



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Βέλτιστη Ρύθμιση Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης-
Κατεύθυνσης με Χρήση Τεχνικών Μη Γραμμικού
Προγραμματισμού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασία Χ. Ερμείδου

Δήμητρα Μαρία Χ. Γκότση

Επιβλέποντες : Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Παπασπηλιωτόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019



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

Βέλτιστη Ρύθμιση Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης- Κατεύθυνσης με Χρήση Τεχνικών Μη Γραμμικού Προγραμματισμού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασία Χ. Ερμείδου
Δήμητρα Μαρία Χ. Γκότση

Επιβλέποντες : Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βασίλειος Παπασπηλιωτόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Νοεμβρίου 2019.

(Υπογραφή)

.....
Κορρές Γεώργιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γεωργιάκης Παύλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γκόνος Ιωάννης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

.....

Αναστασία Χ. Ερμείδου

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

.....

Δήμητρα Μαρία Χ. Γκότση

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

Copyright © Αναστασία Χ. Ερμείδου, Δήμητρα Μαρία Χ. Γκότση 2019

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 τους συγγραφείς.

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

Περίληψη

Ένα σωστά σχεδιασμένο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) πρέπει να εξασφαλίζει την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε φορτίο που συνδέεται σε αυτό. Η ισχύς μεταφέρεται κυρίως με εκτεθειμένες εναέριες γραμμές, με αποτέλεσμα να υπάρχει η πιθανότητα βλάβης τους. Η Προστασία Σ.Η.Ε. καλείται σε αυτές τις περιπτώσεις να ανιχνεύσει τυχόν σφάλματα στα δίκτυα και να απομονώσει όσο το δυνατόν γρηγορότερα το πληγέν κομμάτι του δικτύου έως ότου αυτά εκκαθαριστούν, με σκοπό την ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου. Η πολυπλοκότητα των σύγχρονων δικτύων απαιτεί τη ρύθμιση των σύγχρονων ηλεκτρονόμων προστασίας, που διαθέτουν μικροεπεξεργαστές, με όσο το δυνατόν αυτοματοποιημένο τρόπο ανάλογα με το εκάστοτε δίκτυο.

Στην παρούσα διπλωματική, στόχος είναι η ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης, σε πρώτο στάδιο σε ακτινικά παθητικά δίκτυα με μία πηγή, και σε δεύτερο στάδιο, σε βροχοειδή συστήματα με πολλαπλές πηγές. Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές προς ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υπερέντασης είναι το ρεύμα διέγερσης και ο χρονικός πολλαπλασιαστής.

Αρχικά, αναφέρονται τα είδη σφαλμάτων που εμφανίζονται στα Σ.Η.Ε., καθώς και μέθοδοι ανάλυσης των δικτύων κατά το σφάλμα, με σκοπό τον προσδιορισμό της τάσης και του ρεύματος σε κάθε σημείο του δικτύου, μεγέθη τα οποία είναι άμεσα συσχετισμένα με τη σωστή ρύθμιση των ηλεκτρονόμων.

Στη συνέχεια, γράφτηκε κώδικας σε Matlab με σκοπό την αλγοριθμική ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά δίκτυα με μία πηγή για διάφορα δεδομένα δικτύου που δίνει ο χρήστης. Το τελευταίο και βασικό κομμάτι της διπλωματικής, που περιγράφεται στα Κεφάλαια 5 και 6, είναι αυτό της ρύθμισης ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης για επιλογική συνεργασία σε βροχοειδή δίκτυα με πολλαπλές πηγές, με χρήση μη γραμμικού προγραμματισμού. Για να επιτευχθεί αυτό, πρώτα γίνεται μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε όλους τους ζυγούς του εκάστοτε δικτύου, έπειτα βρίσκονται τα ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας, καθώς και τα ρεύματα που «βλέπει» ο καθένας. Τέλος, ρυθμίζονται οι ηλεκτρονόμοι βάσει της μεθόδου βελτιστοποίησης που επιλέχθηκε και επιτυγχάνεται η επιλογική συνεργασία μεταξύ τους. Η ρύθμιση των ηλεκτρονόμων έγινε αρχικά για σφάλματα που συμβαίνουν ακριβώς μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο (close-in σφάλμα) και έπειτα για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και σε ποσοστό της γραμμής που επιθυμεί ο χρήστης. Όλα τα παραπάνω, εξετάστηκαν σε 2 Πρότυπα Δίκτυα, ένα 8 ζυγών και ένα 15 ζυγών, στα οποία αξιολογήθηκαν αναλυτικά τα αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Προστασία Σ.Η.Ε., Ηλεκτρονόμος υπερέντασης-κατεύθυνσης, Επιλογική συνεργασία ηλεκτρονόμων, Ρεύμα διέγερσης, Χρονικός πολλαπλασιαστής, Συμμετρικά σφάλματα, Ασύμμετρα σφάλματα, Close-in σφάλμα, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός, Βελτιστοποίηση, Ρύθμιση ηλεκτρονόμων

Abstract

A properly designed Power System should ensure continuous power supply to any load connected to it without interruption. Power is transmitted through exposed lines, resulting in possible damage. Therefore, Protection of Power Systems must detect any network fault and isolate as soon as possible the part of the network where the fault occurs until it is cleared, in order to maintain a very high level of continuity of service to the rest system. The complexity of modern Power Systems requires that modern protection relays, which are equipped with microprocessors, are set in a fully automated way satisfying the requirements of each network.

In the present thesis, the aim is the setting of overcurrent relays on single-source radial networks and on multiple-source meshed systems. In particular, the two variables of each relay are optimized in order to be proper set. These variables are the pick-up current and the Time Dial Setting.

Firstly, the types of faults that occur in Power Systems are mentioned, as well as the systematic fault analysis, in order to determine voltage and current at each point of the network. These variables are directly related to the proper relay setting.

Subsequently, Matlab was used for the algorithmic setting of overcurrent relays in single-source radial networks, based on network data provided by the user (e.g. loads on buses, sequence impedances etc.). The final and most important part of this thesis, which is described in Chapters 5 and 6, is the coordination of directional overcurrent relays in meshed power grids with multiple sources, using nonlinear programming. In order to achieve this goal, a short circuit study on all buses of the network has been designed. The primary-backup relay pairs must be found, as well as the currents that each relay detects, in order to apply the optimization method. The relays were first set for faults occurring right in front of each relay (close-in fault), and then for a combination of faults: one close-in fault and one fault in a percentage of the line which is given by the user. The proposed method is applied to two different meshed power systems, one consisted of 8 buses and one of 15 buses, and the simulation results were analyzed in detail.

Keywords

Power System Protection, Directional Overcurrent Relay, Relay Coordination, Pick-up current, Time Dial Setting, Symmetrical Faults, Unsymmetrical Faults, Close-in fault, Nonlinear Programming, Optimization, Relay Setting

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας προς όλους όσους βοήθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, Καθηγητή κ. Γεώργιο Κορρέ για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε με την ανάθεσή της, καθώς και για την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε για την άψογη συνεργασία αυτούς τους μήνες και για τις γνώσεις που μας μετέδωσε κατά τη διάρκεια της φοίτησής μας στο Πολυτεχνείο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να απευθύνουμε στον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Παπασπηλιωτόπουλο για τη συνεισφορά και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειες και τους φίλους μας για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	8
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	12
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	16
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Χρησιμότητα του συστήματος προστασίας	19
1.2 Βασικοί στόχοι ενός συστήματος προστασίας.....	20
1.3 Αρχές στην τοποθέτηση των ηλεκτρονόμων.....	21
2 ΕΙΔΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	23
2.1 Συμμετρικά Σφάλματα.....	23
2.1.1 Συστηματική ανάλυση τριφασικού σφάλματος με χρήση της μήτρας σύνθετων αντιστάσεων	23
2.1.2 Τροποποίηση μήτρας αγωγιμοτήτων για συμμετρικό σφάλμα ανάμεσα σε δύο ζυγούς.....	27
2.2 Ασύμμετρα σφάλματα.....	28
2.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες.....	29
2.2.1.1 Σύστημα θετικής ακολουθίας	29
2.2.1.2 Σύστημα αρνητικής ακολουθίας.....	30
2.2.1.3 Σύστημα μηδενικής ακολουθίας.....	30
2.2.2 Είδη βραχυκυκλωμάτων.....	32
2.2.2.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα - SLG	32
2.2.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c χωρίς γη - LL.....	34
2.2.2.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c με γη - LLG	36
2.2.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c με αντίσταση στις φάσεις προς γη.....	37

2.2.2.5	Τριφασικό σφάλμα με γη ή χωρίς γη - LLL.....	39
2.2.2.6	Τριφασικό σφάλμα με αντιστάσεις στις φάσεις με γη ή χωρίς γη.....	41
3	ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	43
3.1	Εισαγωγή.....	43
3.2	Προστασία υπερέντασης	43
3.2.1	Εισαγωγή	43
3.2.2	Επιλογή του εξοπλισμού προστασίας.....	44
3.2.3	Τύποι ηλεκτρονόμων υπερέντασης	44
3.2.3.1	Ηλεκτρονόμοι σταθερού ρεύματος ή στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι.....	45
3.2.3.2	Ηλεκτρονόμοι σταθερού χρόνου	46
3.2.3.3	Ηλεκτρονόμοι αντιστρόφου χρόνου.....	46
3.2.4	Το ρεύμα διέγερσης	50
3.2.5	Το Time Dial Setting (TDS)	50
3.2.6	Χρόνος διάκρισης (Time Discrimination Margin).....	50
3.3	Προστασία κατεύθυνσεως.....	51
3.3.1	Αρχή λειτουργίας.....	51
3.3.2	Σχεδιασμός κατευθυντικών μονάδων για σφάλματα φάσης.....	54
3.3.3	Προστασία σφαλμάτων με γη	56
3.3.4	Πόλωση τάσης.....	57
3.3.5	Πόλωση ρεύματος.....	58
3.3.6	Συνδεσμολογίες στοιχείων κατεύθυνσης	59
3.4	Διαφορική προστασία	61
3.4.1	Αρχή λειτουργίας.....	61
3.4.2	Διαφορική προστασία μετασχηματιστών	63
3.4.3	Διαφορική προστασία γεννητριών και περιστρεφόμενων μηχανών	65
3.4.4	Διαφορική προστασία γραμμών	67
3.4.5	Διαφορική προστασία ζυγών	67
3.4.5.1	Διαφορική προστασία με πολλαπλά πηνία συγκράτησης	68
3.4.5.2	Διαφορική προστασία υψηλής σύνθετης αντίστασης	69
3.5	Προστασία αποστάσεως.....	69
3.5.1	Χαρακτηριστική λειτουργίας τύπου Impedance.....	70
3.5.2	Διάγραμμα R-X	71
3.5.3	Χαρακτηριστική λειτουργίας τύπου ΜΗΟ	72
3.5.4	Ηλεκτρονόμοι με πολυγωνικές χαρακτηριστικές λειτουργίας	72

3.5.5	Ρυθμίζοντας την έκταση και τον χρόνο λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως	73
4	ΡΥΘΜΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	76
4.1	Αλγόριθμος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά δίκτυα.....	76
4.2	Παραδείγματα ρύθμισης ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά δίκτυα	80
4.2.1	Επίλυση με γνωστά μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα σφάλματος	81
4.2.2	Επίλυση με γνωστά φορτία στους ζυγούς και γνωστές σύνθετες αντιστάσεις γραμμών θετικής ακολουθίας.....	88
4.2.3	Επίλυση με γνωστά φορτία και μέγιστα ρεύματα στους ζυγούς	93
4.2.4	Επίλυση με γνωστά φορτία στους ζυγούς και γνωστές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.....	97
5	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ-ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΣΕ ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ.....	103
5.1	Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος επιλογικότητας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης.....	103
5.1.1	Συμβατικές μέθοδοι	104
5.1.2	Τεχνικές βελτιστοποίησης	104
5.1.3	Μεθεωρητικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση.....	105
5.2	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης.....	106
5.2.1	Αντικειμενική συνάρτηση.....	108
5.2.2	Όρια των μεταβλητών του προβλήματος	109
5.2.3	Όρια των χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων.....	109
5.2.4	Περιορισμοί επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων.....	109
5.3	Ο αλγόριθμος interior-point για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων μη-γραμμικού προγραμματισμού.....	110
5.4	Matlab Optimization Toolbox-Fmincon	111
5.5	Περιγραφή αλγόριθμου.....	115
5.5.1	Σύνολο αρχείων	115
5.5.2	Υλοποίηση για close-in σφάλμα.....	118
5.5.3	Υλοποίηση για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και σε ποσοστό της γραμμής	123

6	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	126
6.1	Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας.....	126
6.2	Δίκτυο 8 ζυγών	127
6.2.1	Δεδομένα Δικτύου	127
6.2.2	Αποτελέσματα Δικτύου	130
6.2.2.1	Μελέτη βραχυκυκλωμάτων	130
6.2.2.2	Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης.....	132
6.2.2.2.1	Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη IEEE-Very Inverse.....	136
6.2.2.2.2	Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη U.S.-Moderately Inverse...	139
6.3	Δίκτυο 15 ζυγών	146
6.3.1	Δεδομένα Δικτύου	146
6.3.2	Αποτελέσματα Δικτύου	149
6.3.2.1	Μελέτη βραχυκυκλωμάτων	149
6.3.2.2	Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης.....	151
6.3.2.2.1	Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη U.S.-Moderately Inverse...	157
6.3.2.2.2	Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη U.S.-Inverse.....	168
6.4	Επίδραση αρχικού σημείου στις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων	177
7	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	179
7.1	Συμπεράσματα	179
7.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	179
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	181

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ζώνες πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [2]	22
Σχήμα 1.2: Επικάλυψη των ζωνών προστασίας [7]	22
Σχήμα 2.1: Ένας τυπικός ζυγός σε ένα Σ.Η.Ε. [3]	24
Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του Σ.Η.Ε. [3].....	25
Σχήμα 2.3: Προσθήκη υποθετικού ζυγού στη θέση σφάλματος [4]	27
Σχήμα 2.4: Ρεύματα θετικής ακολουθίας	29
Σχήμα 2.5: Ρεύματα αρνητικής ακολουθίας.....	30
Σχήμα 2.6: Ρεύματα μηδενικής ακολουθίας	30
Σχήμα 2.7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στα φάση a με αντίσταση προς γη	32
Σχήμα 2.8: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό βραχυκύκλωμα	33
Σχήμα 2.9: Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b-c χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος.....	34
Σχήμα 2.10: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη	35
Σχήμα 2.11: Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b-c με αντίσταση σφάλματος προς γη	36
Σχήμα 2.12: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη	36
Σχήμα 2.13: Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b-c με αντίσταση στις φάσεις προς γη	37
Σχήμα 2.14: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη με αντίσταση στις φάσεις	38
Σχήμα 2.15: Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη.....	39
Σχήμα 2.16: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα.....	40
Σχήμα 2.17: Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη με αντίσταση στις φάσεις	41
Σχήμα 2.18: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα με αντίσταση στις φάσεις	41
Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικές λειτουργίας διαφόρων τύπων ηλεκτρονόμων υπερέντασης [7] .	45
Σχήμα 3.2: Επιλογικότητα ηλεκτρονόμων με διαφορετικές χαρακτηριστικές χάρη στη χρήση στιγμιαίου ηλεκτρονόμου [7]	46
Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικές λειτουργίας (από κάτω προς τα πάνω) σταθερού, αντιστρόφου, αρκετά αντιστρόφου και εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου	48
Σχήμα 3.4: Τυπικές χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου για διάφορα <i>TDS</i> [7].....	49
Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου για σύστημα με δύο ηλεκτρονόμους που συνδέονται με δύο διακόπτες [7]	49
Σχήμα 3.6: Ακτινικό δίκτυο διανομής με δύο πηγές [39]	51
Σχήμα 3.7: Δίκτυο διανομής με παράλληλες διαδρομές [39]	52
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα προβλήματος επιλογικότητας [39].....	52

Σχήμα 3.9: Πρόβλημα διαχωρισμού (δεξιά), Διαχωρισμός ρεύματος βάσει διανύσματος αναφοράς (αριστερά) [39]	53
Σχήμα 3.10: Λογική λειτουργίας κατευθυντικών ηλεκτρονόμων [39]	53
Σχήμα 3.11: Διανύσματα τάσης και έντασης σε κατάσταση ισορροπίας [8].....	55
Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης για θέση μέγιστης ροπής 30° [2]	55
Σχήμα 3.13: Μεγέθη της φάσης a, για σφάλματα a-b, a-c και b-c [39]	56
Σχήμα 3.14: Σφάλμα SLG στη φάση a.....	57
Σχήμα 3.15: Υπολογισμός τάσης μηδενικής ακολουθίας	57
Σχήμα 3.16: Πόλωση με βάση την τάση μηδενικής ακολουθίας [2]	57
Σχήμα 3.17: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης για ανίχνευση σφάλματος γης με πόλωση τάσης χρησιμοποιώντας το μοντέλο των 60°(Πίνακας 3.2) [2].....	58
Σχήμα 3.18: Πόλωση με βάση το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας [39]	59
Σχήμα 3.19: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση ρεύματος [2]	59
Σχήμα 3.20: Συνδέσεις στοιχείων κατεύθυνσης στη φάση a [8].....	60
Σχήμα 3.21: Διαφορική προστασία-ισορροπία ρευμάτων [7]	62
Σχήμα 3.22: Διαφορικός ηλεκτρονόμος με χαρακτηριστική μεταβλητού ποσοστού [7].....	62
Σχήμα 3.23: Χαρακτηριστική λειτουργίας μεταβλητού ποσοστού [7]	62
Σχήμα 3.24: Διαφορική προστασία στοιχείου με τρεις ακροδέκτες [7].....	63
Σχήμα 3.25: Διαφορική προστασία μετασηματιστή [7].....	64
Σχήμα 3.26: Διαφορική προστασία γεννήτριας συνδεδεμένης σε αστέρα [7]	66
Σχήμα 3.27: Διαφορική προστασία γεννήτριας συνδεδεμένης σε τρίγωνο [7]	66
Σχήμα 3.28: Διαφορική προστασία γεννήτριας συνδεδεμένης σε αστέρα για σφάλματα γης [7]	67
Σχήμα 3.29: Διαφορική προστασία ζυγού με πολλαπλά πηνία συγκράτησης [7]	68
Σχήμα 3.30: Διαφορική προστασία ζυγού υψηλής σύνθετης αντίστασης με χρήση κοινού ζυγού ανά φάση [7]	69
Σχήμα 3.31: Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως με βάση το μοντέλο της ισορροπημένης ράβδου: (a) ηλεκτρονόμος αποστάσεως στη γραμμή μεταφοράς GH (b) απλουστευμένο παράδειγμα στοιχείου με ράβδο [2]	70
Σχήμα 3.32: Χαρακτηριστικές ηλεκτρονόμου αποστάσεως στο διάγραμμα R-X: (a) τύπου impedance, (b) mho, (c) offset mhos, (d) τύπου φακού, (e) τύπου παρωπίδων, (f) τύπου reactance [2]	72
Σχήμα 3.33: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου αποστάσεως τύπου τετραπλεύρου [7]	73
Σχήμα 3.34: Ζώνες προστασίας ενός ηλεκτρονόμου αποστάσεως για ένα ακτινικό δίκτυο [7] 74	
Σχήμα 3.35: Χαρακτηριστική λειτουργίας για προστασία αποστάσεως στον ζυγό A [7]	75
Σχήμα 3.36: Χρόνοι λειτουργίας για προστασία αποστάσεως στον ζυγό A [7]	75
Σχήμα 4.1: Παράδειγμα ακτινικού δικτύου [6].....	76

Σχήμα 4.2: Ερώτηση προς τον χρήστη για το είδος των δεδομένων	76
Σχήμα 4.3: Δεδομένα ρευμάτων από το 1 ^ο φύλλο του overc_data.xlsx	77
Σχήμα 4.4: Δεδομένα Σ.Η.Ε. από το 2 ^ο φύλλο του overc_data.xlsx	77
Σχήμα 4.5: Ακτινικό δίκτυο του παραδείγματος 1.....	81
Σχήμα 4.6: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 1	87
Σχήμα 4.7: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 2	92
Σχήμα 4.8: Ακτινικό δίκτυο του παραδείγματος 3.....	93
Σχήμα 4.9: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 3	96
Σχήμα 4.10: Ακτινικό δίκτυο του παραδείγματος 4	97
Σχήμα 4.11: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 4	102
Σχήμα 5.1: Ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας σε ένα Σ.Η.Ε. [35]	107
Σχήμα 5.2: Near-end και far-end σφάλματα για τον ηλεκτρονόμο Rp_{nr} [36].....	107
Σχήμα 5.3: Διαγράμματα ροής των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν	116
Σχήμα 5.4: Μορφή δεδομένων που εισάγει ο χρήστης στο Excel.....	117
Σχήμα 5.5: Τα ρεύματα που βλέπει ο ηλεκτρονόμος id και ο backup του για σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής μπροστά από τον id	120
Σχήμα 5.6: Μορφή πίνακα Ip_b στο Matlab	121
Σχήμα 6.1: Πρότυπο δίκτυο 8 ζυγών [37]	128
Σχήμα 6.2: Μορφή δεδομένων 8 ζυγών στο Excel	130
Σχήμα 6.3: Μορφή αποτελεσμάτων των τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο command window	131
Σχήμα 6.4: Μορφή αποτελεσμάτων των ρευμάτων στις γραμμές για σφάλμα στον ζυγό 4 του δικτύου 8 ζυγών στο command window	131
Σχήμα 6.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3	142
Σχήμα 6.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3 με νέες ρυθμίσεις.....	145
Σχήμα 6.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από τον 3.....	146
Σχήμα 6.8: Πρότυπο δίκτυο 15 ζυγών [38]	147
Σχήμα 6.9: Μορφή δεδομένων 15 ζυγών στο Excel	148
Σχήμα 6.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3	161
Σχήμα 6.11: Χαρακτηριστικές καμπύλες ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3 με νέες ρυθμίσεις.....	167

Σχήμα 6.12: Χαρακτηριστικές καμπύλες ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από τον 3 168

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1: Σταθερές ANSI/IEEE και IEC για τυποποιημένες καμπύλες αντιστρόφου χρόνου [7]	47
Πίνακας 3.2: Συνδεσμολογίες ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης	60
Πίνακας 4.1: Σταθερές A,B,C,D,E των καμπυλών General Electric IAC	81
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα <i>TDS</i> και χρόνων του παραδείγματος 1	85
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα <i>TDS</i> και χρόνων του παραδείγματος 2	91
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα <i>TDS</i> και χρόνων του παραδείγματος 3	95
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα <i>TDS</i> και χρόνων του παραδείγματος 4	100
Πίνακας 6.1: Οικογένεια καμπυλών U.S.	126
Πίνακας 6.2: Οικογένεια καμπυλών IEC	127
Πίνακας 6.3: Οικογένεια καμπυλών IEEE	127
Πίνακας 6.4: Δεδομένα γεννητριών δικτύου 8 ζυγών	128
Πίνακας 6.5: Δεδομένα μετασηματιστών δικτύου 8 ζυγών	128
Πίνακας 6.6: Δεδομένα γραμμών δικτύου 8 ζυγών	129
Πίνακας 6.7: Τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης σε κάθε ζυγό του δικτύου 8 ζυγών	130
Πίνακας 6.8: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 4	132
Πίνακας 6.9: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 7	132
Πίνακας 6.10: Ζεύγη primary/backup ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για close-in σφάλμα μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο στο δίκτυο 8 ζυγών	133
Πίνακας 6.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για σφάλμα close-in στο δίκτυο 8 ζυγών	134
Πίνακας 6.12: Ζεύγη primary/backup ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο στο δίκτυο 8 ζυγών	135
Πίνακας 6.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 8 ζυγών	135
Πίνακας 6.14: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse και όρια του <i>I_{pu}</i>	136
Πίνακας 6.15: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse	137
Πίνακας 6.16: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse και όρια του <i>I_{pu}</i>	138
Πίνακας 6.17: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse	138
Πίνακας 6.18: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse	139

Πίνακας 6.19: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του <i>Ipu</i>	140
Πίνακας 6.20: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse.....	141
Πίνακας 6.21: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του <i>Ipu</i>	142
Πίνακας 6.22: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse	143
Πίνακας 6.23: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse.....	144
Πίνακας 6.24: Τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης σε κάθε ζυγό του δικτύου 15 ζυγών	149
Πίνακας 6.25: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 8	150
Πίνακας 6.26: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 13	151
Πίνακας 6.27: Ζεύγη primary/backup ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών	152
Πίνακας 6.28: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για σφάλμα close-in στο δίκτυο 15 ζυγών	154
Πίνακας 6.29: Ζεύγη primary/backup ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο στο δίκτυο 15 ζυγών	154
Πίνακας 6.30: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 15 ζυγών.....	157
Πίνακας 6.31: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του <i>Ipu</i>	158
Πίνακας 6.32: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse.....	159
Πίνακας 6.33: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του <i>Ipu</i>	162
Πίνακας 6.34: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse.....	163
Πίνακας 6.35: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse	165
Πίνακας 6.36: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in για το δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.- Inverse και όρια του <i>Ipu</i>	169
Πίνακας 6.37: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse.....	170
Πίνακας 6.38: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse και όρια του <i>Ipu</i>	172

Πίνακας 6.39: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse	173
Πίνακας 6.40: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse	175

1 Εισαγωγή

1.1 Χρησιμότητα του συστήματος προστασίας

Η προστασία με ηλεκτρονόμους αποτελεί ζωτικό κομμάτι οποιουδήποτε Σ.Η.Ε., σχετικά περιττό κατά την ομαλή λειτουργία, αλλά πολύ σημαντικό κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και ασυνήθιστων διαταραχών.

Τι είναι ένας ηλεκτρονόμος προστασίας; σύμφωνα με το Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) είναι μία ηλεκτρική συσκευή που σχεδιάστηκε για να ερμηνεύει συνθήκες στην είσοδό της, με καθορισμένο τρόπο, και για να προκαλεί άνοιγμα των διακοπών ισχύος ή κάποια απότομη αλλαγή στο κύκλωμα το οποίο ελέγχει, εφόσον πληρούνται συγκεκριμένες συνθήκες. Οι είσοδοι είναι συνήθως ηλεκτρικά μεγέθη, αλλά μπορεί να είναι και μηχανικές, θερμικές ή άλλες ποσότητες.

Ο κύριος σκοπός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι να διατηρούν πολύ υψηλό επίπεδο συνοχής των υπηρεσιών, και όταν συμβούν αναπάντεχες καταστάσεις όπως τα βραχυκυκλώματα, να ελαχιστοποιήσουν τον χρόνο διακοπής. Φυσικά φαινόμενα που προκαλούν βραχυκυκλώματα είναι οι κεραυνοί, ο αέρας, ο πάγος, οι σεισμοί, οι φωτιές, οι εκρήξεις, οι πτώσεις δένδρων, τα ιπτάμενα αντικείμενα, η φυσική επαφή με ζώα κ.α. Η πλειονότητα των σφαλμάτων που συμβαίνουν σε εναέρια γραμμές είναι τα μονοφασικά σφάλματα με γη, προκαλούμενα κυρίως από παροδικές ανυψώσεις τάσης μέσω κεραυνών, από πτώσεις δένδρων και κλαδιών, και από στιγμιαία επαφή με δένδρα λόγω ανέμου. Σε πολλές από τις παραπάνω περιπτώσεις δεν προκαλούνται μόνιμες βλάβες στο δίκτυο εάν οι ηλεκτρονόμοι προστασίας λειτουργήσουν άμεσα. Μία συνήθης πρακτική είναι το άνοιγμα των διακοπών στο σημείο σφάλματος, έπειτα αναμονή μέχρι το εμφανιζόμενο ηλεκτρικό τόξο να εξασθενήσει, και τέλος πάλι κλείσιμο των διακοπών. Αυτό συνεισφέρει στη συνοχή των υπηρεσιών παροχής ρεύματος καθώς η διακοπή είναι στιγμιαία, διάρκειας από μισό έως ένα με δύο λεπτά.

Τα σφάλματα προκαλούν συνήθως σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους ενός Σ.Η.Ε., οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό αποδεκτών και μη καταστάσεων. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να περιλαμβάνουν υπερεντάσεις, υποτάσεις και υπερτάσεις, αλλαγές φασικών γωνιών, διαφορετική κατεύθυνση ισχύος και ρεύματος, αλλαγή συχνότητας, θερμοκρασίας κ.α. Ο πιο συνήθης δείκτης σφάλματος είναι η ξαφνική και σημαντική αύξηση του ρεύματος, για αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως η προστασία υπερέντασης.

Οι διάφοροι ηλεκτρονόμοι πρέπει να είναι κατάλληλα συγχρονισμένοι, ώστε οι πρωτεύουσες προστασίες να λειτουργούν πρώτες, στην πρώτη ένδειξη προβλήματος μέσα στη ζώνη προστασίας τους. Εάν αποτύχουν πρέπει να υπάρχουν δευτερεύουσες (backup) προστασίες ικανές να εκκαθαρίσουν το σφάλμα.

1.2 Βασικοί στόχοι ενός συστήματος προστασίας

Ο θεμελιώδης και βασικός σκοπός ενός συστήματος προστασίας είναι να απομονώσει την προβληματική περιοχή στο δίκτυο γρήγορα, ώστε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου δικτύου να λειτουργήσει ομαλά.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση του όρου «προστασία» δεν υπονοεί ότι ο εξοπλισμός προστασίας μπορεί να εμποδίσει την εμφάνιση σφάλματος. Οι ηλεκτρονόμοι δρουν αφότου συμβεί το σφάλμα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διάρκειας του σφάλματος και τον περιορισμό των καταστροφών και του χρόνου διακοπής.

Οι έξι βασικές πτυχές ενός συστήματος προστασίας είναι [1]:

1. **Αξιοπιστία:** Διασφάλιση ότι η προστασία θα λειτουργήσει ορθά. Η σωστή λειτουργία του συστήματος προστασίας επιτυγχάνεται όταν ικανοποιούνται οι εξής δύο συνθήκες:
 - το σύστημα λειτουργεί όταν εμφανιστεί ένα σφάλμα το οποίο ανήκει στη ζώνη προστασίας του
 - το σύστημα δε λειτουργεί όταν εμφανίζονται σφάλματα, τα οποία δεν ανήκουν στη ζώνη προστασίας του ή όταν δεν υπάρχει σφάλμα
2. **Επιλογικότητα:** Είναι η ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να ενεργοποιεί μόνο τις πλησιέστερες προς το σφάλμα συσκευές προστασίας (π.χ. άνοιγμα διακοπών ισχύος) και να απομονώνει το αντίστοιχο τμήμα του δικτύου, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του υπολοίπου.
3. **Ταχύτητα λειτουργίας:** Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εμφάνισης ενός σφάλματος και της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου πρέπει να τηρείται εντός προκαθορισμένων ορίων. Μία υπέρβαση μπορεί π.χ. να προκαλέσει τη διακοπή της λειτουργίας ενός ολόκληρου υποσταθμού αντί μίας γραμμής. Αλλά από την άλλη πλευρά μία πολύ ταχεία προστασία (π.χ. κάτω των 10ms), μπορεί να προκαλέσει τη λειτουργία των προστασιών χωρίς λόγο.
4. **Διαβάθμιση:** Έγκειται στον καθορισμό των κατάλληλων κλιμακωτών ρυθμίσεων (graded settings) για την επίτευξη της επιλογικότητας.
5. **Ευαισθησία:** Είναι η ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να αναγνωρίζει μία διαταραχή που υπερβαίνει τις ονομαστικές συνθήκες διέγερσης και να θέτει το σύστημα σε λειτουργία. Συνήθως σχετίζεται με την ελάχιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος, για την οποία λειτουργεί μία διάταξη προστασίας.
6. **Διακριτικότητα:** Η ικανότητα ενός ηλεκτρονόμου να διακρίνει μεταξύ σφάλματος ή μίας υπερβάσεως οφειλόμενης σε μεταβατική κατάσταση. Για παράδειγμα, η διάκριση μεταξύ ρεύματος σφάλματος και ρεύματος παρεμβολής (ζεύξεως) ενός μετασχηματιστή ή ρεύματος σφάλματος και μεταβατικού ρεύματος, λόγω ταλαντώσεως ισχύος σε ένα σύστημα παραγωγής - μεταφοράς.

Ιδανική περίπτωση αποτελεί η επίτευξη όλων των παραπάνω στόχων στο μέγιστο βαθμό. Πραγματικές εφαρμογές απαιτούν κοινή λογική και συμβιβασμούς. Έτσι, ρεαλιστικός στόχος οφείλει να είναι η μεγιστοποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών προστασίας ως σύνολο.

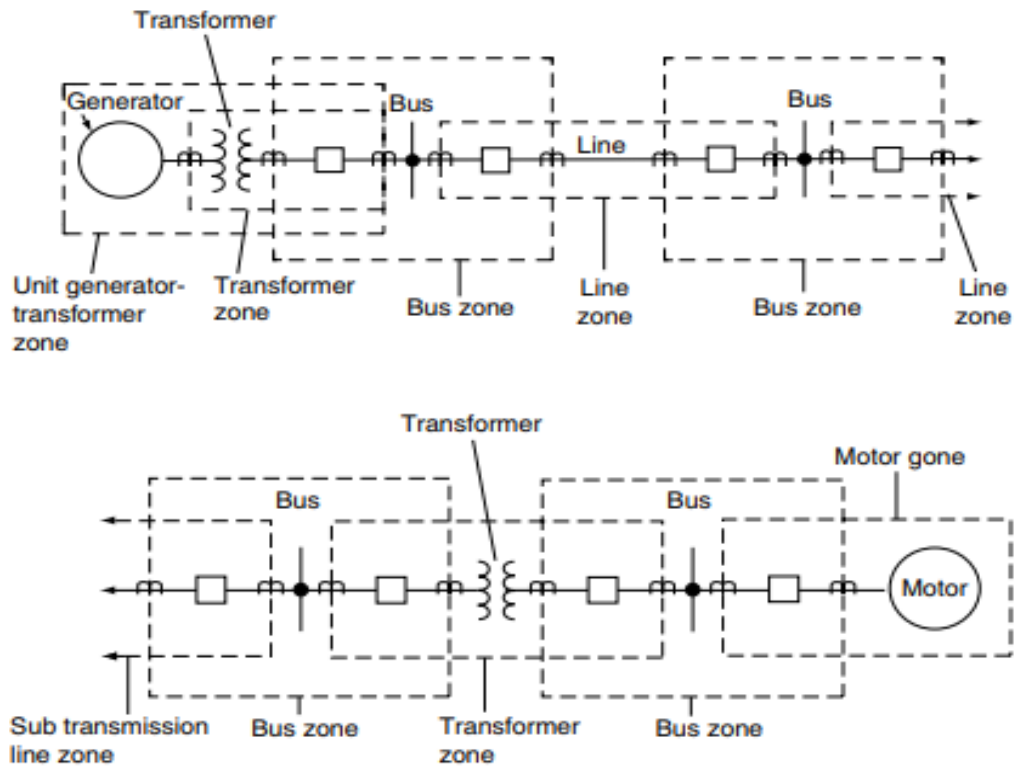
1.3 Αρχές στην τοποθέτηση των ηλεκτρονόμων

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζεται σε ζώνες προστασίας ορισμένες από τον εξοπλισμό και τους διακόπτες. Έξι κατηγορίες ζωνών προστασίας υπάρχουν σε ένα Σ.Η.Ε.:

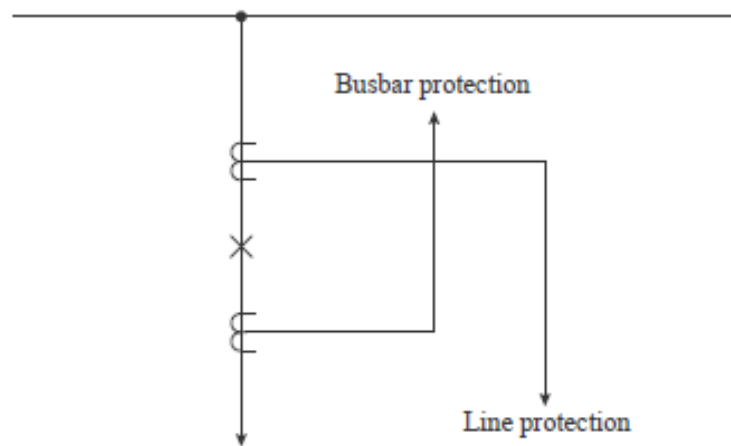
- Γεννήτριας
- Μετασχηματιστή
- Ζυγού
- Γραμμών (μεταφοράς, διανομής)
- Κινητήρα, στατικών φορτίων
- Πυκνωτών και/ή πηνίων (όταν προστατεύονται χωριστά)

Κάποιες από αυτές τις ζώνες εικονίζονται στο Σχ. 1.1. Παρόλο που οι αρχές προστασίας είναι σχετικά όμοιες, η κάθε μία από αυτές τις ζώνες έχει ηλεκτρονόμους ειδικά σχεδιασμένους για την πρωτεύουσα προστασία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του προστατευόμενου εξοπλισμού. Η προστασία κάθε ζώνης πρέπει να περιλαμβάνει και ηλεκτρονόμους που παρέχουν δευτερεύουσα προστασία στους ηλεκτρονόμους που προστατεύουν τον γειτονικό εξοπλισμό. Μερικοί ηλεκτρονόμοι είναι ρυθμισμένοι για να λειτουργούν μόνο για σφάλματα που συμβαίνουν μέσα στη ζώνη προστασίας τους. Άλλοι ηλεκτρονόμοι μπορούν να εντοπίζουν σφάλματα μέσα σε μία ορισμένη ζώνη (πρωτεύουσα), αλλά και έξω από αυτή συνήθως σε γειτονικές. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι αποτελούν δευτερεύουσα προστασία της γειτονικής ζώνης που καλύπτουν. Είναι σημαντικό να απομονώνεται κάθε σφάλμα, ακόμα και όταν η πρωτεύουσα προστασία δεν λειτουργήσει, για αυτό κάθε στοιχείο του Σ.Η.Ε. πρέπει να προστατεύεται από ηλεκτρονόμους πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας.

Η προστασία κάθε ζώνης πρέπει να επικαλύπτεται με τη γειτονική της, αλλιώς θα δημιουργηθεί κενό πρωτεύουσας προστασίας μεταξύ των ζωνών. Η επικάλυψη αυτή επιτυγχάνεται με τη θέση των μετασχηματιστών εντάσεως (Current Transformers - CTs), την κύρια πηγή πληροφοριών του συστήματος για τους ηλεκτρονόμους. Οι ζώνες προστασίας επικαλύπτονται σε συγκεκριμένα σημεία, ώστε όταν ένα σφάλμα συμβεί στις επικαλυπτόμενες περιοχές να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτρονόμοι δύο διαφορετικών ζωνών προστασίας. Η επικάλυψη επιτυγχάνεται συνδέοντας τους ηλεκτρονόμους με τους αντίστοιχους μετασχηματιστές εντάσεως, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2.



Σχήμα 1.1: Ζώνες πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [2]



Σχήμα 1.2: Επικάλυψη των ζωνών προστασίας [7]

2 Είδη σφαλμάτων

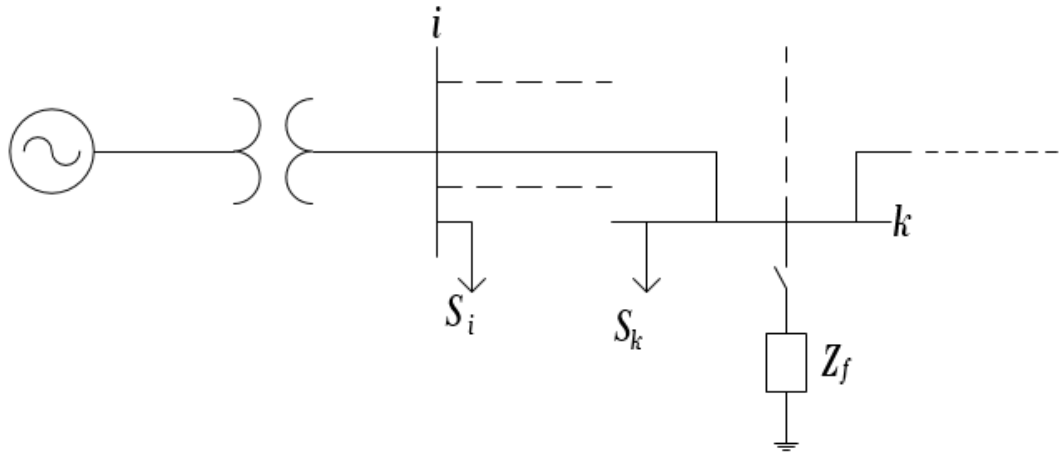
2.1 Συμμετρικά Σφάλματα

Η μελέτη σφαλμάτων αποτελεί σημαντικό μέρος της ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα περιλαμβάνει τον καθορισμό των τάσεων στους ζυγούς και των ρευμάτων στις γραμμές, κατά τη διάρκεια διαφόρων ειδών σφαλμάτων. Αυτά χωρίζονται σε τριφασικά συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων χρησιμεύουν στην κατάλληλη ρύθμιση και επιλογική συνεργασία των ηλεκτρονόμων του δικτύου. Η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων σχηματίζεται και χρησιμοποιείται για τον συστηματικό υπολογισμό των τάσεων και των ρευμάτων κατά το βραχυκύκλωμα, για αυτό είναι σημαντικό να δειχθεί η κατασκευή της μήτρας βήμα-βήμα, καθώς και οι μαθηματικοί τύποι για τις τάσεις και τα ρεύματα που απορρέουν από αυτήν.

2.1.1 Συστηματική ανάλυση τριφασικού σφάλματος με χρήση της μήτρας σύνθετων αντιστάσεων

Έστω ένας ζυγός σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας n -ζυγών, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1. Το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες ισορροπίας και το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίησή του. Κάθε γεννήτρια αναπαρίσταται από μία πηγή εναλλασσόμενης τάσεως, την οποία ακολουθεί μία κατάλληλη αντίδραση (X''_d, X'_d , ή X_d). Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με το ισοδύναμο κύκλωμα π και όλες οι σύνθετες αντιστάσεις εκφράζονται ανά μονάδα σε κοινή βάση ισχύος. Ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα θα εφαρμοσθεί στον ζυγό k με αντίσταση σφάλματος Z_f . Οι τάσεις στους ζυγούς προ του σφάλματος προέρχονται από τη λύση του προβλήματος της ροής φορτίου και παρουσιάζονται από το διάνυσμα:

$$\mathbf{V}_{bus}(0) = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$



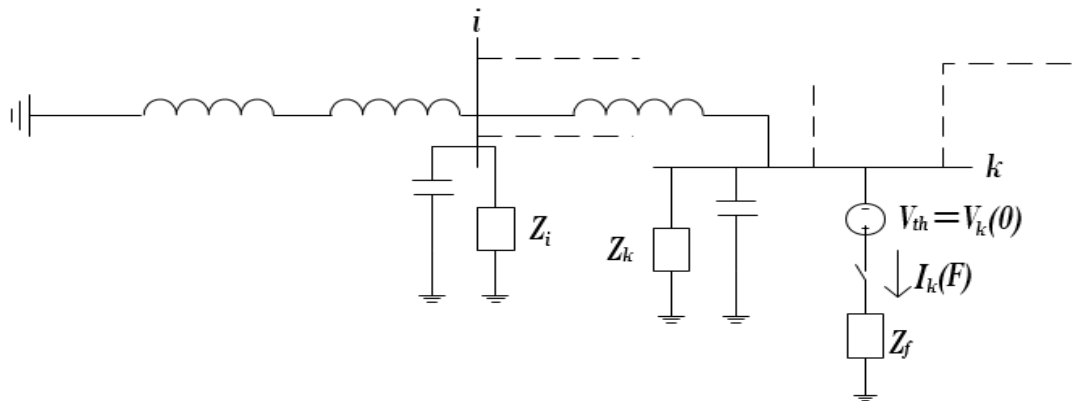
Σχήμα 2.1: Ένας τυπικός ζυγός σε ένα Σ.Η.Ε. [3]

Όπως έχει αναφερθεί, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από τα κανονικής λειτουργίας. Παρόλα αυτά, μία καλή προσέγγιση είναι να αναπαρασταθούν τα φορτία στους ζυγούς με μία σταθερή τιμή σύνθετης αντίστασης, υπολογισμένη σύμφωνα με τις τάσεις προ του σφάλματος π.χ.:

$$Z_{iL} = \frac{|V_i(0)|^2}{S_L^*} \quad (2.2)$$

Οι αλλαγές στο δίκτυο που οφείλονται στην αντίσταση σφάλματος Z_f είναι ισοδύναμες με αυτές που προκαλούνται με την προσθήκη της τάσης $V_k(0)$ με όλες τις άλλες πηγές βραχυκυκλωμένες. Μηδενίζοντας όλες τις πηγές τάσης και αναπαριστώντας όλα τα στοιχεία και τα φορτία με τις κατάλληλες σύνθετες αντιστάσεις, δημιουργείται το κύκλωμα Thévenin που φαίνεται στο Σχ. 2.2. Οι αλλαγές στις τάσεις των ζυγών που προκαλούνται από το σφάλμα περιγράφονται από το διάνυσμα:

$$\Delta \mathbf{V}_{bus}(0) = \begin{bmatrix} \Delta V_1(0) \\ \vdots \\ \Delta V_k(0) \\ \vdots \\ \Delta V_n(0) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα Thévenin του Σ.Η.Ε. [3]

Από το θεώρημα Thévenin, οι τάσεις των ζυγών κατά το σφάλμα προκύπτουν από την υπέρθεση των τάσεων προ του σφάλματος και τις αλλαγές των τάσεων που προαναφέρθηκαν, δηλαδή:

$$\mathbf{V}_{bus}(F) = \mathbf{V}_{bus}(0) + \Delta \mathbf{V}_{bus} \quad (2.4)$$

Τα ρεύματα που εγγέονται στους ζυγούς εκφράζονται βάσει των τάσεων στους ζυγούς:

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V}_{bus} \quad (2.5)$$

όπου \mathbf{I}_{bus} είναι το διάνυσμα ρευμάτων που εισέρχεται στους ζυγούς και \mathbf{Y}_{bus} η μήτρα αγωγιμοτήτων.

Τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας είναι το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στον εκάστοτε ζυγό:

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^m y_{ij} + y_i \quad j \neq i \quad (2.6)$$

Τα μη-διαγώνια στοιχεία ισούνται με την αγωγιμότητα μεταξύ των ζυγών με αντίθετο πρόσημο:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.7)$$

όπου y_{ij} είναι η αγωγιμότητα της γραμμής $i - j$.

Στο κύκλωμα του Σχ. 2.2, το ρεύμα που εισέρχεται σε κάθε ζυγό είναι μηδενικό, εκτός από τον ζυγό όπου συμβαίνει το σφάλμα. Εφόσον το ρεύμα στον βραχυκυκλωμένο ζυγό εξέρχεται από τον ζυγό, θεωρείται ότι έχει αρνητικό πρόσημο καθώς εισέρχεται στον ζυγό k . Έτσι, η εξίσωση πινάκων που εφαρμόζεται σε αυτό το κύκλωμα γίνεται:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{kk} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nk} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ή

$$\mathbf{I}_{bus}(F) = \mathbf{Y}_{bus} \Delta \mathbf{V}_{bus} \quad (2.9)$$

Λύνοντας ως προς $\Delta \mathbf{V}_{bus}$, προκύπτει:

$$\Delta \mathbf{V}_{bus} = \mathbf{Z}_{bus} \mathbf{I}_{bus}(F) \quad (2.10)$$

όπου $\mathbf{Z}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}^{-1}$ γνωστή και ως μήτρα σύνθετων αντιστάσεων. Εισάγοντας την (2.10) στην (2.4), το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών κατά το σφάλμα προκύπτει:

$$\mathbf{V}_{bus}(F) = \mathbf{V}_{bus}(0) + \mathbf{Z}_{bus} \mathbf{I}_{bus}(F) \quad (2.11)$$

Γράφοντας την παραπάνω εξίσωση πινάκων σε μορφή στοιχείων, προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ \vdots \\ V_k(F) \\ \vdots \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{k1} & \cdots & Z_{kk} & \cdots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nk} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Εφόσον μόνο ένα στοιχείο είναι μη μηδενικό στο διάνυσμα ρευμάτων, η εξίσωση της σειράς k στην (2.12) είναι:

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(F) \quad (2.13)$$

Επιπλέον, από το κύκλωμα του Σχ. 2.2, ισχύει ότι:

$$V_k(F) = Z_f I_k(F) \quad (2.14)$$

Για σφάλμα χωρίς αντίσταση ισχύει ότι $Z_f = 0$ και $V_k(F) = 0$. Αντικαθιστώντας το $V_k(F)$ από την (2.14) στην (2.13) και λύνοντας ως προς το ρεύμα σφάλματος, προκύπτει:

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (2.15)$$

Συνεπώς, για σφάλμα στον ζυγό k χρειάζεται μόνο το στοιχείο Z_{kk} από τη μήτρα σύνθετων αντιστάσεων. Αυτό το στοιχείο είναι πράγματι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thévenin που «βλέπει» ο βραχυκυκλωμένος ζυγός. Επιπλέον, γράφοντας την i -οστή εξίσωση της (2.12), ισχύει ότι:

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας το $I_k(F)$, η τάση στον ζυγό i κατά το σφάλμα είναι:

$$V_i(F) = V_i(0) - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + Z_f} V_k(0) \quad (2.17)$$

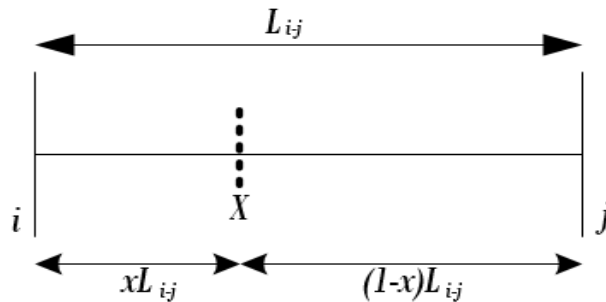
Με τη γνώση των τάσεων στους ζυγούς κατά το σφάλμα, είναι δυνατός ο υπολογισμός των ρευμάτων σφάλματος σε όλες τις γραμμές. Για τη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς i και j με σύνθετη αντίσταση z_{ij} , το ρεύμα βραχυκύκλωσης που ρέει στη γραμμή (με θετική φορά από το i στο j) είναι:

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{z_{ij}} \quad (2.18)$$

Σημειώνεται ότι με τη γνώση της μήτρας σύνθετων αντιστάσεων, τα ρεύματα σφάλματος και οι τάσεις των ζυγών μπορούν εύκολα να βρεθούν για οποιονδήποτε ζυγό που δέχεται το σφάλμα στο δίκτυο. Αυτή η μέθοδος είναι απλή και πρακτική, αφού όλοι οι υπολογισμοί προκύπτουν από τη μήτρα Z_{bus} .

2.1.2 Τροποποίηση μήτρας αγωγιμοτήτων για συμμετρικό σφάλμα ανάμεσα σε δύο ζυγούς

Έστω ότι συμβαίνει σφάλμα στη γραμμή $i - j$ σε σημείο με απόσταση xL_{i-j} από τον ζυγό i , όπου x το ποσοστό της γραμμής που γίνεται το σφάλμα (Σχ. 2.3). Η προτεινόμενη μέθοδος, είναι να θεωρηθεί υποθετικός ζυγός X στη θέση όπου γίνεται το σφάλμα και να ενημερωθεί η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων για τον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος που ρέουν στις γραμμές με τη χρήση του τροποποιημένου Z_{bus} .



Σχήμα 2.3: Προσθήκη υποθετικού ζυγού στη θέση σφάλματος [4]

Εφόσον η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων υπολογίζεται αντιστρέφοντας τη μήτρα αγωγιμοτήτων, πρώτα θα βρεθούν οι αλλαγές που χρειάζεται να γίνουν στη μήτρα Y_{bus} , ώστε αντιστρέφοντάς τη να προκύψει η Z_{busnew} . Έστω ότι το Σ.Η.Ε. αποτελείται από N ζυγούς. Τότε, ο καινούριος ζυγός X θα είναι ο υπ' αριθμόν $N + 1$, οπότε η μήτρα αγωγιμοτήτων θα επεκταθεί κατά μία στήλη και μία γραμμή. Εάν για το Σ.Η.Ε. είναι γνωστές οι σύνθετες αντιστάσεις τότε οι καινούργιες αντιστάσεις που εμφανίζονται με την προσθήκη του ζυγού $N + 1$ θα είναι:

$$\begin{aligned} z_{i,N+1} &= xz_{ij} \\ z_{j,N+1} &= (1-x)z_{ij} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Οι αντίστοιχες καινούριες αγωγιμότητες θα είναι:

$$\begin{aligned} y_{i,N+1} &= \frac{1}{Z_{i,N+1}} \\ y_{j,N+1} &= \frac{1}{Z_{j,N+1}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Παρατηρώντας τη μήτρα Y_{bus} , τα στοιχεία που αλλάζουν για σφάλμα ανάμεσα στη γραμμή $i - j$ είναι τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned} Y_{ii\text{new}} &= Y_{ii} + Y_{ij} + y_{i,N+1} \\ Y_{jj\text{new}} &= Y_{jj} + Y_{ji} + y_{j,N+1} \\ Y_{ij\text{new}} &= Y_{j\text{inew}} = 0 \\ Y_{i,N+1\text{new}} &= Y_{N+1,i\text{new}} = -y_{i,N+1} \\ Y_{j,N+1\text{new}} &= Y_{N+1,j\text{new}} = -y_{j,N+1} \\ Y_{N+1,N+1\text{new}} &= y_{i,N+1} + y_{j,N+1} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Συνεπώς, υπολογίζεται και η $Z_{bus\text{new}} = Y_{bus\text{new}}^{-1}$.

Αυτή η διαδικασία σε μία μελέτη προστασίας πρέπει να γίνεται σε όλες τις πιθανές θέσεις σφάλματος, δηλαδή σε όλες τις γραμμές του δικτύου και μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο. Η διαδικασία υπολογισμού των ρευμάτων που βλέπει ο κάθε ηλεκτρονόμος περιέχει τις εξισώσεις που περιγράφηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, βρίσκεται το ρεύμα σφάλματος I_F από την (2.15), όπου το Z_{kk} αντικαθίσταται με το $Z_{N+1,N+1}$ εφόσον το σφάλμα γίνεται στον υποτιθέμενο καινούριο ζυγό, και έπειτα υπολογίζονται οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς για τη συγκεκριμένη θέση σφάλματος από την (2.16), όπου αντί για Z_{ik} τοποθετείται το $Z_{i,N+1}$. Τέλος, υπολογίζονται τα ρεύματα σε όλες τις γραμμές από την (2.18), γνωρίζοντας έτσι τι ρεύμα «βλέπει» ο κάθε ηλεκτρονόμος και συνεπώς μπορούν να ρυθμιστούν με τη μέθοδο που θα παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 5.

2.2 Ασύμμετρα σφάλματα

Τα περισσότερα σφάλματα που εμφανίζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ασύμμετρα. Τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα μπορεί να είναι μονοφασικά προς γη, διφασικά χωρίς γη ή διφασικά προς γη. Σε όλες τις περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων μπορεί να εμπεριέχεται και αντίσταση σφάλματος. Τα σφάλματα των ανοιχτών αγωγών αναφέρονται στις περιπτώσεις διακοπής ενός ή δύο αγωγών φάσεων, στο άνοιγμα μονοπολικού ή διπολικού διακόπτη ή τήξεις ασφαλειών που δεν ανοίγουν τις τρεις φάσεις ταυτόχρονα. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των τάσεων και των ρευμάτων σε όλα τα σημεία του δικτύου μετά την εμφάνιση του σφάλματος είναι η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών.

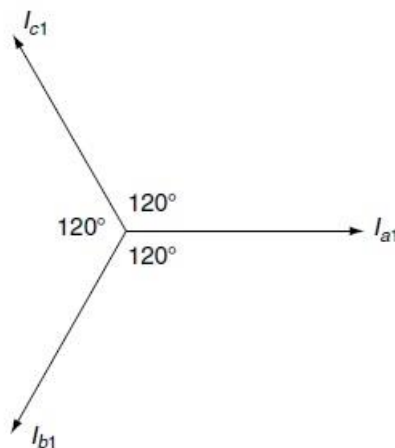
2.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία για την ανάλυση ασύμμετρων κυκλωμάτων είναι η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών την οποία ανέπτυξε ο Fortescue [5]. Αποδεικνύεται ότι ένα ασύμμετρο σύστημα n φασικών διανυσμάτων μπορεί να αναλυθεί σε n συστήματα συμμετρικών φασικών διανυσμάτων, τα οποία αποκαλούνται συμμετρικές συνιστώσες των πραγματικών φασικών διανυσμάτων. Στην περίπτωση των τριφασικών συστημάτων, τα τρία ασύμμετρα φασικά διανύσματα μπορούν να αναλυθούν σε τρία τριφασικά συμμετρικά συστήματα φασιθετών. Τα συστήματα συμμετρικών συνιστωσών αναλύονται παρακάτω.

