{\text{ab}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad \text{MAB} = 9.904$$

$$I_{\text{bc}} := I_b - I_c \quad V_{\text{bc}} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{\text{bc}} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{\text{bc}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad \text{MBC} = 2.646$$

$$I_{\text{ca}} := I_c - I_a \quad V_{\text{ca}} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 3.168$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.99$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

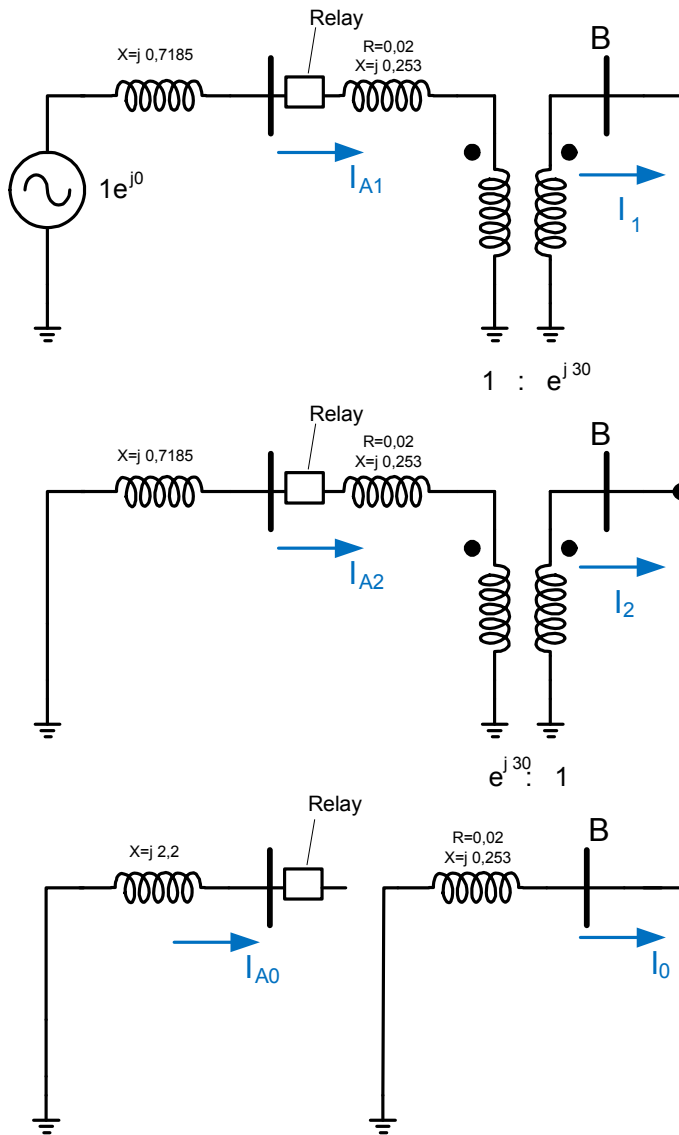
$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = -7.678 \times 10^5 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = 6.954 \times 10^8 \text{V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρεύματος:

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_0 := Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1 \cdot \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_0 := -I_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix} \quad I_{abc} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc}_{0,0} \quad I_b := I_{abc}_{1,0} \quad I_c := I_{abc}_{2,0} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} -0.127 - 0.761i \\ -0.753 + 0.228i \\ 0.88 + 0.533i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 1.292 \text{ kA}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu} \quad V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_d\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.453 + 0.091i \\ -0.336 - 0.325i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc}_{0,0} \quad V_b := V_{Relayabc}_{1,0} \quad V_c := V_{Relayabc}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad \text{MAB} = 3.007$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad \text{MBC} = 1.29$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad \text{MCA} = 1.456$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(j \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.03$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

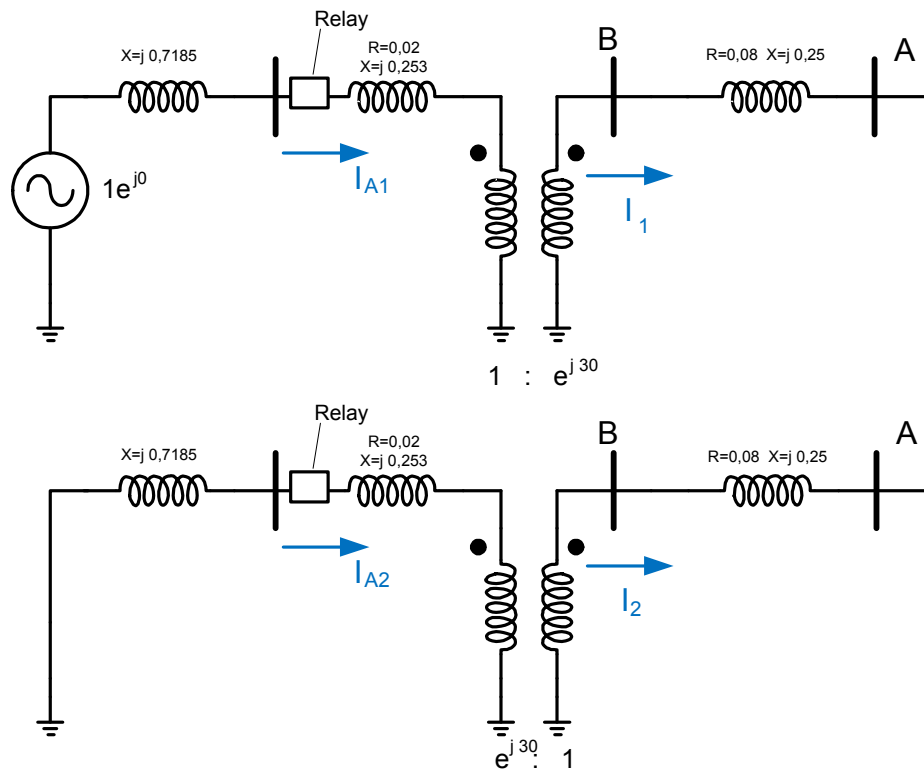
$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -1.656 \times 10^5 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 2.646 \times 10^8 \text{ V}^2$$

## 3. Διφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}} \quad Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0}$$

$$I_b := I_{\text{abc}}_{1,0}$$

$$I_c := I_{\text{abc}}_{2,0}$$

$$I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} -0.335 - 0.232i \\ -0.335 - 0.232i \\ 0.671 + 0.464i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 0.683 \text{ kA}$$



Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.833 + 0.241i \\ -0.667 - 0.625i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]} \quad MAB = 8.415 \times 10^{16}$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]} \quad MBC = 3.283$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}} \right]} \quad MCA = 3.993$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left( |Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}| \right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, Vab, Iab, Vbc, Ibc, Vcpre)$$

$$r = 2$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang}$$

$$\text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (Vab) - Z1R \cdot (Iab)$$

$$B_{pp} := (Vbc) - Z1R \cdot (Ibc)$$

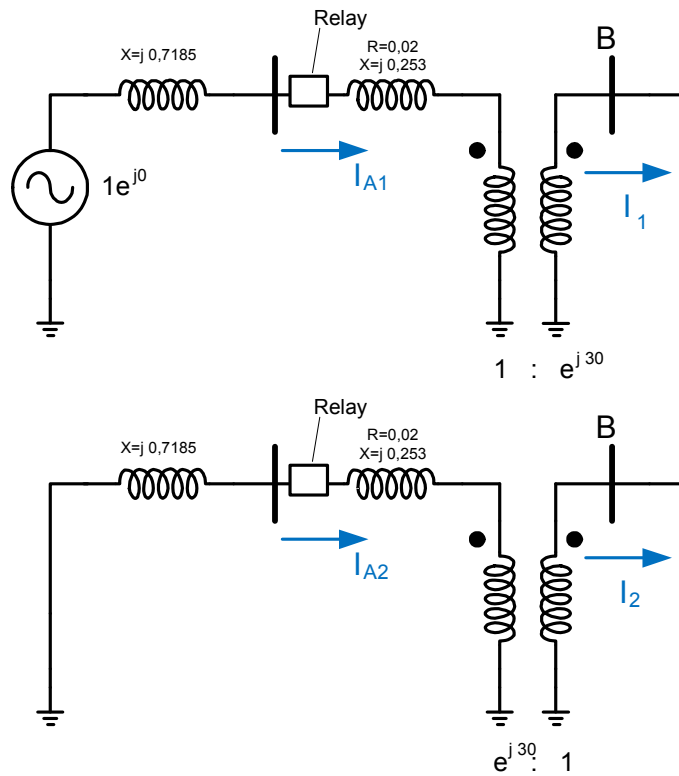
$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -1.603 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (Vab) - 0.25 \cdot Vcpre$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 1.362 \times 10^9 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix} \quad I_{abc} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc}_{0,0} \quad I_b := I_{abc}_{1,0} \quad I_c := I_{abc}_{2,0} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} -0.44 - 0.266i \\ -0.44 - 0.266i \\ 0.88 + 0.533i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 0.861 \text{ kA}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu} \quad V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_d\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.809 + 0.316i \\ -0.691 - 0.55i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc}_{0,0} \quad V_b := V_{Relayabc}_{1,0} \quad V_c := V_{Relayabc}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad MAB = 4.109 \times 10^{16}$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad MBC = 1.987$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad MCA = 2.729$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.01$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.972 \times 10^5 \text{ V}^2$$

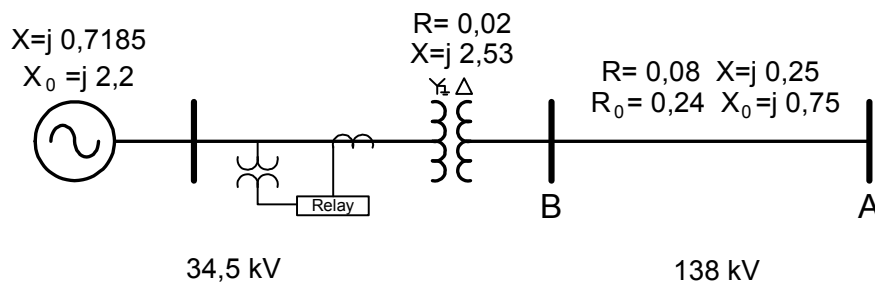
$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 1.362 \times 10^9 \text{ V}^2$$

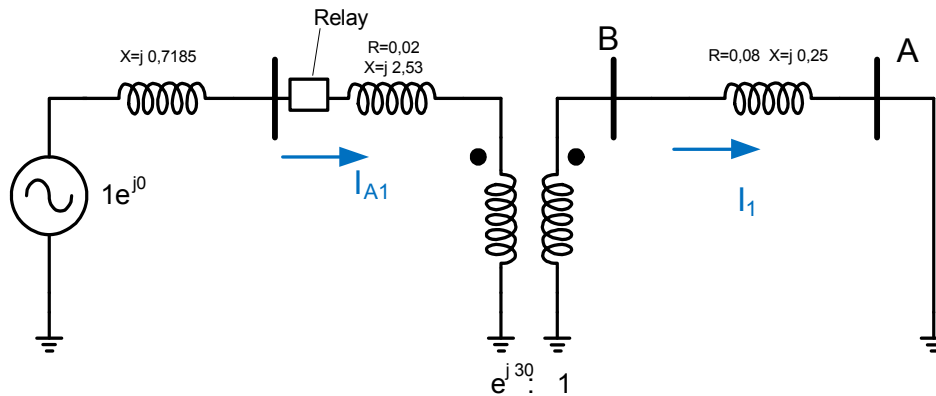
**Γ Μετασηματιστής γειωμένου αστέρα -τριγώνου με το τύλιγμα τριγώνου στη υψηλή τάση. Η αντίσταση του μετασηματιστή 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή της γραμμής (παράγραφος 6.3.3)**

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



### 1. Τριφασικό Σφάλμα.

Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_{MT\_pu2} := 0.02 + j \cdot 2.53$$

$$Z_1 := X_{gen\_d\_pu} + Z_{MT\_pu2} + Z_{L1\_pu}$$

$$I_1 := \frac{V_{gen\_pu} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}}{Z_1}$$

$$I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{abc} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc}_{0,0}$$

$$I_b := I_{abc}_{1,0}$$

$$I_c := I_{abc}_{2,0}$$

$$I_{abc} = \begin{pmatrix} 8.164 \times 10^{-3} - 0.286i \\ -0.251 + 0.136i \\ 0.243 + 0.15i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 0.478 \text{ kA}$$

$$\arg(I_a) = -88.363 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu}$$

$$V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_2\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix}$$

$$V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.795 - 5.866i \times 10^{-3} \\ -0.402 - 0.685i \\ -0.392 + 0.691i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc}_{0,0}$$

$$V_b := V_{Relayabc}_{1,0}$$

$$V_c := V_{Relayabc}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ab} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}}\right]} \quad MAB = 11.031$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{bc} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]} \quad MBC = 11.031$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 11.031$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu2}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 10.639$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 11.02$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

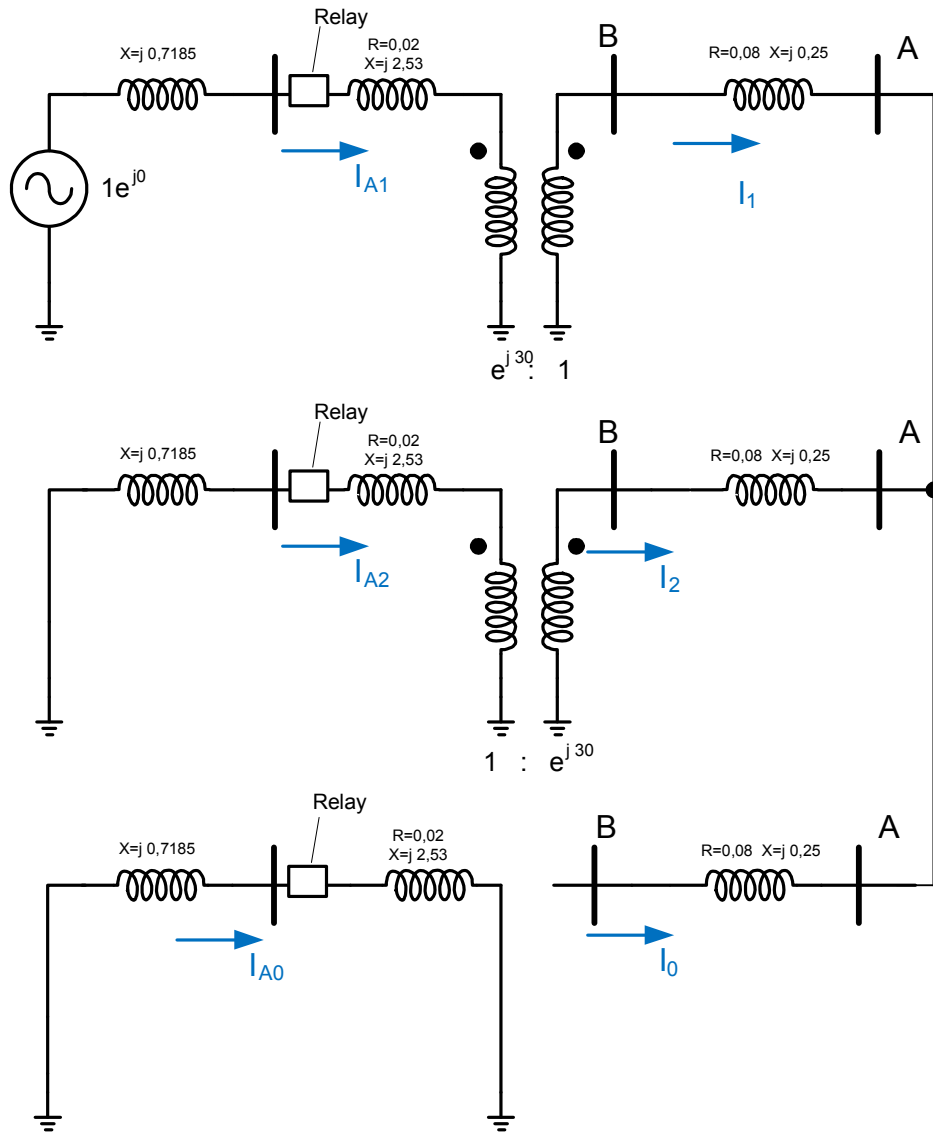
$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = 5.146 \times 10^7 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = -7.11 \times 10^5 \text{ V}^2$$