2.2.1.1 Σύστημα θετικής ακολουθίας

Το σύστημα θετικής ακολουθίας αποτελείται από τρία φασικά διανύσματα ρευμάτων και τάσεων που τροφοδοτούνται από τις γεννήτριες του συστήματος. Είναι ίσου μέτρου, γωνίας που διαφέρει το ένα από το άλλο κατά 120° και περιστρέφονται ωρολογιακά με τη συχνότητα του συστήματος. Η θετική ακολουθία συμβολίζεται ως $+$ ή 1 . Στο Σχ. 2.4 φαίνεται το σύνολο φασιθετών ρευμάτων θετικής ακολουθίας σε ένα σύστημα που η ακολουθία φάσεων είναι a, b, c . Για να απεικονισθεί καλύτερα η διαφορά γωνίας των 120° χρησιμοποιείται ένας τελεστής μοναδιαίου μέτρου και γωνίας 120° , ο οποίος ορίζεται ως a και για τον οποίο ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866 \\ a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 + j0 \end{aligned} \quad (2.22)$$



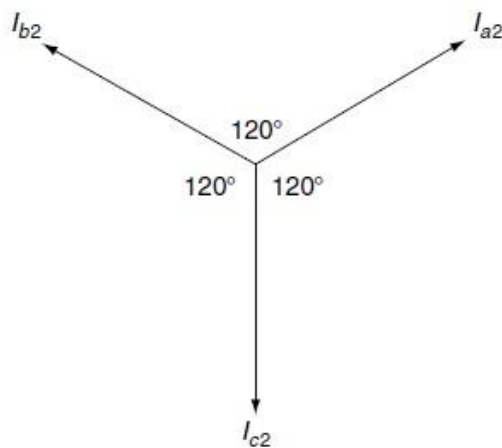
Σχήμα 2.4: Ρεύματα θετικής ακολουθίας

Έτσι, το σύστημα θετικής ακολουθίας καθορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_1, V_{a1} = V_1 \\ I_{b1} &= a^2 I_{a1} = a^2 I_1 = I_1 \angle 240^\circ, V_{b1} = a^2 V_1 = V_1 \angle 240^\circ \\ I_{c1} &= a I_{a1} = a I_1 = I_1 \angle 120^\circ, V_{c1} = a V_1 = V_1 \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.2.1.2 Σύστημα αρνητικής ακολουθίας

Το σύστημα αρνητικής ακολουθίας αποτελείται από τρία φασικά διανύσματα ίσου μέτρου και γωνίας που διαφέρουν οι φασιθέτες μεταξύ τους κατά 120° , αλλά η περιστροφή τους γίνεται όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5. Έτσι, αν η θετική ακολουθία είναι a, b, c, η αρνητική ακολουθία θα είναι a, c, b. Συμβολίζεται ως -2 .



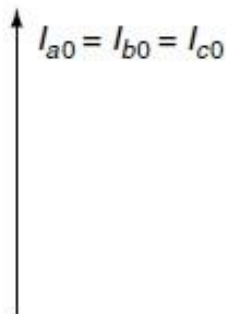
Σχήμα 2.5: Ρεύματα αρνητικής ακολουθίας

Έτσι, το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας καθορίζεται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} I_{a2} &= I_2, V_{a2} = V_2 \\ I_{b2} &= \alpha I_{a2} = \alpha I_2 = I_2 < 120^\circ, V_{b2} = \alpha V_2 = V_2 < 120^\circ \\ I_{c2} &= \alpha^2 I_{a2} = \alpha^2 I_2 = I_2 < 240^\circ, V_{c2} = \alpha^2 V_2 = V_2 < 240^\circ \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.2.1.3 Σύστημα μηδενικής ακολουθίας

Το σύστημα μηδενικής ακολουθίας αποτελείται από τρία φασικά διανύσματα ίσου μέτρου και μηδενικής γωνίας όπως φαίνεται στο Σχ. 2.6. Συμβολίζεται ως 0.



Σχήμα 2.6: Ρεύματα μηδενικής ακολουθίας

Το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας καθορίζεται από τις εξής σχέσεις:

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0, V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη σφαλμάτων

Τα διανύσματα κάθε συστήματος είναι ίσα κατά μέτρο όπως αναφέρθηκε και με σταθερή φασική απόκλιση, αλλά αυτό δεν ισχύει σε σχέση με τα αντίστοιχα διανύσματα των άλλων συστημάτων. Για αυτόν τον λόγο αρκεί να υπολογιστούν οι συμμετρικές συνιστώσες για μία μόνο φάση (συνήθως επιλέγεται η a) και στη συνέχεια οι συνιστώσες των άλλων φάσεων προκύπτουν με κατάλληλη αλλαγή φάσης. Έτσι, όταν παραλείπεται η αναφορά της φάσης στους υπολογισμούς (όπως παραπάνω στα μεγέθη I_1 και V_1), εννοείται η φάση a .

Οποιοδήποτε ρεύμα ή τάση μπορεί να εκφραστεί σε συμμετρικές συνιστώσες σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2, V_a = V_0 + V_1 + V_2 \\ I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2, V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \\ I_c &= I_0 + a I_1 + a^2 I_2, V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να καθοριστούν αντίστοιχα τα μεγέθη συμμετρικών συνιστωσών από τα μεγέθη του τριφασικού συστήματος:

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c), V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ I_1 &= \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c), V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) \\ I_2 &= \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c), V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Σε μορφή πινάκων για καλύτερη απεικόνιση των παραπάνω εξισώσεων ισχύει ότι:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις συμπεριλαμβάνουν φασικά ρεύματα και τάσεις. Για τα ακολουθιακά μεγέθη ισχύουν οι νόμοι του Ohm και του Kirchhoff και έτσι μπορούν να παρασταθούν μέσω των ακολουθιακών κυκλωμάτων. Συνεπώς, τα κυκλώματα ακολουθίας είναι 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.

Αν ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα αναλυθεί σε συμμετρικές συνιστώσες, τότε τα φασικά μεγέθη του συστήματος θα ταυτίζονται με τις συνιστώσες θετικής ακολουθίας και τα μεγέθη αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας θα είναι μηδενικά. Αυτό γίνεται αντιληπτό τόσο από την περιγραφή των ακολουθιακών συστημάτων, όσο και από τις εξισώσεις (2.27) και

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη σφαλμάτων

(2.28). Άρα, σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα στο Σ.Η.Ε. σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας υπάρχουν μόνο τάσεις θετικής ακολουθίας.

Κάθε ακολουθιακό κύκλωμα αναπαρίσταται από το ισοδύναμο Thévenin του δικτύου στο σημείο του σφάλματος. Το ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας περιλαμβάνει μία πηγή τάσης E_1 και τη σύνθετη αντίσταση Z_1 που βλέπει το δίκτυο προς το σφάλμα, ενώ τα άλλα δύο κυκλώματα περιλαμβάνουν μόνο την ισοδύναμη αντίστοιχη αντίσταση (Z_2, Z_0), αφού το Σ.Η.Ε. παράγει μόνο τάσεις θετικής ακολουθίας. Οι αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας θεωρούνται συνήθως ίσες, ενώ για τον υπολογισμό της αντίστασης μηδενικής ακολουθίας λαμβάνονται υπόψιν μόνο τα γειωμένα σημεία στον υπολογισμό της αντίστασης.

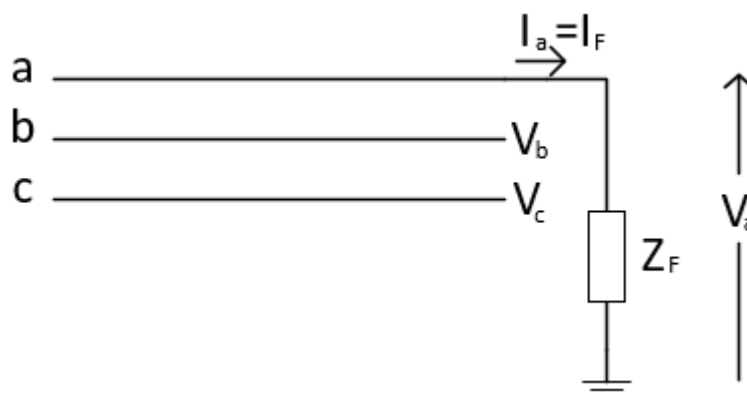
Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Καταγραφή των βασικών συνθηκών που ισχύουν για τα φασικά μεγέθη του συστήματος κατά το βραχυκύκλωμα ανάλογα με τον τύπο του
- Μετασχηματισμός των παραπάνω σε μεγέθη ακολουθίας, προς εύρεση σχέσεων μεταξύ τους, έτσι ώστε να κατασκευαστούν τα τρία κυκλώματα ακολουθίας και να διασυνδεθούν στο σημείο του σφάλματος
- Εύρεση των ισοδύναμων αντιστάσεων ακολουθίας Z_1, Z_2, Z_0 και της τάσης E_1
- Υπολογισμός των ρευμάτων και των τάσεων ακολουθίας από το κύκλωμα με τα διασυνδεδεμένα κυκλώματα ακολουθίας
- Μετασχηματισμός των παραπάνω σε φασικά ρεύματα και τάσεις του τριφασικού συστήματος

2.2.2 Είδη βραχυκυκλωμάτων

2.2.2.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα - SLG

Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα, που είναι το πιο συνηθισμένο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, προκαλείται από την πτώση κεραυνών, όταν ο αγωγός έρθει σε επαφή με κάποιο γειωμένο αντικείμενο ή αν ο αγωγός πέσει στο έδαφος.



Σχήμα 2.7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στα φάση a με αντίσταση προς γη

Οι βασικές συνθήκες του μονοφασικού βραχυκυκλώματος στη φάση a με αντίσταση γης Z_F είναι:

$$V_a = I_a Z_F$$

$$I_b = I_c = 0$$

Το ρεύμα σφάλματος θα είναι:

$$I_F = I_a$$

Αν οι παραπάνω σχέσεις μετασχηματιστούν βάσει των εξισώσεων (2.27) προκύπτει:

$$V_a = I_a Z_F \Rightarrow V_0 + V_1 + V_2 = (I_0 + I_1 + I_2) Z_F$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0$$

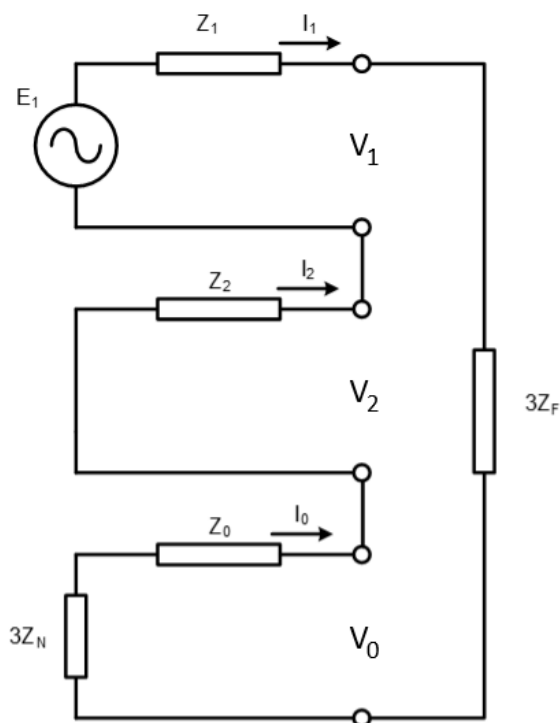
$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = 0$$

Μετά από πράξεις προκύπτει:

$$I_0 = I_1 = I_2$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = 3I_0 Z_F$$

Βάσει των δύο παραπάνω μαθηματικών τύπων προκύπτει η εξής σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας:



Σχήμα 2.8: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Η αντίσταση Z_N που εμφανίζεται στο Σχ. 2.8 ουσιαστικά είναι η γείωση ουδετέρου μέσω αντιστάσεως σε περίπτωση αστέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη σφαλμάτων

Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα μπορούν να βρεθούν όλα τα μεγέθη ακολουθίας και έπειτα από αυτά, με βάση την εξίσωση (2.27), μπορούν να υπολογιστούν όλες οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Επομένως, προκύπτει:

$$\begin{aligned} I_1 = I_2 = I_0 &= \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F} \\ V_1 &= E_1 - I_1 Z_1 \\ V_2 &= -I_2 Z_2 \\ V_0 &= -I_0 (Z_0 + 3Z_N) \end{aligned}$$

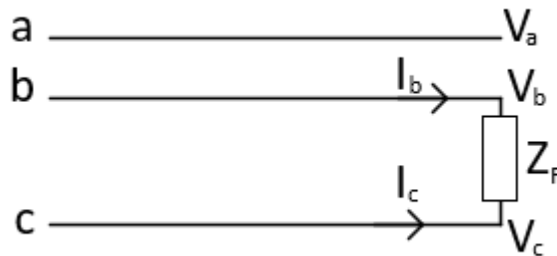
Από τα παραπάνω μεγέθη ακολουθίας υπολογίζονται τα αντίστοιχα φασικά μεγέθη I_a, I_b, I_c, V_a, V_b και V_c . Το ρεύμα I_F θα προκύψει μετά από πράξεις ίσο με:

$$I_F = I_a = \frac{3E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F} \quad (2.29)$$

Προφανώς, αν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος προς γη Z_F ή αντίσταση ουδετέρου Z_N , οι τιμές αυτές στους παραπάνω τύπους μηδενίζονται.

2.2.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c χωρίς γη - LL

Αυτός ο τύπος σφάλματος συμβαίνει όταν δύο αγωγοί έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, για αυτό και τις περισσότερες φορές η αιτία πρόκλησής του είναι ο δυνατός άνεμος.



Σχήμα 2.9: Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b-c χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος

Οι βασικές συνθήκες του διφασικού βραχυκυκλώματος με αντίσταση σφάλματος Z_F είναι:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b + I_c &= 0 \\ V_b - V_c &= I_b Z_F \\ I_F &= I_b \end{aligned}$$

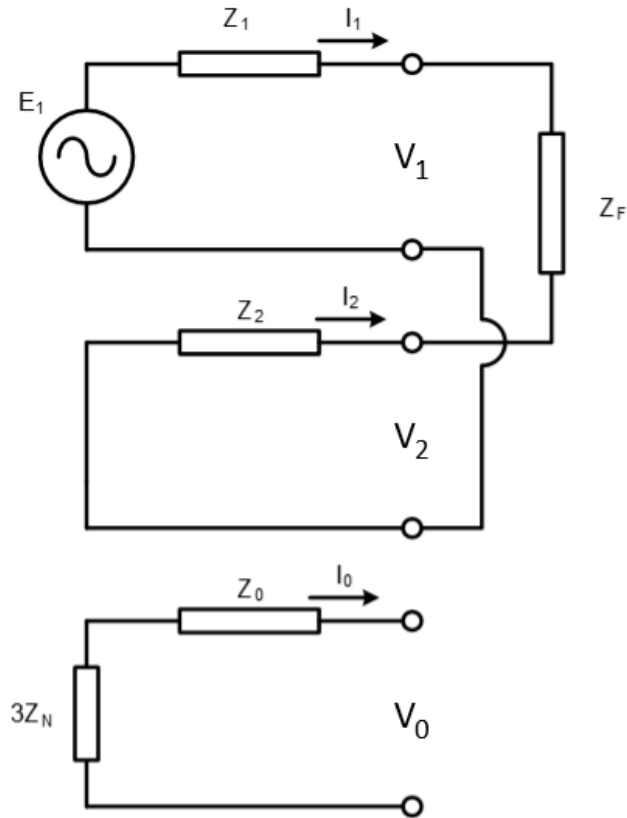
Αν οι παραπάνω σχέσεις μετασχηματιστούν βάσει των εξισώσεων (2.26) προκύπτουν:

$$I_0 = 0$$

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$V_1 - V_2 = I_1 Z_F$$

Συνεπώς προκύπτει η παρακάτω σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας:



Σχήμα 2.10: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Από το παραπάνω κύκλωμα προκύπτουν τα μεγέθη ακολουθίας:

$$I_1 = -I_2 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

$$I_0 = 0$$

$$V_1 = E_{a1} - I_1 Z_1$$

$$V_2 = -I_2 Z_2$$

$$V_0 = 0$$

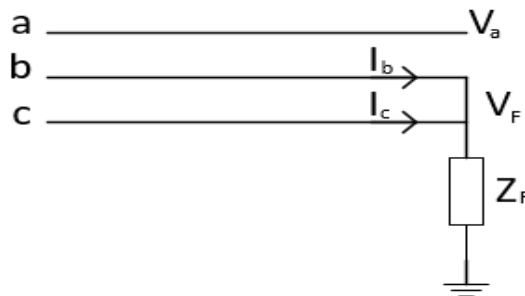
Από τα παραπάνω μεγέθη ακολουθίας μπορούν να βρεθούν τα αντίστοιχα φασικά μεγέθη. Το ρεύμα I_F θα προκύψει μετά από πράξεις ίσο με:

$$I_F = I_b = \frac{-j\sqrt{3}E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (2.30)$$

Προφανώς, αν δεν υπάρχει αντίσταση σφάλματος μεταξύ των φάσεων b και c, η τιμή αυτή στους παραπάνω τύπους μηδενίζεται.

2.2.2.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c με γη - LLG

Αυτό το σφάλμα συμβαίνει όταν έρθουν σε επαφή δύο φάσεις μεταξύ τους αλλά και με τη γη, π.χ. με την πτώση ενός δέντρου.



Σχήμα 2.11: Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b-c με αντίσταση σφάλματος προς γη

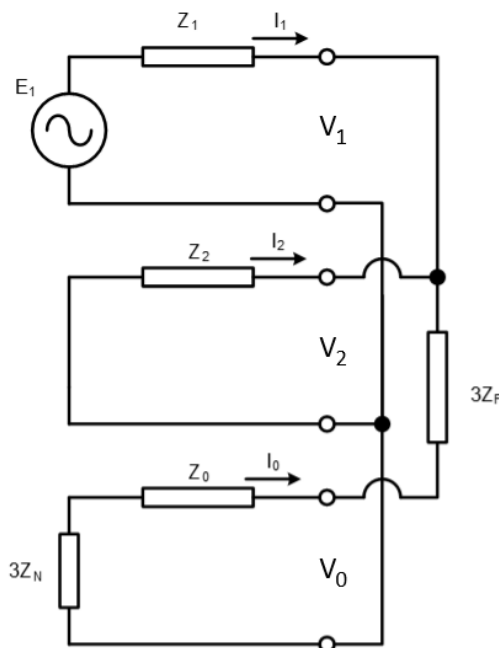
Οι βασικές συνθήκες του διφασικού βραχυκυκλώματος με γη με αντίσταση σφάλματος προς γη Z_F είναι:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ V_b &= V_c = (I_b + I_c)Z_F \\ I_F &= I_b + I_c \end{aligned}$$

Αναλύοντας τις συνθήκες του σφάλματος σε συμμετρικές συνιστώσες προκύπτουν τα εξής:

$$\begin{aligned} I_0 + I_1 + I_2 &= 0 \\ V_1 &= V_2 \\ V_0 - V_2 &= 3I_0Z_F \end{aligned}$$

Βάσει των παραπάνω, η σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας θα είναι:



Σχήμα 2.12: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Μετά από κυκλωματική ανάλυση του παραπάνω προκύπτουν:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_N + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F}} = \frac{E_1(Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F)}{(Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_N + 3Z_F) + Z_1Z_2}$$

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

$$I_0 = -I_1 - I_2$$

$$V_1 = E_1 - I_1Z_1$$

$$V_2 = -I_2Z_2$$

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

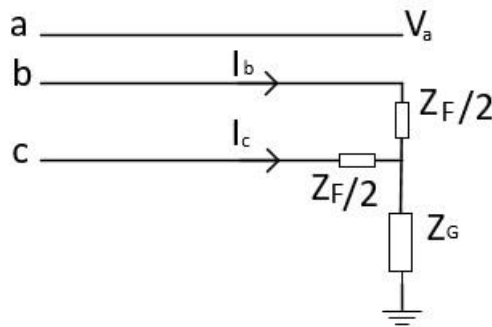
Από τα παραπάνω μεγέθη ακολουθίας μπορούν να βρεθούν τα αντίστοιχα φασικά μεγέθη. Το ρεύμα I_F θα προκύψει μετά από πράξεις ίσο με:

$$I_F = I_b + I_c = -\frac{3E_1Z_2}{Z_1Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_N + 3Z_F)} \quad (2.31)$$

Αν η αντίσταση σφάλματος προς γη είναι μηδενική αντικαθίσταται με μηδέν η τιμή της σε όλους τους τύπους.

2.2.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c με αντίσταση στις φάσεις προς γη

Ένας άλλος τύπος βραχυκυκλώματος που μπορεί να προκληθεί είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω σφάλματων.



Σχήμα 2.13: Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b-c με αντίσταση στις φάσεις προς γη

Οι βασικές συνθήκες του διφασικού βραχυκυκλώματος με γη με αντίσταση σφάλματος προς γη Z_G και αντίσταση Z_F μεταξύ των φάσεων b και c είναι:

$$I_a = 0$$

$$V_b - V_c = I_b \frac{Z_F}{2}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη σφαλμάτων

$$V_c - V_F = I_c \frac{Z_F}{2}$$

$$I_F = I_b + I_c$$

Πρώτα αναλύονται οι συνθήκες σφάλματος σε συμμετρικές συνιστώσες και έπειτα για τη διευκόλυνση των πράξεων ορίζονται τα εξής:

$$V'_1 = V_1 - I_1 \frac{Z_F}{2}, \quad V'_2 = V_2 - I_2 \frac{Z_F}{2}, \quad V'_0 = V_0 - I_0 \frac{Z_F}{2}$$

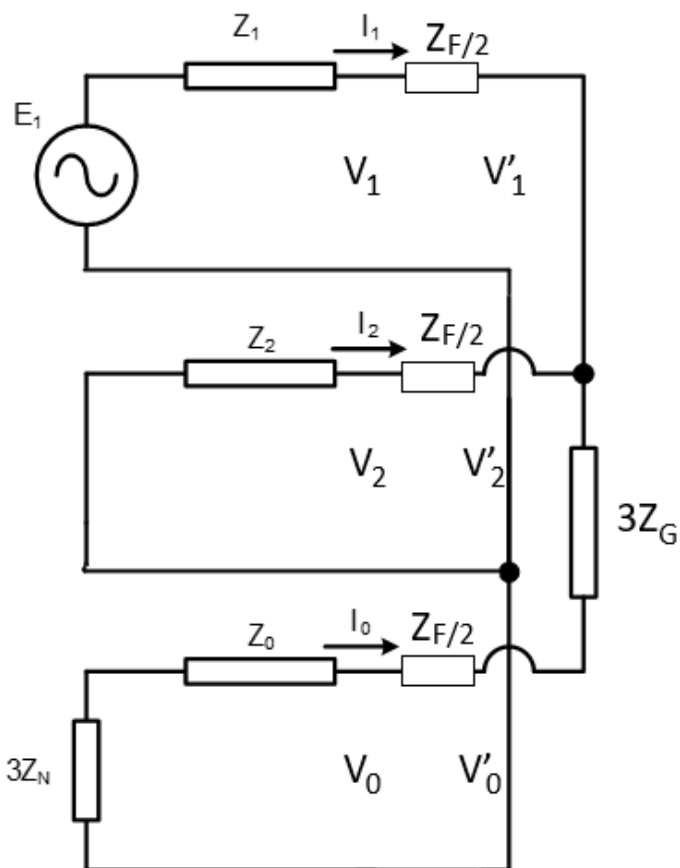
Με βάση τα παραπάνω, προκύπτουν τα εξής για τα κυκλώματα ακολουθίας:

$$V_1 - V_2 = (I_1 - I_2) \frac{Z_F}{2}$$

$$V'_0 - V'_1 = (3Z_G) I_0$$

$$V'_1 = V'_2$$

Επομένως, προκύπτει η παρακάτω σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας:



Σχήμα 2.14: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη με αντίσταση στις φάσεις

Μετά από ανάλυση του παραπάνω κυκλώματος προκύπτουν:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + \frac{Z_F}{2} + \frac{(Z_2 + \frac{Z_F}{2})(Z_0 + \frac{Z_F}{2} + 3Z_G + 3Z_N)}{Z_2 + \frac{Z_F}{2} + Z_0 + \frac{Z_F}{2} + 3Z_G + 3Z_N}} = \frac{E_1(Z_2 + Z_0 + Z_F + 3Z_G + 3Z_N)}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)(Z_0 + \frac{Z_F}{2} + 3Z_G + 3Z_N) + (Z_1 + \frac{Z_F}{2})(Z_2 + \frac{Z_F}{2})}$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0 + \frac{Z_F}{2} + 3Z_G + 3Z_N}{Z_0 + Z_2 + Z_F + 3Z_G + 3Z_N}$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2 + \frac{Z_F}{2}}{Z_0 + Z_2 + Z_F + 3Z_G + 3Z_N}$$

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

$$V_2 = -I_2 Z_2$$

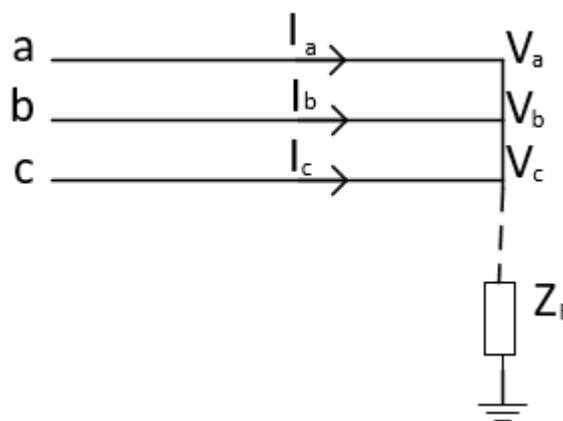
$$V_0 = -I_0 Z_0$$

Από τα παραπάνω μεγέθη ακολουθίας μπορούν να βρεθούν τα αντίστοιχα φασικά μεγέθη. Το ρεύμα I_F θα προκύψει μετά από πράξεις ίσο με:

$$I_F = I_b + I_c = - \frac{3E_1(Z_2 + \frac{Z_F}{2})}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)(Z_0 + \frac{Z_F}{2} + 3Z_G + 3Z_N) + (Z_1 + \frac{Z_F}{2})(Z_2 + \frac{Z_F}{2})}$$

2.2.2.5 Τριφασικό σφάλμα με γη ή χωρίς γη - LLL

Αυτός ο τύπος σφάλματος είναι ο πιο σπάνιος, αλλά είναι ο πιο σοβαρός, καθώς προκαλεί συνήθως τα πιο μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Για αυτό και τις περισσότερες φορές οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ρυθμίζονται με βάση αυτό το ρεύμα.



Σχήμα 2.15: Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

Οι συνθήκες του τριφασικού σφάλματος είναι:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

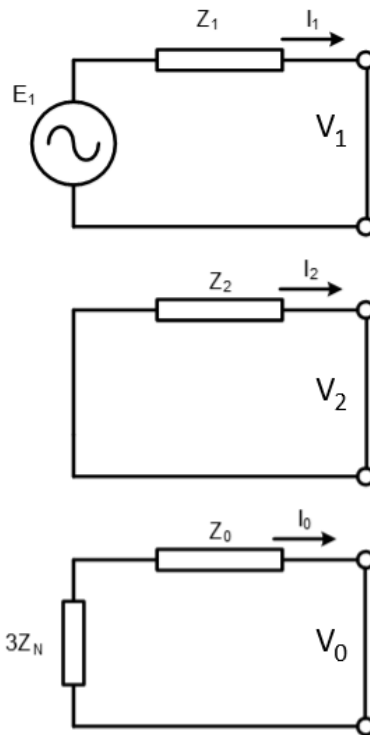
$$V_a = V_b = V_c = 0$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη σφαλμάτων

Από αυτές προκύπτει:

$$\begin{aligned}V_0 &= V_1 = V_2 = 0 \\I_0 &= I_2 = 0\end{aligned}$$

Έτσι, τα κυκλώματα είναι κλειστά λόγω συμμετρίας και προκύπτει η παρακάτω σύνδεση κυκλωμάτων:



Σχήμα 2.16: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν:

$$\begin{aligned}I_1 &= \frac{E_1}{Z_1} \\I_2 &= I_0 = 0 \\V_1 &= V_2 = V_0 = 0\end{aligned}$$

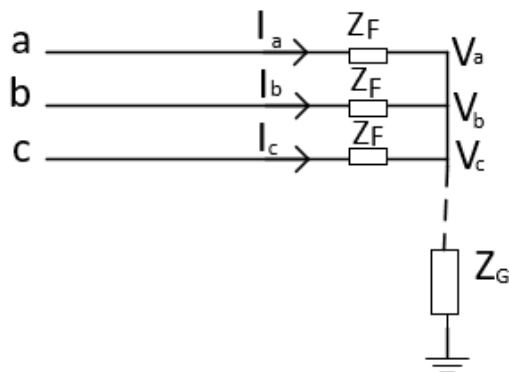
Από τα παραπάνω υπολογίζονται τα πραγματικά ρεύματα I_a, I_b, I_c , αφού οι τάσεις είναι μηδενικές.

Το ρεύμα σφάλματος I_F θα είναι:

$$I_F = I_1 = \frac{E_1}{Z_1} \quad (2.32)$$

2.2.2.6 Τριφασικό σφάλμα με αντιστάσεις στις φάσεις με γη ή χωρίς γη

Ένας άλλος τύπος τριφασικού βραχυκυκλώματος είναι το τριφασικό βραχυκύκλωμα με αντιστάσεις μεταξύ των φάσεων.



Σχήμα 2.17: Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη με αντίσταση στις φάσεις

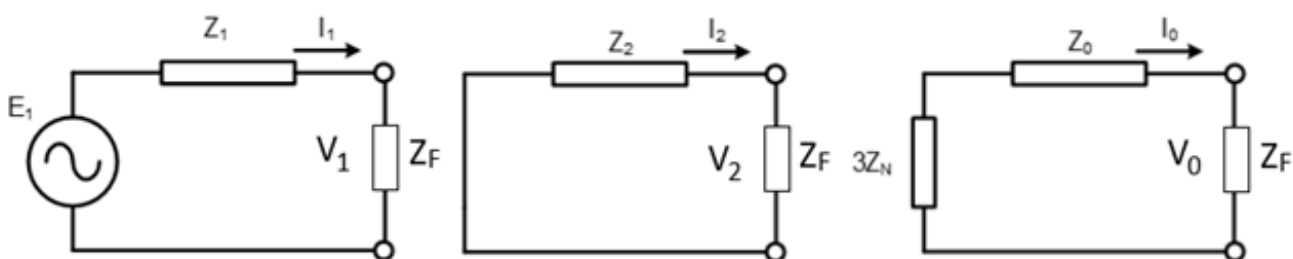
Οι βασικές συνθήκες του τριφασικού βραχυκυκλώματος με αντιστάσεις στις φάσεις Z_F με ή χωρίς γη είναι:

$$\begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= 0 \\ V_a &= I_a Z_F \\ V_b &= I_b Z_F \\ V_c &= I_c Z_F \end{aligned}$$

Αν μετασχηματιστούν οι παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν τα εξής:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_2 = 0 \\ I_0 &= I_2 = 0 \\ V_1 &= I_1 Z_F \end{aligned}$$

Έτσι, τα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι κλειστά και προκύπτει η παρακάτω σύνδεση κυκλωμάτων:



Σχήμα 2.18: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα με αντίσταση στις φάσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη σφαλμάτων

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν:

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

$$I_2 = I_0 = 0$$

$$V_1 = I_1 Z_F$$

$$V_2 = V_0 = 0$$

Από τα παραπάνω υπολογίζονται τα πραγματικά ρεύματα και οι τάσεις βάσει του μετασχηματισμού (2.25).

Το ρεύμα σφάλματος I_F θα είναι:

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

3 Είδη προστασίας

3.1 Εισαγωγή

Μέχρι τη δεκαετία του 1950 οι ηλεκτρονόμοι ήταν ηλεκτρομηχανικοί. Αποτελούνταν από μηχανικά μέρη (γρανάζια, ελατήρια, βραχίονες κτλ.), τα οποία συνεργάζονταν με ηλεκτρομαγνήτες που διεγείρονταν από το δευτερεύον ρεύμα των μετασχηματιστών έντασης. Η έξοδός τους ήταν μία σειρά από βοηθητικές επαφές που έκλειναν και έδιναν έτσι την εντολή να ανοίξει ο διακόπτης ισχύος. Από τη δεκαετία του 1960 και μετά οι ηλεκτρονόμοι αυτοί άρχισαν να αντικαθίστανται με ηλεκτρονικούς. Αποτελούνταν από ηλεκτρονικά στοιχεία στερεάς κατάστασης, δηλαδή τρανζίστορ και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Με την πρόοδο των ψηφιακών ηλεκτρονικών οι ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι έγιναν πολύ «έξυπνοι», δηλαδή συνδυάζουν πολλές λειτουργίες και πολλές ρυθμίσεις. Σήμερα οι ηλεκτρονόμοι είναι εξ' ολοκλήρου ψηφιακές συσκευές, οι οποίες περιέχουν τουλάχιστον έναν μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει το σύνολο των συμβατικών λειτουργιών του ηλεκτρονόμου προστασίας. Παράλληλα, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να επικοινωνεί με συστήματα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (SCADA), κάτι που είναι πολύ σημαντικό στα πολύπλοκα ηλεκτρικά δίκτυα που υπάρχουν σήμερα.

3.2 Προστασία υπερέντασης

3.2.1 Εισαγωγή

Τα πολύ υψηλά ρεύματα σφάλματος που εμφανίζονται στα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπισθεί η ύπαρξη σφάλματος και να λειτουργήσουν οι προστατευτικές διατάξεις, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα και την απαιτούμενη ακρίβεια που χρειάζεται ανά περίπτωση. Τέτοιοι τύποι προστασίας είναι οι θερμομαγνητικοί διακόπτες, οι διακόπτες ισχύος (Circuit Breakers - CB), οι ασφάλειες και οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης. Οι δύο πρώτοι τύποι έχουν απλές ρυθμίσεις λειτουργίας και κυρίως χρησιμοποιούνται στην προστασία εξοπλισμού χαμηλής τάσης. Οι ασφάλειες χρησιμοποιούνται επίσης συχνά στη χαμηλή τάση, ειδικά για την προστασία γραμμών και μετασχηματιστών διανομής.

Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης, είναι η πιο συνηθισμένη μορφή προστασίας που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση μεγάλων ρευμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι με τον όρο υπερένταση εννοούνται ρεύματα έντασης πολλαπλάσια του ονομαστικού ($> 2I_N$), τα οποία εμφανίζονται κυρίως υπό συνθήκες σφαλμάτων, ενώ με τον όρο υπερφόρτιση εννοούνται ρεύματα έντασης λίγο μεγαλύτερα του ονομαστικού ($< 2I_N$), τα οποία εμφανίζονται π.χ. κατά την εκκίνηση κινητήρων. Ωστόσο, οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων που επιλέγονται σε κάποιες περιπτώσεις αντιμετωπίζουν τόσο τις συνθήκες υπερφόρτισης όσο και τις συνθήκες υπερέντασης.

3.2.2 Επιλογή του εξοπλισμού προστασίας

Για την επιλογή τόσο των διακοπών ισχύος όσο και των μετασχηματιστών εντάσεως είναι απαραίτητη τόσο η ανάλυση μόνιμης κατάστασης όσο και η ανάλυση βραχυκυκλωμάτων. Για την προστασία κάθε γραμμής ενός ακτινικού δικτύου πρέπει να υπολογιστούν το μέγιστο και το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος. Το μέγιστο ρεύμα σφάλματος χρειάζεται για την επιλογή των διακοπών ισχύος στα άκρα των γραμμών, ενώ το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος χρησιμοποιείται για την επιλογή των αντίστοιχων μετασχηματιστών εντάσεως και τον έλεγχο της διακριτικότητας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης, δηλαδή της ικανότητάς τους να διακρίνουν μεταξύ σφάλματος ή μίας υπερβάσεως οφειλόμενης σε μεταβατική κατάσταση.

Οι μετασχηματιστές εντάσεως αποτελούνται από ένα πρωτεύον και ένα ή περισσότερα (συνήθως δύο) δευτερεύοντα τυλίγματα. Το ένα δευτερεύον τυλίγμα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση με ονομαστικό ρεύμα 5A ή 1A των οργάνων μέτρησης όπως αμπερόμετρα, μετρητές ισχύος και μετρητές ενέργειας. Το άλλο δευτερεύον τυλίγμα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση με ονομαστικό ρεύμα 5A ή 1A των ηλεκτρονόμων προστασίας. Για την επιλογή των CTs πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι ακόλουθες παράμετροι [6]:

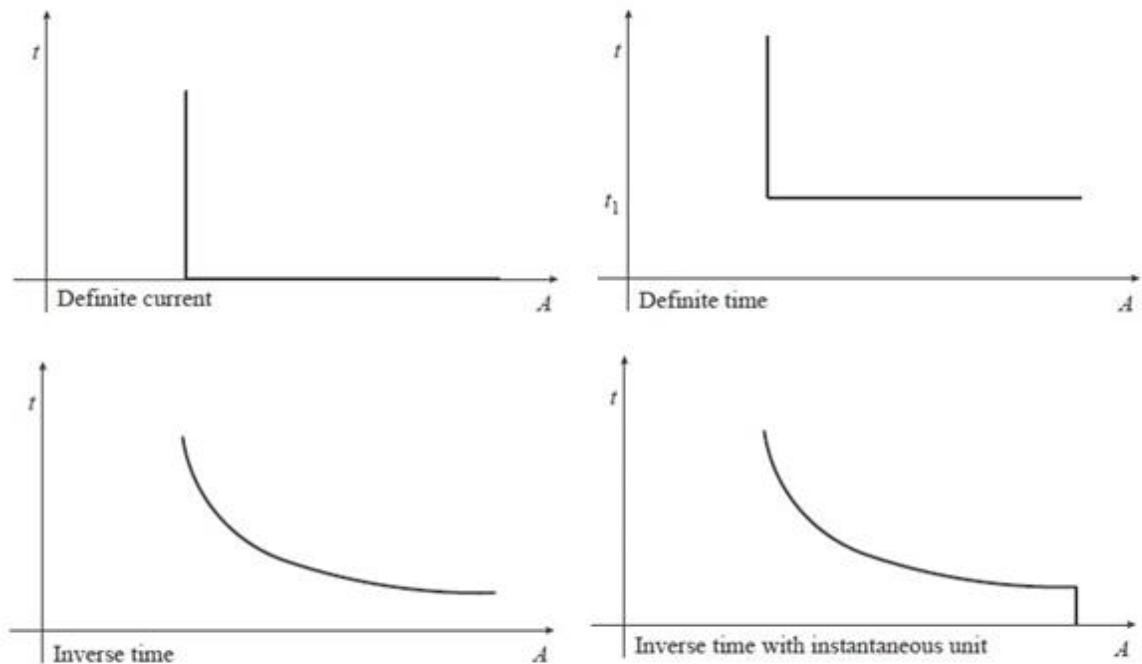
- Το ρεύμα στο πρωτεύον του CT πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα της γραμμής σε καταστάσεις ομαλής φόρτισης ή αποδεκτών υπερφορτίσεων.
- Το ρεύμα στο δευτερεύον του CT πρέπει να ταιριάζει με το αναγραφόμενο ρεύμα λειτουργίας του χρησιμοποιούμενου ηλεκτρονόμου υπερέντασης (5A ή 1A).
- Πρέπει να αποφεύγονται φαινόμενα κορεσμού στους CTs όταν αυτοί διαρρέονται από μέγιστα ρεύματα σφάλματος.

Για την επιλογή των διακοπών ισχύος πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα ακόλουθα:

- Το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να αποκόψουν οι διακόπτες ισχύος πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα σφάλματος που μπορεί να προκύψει για το δίκτυο.
- Ο μέγιστος χρόνος λειτουργίας ενός διακόπτη ισχύος πρέπει να είναι γνωστός εκ των προτέρων για τον σωστό καθορισμό της απόκρισης των συνδεδεμένων ηλεκτρονόμων υπερέντασης.

3.2.3 Τύποι ηλεκτρονόμων υπερέντασης

Με βάση τη χαρακτηριστική λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες: σταθερού ρεύματος ή στιγμιαίοι, σταθερού χρόνου και αντιστρόφου χρόνου [7]. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αυτών των τριών τύπων παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1, στο οποίο απεικονίζεται επίσης ο συνδυασμός ενός στιγμιαίου ηλεκτρονόμου με έναν ηλεκτρονόμο αντιστρόφου χρόνου.

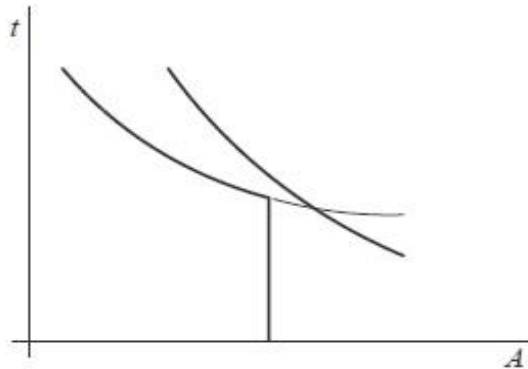


Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικές λειτουργίες διαφόρων τύπων ηλεκτρονόμων υπερέντασης [7]

3.2.3.1 Ηλεκτρονόμοι σταθερού ρεύματος ή στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι

Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου λειτουργεί στιγμιαία όταν το ρεύμα ξεπεράσει μία προκαθορισμένη τιμή. Η ρύθμιση επιλέγεται έτσι ώστε στον πιο απομακρυσμένο ζυγό από την πηγή ο ηλεκτρονόμος να λειτουργήσει για την πιο χαμηλή τιμή ρεύματος και προχωρώντας προς την πηγή οι εκάστοτε ηλεκτρονόμοι να λειτουργούν για όλο και μεγαλύτερο ρεύμα σφάλματος. Έτσι, ο ηλεκτρονόμος με τη χαμηλότερη ρύθμιση ρεύματος διεγέρσεως λειτουργεί πρώτα και αποσυνδέει το φορτίο που είναι πλησιέστερο στο σφάλμα. Αυτός ο τύπος προστασίας έχει το μειονέκτημα ότι έχει μικρή επιλογικότητα σε υψηλές τιμές ρεύματος βραχυκυκλώματος. Αν για παράδειγμα, οι ρυθμίσεις προστασίας έχουν γίνει βάσει του μέγιστου ρεύματος σφάλματος που μπορεί να εμφανιστεί, τότε οι ηλεκτρονόμοι δεν θα μπορούν να ανιχνεύσουν ένα πιθανό σφάλμα που θα εμφανιστεί με χαμηλότερη τιμή ρεύματος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η δυσκολία διακρίσεως μεταξύ του ρεύματος σφάλματος από ένα σημείο σε ένα άλλο όταν η σύνθετη αντίδραση μεταξύ αυτών των σημείων είναι μικρή σε σύγκριση με την αντίδραση πίσω προς την πηγή, έχοντας έτσι παρόμοια ρεύματα βραχυκύκλωσης, οδηγώντας στην πιθανότητα κακής διάκρισης. Έτσι, αντί να απομονωθεί μόνο το σημείο του δικτύου που περιέχει το σφάλμα, υπάρχει η πιθανότητα να απομονωθεί μεγαλύτερο τμήμα δικτύου. Ως αποτέλεσμα, οι στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι δεν χρησιμοποιούνται μόνοι τους για προστασία, αλλά επικουρικά μαζί με άλλες μορφές προστασίας, για να μειώσουν τον χρόνο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου σε πολύ μεγάλα ρεύματα σφάλματος ή για να βοηθήσουν στη σωστή επιλογική συνεργασία μεταξύ ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιούν διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες. Το τελευταίο

επιτυγχάνεται τοποθετώντας ένα στοιχείο στιγμιαίου χρόνου σε σημείο ώστε να αποτρέπει την τομή των χαρακτηριστικών καμπυλών όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχ. 3.2.



Σχήμα 3.2: Επιλογικότητα ηλεκτρονόμων με διαφορετικές χαρακτηριστικές χάρη στη χρήση στιγμιαίου ηλεκτρονόμου [7]

3.2.3.2 Ηλεκτρονόμοι σταθερού χρόνου

Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου για να αντιμετωπίσει διαφορετικά επίπεδα ρεύματος ρυθμίζεται σε διαφορετικούς χρόνους λειτουργίας. Οι ρυθμίσεις μπορούν να επιλεχθούν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε ο διακόπτης που βρίσκεται πλησιέστερα στο σφάλμα να ενεργοποιείται στο συντομότερο χρονικό διάστημα, και στη συνέχεια οι υπόλοιποι διακόπτες να ενεργοποιούνται διαδοχικά ρυθμιζόμενοι με μεγαλύτερες χρονικές καθυστερήσεις προχωρώντας προς την πηγή. Η διαφορά μεταξύ των χρόνων ενεργοποίησης για το ίδιο ρεύμα ονομάζεται χρόνος διάκρισης (Time Discrimination Margin).

Δεδομένου ότι ο χρόνος λειτουργίας για αυτόν τον τύπο ηλεκτρονόμου μπορεί να ρυθμιστεί σε σταθερά βήματα, η προστασία είναι πιο επιλεκτική. Το μεγάλο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα βραχυκυκλώματα κοντά στην πηγή, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα ρεύματα, θα εκκαθαριστούν σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου έχει ένα ρεύμα διέγερσης (pick-up current) για να ορισθεί η τιμή ρεύματος με την οποία θα ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος, καθώς και μία ρύθμιση χρόνου διάκρισης για να καθοριστεί ακριβώς ο χρόνος απόκρισης του ηλεκτρονόμου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο χρόνος απόκρισης είναι ανεξάρτητος από την τιμή του ρεύματος διέγερσης που απαιτείται για την ενεργοποίηση της προστασίας. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται συχνά όταν η αντίσταση πηγής είναι μεγάλη σε σύγκριση με των υπολοίπων στοιχείων προς τα φορτία του Σ.Η.Ε. και όταν μία γραμμή δεν είναι πολύ μεγάλη σε μήκος και έτσι τα ρεύματα σφάλματος είναι παρόμοια και δεν αυξάνονται πολύ προς την πηγή.

3.2.3.3 Ηλεκτρονόμοι αντιστρόφου χρόνου

Η θεμελιώδης ιδιότητα αυτών των ηλεκτρονόμων είναι ότι λειτουργούν σε χρόνο που είναι αντιστρόφως ανάλογο του ρεύματος σφάλματος, όπως ορίζονται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες που παρατίθενται στα Σχ. 3.3 και 3.4. Αυτός ο τύπος προστασίας ξεπερνάει τα μειονεκτήματα των δύο προηγούμενων τύπων προστασίας λειτουργώντας με τέτοιο τρόπο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Είδη προστασίας

ώστε όσο ψηλότερα είναι τα ρεύματα σφάλματος, τόσο πιο γρήγορη είναι η απόκρισή τους, διατηρώντας την επιλογικότητα της προστασίας.

Οι ηλεκτρονόμοι αντιστρόφου χρόνου ταξινομούνται γενικά σύμφωνα με τη χαρακτηριστική καμπύλη στην οποία υπακούν υποδεικνύοντας την ταχύτητα λειτουργίας τους. Βάσει αυτού, ορίζονται ως αντιστρόφου, πολύ αντιστρόφου ή εξαιρετικά αντιστρόφου. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι στη διεθνή βιβλιογραφία συχνά αναφέρονται και ως IDMT (Inverse Definite Minimum Time). Οι χαρακτηριστικές καμπύλες σύμφωνα με τα πρότυπα IEC και ANSI/IEEE ορίζονται από την παρακάτω έκφραση:

$$t = TDS \frac{\beta}{\left(\frac{I}{I_{pu}}\right)^\alpha - 1} + L$$

όπου,

t : ο χρόνος ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου σε s

TDS : ο χρονικός πολλαπλασιαστής (Time Dial Setting) που έχει επιλεγθεί σε s

I : το ρεύμα βραχυκύκλωσης υποβιβασμένο στο δευτερεύον του ηλεκτρονόμου σε A

I_{pu} : το ρεύμα διέγερσης που έχει επιλεγθεί σε A

L : σταθερά

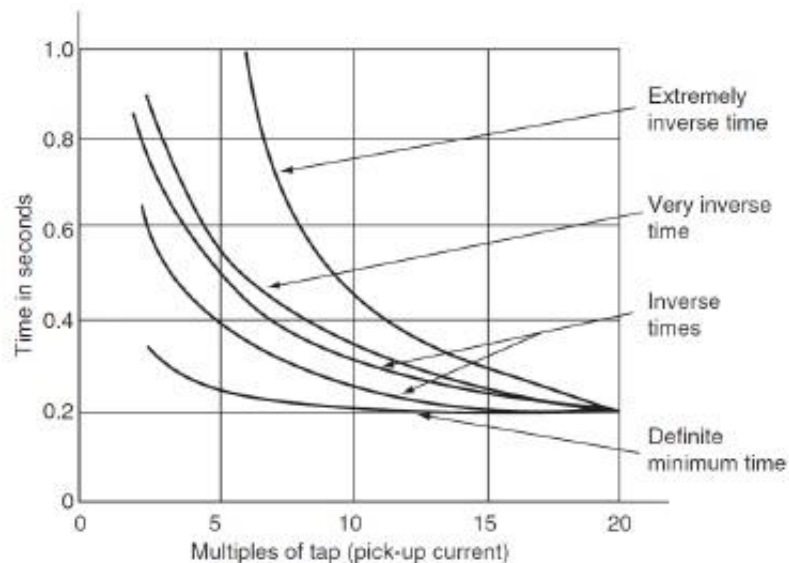
α, β : σταθερές κλίσης

Τυποποιημένες τιμές των σταθερών α, β και L δίνονται στον Πίνακα 3.1 ανάλογα το πρότυπο.

Πίνακας 3.1: Σταθερές ANSI/IEEE και IEC για τυποποιημένες καμπύλες αντιστρόφου χρόνου [7]

Curve description	Standard	α	β	L
Moderately inverse	IEEE	0.02	0.0515	0.114
Very inverse	IEEE	2.0	19.61	0.491
Extremely inverse	IEEE	2.0	28.2	0.1217
Inverse	CO8	2.0	5.95	0.18
Short-time inverse	CO2	0.02	0.0239	0.0169
Standard inverse	IEC	0.02	0.14	0
Very inverse	IEC	1.0	13.5	0
Extremely inverse	IEC	2.0	80.0	0
Long-time inverse	UK	1.0	120	0

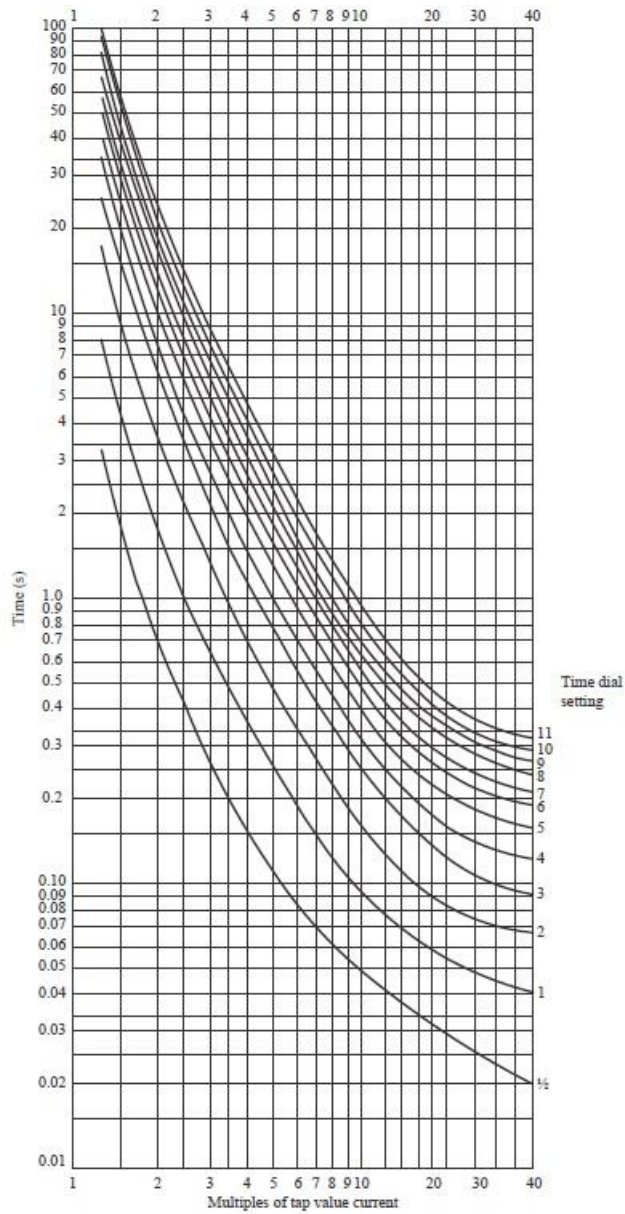
Παρακάτω στο Σχ. 3.3 φαίνονται συγκεντρωτικά κάποιες καμπύλες σταθερού, αντιστρόφου, αρκετά αντιστρόφου και εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου.



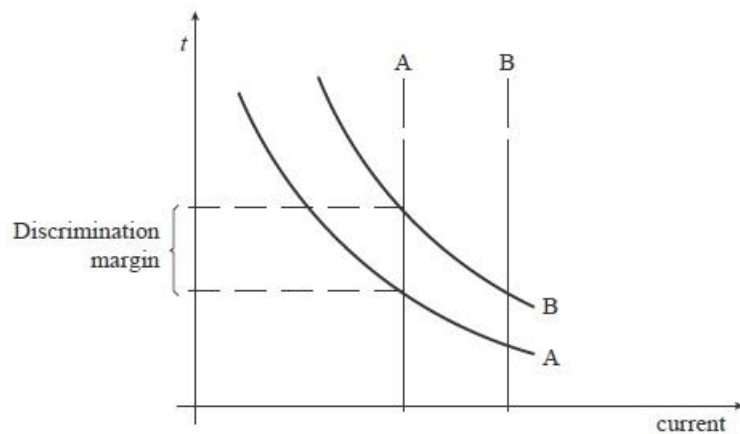
Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικές λειτουργίας (από κάτω προς τα πάνω) σταθερού, αντιστρόφου, αρκετά αντιστρόφου και εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου

Το ρεύμα διέγερσης καθορίζει τη θέση της χαρακτηριστικής καμπύλης ως προς τον οριζόντιο άξονα των ρευμάτων, ενώ η τιμή του TDS καθορίζει τη θέση της ως προς τον κάθετο άξονα του χρόνου. Έτσι, στο Σχ. 3.4 όσο αυξάνεται το TDS τόσο μετατοπίζεται η καμπύλη προς τα πάνω και άρα αυξάνεται και ο χρόνος ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου.

Ο χρόνος λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης, όταν λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία, πρέπει να καθυστερήσει για να εξασφαλιστεί ότι, στην περίπτωση σφάλματος, ο ηλεκτρονόμος δεν θα ενεργοποιηθεί πριν από οποιαδήποτε άλλη προστασία που βρίσκεται πλησιέστερα στο σφάλμα. Οι καμπύλες αντιστρόφου χρόνου δύο ηλεκτρονόμων υπερέντασης που συνδέονται με δύο διακόπτες σε ένα τυπικό σύστημα φαίνονται στο Σχ. 3.5, στο οποίο απεικονίζεται η διαφορά στον χρόνο λειτουργίας αυτών των ηλεκτρονόμων για το ίδιο σφάλμα, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις επιλογικότητας του συστήματος.



Σχήμα 3.4: Τυπικές χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου για διάφορα TDS [7]



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου για σύστημα με δύο ηλεκτρονόμους που συνδέονται με δύο διακόπτες [7]

Οι ηλεκτρονόμοι αντιστρόφου χρόνου μπορούν να ρυθμιστούν με την κατάλληλη επιλογή δύο παραμέτρων – του χρονικού πολλαπλασιαστή ή *TDS* (Time Dial Setting) και του ρεύματος διέγερσης (pick-up current).

3.2.4 Το ρεύμα διέγερσης

Το ρεύμα διέγερσης ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης εκφράζει το κατώφλι ρεύματος από το οποίο ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος. Έτσι, τα ρεύματα σφάλματος που βλέπει ο ηλεκτρονόμος εκφράζονται ως πολλαπλάσιο του ρεύματος διέγερσης του ηλεκτρονόμου υπερέντασης. Ο λόγος του ρεύματος σφάλματος υποβιβασμένο στο δευτερεύον του ηλεκτρονόμου προς το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου συχνά αναφέρεται ως PSM (Plug Setting Multiplier). Το ρεύμα διέγερσης πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η λειτουργία του ηλεκτρονόμου στην περίπτωση υπερφόρτισης ή σε μεταβατικές καταστάσεις, για αυτό επιλέγεται ένας συντελεστής υπερφόρτισης επί του ονομαστικού ρεύματος:

$$pick - up\ current = \frac{OLF * I_{nom}}{CTR}$$

όπου,

OLF: συντελεστής υπερφόρτισης που εξαρτάται από το προστατευόμενο στοιχείο

I_{nom}: το ονομαστικό ρεύμα

Ο συντελεστής υπερφόρτισης που συνιστάται για τους κινητήρες είναι 1,05. Για τις γραμμές, τους μετασχηματιστές και τις γεννήτριες, συνήθως επιλέγεται σε ένα εύρος 1,25-1,5.

3.2.5 Το Time Dial Setting (TDS)

Το *TDS* ρυθμίζει τη χρονική καθυστέρηση μέχρι ο ηλεκτρονόμος να λειτουργήσει, όταν το ρεύμα σφάλματος φτάσει μία τιμή ίση ή μεγαλύτερη από το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου. Στους ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους, η χρονική καθυστέρηση συνήθως επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της φυσικής απόστασης μεταξύ των κινητών και των σταθερών επαφών. Μία μικρότερη τιμή *TDS* οδηγεί σε μικρότερους χρόνους λειτουργίας του ηλεκτρονόμου.

3.2.6 Χρόνος διάκρισης (Time Discrimination Margin)

Προκειμένου να εξασφαλίζεται η επιλογικότητα του συστήματος απαιτείται ένας χρόνος διάκρισης (*t_c*) μεταξύ δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών αντιστρόφου χρόνου, ο οποίος είναι της τάξης των 0,2-0,4 s. Αυτή η τιμή προκύπτει από τον εξής τύπο:

$$t_c = breaker\ time + overtravel\ time + security\ margin$$

όπου,

breaker time: είναι ο χρόνος λειτουργίας του διακόπτη ισχύος

overtravel time: ο χρόνος μετάδοσης του σήματος από τον ηλεκτρονόμο στο διακόπτη ισχύος

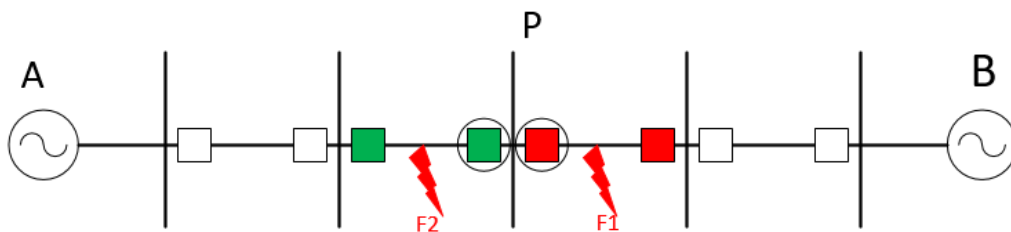
security margin: συντελεστής ασφαλείας ο οποίος σχετίζεται με την ακρίβεια του ηλεκτρονόμου και τη διακύμανση των χρόνων λειτουργίας των διακοπών

3.3 Προστασία κατευθύνσεως

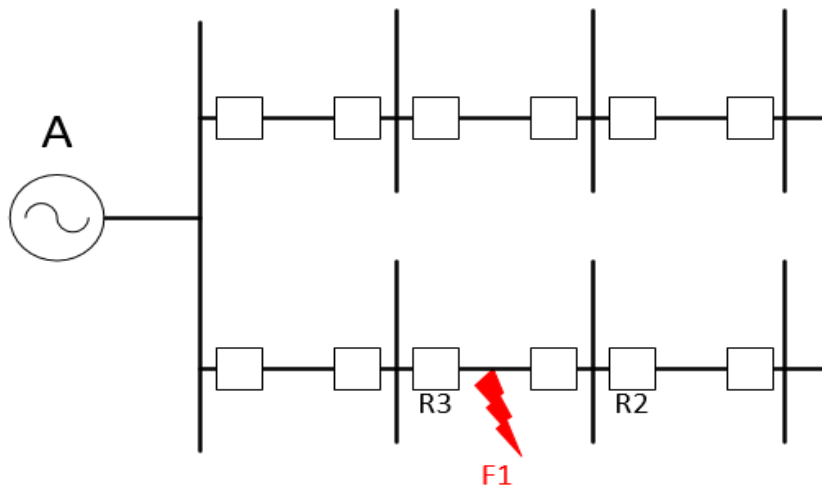
3.3.1 Αρχή λειτουργίας

Σε δίκτυα μεταφοράς με πολλαπλές πηγές, δεν αρκεί η προστασία υπερέντασης με απλούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης. Το Σχ. 3.6 δείχνει ένα σύστημα που είναι ακτινικό με δύο πηγές συνδεδεμένο με αυτό. Εάν οι ηλεκτρονόμοι προστασίας είναι εγκατεστημένοι μόνο στο ένα άκρο της γραμμής μεταφοράς, για παράδειγμα στη μεριά της πηγής A, είναι προφανές ότι μετά το άνοιγμα του ηλεκτρονόμου με κόκκινο χρώμα, το σφάλμα θα συνεχίσει να τροφοδοτείται από την πηγή B. Συνεπώς, οι ηλεκτρονόμοι εγκαθίστανται και στο άλλο άκρο της γραμμής για την ανίχνευση σφάλματος και την αποσύνδεση της γραμμής μεταφοράς από το άλλο άκρο. Παρόμοια κατάσταση θα προκύψει ακόμη και για ένα σύστημα μίας πηγής εάν υπάρχουν παράλληλες διαδρομές (Σχ. 3.7). Ως εκ τούτου, το σύστημα που έχει πολλαπλές διαδρομές προς την πηγή απαιτεί ηλεκτρονόμους στα άκρα αμφότερα. Ωστόσο, η εγκατάσταση ηλεκτρονόμων και στα δύο άκρα δεν παρέχει μία πλήρη λύση. Για να γίνει κατανοητός ο λόγος, εξετάζεται η δράση του κόκκινου ηλεκτρονόμου στο Σχ. 3.6 σε σχέση με δύο πιθανά σφάλματα F1 και F2.

Αν το σφάλμα συμβεί στο σημείο F1, τότε είναι ευθύνη των κόκκινων ηλεκτρονόμων να ανοίξουν. Εάν υπάρχει βλάβη στο F2, τότε οι πράσινοι ηλεκτρονόμοι πρέπει να απομονώσουν τη γραμμή. Ωστόσο, είναι πολύ πιθανό για σφάλμα στο F2, ο κυκλωμένος κόκκινος ηλεκτρονόμος να λειτουργήσει πριν τον πράσινο ηλεκτρονόμο, για να αποσυνδέσει την τροφοδοσία από την πηγή B, διότι και οι δύο ηλεκτρονόμοι διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα σφάλματος. Με άλλα λόγια, ο κυκλωμένος κόκκινος ηλεκτρονόμος συναγωνίζεται με τον κυκλωμένο πράσινο ηλεκτρονόμο για να εκκαθαρίσει το σφάλμα. Το άνοιγμα του κόκκινου κυκλωμένου ηλεκτρονόμου προκαλεί άσκοπα απώλεια υπηρεσίας για τα φορτία στον ζυγό P και πρέπει να θεωρηθεί λανθασμένη λειτουργία.

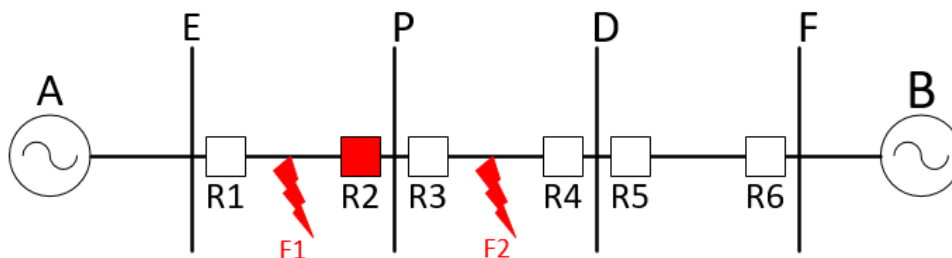


Σχήμα 3.6: Ακτινικό δίκτυο διανομής με δύο πηγές [39]



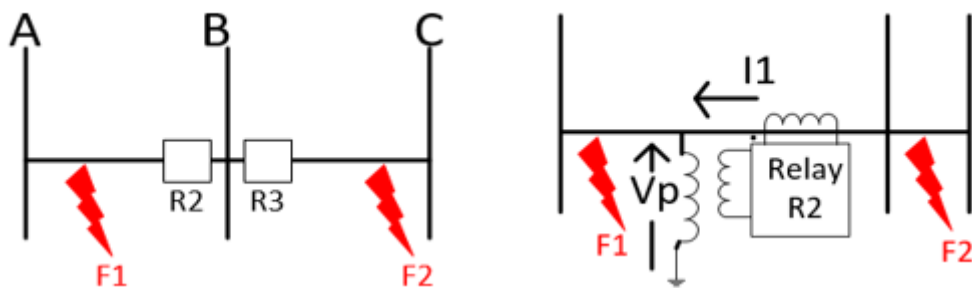
Σχήμα 3.7: Δίκτυο διανομής με παράλληλες διαδρομές [39]

Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, το στοιχείο του ηλεκτρονόμου πρέπει να είναι εφοδιασμένο με επιπλέον χαρακτηριστικά ώστε να διακρίνει μεταξύ σφαλμάτων στα οποία πρέπει να ανταποκρίνεται και άλλων που δεν πρέπει να ανταποκρίνεται. Επιπλέον, αυτή η επιλογικότητα δε θα είναι επαρκής αν βασίζεται στο μέγεθος του ρεύματος διέγερσης (ή των ρευμάτων σφάλματος). Σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιείται διάκριση με βάση τον χρόνο για να επιτευχθεί η επιλογικότητα. Από το Σχ. 3.8, είναι προφανές ότι αυτή η διάκριση θα υπάρχει μεταξύ των ακολουθιών ηλεκτρονόμων $R1 \rightarrow R3 \rightarrow R5$ και $R6 \rightarrow R4 \rightarrow R2$.



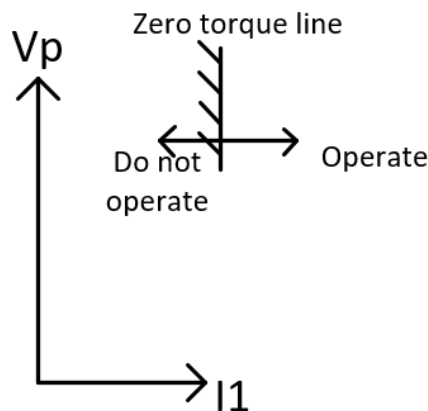
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα προβλήματος επιλογικότητας [39]

Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να παρέχεται τέτοια χρονική διάκριση μεταξύ ηλεκτρονόμων όπως των R2 και R3. Εξετάζονται δύο πιθανές θέσεις σφάλματος σε σχέση με τον ηλεκτρονόμο R3 όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9. Ο ηλεκτρονόμος R2 πρέπει λειτουργεί αν το σφάλμα βρίσκεται στο F1 επειδή είναι μπροστά του, αλλά να μην λειτουργεί όταν είναι πίσω του, όπως το F2. Με την πολικότητα του CT όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9, είναι φανερό ότι το ρεύμα σφάλματος F1 που παρατηρείται από τον ηλεκτρονόμο, έπεται του V_p κατά 90° (Σχ. 3.10). Αυτό γίνεται με την προϋπόθεση της κυρίως επαγωγικής σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος. Ωστόσο, όταν το σφάλμα βρίσκεται στη θέση F2, τότε το ρεύμα που βλέπει ο ηλεκτρονόμος προηγείται της τάσης V_p .



Σχήμα 3.9: Πρόβλημα διαχωρισμού (δεξιά), Διαχωρισμός ρεύματος βάσει διανύσματος αναφοράς (αριστερά) [39]

Έτσι, αν μετρηθεί το διάνυσμα της τάσης του ζυγού V_p και υπολογισθεί η γωνία του φασικού ρεύματος που περνά από τον ηλεκτρονόμο σε σχέση με την τάση του ζυγού, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη λογική για να εξασφαλισθεί η επιλογικότητα. Αν ο ηλεκτρονόμος ανιχνεύσει βλάβη και το ρεύμα δεν προηγείται του V_p , τότε πρέπει να επιτραπεί η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου. Αν ο ηλεκτρονόμος ανιχνεύσει βλάβη και το ρεύμα προηγείται του V_p , τότε δεν πρέπει να λειτουργήσει. Η αρχή της διάκρισης που βασίζεται στη σύγκριση γωνιών μεταξύ ενός συνόλου διανυσμάτων, ένα από τα οποία χρησιμοποιείται ως αναφορά, ονομάζεται «αρχή της διάκρισης κατεύθυνσης». Οι ηλεκτρονόμοι με αυτή την αρχή ονομάζονται κατευθυντικοί ηλεκτρονόμοι.



Σχήμα 3.10: Λογική λειτουργίας κατευθυντικών ηλεκτρονόμων [39]

Για παράδειγμα, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να γίνουν κατευθυντικοί με την προσθήκη της λογικής της διάκρισης στην ήδη υπάρχουσα λογική υπερέντασης. Τέτοιοι ηλεκτρονόμοι καλούνται ηλεκτρονόμοι υπερέντασης-κατεύθυνσης. Χρησιμοποιούνται σε συστήματα διανομής ή σε συστήματα μεταφοράς όπου η βροχοειδής διαμόρφωση χρησιμοποιείται για την παροχή μεγαλύτερης αξιοπιστίας στις υπηρεσίες. Το κόστος αυτού του τύπου προστασίας είναι υψηλότερο από το μη κατευθυντικό, λόγω του πρόσθετου κόστους των μετασχηματιστών τάσεως (Voltage Transformers-VT).

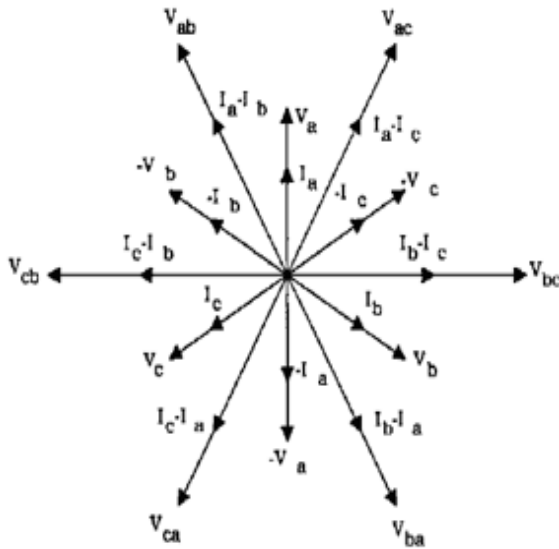
Με τους παραδοσιακούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης, ένας ηλεκτρονόμος υπερέντασης-κατεύθυνσης μπορεί να απεικονιστεί ως μία σύνδεση μίας μονάδας κατεύθυνσης και μίας μονάδας υπερέντασης. Εάν η πολικότητα του ρεύματος είναι κατάλληλη, τότε η μονάδα κατεύθυνσης ενεργοποιείται. Αν το μέτρο του ρεύματος είναι πάνω από το προβλεπόμενο, τότε και η μονάδα υπερέντασης ενεργοποιείται και όταν και οι δύο μονάδες ενεργοποιούνται, στέλνεται σήμα ώστε να ανοίξουν οι διακόπτες ισχύος. Στους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, αυτό μπορεί να προγραμματιστεί από μία απλή λογική «AND».

Κάθε σφάλμα που αφορά το έδαφος ονομάζεται σφάλμα γης. Παραδοσιακά, τρεις ηλεκτρονόμοι φάσεων και ένας ηλεκτρονόμος γης χρησιμοποιούνται για την προστασία. Ωστόσο, σε έναν ψηφιακό ηλεκτρονόμο, όλες αυτές οι λειτουργίες μπορούν να ενσωματωθούν σε έναν μόνο ηλεκτρονόμο που «διαβάζει» τριφασικές τάσεις και τριφασικά ρεύματα.

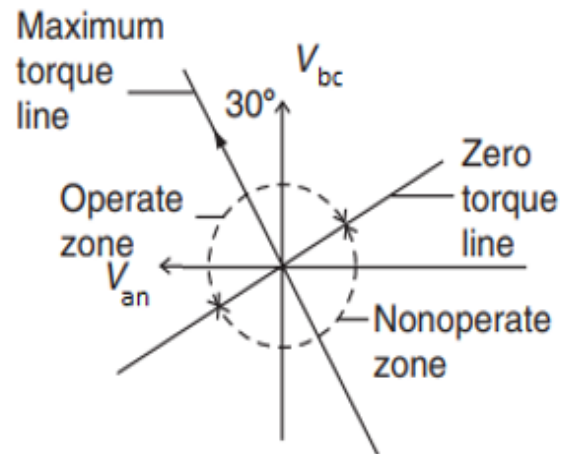
3.3.2 Σχεδιασμός κατευθυντικών μονάδων για σφάλματα φάσης

Ας εξετασθεί πρώτα, ένα σφάλμα τριών φάσεων. Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή του διανύσματος αναφοράς μπορεί να είναι η ίδια η φασική τάση. Για ένα κύκλωμα με κυρίως επαγωγική αντίδραση, το ρεύμα σφάλματος στη σωστή κατεύθυνση έπεται του διανύσματος αναφοράς κατά 90° . Όσον αφορά τη φάση αναφοράς V_a , μπορεί να σχεδιαστεί η γραμμή λειτουργίας, που ονομάζεται επίσης γραμμή μηδενικής ροπής (zero torque line) λόγω της κληρονομιάς από τα ηλεκτρομηχανολογικά μεγέθη, η οποία χωρίζει το επίπεδο σε δύο επισημασμένες περιοχές ως «λειτουργία» και «μη λειτουργία». Αν το σφάλμα βρίσκεται στην περιοχή λειτουργίας, τότε το I_a έπεται του V_a και δρομολογείται η απόφαση για το εάν πρέπει να λειτουργήσει ο ηλεκτρονόμος με βάση το μέτρο του ρεύματος σφάλματος. Σε περίπτωση που υπάρχει σφάλμα πίσω από τον ηλεκτρονόμο, το ρεύμα σφάλματος προηγείται του V_a και επομένως βρίσκεται στην περιοχή μη λειτουργίας.

Το Σχ. 3.11 δείχνει το διάγραμμα διανυσμάτων και τη σχέση μεταξύ των διαφορετικών φάσεων. Η οριακή ή η μέγιστη γραμμή ροπής είναι μία γραμμή κάθετη στη γραμμή μηδενικής ροπής. Και πάλι αυτή η ορολογία οφείλεται στην κληρονομιά του ηλεκτρομηχανικού ηλεκτρονόμου. Η μέγιστη γραμμή ροπής μπορεί να τοποθετηθεί υπό γωνία σε σχέση με το V_a επίσης. Αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα του ηλεκτρομηχανολογικού σχεδιασμού του ηλεκτρονόμου. Αλλά η ίδια τοποθέτηση είναι απλή σε έναν ψηφιακό ηλεκτρονόμο. Για παράδειγμα, η κοινή πρακτική είναι να τοποθετείται η μέγιστη γραμμή ροπής σε γωνία 60° ή 30° σε σχέση με το V_a (Σχ. 3.12).



Σχήμα 3.11: Διανύσματα τάσης και έντασης σε κατάσταση ισορροπίας [8]



Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης για θέση μέγιστης ροπής 30° [2]

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.12, δεδομένου ότι η V_{bc} είναι κάθετη με την V_a , είναι δυνατή η χρήση της V_{bc} ως διάνυσμα αναφοράς και η τοποθέτηση της μέγιστης γραμμής ροπής σε 30° μπροστά της. Αυτή η λογική χρησιμοποιείται συχνά στους ηλεκτρονόμους υπερέντασης-κατεύθυνσης. Με αυτήν την τοποθέτηση θα αποδειχθεί ότι η μονάδα κατεύθυνσης θα αναγνωρίσει τόσο τριφασικά όσο και διφασικά σφάλματα (Σχ. 3.13). Θεωρείται ένα σφάλμα γραμμής μεταξύ της φάσης a και b. Σε αυτήν την περίπτωση, ισχύει:

$$V_a - V_F = Z_1 I_a$$

Ομοίως,

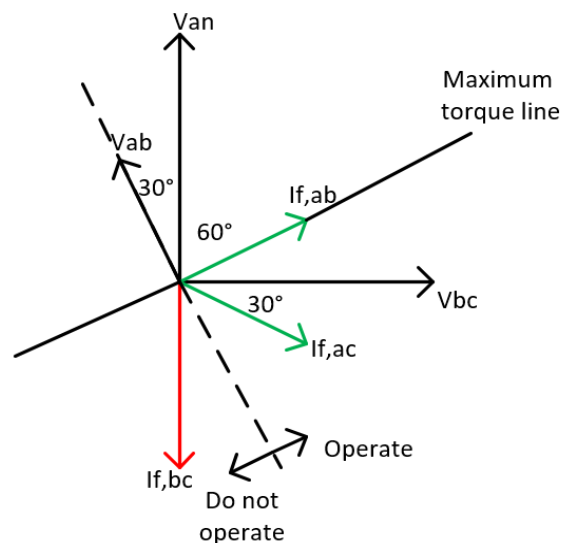
$$V_b - V_F = -Z_1 I_a, \quad (Z_1 = Z_2)$$

Συνεπώς:

$$V_a - V_b = 2Z_1 I_a \Rightarrow I_a = \frac{V_a - V_b}{2Z_1}$$

Αν για απλότητα θεωρηθεί ότι το Z είναι καθαρά επαγωγικό, τότε από το Σχ. 3.13 προκύπτει ότι το I_{ab}^f θα έπεται κατά 60° του V_{an} . Έτσι, η μονάδα ρυθμισμένη με τις 30° και με το V_{bc} ως διάνυσμα αναφοράς θα αναγνωρίσει και το τριφασικό σφάλμα και το διφασικό σφάλμα. Για διφασικό σφάλμα που περιλαμβάνει φάσεις a και c, το V_{ac} έπεται του V_{an} κατά 30°. Υποθέτοντας καθαρά επαγωγική αντίδραση, το ρεύμα φάσης I_a θα έπεται του V_{bc} κατά 30°. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.13, το I_{ac}^f θα είναι και πάλι στην περιοχή λειτουργίας και η μονάδα κατεύθυνσης θα ενεργοποιηθεί. Έτσι, αυτή η μονάδα (μέγιστη ροπή στις 30° με V_{bc} ως αναφορά) θα λειτουργήσει για όλα τα σφάλματα φάσεων που αφορούν τη φάση a. Αντίθετα, για διφασικό σφάλμα που περιλαμβάνει φάσεις b και c, το I_{bc}^f θα έπεται του V_{bc} κατά 90°. Ως

εκ τούτου, θα βρίσκεται έξω από την περιοχή ενεργοποίησης της μονάδας κατεύθυνσης. Επομένως, η μονάδα κατεύθυνσης δεν θα λειτουργήσει.

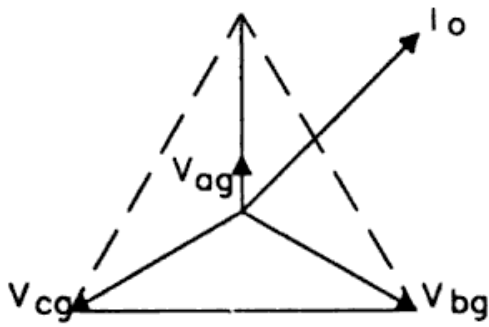


Σχήμα 3.13: Μεγέθη της φάσης a, για σφάλματα a-b, a-c και b-c [39]

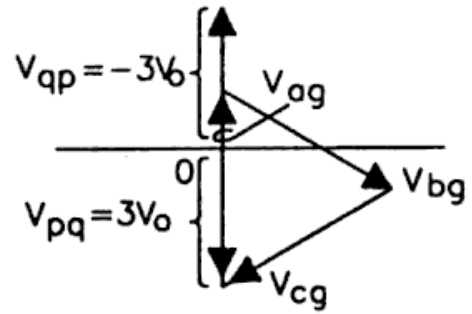
Συνοπτικά, το βασικό χαρακτηριστικό για να διακριθεί η επιλογικότητα ανά κατεύθυνση είναι η τοποθέτηση της γραμμής μηδενικής ροπής που χωρίζει το επίπεδο R-X σε δύο περιοχές, δηλαδή λειτουργία και μη λειτουργία. Είναι προφανές ότι στους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, αυτή η τοποθέτηση είναι αρκετά ευέλικτη και μπορεί να καθοριστεί σε σχέση με οποιαδήποτε αναφορά φασικής τάσης. Αυτή η τοποθέτηση μπορεί να γίνει προγραμματιζόμενη.

3.3.3 Προστασία σφαλμάτων με γη

Συνήθως, τα σφάλματα με γη είναι μονοφασικά και διφασικά σφάλματα. Τα σφάλματα γης διακρίνονται από την παρουσία των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας I_0 . Δεδομένου ότι, εκτός από τις καταστάσεις ανισοροπίας, στην κανονική λειτουργία του συστήματος απουσιάζει το I_0 , είναι δυνατή μία πολύ πιο ευαίσθητη αναγνώριση για σφάλματα γης, χρησιμοποιώντας το στοιχείο $I_0 = (I_a + I_b + I_c)/3$ που θα δηλώνει σφάλμα εάν το I_0 υπερβαίνει ένα όριο. Εντούτοις, σε ένα σύστημα με πολλαπλές πηγές ή παράλληλες διαδρομές, απαιτείται οι ηλεκτρονόμοι για σφάλματα γης να είναι κατευθυντικοί. Το μέγεθος αναφοράς είναι αυτό που καθορίζει την πόλωση.



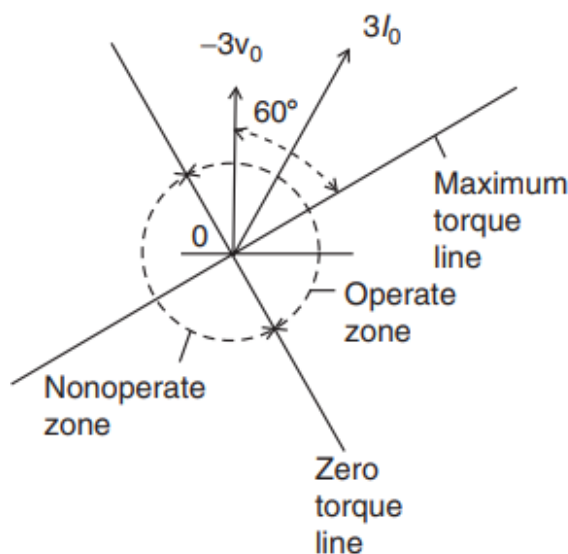
Σχήμα 3.14: Σφάλμα SLG στη φάση a



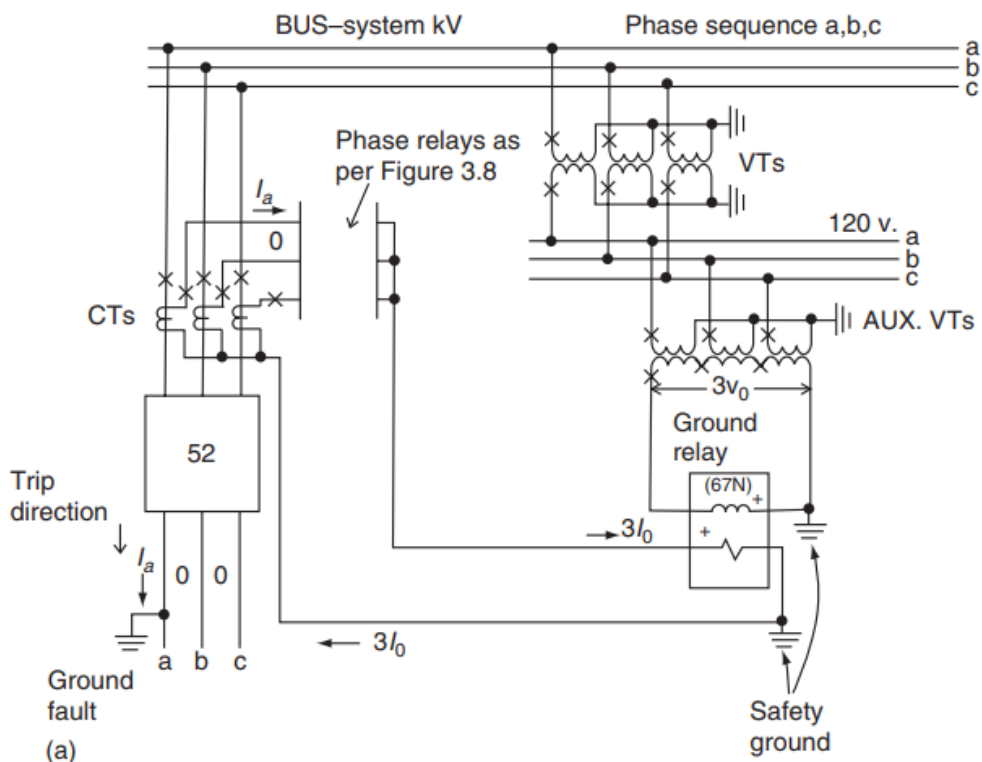
Σχήμα 3.15: Υπολογισμός τάσης μηδενικής ακολουθίας

3.3.4 Πόλωση τάσης

Έστω ότι ένα σφάλμα γης εμφανίζεται στη φάση a. Τότε, αν $I_a = 3I_0$ και $I_b = I_c = 0$, παρατηρείται αντίστοιχη πτώση της τάσης της φάσης a ενώ οι τάσεις των b και c παραμένουν αμετάβλητες. Το ρεύμα σφάλματος φαίνεται στο Σχ. 3.14. Το Σχ. 3.15 δείχνει τον υπολογισμό του $3V_0$. Το Σχ. 3.16 δείχνει την καταλληλότητα του $-3V_0$ ως διάνυσμα αναφοράς. Η V_0 δεν είναι παρούσα κατά τη διάρκεια κανονικών συνθηκών αλλά μόνο κατά τη διάρκεια σφάλματος. Τοποθετείται η μέγιστη ροπή σε υστέρηση 60° σε σχέση με την $-3V_0$. Τότε είναι σαφές ότι η γραμμή μηδενικής ροπής, που διαχωρίζει τον χώρο σε ζώνες λειτουργίας-μη λειτουργίας, προηγείται του $-3V_0$ κατά 30° . Έτσι, για σφάλμα στη σωστή περιοχή, το $3I_0$ υστερεί του $-3V_0$ και συνεπώς βρίσκεται στην περιοχή λειτουργίας. Εάν υπάρχει σφάλμα πίσω από τον ηλεκτρονόμο, το $3I_0$ θα προηγείται του $-3V_0$ κατά περίπου 45° έως 60° και ως εκ τούτου θα βρίσκεται σε περιοχή μη λειτουργίας.



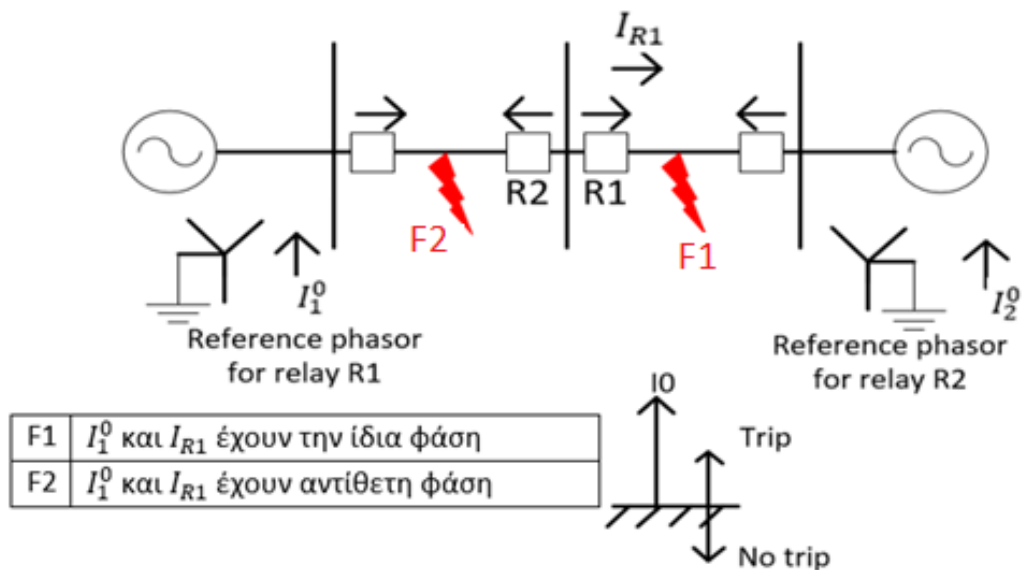
Σχήμα 3.16: Πόλωση με βάση την τάση μηδενικής ακολουθίας [2]



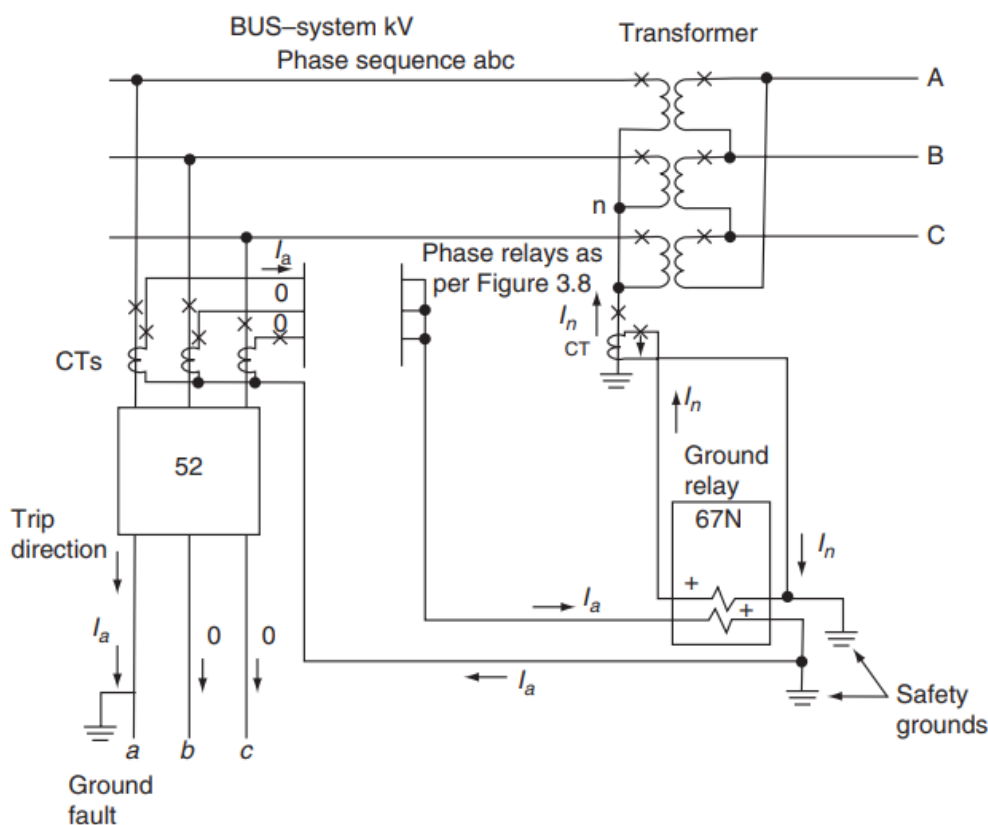
Σχήμα 3.17: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης για ανίχνευση σφάλματος γης με πόλωση τάσης χρησιμοποιώντας το μοντέλο των 60° (Πίνακας 3.2) [2]

3.3.5 Πόλωση ρεύματος

Μια εναλλακτική λύση για την πόλωση της τάσης είναι η πόλωση ρεύματος, που δεν απαιτεί επιπλέον VT όπως στην παραπάνω περίπτωση. Όταν το σύστημα είναι σε ισορροπία ισχύει ότι $3I_0 = I_a + I_b + I_c = 0$. Κατά τη διάρκεια σφάλματος γης, για παράδειγμα στη φάση a (Σχ.3.18), στο F1 ρέει το $3I_0$ από τη γη στον ουδέτερο ενός μετασχηματιστή ισχύος ή διανομής αστέρα-τριγώνου. Αν θεωρηθεί για λόγους απλότητας ότι $I_b = I_c = 0$, τότε το $3I_0$ και το I_a είναι σε φάση. Αυτό δείχνει ότι η μονάδα κατεύθυνσης για τον ηλεκτρονόμο γης θα πρέπει να λειτουργήσει όταν το I_a είναι σε φάση με το $3I_0$. Έτσι τοποθετείται η μέγιστη γραμμή ροπής σε μηδενικές μοίρες σε σχέση με το διάνυσμα I_0 . Εάν, ωστόσο, υπάρχει σφάλμα πίσω από τον ηλεκτρονόμο, τότε το I_a θα βρεθεί στη ζώνη μη λειτουργίας και ως εκ τούτου ο ηλεκτρονόμος δεν θα λειτουργήσει καθώς τα I_1^0 και I_{R1} έχουν αντίθετη φορά.



Σχήμα 3.18: Πόλωση με βάση το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας [39]



Σχήμα 3.19: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση ρεύματος [2]

3.3.6 Συνδεσμολογίες στοιχείων κατεύθυνσης

Τέσσερις τύποι σύνδεσης των στοιχείων κατεύθυνσης (Πίνακας 3.2) χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια. Η μελέτη αυτών των συνδέσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καμία δεν είναι τέλεια. Όλες μπορούν να εμφανίσουν προβλήματα κάτω από κάποιες συνθήκες σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Είδη προστασίας

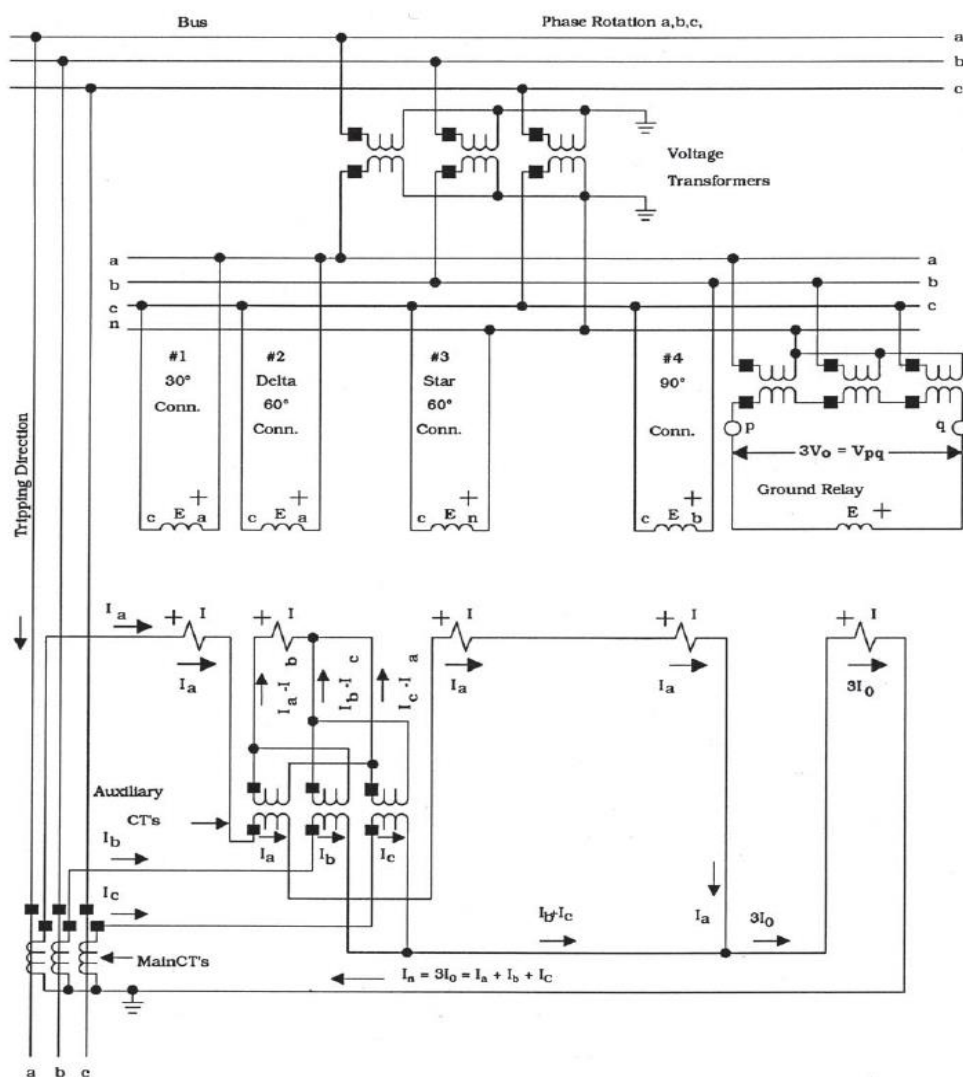
Αυτές οι συνθήκες είναι διαφορετικές σε κάθε συνδεσμολογία. Ευτυχώς, η πιθανότητα να προκύψουν οι δυσμενείς συνθήκες είναι πολύ μικρή. Το Σχ. 3.20 είναι ένα σύνθετο διάγραμμα που παρουσιάζει όλες τις συνδέσεις, μαζί με τη σύνδεση του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης γης.

Πίνακας 3.2: Συνδεσμολογίες ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης

Συνδεσμολογία	Φάση A		Φάση B		Φάση C		Μέγιστη ροπή
	I	V	I	V	I	V	
30°	I_a	V_{ac}	I_b	V_{ba}	I_c	V_{cb}	Επιπορεία I κατά 30°
60° delta	$I_a - I_b$	V_{ac}	$I_b - I_c$	V_{ba}	$I_c - I_a$	V_{cb}	Επιπορεία I κατά 60°
60° wye	I_a	$-V_c$	I_b	$-V_a$	I_c	$-V_b$	Επιπορεία I κατά 60°
90° - 45°	I_a	V_{bc}	I_b	V_{ca}	I_c	V_{ab}	Επιπορεία I κατά 45°
90° - 60°	I_a	V_{bc}	I_b	V_{ca}	I_c	V_{ab}	Επιπορεία I κατά 60°

Παρατηρήσεις:

1. Η ονομασία των συνδεσμολογιών προέρχεται από τη γωνία που προπορεύεται το ρεύμα εισόδου, με $\Sigma.I = 1,0$, σε σχέση με την τάση εισόδου.
2. Η μέγιστη ροπή εμφανίζεται όταν το ρεύμα εισόδου επιπορεύεται του ίδιου ρεύματος με $\Sigma.I = 1,0$, κατά τη γωνία που αναγράφεται σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 3.20: Συνδέσεις στοιχείων κατεύθυνσης στη φάση a [8]

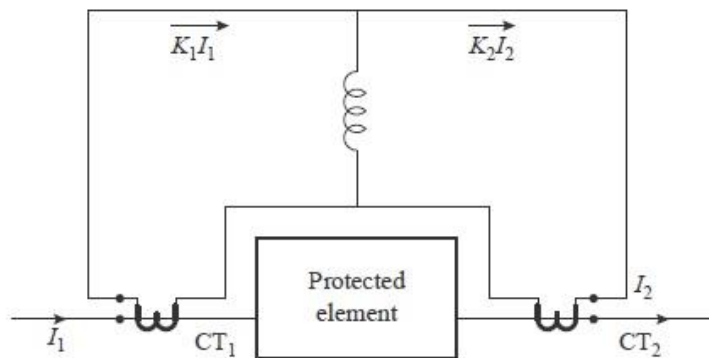
3.4 Διαφορική προστασία

3.4.1 Αρχή λειτουργίας

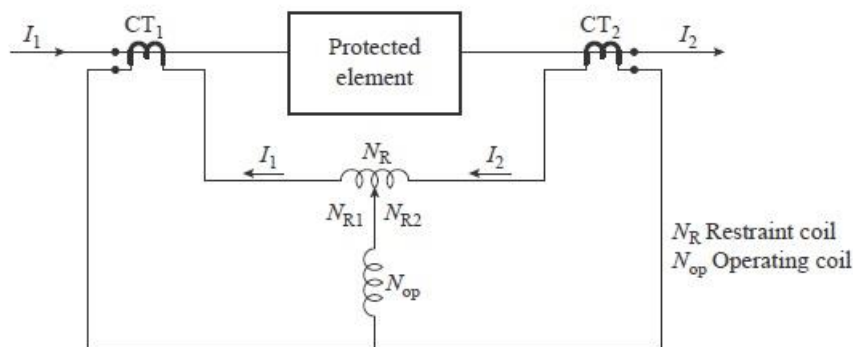
Η διαφορική προστασία λειτουργεί όταν το διάνυσμα διαφοράς δύο ή περισσοτέρων όμοιων ηλεκτρικών μεγεθών υπερβαίνουν μία προκαθορισμένη τιμή. Σχεδόν κάθε τύπος ηλεκτρονόμου μπορεί να λειτουργήσει ως διαφορική προστασία - δεν είναι τόσο η κατασκευή του ηλεκτρονόμου, αλλά η σύνδεσή του στο κύκλωμα. Η πλειονότητα των διαφορικών ηλεκτρονόμων λειτουργεί αντιλαμβάνοντας διαφορά ρευμάτων, αλλά μπορούν επίσης να λειτουργούν και με διαφορά τάσης, βασιζόμενοι στην ίδια αρχή λειτουργίας με τους ηλεκτρονόμους διαφορικού ρεύματος. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το σήμα έναυσης λειτουργίας του ηλεκτρονόμου προέρχεται από την τάση κατά μήκος μίας αντίστασης διακλάδωσης.

Ένα απλό παράδειγμα συνδεσμολογίας διαφορικής προστασίας φαίνεται στο Σχ. 3.21. Τα δευτερεύοντα των CTs είναι διασυνδεδεμένα και το πηνίο ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης είναι συνδεδεμένο σε αυτά. Αν και τα ρεύματα I_1 και I_2 μπορεί να είναι διαφορετικά, υπό την προϋπόθεση ότι και οι δύο CTs έχουν κατάλληλη σύνδεση και λόγο μετασχηματισμού, σε κανονικές συνθήκες φορτίου, η διαφορά των ρευμάτων στο δευτερεύον των CTs θα αθροίζεται στο μηδέν με αποτέλεσμα να μην ρέει ρεύμα στον ηλεκτρονόμο υπερέντασης και να μην ενεργοποιείται η προστασία. Ωστόσο, εάν παρουσιαστεί σφάλμα στο τμήμα μεταξύ των δύο CTs, το ρεύμα σφάλματος θα ρέει προς το βραχυκύκλωμα και από τις δύο πλευρές και το άθροισμα των ρευμάτων στο δευτερεύον των CTs θα ρέει μέσα στο διαφορικό ηλεκτρονόμο. Σε όλες τις περιπτώσεις, το ρεύμα στον διαφορικό ηλεκτρονόμο θα είναι ανάλογο του διανύσματος διαφοράς των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από το προστατευόμενο στοιχείο. Αν το ρεύμα μέσω του διαφορικού ηλεκτρονόμου υπερβαίνει την προκαθορισμένη τιμή διέγερσης, τότε ο ηλεκτρονόμος θα λειτουργήσει.

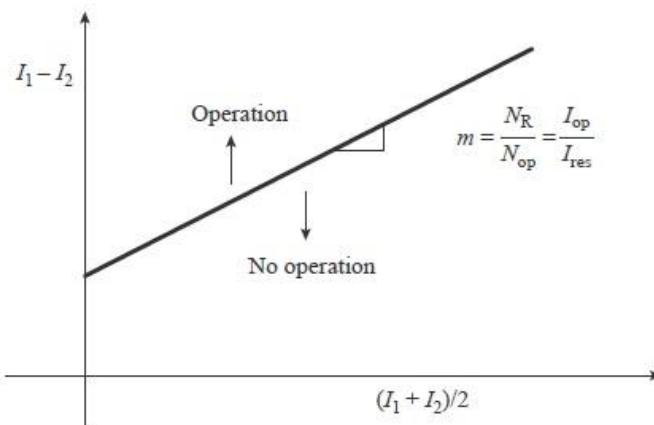
Ένας συγκεκριμένος τύπος διαφορικού ηλεκτρονόμου που χρησιμοποιείται εκτεταμένα είναι ο διαφορικός ηλεκτρονόμος με χαρακτηριστική μεταβλητού ποσοστού, ο οποίος χρησιμοποιεί επιπρόσθετα ένα πηνίο συγκράτησης εκτός από το πηνίο λειτουργίας όπως φαίνεται στο Σχ. 3.22. Το ρεύμα στο πηνίο λειτουργίας είναι ανάλογο της διαφοράς ($I_1 - I_2$). Αν θεωρηθεί ότι N είναι οι σπείρες του πηνίου συγκράτησης και ότι το πηνίο λειτουργίας συνδέεται στο μέσο του πηνίου συγκράτησης, τότε τα συνολικά αμπερελίγματα ($A\text{-}\epsilon$) είναι ίσα με $\left(I_1 * \left(\frac{N}{2} \right) + I_2 * \left(\frac{N}{2} \right) \right)$, το οποίο ταυτίζεται με την περίπτωση που το ρεύμα $\frac{I_1 + I_2}{2}$ ρέει σε ολόκληρο το πηνίο συγκράτησης. Η χαρακτηριστική λειτουργίας αυτού του ηλεκτρονόμου φαίνεται στο Σχ. 3.23.



Σχήμα 3.21: Διαφορική προστασία-ισορροπία ρευμάτων [7]



Σχήμα 3.22: Διαφορικός ηλεκτρονόμος με χαρακτηριστική μεταβλητού ποσοστού [7]

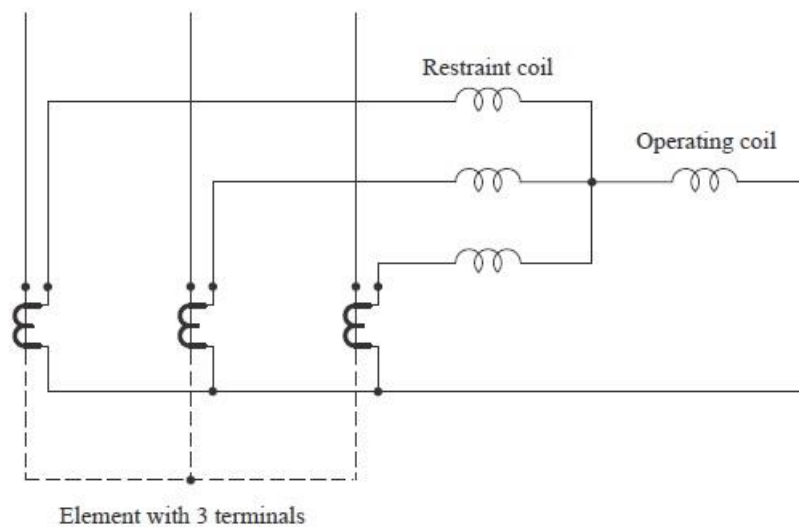


Σχήμα 3.23: Χαρακτηριστική λειτουργίας μεταβλητού ποσοστού [7]

Οι CTs παρόλο που κατασκευάζονται σύμφωνα με τις ίδιες προδιαγραφές, δεν θα έχουν επακριβώς τα ίδια ρεύματα δευτερεύοντος για ίδια ρεύματα πρωτεύοντος λόγω μικροδιαφορών στις χαρακτηριστικές μαγνήτισής τους. Η δύναμη συγκράτησης του ηλεκτρονόμου αυξάνεται με το μέγεθος του $(I_1 + I_2)$, αποτρέποντας έτσι την άσκοπη ενεργοποίηση της προστασίας λόγω οποιασδήποτε ανισορροπίας που οφείλεται στους CTs. Επιπλέον, η ροπή συγκράτησης αυξάνεται παρουσία σφαλμάτων εκτός του στοιχείου προστασίας, δημιουργώντας μία πιο σταθερή χαρακτηριστική λειτουργίας και αποτρέποντας τη δυσλειτουργία του ηλεκτρονόμου. Σε ηλεκτρονόμους με μεταβλητά taps στο πηνίο

συγκράτησης, τα taps μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να εξισορροπήσουν τα ρεύματα λόγω διαφορών στους CTs. Εάν οι ηλεκτρονόμοι δεν έχουν αυτήν τη δυνατότητα, τότε τα ρεύματα που εξέρχονται από τους CTs πρέπει να ταιριάζουν αρκετά για να αποφευχθεί η κακή λειτουργία των ηλεκτρονόμων.

Διαφορικοί ηλεκτρονόμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στοιχεία Σ.Η.Ε. που έχουν περισσότερους από δύο ακροδέκτες, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.24. Κάθε ένα από τα τρία πηνία συγκράτησης έχει τον ίδιο αριθμό σπειρών, και κάθε πηνίο συγκράτησης έχει ένα ρεύμα ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα, τα οποία αθροίζονται αριθμητικά. Η κλίση της χαρακτηριστικής λειτουργίας του κάθε ηλεκτρονόμου ποικίλει ανάλογα με την κατανομή ρεύματος στα τρία πηνία συγκράτησης. Υπάρχουν επίσης και άλλοι τύποι διαφορικών ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιούν στοιχεία κατεύθυνσης ή υπέρτασης αντί για υπερέντασης. Όλοι οι τύποι όμως, είναι επεκτάσεις της αρχής που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 3.24: Διαφορική προστασία στοιχείου με τρεις ακροδέκτες [7]

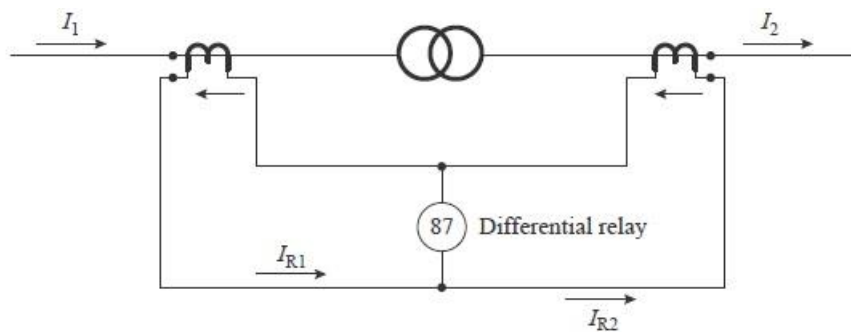
Η διαφορική προστασία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με το είδος του στοιχείου που προστατεύει ως ακολούθως:

- μετασχηματιστών
- γεννητριών και κινητήρων
- γραμμών
- ζυγών

3.4.2 Διαφορική προστασία μετασχηματιστών

Η διαφορική προστασία μπορεί να προστατεύσει έναν μετασχηματιστή αποτελεσματικά. Οι CTs στο πρωτεύον και δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι συνδεδεμένοι με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το ρεύμα να κυκλοφορεί όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.25. Σφάλματα στους ακροδέκτες ή στα τυλίγματα είναι εντός της ζώνης προστασίας και θα πρέπει να εκκαθαριστούν το συντομότερο δυνατό, προκειμένου να αποφευχθούν η εσωτερική καταπόνηση του μετασχηματιστή και ο κίνδυνος πυρκαγιάς. Η πλειονότητα εσωτερικών σφαλμάτων που

εμφανίζονται στα τυλίγματα είναι σφάλματα γης (διά μέσου του πυρήνα) ή μεταξύ των ελιγμάτων, με τη σοβαρότητά τους να ποικίλλει ανάλογα με τον σχεδιασμό του μετασχηματιστή και τον τύπο γείωσης.



Σχήμα 3.25: Διαφορική προστασία μετασχηματιστή [7]

Η διαφορική προστασία μπορεί επίσης να ανιχνεύσει και να εκκαθαρίσει σφάλματα μόνωσης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Η κύρια αιτία αυτών των σφαλμάτων είναι η δημιουργία τόξου ανάμεσα στους μονωτήρες και τα σφάλματα στον μεταγωγέα των taps. Αυτός ο τύπος προστασίας δεν ανταποκρίνεται μόνο σε σφάλματα μεταξύ των φάσεων και σε σφάλματα γης, αλλά και σε ένα βαθμό σε σφάλματα μεταξύ των ελιγμάτων. Εντούτοις, σφάλματα μεταξύ των φάσεων των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι λιγότερο συχνά. Επιπλέον, πολλές φορές ένα εσωτερικό σφάλμα που δεν αποτελεί άμεσο κίνδυνο, αν δεν ανιχνευθεί εγκαίρως, μπορεί να εξελιχθεί σε σοβαρό σφάλμα. Τέτοια σφάλματα είναι σφάλματα στον πυρήνα, που προκαλούνται από την αλλοίωση της μόνωσης μεταξύ των ελασμάτων που τον συντελούν.

Για να εφαρμοστούν οι αρχές της διαφορικής προστασίας στους τριφασικούς μετασχηματιστές, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι ακόλουθοι παράγοντες:

1. Ο λόγος μετασχηματισμού: Το ονομαστικό ρεύμα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι αντιστρόφως ανάλογο των αντιστοίχων εφαρμοζόμενων τάσεων. Αυτό πρέπει να αντισταθμίζεται χρησιμοποιώντας διαφορετικούς λόγους μετασχηματισμού για τους CTs στο πρωτεύον και το δευτερεύον του μετασχηματιστή.
2. Οι συνδέσεις μετασχηματιστή: Όταν ένας μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος σε αστέρα- τρίγωνο, το ρεύμα στο δευτερεύον έχει μία μετατόπιση φάσεως κατά 30° σε σχέση με το ρεύμα στο πρωτεύον. Αυτή η μετατόπιση μπορεί να αντισταθμιστεί με κατάλληλες συνδέσεις στο δευτερεύον των CTs. Επιπλέον, το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που ρέει στην πλευρά του αστέρα δεν επάγει ρεύμα στο τύλιγμα που είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο. Συνεπώς, το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας μπορεί να εξαλειφθεί από την πλευρά του αστέρα συνδέοντας τον CT σε τρίγωνο. Για τον ίδιο λόγο, θα πρέπει να συνδεθεί ο CT στην πλευρά του τριγώνου του μετασχηματιστή σε αστέρα. Όταν οι CTs συνδέονται σε τρίγωνο, τα ονομαστικά μεγέθη στο δευτερεύον τους πρέπει να πολλαπλασιαστούν επί $\sqrt{3}$, έτσι ώστε τα ρεύματα που ρέουν στο τρίγωνο να είναι σε ισορροπία με τα ρεύματα στο δευτερεύον των CTs που είναι συνδεδεμένοι σε αστέρα.