2. Διφασικό ως προς γη σφάλμα

Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu2}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left( \frac{-\pi}{6} \right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left( \frac{\pi}{6} \right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \left( \frac{-\pi}{6} \right)}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc_{0,0}} \quad I_b := I_{abc_{1,0}} \quad I_c := I_{abc_{2,0}} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} 0.126 - 0.068i \\ -0.251 + 0.136i \\ 0.126 - 0.068i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 239.073A$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu} \quad V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_2\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.951 - 0.09i \\ -0.402 - 0.685i \\ -0.549 + 0.776i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc_{0,0}} \quad V_b := V_{Relayabc_{1,0}} \quad V_c := V_{Relayabc_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad \text{MAB} = 13.46$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]} \quad \text{MBC} = 18.733$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}[V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}]}{\text{Re}[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}]} \quad \text{MCA} = -2.433 \times 10^{17}$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$



$$\max R := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu2}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 10.639$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \max R, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 11.04$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang}$$

$$\text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.026 \times 10^5 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

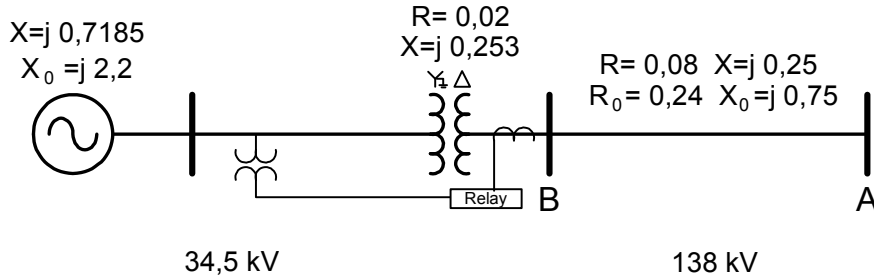
$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 2.098 \times 10^8 \text{V}^2$$

### 3 Διφασικό χωρίς γη σφάλμα

Η περίπτωση αυτή είναι ίδια με την προηγούμενη (διφασικό ως προς γη). Εκεί λόγω του τυλίγματος τριγώνου στην υψηλή τάση, η αντίσταση  $Z_0$  είναι άπειρη και έτσι η ροή των ρευμάτων ακολουθίας γινόταν στα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Το ίδιο γίνεται και στην περίπτωση αυτή, αφού εδώ έχουμε σύνδεση του κυκλώματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας σε σειρά.

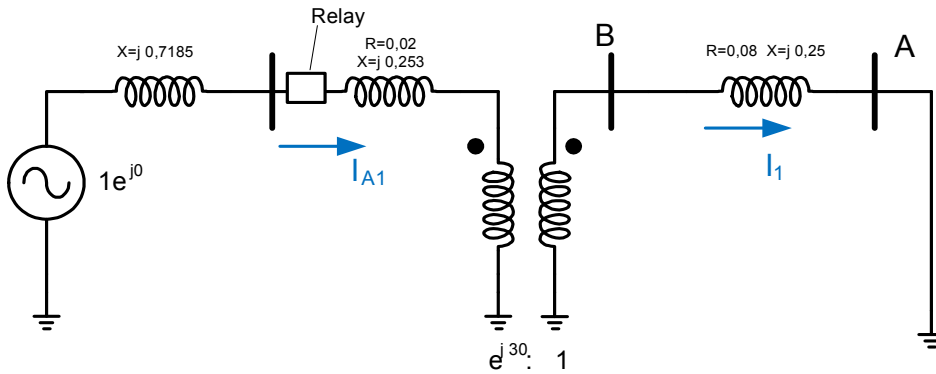
**Δ Μετασχηματιστής γειωμένου αστέρα -τριγώνου με το τύλιγμα τριγώνου στη υψηλή τάση. Οι μετασχηματιστές έντασης στην υψηλή τάση (παράγραφος 6.4.1)**

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



**1. Τριφασικό σφάλμα.**

α. Στο σημείο Α.



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}}{Z_1} \quad I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}_{0,0}} \quad I_b := I_{\text{abc}_{1,0}} \quad I_c := I_{\text{abc}_{2,0}} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} -0.349 - 0.738i \\ -0.464 + 0.671i \\ 0.813 + 0.067i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.365 \text{ kA} \quad \arg(I_a) = -115.32 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.416 - 0.048i \\ -0.249 - 0.336i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad MAB = 2.657$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad MBC = 2.657$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad MCA = 2.657$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 2.49$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = 1.038 \times 10^8 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -6.179 \times 10^5 \text{ V}^2$$

Με τους ΜΤ συνδεδεμένους σε σύνδεση τριγώνου - αστέρα για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{Relay1}} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{\text{Relay2}} := V_{\text{Relay2}} \cdot e^{j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.336 - 0.249i \\ -0.384 - 0.166i \\ 0.048 + 0.416i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{B1} := (e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a^2) \quad V_{C1} := e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad MAB = 1.993$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]} \quad MBC = 1.993$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot (\overline{V_{C1} - V_{A1}})\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (\overline{V_{C1} - V_{A1}})\right]} \quad MCA = 1.993$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.98$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

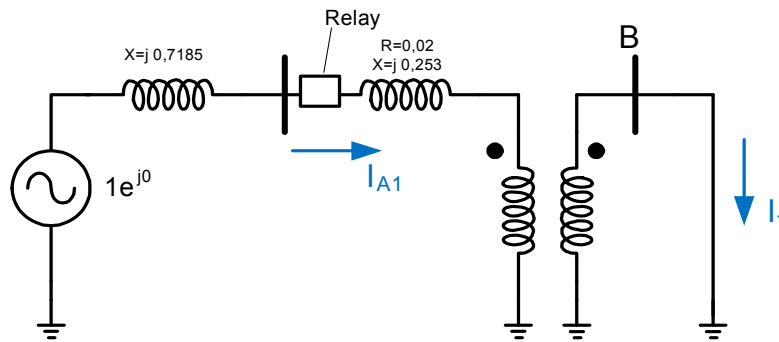
$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = 2.384 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = -9.893 \times 10^5 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}}{Z_1} \quad I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0} \quad I_b := I_{\text{abc}}_{1,0} \quad I_c := I_{\text{abc}}_{2,0} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} -0.496 - 0.902i \\ -0.533 + 0.88i \\ 1.029 + 0.021i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.722 \text{ kA} \quad \arg(I_a) = -118.821 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.261 - 0.015i \\ -0.144 - 0.218i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ab} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}}\right]} \quad MAB = 1.404$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{bc} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]} \quad MBC = 1.404$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 1.404$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(j \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(\left|Z_{L1\_pu}\right| + \left|Z_{MT\_pu}\right|\right)}{\left|Z_{L1\_pu}\right|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.36$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = 6.53 \times 10^7 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = -6.261 \times 10^5 \text{ V}^2$$

Με τους ΜΤ συνδεδεμένους σε σύνδεση τριγώνου - αστέρα για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{Relay1}} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{deg}} \quad V_{\text{Relay2}} := V_{\text{Relay2}} \cdot e^{j \cdot 30 \text{deg}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.218 - 0.144i \\ -0.233 - 0.117i \\ 0.015 + 0.261i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{-j \cdot 30 \text{deg}} \quad V_{B1} := (e^{-j \cdot 30 \text{deg}} \cdot a^2) \quad V_{C1} := e^{-j \cdot 30 \text{deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad \text{MAB} = 1.007$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]} \quad \text{MBC} = 1.007$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}[V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}]}{\text{Re}[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}]} \quad \text{MCA} = 1.007$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$



$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

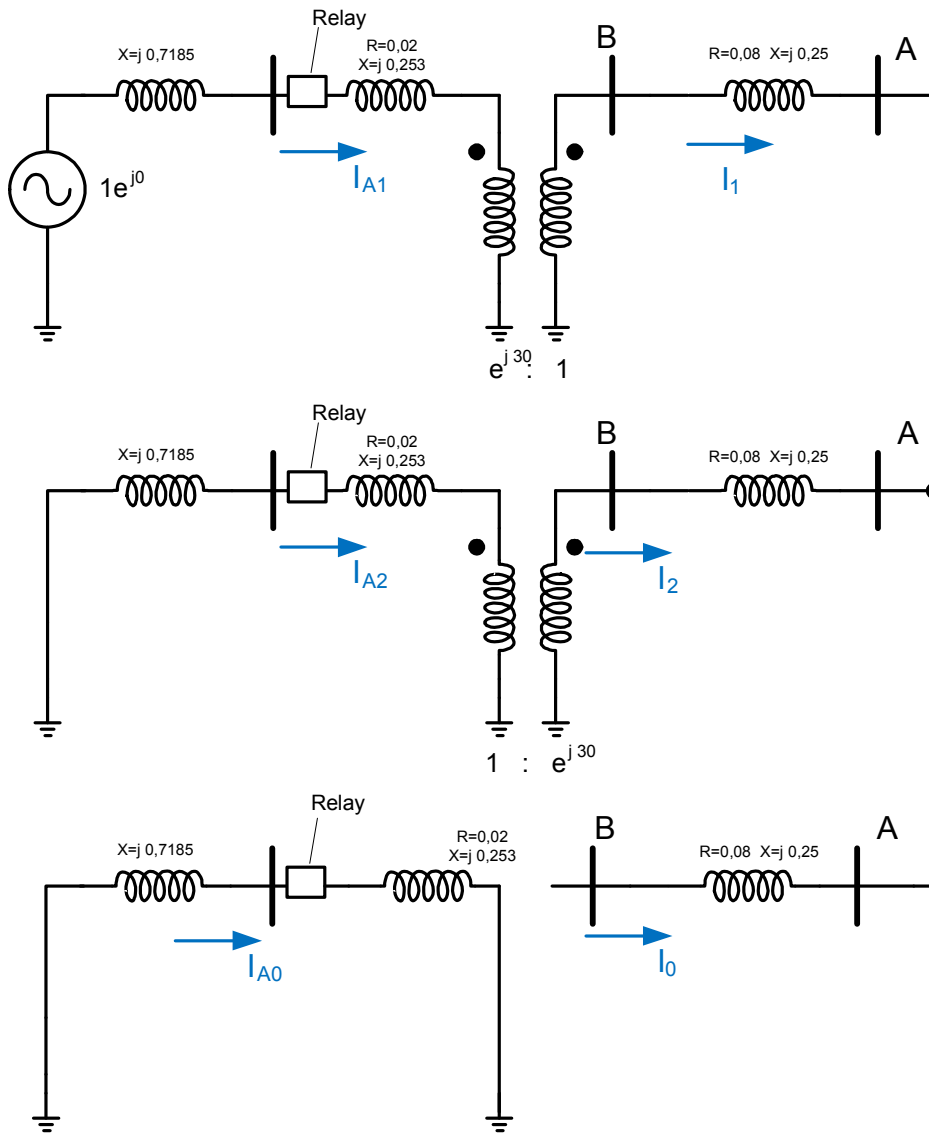
$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = 3.94 \times 10^6 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -2.44 \times 10^5 \text{V}^2$$

## 2. Διφασικό ως προς γη σφάλμα

Α. Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}} \quad Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left( \frac{-\pi}{6} \right)}}{Z_{\text{tot}}} \quad I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \left( \frac{\pi}{6} \right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc_{0,0}} \quad I_b := I_{abc_{1,0}} \quad I_c := I_{abc_{2,0}} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.639 + 0.302i \\ 0.639 - 0.302i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 0 \cdot kA$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu} \quad V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_d\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.875 - 0.265i \\ -0.249 - 0.336i \\ -0.625 + 0.601i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc_{0,0}} \quad V_b := V_{Relayabc_{1,0}} \quad V_c := V_{Relayabc_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad MAB = 5.686$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]} \quad MBC = 3.458$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}[V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}]}{\text{Re}[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}]} \quad MCA = -41.311$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 2.37$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -4.955 \times 10^5 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 4.186 \times 10^8 \text{ V}^2$$

Με τους MT συνδεδεμένους σε σύνδεση τριγώνου - αστέρα για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{Relay1} := V_{Relay1} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{Relay2} := V_{Relay2} \cdot e^{j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.866 - 0.5i \\ -0.649 - 0.041i \\ -0.217 + 0.541i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc}_{0,0} \quad V_b := V_{Relayabc}_{1,0} \quad V_c := V_{Relayabc}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{B1} := (e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a^2) \quad V_{C1} := e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad MAB = 11.962$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{bc} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}}\right]} \quad \boxed{MBC = 1.993}$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad \boxed{MCA = 26.711}$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$\boxed{r = 2}$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

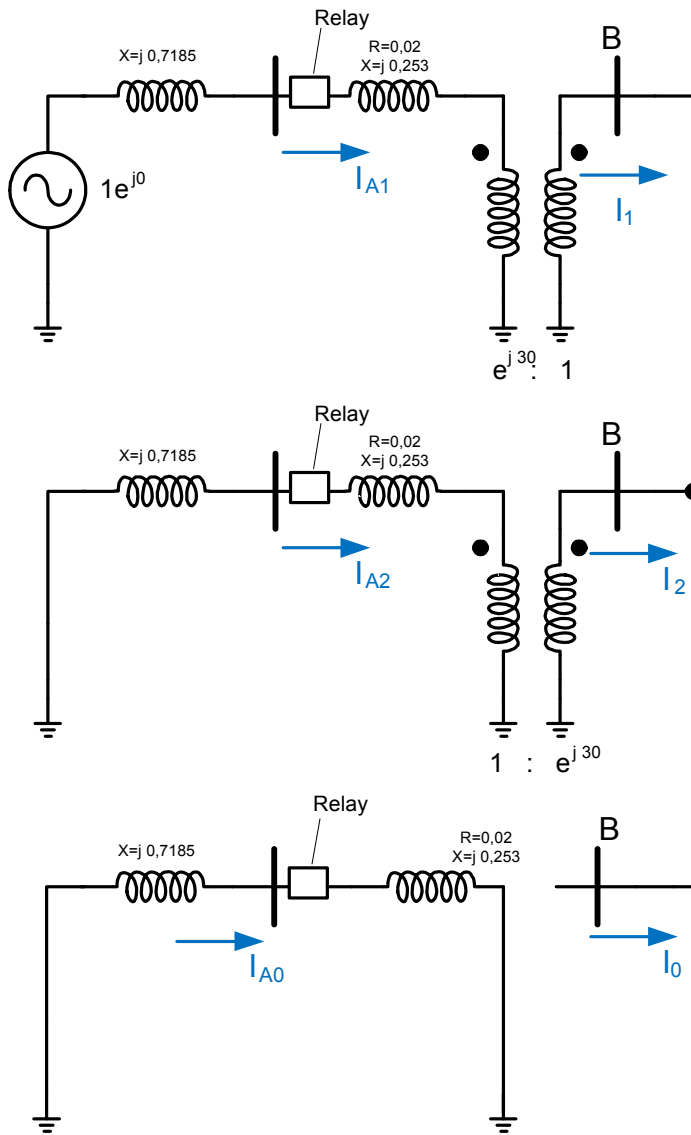
$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$\boxed{T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = -1.603 \times 10^6 \text{ V}^2}$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$\boxed{T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = 1.016 \times 10^9 \text{ V}^2}$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμών ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \left( \frac{-\pi}{6} \right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \left( \frac{\pi}{6} \right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{-\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0}$$

$$I_b := I_{\text{abc}}_{1,0}$$

$$I_c := I_{\text{abc}}_{2,0}$$

$$I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.781 + 0.43i \\ 0.781 - 0.43i \end{pmatrix}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.822 - 0.324i \\ -0.144 - 0.218i \\ -0.678 + 0.542i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}]} \quad MAB = 3.442$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}]} \quad MBC = 2.364$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}[V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}]}{\text{Re}[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}]} \quad MCA = -25.968$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.21$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -8.443 \times 10^5 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 3.54 \times 10^8 \text{ V}^2$$

Με τους ΜΤ συνδεδεμένους σε σύνδεση τριγώνου - αστέρα για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{Relay1}} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := V_{\text{Relay2}} \cdot e^{j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.866 - 0.5i \\ -0.557 + 0.061i \\ -0.309 + 0.439i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0}$$

$$V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0}$$

$$V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{B1} := (e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a^2) \quad V_{C1} := e^{-j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}$$

$$MAB = 8.379$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}$$

$$MBC = 1.007$$

$$I_{ca} := I_c - I_a$$

$$V_{ca} := V_c - V_a$$



$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 25.767$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.01$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = -7.972 \times 10^5 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

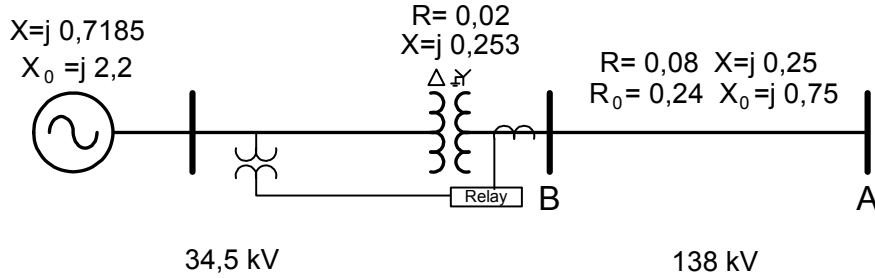
$$T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = 9.921 \times 10^8 \text{V}^2$$

### 3 Διφασικό χωρίς γη σφάλμα

Η περίπτωση αυτή είναι ίδια με την προηγούμενη (διφασικό ως προς γη). Εκεί λόγω του τυλίγματος τριγώνου στην υψηλή τάση, η αντίσταση  $Z_0$  είναι άπειρη και έτσι η ροή των ρευμάτων ακολουθίας γινόταν στα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Το ίδιο γίνεται και στην περίπτωση αυτή, αφού εδώ έχουμε σύνδεση του κυκλώματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας σε σειρά.