3. Η αλλαγή των taps: Εάν ο μετασχηματιστής έχει το πλεονέκτημα εναλλαγής των taps του, είναι δυνατό να μεταβληθεί ο λόγος μετασχηματισμού του και η διαφορική προστασία θα πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθεί αυτή την εναλλαγή. Δεδομένου ότι δεν είναι πρακτικό να μεταβάλλονται οι λόγοι μετασχηματισμού των CTs, η διαφορική προστασία θα πρέπει να έχει ένα κατάλληλο εύρος ανοχής για να είναι σε θέση να τροποποιεί την ευαισθησία της στην απόκριση λειτουργίας της.
4. Το φαινόμενο της αρχικής μαγνήτισης (magnetisation inrush): Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν ενεργοποιείται ένας μετασχηματιστής, ή όταν στο πρωτεύον η τάση επιστρέφει στην κανονική της τιμή μετά από την εκκαθάριση ενός εξωτερικού σφάλματος. Έτσι, στο πρωτεύον κυκλοφορεί το ρεύμα μαγνήτισης χωρίς να υπάρχει στο δευτερεύον αντίστοιχο ρεύμα. Επομένως, το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με το να υπάρχει εσωτερικό σφάλμα στον μετασχηματιστή. Σε αυτήν την περίπτωση, ο διαφορικός ηλεκτρονόμος βλέπει το ρεύμα μαγνήτισης ως εσωτερικό σφάλμα και για αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει κάποια μέθοδος διαχωρισμού μεταξύ του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος σφάλματος. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν:
 - Χρήση ενός διαφορικού ηλεκτρονόμου με κατάλληλη ευαισθησία για να αντιλαμβάνεται το ρεύμα μαγνήτισης, που συνήθως περιλαμβάνει μία μονάδα που εισάγει μία χρονική καθυστέρηση για να καλύψει την περίοδο της αρχικής αιχμής του ρεύματος κατά το φαινόμενο
 - Χρήση μονάδας περιορισμού αρμονικών ή μονάδας ελέγχου, σε συνδυασμό με τη διαφορική μονάδα
 - Αναστολή του διαφορικού ηλεκτρονόμου κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης του μετασχηματιστή

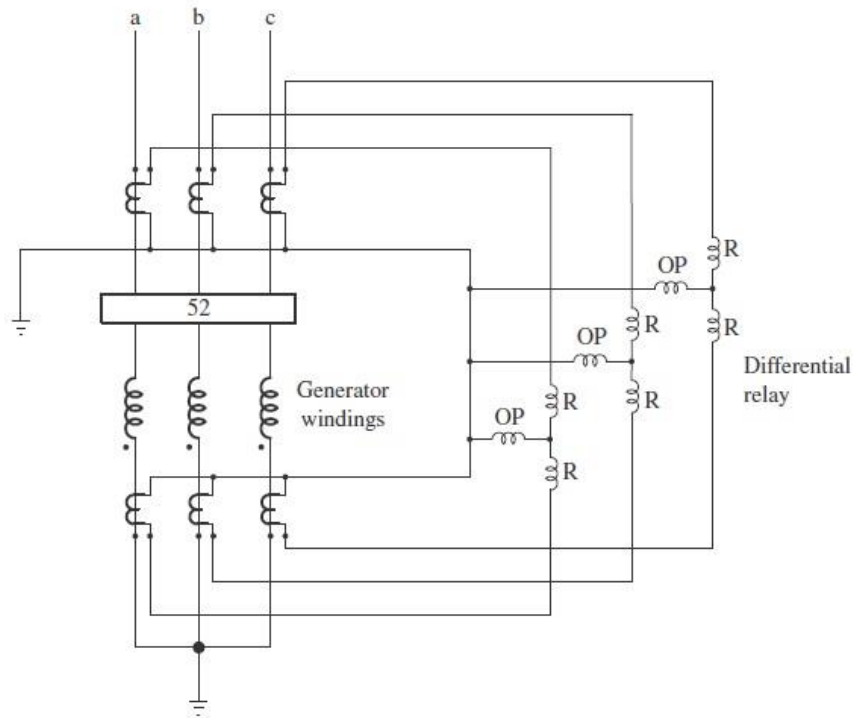
3.4.3 Διαφορική προστασία γεννητριών και περιστρεφόμενων μηχανών

Η διαφορική προστασία γεννητριών και άλλων περιστρεφόμενων μηχανών είναι παρόμοια με αυτήν των μετασχηματιστών. Τα εσωτερικά σφάλματα στα τυλίγματα της γεννήτριας περιλαμβάνουν βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων, βραχυκυκλώματα μεταξύ ελιγμάτων, ανοιχτοκυκλώματα και σφάλματα προς γη. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις το κύκλωμα θα πρέπει να αποσυνδεθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή διαφορική προστασία, ο ουδέτερος της γεννήτριας πρέπει να είναι καλά γειωμένος, είτε απευθείας είτε μέσω αντίστασης ή αντίδρασης. Η διαφορική προστασία θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

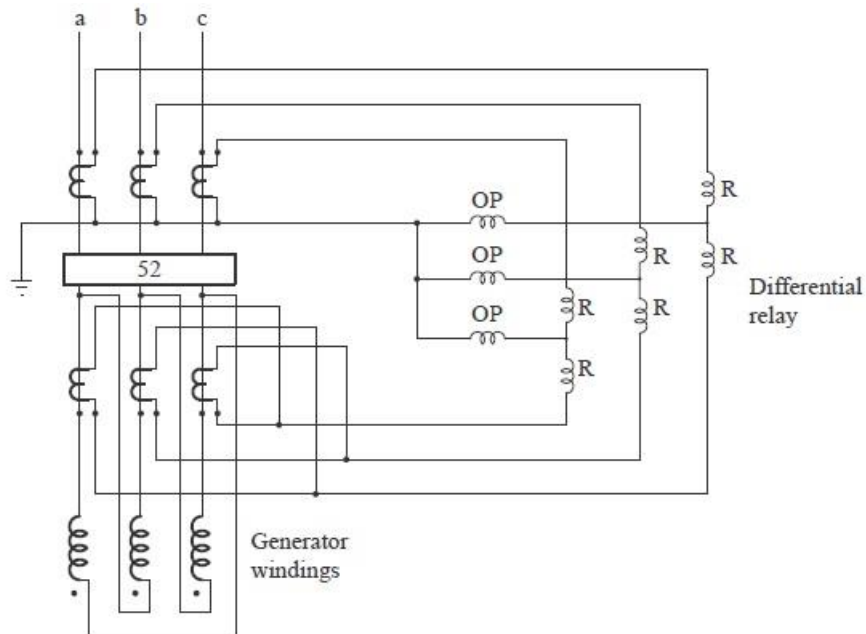
- Θα πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητη για να ανιχνεύει ζημιά στα τυλίγματα στάτη της γεννήτριας και να μη λειτουργεί για σφάλματα εκτός της.
- Θα πρέπει να λειτουργεί γρήγορα με τέτοιο τρόπο ώστε η γεννήτρια να αποσυνδεθεί πριν να προκύψουν σοβαρές ζημιές.
- Θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανοίγει ο κεντρικός διακόπτης, όπως και ο διακόπτης ουδέτερου και ο διακόπτης πεδίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Είδη προστασίας

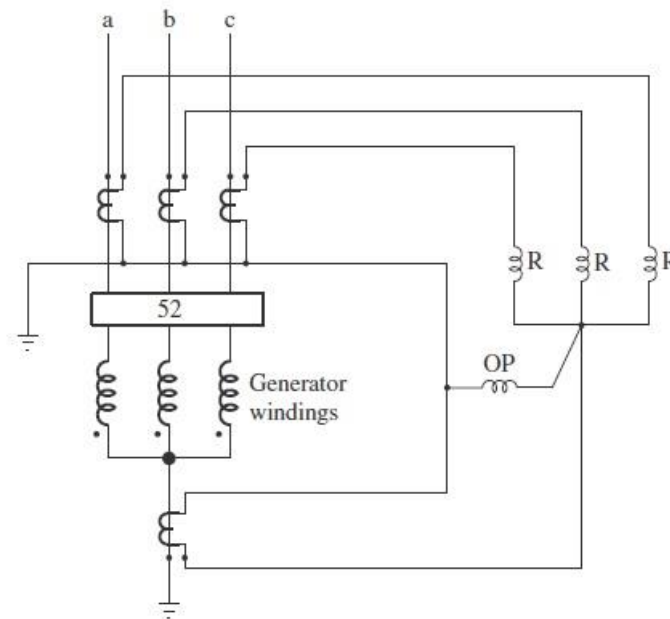
Οι συνδέσεις των CTs και των διαφορικών ηλεκτρονόμων για μία γεννήτρια σε αστέρα μπορεί να φανεί στο Σχ. 3.26, ενώ για μία σύνδεση τριγώνου στο Σχ. 3.27. Αν στη διαφορική προστασία έχει ληφθεί μόνο ο ουδέτερος όπως φαίνεται στο Σχ. 3.28, η διαφορική προστασία καλύπτει μόνο σφάλματα γης.



Σχήμα 3.26: Διαφορική προστασία γεννήτριας συνδεδεμένης σε αστέρα [7]



Σχήμα 3.27: Διαφορική προστασία γεννήτριας συνδεδεμένης σε τρίγωνο [7]



Σχήμα 3.28: Διαφορική προστασία γεννήτριας συνδεδεμένης σε αστέρα για σφάλματα γης [7]

3.4.4 Διαφορική προστασία γραμμών

Η μορφή της διαφορικής προστασίας χρησιμοποιώντας μόνο έναν ηλεκτρονόμο όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.22, δεν είναι κατάλληλη για μεγάλες εναέριες γραμμές μεταφοράς, καθώς τα άκρα μίας γραμμής είναι πολύ μακριά το ένα με το άλλο για να είναι σε θέση να συνδεθούν ικανοποιητικά τα δευτερεύοντα των δύο CTs. Είναι επομένως απαραίτητο να εγκατασταθούν ηλεκτρονόμοι σε κάθε άκρο του κυκλώματος και να διασυνδεθούν με κάποιον κατάλληλο σύνδεσμο επικοινωνίας. Η πιλοτική προστασία είναι μία προσαρμογή της αρχής της διαφορικής προστασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτές τις γραμμές με τον όρο πιλοτική να υποδεικνύει ότι υπάρχει ένα κανάλι διασύνδεσης μεταξύ των άκρων των γραμμών μέσω του οποίου μπορούν να μεταδοθούν οι πληροφορίες.

Η αρχή λειτουργίας της πιλοτικής διαφορικής προστασίας είναι παρόμοια με τη διαφορική προστασία γεννητριών και μετασχηματιστών. Αυτή η μέθοδος προστασίας είναι ιδανική από θεωρητική άποψη, αφού και τα δύο άκρα της γραμμής θα πρέπει να ανοίξουν ακαριαία για σφάλματα οπουδήποτε και αν συμβαίνουν στη γραμμή. Επιπλέον, το σύστημα δεν πρέπει να λειτουργεί για σφάλματα εκτός του τμήματος της γραμμής και συνεπώς αυτού του είδους η προστασία είναι εκ φύσεως επιλεκτική. Πολλές από τις λειτουργικές δυσκολίες της συμβατικής πιλοτικής προστασίας, που οφείλονται σε επαγόμενα ρεύματα, έχουν ξεπεραστεί με τη χρήση οπτικών ινών οι οποίες έχουν βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία αυτού του τύπου προστασίας.

3.4.5 Διαφορική προστασία ζυγών

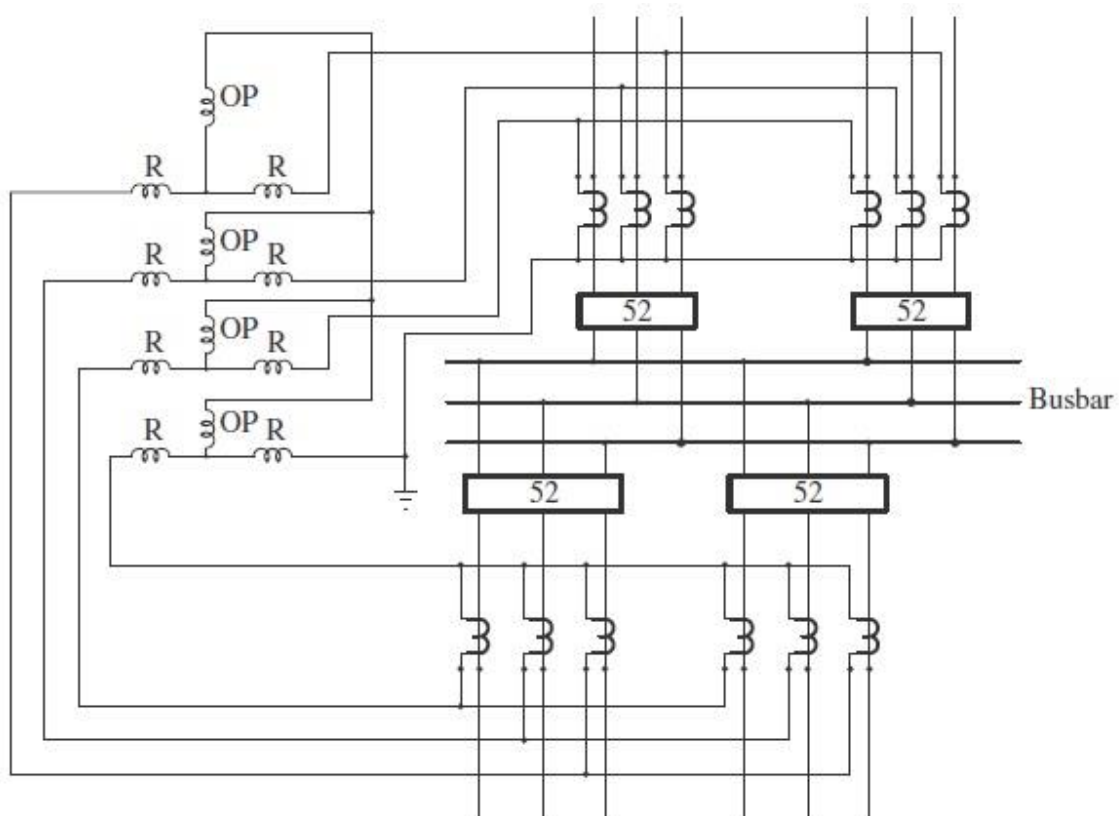
Η διαφορική προστασία ζυγών βασίζεται στις ίδιες αρχές με τη διαφορική προστασία γεννητριών και μετασχηματιστών. Υπό κανονικές συνθήκες συστήματος, η ισχύς που

εισέρχεται σε έναν ζυγό είναι ίδια με την ισχύ που εξέρχεται από αυτόν. Αν υπάρχει ένα σφάλμα στο εσωτερικό του διαφορικού κυκλώματος το σύστημα βγαίνει εκτός ισορροπίας, και κατά συνέπεια το ρεύμα ρέει στο πηνίο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, προκαλώντας στη συνέχεια το άνοιγμα όλων των διακοπών που συνδέονται με αυτόν τον ζυγό.

Μπορεί να υπάρχουν πολλά κυκλώματα συνδεδεμένα σε έναν ζυγό, γεγονός που συνεπάγεται τη σύνδεση ενός αριθμού CTs παράλληλα. Μπορούν να συνδεθούν συνήθως από έξι έως οκτώ CTs παράλληλα χωρίς δυσκολία. Αν και σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πολλαπλά πηνία συγκράτησης, έχει υπερισχύσει η διαφορική προστασία υψηλής σύνθετης αντίστασης, που θα αναλυθεί παρακάτω, λόγω της καλύτερης απόδοσής της. Η πλειονότητα των σφαλμάτων σε έναν ζυγό περιλαμβάνουν μία φάση και τη γη και οφείλονται σε πολλές αιτίες, όπως κεραυνοπληξίες και ατέλειες στη μόνωση του εξοπλισμού διακοπών.

3.4.5.1 Διαφορική προστασία με πολλαπλά πηνία συγκράτησης

Σε ένα σχήμα με πολλαπλά πηνία συγκράτησης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορικοί ηλεκτρονόμοι με χαρακτηριστική μεταβλητού ποσοστού, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.29. Τα δευτερεύοντα των CTs στην εξερχόμενη πλευρά του ζυγού συνδέονται παράλληλα και διά μέσου του διαφορικού ηλεκτρονόμου, συνδέονται μαζί με τα δευτερεύοντα των CTs στην εισερχόμενη πλευρά του ζυγού, που επίσης συνδέονται παράλληλα.

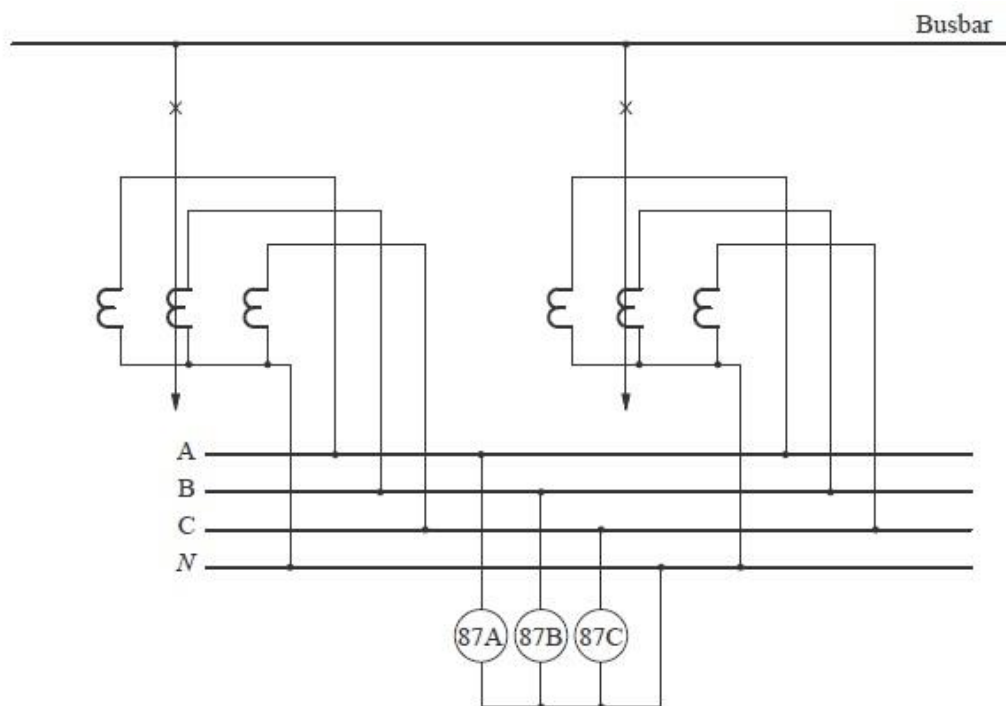


Σχήμα 3.29: Διαφορική προστασία ζυγού με πολλαπλά πηνία συγκράτησης [7]

3.4.5.2 Διαφορική προστασία υψηλής σύνθετης αντίστασης

Η διάταξη υψηλής σύνθετης αντίστασης εξαναγκάζει κάθε διαφορικό ρεύμα σφάλματος να ρέει μέσω των CTs και όχι μέσω του πηνίου λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, και έτσι αποφεύγεται η δυσλειτουργία για εξωτερικά σφάλματα ή σε συνθήκες υπερφόρτισης όταν τα ρεύματα δευτερεύοντος όλων των CTs δεν είναι τα ίδια λόγω των διαφορών στα χαρακτηριστικά μαγνήτισής τους.

Στο παρακάτω Σχ. 3.30 τοποθετούνται ομάδες από CTs σε κάθε μία από τις φάσεις και με τη χρήση ενός κοινού ζυγού ανά φάση τροφοδοτούνται τρία στοιχεία ενός διαφορικού ηλεκτρονόμου υψηλής σύνθετης αντίστασης, και έτσι ο ζυγός είναι προστατευμένος και από σφάλματα μεταξύ φάσεων και από σφάλματα γης.



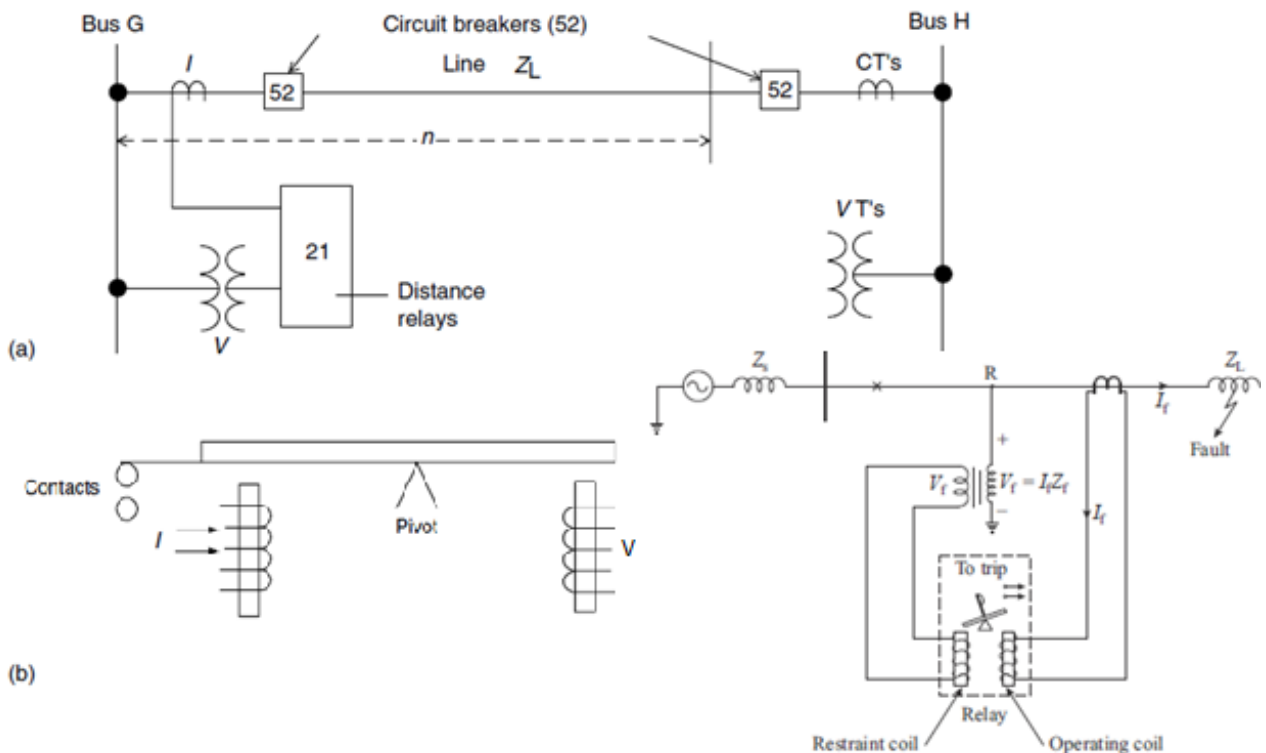
Σχήμα 3.30: Διαφορική προστασία ζυγού υψηλής σύνθετης αντίστασης με χρήση κοινού ζυγού ανά φάση [7]

3.5 Προστασία αποστάσεως

Βασική αρχή των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι η σύγκριση της τάσης και του ρεύματος του συστήματος. Λειτουργούν όταν ο λόγος των παραπάνω μεγεθών είναι μικρότερος από μία προκαθορισμένη τιμή. Σε συνθήκες ισορροπίας και σε σφάλματα φάσης, ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα που εφαρμόζεται στον ηλεκτρονόμο είναι ουσιαστικά η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος, επειδή $\frac{V}{I} = Z$. Έτσι, αυτοί οι ηλεκτρονόμοι ρυθμίζονται με βάση τη σταθερή αντίσταση του Σ.Η.Ε. για τη ζώνη που πρέπει να προστατεύσουν [2].

3.5.1 Χαρακτηριστική λειτουργίας τύπου Impedance

Ένας προηγούμενος σχεδιασμός παρέχει μία καλή βασική κατανόηση της αρχής και της εκτίμησης των κοινών όρων που χρησιμοποιούνται σήμερα. Αυτός ο πρώτος τύπος απεικονίζεται στο Σχ. 3.31. Ένα στοιχείο σε ισορροπία (Σχ. 3.31b) έχει έναν ηλεκτρομαγνήτη υπό τάση ώστε να περιορίζει την κίνησή του και έναν ακόμη ηλεκτρομαγνήτη που λειτουργεί με ρεύμα για να κλείνει τις επαφές του. Κατά τον σχεδιασμό και τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου, η δύναμη συγκράτησης, η οποία ρυθμίζεται από την τάση, μπορεί να ρυθμιστεί για να ισούται με τη δύναμη του ηλεκτρομαγνήτη που διαρρέεται από το ρεύμα για ένα τριφασικό σφάλμα μηδενικής τάσης στο σημείο με βάση το οποίο γίνεται η ρύθμιση και εμφανίζεται στο σχήμα ως nZ_L . Αυτό το οριακό σημείο είναι γνωστό ως «σημείο ισορροπίας», «όριο λειτουργίας» ή «σημείο απόφασης» του στοιχείου. Για σφάλμα μεταξύ του ηλεκτρονόμου και του σημείου n , το ρεύμα I θα είναι μεγαλύτερο και το V θα μειωθεί ή θα παραμείνει περίπου το ίδιο, σχετικά με την τιμή του για σφάλμα στο n . Έτσι, το αυξημένο ρεύμα προκαλεί την κλίση της ράβδου προς το αριστερό άκρο ώστε να κλείσουν οι επαφές.



Σχήμα 3.31: Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως με βάση το μοντέλο της ισορροπημένης ράβδου: (α) ηλεκτρονόμος αποστάσεως στη γραμμή μεταφοράς GH (β) απλουστευμένο παράδειγμα στοιχείου με ράβδο [2]

Για εξωτερικό σφάλμα στα δεξιά του σημείου n , το ρεύμα θα είναι μικρότερο από το σφάλμα στο n , και η τάση υψηλότερη. Έτσι, η ροπή ή η έλξη του πηνίου τάσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του πηνίου ρεύματος με αποτέλεσμα τη συγκράτηση, και άρα τη μη λειτουργία του ηλεκτρονόμου.

Στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος στο σημείο ισορροπίας n , η τάση στο n θα να είναι μηδέν. Στη συνέχεια, η τάση στη θέση του ηλεκτρονόμου θα είναι η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, δηλαδή $I * n * Z_L$. Διαιρώντας αυτήν την τάση με το ρεύμα, η μονάδα ανταποκρίνεται με αντίσταση:

$$Z_R = \frac{V}{I} = \frac{I * n * Z_L}{I} = n * Z_L.$$

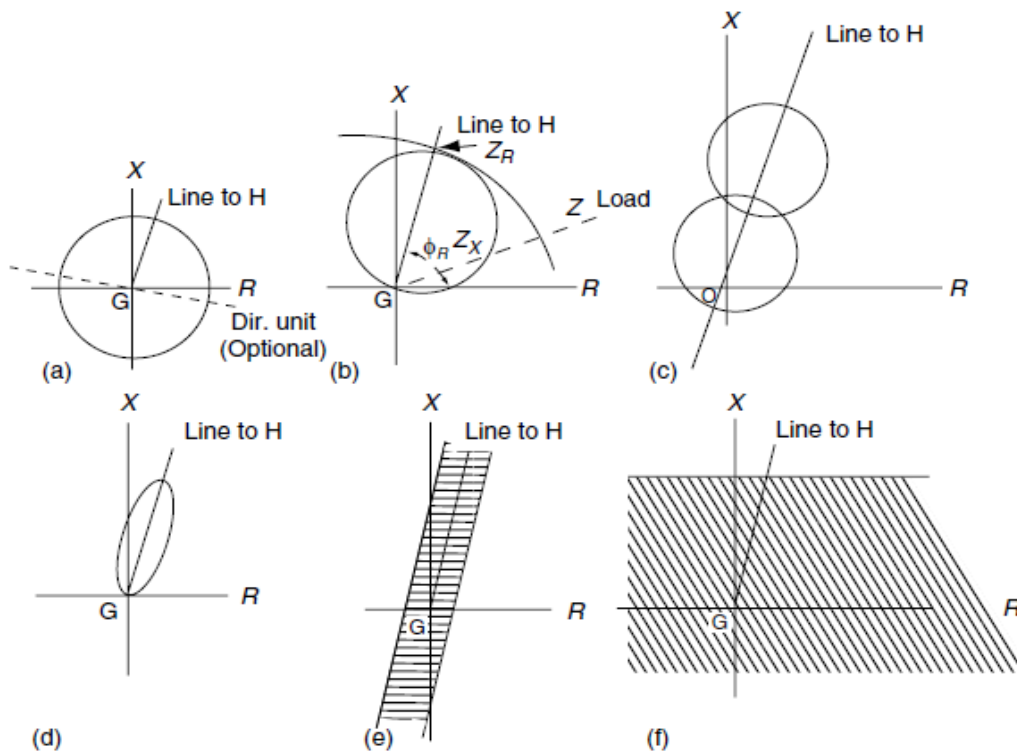
Έτσι, η ρύθμιση και η λειτουργία είναι συνάρτηση της σύνθετης αντίστασης από το σημείο μέτρησης της τάσης του ηλεκτρονόμου μέχρι το σημείο ρύθμισης.

Έχει αποδειχθεί ότι χρησιμοποιώντας πολικές τάσεις και ρεύματα, η έκταση των ηλεκτρονόμων φάσης είναι η ίδια για τριφασικά, διφασικά με γη και χωρίς γη σφάλματα. Επειδή το ρεύμα απαλείφεται στην παραπάνω εξίσωση, η Z_R είναι σταθερή για συγκεκριμένο σημείο για ένα μεγάλο εύρος τιμών ρευμάτων σφάλματος.

3.5.2 Διάγραμμα R-X

Τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρονόμων αποστάσεως φαίνονται καλύτερα σε ένα διάγραμμα R-X, όπου η αντίσταση R είναι η τετμημένη και η αντίδραση X είναι η τεταγμένη. Τυπικές χαρακτηριστικές σε αυτούς τους άξονες παρουσιάζονται στο Σχ. 3.32. Για κάθε περίπτωση, ως αρχή θεωρείται η θέση του ηλεκτρονόμου, με την περιοχή λειτουργίας γενικά στο πρώτο τεταρτημόριο. Όποτε η αναλογία τάσης και ρεύματος του συστήματος πέφτουν εντός του εμφανιζόμενου κύκλου ή στη σκιασμένη περιοχή, ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί.

Ο στοιχειώδης τύπος ηλεκτρονόμου που συζητήθηκε στο Σχ. 3.31 αντιστοιχεί σε μία χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης όπως αυτή που φαίνεται στο Σχ. 3.32a. Αυτό το ξεπερασμένο σχέδιο ήταν ανεξάρτητο της σχέσης φάσης της τάσης και του ρεύματος, λειτουργώντας έτσι και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Έτσι, ήταν απαραίτητη μία ξεχωριστή μονάδα ανίχνευσης κατεύθυνσης για να αποτρέπει τη λειτουργία για σφάλματα στα αριστερά του ζυγού G (βλ. Σχ. 3.32a).



Σχήμα 3.32: Χαρακτηριστικές ηλεκτρονόμοι απόστασης στο διάγραμμα R-X: (a) τύπου impedance, (b) mho, (c) offset mhos, (d) τύπου φακού, (e) τύπου παρωπίδων, (f) τύπου reactance [2]

3.5.3 Χαρακτηριστική λειτουργίας τύπου ΜΗΟ

Ο κύκλος που περνά από την αρχή των αξόνων (βλ. Σχ. 3.32b) είναι γνωστός ως mho και χρησιμοποιείται ευρέως για την προστασία γραμμών. Εντοπίζει κατεύθυνση και είναι πιο ευαίσθητος σε ρεύματα σφάλματος, που φθάνουν περίπου στις 60°-85° υστέρησης, από ότι σε φορτία που έχουν ρεύμα με 0°-30° υστέρησης. Η αντίσταση φορτίου δίνεται από την εξίσωση:

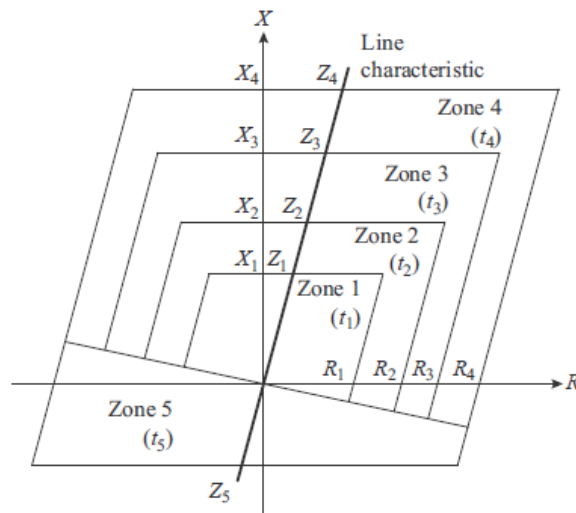
$$Z_{load} = \frac{V_{LN}}{I_{load}}$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι ένα υψηλό ρεύμα ισοδυναμεί με μία χαμηλή αντίσταση. Έτσι, για μεγάλα φορτία το διάνυσμα της σύνθετης αντίστασης κινείται προς την αρχή των αξόνων και για μικρά φορτία απομακρύνεται από αυτή. Με άλλα λόγια, οι ηλεκτρονόμοι απόστασης του Σχ. 3.32b έως το Σχ. 3.32e μπορούν να λειτουργήσουν σε ρεύμα σφάλματος μικρότερο από το ρεύμα φορτίου.

3.5.4 Ηλεκτρονόμοι με πολυγωνικές χαρακτηριστικές λειτουργίας

Οι ηλεκτρονόμοι με πολυγωνικές χαρακτηριστικές εκτείνονται σε μεγαλύτερη απόσταση για να καλύψουν την αντίσταση σφάλματος, ιδιαίτερα για τις γραμμές μικρού μήκους. Η πολυγωνική χαρακτηριστική λειτουργίας επιτυγχάνεται από τρία ανεξάρτητα στοιχεία μέτρησης: αντίδραση, αντίσταση και κατεύθυνση. Για να επιτευχθεί αυτή η χαρακτηριστική, τα

στοιχεία μέτρησης συνδυάζονται καταλλήλως. Ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται μόνο όταν έχουν λειτουργήσει και τα τρία στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται το απαιτούμενο πολυγωνικό σχήμα (Σχ. 3.33).



Σχήμα 3.33: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου αποστάσεως τύπου τετραπλεύρου [7]

3.5.5 Ρυθμίζοντας την έκταση και τον χρόνο λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως

Οι ηλεκτρονόμοι αποστάσεως ρυθμίζονται με βάση τη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας από τη θέση τους μέχρι το σημείο της γραμμής που πρέπει να προστατευθεί. Οι σύνθετες αντιστάσεις γραμμής είναι ανάλογες των μηκών των γραμμών. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος, ξεκινώντας από τη θέση του ηλεκτρονόμου. Ωστόσο, αυτή η τιμή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ρεύματα και τάσεις από τους μετασχηματιστές μέτρησης που τροφοδοτούν τους ηλεκτρονόμους. Επομένως, για να μετατραπεί η πρωτεύουσα αντίσταση σε δευτερεύουσα τιμή, με την οποία ρυθμίζεται ο ηλεκτρονόμος απόστασης, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{V_{prim}}{I_{prim}} = Z_{prim} = \frac{V_{sec} * VTR}{I_{sec} * CTR} \Rightarrow Z_{sec} = Z_{prim} \frac{CTR}{VTR}$$

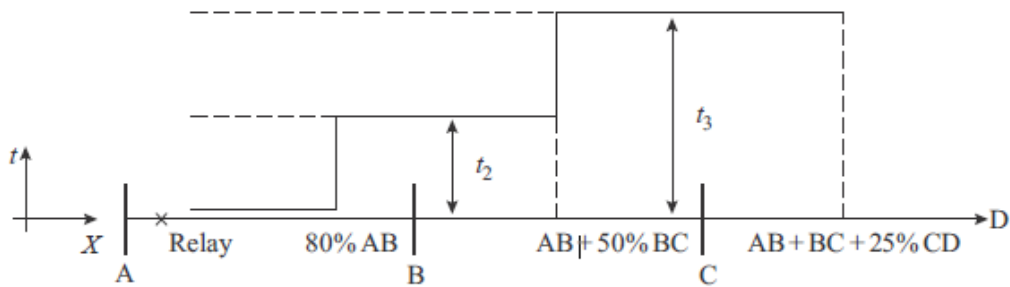
όπου CTR και VTR είναι οι λόγοι μετασχηματισμού των CTs και VTs αντίστοιχα.

Κανονικά, χρησιμοποιούνται τρεις ζώνες προστασίας προς μία κατεύθυνση για την κάλυψη ενός τμήματος γραμμής και την παροχή εφεδρικής προστασίας σε απομακρυσμένα τμήματα (βλ. Σχ. 3.34). Μερικοί ηλεκτρονόμοι έχουν μία ή δύο πρόσθετες ζώνες προς μία κατεύθυνση και μία άλλη προς την αντίθετη κατεύθυνση, η οποία ενεργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ζυγού. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο καθορισμός της εμβέλειας των τριών κύριων ζωνών προστασίας πραγματοποιείται σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Ζώνη 1: Η ρύθμιση αυτή καλύπτει το 80 - 85% του μήκους της προστατευόμενης γραμμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Είδη προστασίας

- Ζώνη 2: Η ρύθμιση αυτή καλύπτει όλη την προστατευμένη γραμμή, καθώς και το 50% της επόμενης μικρότερης γραμμής.
- Ζώνη 3: Η ρύθμιση αυτή καλύπτει όλη τη γραμμή, το 100% της δεύτερης μεγαλύτερης γραμμής, καθώς και το 25% της επόμενης μικρότερης γραμμής.



Σχήμα 3.34: Ζώνες προστασίας ενός ηλεκτρονόμου αποστάσεως για ένα ακτινικό δίκτυο [7]

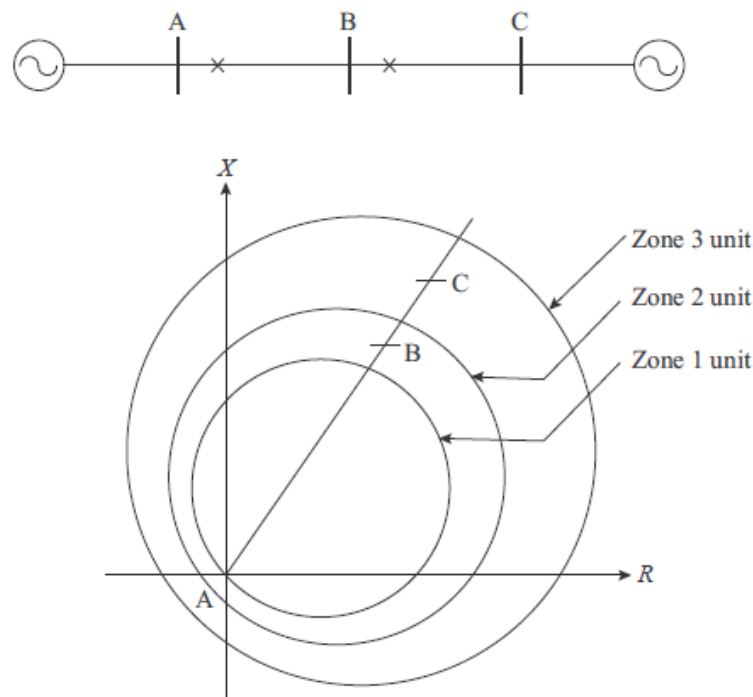
Εκτός από τη μονάδα ρύθμισης της έκτασης, κάθε μονάδα ζώνης διαθέτει μονάδα χρονοδιακόπτη. Ο χρόνος λειτουργίας για τη ζώνη 1 t_1 κανονικά ρυθμίζεται από τον κατασκευαστή να λειτουργεί στιγμιαία, καθώς οποιαδήποτε βλάβη στην προστατευόμενη γραμμή που ανιχνεύεται από τη μονάδα ζώνης 1 πρέπει να εκκαθαριστεί αμέσως χωρίς να χρειάζεται να περιμένει να λειτουργήσει οποιαδήποτε άλλη συσκευή. Ο χρόνος λειτουργίας για τη ζώνη 2 είναι συνήθως της τάξης των 0,25-0,4 s, και της ζώνης 3 είναι στο εύρος 0,6-1,0 s. Όταν υπάρχουν μετασχηματιστές ισχύος σε γειτονικούς υποσταθμούς, ο χρονοδιακόπτης της ζώνης 2 θα πρέπει να έχει ένα περιθώριο λειτουργίας 0,2 s σε σχέση με τον χρόνο ενεργοποίησης οποιασδήποτε συνδεδεμένης προστασίας υπερέντασης μετασχηματιστή. Στην περίπτωση της ζώνης 3, όταν οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων σε διαφορετικές θέσεις αλληλεπικαλύπτονται, ο χρονοδιακόπτης για τη ζώνη 3 του πλέον απομακρυσμένου ηλεκτρονόμου πρέπει να αυξηθεί κατά τουλάχιστον 0,2 s για να αποφευχθεί η λανθασμένη συνεργασία. Ωστόσο, ο χρόνος λειτουργίας για τις μονάδες της ζώνης 3 θα πρέπει επίσης να ρυθμιστεί σε μία τιμή που θα διασφαλίσει τη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος και συνεπώς, αν χρειάζεται, μπορεί να γίνει μείωση του χρόνου λειτουργίας της ζώνης 3.

Όπως αναφέρθηκε η ενεργοποίηση της προστασίας στη ζώνη 1 είναι στιγμιαία, και άρα η ρύθμιση του ηλεκτρονόμου δεν πρέπει να φτάσει ως το ζυγό στο τέλος της πρώτης γραμμής (βλ. Σχ. 3.34). Το υπόλοιπο 20-15% της γραμμής που δεν προστατεύεται από τη ζώνη 1 παρέχει ένα περιθώριο ασφαλείας με σκοπό την άμβλυση των σφαλμάτων στους υπολογισμούς της σύνθετης αντίστασης γραμμής, που προκαλούνται από τους μετασχηματιστές μέτρησης. Δεδομένου ότι η απόσταση και επομένως ο χρόνος λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι σταθερά, η επιλογική τους συνεργασία είναι πολύ ευκολότερη από αυτήν στους ηλεκτρονόμους υπερέντασης.

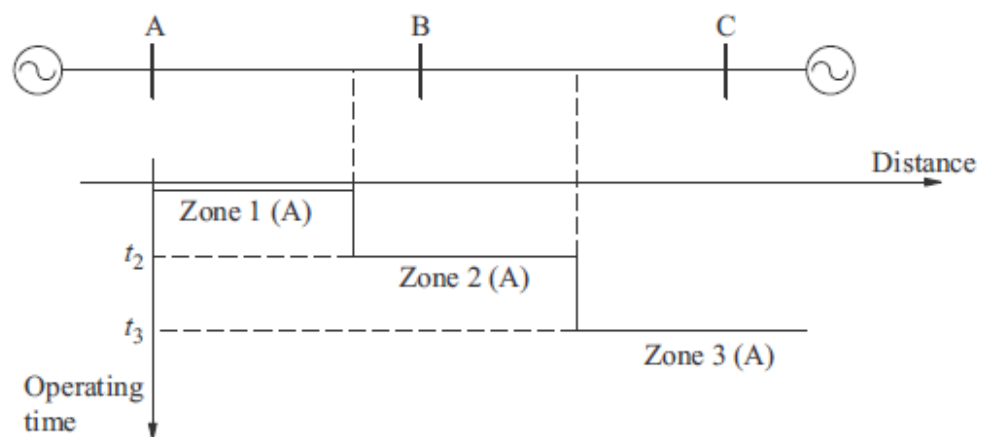
Για να επεξηγηθεί η φιλοσοφία που αναφέρθηκε προηγουμένως, εξετάζεται η περίπτωση του συστήματος στο Σχ. 3.35 στο οποίο απαιτείται η προστασία των γραμμών AB και BC. Είναι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Είδη προστασίας

απαραίτητο να οριστούν τρεις ζώνες προστασίας ξεκινώντας από τον ζυγό A. Και οι τρεις μονάδες πρέπει λειτουργούν για σφάλμα μέσα στη χαρακτηριστική λειτουργίας της ζώνης 1. Για σφάλμα στη γραμμή BC, αλλά εντός της ζώνης 2, οι μονάδες ζώνης 2 και ζώνης 3 πρέπει να λειτουργούν. Δεδομένου ότι υπάρχει επίσης προστασία απόστασης στον ζυγό B, ο ηλεκτρονόμος στο A πρέπει να δίνει την ευκαιρία στον διακόπτη στο B να εκκαθαρίσει το σφάλμα. Για αυτόν τον λόγο, οι μονάδες της ζώνης 2 και της ζώνης 3 λειτουργούν με κατάλληλη χρονική καθυστέρηση προκειμένου να επιτευχθεί διάκριση μεταξύ σφαλμάτων στις γραμμές AB και BC. Το διάγραμμα των χρόνων λειτουργίας του ηλεκτρονόμου στον A φαίνεται στο Σχ. 3.36.



Σχήμα 3.35: Χαρακτηριστική λειτουργίας για προστασία απόστασης στον ζυγό A [7]

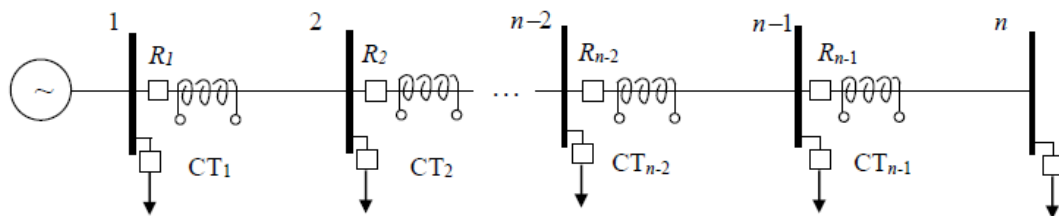


Σχήμα 3.36: Χρόνοι λειτουργίας για προστασία απόστασης στον ζυγό A [7]

4 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

4.1 Αλγόριθμος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά δίκτυα

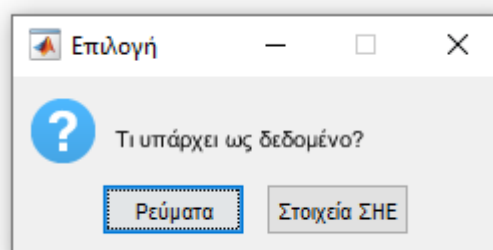
Αν n είναι ο αριθμός των ζυγών ενός ακτινικού δικτύου, τότε ο απαιτούμενος αριθμός ηλεκτρονόμων υπερέντασης, διακοπών ισχύος και μετασχηματιστών εντάσεως, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την προστασία του, θα είναι $n - 1$, θεωρώντας ότι ο τελευταίος ζυγός n συμπίπτει με το άκρο του τμήματος (γραμμής) που προστατεύει ο τελευταίος ηλεκτρονόμος.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα ακτινικού δικτύου [6]

Η ρύθμιση των ηλεκτρονόμων ενός ακτινικού δικτύου υλοποιήθηκε στο λογισμικό Matlab με το αρχείο overcurrent.m το οποίο καλεί τη συνάρτηση allfaults.m. Τα δεδομένα αντλούνται από το αρχείο Excel overc_data.xlsx.

Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, υπάρχουν δύο διαφορετικοί βασικοί τύποι δεδομένων, βάσει των οποίων διαφοροποιείται η εκτέλεση του αλγορίθμου. Για αυτόν τον λόγο αρχικά γίνεται ερώτηση προς τον χρήστη για το είδος των δεδομένων του δικτύου που διατίθενται, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.2.



Σχήμα 4.2: Ερώτηση προς τον χρήστη για το είδος των δεδομένων

Τα δεδομένα ρευμάτων («Ρεύματα») είναι τα ελάχιστα και μέγιστα ρεύματα σφάλματος που μπορεί να εμφανιστούν σε κάθε ζυγό και δίνονται από τον πλησιέστερο στην πηγή προς τον πιο απομακρυσμένο. Εάν ο χρήστης απαντήσει «Ρεύματα» τότε τα ρεύματα I_{min} και I_{max} αντλούνται από το πρώτο Φύλλο του overc_data.xlsx, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.3, χωρίς να χρειάζεται μελέτη βραχυκυκλωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

	A	B	C	D	E	F	G
1	I_{max}(A)	I_{min}(A)		N	t_c(s)	TDS_n(s)	
2	3187	1380		1	0,3	0,5	
3	659	473					
4	431	329					
5	301	238					
6	203	165					
7							
8							
9							
10							
11							

Σχήμα 4.3: Δεδομένα ρευμάτων από το 1^ο φύλλο του *overc_data.xlsx*

Η άλλη περίπτωση είναι ο χρήστης να απαντήσει «Στοιχεία Σ.Η.Ε.», όπου είναι γνωστά τα φορτία ή οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Αν δίνονται οι αντιστάσεις ακολουθίας είναι δυνατή η μελέτη βραχυκυκλωμάτων (τριφασικά, LLG, LL, SLG) με την κλήση της συνάρτησης *all_faults.m*. Τα δεδομένα των στηλών B-G (φορτία ζυγών, αντιστάσεις θετικής, μηδενικής ακολουθίας) του Σχ. 4.4 δίνονται από τον πλησιέστερο στην πηγή ζυγό προς τον πιο απομακρυσμένο. Θεωρείται ότι οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής ακολουθίας ($R1 + jX1$) είναι ίσες με της αρνητικής.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Pload(MW)	Qload(MVAr)	R1 (Ω)	X1 (Ω)	R0 (Ω)	X0 (Ω)		N	t_c(s)	TDS_n(s)	k (I_{min}=kI_{max})	OLF (I_{min}=OLF*I_{ct})
2	0	0	0	2,88	0	1,152		1,5	0,3	0,5	0,75	1,25
3	3	0	0	5,76	0	8,64						
4	3,5	0	0	17,28	0	25,92						
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												

Σχήμα 4.4: Δεδομένα Σ.Η.Ε. από το 2^ο φύλλο του *overc_data.xlsx*

όπου,

N : συντελεστής ασφαλείας

t_c : ο χρόνος διάκρισης σε s

TDS_n : ο μικρότερος χρονικός πολλαπλασιαστής για τον πιο απομακρυσμένο ηλεκτρονόμο από την πηγή

k : συντελεστής μείωσης του τριφασικού ρεύματος σφάλματος για την εύρεση του ελάχιστου ρεύματος σφάλματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

OLF: συντελεστής αύξησης του ονομαστικού ρεύματος για την εύρεση του ελάχιστου ρεύματος σφάλματος

Το ρεύμα διέγερσης I_{pu} ρυθμίζεται με βάση το I_{min} , ενώ το I_{max} χρησιμοποιείται για την εύρεση του *TDS*. Η λογική πίσω από την υλοποίηση του αλγορίθμου είναι η εξής:

- Εάν είναι γνωστά τα μέγιστα και τα ελάχιστα ρεύματα σφάλματος σε κάθε ζυγό
Με το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος I_{min} υπολογίζεται το ρεύμα διέγερσης.

$$I_{pu} = \frac{I_{min}}{N * CTR}$$

Το I_{min} αναφέρεται στο ελάχιστο ρεύμα σφάλματος στον ζυγό μπροστά από τον εκάστοτε ηλεκτρονόμο. Το N είναι ο συντελεστής ασφαλείας (≥ 1) και χρησιμεύει στο να ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος για ρεύματα λίγο μικρότερα του I_{min} .

- Εάν είναι γνωστά τα φορτία στους ζυγούς και οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών θετικής ακολουθίας
Πρέπει αρχικά να βρεθεί η ένταση του ρεύματος που περνάει από κάθε CT, για αυτόν τον λόγο θα υπολογισθούν τα ονομαστικά ρεύματα που ρέουν στις γραμμές σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tilde{I}_{LOAD} = \frac{\tilde{S}^*}{\sqrt{3} * \tilde{V}_{\pi}^*}$$

Τα ονομαστικά ρεύματα I_{CT} που περνούν από κάθε ζυγό προκύπτουν ως διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους \tilde{I}_{LOAD} από τον πιο απομακρυσμένο ζυγό έως τον ζυγό υπολογισμού. Έπειτα, θεωρείται ως ελάχιστο ρεύμα σφάλματος το ονομαστικό ρεύμα προσαυξημένο κατά ένα συντελεστή υπερφόρτισης (*OLF-overload factor*), του οποίου οι τιμές κυμαίνονται από 1,2-1,3.

$$I_{pu} = \frac{OLF * I_{CT}}{N * CTR}$$

Προφανώς, εδώ θα επιλέγεται $N = 1$.

Ως I_{max} θεωρείται το τριφασικό ρεύμα σφάλματος από τον τύπο (2.32).

- Εάν είναι γνωστά τα φορτία στους ζυγούς, οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας
Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση για όλα τα είδη σφαλμάτων με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών από τους τύπους (2.29), (2.30), (2.31), (2.32) και έτσι να βρεθούν από αυτά τα ελάχιστα και μέγιστα ρεύματα σφάλματος που είναι δυνατόν να εμφανιστούν σε κάθε ζυγό. Το I_{CT} προκύπτει με τον

ίδιο τρόπο με την παραπάνω περίπτωση. Για το I_{pu} επιλέγεται μία τιμή ανάμεσα σε μία προσαυξημένη τιμή του I_{CT} και σε μία μειωμένη τιμή του I_{min} .

$$I_{pu} = \frac{OLF * I_{CT} + \frac{1}{N} * I_{min}}{2 * CTR}$$

- Εάν δεν είναι γνωστά τα φορτία στους ζυγούς και είναι γνωστές μόνο οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών θετικής ακολουθίας

Ως I_{max} επιλέγεται το τριφασικό ρεύμα σφάλματος. Το I_{min} προκύπτει από μία εκτίμηση μείωσης του I_{max} κατά ένα συντελεστή k ($\sim 0,75$).

$$I_{min} = k * I_{max}$$

$$I_{pu} = \frac{I_{min}}{N * CTR}$$

- Εάν δεν είναι γνωστά τα φορτία στους ζυγούς, και είναι γνωστές οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να γίνει ανάλυση για όλα τα είδη σφαλμάτων με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών, και να βρεθούν τα ελάχιστα και μέγιστα ρεύματα σφάλματος.

$$I_{pu} = \frac{I_{min}}{N * CTR}$$

Η επιλογή των CTR για κάθε ηλεκτρονόμο γίνεται με βάση το ονομαστικό ρεύμα που έχει υπολογιστεί και επιλέγονται από τυποποιημένες τιμές. Για μία τιμή ονομαστικού ρεύματος επιλέγεται το πρωτεύον ρεύμα του CT, από τον πίνακα των CTs, με την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή από αυτό το ονομαστικό ρεύμα. Το δευτερεύον ρεύμα των μετασχηματιστών εντάσεως είναι 5 A και οι τυποποιημένες τιμές των CTs που θεωρήθηκαν στη συγκεκριμένη υλοποίηση είναι οι εξής:

$$CT = [50 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250 \ 300 \ 400 \ 450 \ 500 \ 600 \ 800 \ 900 \ 1000 \ 1100 \ 1200 \ 1500 \\ 1600 \ 2000 \ 2200 \ 2500 \ 3000]$$

Στην περίπτωση που δεν είναι γνωστά τα φορτία ή στην περίπτωση που δίνονται δεδομένα ρευμάτων, τότε τη θέση του ονομαστικού ρεύματος παίρνει το ελάχιστο ρεύμα I_{min} και επομένως οι μετασχηματιστές εντάσεως ρυθμίζονται με βάση αυτό.

Ο συγκεντρωτικός αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει τις παραμέτρους (I_{pu}, TDS) των ηλεκτρονόμων, παρουσιάζεται παρακάτω [6]. Στη θέση του I_{pu} εισάγεται κάθε φορά ο κατάλληλος τύπος, βάσει των παραπάνω περιπτώσεων.

$$k = n - 1$$

$$I_{pu}(k) = \frac{I_{min}(k+1)}{N*CTR(k)} \text{ or } I_{pu}(k) = \frac{OLF*I_{CT}(k)}{N*CTR(k)} \text{ or } I_{pu}(k) = \frac{OLF*I_{CT}(k) + \frac{1}{N}*I_{min}(k+1)}{2*CTR(k)}$$

$$TDS(k) = 0,5$$

for k = n - 2 down to 1 do

$$I_{pu}(k) = \frac{I_{min}(k+2)}{N*CTR(k)} \text{ or } I_{pu}(k) = \frac{OLF*I_{CT}(k)}{N*CTR} \text{ or } I_{pu}(k) = \frac{OLF*I_{CT}(k) + \frac{1}{N}*I_{min}(k+2)}{2*CTR(k)}$$

$$t_{primary}(k+1) = TDS(k+1) * f\left(\frac{I_{max}(k+1)}{I_{pu}(k+1) * CTR(k+1)}\right)$$

$$t_{backup}(k) = t_{primary} + t_c$$

$$TDS(k) = \frac{t_{backup}(k)}{f\left(\frac{I_{max}(k+1)}{I_{pu}(k) * CTR(k)}\right)}$$

end

Η μεταβλητή k δηλώνει τον εκάστοτε ηλεκτρονόμο προς ρύθμιση. Η διαδικασία ρύθμισης ξεκινά από τον πιο απομακρυσμένο ηλεκτρονόμο από την πηγή, ο οποίος έχει τον μικρότερο χρονικό πολλαπλασιαστή ίσο με $0,5s$, και καταλήγει στον πλησιέστερο στην πηγή. Αρχικά, καθορίζεται το ρεύμα διέγερσης του εκάστοτε ηλεκτρονόμου k με βάση το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος του μεθεπόμενου ζυγού, έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου $k+1$ που έχει μπροστά του. Έπειτα, υπολογίζεται ο χρόνος λειτουργίας που κάνει να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος $k+1$, που βρίσκεται μπροστά από τον εξεταζόμενο ηλεκτρονόμο, για τη μεγαλύτερη τιμή ρεύματος σφάλματος ακριβώς μπροστά του. Αυτός ο χρόνος αυξημένος κατά t_c , είναι ο χρόνος που θα κάνει ο εξεταζόμενος ηλεκτρονόμος k να ενεργοποιηθεί όταν λειτουργεί ως backup προστασία του μπροστινού του $k+1$. Τέλος, με γνωστό τον χρόνο δευτερεύουσας λειτουργίας του ηλεκτρονόμου k , το ρεύμα διέγερσής του και το μέγιστο ρεύμα σφάλματος στον επόμενο ζυγό, είναι δυνατός ο υπολογισμός του TDS του ηλεκτρονόμου k .

4.2 Παραδείγματα ρύθμισης ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά δίκτυα

Η οικογένεια καμπυλών αντιστρόφου χρόνου που επιλέχθηκε είναι της General Electric τύπου IAC [6]. Αποτελεί προεπιλογή στον κώδικα του Matlab που επιλύει το πρόβλημα της ρύθμισης των ηλεκτρονόμων, όμως είναι δυνατή η αντικατάσταση των εξισώσεων αυτών με άλλες, ανάλογα τις ανάγκες του προβλήματος. Η εξίσωση χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρονόμων είναι η παρακάτω, ενώ οι σταθερές A, B, C, D, E παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

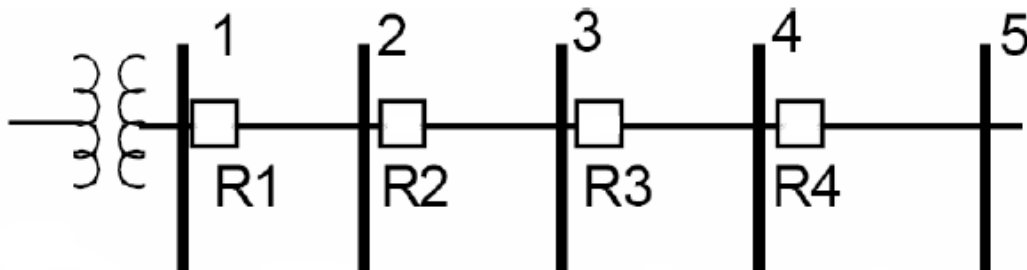
$$t = TDS \left(A + \frac{B}{\left(\frac{I}{I_{pu}}\right) - C} + \frac{D}{\left(\frac{I}{I_{pu}}\right)^2 - C} + \frac{E}{\left(\frac{I}{I_{pu}}\right)^3 - C} \right)$$

Πίνακας 4.1: Σταθερές A,B,C,D,E των καμπυλών General Electric IAC

IAC Curve Shape	A	B	C	D	E
Extremely Inverse	0,0040	0,6379	0,6200	1,7872	0,2461
Very Inverse	0,0900	0,7955	0,1000	-1,2885	7,9586
Inverse	0,2078	0,8630	0,8000	-0,4180	0,1947
Inverse Long	0,3754	17,8307	0,32	-23,7187	23,8978
Inverse Short	0,0442	0,0482	0,34	0,0223	0,0697

4.2.1 Επίλυση με γνωστά μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα σφάλματος

Θεωρείται το παρακάτω ακτινικό δίκτυο με 5 ζυγούς και τα ήδη γνωστά μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα σφάλματος σε κάθε ζυγό.