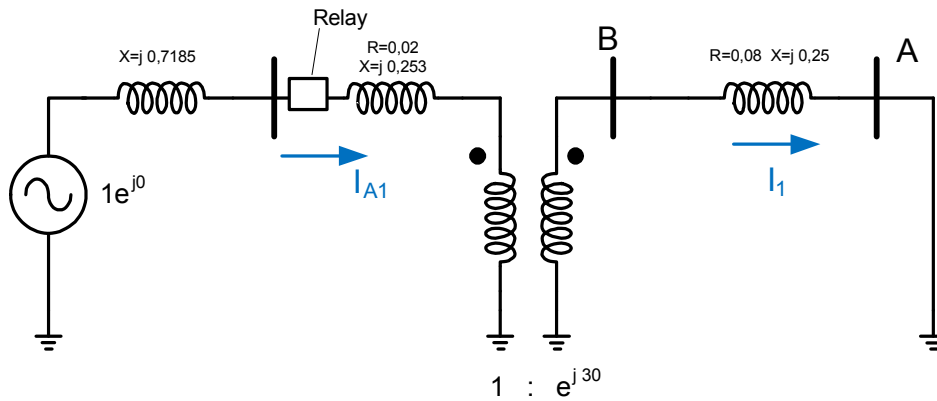
**Ε Μετασχηματιστής τριγώνου - γειωμένου αστέρα με το τύλιγμα αστέρα στη υψηλή τάση. Οι μετασχηματιστές έντασης στην υψηλή τάση (παράγραφος 6.4.2)**

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



**1. Τριφασικό σφάλμα**

α. Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_1}$$

$$I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}_{0,0}} \quad I_b := I_{\text{abc}_{1,0}} \quad I_c := I_{\text{abc}_{2,0}} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0.464 - 0.671i \\ -0.813 - 0.067i \\ 0.349 + 0.738i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.365 \text{ kA}$$

$$\arg(I_a) = -55.32 \text{ deg}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.416 - 0.048i \\ -0.249 - 0.336i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad MAB = 2.029$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad MBC = 2.029$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad MCA = 2.029$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{\text{cpre}}) \quad r = 2.11$$

$$Z_{1R} := r \cdot Z_{1\text{-ang}}$$

$$\arg(Z_{1R}) = 72.255\text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z_{1R} \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z_{1R} \cdot (I_{bc})$$

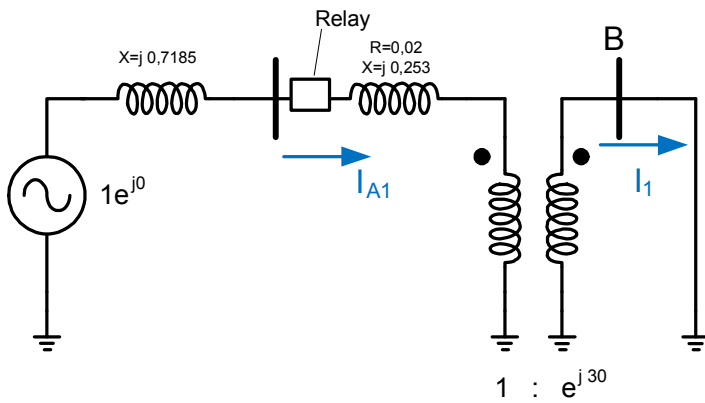
$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = 3.349 \times 10^7 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -8.495 \times 10^5 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_1}$$

$$I_2 := 0$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)}$$

$$I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}$$

$$I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$I_{abc} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc}_{0,0}$$

$$I_b := I_{abc}_{1,0}$$

$$I_c := I_{abc}_{2,0}$$

$$I_{abc} = \begin{pmatrix} 0.533 - 0.88i \\ -1.029 - 0.021i \\ 0.496 + 0.902i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 1.722 \text{ kA}$$

$$\arg(I_a) = -58.821\text{deg}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_2\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.261 - 0.015i \\ -0.144 - 0.218i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}} \right]} \quad MAB = 0.992$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]} \quad MBC = 0.992$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}} \right]} \quad MCA = 0.992$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.01$$

$$Z_{1R} := r \cdot Z_1 \cdot \text{ang}$$

$$\text{arg}(Z_{1R}) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z_{1R} \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z_{1R} \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = 6.392 \times 10^6 \text{ V}^2$$

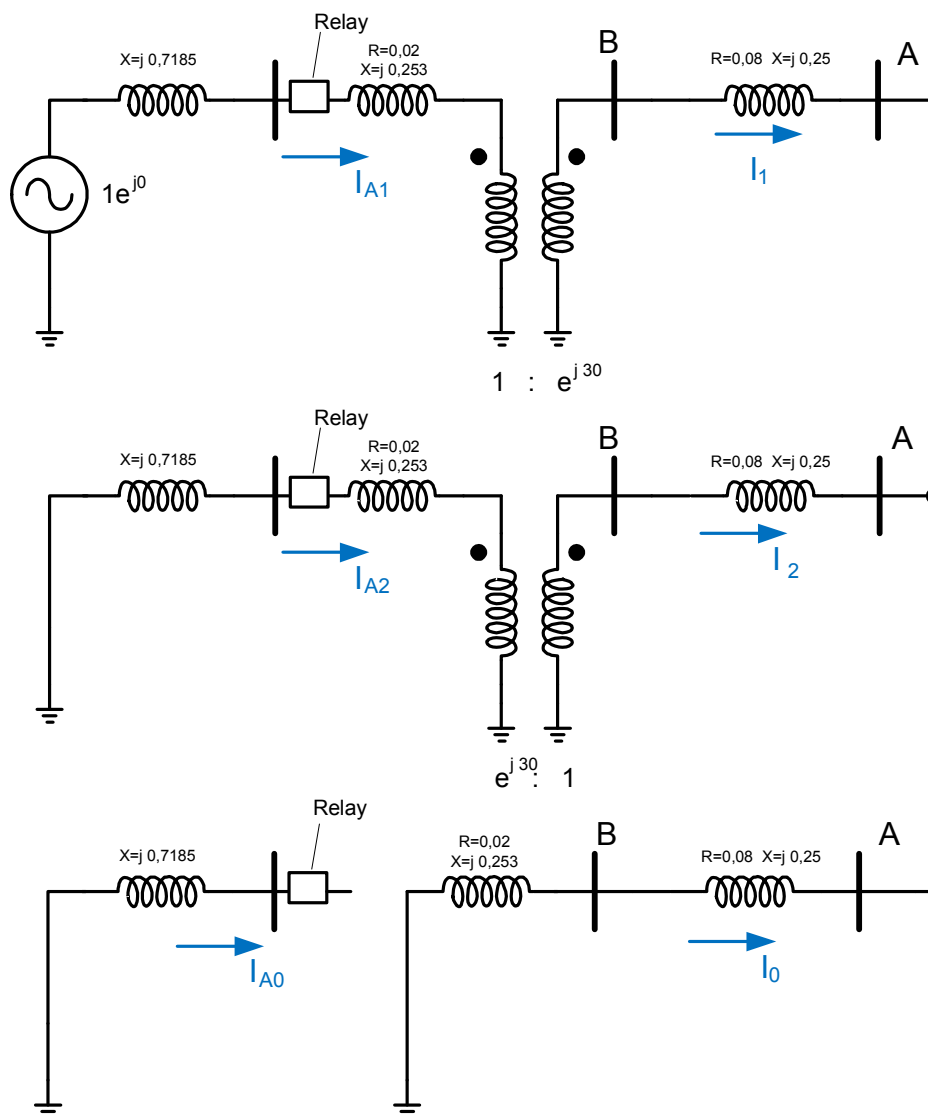
$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = -8.09 \times 10^5 \text{ V}^2$$

## 2. Διφασικό ως προς γη σφάλμα

α. Στο σημείο Α.



Υπολογισμός ρεύμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_0 := Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L0\_pu}}$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}} \quad I_2 := -I_1 \cdot \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \quad I_0 := -I_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0} \quad I_b := I_{\text{abc}}_{1,0} \quad I_c := I_{\text{abc}}_{2,0} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.88 - 0.057i \\ 0.282 + 0.747i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 0 \text{ kA}$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}} \quad V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.69 + 0.117i \\ -0.524 - 0.501i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{\text{ab}} := I_a - I_b \quad V_{\text{ab}} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{\text{ab}} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{\text{ab}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{A1} - V_{B1}} \right]} \quad \text{MAB} = 8.455$$

$$I_{\text{bc}} := I_b - I_c \quad V_{\text{bc}} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{\text{bc}} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]}{\text{Re} \left[ I_{\text{bc}} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{B1} - V_{C1}} \right]} \quad \text{MBC} = 2.494$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot (\overline{V_{C1} - V_{A1}})\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (\overline{V_{C1} - V_{A1}})\right]} \quad MCA = 4.22$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 2.35$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \operatorname{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.058 \times 10^4 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 6.405 \times 10^8 \text{ V}^2$$

Με τους MT συνδεδεμένους σε σύνδεση αστέρα - τριγώνου για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{Relay1} := V_{Relay1} \cdot e^{j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{Relay2} := V_{Relay2} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.701 + 0.357i \\ -0.206 - 0.511i \\ -0.494 + 0.154i \end{pmatrix}$$



$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{j \cdot 30 \text{deg}} \quad V_{B1} := (e^{j \cdot 30 \text{deg}} \cdot 2) \quad V_{C1} := e^{j \cdot 30 \text{deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad \text{MAB} = 5.416$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad \text{MBC} = 1.993$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad \text{MCA} = 7.279$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{\text{cpre}})$$

$$r = 1.99$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

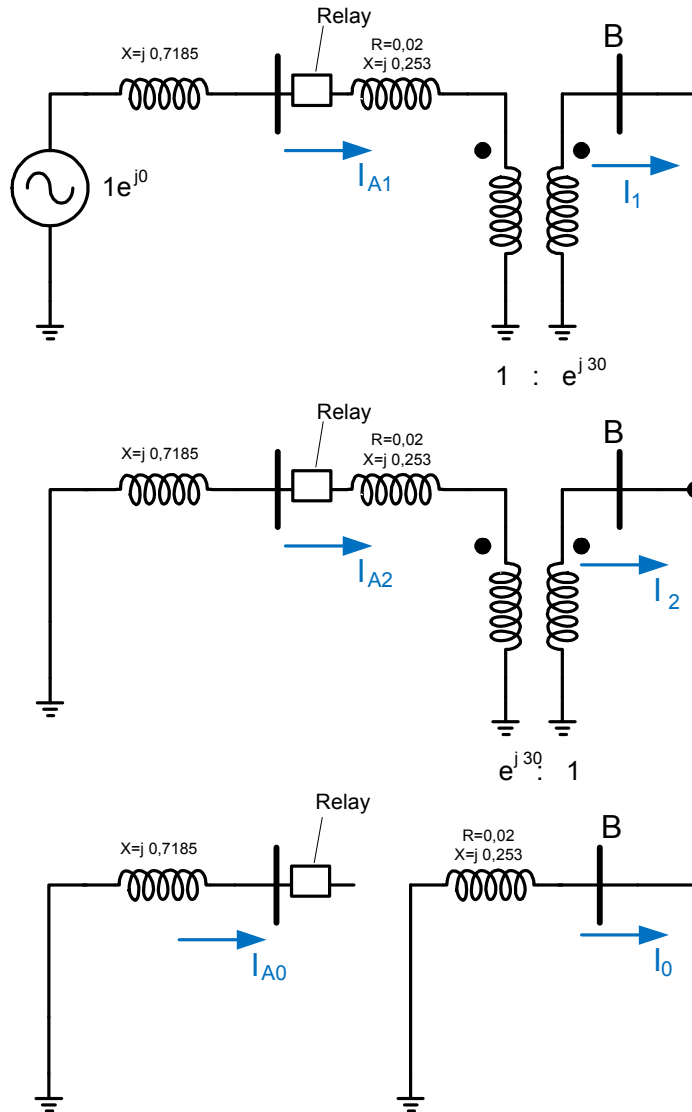
$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.678 \times 10^5 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 5.068 \times 10^8 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρεύμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_0 := Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L0\_pu}}$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}}$$

$$I_2 := -I_1 \cdot \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2}$$

$$I_0 := -I_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{abc} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{abc}_{0,0} \quad I_b := I_{abc}_{1,0} \quad I_c := I_{abc}_{2,0} \quad I_{abc} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1.083 - 0.083i \\ 0.442 + 0.84i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{base1}| = 0 \cdot kA$$

Υπολογισμός τάσεων

$$V_{Relay1} := V_{gen\_pu} - I_{A1} \cdot X_{gen\_d\_pu} \quad V_{Relay2} := -I_{A2} \cdot X_{gen\_d\_pu}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix} \quad V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.652 + 0.183i \\ -0.535 - 0.417i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc}_{0,0} \quad V_b := V_{Relayabc}_{1,0} \quad V_c := V_{Relayabc}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad \text{MAB} = 6.783$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad \text{MBC} = 1.429$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad \text{MCA} = 2.879$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\max R := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \max R, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.13$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -1.466 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 7.013 \times 10^8 \text{ V}^2$$