I_{max} (A)	3.187	659	431	301	203
I_{min} (A)	1.380	473	329	238	165

Σχήμα 4.5: Ακτινικό δίκτυο του παραδείγματος 1

Ζητείται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα βραχυκύκλωσης του Σχ. 4.5 να καθοριστεί το ρεύμα διέγερσης I_{pu} και ένας κατάλληλος χρονικός πολλαπλασιαστής TDS για κάθε ηλεκτρονόμο (από τον 1 έως τον 4), ώστε να εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία μεταξύ τους. Θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές:

- Χρόνος λειτουργίας διακοπών = 0,1 s (breaker time)
- Χρόνος μετάδοσης = 0,1 s (over travel time)
- Συντελεστής ασφαλείας = 0,1 s (security margin)

Συνεπώς, ο χρόνος καθυστέρησης για τους ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας (backup) είναι $t_c = 0,3$ s.

Για τον καθορισμό των ρευμάτων I_{pu} χρειάζονται τα ελάχιστα ρεύματα ενώ για τον καθορισμό του TDS χρειάζονται τα μέγιστα ρεύματα.

Εφαρμόζεται ο αλγόριθμος υπολογισμού του I_{pu} και του TDS για κάθε ηλεκτρονόμο, ξεκινώντας από τον τελευταίο. Η επίλυση γίνεται για extremely inverse curve, και οι λύσεις των

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

υπόλοιπων καμπυλών παρατίθενται συγκεντρωμένα στο τέλος, καθώς η μεθοδολογία είναι ίδια.

- Ηλεκτρονόμος 4 (R4):

Η διαδικασία ρύθμισης ξεκινά από τον ηλεκτρονόμο 4 (R4) που είναι ο πλησιέστερος στο σφάλμα στον ζυγό 5. Το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου R4 θα είναι ίσο με:

$$I_{pu_R4} = \frac{I_{\min(5)}}{N * CTR_4}$$

όπου $N = 3$ ο συντελεστής ασφαλείας

Πρέπει ο CT να μπορεί να υποβιβάσει το ρεύμα διέγερσης, οπότε επιλέγεται $CTR_4 = 100/5$:

$$I_{pu_R4} = \frac{165}{3 * 100/5} = 2,75 A$$

Επιλέγεται επίσης $TDS_{R4} = 0,5 s$ επειδή είναι επιθυμητή η μικρότερη χρονική καθυστέρηση για τον ηλεκτρονόμο R4 που είναι ο πιο απομακρυσμένος από την πηγή.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 4	$I_{pu_R4} = 2,75 A$	$TDS_{R4} = 0,5 s$
----------------	-----------------------	--------------------

- Ηλεκτρονόμος 3 (R3):

Για τον ηλεκτρονόμο R3, ο οποίος λειτουργεί ως δευτερεύουσα (backup) προστασία του ηλεκτρονόμου R4, το ρεύμα διέγερσης θα είναι:

$$I_{pu_R3} = \frac{I_{\min(5)}}{N * CTR_3}$$

οπότε επιλέγεται $CTR_3 = \frac{100}{5}$ ίδιο με του R4. Επομένως:

$$I_{pu_R3} = I_{pu_R4} = 2,75 A$$

(υπό δοκιμή)

Κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 3 (R3):

$$\frac{I_{\min(4)}}{I_{pu_R3} * CTR_3} = \frac{238}{2,75 * 100/5} = 4,3273 > N = 3$$

(άρα καλύπτεται η κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 3)

Για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(4)}}{I_{pu_R4} * CTR_4} = \frac{301}{2,75 * \frac{100}{5}} = 5,4727$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

και $TDS_{R4} = 0,5 s$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου 4 (R4) για πρωτεύουσα προστασία σε σφάλμα στον ζυγό 4 από την εξίσωση του ηλεκτρονόμου για extremely inverse καμπύλη. Από τη χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει $t_{R4} = 0,1067 s$. Η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου R3 όταν αυτός λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου 4, θα είναι ίση με $t_{R3} = t_{R4} + t_c = 0,1067 + 0,3 = 0,4067 s$. Από την εξίσωση extremely inverse καμπύλης, για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{max(4)}}{I_{pu_{R3}} * CTR_3} = \frac{301}{2,75 * \frac{100}{5}} = 5,4727$$

και $t_{R3} = 0,4067 s$ μπορεί να υπολογιστεί το TDS του ηλεκτρονόμου 3 (R3), το οποίο προκύπτει $TDS_{R3} = 1,9052 s$.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 3	$I_{pu_{R3}} = 2,75 A$	$TDS_{R3} = 1,9052 s$
----------------	------------------------	-----------------------

• Ηλεκτρονόμος 2 (R2):

Για τον ηλεκτρονόμο R2, ο οποίος λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου R3, το ρεύμα διέγερσης θα είναι:

$$I_{pu_{R2}} = \frac{I_{min(4)}}{N * CTR_2} = \frac{238}{3 * CTR_2} = \frac{79,3333}{CTR_2}$$

οπότε επιλέγεται $CTR_2 = 100/5$. Επομένως:

$$I_{pu_{R2}} = \frac{79,3333}{100/5} = 3,9667 A$$

(υπό δοκιμή)

Κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 2 (R2):

$$\frac{I_{min(3)}}{I_{pu_{R2}} * CTR_2} = \frac{329}{3,9667 * 100/5} = 4,147 > N = 3$$

(άρα καλύπτεται η κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 2)

Για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{max(3)}}{I_{pu_{R3}} * CTR_3} = \frac{431}{2,75 * \frac{100}{5}} = 7,8364$$

και $TDS_{R3} = 1,9052 s$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου 3 (R3) για πρωτεύουσα προστασία σε σφάλμα στον ζυγό 3 από την εξίσωση του ηλεκτρονόμου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

για extremely inverse καμπύλη. Από τη χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει $t_{R3} = 0,2427 s$. Η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου R2 όταν αυτός λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου 3, θα είναι ίση με $t_{R2} = t_{R3} + t_c = 0,2427 + 0,3 = 0,5427 s$. Από την εξίσωση extremely inverse καμπύλης, για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{max(3)}}{I_{pu_{R2}} * CTR_2} = \frac{431}{3,9667 * \frac{100}{5}} = 5,4328$$

και $t_{R2} = 0,5427 s$ μπορεί να υπολογιστεί το TDS του ηλεκτρονόμου 2 (R2), το οποίο προκύπτει $TDS_{R2} = 2,5134 s$.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 2	$I_{pu_{R2}} = 3,9667 A$	$TDS_{R2} = 2,5134 s$
----------------	--------------------------	-----------------------

• Ηλεκτρονόμος 1 (R1)

Για τον ηλεκτρονόμο R1, ο οποίος λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου R2, το ρεύμα διέγερσης θα είναι:

$$I_{pu_{R1}} = \frac{I_{min(3)}}{N * CTR_1} = \frac{329}{3 * CTR_1} = \frac{109,6667}{CTR_1}$$

οπότε επιλέγεται $CTR_1 = 150/5$. Επομένως:

$$I_{pu_{R1}} = \frac{109,667}{\frac{150}{5}} = 3,6556 A$$

(υπό δοκιμή)

Κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 1 (R1):

$$\frac{I_{min(2)}}{I_{pu_{R1}} * CTR_1} = 4,313 > N = 3$$

(άρα καλύπτεται η κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 1)

Για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{max(2)}}{I_{pu_{R2}} * CTR_2} = \frac{659}{3,9667 * \frac{100}{5}} = 8,3066$$

και $TDS_{R2} = 2,5134 s$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου 2 (R2) για πρωτεύουσα προστασία σε σφάλμα στον ζυγό 2 από την εξίσωση του ηλεκτρονόμου για extremely inverse καμπύλη. Από τη χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει $t_{R2} = 0,296 s$. Η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου R1 όταν αυτός λειτουργεί ως δευτερεύουσα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

προστασία του ηλεκτρονόμου 2, θα είναι ίση με $t_{R1} = t_{R2} + t_c = 0,296 + 0,3 = 0,596 s$. Από την εξίσωση extremely inverse καμπύλης, για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{max(2)}}{I_{pu_{R1}} * CTR_1} = \frac{659}{3,6556 * \frac{150}{5}} = 6,009$$

και $t_{R1} = 0,596 s$ μπορεί να υπολογιστεί το TDS του ηλεκτρονόμου 1 (R1), το οποίο προκύπτει $TDS_{R1} = 3,2134 s$.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 1 $I_{pu_{R1}} = 3,6556 A$ $TDS_{R1} = 3,2134 s$

Για τις άλλου τύπου καμπύλες προκύπτουν:

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα TDS και χρόνων του παραδείγματος 1

Very Inverse	$TDS (s)$	$t_{R_{Primary}} (s)$	$t_{R_{Backup}} (s)$
R4	0,5000	0,1224	0,4224
R3	1,7258	0,3253	0,6253
R2	2,5383	0,4625	0,7625
R1	3,3694		
Inverse	$TDS (s)$	$t_{R_{Primary}} (s)$	$t_{R_{Backup}} (s)$
R4	0,5000	0,1876	0,4876
R3	1,2995	0,4192	0,7192
R2	1,9098	0,6031	0,9031
R1	2,5126		
Inverse Long	$TDS (s)$	$t_{R_{Primary}} (s)$	$t_{R_{Backup}} (s)$
R4	0,5000	1,5586	1,8586
R3	0,5962	1,4215	1,7215
R2	0,5492	1,2539	1,5539
R1	0,5342		
Inverse Short	$TDS (s)$	$t_{R_{Primary}} (s)$	$t_{R_{Backup}} (s)$
R4	0,5000	0,0275	0,3275
R3	5,9592	0,3051	0,6051
R2	10,9908	0,5577	0,8577
R1	15,9481		

Σημειώνεται ότι ο χρόνος λειτουργίας $t_{R_{Primary}}$ του ηλεκτρονόμου που είναι πιο κοντά στην πηγή, δηλαδή του R1, για σφάλμα στον ζυγό 1 δεν υπολογίζεται στη συγκεκριμένη υλοποίηση επειδή δεν χρησιμοποιείται στη ρύθμιση κάποιου ηλεκτρονόμου. Αυτό φαίνεται και στον αλγόριθμο της Ενότητας 4.1. Παρόλα αυτά μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τη χρήση

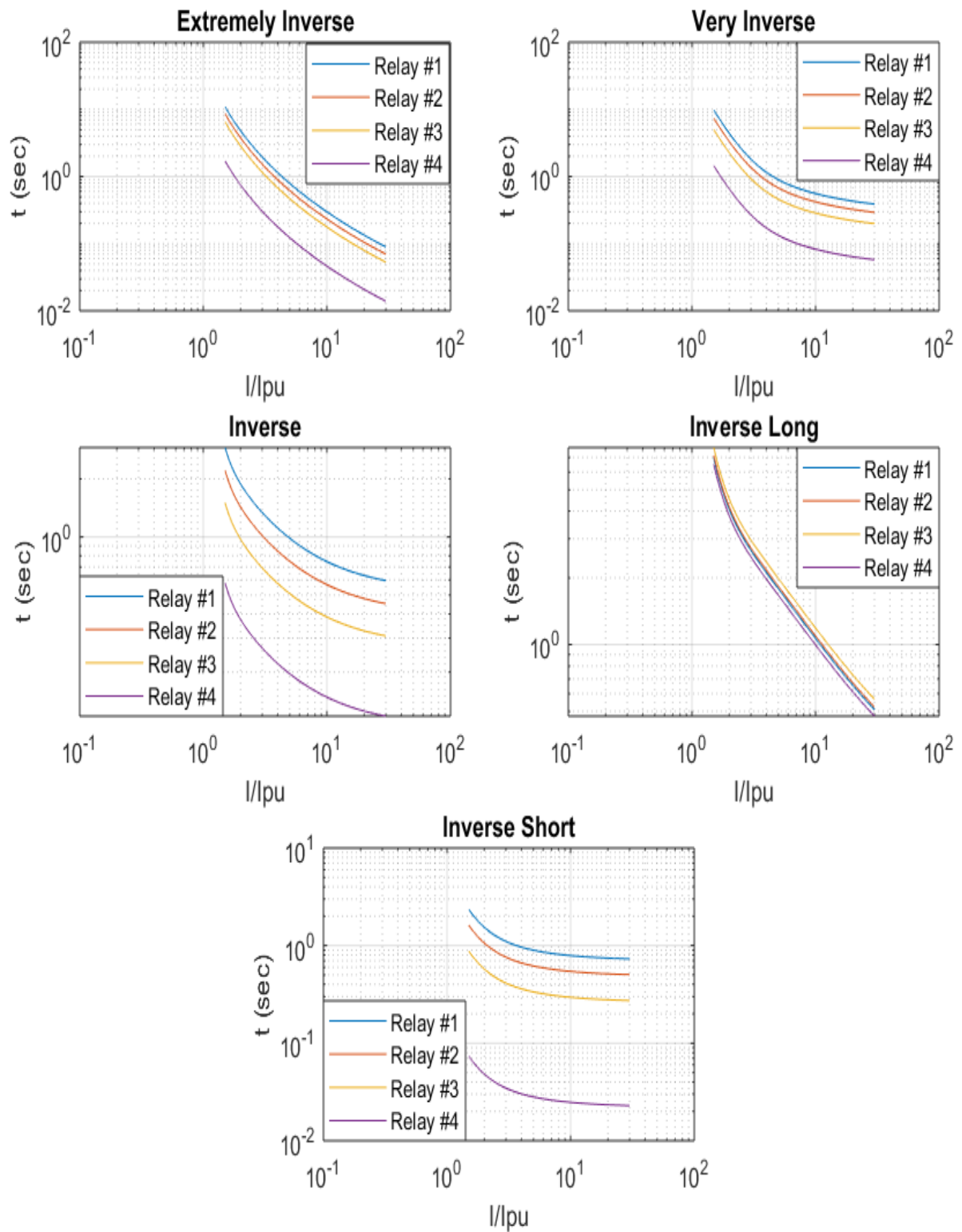
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

του $I_{\max(1)}$. Επιπλέον, η στήλη με τα $t_{R_{Backup}}$ δηλώνει τους χρόνους λειτουργίας των ηλεκτρονόμων που αποτελούν δευτερεύουσα προστασία αυτού της ίδιας γραμμής. Δηλαδή στον Πίνακα 4.2 για Very Inverse, ο χρόνος στον οποίο θα ενεργοποιηθεί η δευτερεύουσα προστασία του R4, δηλαδή ο R3, είναι 1,1352 s. Προφανώς, δεν υπάρχει backup προστασία για τον R1, για αυτό και ο Πίνακας 4.2 είναι κενός σε αυτά τα σημεία.

Από τον Πίνακα 4.2 καθώς και από το παρακάτω Σχ. 4.6 συμπεραίνεται ότι:

- Extremely inverse: Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2 > TDS_3 > TDS_4$. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 4.6, όπου οι καμπύλες λειτουργίας μετατοπίζονται προς τα πάνω, όσο πλησιέστερα βρίσκεται ο εκάστοτε ηλεκτρονόμος στην πηγή. Επίσης για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,1 s.
- Very inverse: Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2 > TDS_3 > TDS_4$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,4 s.
- Inverse: Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2 > TDS_3 > TDS_4$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,6 s.
- Inverse long: Δεν επιτυγχάνεται η επιλογική συνεργασία μεταξύ τους, αφού ισχύει ότι $TDS_2 < TDS_3$ ενώ ο R3 θα έπρεπε να ενεργοποιείται πριν τον R2 για το ίδιο ρεύμα σφάλματος. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 4.6, όπου η χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου R3 είναι πάνω από αυτή του R2.
- Inverse short: Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2 > TDS_3 > TDS_4$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,7 s.

Βάσει των ανωτέρω επιλέγεται η χαρακτηριστική καμπύλη extremely inverse, διότι επιτυγχάνεται επιλογική συνεργασία μεταξύ των ηλεκτρονόμων και ο χρόνος απόκρισης του R1 για μεγάλο ρεύμα σφάλματος κοντά στη γεννήτρια είναι ο μικρότερος.



Σχήμα 4.6: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 1

4.2.2 Επίλυση με γνωστά φορτία στους ζυγούς και γνωστές σύνθετες αντιστάσεις γραμμών θετικής ακολουθίας

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να υπολογιστούν τα μέγιστα και τα ελάχιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης ώστε να καθοριστούν τα ρεύματα διέγερσης και τα *TDS*.

Τα δεδομένα του ακτινικού δικτύου είναι:

- Τάση πηγής τροφοδοσίας (HEΔ) του συστήματος: 138 kV πολική
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση συστήματος: $1,5+j8 \Omega$
- Γραμμή 1 (σύνθετη αντίσταση): $2,2+j20 \Omega$
- Γραμμή 2 (σύνθετη αντίσταση): $1,8+j21 \Omega$
- Φορτίο στον ζυγό 1: 138 kV (πολική), 75 MW + j32 MVar (τριφασική)
- Φορτίο στον ζυγό 2: 138 kV (πολική), 90 MW + j25 MVar (τριφασική)
- Φορτίο στον ζυγό 3: 138 kV (πολική), 70 MW + j27 MVar (τριφασική)

Θεωρείται για απλοποίηση ότι η τάση σε όλους τους ζυγούς του συστήματος είναι η ονομαστική (138kV), αμελώντας έτσι την πτώση τάσης στις γραμμές, καθώς και ότι η γωνία της τάσης είναι 0° σε όλους τους ζυγούς.

Από την παρακάτω σχέση υπολογίζονται τα ρεύματα φορτίου στον κάθε ζυγό:

$$\tilde{I}_{LOAD} = \frac{\tilde{S}^*}{\sqrt{3} * \tilde{V}_\pi^*}$$

$$\tilde{I}_{LOAD1} = \frac{P_1 - jQ_1}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{75 - j32}{138 * \sqrt{3}} 10^3 = 341,1446 A < -23,10^\circ$$

$$\tilde{I}_{LOAD2} = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} * V_2} = \frac{90 - j25}{138 * \sqrt{3}} 10^3 = 390,7896 A < -15,52^\circ$$

$$\tilde{I}_{LOAD3} = \frac{P_3 - jQ_3}{\sqrt{3} * V_3} = \frac{70 - j27}{138 * \sqrt{3}} 10^3 = 313,8889 A < -21,09^\circ$$

Η ένταση του ονομαστικού ρεύματος πρωτεύοντος που διαρρέει κάθε CT είναι:

$$|I_{CT2}| = |I_{LOAD3}| = 313,8889 A$$
$$|I_{CT1}| = |I_{LOAD3} + I_{LOAD2}| = 703,8566 A$$

Με βάση τις παραπάνω τιμές και χρησιμοποιώντας τις τυποποιημένες τιμές για το ρεύμα πρωτεύοντος των CTs, επιλέγονται οι παρακάτω λόγοι μετασχηματισμού:

$$CTR_1 = \frac{800}{5} \quad \text{και} \quad CTR_2 = \frac{400}{5}$$

Για τα μέγιστα ρεύματα σφάλματος θα υπολογιστούν τα ρεύματα για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε κάθε ζυγό του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

Τα τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης προκύπτουν:

$$I_{\max(3)} = \frac{|V_3|}{|Z_{system} + Z_{Line1} + Z_{Line2}|} = \frac{\frac{138}{\sqrt{3}} 10^3}{|(1,5 + j8) + (2,2 + j20) + (1,8 + j21)|} = 1.615,9 A$$

$$I_{\max(2)} = \frac{|V_2|}{|Z_{system} + Z_{Line1}|} = \frac{\frac{138}{\sqrt{3}} 10^3}{|(1,5 + j8) + (2,2 + j20)|} = 2.821 A$$

$$I_{\max(1)} = \frac{|V_1|}{|Z_{system}|} = \frac{\frac{138}{\sqrt{3}} 10^3}{|(1,5 + j8)|} = 9.788,7 A$$

Τα I_{pu} καθορίζονται από τις ελάχιστες τιμές ρεύματος που αναμένονται να διαρρέουν τις γραμμές. Αυτές οι τιμές θεωρείται ότι είναι λίγο μεγαλύτερες από τα ονομαστικά ρεύματα I_{CT} που υπολογίστηκαν παραπάνω από τα δεδομένα φορτία. Έτσι, επιλέγεται $OLF = 1,2$, άρα $I_{min} = 1,2 * I_{CT}$.

Εφόσον έχουν βρεθεί όλες οι παράμετροι, μπορούν να προσδιοριστούν τα I_{pu} και τα TDS μέσω του γνωστού αλγορίθμου που εφαρμόστηκε και στο πρώτο παράδειγμα. Για συντελεστή ασφαλείας $N = 1$ το ρεύμα διέγερσης είναι:

$$I_{pu} = \frac{I_{min}}{N * CTR}$$

- **Ηλεκτρονόμος 2 (R2):**

Η διαδικασία ρύθμισης των ηλεκτρονόμων ξεκινά από τον ηλεκτρονόμο 2 (R2) που είναι ο πλησιέστερος στο σφάλμα στον ζυγό 3. Το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου R2 θα είναι ίσο με:

$$I_{pu_{R2}} = \frac{I_{min(2)}}{N * CTR_2} = \frac{1,2 * 313,8889}{1 * \frac{400}{5}} = 4,7083 A$$

Επιλέγεται επίσης $TDS_{R2} = 0,5 s$ επειδή είναι επιθυμητή η μικρότερη χρονική καθυστέρηση για τον ηλεκτρονόμο R2.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 2	$I_{pu_{R2}} = 4,7083 A$	$TDS_{R2} = 0,5 s$
----------------	--------------------------	--------------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

- Ηλεκτρονόμος 1 (R1):

Για τον ηλεκτρονόμο R1, ο οποίος λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου R2, το ρεύμα διέγερσης θα είναι:

$$I_{pu_R1} = \frac{I_{\min(2)}}{N * CTR_1} = \frac{1,2 * 313,8889}{1 * \frac{800}{5}} = 2,3542 \text{ A}$$

(υπό δοκιμή)

Κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 1 (R1):

$$\frac{I_{\min(1)}}{I_{pu_R1} * CTR_1} = \frac{1,2 * 703,8566}{2,3542 * \frac{800}{5}} = 2,2423 > N = 1$$

(άρα καλύπτεται η κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 1)

Για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(2)}}{I_{pu_R2} * CTR_2} = \frac{2.821}{4,7083 * \frac{400}{5}} = 7,4894$$

και $TDS_{R2} = 0,5 \text{ s}$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου 2 (R2) για πρωτεύουσα προστασία σε σφάλμα στον ζυγό 2 από την εξίσωση του ηλεκτρονόμου για extremely inverse καμπύλη. Από τη χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει $t_{R2} = 0,0677 \text{ s}$. Η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου R1 όταν αυτός λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου 2, θα είναι ίση με $t_{R1} = t_{R2} + t_c = 0,0677 + 0,3 = 0,3677 \text{ s}$. Από την εξίσωση extremely inverse καμπύλης, για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(2)}}{I_{pu_R1} * CTR_1} = \frac{2.821}{2,3542 * \frac{800}{5}} = 7,4893$$

και $t_{R1} = 0,3677 \text{ s}$ μπορεί να υπολογιστεί το TDS του ηλεκτρονόμου 1 (R1), το οποίο προκύπτει $TDS_{R1} = 2,7141 \text{ s}$.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 1	$I_{pu_R1} = 2,3542 \text{ A}$	$TDS_{R1} = 2,7141 \text{ s}$
----------------	---------------------------------	-------------------------------

Για τις άλλου τύπου καμπύλες προκύπτουν:

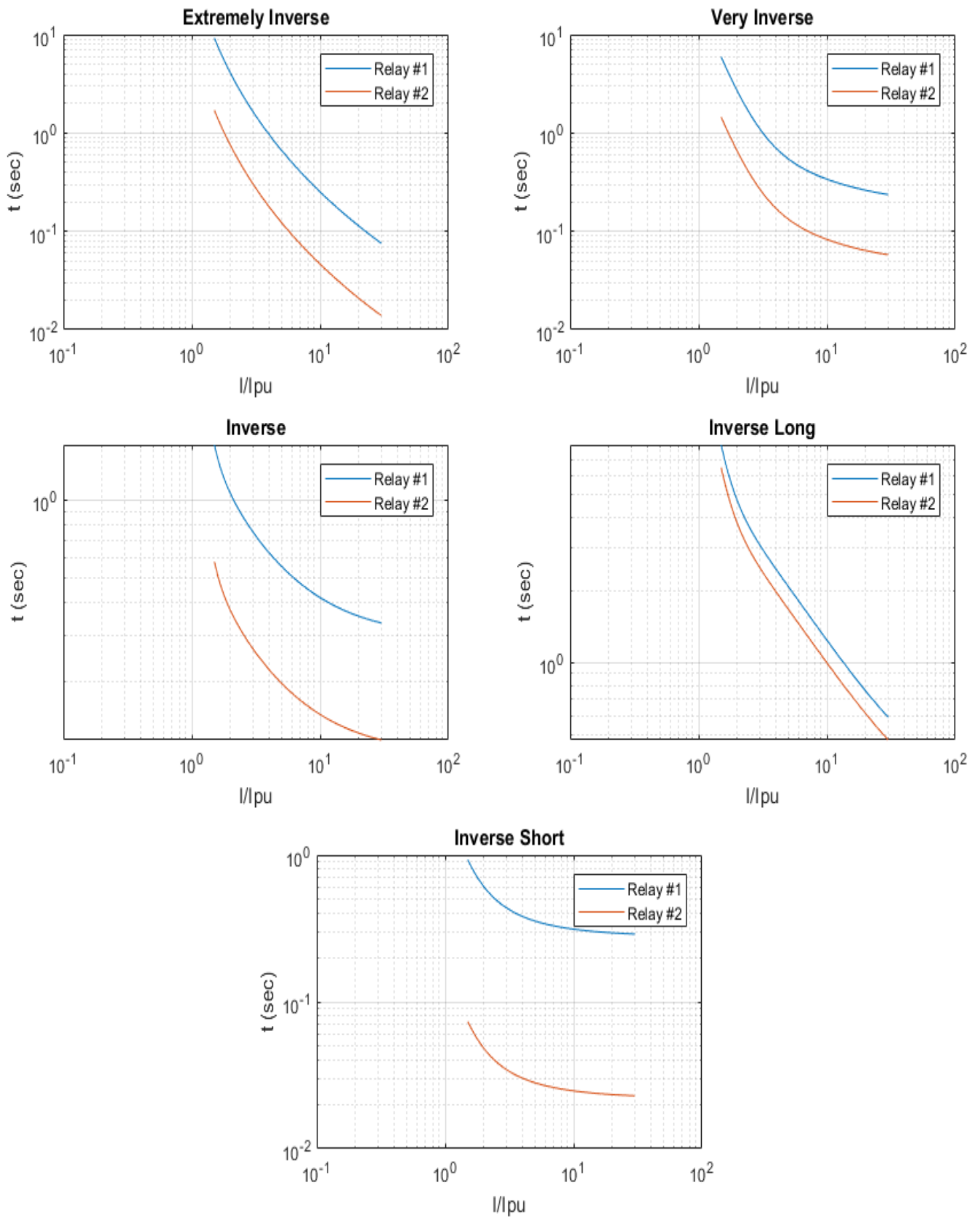
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα TDS και χρόνων του παραδείγματος 2

Very Inverse	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,0969	0,3969
R1	2,0481		
Inverse	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,1641	0,4641
R1	1,4143		
Inverse Long	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	1,2329	1,5329
R1	0,6217		
Inverse Short	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,0258	0,3258
R1	6,3175		

Από τον Πίνακα 4.3 καθώς και από το παρακάτω Σχ. 4.7 συμπεραίνεται ότι:

- **Extremely inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 4.7, όπου οι καμπύλες λειτουργίας μετατοπίζονται προς τα πάνω, όσο πλησιέστερα βρίσκεται ο εκάστοτε ηλεκτρονόμος στην πηγή. Επίσης για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,08 s.
- **Very inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,25 s.
- **Inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,35 s.
- **Inverse long:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,6 s.
- **Inverse short:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,3 s.

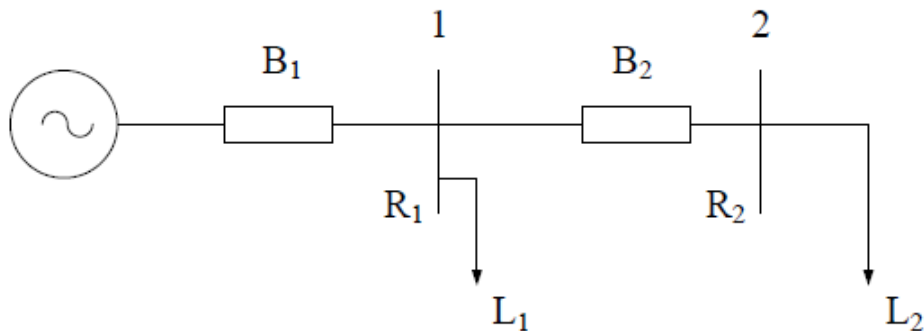
Βάσει των ανωτέρω επιλέγεται η χαρακτηριστική καμπύλη extremely inverse, διότι επιτυγχάνεται επιλογική συνεργασία μεταξύ των ηλεκτρονόμων και ο χρόνος απόκρισης του R1 για μεγάλο ρεύμα σφάλματος κοντά στη γεννήτρια είναι ο μικρότερος.



Σχήμα 4.7: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 2

4.2.3 Επίλυση με γνωστά φορτία και μέγιστα ρεύματα στους ζυγούς

Το δίκτυο που επιλύθηκε είναι το παρακάτω:



Σχήμα 4.8: Ακτινικό δίκτυο του παραδείγματος 3

- Οι τάσεις στους ζυγούς είναι 13,8 kV
- $I_{\max(1)} = 3.200 \text{ A}$, $I_{\max(2)} = 2.800 \text{ A}$
- $L_1 = 8,1(MW) + 3,923(MVAr)$, $L_2 = 3,4(MW) + 2,10713(MVAr)$

Θα υπολογιστούν τα ρεύματα φορτίων στους ζυγούς σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tilde{I}_{LOAD} = \frac{\tilde{S}^*}{\sqrt{3} * \tilde{V}_{\pi}^*}$$

$$\tilde{I}_{LOAD1} = \frac{P_1 - jQ_1}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{8,1 - j3,923}{13,8 * \sqrt{3}} 10^3 = 375,9088 \text{ A} < -25,84^\circ$$

$$\tilde{I}_{LOAD2} = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} * V_2} = \frac{3,4 - j2,10713}{13,8 * \sqrt{3}} 10^3 = 167,3479 \text{ A} < -31,79^\circ$$

Το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος που διαρρέει κάθε CT είναι:

$$|I_{CT2}| = |I_{LOAD2}| = 167,3479 \text{ A}$$

$$|I_{CT1}| = |I_{LOAD1} + I_{LOAD2}| = 543,2567 \text{ A}$$

Χρησιμοποιώντας τις τυποποιημένες τιμές για το ρεύμα πρωτεύοντος των CTs, επιλέγονται τα εξής CTR:

$$CTR_1 = \frac{600}{5} \quad \text{και} \quad CTR_2 = \frac{200}{5}$$

Τα I_{pu} καθορίζονται από τις ελάχιστες τιμές ρεύματος που αναμένονται να διαρρέουν τις γραμμές. Αυτές οι τιμές θεωρείται ότι είναι λίγο μεγαλύτερες από τις ονομαστικές, δηλαδή από τα I_{CT} που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Έτσι, για συντελεστή ασφαλείας $N = 1$ και $OLF = 1,2$ εφαρμόζεται ο γνωστός αλγόριθμος:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

- Ηλεκτρονόμος 2 (R2):

Η διαδικασία ρύθμισης των ηλεκτρονόμων ξεκινά από τον ηλεκτρονόμο 2 (R2) που είναι ο πλησιέστερος στο σφάλμα στον ζυγό 2. Το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου R2 θα είναι ίσο με:

$$I_{pu_R2} = \frac{I_{\min(2)}}{N * CTR_2} = \frac{1,2 * 167,3479}{1 * \frac{200}{5}} = 5,0204 A$$

Επιλέγεται επίσης $TDS_{R2} = 0,5 s$ επειδή είναι επιθυμητή η μικρότερη χρονική καθυστέρηση για τον ηλεκτρονόμο R2.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 2	$I_{pu_R2} = 5,0204 A$	$TDS_{R2} = 0,5 s$
----------------	-------------------------	--------------------

- Ηλεκτρονόμος 1 (R1):

Για τον ηλεκτρονόμο R1, ο οποίος λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου R2, το ρεύμα διέγερσης θα είναι:

$$I_{pu_R1} = \frac{I_{\min(2)}}{N * CTR_1} = \frac{1,2 * 167,3479}{1 * \frac{600}{5}} = 1,6735 A$$

Για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(2)}}{I_{pu_R2} * CTR_2} = \frac{2.800}{5,0204 * \frac{200}{5}} = 13,9431$$

και $TDS_{R2} = 0,5 s$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου 2 (R2) για πρωτεύουσα προστασία σε σφάλμα στον ζυγό 2 από την εξίσωση του ηλεκτρονόμου για extremely inverse καμπύλη. Από τη χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει $t_{R2} = 0,031 s$. Η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου R1 όταν αυτός λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου 2, θα είναι ίση με $t_{R1} = t_{R2} + t_c = 0,031 + 0,3 = 0,331 s$. Από την εξίσωση extremely inverse καμπύλης, για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(2)}}{I_{pu_R1} * CTR_1} = \frac{2.800}{1,6735 * \frac{600}{5}} = 13,9428$$

και $t_{R1} = 0,331 s$ μπορεί να υπολογιστεί το TDS του ηλεκτρονόμου 1 (R1), το οποίο προκύπτει $TDS_{R1} = 5,3346 s$.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 1	$I_{pu_R1} = 1,6735 A$	$TDS_{R1} = 5,3346 s$
----------------	-------------------------	-----------------------

Για τις άλλου τύπου καμπύλες προκύπτουν:

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα TDS και χρόνων του παραδείγματος 3

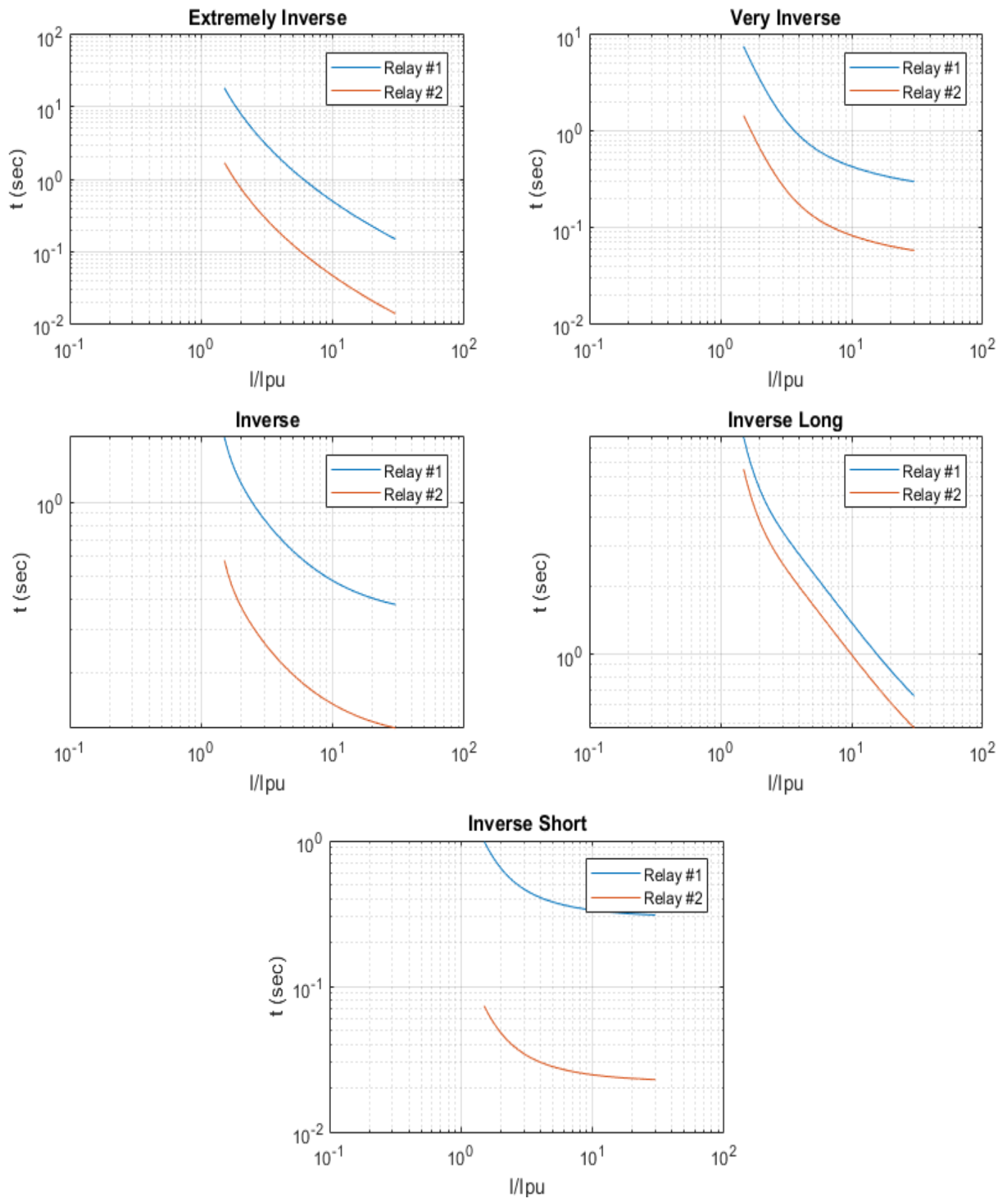
Very Inverse	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,0719	0,3719
R1	2,5871		
Inverse	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,1356	0,4356
R1	1,6065		
Inverse Long	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,7830	1,0830
R1	0,6916		
Inverse Short	<i>TDS</i> (s)	$t_{R_{Primary}}$ (s)	$t_{R_{Backup}}$ (s)
R2	0,5	0,0239	0,3239
R1	6,7641		

Από τον Πίνακα 4.4 καθώς και από το παρακάτω Σχ. 4.9 συμπεραίνεται ότι:

- **Extremely inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 4.9, όπου οι καμπύλες λειτουργίας μετατοπίζονται προς τα πάνω, όσο πλησιέστερα βρίσκεται ο εκάστοτε ηλεκτρονόμος στην πηγή. Επίσης για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,15 s.
- **Very inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,3 s.
- **Inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,4 s.
- **Inverse long:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,7 s.
- **Inverse short:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,3 s.

Βάσει των ανωτέρω επιλέγεται η χαρακτηριστική καμπύλη extremely inverse, διότι επιτυγχάνεται επιλογική συνεργασία μεταξύ των ηλεκτρονόμων και ο χρόνος απόκρισης του R1 για μεγάλο ρεύμα σφάλματος κοντά στη γεννήτρια είναι ο μικρότερος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα



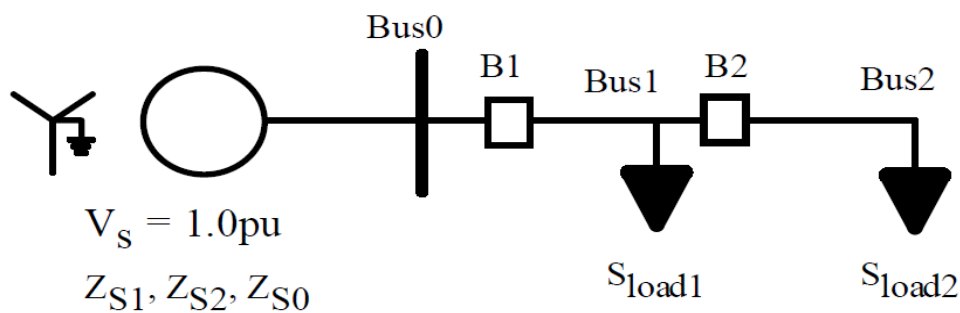
Σχήμα 4.9: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 3

4.2.4 Επίλυση με γνωστά φορτία στους ζυγούς και γνωστές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

Το παρακάτω ακτινικό δίκτυο έχει:

- Πολική τάση 24 kV στους ζυγούς 0, 1 και 2
- Αντίδραση πηγής $Z_{S1} = j2,88 \Omega$, $Z_{S0} = j1,152 \Omega$
- $Z_{L11} = j5,76 \Omega$, $Z_{L10} = j8,64 \Omega$
- $Z_{L21} = j17,28 \Omega$, $Z_{L20} = j25,92 \Omega$
- $S_{load1} = 3 MW + 0 MVar$, $S_{load2} = 3,5 MW + 0 MVar$

Οι αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας θεωρούνται ίσες με της θετικής.



Σχήμα 4.10: Ακτινικό δίκτυο του παραδείγματος 4

Εφόσον είναι γνωστές οι σύνθετες αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας, μπορούν να υπολογιστούν τα ρεύματα για όλα τα είδη σφαλμάτων από τις σχέσεις (2.29), (2.30), (2.31) και (2.32).

Τριφασικό σφάλμα:

$$I_{3\phi(2)} = \frac{|V_2|}{|Z_S + Z_{L1} + Z_{L2}|}$$

$$= \frac{\frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{|j2,88 + j5,76 + j17,28|} = 534,5835A$$

$$I_{3\phi(1)} = \frac{|V_1|}{|Z_S + Z_{L1}|} = \frac{\frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{|j2,88 + j5,76|} = 1.603,7507A$$

Διφασικό χωρίς γη:

$$I_{LL(2)} = \frac{-j\sqrt{3}|V_2|}{|2(Z_S + Z_{L1} + Z_{L2})|}$$

$$= \frac{-j\sqrt{3} * \frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{2|j2,88 + j5,76 + j17,28|} = 462,9629 A$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

$$I_{LL(1)} = \frac{-j\sqrt{3}|V_1|}{|2(Z_S + Z_{L1})|} = \frac{-j\sqrt{3} * \frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{2|j2,88 + j5,76|} = 1.388,8888 \text{ A}$$

Διφασικό με νη:

$$I_{LLG(2)} = \frac{-3|V_2|}{|Z_S + Z_{L1} + Z_{L2} + 2(Z_{S0} + Z_{L10} + Z_{L20})|} = \frac{-3 * \frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{|j2,88 + j5,76 + j17,28 + 2(j1,152 + j8,64 + j25,92)|} = 427,0342 \text{ A}$$

$$I_{LLG(1)} = \frac{-3|V_1|}{|Z_S + Z_{L1} + 2(Z_{S0} + Z_{L10})|} = \frac{-3 * \frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{|j2,88 + j5,76 + 2(j1,152 + j8,64)|} = 1.472,8323 \text{ A}$$

Μονοφασικό:

$$I_{SLG(2)} = \frac{3|V_2|}{|2(Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{L2}) + Z_{S0} + Z_{L10} + Z_{L20}|} = \frac{3 * \frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{|2(j2,88 + j5,76 + j17,28) + j1,152 + j8,64 + j25,92|} = 474,7946 \text{ A}$$

$$I_{SLG(1)} = \frac{3|V_1|}{|2(Z_{S0} + Z_{L1}) + Z_S + Z_{L10}|} = \frac{3 * \frac{24}{\sqrt{3}} * 10^3}{|2(j2,88 + j5,76) + j1,152 + j8,64|} = 1.535,5060 \text{ A}$$

Συνοπτικά:

	Ζυγός 1	Ζυγός 2
$I_{3\phi}$	1.603,7507	534,5835
I_{LL}	1.388,8888	462,9629
I_{LLG}	1.472,8323	427,0342
I_{SLG}	1.535,5060	474,7946

Από τις παραπάνω τιμές πρέπει να βρεθούν οι μέγιστες και οι ελάχιστες ώστε να ρυθμιστούν οι ηλεκτρονόμοι με βάση αυτές. Πρώτα όμως θα υπολογιστούν οι λόγοι των CTs από το ονομαστικά ρεύματα γραμμής:

$$\tilde{I}_{LOAD1} = \frac{P_1 - jQ_1}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{3 - j0}{24 * \sqrt{3}} 10^3 = 72,1687 \text{ A} < 0^\circ$$

$$\tilde{I}_{LOAD2} = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} * V_2} = \frac{3,5 - j0}{24 * \sqrt{3}} 10^3 = 84,1969 \text{ A} < 0^\circ$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

Η ένταση του ονομαστικού ρεύματος πρωτεύοντος που διαρρέει κάθε CT είναι:

$$|I_{CT2}| = |I_{LOAD2}| = 84,1969 A$$
$$|I_{CT1}| = |I_{LOAD1} + I_{LOAD2}| = 156,3656 A$$

Χρησιμοποιώντας τις τυποποιημένες τιμές για το ρεύμα πρωτεύοντος των CTs, επιλέγονται τα εξής CTR:

$$CTR_1 = \frac{200}{5} \quad \text{και} \quad CTR_2 = \frac{100}{5}$$

- Ηλεκτρονόμος 2 (R2):

Η διαδικασία ρύθμισης των ηλεκτρονόμων ξεκινά από τον ηλεκτρονόμο 2 (R2) που είναι ο πλησιέστερος στο σφάλμα στον ζυγό 2. Το ελάχιστο σφάλμα που «βλέπει» ο R2 είναι $I_{\min(2)} = I_{LLG,2} = 427,0342 A$.

Το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου R2 θα βρίσκεται ανάμεσα σε μία προσαυξημένη τιμή του ονομαστικού ρεύματος γραμμής I_{CT2} και στο ελάχιστο ρεύμα σφάλματος μειωμένο κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{N} = \frac{1}{1.5} = \frac{2}{3}$. Εδώ θα θεωρηθεί ότι το I_{pu} θα είναι ακριβώς στη μέση, άρα θα είναι ίσο με:

$$I_{pu_{R2}} = \frac{1,25 * I_{CT2} + \frac{2}{3} * I_{\min(2)}}{2 * CTR_2} = \frac{1,25 * 84,1969 + \frac{2}{3} * 427,0342}{2 * \frac{100}{5}} = 9,7484 A$$

Επιλέγεται επίσης $TDS_{R2} = 0,5 s$ επειδή είναι επιθυμητή η μικρότερη χρονική καθυστέρηση για τον ηλεκτρονόμο R2.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 2	$I_{pu_{R2}} = 9,7484 A$	$TDS_{R2} = 0,5 s$
----------------	--------------------------	--------------------

- Ηλεκτρονόμος 1 (R1):

Για τον ηλεκτρονόμο R1, ο οποίος λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου R2, το ρεύμα διέγερσης θα είναι:

$$I_{pu_{R1}} = \frac{1,25 * I_{CT1} + \frac{2}{3} * I_{\min(2)}}{2 * CTR_1} = \frac{1,25 * 156,3656 + \frac{2}{3} * 427,0342}{2 * \frac{200}{5}} = 6,0018 A$$

(υπό δοκιμή)

Το ελάχιστο ρεύμα για σφάλμα στον ζυγό 1 είναι $I_{\min(1)} = I_{LL,1} = 1.388,8888 A$

Κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 1 (R1):

$$\frac{1,25 * I_{CT1} + \frac{2}{3} * I_{\min(1)}}{I_{pu_R1} * 2 * CTR_1} = 2,3355 > 1$$

(άρα καλύπτεται η κύρια προστασία του ηλεκτρονόμου 1)

Το μέγιστο ρεύμα που «βλέπει» ο R2 είναι $I_{\max(2)} = I_{3\phi_2} = 534,5835A$

Για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(2)}}{I_{pu_R2} * CTR_2} = \frac{534,5835}{9,7484 * \frac{100}{5}} = 2,7419$$

και $TDS_{R2} = 0,5 s$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου 2 (R2) για πρωτεύουσα προστασία σε σφάλμα στον ζυγό 2 από την εξίσωση του ηλεκτρονόμου για extremely inverse καμπύλη. Από τη χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει $t_{R2} = 0,0597 s$. Η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου R1 όταν αυτός λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία του ηλεκτρονόμου 2, θα είναι ίση με $t_{R1} = t_{R2} + t_c = 0,0597 + 0,3 = 0,3597 s$. Από την εξίσωση extremely inverse καμπύλης, για λόγο ρευμάτων:

$$\frac{I_{\max(2)}}{I_{pu_R1} * CTR_1} = \frac{534,5835}{6,0018 * \frac{200}{5}} = 2,2267$$

και $t_{R1} = 0,3597 s$ υπολογίζεται το TDS του R1, το οποίο προκύπτει $TDS_{R1} = 2,2616 s$.

Άρα:

Ηλεκτρονόμος 1	$I_{pu_R1} = 6,0018 A$	$TDS_{R1} = 2,2616 s$
----------------	-------------------------	-----------------------

Για τις άλλου τύπου καμπύλες προκύπτουν:

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα TDS και χρόνων του παραδείγματος 4

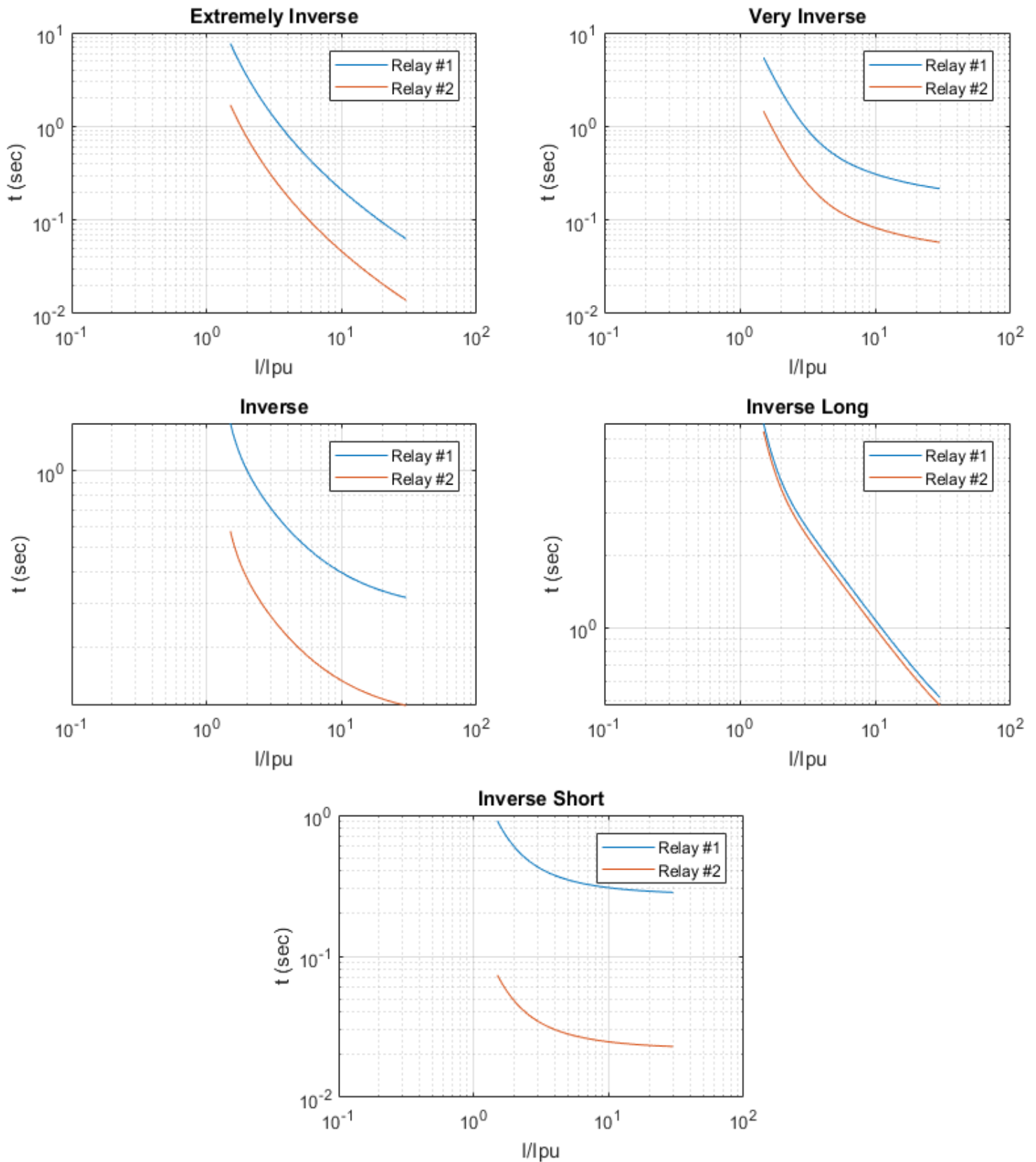
Very Inverse	$TDS (s)$	$t_{RPrimary} (s)$	$t_{RBackup} (s)$
R2	0,5	0,0916	0,3916
R1	1,8731		
Inverse	$TDS (s)$	$t_{RPrimary} (s)$	$t_{RBackup} (s)$
R2	0,5	0,1585	0,4585
R1	1,3349		
Inverse Long	$TDS (s)$	$t_{RPrimary} (s)$	$t_{RBackup} (s)$
R2	0,5	1,1498	1,4498
R1	0,5399		
Inverse Short	$TDS (s)$	$t_{RPrimary} (s)$	$t_{RBackup} (s)$
R2	0,5	0,0254	0,3254
R1	6,1829		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινικά παθητικά δίκτυα

Από τον Πίνακα 4.5 καθώς και από το παρακάτω Σχ. 4.11 συμπεραίνεται ότι:

- **Extremely inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 4.11, όπου οι καμπύλες λειτουργίας μετατοπίζονται προς τα πάνω, όσο πλησιέστερα βρίσκεται ο εκάστοτε ηλεκτρονόμος στην πηγή. Επίσης για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,07 s.
- **Very inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,2 s.
- **Inverse:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,3 s.
- **Inverse long:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,5 s.
- **Inverse short:** Ο κάθε ηλεκτρονόμος λειτουργεί εφεδρικά για τον επόμενο, αφού ισχύει ότι $TDS_1 > TDS_2$. Για μεγάλη τιμή σφάλματος κοντά στη γεννήτρια ($\frac{I}{I_{pu}} = 30$) ο ταχύτερος χρόνος αντίδρασης του R1 είναι περίπου 0,3 s.

Βάσει των ανωτέρω επιλέγεται η χαρακτηριστική καμπύλη extremely inverse, διότι επιτυγχάνεται επιλογική συνεργασία μεταξύ των ηλεκτρονόμων και ο χρόνος απόκρισης του R1 για μεγάλο ρεύμα σφάλματος κοντά στη γεννήτρια είναι ο μικρότερος.



Σχήμα 4.11: Γραφήματα για όλες τις καμπύλες IAC του παραδείγματος 4

5 Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

5.1 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος επιλογικότητας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης

Ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης είναι ένας τύπος ηλεκτρονόμου προστασίας που λειτουργεί όταν το μετρούμενο ρεύμα υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή. Το ρεύμα διέγερσης των ηλεκτρονόμων υπερέντασης γενικά ρυθμίζεται ως ποσοστό του μέγιστου ρεύματος κανονικής λειτουργίας (pick up current- I_{pu}), λαμβάνοντας υπόψιν και το αναμενόμενο ελάχιστο ρεύμα σφάλματος εντός της προστατευόμενης ζώνης. Η επιλογική συνεργασία των ηλεκτρονόμων προστασίας δημιουργείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού του συστήματος με βάση τον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος. Για να εκκαθαριστεί σωστά το σφάλμα μέσα σε καθορισμένο χρόνο, πρέπει κάθε ηλεκτρονόμος να συντονίσει τη λειτουργία του με άλλους ηλεκτρονόμους που βρίσκονται σε όλους τους γειτονικούς ζυγούς. Η μεταξύ τους συνεργασία αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό του συστήματος προστασίας. Το πρόβλημα συνεργασίας των ηλεκτρονόμων περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της ακολουθίας ενεργοποίησής τους για κάθε πιθανή θέση σφάλματος, έτσι ώστε το πληγέν τμήμα να απομονώνεται με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες και χωρίς υπερβολικές χρονικές καθυστερήσεις. Στο πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας του ηλεκτρονόμου υπερέντασης, ο στόχος είναι να καθοριστεί ο χρονικός πολλαπλασιαστής (TDS) και το ρεύμα διέγερσης (I_{pu}) κάθε ηλεκτρονόμου, έτσι ώστε ο συνολικός χρόνος λειτουργίας των πρωτευόντων ηλεκτρονόμων να ελαχιστοποιείται, καθώς και ο χρόνος λειτουργίας των ηλεκτρονόμων δευτερεύουσας προστασίας να τηρείται πάνω από ένα όριο.

Παλαιότερα, η μελέτη επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης γινόταν με απλά εργαλεία και υπολογισμούς, καταναλώνοντας πολύ χρόνο για την πραγματοποίησή της, ενώ τα αποτελέσματα ήταν αμφιλεγόμενα. Με την αύξηση της ζήτησης ενέργειας, τα δίκτυα έγιναν πιο πολύπλοκα, με βρόχους και πολλαπλές πηγές, καθιστώντας ασύμφορη τη συμβατική μέθοδο επίλυσης του προβλήματος επιλογικότητας. Έτσι, οι τεχνικές βελτιστοποίησης είναι πιο αποτελεσματικές σε τέτοιου είδους δίκτυα. Αναλυτικότερα, οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες [9]: τις συμβατικές μεθόδους, τις τεχνικές βελτιστοποίησης και τους μεθευρετικούς αλγορίθμους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

5.1.1 Συμβατικές μέθοδοι

Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί τις τελευταίες δεκαετίες από τη δεκαετία του 1960 για τη συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω στις εξής δύο υποκατηγορίες: δοκιμής-σφάλματος (trial-error) και τοπολογικής ανάλυσης. Η προσέγγιση δοκιμών-σφαλμάτων έχει αργό ρυθμό σύγκλισης ως αποτέλεσμα του μεγάλου αριθμού επαναλήψεων που απαιτείται για την επίτευξη κατάλληλης ρύθμισης των ηλεκτρονόμων. Για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη διαδικασία επιλογικής συνεργασίας, προτείνεται μία τεχνική η οποία εντοπίζει τη θέση των ηλεκτρονόμων με τους οποίους θα ξεκινήσει η διαδικασία της ρύθμισης για τη μεταξύ τους συνεργασία. Αυτές οι θέσεις ονομάζονται σημεία διακοπής (breakpoints). Η εύρεση των σημείων διακοπής είναι το σημαντικό μέρος για την έναρξη της διαδικασίας συνεργασίας. Τοπολογικές μέθοδοι που περιλαμβάνουν τη θεωρία γράφων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των σημείων διακοπής. Η λύση που προκύπτει χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο είναι ικανοποιητική, αλλά δεν είναι βέλτιστη. Αυτό σημαίνει ότι οι ρυθμίσεις TDS των ηλεκτρονόμων είναι υψηλές. Επιπλέον, λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων, η προσέγγιση με δοκιμές-σφάλματα και η τοπολογική ανάλυση είναι χρονοβόρες.

5.1.2 Τεχνικές βελτιστοποίησης

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης ξεπερνούν γενικά τη συμβατική προσέγγιση, στην οποία οι ηλεκτρονόμοι διατάσσονται σε μία σειρά πριν εξεταστούν για επιλογική συνεργασία, και λόγω των πλεονεκτημάτων της γίνεται προτιμητέα από τους μελετητές. Επιπλέον, οι τεχνικές βελτιστοποίησης εξαλείφουν την ανάγκη να βρεθεί το σύνολο των σημείων διακοπής (breakpoints). Ο A.J. Urdaneta [10] ήταν ο πρώτος ερευνητής του περιγράφει την εφαρμογή της θεωρίας βελτιστοποίησης στην επιλογική συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης. Στη μέθοδο βελτιστοποίησης, ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν μη γραμμικό προγραμματισμό (Non Linear Programming-NLP) για την επίλυση του προβλήματος επιλογικότητας, μέθοδοι οι οποίες είναι πιο περίπλοκες και συχνά χρονοβόρες [11]. Στα [10], [12] και [13] το πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων διατυπώνεται ως πρόβλημα μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Nonlinear Programming-MINLP) και επιλύεται με τη χρήση του λογισμικού General Algebraic Modeling System (GAMS). Ωστόσο, η χρήση δυαδικών μεταβλητών για να ληφθούν υπόψιν τα διακριτά ρεύματα διέγερσης, αυξάνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος επιλογικότητας. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτής της τεχνικής, η συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης εκτελείται συνήθως με τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού (LP) όπως Simplex, διπλή Simplex και δύο φάσεων Simplex [14], [15], [16], [9], [12]. Το μειονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι ότι βασίζονται σε μία αρχική εικασία και μπορεί να παγιδευτούν σε κάποιο τοπικό ελάχιστο [17]. Στο [18], η μέθοδος Big-M έχει προταθεί για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή του TDS των ηλεκτρονόμων υπερέντασης στα οποία το I_{pu} θεωρείται ότι είναι γνωστό και σταθερό. Ο P.P.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Bedekar στα [19],[20],[21] πρότεινε τις μεθόδους Simplex, διπλή Simplex και Simplex δύο φάσεων για την επίλυση του προβλήματος ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης στα συστήματα διανομής με δακτύλιο. Εντέλει αποδείχτηκε ότι η διπλή μέθοδος Simplex είναι καλύτερη σε σύγκριση με τις άλλες τέσσερις [22]. Επιπλέον, στο [23] δηλώνεται ότι αν και οι τεχνικές LP είναι απλές και συγκλίνουν εύκολα σε βέλτιστες λύσεις, μόνο οι τιμές TDS μπορούν να βελτιστοποιηθούν, αλλά το ρεύμα διέγερσης I_{pu} πρέπει να επιλέγεται με βάση την εμπειρία για τα δεδομένα των σφάλματων και του φορτίου. Γενικά, αυτή δεν είναι η βέλτιστη λύση του προβλήματος.

5.1.3 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση

Σήμερα εφαρμόζονται οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence-AI) και στους αλγορίθμους εμπνευσμένους από τη φύση (Nature Inspired Algorithms-NIA) για να επιλύσουν το πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας τόσο των ηλεκτρονόμων υπερέντασης όσο και των κατεύθυνσης. Μία από τις μεθόδους AI που έχει εφαρμοσθεί για να λυθεί αυτό το πρόβλημα είναι η ασαφής λογική [24]. Εάν χρησιμοποιείται γραμμική διαμόρφωση του προβλήματος, μόνο το TDS μπορεί να βελτιστοποιηθεί, διαφορετικά για τη βελτιστοποίηση και των δύο παραμέτρων TDS και I_{pu} απαιτείται μη γραμμική διατύπωση του προβλήματος συνεργασίας. Στα [16] και [25-29] εφαρμόστηκε ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm-GA) επιτυχώς για την αντιμετώπιση του προβλήματος της εσφαλμένης συνεργασίας και την ελαχιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρονόμων. Μερικοί από τους ερευνητές έρχονται με καλύτερη ιδέα όπως στα [12],[13],[15],[19-22],[30] για την επίλυση του προβλήματος της εσφαλμένης συνεργασίας τόσο για συνεχή όσο και για διακριτά TDS , και τη βελτίωση της σύγκλισης του GA χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μη γραμμικού προγραμματισμού. Μία άλλη αξιόπιστη τεχνική βελτιστοποίησης είναι ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming-EP). Ο Εξελικτικός Προγραμματισμός είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναζήτησης πολλαπλών σημείων και αποφεύγει το πρόβλημα του τοπικά βέλτιστου σημείου. Η εφαρμογή EP στο σύστημα προστασίας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 2000, αλλά έχει δύο προβλήματα: πιθανή εσφαλμένη συνεργασία μεταξύ των ηλεκτρονόμων και θεώρηση των TDS ως συνεχή [31]. Αργότερα, προτάθηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO), ένας αλγόριθμος ικανός να βελτιστοποιήσει ένα μη γραμμικό και πολυδιάστατο πρόβλημα το οποίο συνήθως καταλήγει αποτελεσματικά σε ικανοποιητικές λύσεις ενώ απαιτεί ελάχιστη παραμετροποίηση. Οι ρίζες του προέρχονται από την παρατήρηση της συμπεριφοράς των ζωικών ομάδων. Συγκεκριμένα, αρχικός σκοπός του ήταν η προσομοίωση της κίνησης των οργανισμών σε ένα σμήνος πουλιών ή ένα κοπάδι ψαριών. Έτσι, η προέλευση του αλγορίθμου είναι η ίδια η φύση. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι να δημιουργηθεί ένα σμήνος (swarm) αποτελούμενο από πιθανές λύσεις οι οποίες ονομάζονται σωματίδια (particles). Κάθε σωματίδιο αναπαριστά μία υποψήφια λύση για το

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτά τα σωματίδια κινούνται σε έναν πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης σύμφωνα με μία απλή μαθηματική συνάρτηση. Κάθε κίνηση σωματιδίου επηρεάζεται από την τοπική γνωστή του θέση, αλλά επίσης κατευθύνεται προς γνωστές θέσεις στον χώρο αναζήτησης οι οποίες επικαιροποιούνται όσο τα υπόλοιπα σωματίδια βρίσκουν καλύτερες θέσεις. Άρα κινούνται στο χώρο αναζητώντας την καλύτερη θέση με την οποία ικανοποιούν τις ανάγκες μίας αντικειμενικής συνάρτησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση ανάλογα με το πρόβλημα). Το 2010, χρησιμοποιείται ο Αλγόριθμος αναζήτησης Harmony [32] ο οποίος οδηγεί σε καλύτερη λύση σε σύγκριση με τους GA και LP, ενώ παράλληλα προτείνεται ο Αλγόριθμος Μελισσών (Honey Bee Algorithm) [33], ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές τιμές TDS . Ένα χρόνο αργότερα, προτάθηκε η Τεχνητή Αποικία Μελισσών (Artificial Bee Colony-ABC) [34], η οποία μπορεί να συγκρίνει προς την καλύτερη λύση ελαφρώς ταχύτερα από την PSO.

5.2 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης

Από τις παραπάνω μεθόδους βελτιστοποίησης, στην παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί αυτή του μη γραμμικού προγραμματισμού (NLP). Το πρόβλημα επιλογικότητας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε ένα βροχοειδές και με πολλαπλές πηγές σύστημα, ουσιαστικά ανάγεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης NLP, όπου η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το άθροισμα των χρόνων ενεργοποίησης κάθε ζεύγους πρωτεύουσας και επικουρικής προστασίας (primary και backup - P/B) ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης, υπακούοντας σε συγκεκριμένους περιορισμούς. Η NLP μορφή του παραπάνω προβλήματος παρουσιάζεται παρακάτω. Οι μεταβλητές προς ελαχιστοποίηση είναι ο χρονικός πολλαπλασιαστής TDS και το ρεύμα διέγερσης κάθε ηλεκτρονόμου υπερέντασης-κατεύθυνσης, οι οποίες καθορίζουν τον χρόνο λειτουργίας των ηλεκτρονόμων σε περίπτωση σφάλματος και θεωρούνται συνεχείς μεταβλητές. Αυτή η υπόθεση συμφωνεί με τις προδιαγραφές των σύγχρονων ψηφιακών ηλεκτρονόμων, των οποίων οι τιμές ρύθμισης έχουν ακρίβεια πολλών δεκαδικών ψηφίων.

Αρχικά, θεωρείται ότι το Σ.Η.Ε. αποτελείται από N ζυγούς και M γραμμές με δύο ηλεκτρονόμους ανά γραμμή· έναν στην αναχώρηση και έναν στην άφιξη της γραμμής. Μία γραμμή, που ενώνει τους ζυγούς i και j , θα έχει δύο ηλεκτρονόμους, έναν σε κάθε άκρο. Θεωρείται από εδώ και στο εξής, ότι ο ηλεκτρονόμος που θα βρίσκεται στο άκρο αναχώρησης της γραμμής μπροστά από τον ζυγό i , θα ονομάζεται ij , ενώ ο ηλεκτρονόμος που θα βρίσκεται στο άκρο αναχώρησης της γραμμής μπροστά από τον ζυγό j , θα ονομάζεται ji . Έτσι, ο κάθε ηλεκτρονόμος θα αναφέρεται με δύο αριθμούς ij , όπου ο i θα δηλώνει τον ζυγό αναχώρησης της γραμμής που είναι τοποθετημένος και ο j θα δηλώνει τον ζυγό άφιξης της γραμμής που «κοιτάει» ο ηλεκτρονόμος. Όλοι οι ηλεκτρονόμοι είναι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης-κατεύθυνσης που ενεργοποιούνται για σφάλματα f_{ij} που γίνονται μπροστά από αυτούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Όσον αφορά τους ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας (backup) προστασίας για τον κάθε ηλεκτρονόμο ij , αυτοί προφανώς θα δηλώνονται ως ki , αφού οι backup ηλεκτρονόμοι ενός ηλεκτρονόμου ij , θα είναι όλοι εκείνοι οι ηλεκτρονόμοι που βρίσκονται στο άκρο αναχώρησης k μίας γραμμής και «βλέπουν» προς τον ζυγό άφιξης i της γραμμής κοιτώντας προς την ίδια κατεύθυνση με τον ij . Τονίζεται ότι στους ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας ki , εξαιρείται ο ηλεκτρονόμος ji αφού αυτός θα βρίσκεται αντικρουστά του ηλεκτρονόμου ij στην ίδια γραμμή με αυτόν και δεν αποτελεί δευτερεύουσα προστασία.

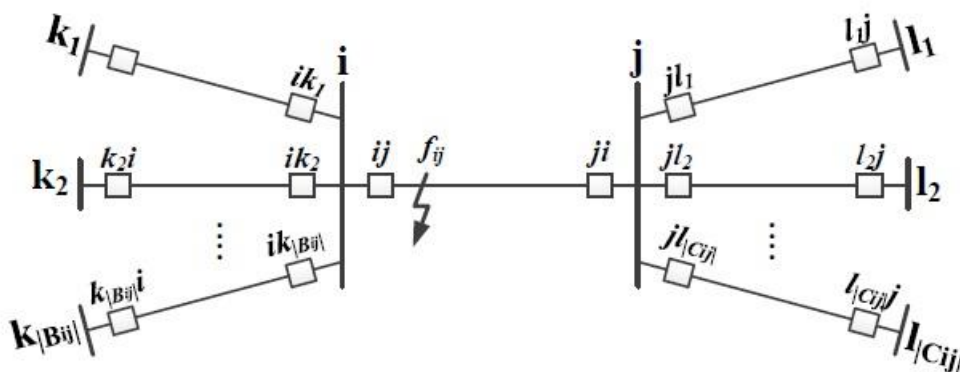
Βάσει των παραπάνω, ορίζονται τα εξής σύνολα:

R : το σύνολο που απεικονίζει το συνολικό αριθμό ηλεκτρονόμων και ισχύει $R = 2M$

B_{ij} : το σύνολο που απεικονίζει τους ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας του ηλεκτρονόμου ij

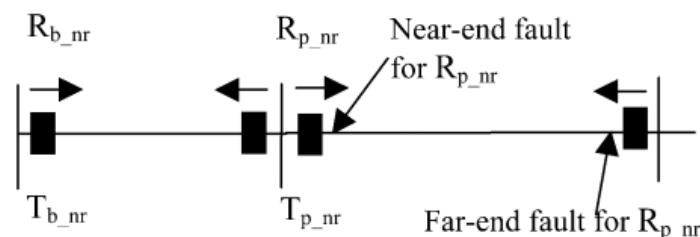
C_{ij} : το σύνολο που απεικονίζει τους ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας του ηλεκτρονόμου ji

Όσα περιγράφηκαν παραπάνω, γίνονται πιο κατανοητά με τη βοήθεια του παρακάτω Σχ. 5.2:



Σχήμα 5.1: Ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας σε ένα Σ.Η.Ε. [35]

Ένα σφάλμα που συμβαίνει στη γραμμή ακριβώς μπροστά στον ηλεκτρονόμο είναι near-end, ή αλλιώς close-in, σφάλμα για τον υπό εξέταση ηλεκτρονόμο. Το ίδιο σφάλμα θεωρείται far-end για τον ηλεκτρονόμο που βρίσκεται στην άλλη άκρη της γραμμής. Στο Σχ. 5.1 φαίνονται τα σφάλματα near-end και far-end για τον ηλεκτρονόμο R_{p_nr} .



Σχήμα 5.2: Near-end και far-end σφάλματα για τον ηλεκτρονόμο R_{p_nr} [36]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Το close-in σφάλμα χρησιμοποιείται για τη συνεργασία της λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για την κάλυψη περιπτώσεων με υψηλό ρεύμα βραχυκύκλωσης κοντά στους ηλεκτρονόμους (π.χ. στην αρχή μίας γραμμής). Το far-end σφάλμα χρησιμεύει στην εύρεση του ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης στο τέλος της γραμμής.

Σε όλες τις διαδικασίες, για να επιτευχθεί η συνεργασία των ηλεκτρονόμων, λαμβάνονται υπόψιν το καλύτερο και το χειρότερο σενάριο. Τα close-in και far-end σφάλματα είναι ο απλούστερος τρόπος για την εύρεση των κρίσιμων καταστάσεων επιλογικής συνεργασίας, ειδικά όταν περιλαμβάνονται προβλήματα όπως δυσλειτουργία των διακοπών ισχύος (CB). Υπάρχουν τρία επίπεδα κριτηρίων συνεργασίας, τα επιθυμητά, τα ελάχιστα και τα ενισχυμένα. Τα συνήθη επιθυμητά κριτήρια είναι να γίνεται μελέτη για δύο είδη σφαλμάτων, τα far-end και τα close-in. Εάν είναι απαραίτητο, αυτά τα κριτήρια μπορούν να χαλαρώσουν σε ελάχιστα κριτήρια που επιτρέπουν στους ηλεκτρονόμους να μη λειτουργούν σε μικρότερα ρεύματα σφάλματος. Τα ενισχυμένα κριτήρια προκύπτουν όταν είναι επιθυμητός ο έλεγχος της συνεργασίας για μεγαλύτερο εύρος σφαλμάτων, όπως αυτά στο μέσο της γραμμής (mid-line).

5.2.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας των ζευγών πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας.

$$\min f = \sum_{\forall ij \in R} (t_{ij} + \sum_{\forall ki \in B_{ij}} t_{ki}^{ij}) \quad (5.1)$$

όπου

t_{ij} : ο χρόνος ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου πρωτεύουσας προστασίας ij

t_{ki}^{ij} : ο χρόνος ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου δευτερεύουσας προστασίας ki του ηλεκτρονόμου ij

Η χαρακτηριστική λειτουργίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.2.3 θεωρείται ότι έχει την εξής μορφή:

$$t_{ij} = TDS_{ij} \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{ij}}{I_{pu,ij}} \right)^B - 1} + C \right) \quad (5.2)$$

όπου,

A, B, C : σταθερές που ορίζουν τον τύπο της χαρακτηριστικής λειτουργίας

TDS_{ij} : το TDS του ηλεκτρονόμου ij

I_{ij} : το ρεύμα που «βλέπει» ο ηλεκτρονόμος ij

$I_{pu,ij}$: το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου ij

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

5.2.2 Όρια των μεταβλητών του προβλήματος

Όπως προαναφέρθηκε οι μεταβλητές βελτιστοποίησης του προβλήματος επιλογικότητας NLP είναι ο χρονικός πολλαπλασιαστής TDS_{ij} και το ρεύμα διέγερσης $I_{pu,ij}$ κάθε ηλεκτρονόμου ij . Για τις οριακές τιμές του ρεύματος διέγερσης πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα μέγιστα ρεύματα φορτίου που μπορεί να εμφανιστούν στο Σ.Η.Ε., καθώς και τα ελάχιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η άσκοπη λειτουργία των ηλεκτρονόμων σε περίπτωση υπερφόρτισης, αλλά ταυτόχρονα να διατηρείται η ευαισθησία των ηλεκτρονόμων για τα ελάχιστα ρεύματα σφάλματος. Όσον αφορά το TDS , οι κατασκευαστές των ηλεκτρονόμων αναφέρουν τις μέγιστες και τις ελάχιστες επιτρεπτές τιμές.

$$I_{pu,ij}^{min} \leq I_{pu,ij} \leq I_{pu,ij}^{max}, \forall ij \in R \quad (5.3)$$

$$TDS_{ij}^{min} \leq TDS_{ij} \leq TDS_{ij}^{max}, \forall ij \in R \quad (5.4)$$

5.2.3 Όρια των χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων

Οι ηλεκτρονόμοι χρειάζονται έναν ελάχιστο χρόνο μέχρι να λειτουργήσουν και να στείλουν εντολή στον διακόπτη ισχύος CB να ανοίξει όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.2.6, όμως δεν πρέπει να καθυστερούν και πάρα πολύ στην αντίδρασή τους. Έτσι, πρέπει να υπάρχουν άνω και κάτω όρια στους χρόνους αντίδρασης των ηλεκτρονόμων είτε λειτουργούν ως πρωτεύουσα είτε ως δευτερεύουσα προστασία, αναλόγως τις απαιτήσεις του δικτύου.

$$\left. \begin{array}{l} t_{ij}^{min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{max} \\ t_{ki}^{ij,min} \leq t_{ki}^{ij} \leq t_{ki}^{ij,max} \end{array} \right\} \forall ij \in R, \forall k \in B_{ij} \quad (5.5)$$

5.2.4 Περιορισμοί επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων

Τα ρεύματα βραχυκύκλωσης μετρούνται τόσο από τους ηλεκτρονόμους πρωτεύουσας, όσο και από τους ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας. Συνεπώς, η επιλογικότητα του σχήματος προστασίας είναι άμεσα συσχετισμένη με την αξιοπιστία του Σ.Η.Ε. Οι backup ηλεκτρονόμοι πρέπει να λειτουργούν μόνο σε περίπτωση δυσλειτουργίας του ηλεκτρονόμου πρωτεύουσας προστασίας και μετά από έναν ορισμένο χρόνο, ο οποίος αναφέρεται ως χρόνος διαβάθμισης (Coordination Time Interval) ή CTI . Τυπικές τιμές για αυτό το περιθώριο χρόνου είναι 0,2-0,4 s. Σύμφωνα με τα παραπάνω πρέπει να ισχύει ότι:

$$t_{ki}^{ij} - t_{ij} \geq CTI, \forall ij \in R, \forall k \in B_{ij} \quad (5.6)$$

5.3 Ο αλγόριθμος interior-point για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού

Για τη μέθοδο interior-point θα περιγραφεί μία εσωτερική μέθοδος για τον μη γραμμικό προγραμματισμό καθώς και η υλοποίησή της. Μία τυπική επανάληψη υπολογίζει ένα αρχικό βήμα με την επίλυση των πρωτεουσών και δευτερευουσών εξισώσεων (χρησιμοποιώντας γραμμική άλγεβρα) και πραγματοποιεί μία γραμμική αναζήτηση για να εξασφαλίσει μείωση σε μία συνάρτηση αξίας (merit function). Για να επιτευχθεί σύγκλιση σε περίπτωση απουσίας κυρτότητας επαρκούς βαθμού ή έλλειψης Hessian ή Jacobian βαθμίδας, το πρωτεύον βήμα (step) αντικαθίσταται, υπό ορισμένες συνθήκες, από μία περιοχή εμπιστοσύνης για αυτό. Ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιήσει ακριβείς δεύτερες παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών ή quasi-Newton προσεγγίσεις.

Οποιοδήποτε γενικό μοντέλο προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με περιορισμούς αποτελείται από μία μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση με περιορισμούς ισότητας και ανισότητας:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f(x) \\
 & \text{ώστε} \\
 & h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, N_h \\
 & g_i(x) \geq 0, \quad i = 1, \dots, N_g \\
 & x_{i,l} \leq x_i \leq x_{i,u} \quad i = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

όπου

N_h : ο αριθμός των περιορισμών ισότητας

N_g : ο αριθμός των περιορισμών ανισότητας

N : ο αριθμός των μεταβλητών

x_i : μεταβλητή i του προβλήματος

$x_{i,l}$: κάτω περιορισμός της μεταβλητής i

$x_{i,u}$: άνω περιορισμός της μεταβλητής i

Η μέθοδος interior-point αντικαθιστά το μη-γραμμικό πρόβλημα (5.7) με μία σειρά από φραγμένα υπο-προβλήματα της μορφής [40]:

$$\begin{aligned}
 \min_z f_\mu(z) &= \min f(x) - \mu \sum_{i=1}^m \ln s_i \\
 \text{ώστε } h(x) &= 0 \\
 g(x) + s &= 0
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Εδώ το $s > 0$ είναι ένα διάνυσμα από slack μεταβλητές που μετατρέπουν την ανισότητα σε ισότητα, $z = (x, s)$, και $\mu > 0$ είναι η παράμετρος που φράζει την αντικειμενική συνάρτηση,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

η οποία όσο μειώνεται προς το μηδέν, το ελάχιστο της f_μ προσεγγίζει το ελάχιστο της f . Ο πρόσθετος λογαριθμικός όρος ονομάζεται συνάρτηση φραγής (barrier function). Η συνάρτηση Lagrange που θα χρησιμεύσει στον υπολογισμό του βήματος σε κάθε επανάληψη ορίζεται ως:

$$L(z, \lambda, \mu) = f_\mu(z) + \lambda_h^T h(x) + \lambda_g^T (g(x) + s) \quad (5.9)$$

όπου $\lambda_h \in \mathbb{R}^l$ και $\lambda_g \in \mathbb{R}^m$ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange και $\lambda = (\lambda_h, \lambda_g)$.

Το πρόβλημα (5.8) είναι μία σειρά από προβλήματα με περιορισμούς ισότητας και είναι πιο εύκολο να λυθούν από ότι το αρχικό πρόβλημα με περιορισμούς ανισότητας. Για να λυθεί το καινούριο πρόβλημα, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί έναν από τους δύο κυρίως τύπους βήματος σε κάθε επανάληψη:

- Ένα άμεσο βήμα στο (x, s) . Αυτό το βήμα επιχειρεί να λύσει τις εξισώσεις Karush-Kuhn-Tucker (KKT) (5.10), (5.11) για το πρόβλημα (5.8), γνωστό και ως Newton step.

$$\nabla_x L(z, \lambda, \mu) = 0 \quad (5.10)$$

$$\lambda_{g,i} (g_i(x) + s_i) = 0 \quad \forall i \quad (5.11)$$

- Ένα βήμα CG (conjugate gradient), χρησιμοποιώντας μία περιοχή εμπιστοσύνης. Από προεπιλογή ο αλγόριθμος αρχικά επιχειρεί να κάνει ένα άμεσο βήμα. Εάν αποτύχει, επιχειρεί το CG step. Μία περίπτωση στην οποία δεν κάνει άμεσο βήμα είναι όταν το πρόβλημα (5.8) δεν είναι τοπικά κυρτό κοντά στην παρούσα επανάληψη.

Σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος μειώνει μία συνάρτηση αξίας όπως η:

$$f_\mu(z) + v \|(h(x), g(x) + s)\|$$

Η παράμετρος v μπορεί να αυξήσει τον αριθμό επαναλήψεων ώστε να οδηγήσει προς την εφικτή λύση. Εάν ένα επιλεγθέν βήμα δεν μειώσει τη συνάρτηση αξίας, ο αλγόριθμος απορρίπτει το βήμα αυτό και επιχειρεί ένα καινούριο.

Σε εφαρμογή στο Matlab, εάν είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε μία συνάρτηση με μη γραμμικούς περιορισμούς επιστρέψει μία μιγαδική τιμή, NaN, Inf ή error σε μία επανάληψη με x_j , ο αλγόριθμος απορρίπτει αυτό το x_j . Η απόρριψη αυτή έχει την ίδια αντιμετώπιση όπως όταν δεν μειώνεται η συνάρτηση αξίας: επιχειρείται ένα διαφορετικό, μικρότερο βήμα.

5.4 Matlab Optimization Toolbox-Fmincon

Το MATLAB Optimization Toolbox είναι μία εφαρμογή η οποία παρέχει αλγορίθμους αναζήτησης βέλτιστης λύσης. Αυτή η «εργαλειοθήκη» μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για να μεγιστοποιήσει είτε για να ελαχιστοποιήσει ποσότητες ενώ παράλληλα πρέπει να ικανοποιούνται περιορισμοί που παρέχουν οι χρήστες. Το MATLAB Optimization Toolbox

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

περιέχει πολλούς διαφορετικούς τύπους συναρτήσεων για την αναζήτηση λύσεων. Η συνάρτηση που επιλέχθηκε για αυτήν τη διπλωματική ήταν η συνάρτηση `fmincon` [41].

Η `fmincon` είναι σχεδιασμένη να ελαχιστοποιεί συναρτήσεις που συνοδεύονται από περιορισμούς, για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε για να λύσει το πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης. Λειτουργεί αλλάζοντας τις τιμές της δοθείσας αντικειμενικής συνάρτησης και επιστρέφοντας τη μικρότερη τιμή αυτής, όντας μέσα στα όρια μεταβλητών που της τίθενται. Στην προκειμένη περίπτωση, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα των χρόνων ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων.

$$\min_x f(x)$$

Τα όρια που μπορούν να δοθούν για τη ρουτίνα ελαχιστοποίησης παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$A \cdot x \leq b \quad (5.12)$$

$$Aeq \cdot x = beq \quad (5.13)$$

$$c(x) \leq 0 \quad (5.14)$$

$$ceq(x) = 0 \quad (5.15)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (5.16)$$

Όπου $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση και επιστρέφει ένα βαθμωτό μέγεθος, A και Aeq είναι πίνακες που έχουν τους συντελεστές των γραμμικών περιορισμών ισότητας και ανισότητας, b και beq είναι διανύσματα στήλες και $c(x)$ και $ceq(x)$ είναι μη γραμμικές συναρτήσεις που παίρνουν ως όρισμα το x και επιστρέφουν διάνυσμα. Η μεταβλητή lb αναφέρεται στα κάτω όρια του διανύσματος x , ενώ η μεταβλητή ub στα άνω όρια του x . Τα όρια του x μειώνουν την περιοχή αναζήτησης του αλγορίθμου και τον χρόνο αναζήτησης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το διάνυσμα x αποτελείται από αγνώστους που πρέπει να βρεθούν και να βελτιστοποιηθούν στο πρόβλημα συνεργασίας των ηλεκτρονόμων, δηλαδή τα TDS και τα I_{pu} , που είναι όσα και οι ηλεκτρονόμοι προς ρύθμιση στο εκάστοτε δίκτυο. Δεν υπάρχουν γραμμικοί περιορισμοί τύπου (5.12), (5.13) και (5.15) οπότε οι πίνακες A, Aeq, b, beq, ceq είναι κενοί. Στην ανίσωση (5.14) λαμβάνονται υπόψιν οι περιορισμοί για τους χρόνους (5.5), (5.6), οι οποίοι προφανώς είναι μη γραμμικοί, όπως φαίνεται και από τον τύπο του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρονόμων (5.2) όπου το I_{pu} (μέρος του διανύσματος x) υψώνεται σε δύναμη. Για να επιτευχθεί συντακτικά η μορφή (5.14) θα πρέπει να μεταφερθούν οι χρόνοι στην άλλη μεριά της ανίσωσης:

$$t_{ij} - t_{ij}^{max} \leq 0 \text{ και } -t_{ij} + t_{ij}^{min} \leq 0$$

Ένας ακόμη μη γραμμικός περιορισμός τύπου (5.14) είναι αυτός για την επιλογικότητα μεταξύ των ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

$$t_{ki}^{ij} - t_{ij} \geq CTI \Rightarrow CTI - t_{ki}^{ij} + t_{ij} \leq 0$$

Οι περιορισμοί τύπου (5.16) δεν είναι άλλοι από τα όρια των TDS και I_{pu} :

$$I_{pu,ij}^{min} \leq I_{pu,ij} \leq I_{pu,ij}^{max}, \forall ij \in R$$
$$TD_{ij}^{min} \leq TD_{ij} \leq TD_{ij}^{max}, \forall ij \in R$$

Η `fmincon` διαθέτει διαφορετικούς αλγόριθμους, από τους οποίους μπορεί να επιλέξει ο χρήστης τον κατάλληλο για να λύσει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε σε αυτή τη διπλωματική είναι ο `interior-point algorithm`, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στην προηγούμενη Ενότητα 5.3. Η επιλογή του βασίστηκε στη γρήγορη σύγκλιση του σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας και στην πολυπλοκότητά του η οποία είναι πολυωνυμική στη χειρότερη περίπτωση.

Για να συγκλίνει ο αλγόριθμος πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα οι παράμετροι της `fmincon`. Η σύνταξή της στον κώδικα που αναπτύχθηκε είναι:

$$[x, fval, exitflag, output] = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options)$$

όπου,

x : το τελικό βέλτιστο διάνυσμα x . Στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει την ακόλουθη σημασία:

$$x = [TDS_1, \dots, TDS_n, I_{pu1}, \dots, I_{pun}] \text{ όπου } n \text{ ο αριθμός των ηλεκτρονόμων}$$

fval: επιστρέφεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμένη βάσει του βέλτιστου διανύσματος x

exitflag: επιστρέφεται ένας ακέραιος αριθμός που δηλώνει την αιτία που η `fmincon` τερμάτισε τη λειτουργία της

output: επιστρέφει μία δομή με πληροφορίες για τη διαδικασία βελτιστοποίησης

fun: είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση

x0: είναι το αρχικό σημείο από το οποίο ξεκινά ο αλγόριθμος, ορίζεται ως πραγματικό διάνυσμα και από το μέγεθός του καταλαβαίνει η `fmincon` πόσες μεταβλητές θα έχει το τελικό x . Η σύγκλιση του αλγόριθμου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του αρχικού σημείου, για αυτόν τον λόγο στη συγκεκριμένη περίπτωση πρώτα λύνεται με την `fmincon` ένα ενδιάμεσο πρόβλημα με μηδενική αντικειμενική συνάρτηση ($\text{fun} = @(x)0$) και τους ίδιους περιορισμούς με το αρχικό. Αυτό χρησιμεύει στο να βρεθεί πρώτα ένα αρχικό σημείο που βρίσκεται μέσα στα όρια των μη γραμμικών ανισώσεων, αδιαφορώντας για τη συνάρτηση βελτιστοποίησης. Το διάνυσμα x που προκύπτει τοποθετείται ως αρχικό σημείο x_0 του κανονικού προβλήματος και έτσι είναι πολύ πιο πιθανή η σύγκλιση του αλγορίθμου.

A, b, Aeq, beq, lb, ub: αναφέρθηκαν παραπάνω

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

nonlcon: ορίζεται ως μία συνάρτηση function στο Matlab, η οποία δέχεται ένα διάνυσμα x και επιστρέφει δύο πίνακες $c(x)$ και $c_{eq}(x)$ οι οποίοι αφορούν τους μη γραμμικούς ανισωτικούς και ισωτικούς περιορισμούς για το διάνυσμα x , για παράδειγμα:

```
x = fmincon(@myfun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@mycon)
```

όπου mycon:

```
function [c,ceq] = mycon(x)
c = ...      % Compute nonlinear inequalities at x.
ceq = ...    % Compute nonlinear equalities at x.
```

options: οι επιλογές βελτιστοποίησης ορίζονται μέσω του optimoptions. Μερικές επιλογές εφαρμόζονται σε όλους τους αλγόριθμους και άλλες μόνο σε συγκεκριμένους. Αναλυτικά τα options που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό το πρόβλημα:

- **Algorithm**: επιλέγεται ένας από:
 - 'interior-point'
 - 'trust-region-reflective'
 - 'sqp'
 - 'sqp-legacy'
 - 'active-set'
- **Display**: επιλογές εμφάνισης:
 - 'off' ή 'none' δεν εμφανίζει τίποτα
 - 'iter' εμφανίζει κάθε επανάληψη με το προκαθορισμένο μήνυμα εξόδου
 - 'iter-detailed' εμφανίζει κάθε επανάληψη με τεχνικό μήνυμα εξόδου
 - 'notify' εμφανίζει μόνο όταν η συνάρτηση δεν συγκλίνει, και δίνει το προκαθορισμένο μήνυμα εξόδου
 - 'notify-detailed' εμφανίζει μόνο όταν η συνάρτηση δεν συγκλίνει, και δίνει το τεχνικό μήνυμα εξόδου
 - 'final' (default) εμφανίζει μόνο το τελικό αποτέλεσμα και δίνει το προκαθορισμένο μήνυμα εξόδου
 - 'final-detailed' εμφανίζει μόνο το τελικό αποτέλεσμα και δίνει το τεχνικό μήνυμα εξόδου
- **MaxFunctionEvaluations**: ο μέγιστος αριθμός υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης
- **MaxIterations**: ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που επιτρέπεται

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Στο πρόβλημα επιλέχθηκαν:

```
Options=optimoptions(@fmincon,'Algorithm','interior-  
point','MaxIter',5000,'MaxFunEvals',100000,'Display','iter');
```

5.5 Περιγραφή αλγόριθμου

5.5.1 Σύνολο αρχείων

Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε πραγματοποιεί:

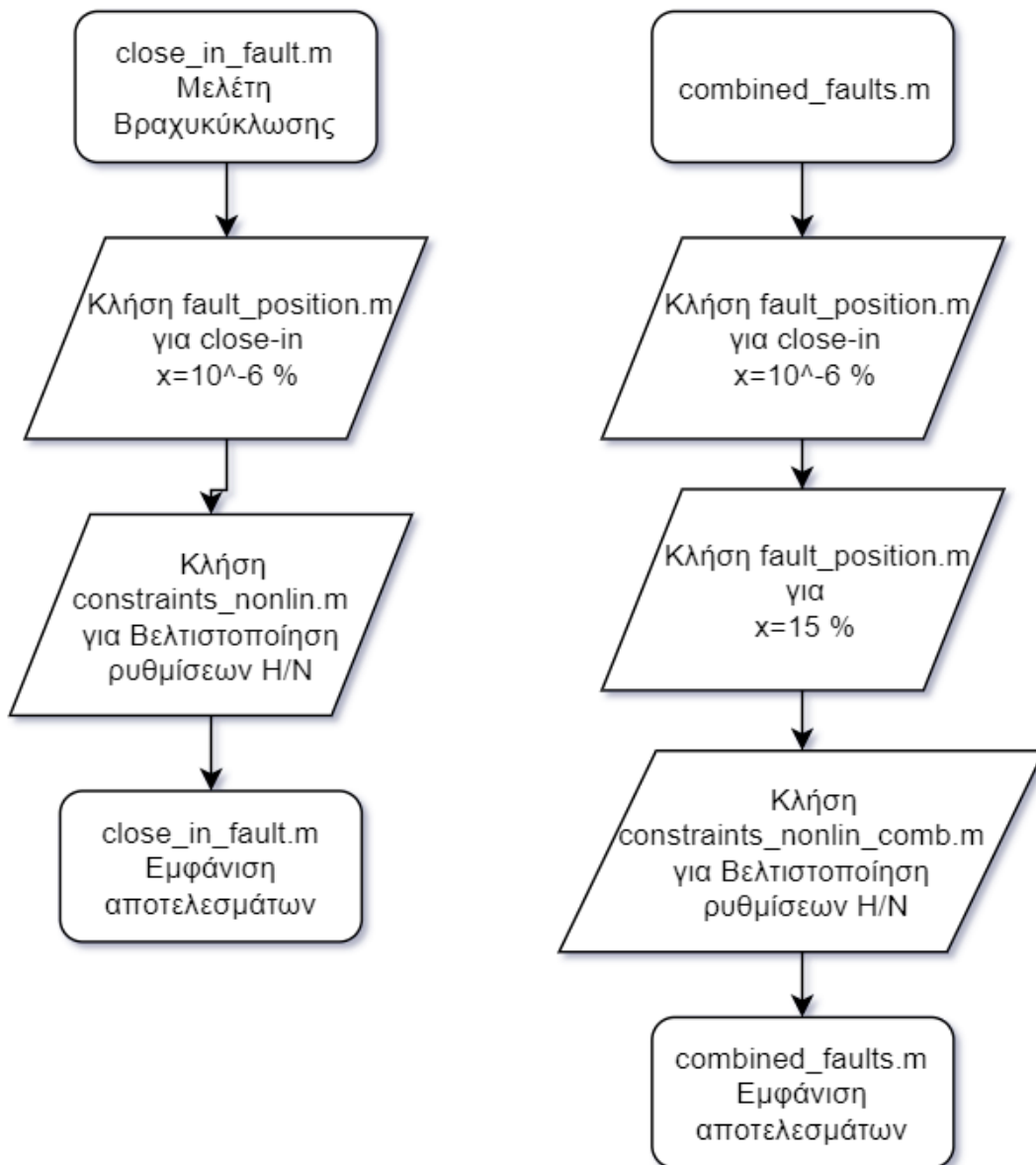
- Μελέτη βραχυκυκλωμάτων για συμμετρικά τριφασικά σφάλματα δικτύου, το οποίο εισάγεται με τη μορφή αρχείου Excel.
- Βέλτιστη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων προστασίας γραμμών του δικτύου, βάσει σφαλμάτων close-in.
- Βέλτιστη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων (σφάλμα close-in και κατά μήκος της γραμμής, σε ποσοστό που δίνει ο χρήστης).

Δημιουργήθηκαν 5 αρχεία κώδικα σε Matlab, τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους ως εξής:

- Το κυρίως πρόγραμμα close_in_fault.m που κάνει τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων.
- Τη συνάρτηση fault_position.m που παίρνει ως όρισμα το ποσοστό της γραμμής που γίνεται το σφάλμα και υπολογίζει τα ρεύματα που «βλέπει» κάθε ηλεκτρονόμος για το συγκεκριμένο σφάλμα.
- Τη συνάρτηση constraints_nonlin.m, στην οποία ορίζονται οι μη γραμμικοί περιορισμοί και λύνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης με την κλήση της fmincon.
- Το κυρίως πρόγραμμα combined_faults.m που καλεί δύο φορές τη fault_position.m, μία για close-in σφάλμα και μία για μεγαλύτερο ποσοστό της γραμμής (15-20%).
- Τη συνάρτηση constraints_nonlin_comb.m που είναι σχεδόν ίδια με τη constraints_nonlin.m, μόνο που προστίθενται επιπλέον περιορισμοί για τους χρόνους λειτουργίας για σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής.

Τα αρχεία που χρησιμοποιούνται στα δύο σενάρια ρύθμισης των ηλεκτρονόμων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα ροής του Σχ. 5.3. Τα αρχεία αυτά θα αναλυθούν λεπτομερώς παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα



Σχήμα 5.3: Διαγράμματα ροής των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Αρχικά, τα δεδομένα του εκάστοτε δικτύου αντλούνται από το αρχείο `grid_data.xlsx` το οποίο έχει την παρακάτω μορφή:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	From Bus	To Bus	R (pu)	X (pu)	1/2B (pu)	Transf.	In_prim(ij)	In_prim(ji)	Generators (bus)	R (pu)	X(pu)	V(kV)
2	2	8	0,0018	0,0222	0	0	400	200	1	0,000001	0,1	10
3	2	3	0,0018	0,0222	0	0	400	200	7	0,000001	0,1	10
4	3	4	0,0018	0,02	0	0	400	400				
5	4	5	0,0022	0,02	0	0	400	400				
6	5	6	0,0022	0,02	0	0	200	400				
7	8	6	0,0018	0,02	0	0	200	400				
8	2	6	0,0022	0,0222	0	0	400	200				
9	1	2	0,000001	0,026666	0	1						
10	7	6	0,000001	0,026666	0	1						
11												
12												
13												
14												

M	N	O	P	Q	R	S	T
Nom. Of Buses	V of buses(pu)	S base(MVA)	V base (kV)	Curve constants		x %(fault position)	
8	1	100	150	A	0,14	15	
				B	0,02		
	EG (bus)	S (MVA)	X (pu)	C	0		
	4	400	0,25				

Σχήμα 5.4: Μορφή δεδομένων που εισάγει ο χρήστης στο Excel

Στις δύο πρώτες στήλες φαίνονται πόσες είναι οι γραμμές και ο χρήστης εισάγει τον ζυγό άφιξης και αναχώρησης κάθε γραμμής. Στις στήλες C-E δίνονται οι αντιστάσεις, οι αντιδράσεις και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες των γραμμών σε ανα μονάδα σύστημα. Η στήλη F παίρνει τιμές 1 ή 0 ανάλογα με το αν η γραμμή έχει μετασχηματιστή (1) ή όχι (0). Αυτό χρειάζεται για τον αλγόριθμο γιατί δεν γίνεται μελέτη ρύθμισης ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης εκατέρωθεν των μετασχηματιστών. Στις στήλες G, H τοθετούνται οι ονομαστικές τιμές ρευμάτων πρωτεύοντος των CT των ηλεκτρονόμων ij και ji αντίστοιχα. Οι μετασχηματιστές εντάσεως έχουν λόγο μετασχηματισμού $CTR = \frac{I_n^{primary}}{I_{secondary}}$, όπου το $I_{secondary}$ θεωρήθηκε ίσο με 1 A. Στις στήλες I-L βρίσκονται τα στοιχεία των γεννητριών, σε ποιους ζυγούς συνδέονται και η βασική τους τάση σε kV. Εάν υπάρχει εξωτερικό Σ.Η.Ε. συνδεδεμένο σε κάποιο ζυγό (external grid-EG) εισάγεται ο ζυγός στον οποίο συνδέεται και η ισχύς βραχυκύκλωσής του από όπου υπολογίζεται η

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

ισοδύναμη αντίδρασή του. Επιπλέον, εισάγονται ο αριθμός των ζυγών του δικτύου, η τάση των ζυγών που θεωρείται ότι έχουν ακριβώς πριν από το σφάλμα σε ανα μονάδα (1 pu), η βασική ισχύς και τάση για όλο το δίκτυο. Τέλος, στις στήλες Q-S τοποθετούνται οι σταθερές A, B, C των καμπύλων TOC (Time Overcurrent Curves) και στη στήλη T το ποσοστό της γραμμής που γίνεται το σφάλμα σε σχέση με τον κάθε ηλεκτρονόμο για τη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων.

5.5.2 Υλοποίηση για close-in σφάλμα

Το αρχείο `close_in_fault.m` αρχικά υλοποιεί μελέτη βραχυκυκλωμάτων για συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα πάνω σε κάθε ζυγό. Για να γίνει αυτό ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.1. Τα δεδομένα του δικτύου αντλούνται από το αρχείο Excel `grid_data.xlsx`. Αφού διαβαστούν τα δεδομένα, δημιουργείται η μήτρα αγωγιμοτήτων από τις σχέσεις (2.6) και (2.7) και έπειτα η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων $Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$ που είναι απαραίτητη για τον μετέπειτα υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Εάν το δίκτυο έχει και εξωτερικό δίκτυο (EG), τότε η ισοδύναμη αγωγιμότητά του μπαίνει στη διαγώνιο της Y_{bus} , όπως και στην περίπτωση των γεννητριών. Παράλληλα, αποθηκεύονται σε έναν πίνακα $z(i, j)$ (όπου i ζυγός εκκίνησης και j ζυγός άφιξης) οι αντιστάσεις των γραμμών που θα χρειαστούν στον υπολογισμό των ρευμάτων που ρέουν σε κάθε γραμμή και άρα στον υπολογισμό του ρεύματος που «βλέπει» ο κάθε ηλεκτρονόμος για συγκεκριμένο σφάλμα.

Στο σημείο που δομείται η μήτρα αγωγιμοτήτων, δημιουργείται και ο πίνακας map , ο οποίος θα φανεί ιδιαίτερα χρήσιμος στον καθορισμό των ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας. Ο πίνακας map έχει στην πρώτη στήλη τον ζυγό εκκίνησης, στη δεύτερη στήλη τον ζυγό άφιξης και στην τρίτη έναν μοναδικό id (identification number) που χαρακτηρίζει τον συγκεκριμένο ηλεκτρονόμο. Η αρίθμηση των id γίνεται με τη σειρά που δίνονται τα δεδομένα των γραμμών στο αρχείο `grid_data.xlsx`. Για παράδειγμα, ο ηλεκτρονόμος με $id = 1$ είναι αυτός που βρίσκεται κοντά στον ζυγό 2 και «κοιτά» τον ζυγό 8 (βλ. Σχ. 5.4), ενώ ο ηλεκτρονόμος με $id = 2$ είναι αυτός που βρίσκεται κοντά στον ζυγό 8 και «κοιτά» τον 2. Στην τέταρτη στήλη αποθηκεύονται τα ονομαστικά ρεύματα πρωτεύοντος των CTs, τα οποία δίνονται στα δεδομένα του δικτύου. Σημειώνεται ότι στα στοιχεία του map δεν περιλαμβάνονται οι μετασχηματιστές, δηλαδή στο συγκεκριμένο πρόβλημα δεν γίνεται ρύθμιση των ηλεκτρονόμων που προστατεύουν τον μετασχηματιστή.

Αφού έχει δημιουργηθεί ο πίνακας Z_{bus} , υπολογίζονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης $I_f(i)$ για σφάλμα σε κάθε ζυγό μέσω του τύπου (2.15) και οι τάσεις κάθε ζυγού για το κάθε σφάλμα $V_f(j, i)$ από τον τύπο (2.17), όπου j είναι ο ζυγός που υπολογίζεται η τάση του και i ο ζυγός στον οποίο γίνεται το σφάλμα.

Στη συνέχεια, πρέπει να υπολογισθούν τα ρεύματα σε κάθε γραμμή (συμπεριλαμβανομένου και των γραμμών με μετασχηματιστή) για την πλήρη παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μελέτης τριφασικών βραχυκυκλωμάτων. Αυτό θα γίνει με την εξίσωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

(2.18), όπου υπολογίζονται τα ρεύματα $I(i, j, k)$ με i τον ζυγό εκκίνησης της γραμμής, j τον ζυγό άφιξης και k τον ζυγό που γίνεται το σφάλμα. Εάν οι γεννήτριες του συστήματος δεν συνδέονται σε μετασχηματιστή, αλλά κατευθείαν στο δίκτυο όπως στο δίκτυο 15 ζυγών της Ενότητας 6.3, τότε πρέπει να υπολογιστεί και το ρεύμα που συνεισφέρουν οι γεννήτριες για σφάλμα στον ζυγό τους, το οποίο προκύπτει αφαιρώντας από το I_f του ζυγού που συνδέεται η εκάστοτε γεννήτρια το άθροισμα των ρευμάτων των γραμμών που καταλήγουν σε αυτόν τον ζυγό. Επίσης, η ίδια διαδικασία γίνεται και για τα EG, τα οποία προσομοιάζονται με μία γεννήτρια που δεν παρεμβάλλεται μετασχηματιστής. Σημειώνεται ότι δε λαμβάνεται υπόψιν η συνδεσμολογία των μετασχηματιστών που οδηγεί σε στροφή των γωνιών στα ρεύματα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του μετασχηματιστή σε συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο, που η φάση του ρεύματος δευτερεύοντος μετατοπίζεται κατά 30° σε σχέση με το ρεύμα πρωτεύοντος.

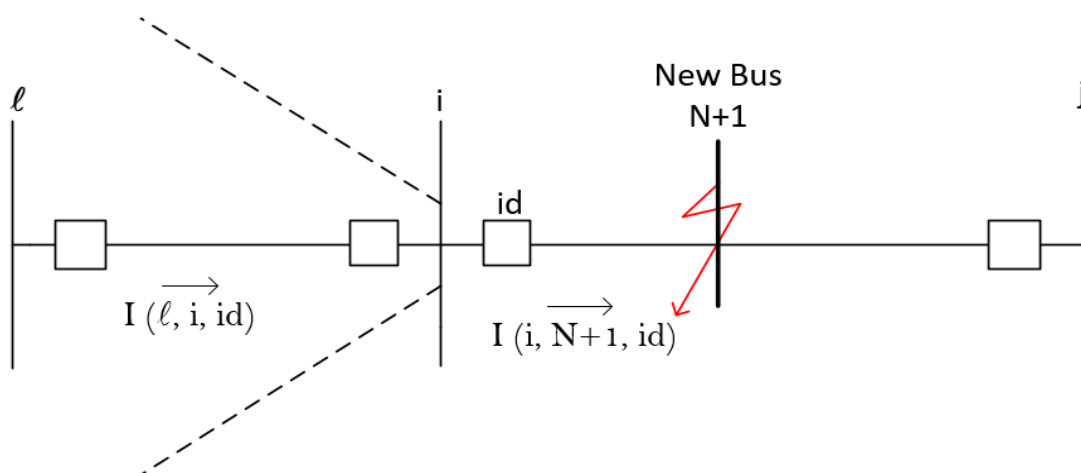
Μετά τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων, επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση των ηλεκτρονόμων με βάση τα close-in σφάλματα, ώστε να επιτευχθεί επιλογική συνεργασία μεταξύ τους. Αρχικά, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ρευμάτων που «βλέπει» ο κάθε ηλεκτρονόμος ij για σφάλμα close-in, καθώς και το αντίστοιχο ρεύμα που «βλέπουν» όλοι οι backup ηλεκτρονόμοι του ki για σφάλμα «μπροστά» στον ηλεκτρονόμο ij . Για αυτήν τη λειτουργία δημιουργήθηκε η συνάρτηση `fault_position.m`, η οποία παίρνει ως παράμετρο το ποσοστό της γραμμής x που γίνεται το σφάλμα μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο και επιστρέφει τον πίνακα I_{p_b} που θα αναλυθεί παρακάτω. Για το σφάλμα close-in, γίνεται η κλήση της `fault_position.m` με $x = 10^{-6}\%$. Επιλέγεται τόσο μικρό ποσοστό γραμμής ώστε να γίνεται το σφάλμα ακριβώς στην αρχή της γραμμής, περίπτωση στην οποία παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης που μπορεί να εντοπίσει ο ηλεκτρονόμος.

Στη `fault_position.m`, με βάση την Ενότητα 2.1.2, γίνεται τροποποίηση της μήτρας αγωγιμοτήτων Y_{bus} του αρχικού δικτύου με την εισαγωγή καινούριου ζυγού $N + 1$ (όπου N ο αριθμός των ζυγών) στο σημείο της γραμμής που γίνεται το σφάλμα, και κατά συνέπεια της Z_{bus} . Εφόσον το σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής γίνεται μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο, η μήτρα θα τροποποιηθεί τόσες φορές όσο και το σύνολο των ηλεκτρονόμων. Για κάθε νέα μήτρα Z_{new} υπολογίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_f(k)$ που γίνεται μπροστά από τον ηλεκτρονόμο με $id = k$, δηλαδή πάνω στον νέο ζυγό, καθώς και οι τάσεις όλων των ζυγών για το συγκεκριμένο σφάλμα σε έναν πίνακα $V_f(i, k)$ όπου το i δηλώνει τον ζυγό που υπολογίζεται η τάση και το k τον ηλεκτρονόμο που γίνεται μπροστά του το σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής x . Ο πίνακας $V_f(i, k)$ δεν έχει την ίδια σημασία που είχε ο πίνακας $V_f(j, i)$ στο `close_in_fault.m` όπου j ήταν ο ζυγός που υπολογιζόταν η τάση του και i ο ζυγός στον οποίο γινόταν το σφάλμα.

Στη συνέχεια πρέπει όπως και στην περίπτωση του `close_in_fault.m` να υπολογισθούν τα ρεύματα σε κάθε γραμμή για το κάθε σημείο σφάλματος. Αυτό γίνεται μέσω της σχέσης (2.18) και προκύπτει ο $I(i, j, k)$ μόνο που τώρα το k δεν δηλώνει ζυγό αλλά τον ηλεκτρονόμο που γίνεται μπροστά του το σφάλμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Ακολουθεί η εύρεση των ηλεκτρονόμων που αποτελούν δευτερεύουσα προστασία για τον κάθε ηλεκτρονόμο, καθώς και η αναζήτηση των ρευμάτων που «βλέπουν» οι ηλεκτρονόμοι στον πίνακα με τα ρεύματα γραμμών $I(i, j, k)$. Για να γίνει αυτό για τον εκάστοτε ηλεκτρονόμο id που βρίσκεται μπροστά στον ζυγό i της γραμμής $i - j$, διαβάζεται ο πίνακας map στον οποίο αντιστοιχίζονται τα id των ηλεκτρονόμων με τις γραμμές που ανήκουν και αναζητούνται όλες οι γραμμές της μορφής ki που καταλήγουν στον εξεταζόμενο ζυγό i , εκτός της ίδιας γραμμής $j - i$ που βρίσκεται ο id , και οι αντίστοιχοι ηλεκτρονόμοι αυτών των γραμμών θεωρούνται ως backup προστασία του id . Σημειώνεται ότι πρέπει οι ηλεκτρονόμοι δευτερεύουσας προστασίας να «κοιτούν» προς την ίδια κατεύθυνση με τον id , αλλιώς δεν έχει νόημα η εφεδρική τους προστασία. Αυτά τα δεδομένα τοποθετούνται σε έναν πίνακα που ορίζεται ως I_{p_b} , στην 1^η στήλη του οποίου εισάγεται ο id του ηλεκτρονόμου πρωτεύουσας προστασίας που μπροστά του γίνεται το σφάλμα και στη 2^η στήλη ο id του ηλεκτρονόμου που λειτουργεί ως δευτερεύουσα προστασία αυτού της 1^{ης} στήλης. Στην 3^η στήλη τοποθετείται το ρεύμα που «βλέπει» ο primary ηλεκτρονόμος σε αμπέρ και στην 4^η στήλη το ρεύμα που «βλέπει» ο backup ηλεκτρονόμος για το ίδιο σφάλμα. Τα ρεύματα αυτά αντλούνται από τον πίνακα $I(i, j, k)$. Για παράδειγμα για σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής x μπροστά από τον ηλεκτρονόμο id (Σχ. 5.5), ο οποίος βρίσκεται μπροστά από τον ζυγό i της γραμμής $i - j$, το ρεύμα που βλέπει ο id είναι το $I(i, N + 1, id)$ όπου i ο ζυγός εκκίνησης της γραμμής, $N + 1$ ο ζυγός άφιξης που είναι και ο καινούριος ζυγός που προστέθηκε στο σημείο σφάλματος, και id ο ηλεκτρονόμος που γίνεται μπροστά του το σφάλμα. Το παραπάνω ρεύμα αποτελεί πρωτεύον ρεύμα για τον id και μπαίνει στην 3^η στήλη του πίνακα I_{p_b} στη γραμμή που βρίσκεται ο id ως ηλεκτρονόμος πρωτεύουσας προστασίας. Για τον ίδιο ηλεκτρονόμο id , το ρεύμα που «βλέπει» ο εκάστοτε ηλεκτρονόμος δευτερεύουσας προστασίας του, θα είναι το $I(l, i, id)$ όπου l ο ζυγός εκκίνησης της γραμμής που βρίσκεται ο backup ηλεκτρονόμος του id , i ο ζυγός άφιξης (που είναι και ο ζυγός που βρίσκεται μπροστά ο id) και id ο ηλεκτρονόμος που γίνεται μπροστά του το σφάλμα.



Σχήμα 5.5: Τα ρεύματα που βλέπει ο ηλεκτρονόμος id και ο backup του για σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής μπροστά από τον id

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Το παραπάνω ρεύμα μπαίνει στην 4^η στήλη του πίνακα I_{p_b} στη γραμμή που βρίσκονται ο id ως ηλεκτρονόμος πρωτεύουσας προστασίας και ο ηλεκτρονόμος της γραμμής $l - i$ ως δευτερεύουσα προστασία του id . Ένα παράδειγμα για το πως εμφανίζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας στο Matlab είναι το ακόλουθο:

```

Ip_b =
     1         4    6093.2    1164.8
     1        14    6093.2    1889.9
     2        12    3231.5    3231.5
     3        14    5923.9    1889.9
     3         2    5923.9     995.45
     4         6    2483.7    2483.7
     5         3    3556.2    3556.2
     6         8    3883.3    2344.3
     7         5    3783.2    2243.7
     8        10    3707.2    3707.2
     9         7    2400.9    2400.9
    10        13    5899.3    1873.7
    10        11    5899.3     986.95
    11         1    2991.1    2991.1
    12        13    6109.5    1873.7
    12         9    6109.5    1197.3
    13         4     5199    1164.8
    13         2     5199     995.45
    14         9    5222.8    1197.3
    14        11    5222.8     986.95

```

Σχήμα 5.6: Μορφή πίνακα I_{p_b} στο Matlab

Συνεπώς, επιστρέφεται στο `close_in_fault.m` ο πίνακας I_{p_b} και πλέον υπάρχουν όλα τα απαραίτητα ρεύματα για τον ορισμό των χρόνων λειτουργίας t των ηλεκτρονόμων σύμφωνα με τη σχέση (5.2) έτσι ώστε να ξεκινήσει η βελτιστοποίηση με την κλήση της `fmincon`.