Με τους MT συνδεδεμένους σε σύνδεση αστέρα - τριγώνου για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{Relay1} := V_{Relay1} \cdot e^{j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{Relay2} := V_{Relay2} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{Relay012} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{Relay1} \\ V_{Relay2} \end{pmatrix}$$

$$V_{Relayabc} := A_1 \cdot V_{Relay012}$$

$$V_{Relayabc} = \begin{pmatrix} 0.685 + 0.346i \\ -0.241 - 0.375i \\ -0.444 + 0.029i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{Relayabc_{0,0}}$$

$$V_b := V_{Relayabc_{1,0}}$$

$$V_c := V_{Relayabc_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{j \cdot 30 \text{ deg}} \quad V_{B1} := (e^{j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a^2) \quad V_{C1} := e^{j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b$$

$$V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ab} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{A1} - V_{B1})}\right]} \quad \boxed{MAB = 3.983}$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{bc} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{B1} - V_{C1})}\right]} \quad \boxed{MBC = 1.007}$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{(V_{C1} - V_{A1})}\right]} \quad \boxed{MCA = 6.468}$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$\boxed{r = 1}$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

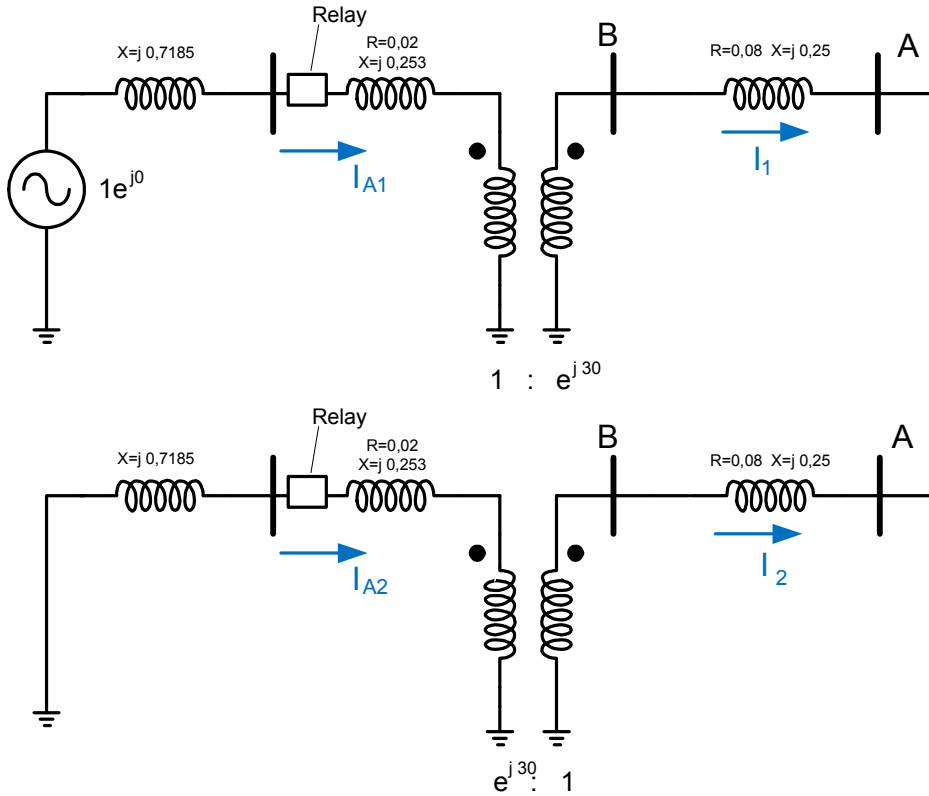
$$\boxed{T_{pp} := \operatorname{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.077 \times 10^5 \text{V}^2}$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$\boxed{T_{3p} := \operatorname{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 5.24 \times 10^8 \text{V}^2}$$

## 3. Διφασικό σφάλμα

α. Στο σημείο Α



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L1\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_0 := Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L0\_pu}}$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}} \quad I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}_{0,0}} \quad I_b := I_{\text{abc}_{1,0}} \quad I_c := I_{\text{abc}_{2,0}} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.581 - 0.402i \\ 0.581 + 0.402i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 0 \cdot \text{kA}$$

Υπολογισμος τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.833 + 0.241i \\ -0.667 - 0.625i \\ -0.166 + 0.384i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re} \left[ V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})} \right]} \quad \text{MAB} = 41.311$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re} \left[ V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})} \right]} \quad \text{MBC} = 2.843$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re} \left[ V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})} \right]}{\text{Re} \left[ I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})} \right]} \quad \text{MCA} = 6.916$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 2.24$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -3.908 \times 10^5 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 1.288 \times 10^9 \text{ V}^2$$

Με τους ΜΤ συνδεδεμένους σε σύνδεση αστέρα - τριγώνου για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{Relay1}} \cdot e^{j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := V_{\text{Relay2}} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.866 + 0.5i \\ -0.289 - 0.582i \\ -0.577 + 0.082i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}_{0,0}}$$

$$V_b := V_{\text{Relayabc}_{1,0}}$$

$$V_c := V_{\text{Relayabc}_{2,0}}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{j \cdot 30 \text{ deg}}$$

$$V_{B1} := (e^{j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a^2)$$

$$V_{C1} := e^{j \cdot 30 \text{ deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b$$

$$V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot (\overline{V_{A1} - V_{B1}})]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (\overline{V_{A1} - V_{B1}})]}$$

$$MAB = 11.962$$

$$I_{bc} := I_b - I_c$$

$$V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot (\overline{V_{B1} - V_{C1}})]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot (\overline{V_{B1} - V_{C1}})]}$$

$$MBC = 1.993$$

$$I_{ca} := I_c - I_a$$

$$V_{ca} := V_c - V_a$$



$$MCA := \frac{\operatorname{Re}\left[V_{ca} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]}{\operatorname{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \sqrt{V_{C1} - V_{A1}}\right]} \quad MCA = 26.711$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{\left(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|\right)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 2$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \arg(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

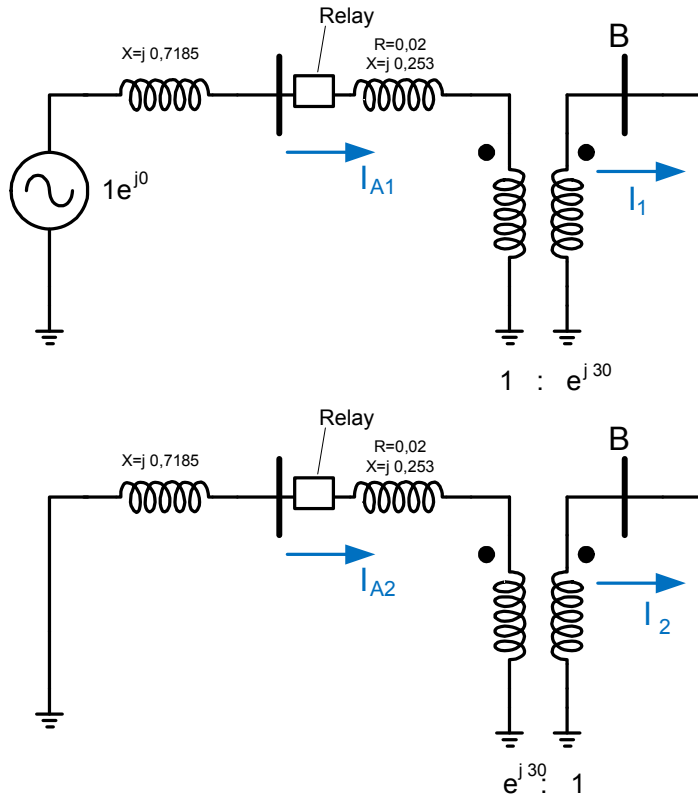
$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab}) \quad B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \operatorname{Im}\left(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}\right) = -1.603 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp} \quad B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \operatorname{Im}\left(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}\right) = 1.016 \times 10^9 \text{ V}^2$$

β. Στο σημείο Β.



Υπολογισμός ρευμάτων

$$Z_1 := X_{\text{gen\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_2 := Z_1$$

$$Z_0 := Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{\text{L0\_pu}}$$

$$Z_{\text{tot}} := Z_1 + Z_2$$

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen\_pu}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)}}{Z_{\text{tot}}} \quad I_2 := -I_1$$

$$I_{A1} := I_1 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{-\pi}{6}\right)} \quad I_{A2} := I_2 \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} \quad I_{012} := \begin{pmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad I_{\text{abc}} := A_1 \cdot I_{012}$$

$$I_a := I_{\text{abc}}_{0,0} \quad I_b := I_{\text{abc}}_{1,0} \quad I_c := I_{\text{abc}}_{2,0} \quad I_{\text{abc}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.763 - 0.461i \\ 0.763 + 0.461i \end{pmatrix}$$

$$|I_a \cdot I_{\text{base1}}| = 0 \cdot \text{kA}$$

Υπολογισμος τάσεων

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{gen\_pu}} - I_{A1} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := -I_{A2} \cdot X_{\text{gen\_d\_pu}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix} \quad V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.809 + 0.316i \\ -0.691 - 0.55i \\ -0.117 + 0.233i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0} \quad V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0} \quad V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := 1 \quad V_{B1} := a^2 \quad V_{C1} := a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}\left[V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}\right]}{\text{Re}\left[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}\right]} \quad \text{MAB} = 25.968$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}\left[V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}\right]}{\text{Re}\left[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}\right]} \quad \text{MBC} = 1.721$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}\left[V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}\right]}{\text{Re}\left[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}\right]} \quad \text{MCA} = 4.727$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{\text{base1}} = (0.952 + 2.976j) \Omega$$

$$\text{shift} := 0 \quad \text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg}) \quad \text{ang} = 1$$

$$\text{maxR} := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{\text{base1}}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{\text{base1}} \quad V_{\text{cpre}} := \frac{V_{\text{base1}}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \text{maxR}, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{\text{cpre}})$$

$$r = 1.13$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang} \quad \text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{ deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -1.819 \times 10^6 \text{ V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 1.303 \times 10^9 \text{ V}^2$$

Με τους ΜΤ συνδεδεμένους σε σύνδεση αστέρα - τριγώνου για την εξομοίωση του μετασχηματιστή έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$V_{\text{Relay1}} := V_{\text{Relay1}} \cdot e^{j \cdot 30 \text{deg}}$$

$$V_{\text{Relay2}} := V_{\text{Relay2}} \cdot e^{-j \cdot 30 \text{deg}}$$

$$V_{\text{Relay012}} := \begin{pmatrix} 0 \\ V_{\text{Relay1}} \\ V_{\text{Relay2}} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{Relayabc}} := A_1 \cdot V_{\text{Relay012}}$$

$$V_{\text{Relayabc}} = \begin{pmatrix} 0.866 + 0.5i \\ -0.332 - 0.452i \\ -0.535 - 0.048i \end{pmatrix}$$

$$V_a := V_{\text{Relayabc}}_{0,0}$$

$$V_b := V_{\text{Relayabc}}_{1,0}$$

$$V_c := V_{\text{Relayabc}}_{2,0}$$

Η τάση θετικής ακολουθίας των στοιχείων πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι:

$$V_{A1} := e^{j \cdot 30 \text{deg}} \quad V_{B1} := (e^{j \cdot 30 \text{deg}} \cdot a^2) \quad V_{C1} := e^{j \cdot 30 \text{deg}} \cdot a$$

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι:

$$I_{ab} := I_a - I_b \quad V_{ab} := V_a - V_b$$

$$MAB := \frac{\text{Re}[V_{ab} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}{\text{Re}[I_{ab} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{A1} - V_{B1})}]}$$

$$MAB = 8.379$$

$$I_{bc} := I_b - I_c \quad V_{bc} := (V_b - V_c)$$

$$MBC := \frac{\text{Re}[V_{bc} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}{\text{Re}[I_{bc} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{B1} - V_{C1})}]}$$

$$MBC = 1.007$$

$$I_{ca} := I_c - I_a \quad V_{ca} := V_c - V_a$$

$$MCA := \frac{\text{Re}[V_{ca} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}]}{\text{Re}[I_{ca} \cdot Z_{L1\_pu} \cdot \overline{(V_{C1} - V_{A1})}]}$$

$$MCA = 25.767$$

Η ρύθμιση για το compensator distance element είναι:

$$Z1 := Z_{L1\_pu} \cdot Z_{base1} = (0.952 + 2.976i) \Omega$$

$$\text{shift} := 0$$

$$\text{ang} := \exp(i \cdot \text{shift} \cdot \text{deg})$$

$$\text{ang} = 1$$

$$\max R := \frac{(|Z_{L1\_pu}| + |Z_{MT\_pu}|)}{|Z_{L1\_pu}|} = 1.967$$

$$V_{ab} := V_{ab} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} := I_{ab} \cdot I_{base1}$$

$$V_{bc} := V_{bc} \cdot \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \quad I_{bc} := I_{bc} \cdot I_{base1} \quad V_{cpre} := \frac{V_{base1}}{\sqrt{3}} \cdot V_{C1}$$

$$r := \text{find\_R}(Z1, \text{ang}, \max R, V_{ab}, I_{ab}, V_{bc}, I_{bc}, V_{cpre})$$

$$r = 1.01$$

$$Z1R := r \cdot Z1 \cdot \text{ang}$$

$$\text{arg}(Z1R) = 72.255 \text{deg}$$

$$A_{pp} := (V_{ab}) - Z1R \cdot (I_{ab})$$

$$B_{pp} := (V_{bc}) - Z1R \cdot (I_{bc})$$

$$T_{pp} := \text{Im}(A_{pp} \cdot \overline{B_{pp}}) = -7.972 \times 10^5 \text{V}^2$$

$$A_{3p} := A_{pp}$$

$$B_{3p} := -j \cdot (V_{ab}) - 0.25 \cdot V_{cpre}$$

$$T_{3p} := \text{Im}(A_{3p} \cdot \overline{B_{3p}}) = 9.921 \times 10^8 \text{V}^2$$

## Αναλυτική Επίλυση των Συστημάτων με Η/Ν Κατεύθυνσης του 6ου Κεφαλαίου παράγραφος (6.5)

### Ορισμοί

$$\begin{aligned} \text{VA} &:= \text{W} & \text{KVA} &:= 1000\text{W} & \text{MVA} &:= 1000\text{KVA} \\ \text{pu} &:= 1.0 & \text{MW} &:= \text{MVA} & \text{MVA}_r &:= \text{MVA} \end{aligned}$$

$$a := e^{\frac{2\pi i}{3}} \quad A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad a = -0.5 + 0.866i \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

### Δεδομένα

$$\begin{aligned} X_{\text{gen1\_d\_pu}} &:= 0.7185 & X_{\text{gen1\_2\_pu}} &:= X_{\text{gen1\_d\_pu}} & X_{\text{gen1\_0\_pu}} &:= 2.2 \\ Z_{\text{MT\_pu}} &:= 0.02 + i \cdot 0.25j & Z_{\text{L1\_1\_pu}} &:= 0.00125 + 0.01581j & Z_{\text{L1\_2\_pu}} &:= Z_{\text{L1\_1\_pu}} \\ Z_{\text{L1\_0\_pu}} &:= 0 + 0.75j & Z_{\text{L2\_1\_pu}} &:= 0.2 + 0.6j & Z_{\text{L2\_2\_pu}} &:= Z_{\text{L2\_1\_pu}} \\ Z_{\text{L2\_0\_pu}} &:= 0.6 + 2j & X_{\text{gen2\_d\_pu}} &:= 0.1j & X_{\text{gen2\_2\_pu}} &:= X_{\text{gen2\_d\_pu}} \\ X_{\text{gen2\_0\_pu}} &:= 0.3j \end{aligned}$$