Η κλήση της `fmincon` απαιτεί ορισμό των παραμέτρων που δέχεται. Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 5.3, οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση είναι το ρεύμα διέγερσης I_{pu} και ο χρονικός πολλαπλασιαστής TDS .

Σαν όρια του TDS θεωρούνται:

$$0,1 \leq TDS_{id} \leq 1,1, \quad \forall id \in R$$

Το ελάχιστο όριο για το I_{pu} δίνεται από τη σχέση:

$$I_{pu,id}^{\min} = \frac{SF_{\min} * I_{n,id}^{\text{primary}}}{CTR_{id}}, \quad SF_{\min} = 1,05, \quad \forall id \in R \quad (5.21)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Δηλαδή, θεωρείται ότι το ελάχιστο ρεύμα που πρέπει να αντιλαμβάνεται ο ηλεκτρονόμος id είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από το ονομαστικό, το οποίο έχει διαστασιολογηθεί με βάση το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα κανονικής ή έκτακτης λειτουργίας των γραμμών.

Το μέγιστο όριο για το I_{pu} δίνεται από τη σχέση:

$$I_{pu,id}^{max} = \frac{I_{f,id}^{primary}}{CTR_{id} * SF_{max}} \quad , SF_{max} = 1,2 \quad , \forall id \in R \quad (5.22)$$

όπου $I_{f,id}^{primary}$ το ρεύμα που «βλέπει» ο ηλεκτρονόμος id για close-in τριφασικό σφάλμα μπροστά από αυτόν. Γενικά, το άνω όριο για το I_{pu} πρέπει να ρυθμίζεται με βάση το χαμηλότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης, για αυτό μειώνεται η τιμή του τριφασικού ρεύματος κατά έναν συντελεστή ασφαλείας (safety factor). Ιδανικά θα μπορούσε να γίνεται μελέτη για όλα τα είδη βραχυκυκλωμάτων και να επιλέγεται στη θέση του $I_{f,id}^{primary}$ το μικρότερο ρεύμα που «βλέπει» ο κάθε ηλεκτρονόμος.

Βάσει των παραπάνω ορίων ορίζονται τα διανύσματα lb, ub της Ενότητας 5.4. Αφού έχουν ορισθεί οι γραμμικοί περιορισμοί και το αρχικό σημείο μέσω των A, b, Aeq, beq, x_0 όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη Ενότητα 5.4, τότε καλείται η συνάρτηση `constraints_nonlin.m`, που εκτελεί τη βελτιστοποίηση.

Η συνάρτηση `constraints_nonlin.m` εκτός από την κλήση της `fmincon` περιλαμβάνει και τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης `objfun(x)` όπως ορίσθηκε στην (5.1), καθώς και τον ορισμό της συνάρτησης `mycon(x)` όπου ορίζονται οι μη γραμμικές ανισώσεις του προβλήματος $c(x)$. Οι μη γραμμικές ανισώσεις είναι οι (5.5) και (5.6), οπότε συμπληρώνεται δυναμικά ο πίνακας $c(x)$ βάσει αυτών και με μοναδικό άγνωστο το x . Οι περιορισμοί για τους χρόνους λειτουργίας των ηλεκτρονόμων, καθώς και της επιλογικής συνεργασίας μεταξύ τους είναι οι εξής:

$$\left. \begin{array}{l} \text{primary:} \quad 0,1 \leq t_{id} \leq 1,1 \text{ s} \\ \text{backup:} \quad 0,3 \leq t_{id_backup}^{id} \leq 3 \text{ s} \\ \text{coordination:} \quad t_{id_backup}^{id} - t_{id} \geq 0,3 \text{ s} \end{array} \right\} \quad \forall id \in R, \forall id_{backup} \in B_{id}$$

Για παράδειγμα, οι μη γραμμικοί περιορισμοί του ηλεκτρονόμου με $id = 1$ όταν λειτουργεί ως πρωτεύουσα προστασία, για να έχουν τη μορφή $c(x) \leq 0$ γράφονται ως εξής:

Άνω όριο για το $t_{primary}$ του 1^{ου} ηλεκτρονόμου:

$$c(1) = -1.1 + t_{primary}(1) \Rightarrow$$

$$c(1) = -1.1 + x(1) \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{f,1}^{primary}}{x(1+n) * CTR_1} \right)^B - 1} + C \right)$$

Κάτω όριο για το $t_{primary}$ του 1^{ου} ηλεκτρονόμου:

$$c(1+n) = 0.1 - x(1) \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{f,1}^{primary}}{x(1+n) * CTR_1} \right)^B - 1} + C \right)$$

όπου A, B, C οι σταθερές της εκάστοτε καμπύλης υπερέντασης και n το σύνολο των ηλεκτρονόμων. Υπενθυμίζεται ότι το x είναι ένα διάνυσμα που περιέχει τις μεταβλητές προς βελτιστοποίηση, δηλαδή το TDS και I_{pu} :

$$x = [TDS_1, \dots, TDS_n, I_{pu1}, \dots, I_{pun}]$$

Το $I_{f,1}^{primary}$ είναι το πρωτεύον ρεύμα σφάλματος που βλέπει ο ηλεκτρονόμος με $id = 1$. Αντλείται από την 3^η στήλη του πίνακα $I_{p,b}$.

Τέλος, καλείται η `fmincon` όπως ορίστηκε στην Ενότητα 5.4. Αφού εκτελεστεί με επιτυχία, επιστρέφεται το τελικό διάνυσμα x και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $fval$ στο κύριο πρόγραμμα `close_in_fault.m`, που εμφανίζει τα αποτελέσματα ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων, τους χρόνους λειτουργίας τους και τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

5.5.3 Υλοποίηση για συνδυασμό σφαλμάτων `close-in` και σε ποσοστό της γραμμής

Μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση είναι να ρυθμίζονται οι ηλεκτρονόμοι για συνδυασμό θέσεων σφαλμάτων. Επιλέγεται μία θέση σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, η οποία εκφράζεται ως ποσοστό της γραμμής μπροστά από τον κάθε ηλεκτρονόμο και εισάγεται από τον χρήστη στο αρχείο `grid_data.m`. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε ποσοστό 15%. Οι ηλεκτρονόμοι πρέπει να λειτουργούν μέσα στα επιθυμητά όρια χρόνου που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 5.5.2 και για τα `close-in` σφάλματα και για σφάλμα στην επιλεγείσα θέση της γραμμής.

Για τη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων για δύο θέσεις σφάλματος εκτελείται το `combined_faults.m`, που δεν υλοποιεί μελέτη βραχυκυκλωμάτων εφόσον αυτό γίνεται στο `close_in_faults.m`, στο οποίο καλείται η `fault_position.m` δύο φορές για $x = 10^{-6}\%$ και $x = 15\%$. Στη `fault_position.m` για κάθε ποσοστό, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την προηγούμενη ενότητα για τον προσδιορισμό των ζευγών πρωτεύουσας-δευτερεύουσας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

προστασίας, καθώς και των αντίστοιχων ρευμάτων που «βλέπουν» οι ηλεκτρονόμοι. Αυτά τα αποτελέσματα επιστρέφονται στο `combined_faults.m` με τη μορφή δύο πινάκων I_{p_b} και $I_{midline}$ αντίστοιχα.

Έπειτα, στο `combined_faults.m` καλείται η `constraints_nonlin_comb.m` με τις ίδιες παραμέτρους με την `constraints_nonlin.m` με επιπλέον παράμετρο τον πίνακα $I_{midline}$. Η `fmincon` καλείται με την ίδια αντικειμενική συνάρτηση (5.1), δηλαδή με βάση τους χρόνους λειτουργίας για *close-in* σφάλμα, αλλά με παραπάνω όρια μη γραμμικών περιορισμών. Τα όρια λειτουργίας στους χρόνους πρέπει να ισχύουν και στην περίπτωση του *close-in* σφάλματος αλλά και στο σφάλμα σε ποσοστό της γραμμής, άρα όλοι οι μη γραμμικοί περιορισμοί είναι διπλοί σε σχέση με πριν. Στο διάλυμα $c(x)$ οι μισοί περιορισμοί θα ορίζονται με βάση τα ρεύματα από τον πίνακα I_{p_b} (*close-in* σφάλμα) και οι άλλοι μισοί από τα ρεύματα του πίνακα $I_{midline}$. Για παράδειγμα, οι περιορισμοί του χρόνου λειτουργίας του ηλεκτρονόμου με $id = 1$ όταν λειτουργεί ως πρωτεύουσα προστασία είναι οι εξής:

Άνω όριο για το $t_{primary}$ του 1^{ου} ηλεκτρονόμου:

$$c(1) = -1.1 + x(1) \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{p_b}(1)}{x(1+n) * CTR_1} \right)^B - 1} + C \right)$$

Κάτω όριο για το $t_{primary}$ του 1^{ου} ηλεκτρονόμου:

$$c(1+n) = 0.1 - x(1) \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{p_b}(1)}{x(1+n) * CTR_1} \right)^B - 1} + C \right)$$

Άνω όριο για το $t_{primary,15\%}$ του 1^{ου} ηλεκτρονόμου:

$$c(1+2n) = -1.1 + x(1) \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{midline}(1)}{x(1+n) * CTR_1} \right)^B - 1} + C \right)$$

Κάτω όριο για το $t_{primary,15\%}$ του 1^{ου} ηλεκτρονόμου:

$$c(1+3n) = 0.1 - x(1) \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{midline}(1)}{x(1+n) * CTR_1} \right)^B - 1} + C \right)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βελτιστοποίηση προβλήματος επιλογικής συνεργασίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα

Τέλος, αφού εκτελεστεί με επιτυχία η `fmincon` στην `constraints_nonlin_comb.m`, επιστρέφεται το τελικό διάνυσμα x και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $fval$ στο κύριο πρόγραμμα `combined_faults.m` που εμφανίζει τα αποτελέσματα ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων, τους χρόνους λειτουργίας τους για σφάλμα `close-in` και στο 15% της γραμμής και τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

6.1 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας

Παρακάτω παρατίθενται στους Πίνακες 6.1-6.3 οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη των δικτύων. Οι οικογένειες καμπυλών που χρησιμοποιήθηκαν είναι των IEC, IEEE και U.S. ενώ οι σταθερές A, B, C του τύπου (5.2) φαίνονται στους Πίνακες 6.1-6.3 και εισάγονται αναλόγως την καμπύλη από τον χρήστη στο αρχείο grid_data.xlsx. Εξετάσθηκαν όλες οι χαρακτηριστικές και η επιλογή της καταλληλότερης κρίθηκε από τη σύγκλιση ή μη του αλγορίθμου και σε δεύτερο στάδιο από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε μία.

Πίνακας 6.1: Οικογένεια καμπυλών U.S.

Curve Type	Operating Time
U1 (Moderately Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.0226 + \frac{0.0104}{M^{0.02} - 1} \right)$
U2 (Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$
U3 (Very Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.0963 + \frac{3.88}{M^2 - 1} \right)$
U4 (Extremely Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.0352 + \frac{5.67}{M^2 - 1} \right)$
U5 (Short-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.00262 + \frac{0.00342}{M^{0.02} - 1} \right)$

Πίνακας 6.2: Οικογένεια καμπυλών IEC

Curve Type	Operating Time
C1 (Standard Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right)$
C2 (Very Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{13.5}{M - 1} \right)$
C3 (Extremely Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$
C4 (Long-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{120}{M - 1} \right)$
C5 (Short-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0.05}{M^{0.04} - 1} \right)$

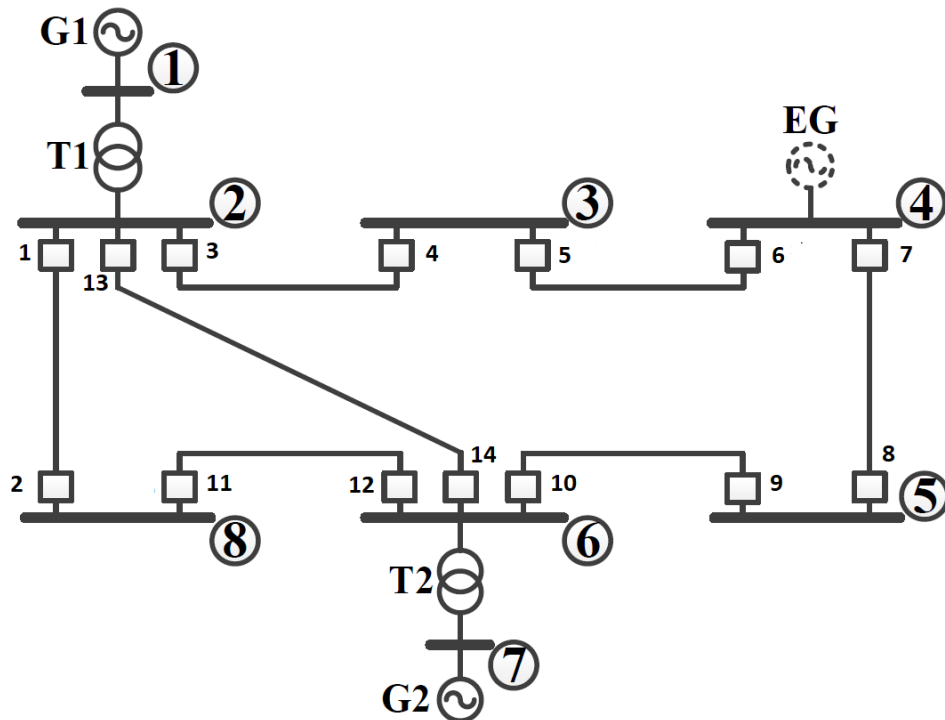
Πίνακας 6.3: Οικογένεια καμπυλών IEEE

Curve Type	Operating Time
E1 (Moderately Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.114 + \frac{0.0515}{M^{0.02} - 1} \right)$
E2 (Very Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.491 + \frac{19.61}{M^2 - 1} \right)$
E3 (Extremely Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(0.1217 + \frac{28.2}{M^2 - 1} \right)$

6.2 Δίκτυο 8 ζυγών

6.2.1 Δεδομένα Δικτύου

Το δίκτυο σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται στο Σχ. 6.1. Αποτελείται από 8 ζυγούς, 2 μετασχηματιστές, 2 γεννήτριες και ένα external grid. Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης-κατεύθυνσης είναι 14, καθώς θεωρείται ότι οι μετασχηματιστές δεν προστατεύονται από ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης, ενώ υπάρχουν 20 ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας. Για παράδειγμα, ο ηλεκτρονόμος με $id = 3$ έχει ως δευτερεύουσα προστασία τους 14 και 2 σύμφωνα με τη λογική που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.5.2. Επιλέχθηκε $S_{base} = 100 \text{ MV}$ και $V_{base} = 150 \text{ kV}$.



Σχήμα 6.1: Πρότυπο δίκτυο 8 ζυγών [37]

Τα δεδομένα των γεννητριών G1 και G2 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.4: Δεδομένα γεννητριών δικτύου 8 ζυγών

Gen.	S_n (MVA)	V_p (kV)	x (%)
G1	150	10	15
G2	150	10	15

Για βασική ισχύ $S_b = 100$ MVA, η νέα αντίδραση των γεννητριών προκύπτει:

$$X_G = X_{old} \frac{S_{new}}{S_{old}} \left(\frac{V_{old}}{V_{new}} \right)^2 = 0,15 \frac{100}{150} \left(\frac{10}{10} \right)^2 = 0,1 \text{ } \mu\Omega$$

Τα δεδομένα των μετασχηματιστών T1 και T2 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.5: Δεδομένα μετασχηματιστών δικτύου 8 ζυγών

Trans.	S_n (MVA)	V_p (kV)	V_s (kV)	x (%)
T1	150	10	150	4
T2	150	10	150	4

Για βασική ισχύ $S_b = 100$ MVA, η νέα αντίδραση των μετασχηματιστών προκύπτει:

$$X_T = X_{old} \frac{S_{new}}{S_{old}} \left(\frac{V_{old}}{V_{new}} \right)^2 = 0,04 \frac{100}{150} \left(\frac{10}{10} \right)^2 = 0,026666 \text{ } \mu\Omega$$

Η βασική αντίσταση στην πλευρά των γραμμών προκύπτει:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{150kV^2}{100 \text{ MVA}} = 225 \Omega$$

Τα δεδομένα των γραμμών δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.6: Δεδομένα γραμμών δικτύου 8 ζυγών

Nodes	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Y (S/km)	Length (km)
1-2	0.004	0.05	0.0	100
1-3	0.0057	0.0714	0.0	70
3-4	0.005	0.0563	0.0	80
4-5	0.005	0.045	0.0	100
5-6	0.0045	0.0409	0.0	110
2-6	0.0044	0.05	0.0	90
1-6	0.005	0.05	0.0	100

Για κάθε γραμμή υπολογίζεται η ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση:

$$Z_L = \frac{(R + jX) * L}{Z_{base}}$$

Ο ζυγός 4 συνδέεται σε εξωτερικό δίκτυο που μοντελοποιείται με ισχύ βραχυκύκλωσης 400 MVA. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίστασή του προκύπτει:

$$S_{EG} = \frac{S_{EG \text{ OLD}}}{S_{base}} = \frac{400}{100} = 4 \mu\text{MVA}$$

$$Z_{EG} = \frac{1}{S_{EG}} = 0,25 \mu\Omega$$

Η επιλογή των ρευμάτων πρωτεύοντος των CTs βασίστηκε στο να βρίσκονται κοντά στο αναμενόμενο ρεύμα κανονικής λειτουργίας και στο να έχουν μία ομοιομορφία τιμών για πρακτικούς λόγους. Επιπλέον, είναι επιθυμητό οι τιμές των ρευμάτων πρωτεύοντος να είναι πολύ μικρότερες των ρευμάτων τριφασικού βραχυκυκλώματος. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκαν CTR των 400/1 και 200/1. Συνολικά τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στο Σχ. 6.2 από το grid_data.xlsx.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	From Bus	To Bus	R (pu)	X (pu)	1/2B (pu)	Transf.	In_prim(ij)	In_prim(ji)	Generators (bus)	R (pu)	X(pu)	V(kV)
2	2	8	0,0018	0,0222	0	0	400	200	1	0,000001	0,1	10
3	2	3	0,0018	0,0222	0	0	400	200	7	0,000001	0,1	10
4	3	4	0,0018	0,02	0	0	400	400				
5	4	5	0,0022	0,02	0	0	400	400				
6	5	6	0,0022	0,02	0	0	200	400				
7	8	6	0,0018	0,02	0	0	200	400				
8	2	6	0,0022	0,0222	0	0	400	200				
9	1	2	0,000001	0,026666	0	1						
10	7	6	0,000001	0,026666	0	1						
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												

M	N	O	P	Q	R	S	T
Nom. Of Buses	V of buses(pu)	S base(MVA)	V base (kV)	Curve constants		x %(fault position)	
8	1	100	150	A	0,14	15	
				B	0,02		
	EG (bus)	S (MVA)	X (pu)	C	0		
	4	400	0,25				

Σχήμα 6.2: Μορφή δεδομένων 8 ζυγών στο Excel

6.2.2 Αποτελέσματα Δικτύου

6.2.2.1 Μελέτη βραχυκυκλωμάτων

Η διαδικασία υπολογισμού των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων περιγράφηκε στην Ενότητα 5.5.2. Στο δίκτυο των 8 ζυγών τα τριφασικά ρεύματα σφάλματος σε κάθε ζυγό παρατίθενται στον Πίνακα 6.7. Σημειώνεται ότι στους ζυγούς όπου συνδέονται γεννήτριες το ρεύμα είναι ανηγμένο στη βασική τους τάση των 10 kV, στη συγκεκριμένη περίπτωση στους ζυγούς 1 και 7.

Πίνακας 6.7: Τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης σε κάθε ζυγό του δικτύου 8 ζυγών

Ζυγός	Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	Γωνία (°)
1	105.174,46	-89,79
2	7.088,67	-89,65
3	6.039,85	-88,98
4	6.127,03	-88,97
5	6.108,02	-88,8
6	7.096,44	-89,63
7	105.245,50	-89,77
8	6.222,58	-89,1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο Matlab αυτό που εμφανίζεται στο command window είναι:

```
Total fault currents:
      Bus   Current      Angle
      No.   Magnitude (A)  degrees
      1     105174.46     -89.79
      2       7088.67     -89.65
      3       6039.85     -88.98
      4       6127.03     -88.97
      5       6108.02     -88.80
      6       7096.44     -89.63
      7     105245.50     -89.77
      8       6222.58     -89.10
```

Σχήμα 6.3: Μορφή αποτελεσμάτων των τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο command window

Δίνεται η δυνατότητα να εμφανιστούν τα ρεύματα που ρέουν σε όλες τις γραμμές για σφάλμα σε ζυγό επιλογής του χρήστη. Το πρόγραμμα εμφανίζει ένα μήνυμα στο οποίο ο χρήστης πληκτρολογεί 'γ' εάν θέλει να εισάγει τον ζυγό που γίνεται το σφάλμα και 'n' εάν όχι. Συγκεκριμένα για τον ζυγό 4 στο command window εμφανίζονται τα εξής:

```
Three-phase balanced fault analysis
Do you want to give a fault location? Enter 'y' or 'n' within single quote -> 'y'
Enter Faulted Bus No. -> 4

Balanced three-phase fault at bus No. 4
Total fault current = 6127.0323 A

Line currents for fault at bus No. 4

      From   To   Current      Angle
      Bus   Bus   Magnitude (A)  degrees
      1     2     2291.03     -88.65
      2     3     2243.73     -89.24
      2     6       34.50     -62.59
      2     8       18.17     -63.37
      3     4     2243.73     -89.24
      4     5     2344.29      91.96
      5     6     2344.29      91.96
      6     7     2296.73      91.40
      6     8       18.17     116.63
      G     1     34365.50     -88.65
      G     7     34450.95     -88.60
      EG    4     1539.60     -90.00
```

Do you want to give a fault location? Enter 'y' or 'n' within single quote -> |

Σχήμα 6.4: Μορφή αποτελεσμάτων των ρευμάτων στις γραμμές για σφάλμα στον ζυγό 4 του δικτύου 8 ζυγών στο command window

Πίνακας 6.8: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 4

Γραμμή	Ρεύμα Γραμμής (A)	Γωνία (°)
1-2	2.291,03	-88,65
2-3	2.243,73	-89,24
2-6	34,5	-62,59
2-8	18,17	-63,37
3-4	2.243,73	-89,24
4-5	2.344,29	91,96
5-6	2.344,29	91,96
6-7	2.296,73	91,4
6-8	18,17	116,63
G-1	34.365,5	-88,65
G-7	34.450,95	-88,6
EG-4	1.539,6	-90

Στον Πίνακα 6.9 παρατίθενται τα ρεύματα των γραμμών για ένα ακόμη παράδειγμα σφάλματος στον ζυγό 7, που πληκτρολογείται πάλι 'γ' στην ερώτηση:

Πίνακας 6.9: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 7

Γραμμή	Ρεύμα Γραμμής (A)	Γωνία (°)
1-2	2.115,39	-89,54
2-3	117,63	87,83
2-6	1.462,58	-89,41
2-8	770,38	-90,19
3-4	117,63	87,83
4-5	934,56	-89,05
5-6	934,56	-89,05
6-7	3.167,43	-89,49
6-8	770,38	89,81
G-1	31.730,92	-89,54
G-7	57.735,03	-90
EG-4	1.052,04	-89,4

Εάν επιθυμεί ο χρήστης να συνεχίσει στη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων πληκτρολογεί 'η'.

6.2.2.2 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης

Μετά τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων, υπολογίζονται τα ρεύματα που «βλέπουν» οι ηλεκτρονόμοι πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας, και εντοπίζονται τα ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας βάσει του αλγόριθμου της Ενότητας 5.5.2. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.10 το ρεύμα που «βλέπει» ο ηλεκτρονόμος με $id = 1$ για σφάλμα μπροστά του είναι 6.093,2 A, ενώ για το ίδιο σφάλμα οι backup του, δηλαδή οι 4 και 14, «βλέπουν» 1.164,8 A και 1.889,9 A αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.10: Ζεύγη *primary/backup* ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για *close-in* σφάλμα μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο στο δίκτυο 8 ζυγών

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	I_{primary} (A)	I_{backup} (A)
1	4	6.093,2	1.164,8
1	14	6.093,2	1.889,9
2	12	3.231,5	3.231,5
3	14	5.923,9	1.889,9
3	2	5.923,9	995,45
4	6	2.483,7	2.483,7
5	3	3.556,2	3.556,2
6	8	3.883,3	2.344,3
7	5	3.783,2	2.243,7
8	10	3.707,2	3.707,2
9	7	2.400,9	2.400,9
10	13	5.899,3	1.873,7
10	11	5.899,3	986,95
11	1	2.991,1	2.991,1
12	13	6.109,5	1.873,7
12	9	6.109,5	1.197,3
13	4	5.199	1.164,8
13	2	5.199	995,45
14	9	5.222,8	1.197,3
14	11	5.222,8	986,95

Εξετάσθηκαν όλες οι καμπύλες λειτουργίας της Ενότητας 6.1. Βασικό κριτήριο επιλογής της καταλληλότερης καμπύλης είναι η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (f_{val}) που προκύπτει από το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας και είναι επιθυμητό να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή. Μετράται και ο χρόνος εκτέλεσης της *function* (t), δηλαδή ο χρόνος που έκανε ο αλγόριθμος να βρει την καλύτερη λύση. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.11. Όπου γράφεται *infeasible* σημαίνει είτε ότι ο αλγόριθμος δεν συνέκλινε για τη συγκεκριμένη καμπύλη, ή ότι δεν υπήρχε σύγκλιση μέσα στο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που έχει οριστεί στα *options*, ο οποίος είναι ένας ήδη μεγάλος αριθμός των 100.000 υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης.

Πίνακας 6.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για σφάλμα *close-in* στο δίκτυο 8 ζυγών

Χαρακτηριστική καμπύλη	f_{val} (s)	t (s)
IEEE-moderately inverse	infeasible	-
IEEE-very inverse	11,43	3,07
IEEE-extremely inverse	infeasible	-
IEC-standard inverse	21,16	3,08
IEC-very inverse	infeasible	
IEC-extremely inverse	14,36	14,5
IEC-long time inverse	infeasible	-
IEC-short time inverse	infeasible	-
U.S.-moderately inverse	9,4	16,23
U.S.-inverse	infeasible	-
U.S.-very inverse	9,5	31,51
U.S.-extremely inverse	infeasible	-
U.S.-short time inverse	9,4	3,83

Παρατηρείται ότι η μικρότερη f_{val} , δηλαδή το μικρότερο άθροισμα χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων, επιτυγχάνεται με τη χρήση της καμπύλης U.S.-Moderately Inverse.

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 5.5.3, η ρεαλιστική προσέγγιση είναι να μελετηθεί η περίπτωση που συμβαίνουν δύο σενάρια σφάλματος, ένα *close-in* και ένα στο $x = 15\%$ της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο. Τότε τα ρεύματα $I_{midline}$ που βλέπουν τα ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας για σφάλμα στο 15% της γραμμής θα είναι:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.12: Ζεύγη primary/backup ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο στο δίκτυο 8 ζυγών

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	I_{primary} (A)	I_{backup} (A)
1	4	5.468,1	1.042,4
1	14	5.468,1	1.530,9
2	12	2.880,7	2.880,7
3	14	5.449,2	1.672,9
3	2	5.449,2	881,1
4	6	2.285,6	2.285,6
5	3	3.332,0	3.332,0
6	8	3.638,0	2.142,6
7	5	3.543,1	2.046,1
8	10	3.471,7	3.471,7
9	7	2.221,6	2.221,6
10	13	5.470,1	1.677,5
10	11	5.470,1	883,6
11	1	2.684,0	2.684,0
12	13	5.540,2	1.548,4
12	9	5.540,2	1.084,6
13	4	4.588,4	988,6
13	2	4.588,4	681,7
14	9	4.609,5	1.019,3
14	11	4.609,5	672,8

Ομοίως ο συγκεντρωτικός Πίνακας $f_{\text{val}} - t$ για συνδυασμό σφαλμάτων είναι:

Πίνακας 6.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 8 ζυγών

Χαρακτηριστική καμπύλη	f_{val} (s)	t (s)
IEEE-moderately inverse	infeasible	-
IEEE-very inverse	11,43	151
IEEE-extremely inverse	infeasible	-
IEC-standard inverse	21,16	18,65
IEC-very inverse	15,47	7,6
IEC-extremely inverse	15,23	9,6
IEC-long time inverse	infeasible	-
IEC-short time inverse	infeasible	-
U.S.-moderately inverse	13,32	9,65
U.S.-inverse	infeasible	-
U.S.-very inverse	infeasible	-
U.S.-extremely inverse	infeasible	-
U.S.-short time inverse	infeasible	-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη ρύθμιση προκύπτει με τη χρήση της IEEE-Very Inverse.

Συνεπώς υπάρχουν δύο διαφορετικές βέλτιστες καμπύλες: μία για close-in, και μία για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και σφάλμα στο 15% της γραμμής. Για λόγους πληρότητας θα παρουσιασθούν οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων και οι χρόνοι λειτουργίας και για τα δύο σενάρια σφάλματος και για τις δύο καμπύλες.

6.2.2.2.1 Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη IEEE-Very Inverse

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.14 με τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in, τηρούνται τα όρια για τα I_{pu} (5.21), (5.22) και τα TDS (από 0,1 έως 1,1).

Πίνακας 6.14: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	2,913	1,05	12,694	0,100
2	1,873	1,05	13,465	0,132
3	3,854	1,05	12,341	0,100
4	2,332	1,05	10,349	0,100
5	2,398	1,05	7,409	0,100
6	2,479	1,05	8,090	0,100
7	2,428	1,05	7,882	0,100
8	2,501	1,05	7,723	0,100
9	2,430	1,05	10,004	0,100
10	4,019	1,05	12,290	0,100
11	1,981	1,05	12,463	0,119
12	3,147	1,05	12,728	0,100
13	2,011	1,05	10,831	0,103
14	3,970	1,05	21,761	0,105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα close-in με βάση τις παραπάνω ρυθμίσεις είναι:

Πίνακας 6.15: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	4	0,124	0,424	0,300000
1	14	0,124	0,492	0,368017
2	12	0,100	0,400	0,300000
3	14	0,192	0,492	0,300000
3	2	0,192	0,492	0,300000
4	6	0,121	0,421	0,300000
5	3	0,203	0,503	0,300000
6	8	0,186	0,486	0,300000
7	5	0,187	0,487	0,300000
8	10	0,203	0,503	0,300000
9	7	0,133	0,433	0,300000
10	13	0,206	0,506	0,300000
10	11	0,206	0,506	0,300000
11	1	0,100	0,400	0,300000
12	13	0,136	0,506	0,370307
12	9	0,136	0,436	0,300000
13	4	0,100	0,424	0,323546
13	2	0,100	0,492	0,391563
14	9	0,100	0,436	0,336064
14	11	0,100	0,506	0,406370

Για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής οι περιορισμοί για τους χρόνους αυξάνονται, αλλά παρόλα αυτά οι ρυθμίσεις παραμένουν ουσιαστικά ίδιες με αυτές στην περίπτωση μόνο των close-in, γεγονός που αιτιολογεί το ότι στους Πίνακες 6.11 και 6.13 η τιμή της f_{val} είναι η ίδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.16: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	2,913	1,05	12,694	0,100
2	1,873	1,05	13,465	0,132
3	3,854	1,05	12,341	0,100
4	2,332	1,05	10,349	0,100
5	2,398	1,05	7,409	0,100
6	2,478	1,05	8,090	0,100
7	2,428	1,05	7,882	0,100
8	2,501	1,05	7,723	0,100
9	2,430	1,05	10,004	0,100
10	4,019	1,05	12,290	0,100
11	1,981	1,05	12,463	0,119
12	3,147	1,05	12,728	0,100
13	2,011	1,05	10,831	0,103
14	3,970	1,05	21,761	0,105

Οι χρόνοι λειτουργίας για close-in σφάλμα βάσει των νέων ρυθμίσεων είναι:

Πίνακας 6.17: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη IEEE-Very Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	$t_{primary}$ (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	4	0,124	0,424	0,300004
1	14	0,124	0,492	0,368021
2	12	0,100	0,400	0,300009
3	14	0,192	0,492	0,300005
3	2	0,192	0,492	0,300005
4	6	0,121	0,421	0,300005
5	3	0,203	0,503	0,300004
6	8	0,186	0,486	0,300005
7	5	0,188	0,488	0,300005
8	10	0,203	0,503	0,300004
9	7	0,133	0,433	0,300005
10	13	0,206	0,506	0,300005
10	11	0,206	0,506	0,300005
11	1	0,100	0,400	0,300010
12	13	0,136	0,506	0,370311
12	9	0,136	0,436	0,300004
13	4	0,100	0,424	0,323546
13	2	0,100	0,492	0,391563
14	9	0,100	0,436	0,336064
14	11	0,100	0,506	0,406371

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα στο 15% της γραμμής για τις νέες ρυθμίσεις είναι:

Πίνακας 6.18: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών *primary/backup* ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη *IEEE-Very Inverse*

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	$t_{primary}$ (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	4	0,142	0,540	0,397535
1	14	0,142	0,807	0,664583
2	12	0,109	0,512	0,402846
3	14	0,220	0,649	0,428815
3	2	0,220	0,636	0,415794
4	6	0,134	0,504	0,369256
5	3	0,226	0,583	0,357018
6	8	0,206	0,596	0,389517
7	5	0,208	0,601	0,392804
8	10	0,227	0,584	0,357499
9	7	0,148	0,513	0,364917
10	13	0,234	0,653	0,418504
10	11	0,234	0,645	0,410800
11	1	0,110	0,505	0,394327
12	13	0,156	0,796	0,640367
12	9	0,156	0,542	0,386077
13	4	0,115	0,611	0,496019
13	2	0,115	1,184	1,069494
14	9	0,114	0,626	0,512007
14	11	0,114	1,296	1,182165

Παρατηρείται ότι για το σφάλμα στο 15%, όπου τα ρεύματα σφάλματος είναι μικρότερα σε σχέση με αυτά των *close-in*, οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων είναι μεγαλύτεροι (Πίνακες 6.17 και 6.18). Αυτό είναι λογικό, λόγω της φθίνουσας μορφής των καμπυλών όσο μεγαλώνουν οι τιμές του άξονα x , δηλαδή των ρευμάτων σφάλματος.

Επιπλέον, σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα χρόνων λειτουργίας τηρούνται οι παρακάτω περιορισμοί που έχουν θεωρηθεί:

$$\left. \begin{array}{l} \text{primary: } 0,1 \leq t_{id} \leq 1,1 \text{ s} \\ \text{backup: } 0,3 \leq t_{id_backup}^{id} \leq 3 \text{ s} \\ \text{coordination: } t_{id_backup}^{id} - t_{id} \geq 0,3 \text{ s} \end{array} \right\} \forall id \in R, \forall id_{backup} \in B_{id}$$

6.2.2.2 Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη *U.S.-Moderately Inverse*

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.19 με τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων για σφάλμα *close-in*, τηρούνται τα όρια για τα I_{pu} (5.21), (5.22) και τα TDS (από 0,1 έως 1,1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.19: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	5,942	1,05	12,694	0,176
2	3,427	1,05	13,465	0,283
3	7,528	1,05	12,341	0,127
4	4,562	1,05	10,349	0,186
5	4,826	1,05	7,409	0,115
6	5,365	1,05	8,090	0,112
7	5,174	1,05	7,882	0,114
8	5,046	1,05	7,723	0,115
9	4,780	1,05	10,004	0,172
10	7,963	1,05	12,290	0,116
11	3,469	1,05	12,463	0,268
12	6,572	1,05	12,728	0,158
13	3,383	1,05	10,831	0,248
14	6,832	1,05	21,761	0,247

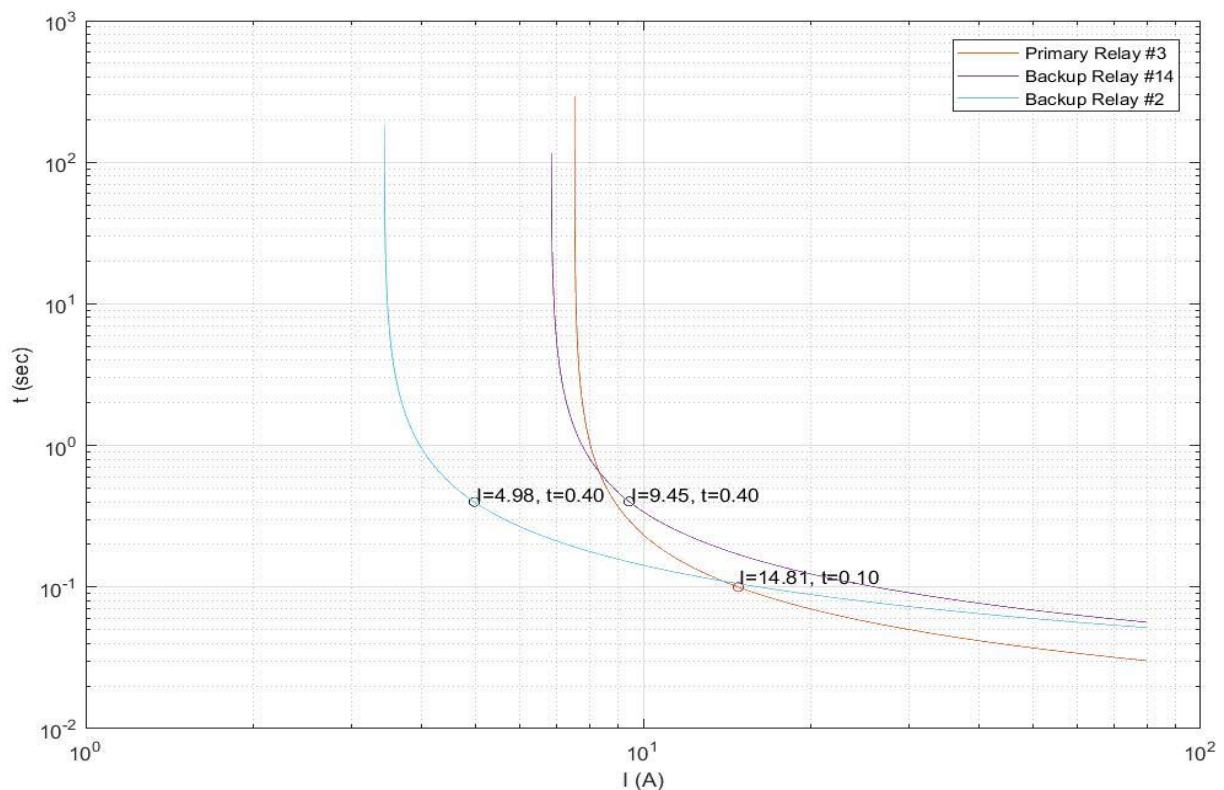
Στον Πίνακα 6.20 φαίνεται ότι οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα είναι οι ελάχιστοι δυνατοί. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος βρήκε τον καταλληλότερο συνδυασμό ρυθμίσεων $I_{pu} - TDS$ που θα μπορούσε, το οποίο επιβεβαιώνεται και από την τιμή της f_{val} που προέκυψε 9,4 s, που είναι η κατώτερη δυνατή τιμή βάσει των κάτω ορίων των χρόνων και του αριθμού των ηλεκτρονόμων. Επίσης, αυτό σημαίνει ότι παρόλο που η fmincon βρίσκει γενικώς τοπικό ελάχιστο, σε αυτήν την περίπτωση έχει βρεθεί το ολικό ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης, διότι δεν δύναται να πάρει τιμή κάτω του 9,4 s.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.20: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών *primary/backup* ηλεκτρονόμων για *close-in* σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη *U.S.-Moderately Inverse*

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	4	0,100	0,400	0,300006
1	14	0,100	0,400	0,300006
2	12	0,100	0,400	0,300006
3	14	0,100	0,400	0,300006
3	2	0,100	0,400	0,300006
4	6	0,100	0,400	0,300006
5	3	0,100	0,400	0,300006
6	8	0,100	0,400	0,300006
7	5	0,100	0,400	0,300006
8	10	0,100	0,400	0,300006
9	7	0,100	0,400	0,300006
10	13	0,100	0,400	0,300006
10	11	0,100	0,400	0,300006
11	1	0,100	0,400	0,300006
12	13	0,100	0,400	0,300006
12	9	0,100	0,400	0,300006
13	4	0,100	0,400	0,300006
13	2	0,100	0,400	0,300006
14	9	0,100	0,400	0,300006
14	11	0,100	0,400	0,300006

Για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε π.χ. ο ηλεκτρονόμος με $id = 3$, ο οποίος έχει ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας τους ηλεκτρονόμους με $id = 14$ και 2 αντίστοιχα, και απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα στο Σχ. 6.5 οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας όλων, που προκύπτουν βάσει των ρυθμίσεων του Πίνακα 6.19. Επιπλέον, στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε ηλεκτρονόμου για σφάλμα *close-in* μπροστά από τον ηλεκτρονόμο 3. Τέλος, φαίνεται ότι τηρείται η επιλογική συνεργασία μεταξύ τους, καθώς και οι γενικότεροι περιορισμοί των χρόνων. Στα σημεία που έχουν απεικονιστεί ισχύει ότι $I = \frac{I_f}{CTR}$, δηλαδή το ρεύμα σφάλματος που «βλέπει» ο εκάστοτε ηλεκτρονόμος είναι υποβιβασμένο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως.



Σχήμα 6.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3

Για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής, οι ρυθμίσεις του Πίνακα 6.21 προκύπτουν διαφορετικές και δίνουν βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ίση με $f_{val} = 13,32$ s.

Πίνακας 6.21: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	3,981	1,05	12,694	0,612
2	2,988	1,05	13,465	0,549
3	4,009	1,05	12,341	0,626
4	4,678	1,05	10,349	0,234
5	4,995	1,05	7,409	0,116
6	4,639	1,05	8,090	0,253
7	4,936	1,05	7,882	0,188
8	5,228	1,05	7,723	0,117
9	4,440	1,05	10,004	0,329
10	4,378	1,05	12,290	0,595
11	2,750	1,05	12,463	0,633
12	3,855	1,05	12,728	0,677
13	3,670	1,05	10,831	0,274
14	6,345	1,05	21,761	0,437

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι χρόνοι λειτουργίας για close-in σφάλμα με τις νέες ρυθμίσεις του Πίνακα 6.21 είναι:

Πίνακας 6.22: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	4	0,248	0,559	0,311560
1	14	0,248	0,578	0,330072
2	12	0,179	0,488	0,309303
3	14	0,260	0,578	0,317811
3	2	0,260	0,569	0,308642
4	6	0,129	0,455	0,326197
5	3	0,106	0,420	0,313417
6	8	0,182	0,535	0,353096
7	5	0,153	0,521	0,367522
8	10	0,108	0,423	0,314129
9	7	0,178	0,502	0,324294
10	13	0,265	0,589	0,324376
10	11	0,265	0,574	0,308993
11	1	0,205	0,516	0,310222
12	13	0,268	0,589	0,321619
12	9	0,268	0,578	0,310582
13	4	0,118	0,559	0,441863
13	2	0,118	0,569	0,451206
14	9	0,168	0,578	0,410078
14	11	0,168	0,574	0,405731

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

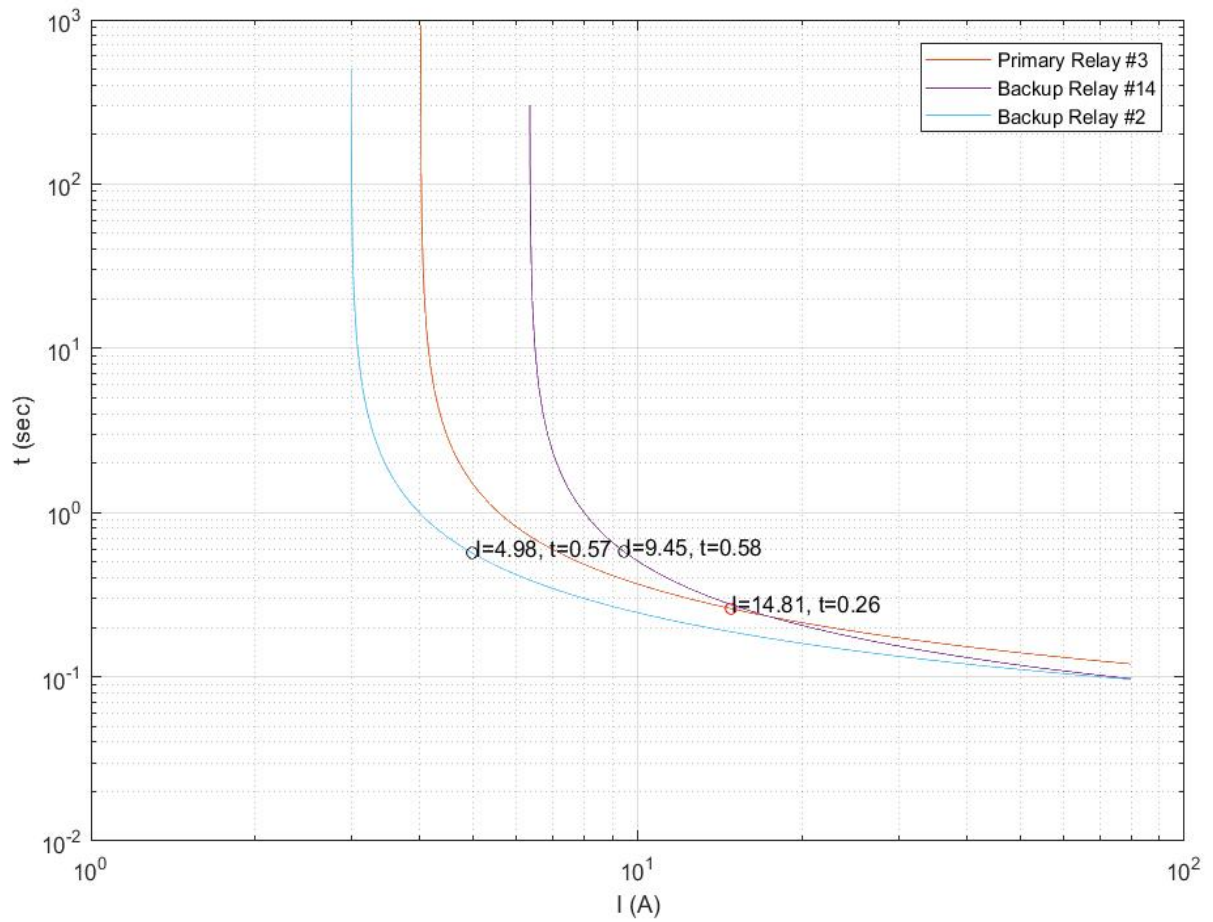
Οι χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα στο 15% της γραμμής προκύπτουν:

Πίνακας 6.23: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 8 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse

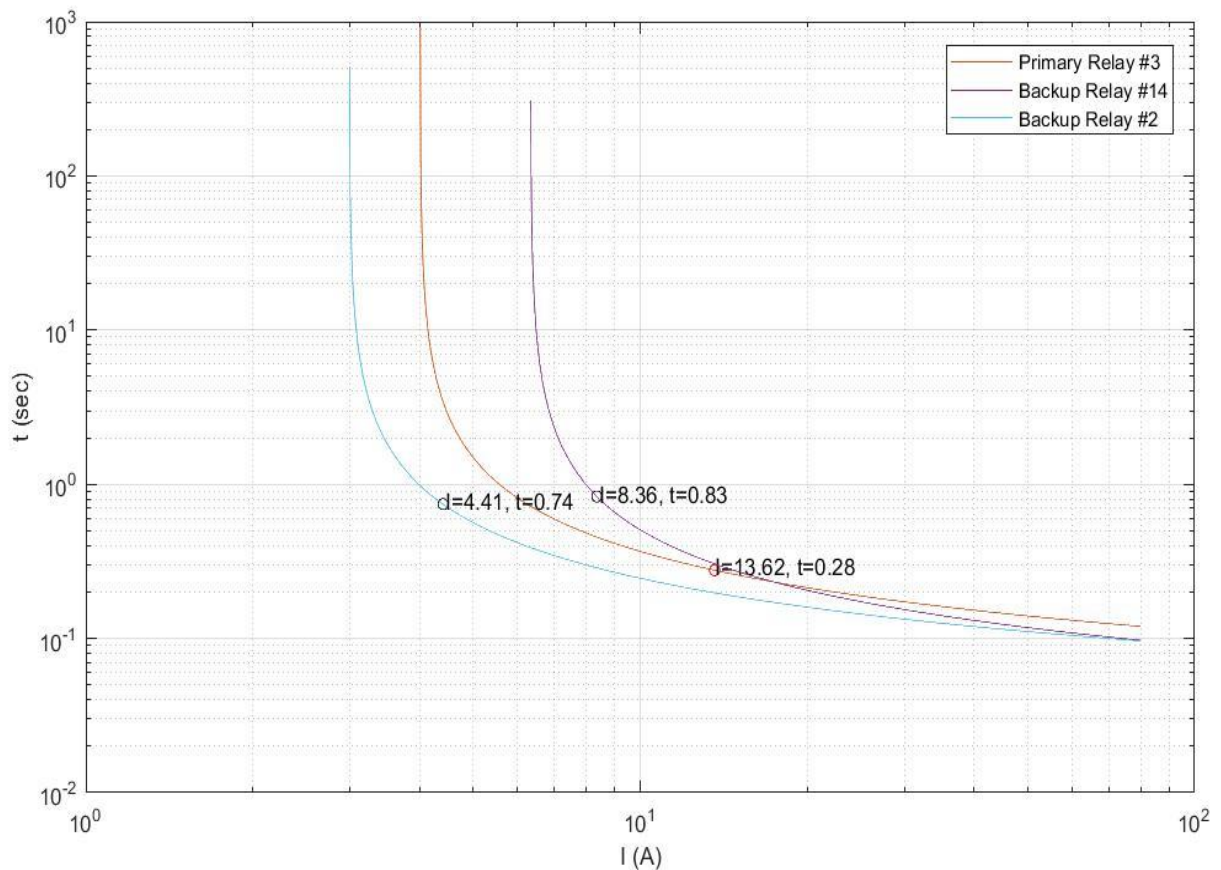
Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	4	0,269	1,130	0,861068
1	14	0,269	1,218	0,949578
2	12	0,191	0,575	0,384529
3	14	0,277	0,83	0,552612
3	2	0,277	0,744	0,467343
4	6	0,14	0,635	0,494279
5	3	0,12	0,456	0,33654
6	8	0,199	2,516	2,316776
7	5	0,17	2,535	2,365114
8	10	0,122	0,462	0,339877
9	7	0,192	0,83	0,638137
10	13	0,282	1,074	0,792282
10	11	0,282	0,705	0,42349
11	1	0,219	0,62	0,401704
12	13	0,287	2,681	2,393515
12	9	0,287	0,861	0,574234
13	4	0,13	2,212	2,082299
13	2	0,13	2,178	2,048274
14	9	0,184	1,247	1,062857
14	11	0,184	1,645	1,460808

Σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα χρόνων λειτουργίας τηρούνται όλοι οι περιορισμοί που έχουν θεωρηθεί.

Παρακάτω απεικονίζονται διαγραμματικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας για τον ηλεκτρονόμο με $id = 3$ και για τους backup του 14 και 2, που προκύπτουν βάσει των παραπάνω νέων ρυθμίσεων του Πίνακα 6.21, για σφάλμα close-in στο Σχ. 6.6, καθώς και για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο Σχ. 6.7. Παρατηρείται η επιλογική συνεργασία των ηλεκτρονόμων και η τήρηση των περιορισμών των χρόνων λειτουργίας.



Σχήμα 6.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3 με νέες ρυθμίσεις

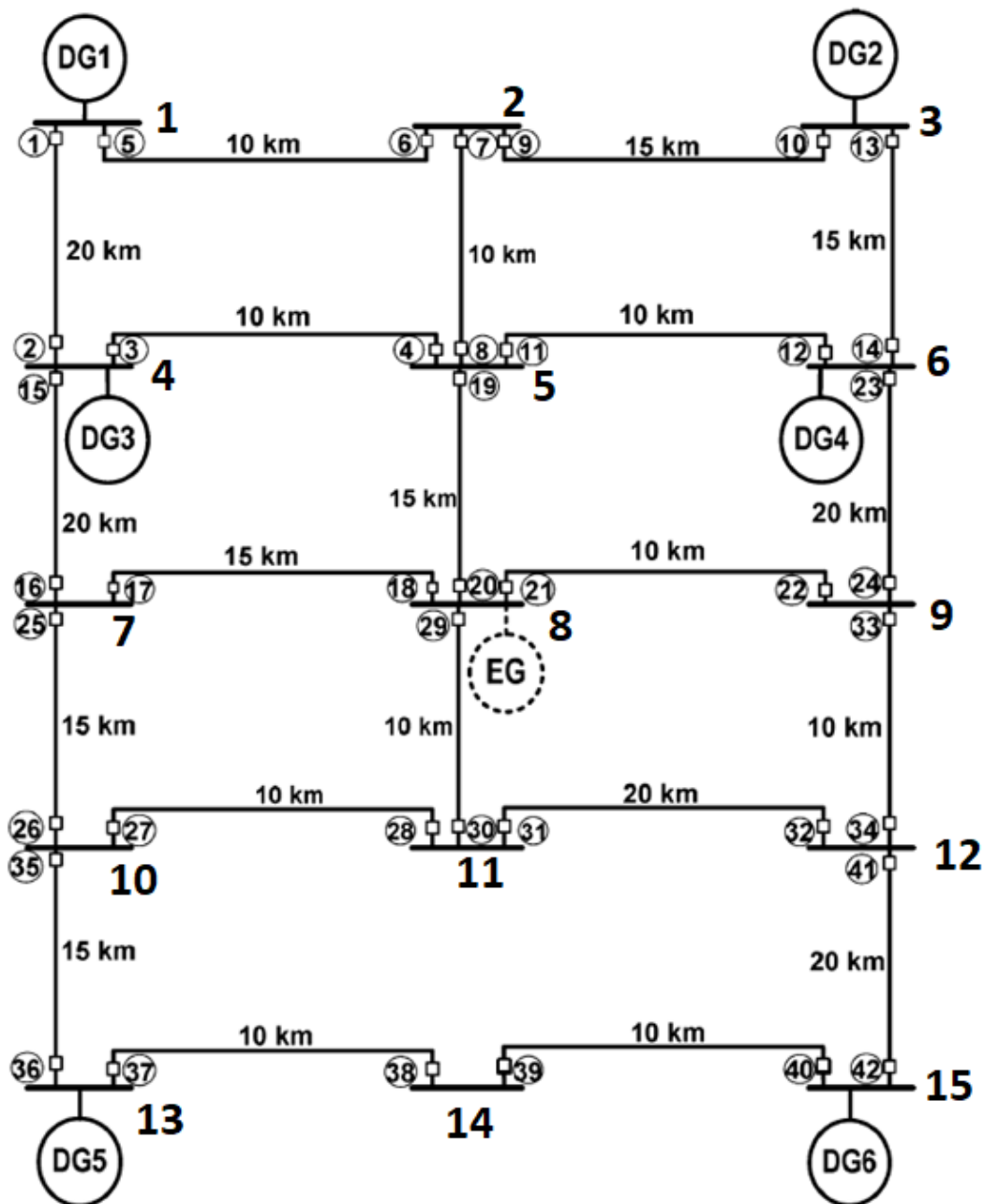


Σχήμα 6.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από τον 3

6.3 Δίκτυο 15 ζυγών

6.3.1 Δεδομένα Δικτύου

Το δίκτυο σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται στο Σχ. 6.8. Αποτελείται από 15 ζυγούς, 21 γραμμές, 6 γεννήτριες και ένα external grid. Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης-κατεύθυνσης είναι 42, ενώ υπάρχουν 82 ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας. Για παράδειγμα, ο ηλεκτρονόμος με $id = 3$ έχει ως δευτερεύουσα προστασία τους 1 και 16 σύμφωνα με τη λογική που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.5.2. Επιλέγεται $S_{base} = 100 \text{ MVA}$ και $V_{base} = 20 \text{ kV}$.



Σχήμα 6.8: Πρότυπο δίκτυο 15 ζυγών [38]

Όλες οι γεννήτριες έχουν ισχύ 15 MVA, τάση 20 kV και αντίδραση $X_G = 15\%$. Επιπλέον, όλες οι γραμμές έχουν σύνθετη αντίσταση $Z = 0,19 + j0,46 \Omega/km$. Ο ζυγός 8 συνδέεται σε εξωτερικό δίκτυο που μοντελοποιείται με ισχύ βραχυκύκλωσης 200 MVA.

Η αντίδραση των γεννητριών στη βασική ισχύ 100 MVA είναι:

$$X_G = 0,15 \frac{100}{15} \left(\frac{20}{20}\right)^2 = 1 \alpha\mu$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η βασική αντίσταση είναι:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{20kV^2}{100 MVA} = 4 \Omega$$

Για κάθε γραμμή υπολογίζεται η ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση:

$$Z_L = \frac{(0,19 + j0,46) * L}{Z_{base}}$$

Η ισοδύναμη αντίσταση του EG είναι:

$$S_{EG} = \frac{S_{EG OLD}}{S_{base}} = \frac{200}{100} = 2 \alpha\mu$$

$$Z_{EG} = \frac{1}{S_{EG}} = 0,5 \alpha\mu$$

Επιλέχθηκαν δύο τιμές *CTR* για ομοιομορφία, των 100/1 και 300/1. Τα δεδομένα όπως είναι στο grid_data.xlsx φαίνονται στο Σχ. 6.9:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	From Bus	To Bus	R (pu)	X (pu)	1/2B (pu)	Transf.	In_prim(ij)	In_prim(ji)	Generators (bus	R (pu)	X(pu)	V(kV)
2	1	4	0,95	2,3	0	0	100	100	1	0	1	20
3	4	5	0,475	1,15	0	0	100	100	3	0	1	20
4	1	2	0,475	1,15	0	0	300	100	4	0	1	20
5	2	5	0,475	1,15	0	0	100	300	6	0	1	20
6	2	3	0,7125	1,725	0	0	100	300	13	0	1	20
7	5	6	0,475	1,15	0	0	100	100	15	0	1	20
8	3	6	0,7125	1,725	0	0	100	100				
9	4	7	0,95	2,3	0	0	300	100				
10	7	8	0,7125	1,725	0	0	100	300				
11	5	8	0,7125	1,725	0	0	100	300				
12	8	9	0,475	1,15	0	0	300	100				
13	6	9	0,95	2,3	0	0	300	100				
14	7	10	0,7125	1,725	0	0	100	100				
15	10	11	0,475	1,15	0	0	100	300				
16	8	11	0,475	1,15	0	0	300	100				
17	11	12	0,95	2,3	0	0	100	100				
18	9	12	0,475	1,15	0	0	100	100				
19	10	13	0,7125	1,725	0	0	100	300				
20	13	14	0,475	1,15	0	0	300	100				
21	14	15	0,475	1,15	0	0	100	300				
22	12	15	0,95	2,3	0	0	100	100				
23												
24												

M	N	O	P	Q	R	S	T
Nom. Of Buses	V of buses(pu)	S base(MVA)	V base (kV)	Curve constants		x %(fault position)	
15	1	100	20	A	19,61	15	
				B	2		
	EG (bus)	S (MVA)	X (pu)	C	0,491		
	8	200	0,5				

Σχήμα 6.9: Μορφή δεδομένων 15 ζυγών στο Excel

6.3.2 Αποτελέσματα Δικτύου

6.3.2.1 Μελέτη βραχυκυκλωμάτων

Στο δίκτυο των 15 ζυγών τα τριφασικά ρεύματα σφάλματος σε κάθε έναν ζυγό παρατίθενται στον Πίνακα 6.24.