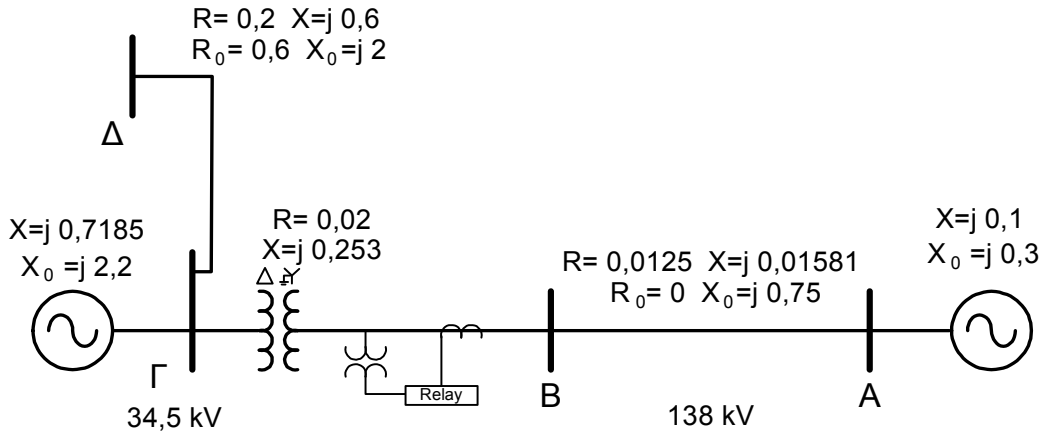
### Υπολογισμός Βασικών Τιμών

$$\begin{aligned} V_{\text{base1}} &:= 34.5\text{kV} & V_{\text{base2}} &:= 138\text{kV} & V_{\text{gen1\_pu}} &:= 1\text{pu} & V_{\text{gen2\_pu}} &:= 1\text{pu} \\ S_{\text{base}} &:= 100\text{MVA} & Z_{\text{base2}} &:= \frac{(V_{\text{base2}})^2}{S_{\text{base}}} & Z_{\text{base1}} &:= \frac{(V_{\text{base1}})^2}{S_{\text{base}}} & I_{\text{base1}} &:= \frac{S_{\text{base}}}{(\sqrt{3} \cdot V_{\text{base1}})} \end{aligned}$$

$$Z_{\text{base2}} = 190.44\Omega$$

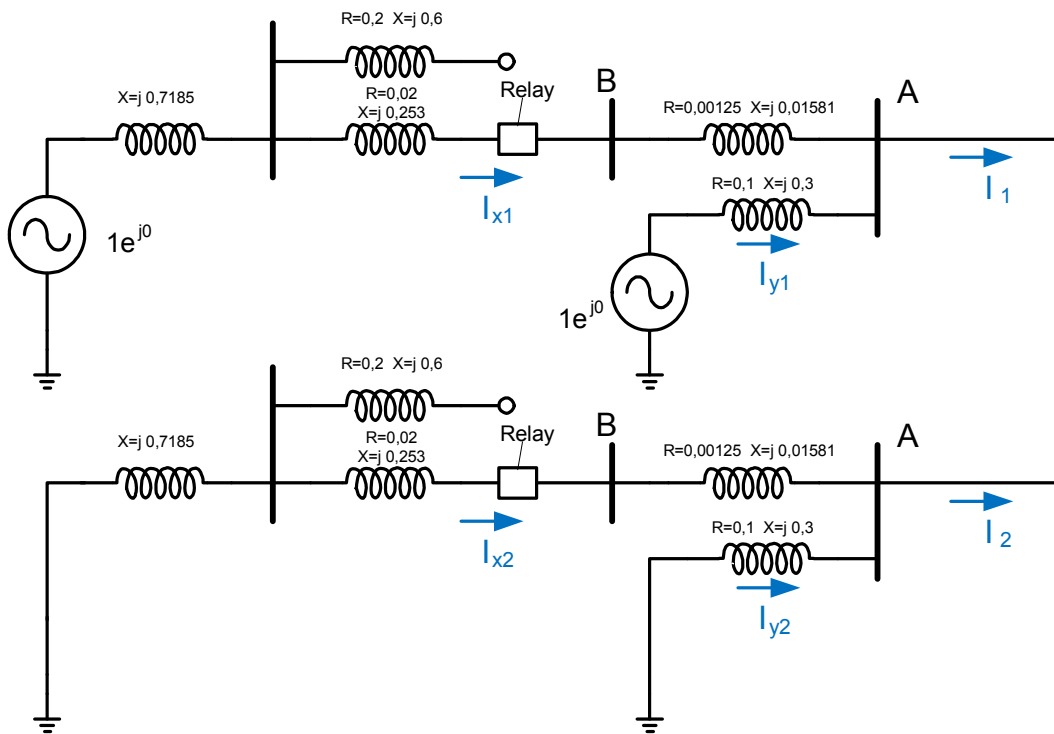
**Α Μετασχηματιστής τριγώνου - γειωμένου αστέρα με το τύλιγμα αστέρα στην υψηλή τάση.**  
**Οι ΜΤ και ΜΕ στην πλευρά υψηλής τάσης.**

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



**1. Σφάλματα στο σημείο Α**

α. Διφασικό σφάλμα.



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{\text{gen1\_2\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}} + Z_{L1\_2\_pu} \quad Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{\text{gen2\_2\_pu}} \quad Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρεύματων βραχυκυκλώσης

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2} \quad I_2 := -I_1$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

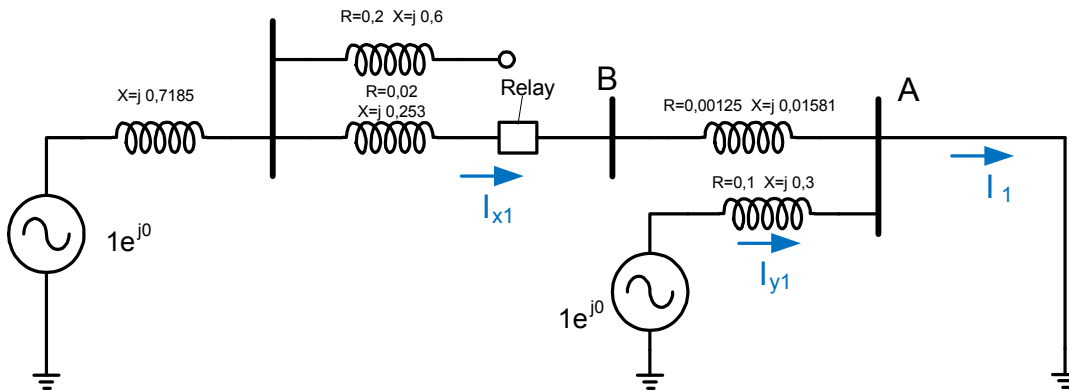
$$V_2 := -I_{x2}(X_{\text{gen1\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}})$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re}[V_2[I_{x2}(\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu})))]]}{(|I_{x2}|)^2} \quad Z_2 = -0.97$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα.



Υπολογισμός ρεύματος

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{x1}(X_{\text{gen1\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}})$$

Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

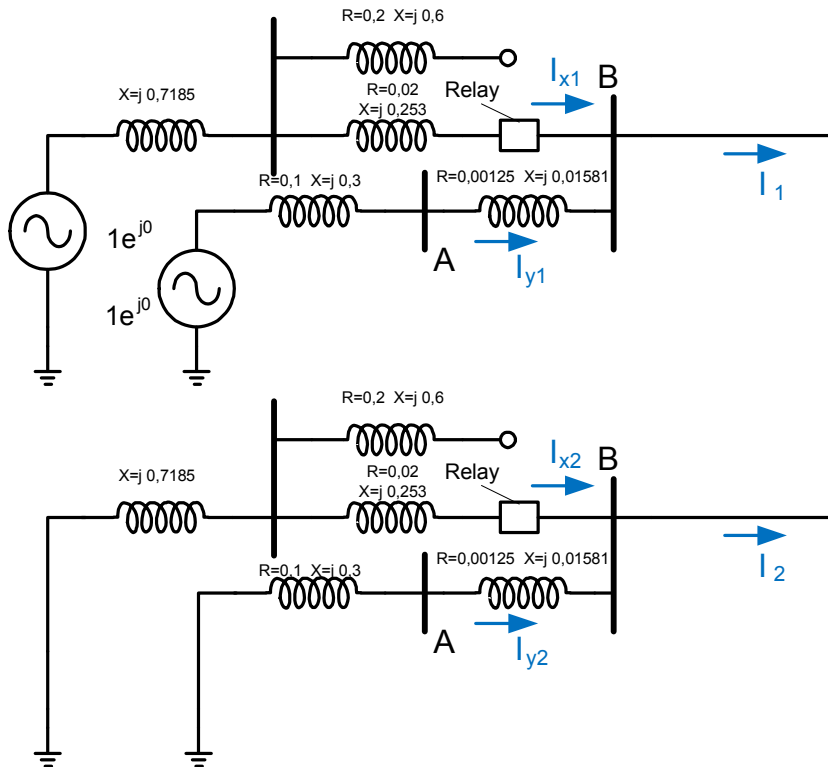
$$T_{32P} := |3V_1| \cdot |3I_{x1}| \cdot \cos[\arg(V_1) - (\arg(I_{x1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))] \quad T_{32P} = 0.146$$

Επειδή η παραπάνω ροπή είναι θετική, το στοιχείο ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς.



## 2. Σφάλματα στο σημείο Β

α. Διφασικό σφάλμα.



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{\text{gen1\_2\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{\text{gen2\_2\_pu}} + Z_{\text{L1\_2\_pu}}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2} Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_2 := -I_{x2} (X_{\text{gen1\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}})$$

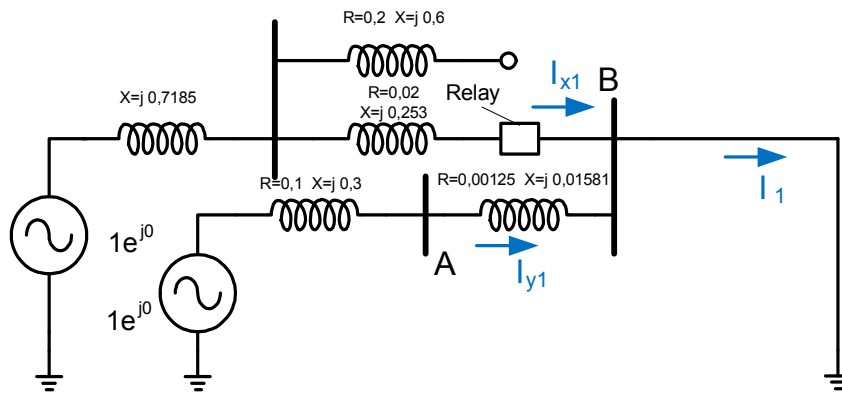
Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re} \left[ V_2 \cdot \left[ I_{x2} \left( \cos(\arg(Z_{\text{L1\_2\_pu}})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{\text{L1\_2\_pu}})) \right) \right] \right]}{\left( |I_{x2}| \right)^2}$$

$$Z_2 = -0.97$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{x1}(X_{\text{gen1\_d\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}})$$

Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T32P := |3V_1| \cdot |3I_{x1}| \cdot \cos[\arg(V_1) - (\arg(I_{x1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))] \quad T32P = 3.08 \times 10^{-15}$$

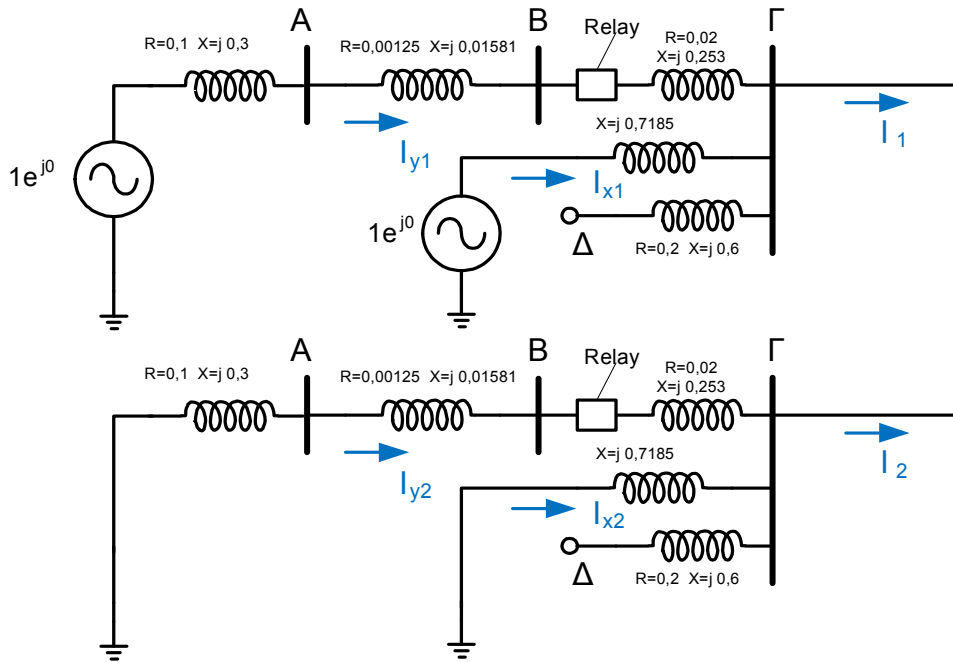
Επειδή η παραπάνω ροπή είναι θετική, το στοιχείο ορίζει το σφάλμα ως ορθής φοράς. Όμως επειδή είναι πολύ μικρής τιμής χρησιμοποιούμε τάση μνήμης θετικής ακολουθίας

$$T32P := |3V_{\text{gen1\_pu}}| \cdot |3I_{x1}| \cdot \cos[\arg(V_{\text{gen1\_pu}}) - (\arg(I_{x1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))] \quad T32P = 9.246$$

Θετική άρα το σφάλμα ορίζεται ως ορθής φοράς.

**3. Σφάλματα στο σημείο Γ**

α. Διφασικό σφάλμα.



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{gen1\_2\_pu}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{gen2\_2\_pu} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρεύματων βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{y2} := I_2 \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_2 := -I_{y2} \cdot (X_{gen2\_d\_pu} + Z_{L1\_2\_pu})$$

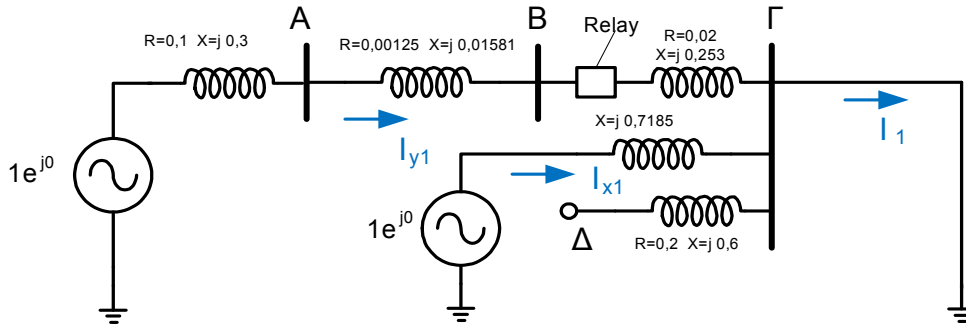
Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re}[V_2 \cdot [-I_{y2} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu})))]]}{(|I_{y2}|)^2}$$

$$Z_2 = 0.116$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1} \quad I_{y1} := I_1 \cdot \frac{Z_{x1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{gen1\_pu} - I_{y1} \cdot (X_{gen2\_d\_pu} + Z_{L1\_1\_pu})$$

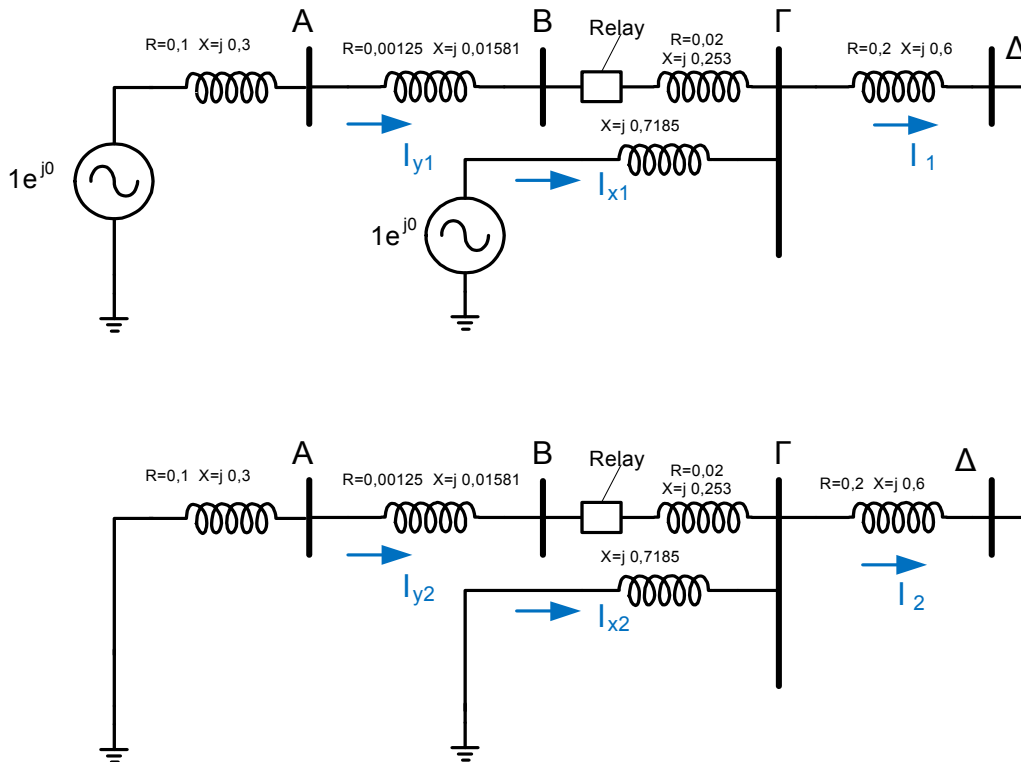
Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T32P := |3V_1| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos[\arg(V_1) - (\arg(-I_{y1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))] \quad T32P = -16.737$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

#### 4. Σφάλματα στο σημείο Δ

α. Διφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$\begin{aligned} Z_{x2} &:= X_{\text{gen1\_2\_pu}} & Z_{x1} &:= Z_{x2} \\ Z_{y2} &:= X_{\text{gen2\_2\_pu}} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu} & Z_{y1} &:= Z_{y2} \\ Z_2 &:= \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} + Z_{L2\_2\_pu} & Z_1 &:= Z_2 \end{aligned}$$

Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης

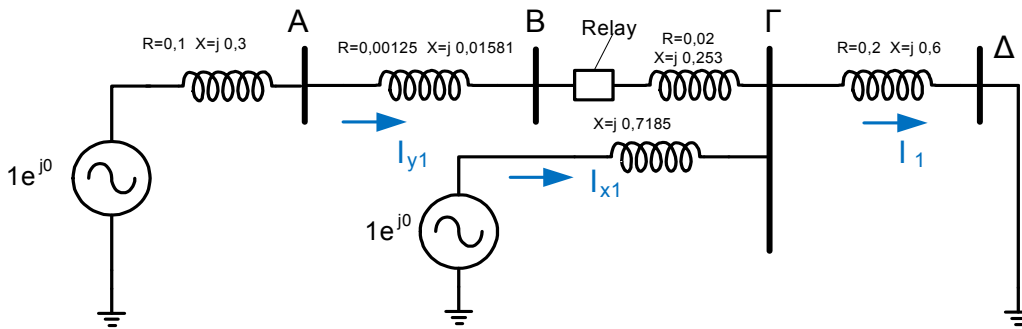
$$\begin{aligned} I_1 &:= \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2} & I_2 &:= -I_1 \\ I_{y2} &:= I_2 \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} & I_{x1} &:= I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} & V_2 &:= -I_{y2} \cdot (X_{\text{gen2\_d\_pu}} + Z_{L1\_2\_pu}) \end{aligned}$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re}[V_2 \cdot [-I_{y2} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu})))]]}{(|I_{y2}|)^2} \quad Z_2 = 0.105$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης

$$\begin{aligned} I_1 &:= \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} & I_{y1} &:= I_1 \cdot \frac{Z_{x1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} & V_1 &:= V_{\text{gen1\_pu}} - I_{y1} \cdot (X_{\text{gen2\_d\_pu}} + Z_{L1\_1\_pu}) \end{aligned}$$

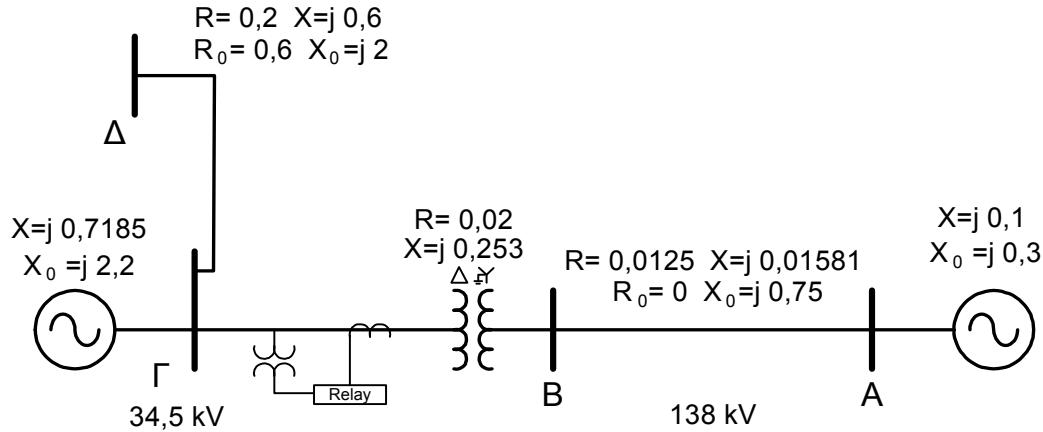
Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T_{32P} := |3V_1| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos[\arg(V_1) - (\arg(-I_{y1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))] \quad T_{32P} = -6.123$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

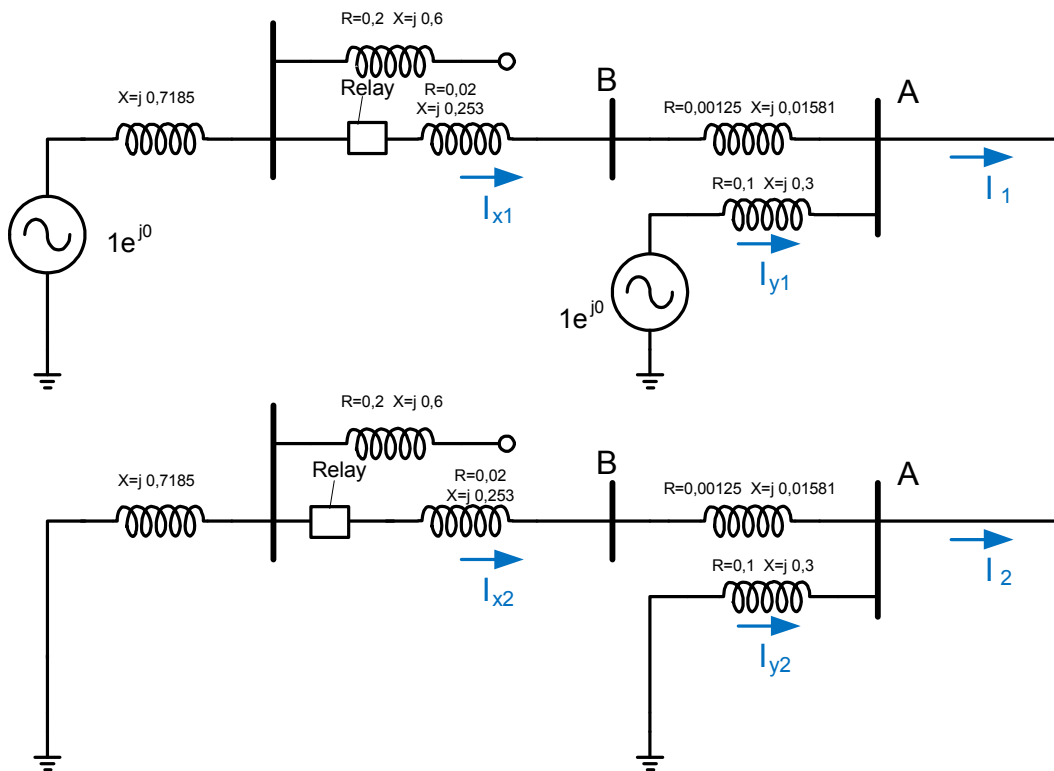
### Β Μετασχηματιστής τριγώνου - γειωμένου αστέρα με το τύλιγμα αστέρα στην υψηλή τάση Οι ΜΤ και ΜΕ στην πλευρά χαμηλής τάσης

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



#### 1. Σφάλματα στο σημείο Α

α. Διφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{gen1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu} + Z_{L1\_2\_pu}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{gen2\_2\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2} Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2} \quad I_2 := -I_1$$

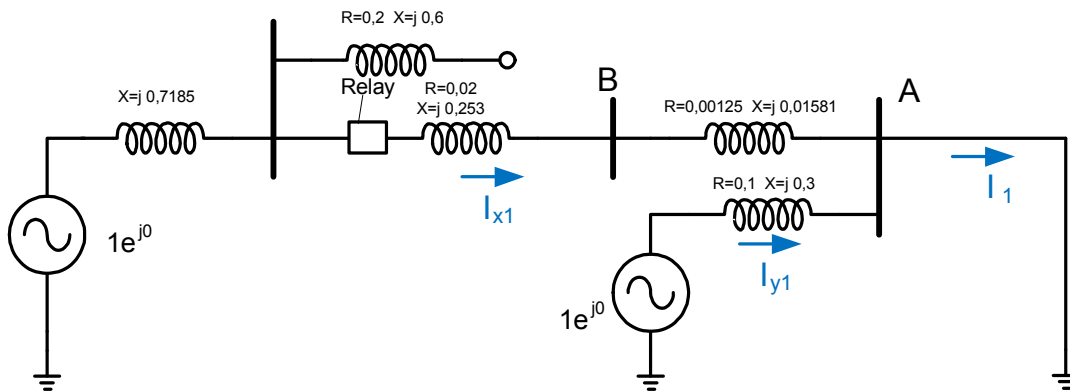
$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_2 := -I_{x2} (X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re} \left[ V_2 \cdot \left[ I_{x2} \left( \cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) \right) \right] \right]}{\left( |I_{x2}| \right)^2} \quad Z_2 = -0.73$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

β. Τριφασικός σφάλμα.



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{x1} (X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

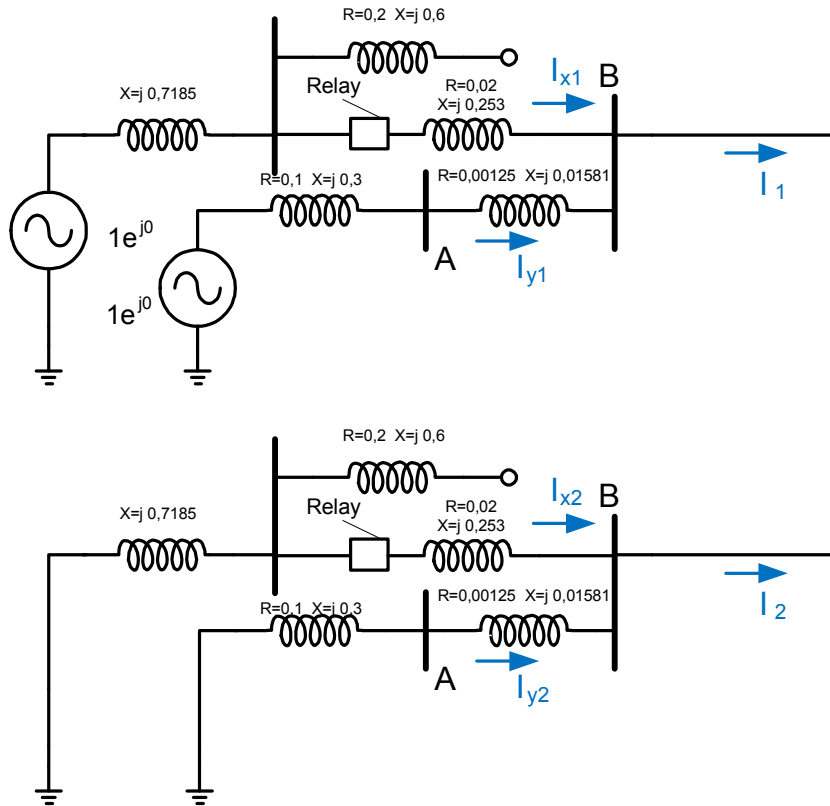
Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T32P := \left| 3V_1 \right| \cdot \left| 3I_{x1} \right| \cdot \cos \left[ \arg(V_1) - \left( \arg(I_{x1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}) \right) \right] \quad T32P = 2.488$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

## 2. Σφάλματα στο σημείο Β

α. Διφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{\text{gen1\_2\_pu}} + Z_{\text{MT\_pu}}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{\text{gen2\_2\_pu}} + Z_{\text{L1\_2\_pu}}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2} Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_2 := -I_{x2} (X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

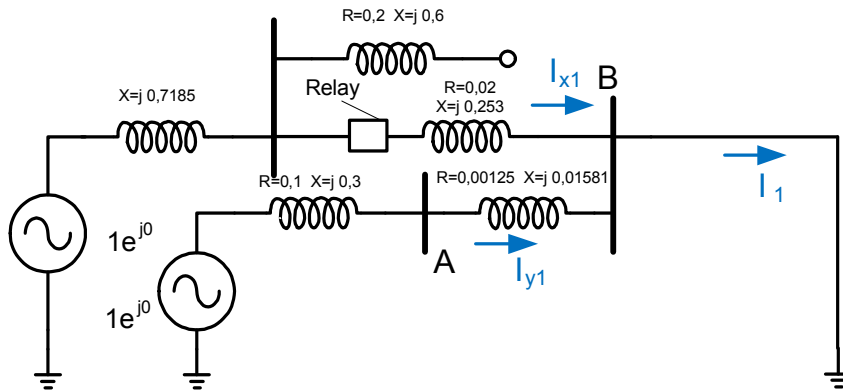
$$Z_2 := \frac{\text{Re} \left[ V_2 \cdot \left[ I_{x2} \left( \cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) \right) \right] \right]}{\left( |I_{x2}| \right)^2}$$

$$Z_2 = -0.718$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.



β. Διφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{gen1\_pu} - I_{x1}(X_{gen1\_d\_pu})$$

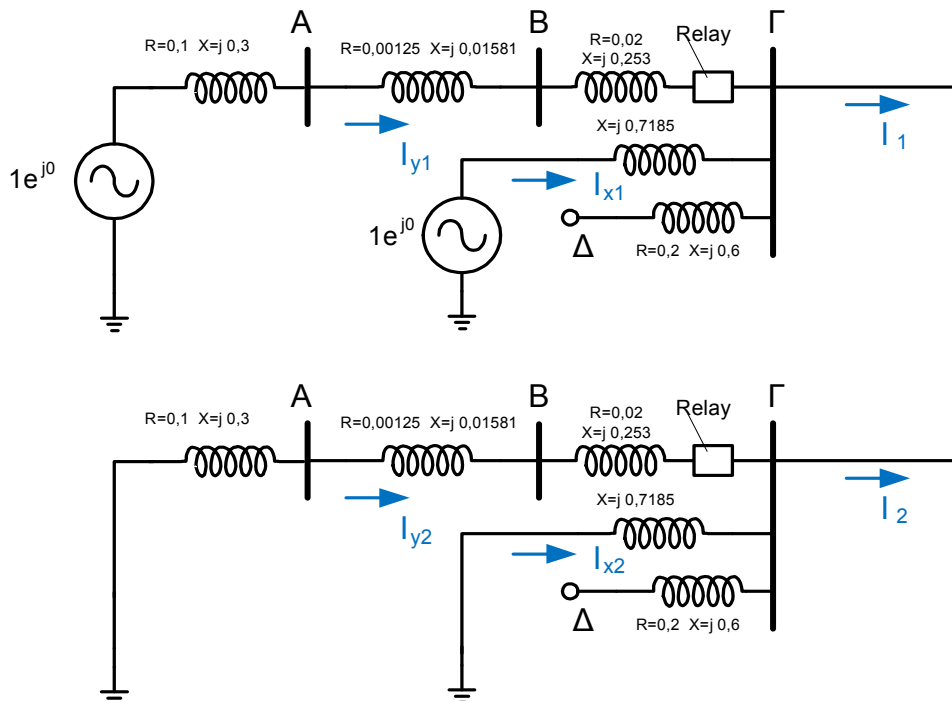
Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T32P := |3V_1| \cdot |3I_{x1}| \cdot \cos[\arg(V_1) - (\arg(I_{x1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))] \quad T32P = 2.419$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

### 3. Σφάλματα στο σημείο Γ

α. Διφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{\text{gen1\_2\_pu}}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{\text{gen2\_2\_pu}} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{y2} := I_2 \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$V_2 := -I_{x2}(X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

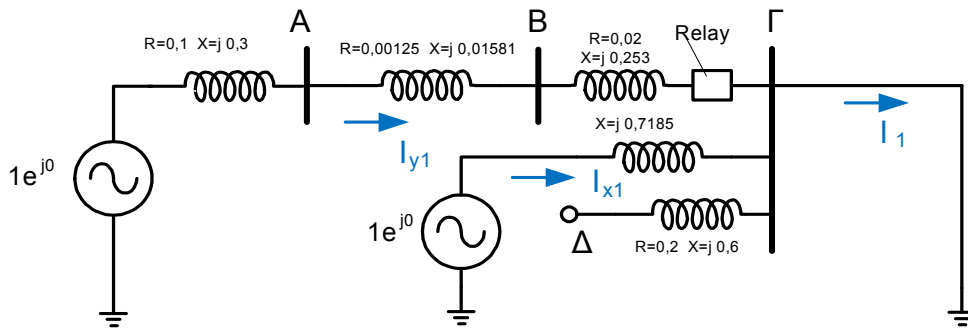
Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re}[V_2 \cdot [-I_{y2} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu})))]]}{(|I_{y2}|)^2}$$

$$Z_2 = 0.369$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1}$$

$$I_{y1} := I_1 \cdot \frac{Z_{x1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{y1} \cdot (X_{\text{gen2\_d\_pu}} + Z_{L1\_1\_pu} + Z_{MT\_pu})$$

Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T_{32P} := |3V_1| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos[\arg(V_1) - (\arg(-I_{y1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))]$$

$$T_{32P} = 0$$

Επειδή η παραπάνω ροπή είναι μηδενική, το στοιχείο δεν ορίζει καθορίζει την κατεύθυνση του σφάλματος. Γι αυτό χρησιμοποιούμε τάση μνήμης θετικής ακολουθίας

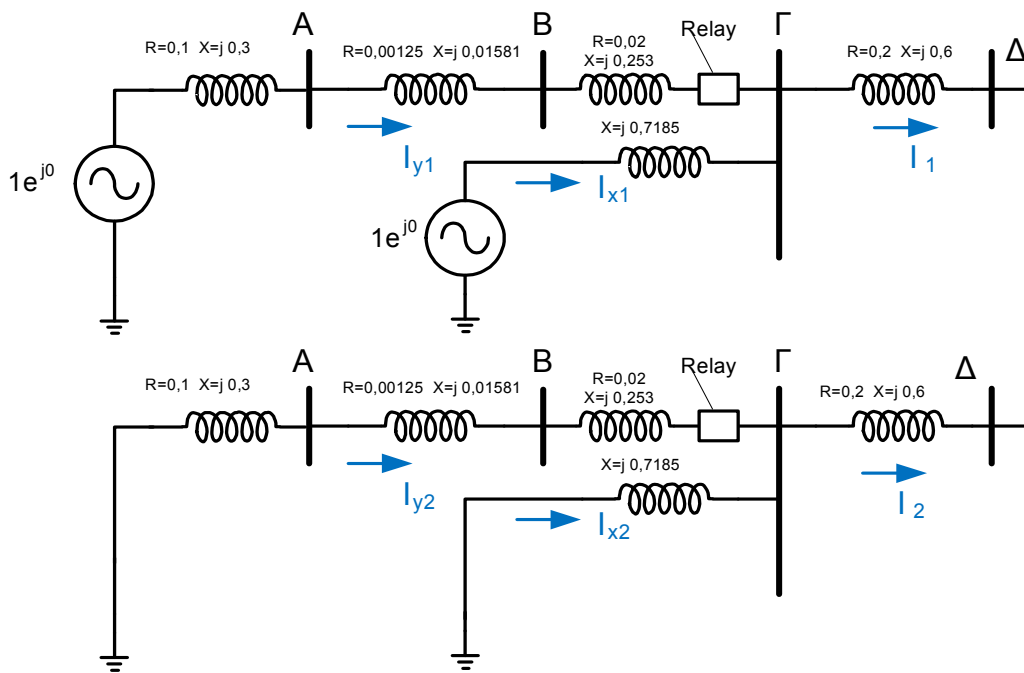
$$T32P := |3V_{gen1\_pu}| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos[\arg(V_{gen1\_pu}) - (\arg(-I_{y1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu}))]$$

$$T32P = -24.357$$

Αρνητική άρα το σφάλμα ορίζεται ως αντίστροφης φοράς.

#### 4. Σφάλματα στο σημείο Δ

α. Διαραστικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{gen1\_2\_pu}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{gen2\_2\_pu} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} + Z_{L2\_2\_pu}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{y2} := I_2 \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

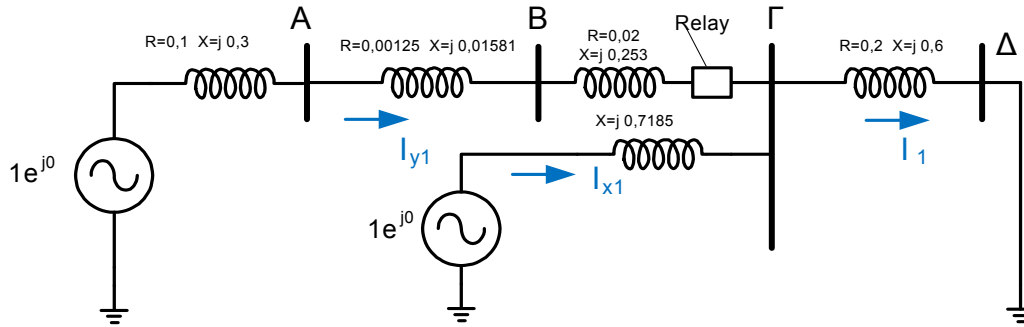
$$V_2 := -I_{y2} \cdot (X_{gen2\_d\_pu} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu})$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $Z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\operatorname{Re}\left[V_2 \cdot \left[-I_{y2} \cdot \left(\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu}))\right)\right]\right]}{\left(|I_{y2}|\right)^2} \quad Z_2 = 0.342$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρεύματος

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1} \quad I_{y1} := I_1 \cdot \frac{Z_{x1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_1 := V_{gen1\_pu} - I_{y1} \cdot (X_{gen2\_d\_pu} + Z_{L1\_1\_pu} + Z_{MT\Gamma\_pu})$$

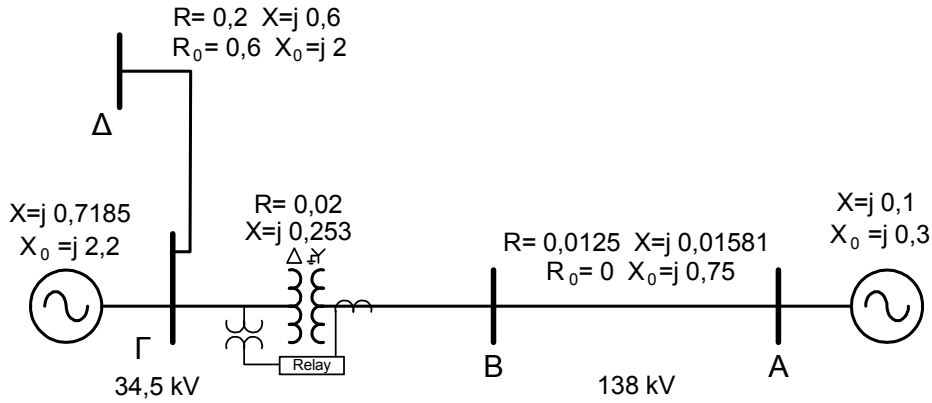
Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T_{32P} := \left| 3V_1 \right| \cdot \left| 3I_{y1} \right| \cdot \cos\left[\arg(V_1) - \left(\arg(-I_{y1}) + \arg(Z_{L1\_1\_pu})\right)\right] \quad T_{32P} = -4.804$$

Αρνητική άρα το σφάλμα ορίζεται ως αντίστροφης φοράς.

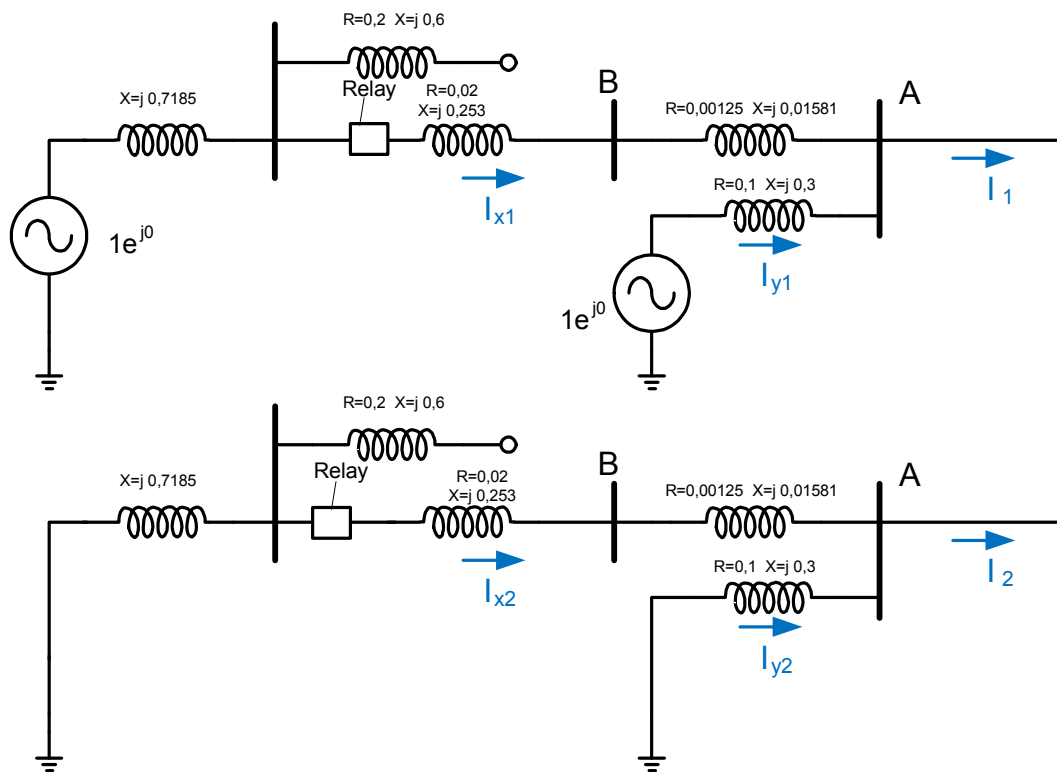
**Γ Μετασχηματιστής τριγώνου - γειωμένου αστέρα με το τύλιγμα αστέρα στην υψηλή τάση. Οι ΜΤ στην πλευρά γαμμηλής και οι ΜΕ στην πλευρά υψηλής τάσης.**

Το κύκλωμα για τους υπολογισμούς φαίνεται παρακάτω



**1. Σφάλματα στο σημείο Α**

α. Διαφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{gen1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu} + Z_{L1\_2\_pu}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{gen2\_2\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2} \quad I_2 := -I_1$$

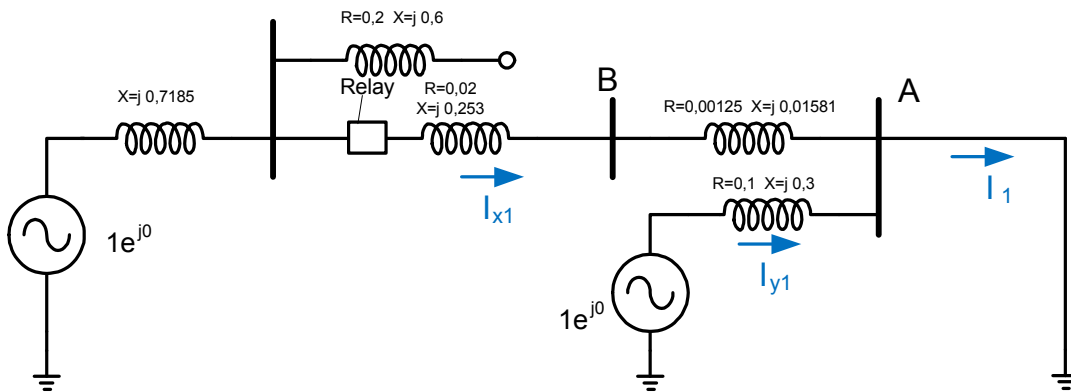
$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_2 := -I_{x2}(X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re} \left[ V_2 \cdot I_{x2} e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu}))) \right]}{(|I_{x2}|)^2} \quad Z_2 = -0.609$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{x1}(X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

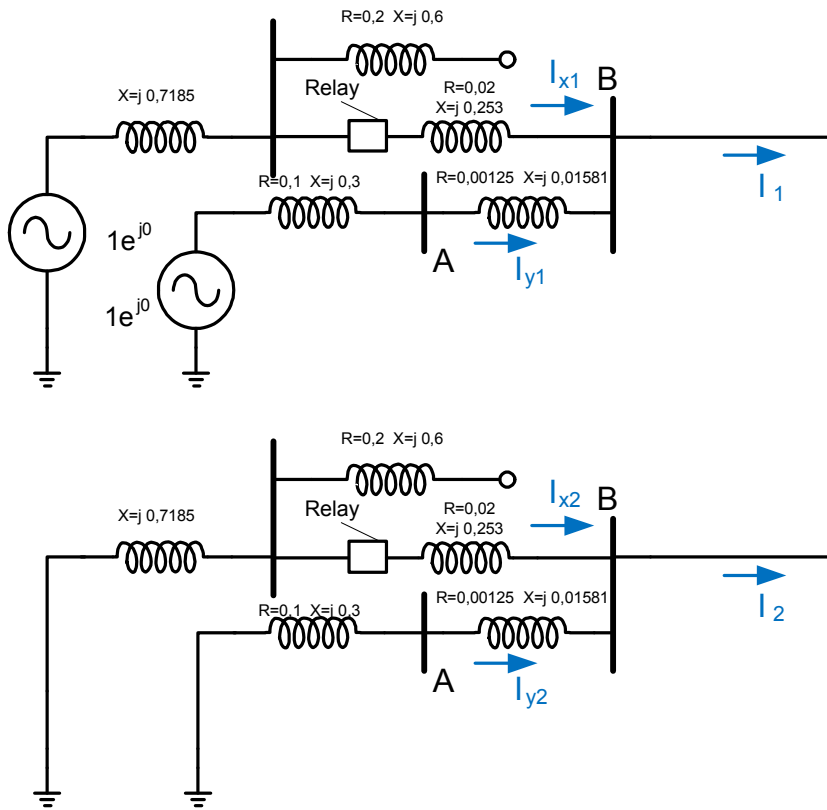
Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T32P := |3V_1| \cdot |3I_{x1}| \cdot \cos \left[ \arg(V_1) - \left( \arg(I_{x1}) + \frac{\pi}{6} + \arg(Z_{L1\_1\_pu}) \right) \right] \quad T32P = 2.155$$

Θετική άρα το σφάλμα ορίζεται ως ορθής φοράς.

**2. Σφάλματα στο σημείο Β**

α. Διφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{gen1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{gen2\_2\_pu} + Z_{L1\_2\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2} Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

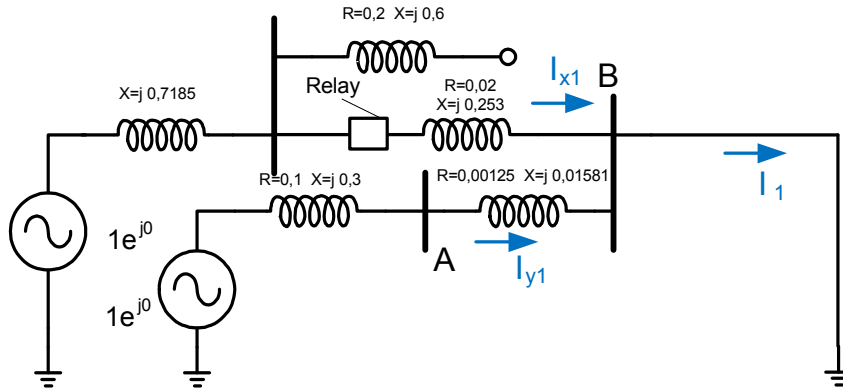
$$V_2 := -I_{x2} (X_{gen1\_d\_pu})$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\operatorname{Re} \left[ V_2 \cdot I_{x2} e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu}))) \right]}{(|I_{x2}|)^2} \quad Z_2 = -0.608$$

Η οποία είναι αρνητική, άρα ορίζεται σφάλμα ορθής φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad V_1 := V_{gen1\_pu} - I_{x1} \cdot (X_{gen1\_d\_pu})$$

Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

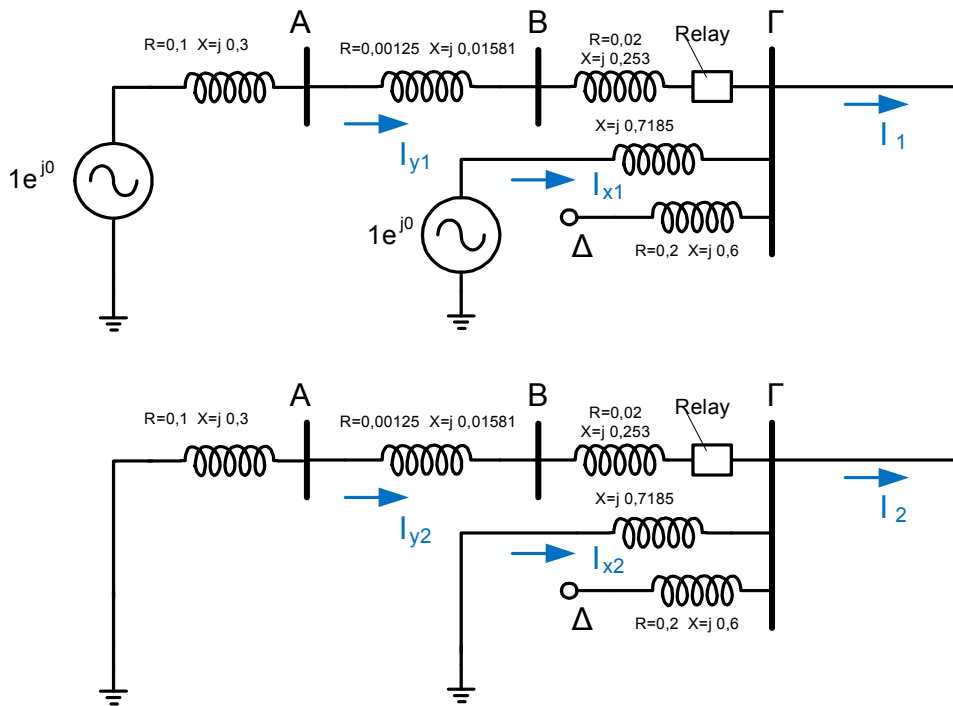
$$T32P := |3V_1| \cdot |3I_{x1}| \cdot \cos \left[ \arg(V_1) - \left( \arg(I_{x1}) + \frac{\pi}{6} + \arg(Z_{L1\_1\_pu}) \right) \right] \quad T32P = 2.095$$

Θετική άρα το σφάλμα ορίζεται ως ορθής φοράς.



### 3. Σφάλματα στο σημείο Γ

α. Διαφασικό σφάλμα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{\text{gen1\_2\_pu}}$$

$$Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{\text{gen2\_2\_pu}} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu}$$

$$Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 := -I_1$$

$$I_{y2} := I_2 \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$V_2 := -I_{x2}(X_{\text{gen1\_d\_pu}})$$

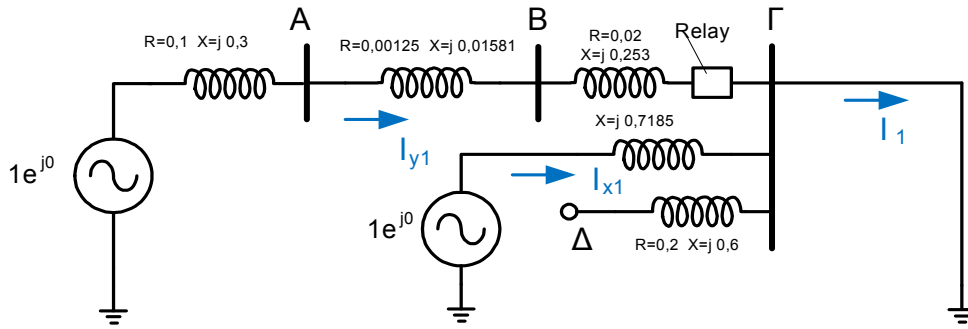
Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας  $z_2$  είναι:

$$Z_2 := \frac{\text{Re} \left[ V_2 \left[ -I_{y2} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu}))) \right] \right]}{(|I_{y2}|)^2}$$

$$Z_2 = 0.316$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} \quad I_{y1} := I_1 \cdot \frac{Z_{x1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{y1} \cdot (X_{\text{gen2\_d\_pu}} + Z_{L1\_1\_pu} + Z_{MT\_pu})$$

Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T_{32P} := |3V_1| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos \left[ \arg(V_1) - \left( \arg(-I_{y1}) + \frac{\pi}{6} + \arg(Z_{L1\_1\_pu}) \right) \right] \quad T_{32P} = 0$$

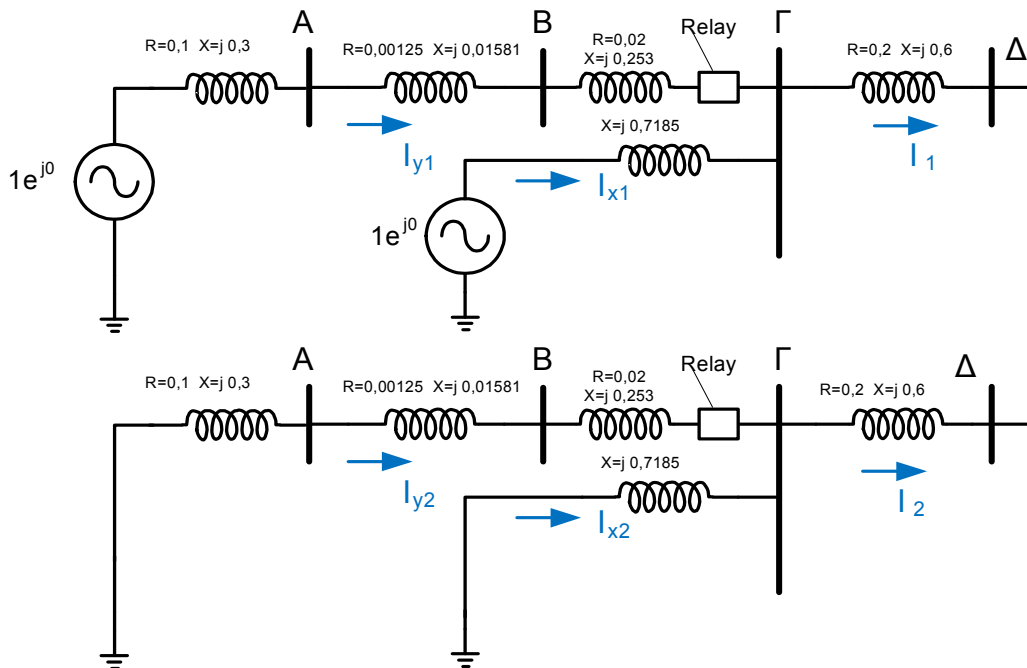
Επειδή η παραπάνω ροπή είναι μηδενική, το στοιχείο δεν ορίζει καθορίζει την κατεύθυνση του σφάλματος. Γι αυτό χρησιμοποιούμε τάση μνήμης θετικής ακολουθίας

$$T_{32P} := |3V_{\text{gen1\_pu}}| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos \left[ \arg(V_{\text{gen1\_pu}}) - \left( \arg(-I_{y1}) + \frac{\pi}{6} + \arg(Z_{L1\_1\_pu}) \right) \right] \quad T_{32P} = -21.354$$

Αρνητική άρα το σφάλμα ορίζεται ως αντίστροφης φοράς.

**4. Σφάλματα στο σημείο Δ**

α. Διφασικά σφάλματα



Ορισμός σύνθετων αντιστάσεων

$$Z_{x2} := X_{gen1\_2\_pu} \qquad Z_{x1} := Z_{x2}$$

$$Z_{y2} := X_{gen2\_2\_pu} + Z_{L1\_2\_pu} + Z_{MT\_pu} \qquad Z_{y1} := Z_{y2}$$

$$Z_2 := \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} + Z_{L2\_2\_pu} \qquad Z_1 := Z_2$$

Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{gen1\_pu}}{Z_1 + Z_2} \qquad I_2 := -I_1$$

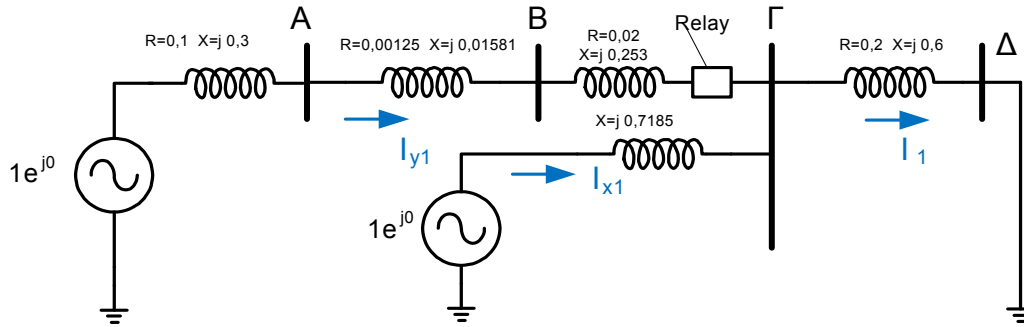
$$I_{y2} := I_2 \cdot \frac{Z_{x2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \qquad I_{x2} := I_2 \cdot \frac{Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \qquad V_2 := -I_{x2}X_{gen1\_d\_pu}$$

Η ρύθμιση του στοιχείου σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας z2 είναι:

$$Z2 := \frac{\text{Re} \left[ V_2 \cdot \left[ -I_{y2} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}} \cdot (\cos(\arg(Z_{L1\_2\_pu})) + j \cdot \sin(\arg(Z_{L1\_2\_pu}))) \right] \right]}{(|I_{y2}|)^2} \qquad Z2 = 0.366$$

Η οποία είναι θετική, άρα ορίζεται σφάλμα αντίστροφης φοράς.

β. Τριφασικό σφάλμα



Υπολογισμός ρευμάτων

$$I_1 := \frac{V_{\text{gen1\_pu}}}{Z_1} \quad I_{y1} := I_1 \cdot \frac{Z_{x1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \quad I_{x1} := I_1 \cdot \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}$$

$$V_1 := V_{\text{gen1\_pu}} - I_{y1} \cdot (X_{\text{gen2\_d\_pu}} + Z_{L1\_1\_pu} + Z_{MT\_pu})$$

Υπολογισμός ροπής του στοιχείου κατεύθυνσης θετικής ακολουθίας.

$$T32P := |3V_1| \cdot |3I_{y1}| \cdot \cos \left[ \arg(V_1) - \left( \arg(-I_{y1}) + \frac{\pi}{6} + \arg(Z_{L1\_1\_pu}) \right) \right] \quad T32P = -3.516$$

Αρνητική άρα το σφάλμα ορίζεται ως αντίστροφης φοράς.

## Βιβλιογραφία

- [1]. J. D Glover, M. S Sarma “Power System Analysis and Design”, Brooks/Cole, 2002
- [2]. J. L Blackburn, T. J Domin “Protective Relaying: Principles and Applications”, CRC Press, 2007
- [3]. P. Bertand “Cahier Technique n° 181: Directional Protection Equipment”, Groupe Schneider, 1998
- [4]. M. Orlahac “Cahier Technique n° 164: Current Transformer for HV Protection”, Groupe Schneider, 1995
- [5]. R. Calvas, F. Sautriau “Cahier Technique n° 2: Protection of Electrical Distribution Networks by the Logic Selectivity System”, Groupe Schneider, 1983
- [6]. C.Teyssandier “Cahier Technique n° 170: From Current Transformer to Hybrid Sensors in HV”, Groupe Schneider, 1995
- [7]. A. Sastre “Cahier Technique n° 174: Protection of Industrial and Commercial MV networks”, Groupe Schneider, 1996
- [8]. J. Roberts, A. Guzman “Directional Element Design and Evaluation” SEL 1993
- [9]. E. O Schweitzer III, J. Roberts “Distance Element Design” SEL 1993
- [10]. W. K. Sonnemann, “A Study of Directional Element Connections for Phase Relays,” AIEE Transactions, 1950, Volume 69, pp 1438–1451.
- [11]. A. R. Van C. Warrington, Protective Relays: Their Theory and Practice, Chapman and Hall, 1969, Volumes I and II.
- [12]. F. Calero “Mutual Impedance in Parallel Lines – Protective Relaying and Fault Location Considerations” SEL 2007
- [13]. P. G. McLaren, G. W. Swift, Z. Zhang, E. Dirks, R.P. Jayasinghe, I. Fernando, “A New Directional Element for Numerical Distance Relays”, IEEE-PES Summer Meeting, San Francisco, CA, July 28, 1994, Paper No. 94 SM 429-1 PWRD.
- [14]. S. C Patel “Polarizing Sources for Directional Ground Relays” GER – 3182A
- [15]. Special Circuits for Ground relay current Polarization from Autotransformers Having Delta Tertiary, P.A. Oakes. AIEE Transaction, pt. III-B (Power Apparatus and Systems), vol. 78, Dec. 1959, pp 1191-94.
- [16]. One High-Side Potential Transformer Polarizes Directional Ground Relays, H.T. Seelay. Relaying News (Schenectady, N.Y.), issue number 24, Dec. 1942, p 3.
- [17]. W. K. Sonneman, H.W. Lensner, “Compensator Distance Relaying: General Principles of Operation,” reprinted in “Protective Relaying for Power Systems,” IEEE Press, from AIEE Trans. Part III, vol. 77, pp. 372–382, June 1958.
- [18]. SEL – 311C Relay: Protection and Automation System. Instruction Manual
- [19]. K. Zimmerman, Pan Roth “Evaluation of Distance and Directional Relay Elements on Lines with Power Transformers of Open Delta VTs. SEL 2005
- [20]. B. K. Παπαδιά “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας” Τόμος I, Αθήνα 1985
- [21]. B. K. Παπαδιά “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας” Τόμος II, Αθήνα 1985
- [22]. Μ. Π. Παπαδόπουλου “Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας” Αθήνα 1997
- [23]. Γ. Κορρέ “Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας” Διαφάνειες Μαθήματος.