Πίνακας 6.24: Τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης σε κάθε ζυγό του δικτύου 15 ζυγών

Ζυγός	Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	Γωνία (°)
1	4.845,96	-82,23
2	3.899,94	-73,45
3	4.891,08	-82,26
4	5.683,87	-80,82
5	5.244,49	-73,91
6	5.941,21	-80,68
7	3.002,94	-71,23
8	8.674,6	-83,74
9	3.532,84	-71,91
10	3.038,13	-71,72
11	3.341,33	-71,98
12	2.806,5	-71,18
13	4.528,85	-83,04
14	2.839,78	-74,91
15	4.400,67	-83,36

Πληκτρολογώντας 'γ' στην εμφανιζόμενη ερώτηση στο command window και έπειτα τον αριθμό 8, προκύπτουν τα ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 8 του Πίνακα 6.25.

Πίνακας 6.25: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 8

Γραμμή	Ρεύμα Γραμμής (A)	Γωνία (°)
1-2	213,17	-68,4
1-4	129,85	-61,84
2-3	149,3	111,81
2-5	362,47	-68,31
3-6	181,05	-62,53
4-5	318,98	-73,64
4-7	465,27	-72,05
5-6	317,37	106,83
5-8	997,9	-71,56
6-9	518,13	-71,98
7-8	590,08	-71,79
7-10	124,83	109,16
8-9	777,86	108,35
8-11	636,46	108,42
9-12	259,75	109,01
10-11	435,89	-71,69
10-13	560,71	108,5
11-12	200,57	108,67
12-15	460,32	108,86
13-14	22,81	119,27
14-15	22,81	119,27
G-1	342,5	-65,91
G-3	329,96	-65,09
G-4	657,1	-74,83
G-6	657,84	-75,15
G-13	538,32	-71,96
G-15	482,77	-70,65
EG-8	5.773,5	-90

Πληκτρολογώντας 'γ' στην εμφανιζόμενη ερώτηση και έπειτα τον αριθμό 13, προκύπτουν τα ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 13 του Πίνακα 6.26.

Πίνακας 6.26: Ρεύματα γραμμών για σφάλμα στον ζυγό 13

Γραμμή	Ρεύμα Γραμμής (A)	Γωνία (°)
1-2	23,94	-53,13
1-4	36,95	-55,02
2-3	21,44	127,18
2-5	45,39	-52,98
3-6	30	-48,6
4-5	5,2	97,45
4-7	191	-66,1
5-6	32,85	121,17
5-8	73,55	-53,59
6-9	102,23	-58,24
7-8	186,96	108,7
7-10	377,57	-68,67
8-9	62,25	-66,18
8-11	383,58	-68,72
9-12	164,11	-61,24
10-11	463,08	109,78
10-13	840,57	-69,52
11-12	80,25	102,63
12-15	89,83	-46,87
13-14	859,91	107,25
14-15	859,91	107,25
G-1	60,89	-54,28
G-3	51,4	-50,36
G-4	149,85	-68,26
G-6	105,65	-61,15
G-13	2.886,75	-90
G-15	780,07	-75,63
EG-8	562,1	-71,26

6.3.2.2 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης

Μετά τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων, υπολογίζονται τα ρεύματα που «βλέπουν» οι ηλεκτρονόμοι πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας, και εντοπίζονται τα ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας βάσει του αλγόριθμου της Ενότητας 5.5.2. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.27 το ρεύμα που «βλέπει» ο ηλεκτρονόμος με $id = 1$ για σφάλμα μπροστά του είναι 3.987,2 A, ενώ για το ίδιο σφάλμα ο backup του, δηλαδή ο 6, «βλέπει» 1.147,1 A.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.27: Ζεύγη *primary/backup* ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για *close-in* σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	I_{primary} (A)	I_{backup} (A)
1	6	3.987,2	1.147,1
2	4	4.861,2	1.340
2	16	4.861,2	700,83
3	1	4.368,4	831,07
3	16	4.368,4	700,83
4	7	3.803,4	1.100,9
4	12	3.803,4	1.473,6
4	20	3.803,4	1.229,5
5	2	3.729,4	876,69
6	10	2.494,5	1.082,3
6	8	2.494,5	1.412,8
7	5	2.488,7	1.406,8
7	10	2.488,7	1.082,3
8	3	4.143,6	1.441,5
8	12	4.143,6	1.473,6
8	20	4.143,6	1.229,5
9	5	2.817,7	1.406,8
9	8	2.817,7	1.412,8
10	14	3.971,8	1.124,7
11	7	3.771	1.100,9
11	3	3.771	1.441,5
11	20	3.771	1.229,5
12	13	4.629,7	1.040,1
12	24	4.629,7	754,56
13	9	3.789,5	942,91
14	11	4.909,1	1.334,2
14	24	4.909,1	754,56
15	1	4.996,5	831,07
15	4	4.996,5	1.340
16	18	2.077,8	1.229,2
16	26	2.077,8	848,66
17	15	1.773,8	925,14
17	26	1.773,8	848,66
18	19	8.098,2	997,9
18	22	8.098,2	777,86
18	30	8.098,2	636,46
19	7	4.015,8	1.100,9
19	3	4.015,8	1.441,5
19	12	4.015,8	1.473,6
20	17	7.702	590,08
20	22	7.702	777,86
20	30	7.702	636,46

Πίνακας 6.27

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	I_{primary} (A)	I_{backup} (A)
21	19	7.915,7	997,9
21	17	7.915,7	590,08
21	30	7.915,7	636,46
22	23	1.817,2	926,49
22	34	1.817,2	890,74
23	13	5.200,5	1.040,1
23	11	5.200,5	1.334,2
24	21	2.606,4	1.715,9
24	34	2.606,4	890,74
25	15	2.154,3	925,14
25	18	2.154,3	1.229,2
26	28	2.198,6	1.107,7
26	36	2.198,6	1.091,4
27	25	1.930,6	839,79
27	36	1.930,6	1.091,4
28	29	2.354,9	1.694,7
28	32	2.354,9	660,4
29	19	8.053,5	997,9
29	17	8.053,5	590,08
29	22	8.053,5	777,86
30	27	1.646,9	986,47
30	32	1.646,9	660,4
31	29	2.681	1.694,7
31	27	2.681	986,47
32	33	2.065,6	1.185,3
32	42	2.065,6	880,57
33	23	2.642,2	926,49
33	21	2.642,2	1.715,9
34	31	1.621,3	740,93
34	42	1.621,3	880,57
35	25	1.947,5	839,79
35	28	1.947,5	1.107,7
36	38	3.716,7	859,91
37	35	3.686	840,57
38	40	1.410,3	1.410,3
39	37	1.429,5	1.429,5
40	41	3.552,4	702,1
41	33	1.926,3	1.185,3
41	31	1.926,3	740,93
42	39	3.723,3	867,72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Για close-in σφάλμα μπροστά στους ηλεκτρονόμους, εξετάστηκαν όλες οι καμπύλες της Ενότητας 6.1. Ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και των χρόνων εκτέλεσης της *fmincon* φαίνεται παρακάτω:

Πίνακας 6.28: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για σφάλμα close-in στο δίκτυο 15 ζυγών

Χαρακτηριστική καμπύλη	f_{val} (s)	t (s)
IEEE-moderately inverse	infeasible	-
IEEE-very inverse	30,58	17,15
IEEE-extremely inverse	50,73	52,08
IEC-standard inverse	51,90	304,62
IEC-very inverse	40,05	312,79
IEC-extremely inverse	infeasible	-
IEC-long time inverse	infeasible	-
IEC-short time inverse	29,15	66,67
U.S.-moderately inverse	28,8	125,89
U.S.-inverse	29,68	79,84
U.S.-very inverse	30,35	48,97
U.S.-extremely inverse	65,57	164,55
U.S.-short time inverse	29,03	118,17

Η μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με τη χρήση της καμπύλης U.S.-Moderately Inverse με χρόνο εκτέλεσης 125,89 s.

Στη συνέχεια θα μελετηθεί και η περίπτωση που συμβαίνει συνδυασμός σφαλμάτων, ένα close-in και ένα στο $x = 15\%$ της γραμμής. Τότε τα ρεύματα $I_{midline}$ που βλέπουν τα ζεύγη ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο είναι:

Πίνακας 6.29: Ζεύγη primary/backup ηλεκτρονόμων και ρευμάτων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο στο δίκτυο 15 ζυγών

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	$I_{primary}$ (A)	I_{backup} (A)
1	6	2.636,3	733,9
2	4	2.983,6	793,1
2	16	2.983,6	433,9
3	1	3.401,2	629,2
3	16	3.401,2	537,1
4	7	3.029,8	866,7
4	12	3.029,8	1.183,8
4	20	3.029,8	979,7
5	2	3.014,0	693,2
6	10	2.138,1	932,5
6	8	2.138,1	1.206,0

Πίνακας 6.29

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	I_{primary} (A)	I_{backup} (A)
7	5	2.126,4	1.203,0
7	10	2.126,4	923,7
8	3	3.242,6	1.122,4
8	12	3.242,6	1.149,5
8	20	3.242,6	971,6
9	5	2.202,5	1.106,8
9	8	2.202,5	1.097,0
10	14	2.877,3	796,3
11	7	3.009,9	869,9
11	3	3.009,9	1.159,9
11	20	3.009,9	980,7
12	13	3.557,9	783,6
12	24	3.557,9	569,7
13	9	2.779,7	671,6
14	11	3.327,0	880,1
14	24	3.327,0	514,6
15	1	3.045,8	508,5
15	4	3.045,8	800,4
16	18	1.632,0	964,2
16	26	1.632,0	667,9
17	15	1.493,0	786,5
17	26	1.493,0	706,5
18	19	4.512,0	546,2
18	22	4.512,0	428,1
18	30	4.512,0	275,5
19	7	2.873,0	793,8
19	3	2.873,0	1.028,6
19	12	2.873,0	1.050,8
20	17	4.423,0	316,3
20	22	4.423,0	420,7
20	30	4.423,0	359,6
21	19	5.216,7	647,7
21	17	5.216,7	383,2
21	30	5.216,7	353,9
22	23	1.603,7	825,0
22	34	1.603,7	778,7
23	13	3.118,6	626,9
23	11	3.118,6	780,9
24	21	1.942,3	1.276,7
24	34	1.942,3	665,7
25	15	1.766,4	765,5
25	18	1.766,4	1.001,0
26	28	1.796,7	895,6

Πίνακας 6.29

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	I_{primary} (A)	I_{backup} (A)
26	36	1.796,7	901,4
27	25	1.702,4	733,7
27	36	1.702,4	969,2
28	29	2.027,9	1.458,7
28	32	2.027,9	569,3
29	19	5.250,1	661,0
29	17	5.250,1	327,0
29	22	5.250,1	448,1
30	27	1.459,9	877,6
30	32	1.459,9	582,3
31	29	1.967,1	1.239,4
31	27	1.967,1	727,8
32	33	1.610,8	916,9
32	42	1.610,8	694,0
33	23	2.241,6	791,6
33	21	2.241,6	1.450,2
34	31	1.456,3	659,0
34	42	1.456,3	797,4
35	25	1.634,9	706,3
35	28	1.634,9	928,6
36	38	2.753,8	629,8
37	35	2.994,3	677,5
38	40	1.290,8	1.290,8
39	37	1.306,9	1.306,9
40	41	2.907,0	569,3
41	33	1.538,8	948,8
41	31	1.538,8	590,0
42	39	2.535,4	582,3

Εξετάζονται όλες οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της Ενότητας 6.1 για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και σε ποσοστό 15% της γραμμής:

Πίνακας 6.30: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης και χρόνου βελτιστοποίησης ανά καμπύλη για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 15 ζυγών

Χαρακτηριστική καμπύλη	f_{val} (s)	t (s)
IEEE-moderately inverse	40,63	294,05
IEEE-very inverse	36,16	227,81
IEEE-extremely inverse	infeasible	-
IEC-standard inverse	56,31	188,04
IEC-very inverse	infeasible	-
IEC-extremely inverse	infeasible	-
IEC-long time inverse	infeasible	-
IEC-short time inverse	infeasible	-
U.S.-moderately inverse	64,04	152,97
U.S.-inverse	35,43	278,28
U.S.-very inverse	infeasible	-
U.S.-extremely inverse	infeasible	-
U.S.-short time inverse	infeasible	-

Η βέλτιστη τιμή f_{val} προκύπτει με τη χρήση της καμπύλης U.S.-Inverse. Για λόγους πληρότητας θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα ρυθμίσεων και χρόνων λειτουργίας και για τις δύο βέλτιστες καμπύλες, πρώτα για close-in σφάλμα και μετά για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και σε ποσοστό 15% της γραμμής.

6.3.2.2.1 Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη U.S.-Moderately Inverse

Στην περίπτωση του δικτύου 15 ζυγών απαιτούνται περισσότεροι υπολογιστικοί πόροι δεδομένου ότι οι μη γραμμικοί περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται είναι 330 για close-in σφάλμα και 660 στην περίπτωση συνδυασμού σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής. Για αυτόν τον λόγο, θα μεταβληθούν τα όρια των χρόνων λειτουργίας και του TDS , ώστε να γίνουν πιο ελαστικά, και έτσι να συγκλίνει με μεγαλύτερη ευκολία ο αλγόριθμος, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι θα φτάσουν οι τιμές στα καινούρια άνω όρια όπως θα παρατηρηθεί και στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, τα νέα όρια των χρόνων και του TDS είναι:

$$\left. \begin{array}{l} \text{primary: } 0,1 \leq t_{id} \leq 1,5 \text{ s} \\ \text{backup: } 0,3 \leq t_{id_{backup}}^{id} \leq 3,5 \text{ s} \\ \text{coordination: } t_{id_{backup}}^{id} - t_{id} \geq 0,2 \text{ s} \\ 0,1 \leq TDS_{id} \leq 1,5 \end{array} \right\} \forall id \in R, \forall id_{backup} \in B_{id}$$

Στον Πίνακα 6.31 φαίνονται οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in. Παρατηρείται ότι τηρούνται τα όρια για τα I_{pu} (5.21)-(5.22) και τα TDS .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.31: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	4,013	1,05	33,226	0,410
2	3,979	1,05	40,510	0,444
3	8,523	1,05	36,403	0,298
4	8,160	1,05	31,695	0,281
5	2,945	1,05	10,359	0,264
6	7,892	1,05	20,788	0,213
7	7,439	1,05	20,739	0,223
8	2,826	1,05	11,510	0,290
9	5,610	1,05	23,481	0,294
10	1,958	1,05	11,033	0,345
11	8,140	1,05	31,425	0,280
12	8,572	1,05	38,581	0,307
13	5,664	1,05	31,579	0,344
14	5,658	1,05	40,909	0,387
15	1,415	1,05	13,879	0,438
16	4,185	1,05	17,315	0,292
17	3,501	1,05	14,782	0,296
18	1,729	1,05	22,495	0,484
19	5,202	1,05	33,465	0,368
20	1,766	1,05	21,395	0,472
21	2,809	1,05	21,988	0,401
22	5,177	1,05	15,144	0,232
23	1,394	1,05	14,446	0,447
24	4,208	1,05	21,720	0,331
25	5,355	1,05	17,953	0,256
26	5,387	1,05	18,322	0,258
27	7,128	1,05	16,088	0,185
28	2,567	1,05	6,541	0,207
29	2,739	1,05	22,371	0,408
30	4,042	1,05	13,724	0,258
31	4,047	1,05	22,342	0,342
32	3,849	1,05	17,213	0,306
33	8,062	1,05	22,018	0,220
34	6,660	1,05	13,511	0,166
35	5,616	1,05	16,229	0,230
36	2,042	1,05	10,324	0,327
37	3,031	1,05	10,239	0,257
38	6,755	1,05	11,752	0,138
39	6,801	1,05	11,913	0,139
40	3,022	1,05	9,868	0,251
41	4,342	1,05	16,052	0,273
42	4,492	1,05	31,027	0,380

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 6.32 φαίνεται ότι οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα είναι οι ελάχιστοι δυνατοί. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος βρήκε τον καταλληλότερο συνδυασμό ρυθμίσεων $I_{pu} - TDS$ που θα μπορούσε, το οποίο επιβεβαιώνεται και από την τιμή της f_{val} που προέκυψε 28,8 s, που είναι η κατώτερη δυνατή τιμή βάσει των κάτω ορίων των χρόνων και του αριθμού των ηλεκτρονόμων. Επίσης, αυτό σημαίνει ότι παρόλο που η fmincon βρίσκει γενικώς τοπικό ελάχιστο, σε αυτή την περίπτωση έχει βρεθεί το ολικό ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης, διότι δεν δύναται να πάρει τιμή κάτω του 28,8 s.

Πίνακας 6.32: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	$t_{primary}$ (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	6	0,100	0,300	0,200002
2	4	0,100	0,300	0,200002
2	16	0,100	0,300	0,200002
3	1	0,100	0,300	0,200002
3	16	0,100	0,300	0,200002
4	7	0,100	0,300	0,200002
4	12	0,100	0,300	0,200003
4	20	0,100	0,300	0,200002
5	2	0,100	0,300	0,200002
6	10	0,100	0,300	0,200002
6	8	0,100	0,300	0,200002
7	5	0,100	0,300	0,200002
7	10	0,100	0,300	0,200002
8	3	0,100	0,300	0,200003
8	12	0,100	0,300	0,200003
8	20	0,100	0,300	0,200003
9	5	0,100	0,300	0,200002
9	8	0,100	0,300	0,200002
10	14	0,100	0,300	0,200002
11	7	0,100	0,300	0,200002
11	3	0,100	0,300	0,200003
11	20	0,100	0,300	0,200003
12	13	0,100	0,300	0,200002
12	24	0,100	0,300	0,200002
13	9	0,100	0,300	0,200002
14	11	0,100	0,300	0,200002
14	24	0,100	0,300	0,200002
15	1	0,100	0,300	0,200002
15	4	0,100	0,300	0,200002
16	18	0,100	0,300	0,200002
16	26	0,100	0,300	0,200002
17	15	0,100	0,300	0,200002
17	26	0,100	0,300	0,200002
18	19	0,100	0,300	0,200003

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.32

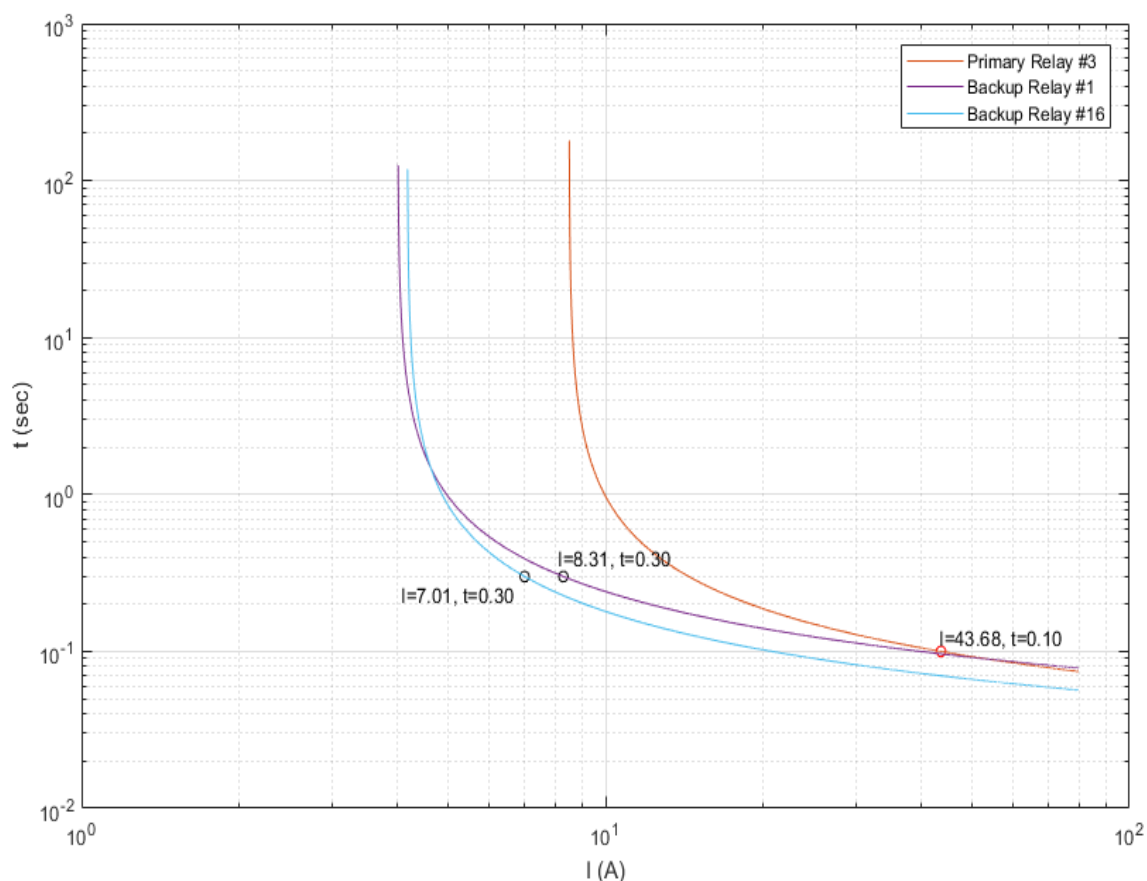
Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
18	22	0,100	0,300	0,200003
18	30	0,100	0,300	0,200003
19	7	0,100	0,300	0,200003
19	3	0,100	0,300	0,200003
19	12	0,100	0,300	0,200003
20	17	0,100	0,300	0,200003
20	22	0,100	0,300	0,200003
20	30	0,100	0,300	0,200003
21	19	0,100	0,300	0,200003
21	17	0,100	0,300	0,200003
21	30	0,100	0,300	0,200003
22	23	0,100	0,300	0,200002
22	34	0,100	0,300	0,200002
23	13	0,100	0,300	0,200002
23	11	0,100	0,300	0,200002
24	21	0,100	0,300	0,200002
24	34	0,100	0,300	0,200002
25	15	0,100	0,300	0,200002
25	18	0,100	0,300	0,200002
26	28	0,100	0,300	0,200002
26	36	0,100	0,300	0,200002
27	25	0,100	0,300	0,200002
27	36	0,100	0,300	0,200002
28	29	0,100	0,300	0,200002
28	32	0,100	0,300	0,200002
29	19	0,100	0,300	0,200003
29	17	0,100	0,300	0,200003
29	22	0,100	0,300	0,200002
30	27	0,100	0,300	0,200002
30	32	0,100	0,300	0,200002
31	29	0,100	0,300	0,200002
31	27	0,100	0,300	0,200002
32	33	0,100	0,300	0,200002
32	42	0,100	0,300	0,200002
33	23	0,100	0,300	0,200002
33	21	0,100	0,300	0,200002
34	31	0,100	0,300	0,200002
34	42	0,100	0,300	0,200002
35	25	0,100	0,300	0,200002
35	28	0,100	0,300	0,200002
36	38	0,100	0,300	0,200002
37	35	0,100	0,300	0,200002
38	40	0,100	0,300	0,200002

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.32

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
39	37	0,100	0,300	0,200002
40	41	0,100	0,300	0,200002
41	33	0,100	0,300	0,200002
41	31	0,100	0,300	0,200002
42	39	0,100	0,300	0,200002

Για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε π.χ. ο ηλεκτρονόμος με $id = 3$, ο οποίος έχει ηλεκτρονόμους δευτερεύουσας προστασίας τους ηλεκτρονόμους με $id = 16$ και 1 αντίστοιχα, και απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα στο Σχ. 6.10 οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας όλων, που προκύπτουν βάσει των ρυθμίσεων του Πίνακα 6.31. Επιπλέον, στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε ηλεκτρονόμου για σφάλμα close-in μπροστά από τον ηλεκτρονόμο 3. Τέλος, φαίνεται ότι τηρείται η επιλογική συνεργασία μεταξύ τους, καθώς και οι γενικότεροι περιορισμοί των χρόνων.



Σχήμα 6.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες U.S.-Moderately Inverse του ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3

Για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής οι ρυθμίσεις προκύπτουν αυξημένες σε σχέση με αυτές του Πίνακα 6.31:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.33: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	4,538	1,05	33,226	0,676
2	4,322	1,05	40,510	0,911
3	6,085	1,05	36,403	1,061
4	5,518	1,05	31,695	1,025
5	3,378	1,05	10,359	0,440
6	4,551	1,05	20,788	0,950
7	6,119	1,05	20,739	0,817
8	3,353	1,05	11,510	0,434
9	4,706	1,05	23,481	0,880
10	2,824	1,05	11,033	0,373
11	5,440	1,05	31,425	1,046
12	6,068	1,05	38,581	1,121
13	5,438	1,05	31,579	0,824
14	4,069	1,05	40,909	1,066
15	2,259	1,05	13,879	0,465
16	3,890	1,05	17,315	0,640
17	2,743	1,05	14,782	0,749
18	2,888	1,05	22,495	0,493
19	4,887	1,05	33,465	0,674
20	2,930	1,05	21,395	0,462
21	3,859	1,05	21,988	0,503
22	3,759	1,05	15,144	0,641
23	2,267	1,05	14,446	0,487
24	4,707	1,05	21,720	0,538
25	5,348	1,05	17,953	0,679
26	5,131	1,05	18,322	0,694
27	5,493	1,05	16,088	0,778
28	2,794	1,05	6,541	0,341
29	3,795	1,05	22,371	0,461
30	2,319	1,05	13,724	0,937
31	5,478	1,05	22,342	0,423
32	4,957	1,05	17,213	0,432
33	4,083	1,05	22,018	1,158
34	5,426	1,05	13,511	0,649
35	4,415	1,05	16,229	0,730
36	2,780	1,05	10,324	0,384
37	4,155	1,05	10,239	0,245
38	3,814	1,05	11,752	0,897
39	4,628	1,05	11,913	0,769
40	4,067	1,05	9,868	0,262
41	4,730	1,05	16,052	0,533
42	5,260	1,05	31,027	0,776

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με βάση τις ρυθμίσεις του Πίνακα 6.33, οι χρόνοι λειτουργίας για close-in σφάλμα είναι:

Πίνακας 6.34: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Moderately Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	6	0,173	0,551	0,377047
2	4	0,212	0,619	0,407034
2	16	0,212	0,576	0,364671
3	1	0,298	0,593	0,294142
3	16	0,298	0,576	0,277739
4	7	0,294	0,738	0,443641
4	12	0,294	0,676	0,382229
4	20	0,294	0,723	0,429342
5	2	0,183	0,685	0,502133
6	10	0,307	0,797	0,490638
6	8	0,307	0,673	0,365793
7	5	0,317	0,705	0,388201
7	10	0,317	0,797	0,480297
8	3	0,167	0,658	0,491226
8	12	0,167	0,676	0,509104
8	20	0,167	0,723	0,556217
9	5	0,271	0,705	0,434413
9	8	0,271	0,673	0,401664
10	14	0,132	0,564	0,431842
11	7	0,299	0,738	0,438562
11	3	0,299	0,658	0,359273
11	20	0,299	0,723	0,424264
12	13	0,306	0,675	0,368601
12	24	0,306	0,602	0,296043
13	9	0,235	0,673	0,438322
14	11	0,241	0,624	0,383092
14	24	0,241	0,602	0,361174
15	1	0,129	0,593	0,463490
15	4	0,129	0,619	0,489450
16	18	0,210	0,741	0,531279
16	26	0,210	0,730	0,519926
17	15	0,222	0,785	0,562873
17	26	0,222	0,730	0,507887
18	19	0,123	0,503	0,379745
18	22	0,123	0,469	0,345934
18	30	0,123	0,499	0,375459
19	7	0,178	0,738	0,559341
19	3	0,178	0,658	0,480052
19	12	0,178	0,676	0,497929
20	17	0,119	0,522	0,402925
20	22	0,119	0,469	0,350540

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.34

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
20	30	0,119	0,499	0,380065
21	19	0,145	0,503	0,358018
21	17	0,145	0,522	0,376592
21	30	0,145	0,499	0,353732
22	23	0,223	0,827	0,604323
22	34	0,223	0,692	0,469539
23	13	0,133	0,675	0,542015
23	11	0,133	0,624	0,491376
24	21	0,173	0,674	0,501301
24	34	0,173	0,692	0,519214
25	15	0,265	0,785	0,519258
25	18	0,265	0,741	0,475625
26	28	0,260	0,642	0,381802
26	36	0,260	0,748	0,488187
27	25	0,336	0,795	0,459097
27	36	0,336	0,748	0,412915
28	29	0,178	0,610	0,432691
28	32	0,178	0,791	0,613405
29	19	0,130	0,503	0,372504
29	17	0,130	0,522	0,391078
29	22	0,130	0,469	0,338693
30	27	0,265	0,705	0,439953
30	32	0,265	0,791	0,526179
31	29	0,146	0,610	0,464376
31	27	0,146	0,705	0,558864
32	33	0,165	0,585	0,420083
32	42	0,165	0,796	0,631236
33	23	0,343	0,827	0,484242
33	21	0,343	0,674	0,331546
34	31	0,320	0,736	0,416072
34	42	0,320	0,796	0,476642
35	25	0,269	0,795	0,525985
35	28	0,269	0,642	0,373419
36	38	0,140	0,589	0,449143
37	35	0,122	0,603	0,480819
38	40	0,372	0,946	0,573612
39	37	0,368	0,935	0,566444
40	41	0,132	0,711	0,578722
41	33	0,207	0,585	0,378471
41	31	0,207	0,736	0,529053
42	39	0,220	0,650	0,430155

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με βάση τις ρυθμίσεις του Πίνακα 6.33, οι χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα στο 15% της γραμμής είναι:

Πίνακας 6.35: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών *primary/backup* ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη *U.S.-Moderately Inverse*

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	6	0,212	1,050	0,838102
2	4	0,261	1,487	1,226111
2	16	0,261	3,059	2,798208
3	1	0,339	1,087	0,747899
3	16	0,339	1,042	0,703142
4	7	0,331	1,234	0,903670
4	12	0,331	0,891	0,560515
4	20	0,331	2,221	1,889701
5	2	0,218	1,018	0,800610
6	10	0,336	2,024	1,687913
6	8	0,336	1,253	0,917377
7	5	0,355	1,342	0,986414
7	10	0,355	2,246	1,890505
8	3	0,201	0,920	0,719236
8	12	0,201	0,931	0,730995
8	20	0,201	2,403	2,202631
9	5	0,312	2,603	2,291721
9	8	0,312	2,616	2,304643
10	14	0,165	0,844	0,679232
11	7	0,336	1,222	0,885717
11	3	0,336	0,874	0,537823
11	20	0,336	2,201	1,865108
12	13	0,349	1,187	0,837979
12	24	0,349	1,476	1,126738
13	9	0,277	1,301	1,023971
14	11	0,282	1,148	0,865900
14	24	0,282	3,148	2,865525
15	1	0,169	3,102	2,932694
15	4	0,169	1,451	1,282032
16	18	0,243	2,402	2,159381
16	26	0,243	1,381	1,138227
17	15	0,243	1,631	1,388139
17	26	0,243	1,141	0,897807
18	19	0,164	3,166	3,002083
18	22	0,164	2,571	2,406971
18	30	0,164	2,839	2,675589
19	7	0,210	1,646	1,436614
19	3	0,210	1,070	0,859939
19	12	0,210	1,081	0,870795

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

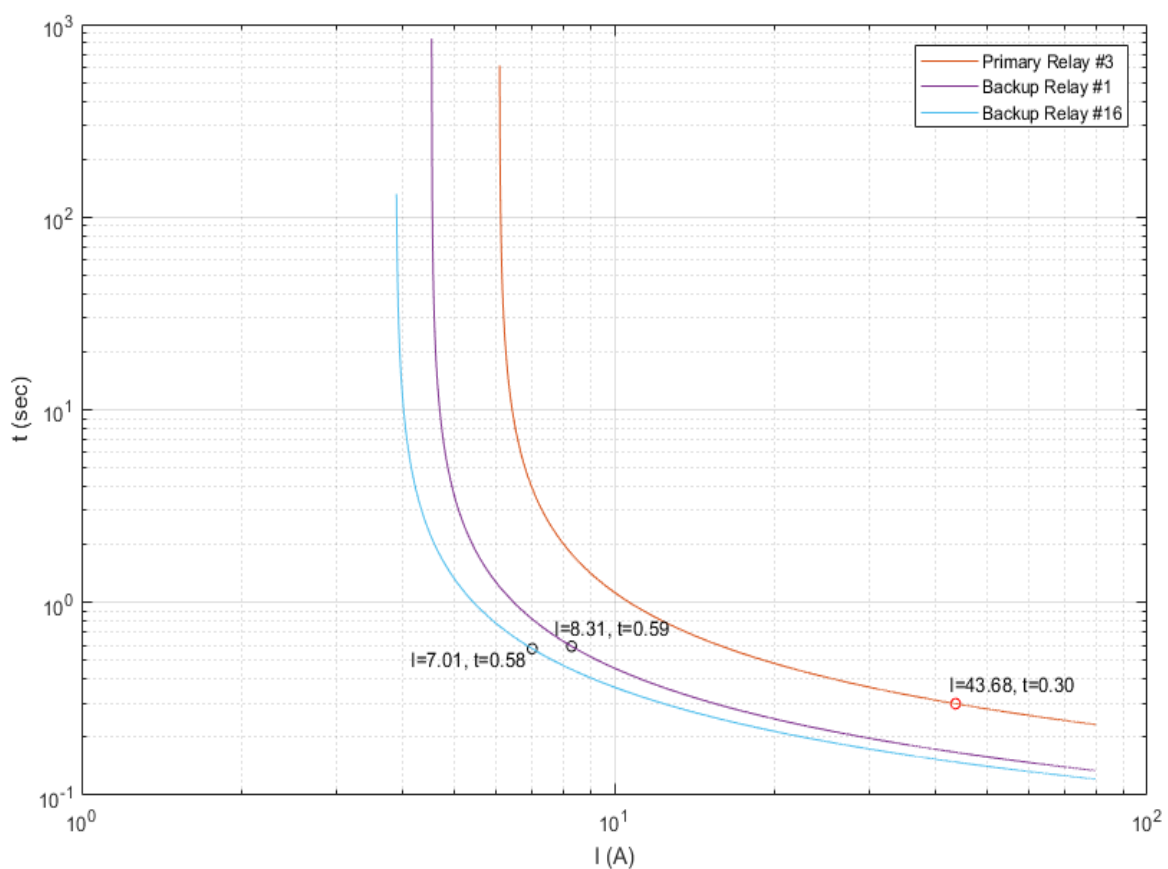
Πίνακας 6.35

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
20	17	0,157	2,751	2,594559
20	22	0,157	2,967	2,810274
20	30	0,157	1,126	0,969909
21	19	0,183	1,257	1,074180
21	17	0,183	1,178	0,995738
21	30	0,183	1,168	0,985506
22	23	0,241	1,318	1,077446
22	34	0,241	0,945	0,704549
23	13	0,175	3,026	2,851480
23	11	0,175	1,522	1,347300
24	21	0,207	2,685	2,478010
24	34	0,207	1,661	1,454630
25	15	0,307	1,991	1,683814
25	18	0,307	1,782	1,474253
26	28	0,300	2,684	2,384272
26	36	0,300	2,575	2,274810
27	25	0,371	1,129	0,757820
27	36	0,371	1,335	0,963319
28	29	0,207	0,975	0,767917
28	32	0,207	1,631	1,424533
29	19	0,165	1,173	1,008447
29	17	0,165	2,232	2,067206
29	22	0,165	1,907	1,742051
30	27	0,281	0,877	0,596089
30	32	0,281	1,404	1,122463
31	29	0,179	2,829	2,649151
31	27	0,179	1,452	1,272143
32	33	0,198	0,764	0,566130
32	42	0,198	1,468	1,270087
33	23	0,374	1,675	1,301539
33	21	0,374	1,171	0,797502
34	31	0,353	1,197	0,844090
34	42	0,353	0,983	0,629807
35	25	0,303	1,282	0,979005
35	28	0,303	1,739	1,436256
36	38	0,174	0,946	0,771959
37	35	0,150	0,900	0,749936
38	40	0,398	2,426	2,028033
39	37	0,399	2,701	2,302774
40	41	0,162	1,504	1,342685
41	33	0,244	0,734	0,489994
41	31	0,244	2,972	2,727557
42	39	0,270	1,755	1,485112

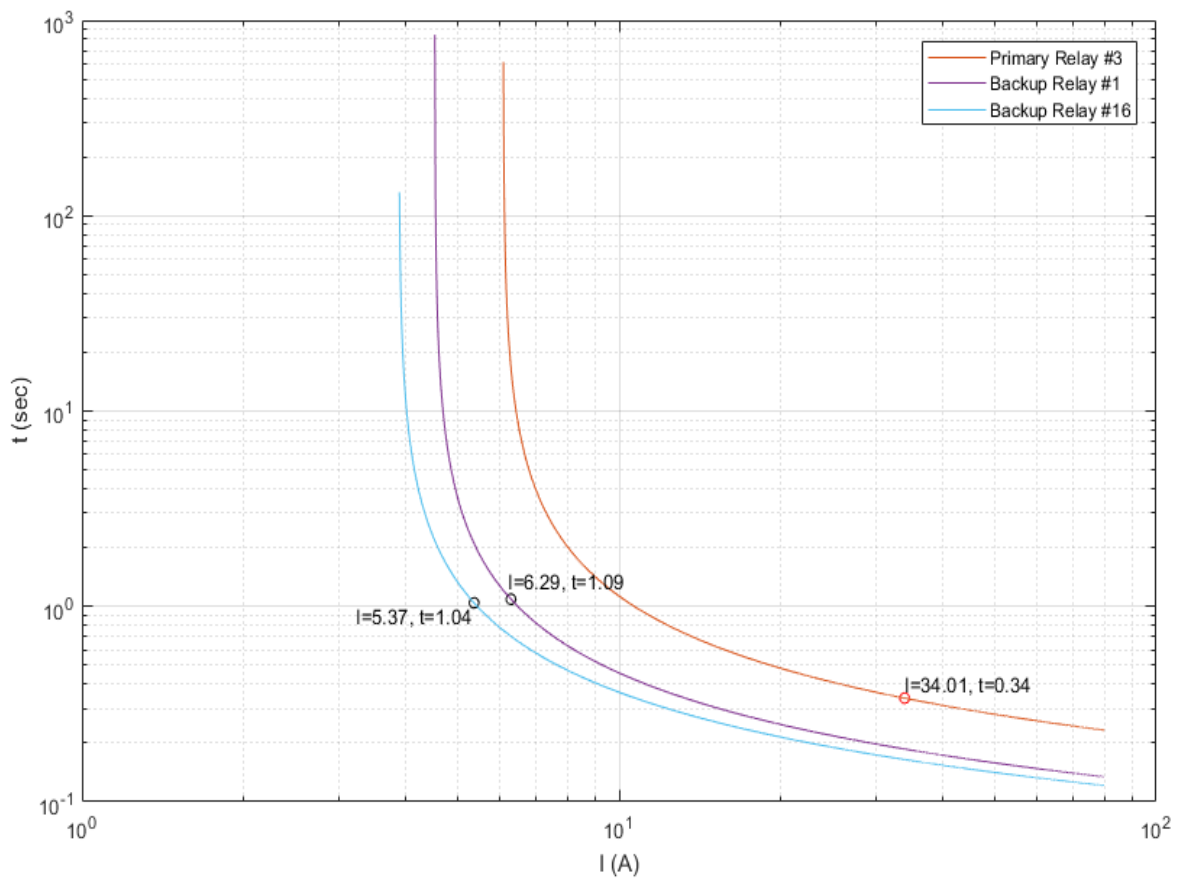
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 6.34 και 6.35, παρατηρείται ότι οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής είναι αυξημένοι, εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος σφάλματος που «βλέπουν» οι ηλεκτρονόμοι σε αυτήν την περίπτωση. Επιπλέον, σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα χρόνων λειτουργίας τηρούνται οι περιορισμοί που έχουν θεωρηθεί.

Παρακάτω απεικονίζονται διαγραμματικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας για τον ηλεκτρονόμο με $id = 3$ και για τους backup του 16 και 1, που προκύπτουν βάσει των παραπάνω νέων ρυθμίσεων του Πίνακα 6.33, για σφάλμα close-in στο Σχ. 6.11, καθώς και για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο Σχ. 6.12. Παρατηρείται η επιλογική συνεργασία των ηλεκτρονόμων και η τήρηση των περιορισμών των χρόνων λειτουργίας.



Σχήμα 6.11: Χαρακτηριστικές καμπύλες ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in μπροστά από τον 3 με νέες ρυθμίσεις



Σχήμα 6.12: Χαρακτηριστικές καμπύλες ηλεκτρονόμου 3 και των backup του και χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής μπροστά από τον 3

6.3.2.2.2 Αποτελέσματα ρύθμισης για την καμπύλη U.S.-Inverse

Στον Πίνακα 6.36 με τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in, παρατηρείται ότι τηρούνται τα όρια για τα I_{pu} (5.21), (5.22) και τα TDS (από 0,1 έως 1,5).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.36: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για σφάλμα close-in για το δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.- Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	2,110	1,05	33,226	0,508
2	2,191	1,05	40,510	0,521
3	4,075	1,05	36,403	0,431
4	3,895	1,05	31,695	0,411
5	1,412	1,05	10,359	0,388
6	4,033	1,05	20,788	0,294
7	3,724	1,05	20,739	0,316
8	1,349	1,05	11,510	0,421
9	2,680	1,05	23,481	0,427
10	1,050	1,05	11,033	0,459
11	3,886	1,05	31,425	0,410
12	4,109	1,05	38,581	0,440
13	2,776	1,05	31,579	0,471
14	2,895	1,05	40,909	0,498
15	1,050	1,05	13,879	0,491
16	1,999	1,05	17,315	0,425
17	1,673	1,05	14,782	0,428
18	1,050	1,05	22,495	0,529
19	2,606	1,05	33,465	0,487
20	1,050	1,05	21,395	0,526
21	1,460	1,05	21,988	0,504
22	2,556	1,05	15,144	0,333
23	1,050	1,05	14,446	0,495
24	2,042	1,05	21,720	0,461
25	2,579	1,05	17,953	0,375
26	2,590	1,05	18,322	0,379
27	3,964	1,05	16,088	0,226
28	1,331	1,05	6,541	0,281
29	1,436	1,05	22,371	0,507
30	1,944	1,05	13,724	0,379
31	1,981	1,05	22,342	0,470
32	1,845	1,05	17,213	0,439
33	4,064	1,05	22,018	0,308
34	4,042	1,05	13,511	0,174
35	2,782	1,05	16,229	0,329
36	1,050	1,05	10,324	0,448
37	1,459	1,05	10,239	0,377
38	4,811	1,05	11,752	0,104
39	4,809	1,05	11,913	0,106
40	1,461	1,05	9,868	0,368
41	2,075	1,05	16,052	0,400
42	2,279	1,05	31,027	0,494

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας για σφάλμα close-in βάσει των παραπάνω ρυθμίσεων είναι:

Πίνακας 6.37: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	6	0,100	0,300	0,200000
2	4	0,100	0,300	0,200000
2	16	0,100	0,300	0,200000
3	1	0,100	0,300	0,200000
3	16	0,100	0,300	0,200000
4	7	0,100	0,300	0,200000
4	12	0,100	0,300	0,200000
4	20	0,100	0,315	0,214799
5	2	0,100	0,300	0,200000
6	10	0,100	0,336	0,235707
6	8	0,100	0,300	0,200000
7	5	0,100	0,300	0,200000
7	10	0,100	0,336	0,235707
8	3	0,100	0,300	0,200000
8	12	0,100	0,300	0,200000
8	20	0,100	0,315	0,214799
9	5	0,100	0,300	0,200000
9	8	0,100	0,300	0,200000
10	14	0,100	0,300	0,200000
11	7	0,100	0,300	0,200000
11	3	0,100	0,300	0,200000
11	20	0,100	0,315	0,214799
12	13	0,100	0,300	0,200000
12	24	0,100	0,300	0,200000
13	9	0,100	0,300	0,200000
14	11	0,100	0,300	0,200000
14	24	0,100	0,300	0,200000
15	1	0,100	0,300	0,200000
15	4	0,100	0,300	0,200000
16	18	0,100	0,316	0,216489
16	26	0,100	0,300	0,200000
17	15	0,100	0,471	0,371312
17	26	0,100	0,300	0,200000
18	19	0,100	0,300	0,200000
18	22	0,100	0,300	0,200000
18	30	0,100	0,300	0,200000
19	7	0,100	0,300	0,200000
19	3	0,100	0,300	0,200000
19	12	0,100	0,300	0,200000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.37

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
20	17	0,100	0,300	0,200000
20	22	0,100	0,300	0,200000
20	30	0,100	0,300	0,200000
21	19	0,100	0,300	0,200000
21	17	0,100	0,300	0,200000
21	30	0,100	0,300	0,200000
22	23	0,100	0,474	0,374318
22	34	0,100	0,300	0,200000
23	13	0,100	0,300	0,200000
23	11	0,100	0,300	0,200000
24	21	0,100	0,300	0,200000
24	34	0,100	0,300	0,200000
25	15	0,100	0,471	0,371312
25	18	0,100	0,316	0,216489
26	28	0,100	0,300	0,200000
26	36	0,100	0,323	0,223089
27	25	0,100	0,300	0,200000
27	36	0,100	0,323	0,223089
28	29	0,100	0,300	0,200000
28	32	0,100	0,300	0,200000
29	19	0,100	0,300	0,200000
29	17	0,100	0,300	0,200000
29	22	0,100	0,300	0,200000
30	27	0,100	0,300	0,200000
30	32	0,100	0,300	0,200000
31	29	0,100	0,300	0,200000
31	27	0,100	0,300	0,200000
32	33	0,100	0,300	0,200000
32	42	0,100	0,300	0,200000
33	23	0,100	0,474	0,374318
33	21	0,100	0,300	0,200000
34	31	0,100	0,300	0,200000
34	42	0,100	0,300	0,200000
35	25	0,100	0,300	0,200000
35	28	0,100	0,300	0,200000
36	38	0,100	0,300	0,200000
37	35	0,100	0,300	0,200000
38	40	0,100	0,300	0,200000
39	37	0,100	0,300	0,200000
40	41	0,100	0,300	0,200000
41	33	0,100	0,300	0,200000
41	31	0,100	0,300	0,200000
42	39	0,100	0,300	0,200000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής οι νέες ρυθμίσεις προκύπτουν:

Πίνακας 6.38: Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής για το δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse και όρια του I_{pu}

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
1	2,286	1,05	33,226	0,552
2	2,319	1,05	40,510	0,591
3	4,417	1,05	36,403	0,459
4	4,215	1,05	31,695	0,434
5	1,623	1,05	10,359	0,364
6	3,972	1,05	20,788	0,358
7	4,185	1,05	20,739	0,308
8	1,498	1,05	11,510	0,429
9	2,886	1,05	23,481	0,462
10	1,104	1,05	11,033	0,477
11	4,213	1,05	31,425	0,432
12	4,399	1,05	38,581	0,478
13	2,953	1,05	31,579	0,521
14	2,989	1,05	40,909	0,576
15	1,065	1,05	13,879	0,497
16	2,265	1,05	17,315	0,423
17	1,939	1,05	14,782	0,414
18	1,120	1,05	22,495	0,580
19	2,917	1,05	33,465	0,498
20	1,104	1,05	21,395	0,584
21	1,627	1,05	21,988	0,531
22	2,953	1,05	15,144	0,310
23	1,065	1,05	14,446	0,503
24	2,261	1,05	21,720	0,483
25	2,812	1,05	17,953	0,403
26	2,791	1,05	18,322	0,404
27	4,044	1,05	16,088	0,261
28	1,726	1,05	6,541	0,211
29	1,576	1,05	22,371	0,539
30	2,017	1,05	13,724	0,412
31	2,216	1,05	22,342	0,496
32	2,070	1,05	17,213	0,453
33	4,140	1,05	22,018	0,359
34	4,169	1,05	13,511	0,194
35	2,876	1,05	16,229	0,372
36	1,155	1,05	10,324	0,443
37	1,901	1,05	10,239	0,318
38	3,450	1,05	11,752	0,260
39	3,630	1,05	11,913	0,242

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.38

Ηλεκτρονόμος	I_{pu} (A)	I_{pumin} (A)	I_{pumax} (A)	TDS (s)
40	1,913	1,05	9,868	0,307
41	2,251	1,05	16,052	0,429
42	2,485	1,05	31,027	0,545

Με βάση τις νέες ρυθμίσεις του Πίνακα 6.38, οι χρόνοι λειτουργίας για close-in σφάλμα είναι:

Πίνακας 6.39: Νέοι χρόνοι λειτουργίας ζευγών primary/backup ηλεκτρονόμων για close-in σφάλμα στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη U.S.-Inverse

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	$t_{primary}$ (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	6	0,110	0,355	0,244442
2	4	0,114	0,362	0,247163
2	16	0,114	0,370	0,255301
3	1	0,111	0,368	0,257457
3	16	0,111	0,370	0,258891
4	7	0,110	0,365	0,255295
4	12	0,110	0,365	0,254334
4	20	0,110	0,377	0,266371
5	2	0,103	0,371	0,267912
6	10	0,120	0,379	0,259272
6	8	0,120	0,365	0,244952
7	5	0,109	0,360	0,251158
7	10	0,109	0,379	0,270223
8	3	0,108	0,366	0,257862
8	12	0,108	0,365	0,256846
8	20	0,108	0,377	0,268883
9	5	0,112	0,360	0,247691
9	8	0,112	0,365	0,252437
10	14	0,106	0,364	0,258192
11	7	0,110	0,365	0,255266
11	3	0,110	0,366	0,255322
11	20	0,110	0,377	0,266342
12	13	0,112	0,365	0,253428
12	24	0,112	0,371	0,258611
13	9	0,113	0,368	0,254808
14	11	0,116	0,362	0,246029
14	24	0,116	0,371	0,254253
15	1	0,102	0,368	0,266590
15	4	0,102	0,362	0,259885
16	18	0,106	0,383	0,276891
16	26	0,106	0,364	0,258065
17	15	0,104	0,490	0,386155
17	26	0,104	0,364	0,260185

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.39

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
18	19	0,110	0,366	0,255996
18	22	0,110	0,367	0,256651
18	30	0,110	0,348	0,237316
19	7	0,105	0,365	0,260189
19	3	0,105	0,366	0,260244
19	12	0,105	0,365	0,259228
20	17	0,111	0,373	0,261181
20	22	0,111	0,367	0,255538
20	30	0,111	0,348	0,236203
21	19	0,108	0,366	0,258698
21	17	0,108	0,373	0,264995
21	30	0,108	0,348	0,240017
22	23	0,106	0,494	0,387964
22	34	0,106	0,359	0,253070
23	13	0,102	0,365	0,263645
23	11	0,102	0,362	0,260604
24	21	0,109	0,374	0,265029
24	34	0,109	0,359	0,250280
25	15	0,114	0,490	0,376437
25	18	0,114	0,383	0,269294
26	28	0,112	0,390	0,277493
26	36	0,112	0,375	0,263290
27	25	0,118	0,375	0,256683
27	36	0,118	0,375	0,257102
28	29	0,102	0,368	0,265605
28	32	0,102	0,375	0,273315
29	19	0,108	0,366	0,258271
29	17	0,108	0,373	0,264569
29	22	0,108	0,367	0,258926
30	27	0,111	0,361	0,249604
30	32	0,111	0,375	0,263851
31	29	0,110	0,368	0,258008
31	27	0,110	0,361	0,251471
32	33	0,109	0,361	0,252317
32	42	0,109	0,379	0,269997
33	23	0,118	0,494	0,375629
33	21	0,118	0,374	0,255484
34	31	0,117	0,379	0,262319
34	42	0,117	0,379	0,262134
35	25	0,116	0,375	0,258647
35	28	0,116	0,390	0,273270
36	38	0,103	0,344	0,241221
37	35	0,104	0,361	0,257150

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.39

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
38	40	0,145	0,418	0,272462
39	37	0,143	0,415	0,272224
40	41	0,104	0,370	0,265662
41	33	0,113	0,361	0,248554
41	31	0,113	0,379	0,266419
42	39	0,113	0,349	0,236747

Οι χρόνοι λειτουργίας για σφάλμα στο 15% της γραμμής με τις ρυθμίσεις του Πίνακα 6.38 είναι:

Πίνακας 6.40: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών *primary/backup* ηλεκτρονόμων για σφάλμα στο 15% της γραμμής στο δίκτυο 15 ζυγών με καμπύλη *U.S.-Inverse*

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
1	6	0,124	0,947	0,822832
2	4	0,128	1,094	0,966449
2	16	0,128	1,019	0,891396
3	1	0,129	0,599	0,469402
3	16	0,129	0,621	0,491148
4	7	0,129	0,613	0,484415
4	12	0,129	0,542	0,413017
4	20	0,129	0,553	0,423732
5	2	0,123	0,549	0,425962
6	10	0,141	0,496	0,354932
6	8	0,141	0,489	0,348551
7	5	0,129	0,490	0,360077
7	10	0,129	0,505	0,375119
8	3	0,127	0,583	0,455649
8	12	0,127	0,574	0,447150
8	20	0,127	0,561	0,433922
9	5	0,131	0,585	0,453666
9	8	0,131	0,592	0,461130
10	14	0,124	0,666	0,541496
11	7	0,129	0,608	0,479047
11	3	0,129	0,546	0,416650
11	20	0,129	0,552	0,422707
12	13	0,130	0,607	0,476432
12	24	0,130	0,625	0,494335
13	9	0,129	0,706	0,576932
14	11	0,132	0,842	0,710226
14	24	0,132	0,775	0,643322
15	1	0,122	0,931	0,808986
15	4	0,122	1,069	0,946295
16	18	0,126	0,582	0,456225

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.40

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
16	26	0,126	0,582	0,456095
17	15	0,117	0,675	0,557949
17	26	0,117	0,518	0,400789
18	19	0,124	1,272	1,148066
18	22	0,124	1,732	1,608740
18	30	0,124	2,905	2,781159
19	7	0,120	0,762	0,641474
19	3	0,120	0,700	0,579604
19	12	0,120	0,691	0,570431
20	17	0,125	1,558	1,433503
20	22	0,125	1,850	1,725040
20	30	0,125	1,199	1,074756
21	19	0,124	0,843	0,719801
21	17	0,124	0,922	0,798759
21	30	0,124	1,253	1,129657
22	23	0,121	0,618	0,497150
22	34	0,121	0,499	0,378467
23	13	0,122	0,977	0,855185
23	11	0,122	1,133	1,010657
24	21	0,126	0,637	0,510030
24	34	0,126	0,781	0,654107
25	15	0,135	0,714	0,579339
25	18	0,135	0,543	0,408172
26	28	0,132	0,669	0,537032
26	36	0,132	0,537	0,405008
27	25	0,140	0,485	0,345082
27	36	0,140	0,466	0,326393
28	29	0,126	0,473	0,347481
28	32	0,126	0,492	0,366503
29	19	0,123	0,806	0,682877
29	17	0,123	1,411	1,287520
29	22	0,123	1,474	1,350981
30	27	0,122	0,466	0,344215
30	32	0,122	0,472	0,349740
31	29	0,127	0,643	0,515679
31	27	0,127	0,741	0,614018
32	33	0,127	0,611	0,484433
32	42	0,127	0,575	0,448463
33	23	0,140	0,672	0,532247
33	21	0,140	0,499	0,359332
34	31	0,138	0,465	0,327248
34	42	0,138	0,447	0,309060
35	25	0,138	0,524	0,386041

Πίνακας 6.40

Ηλεκτρονόμος	Backup Ηλεκτρονόμος	t_{primary} (s)	t_{backup} (s)	Δt (s)
35	28	0,138	0,605	0,467736
36	38	0,122	0,711	0,588989
37	35	0,128	0,554	0,425502
38	40	0,166	0,506	0,339454
39	37	0,164	0,502	0,337963
40	41	0,129	0,550	0,421131
41	33	0,133	0,567	0,433452
41	31	0,133	0,574	0,440666
42	39	0,130	0,960	0,830415

Σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα χρόνων λειτουργίας τηρούνται όλοι οι περιορισμοί που έχουν θεωρηθεί.

6.4 Επίδραση αρχικού σημείου στις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων

Όπως έχει αναφερθεί και στην Ενότητα 5.4, η σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης εξαρτάται και από την επιλογή του αρχικού σημείου x_0 . Προφανώς υπάρχουν άπειρα x_0 μέσα στα όρια $[lb, ub]$. Σε αυτήν τη διπλωματική επιλέχθηκε αρχικά ως x_0 το lb , δηλαδή το χαμηλότερο όριο, και έπειτα με την κλήση της `fmincon` με μηδενική αντικειμενική συνάρτηση επιστρέφεται ένα νέο αρχικό σημείο x_{new} που ικανοποιεί τους μη γραμμικούς περιορισμούς, οπότε και δίνεται αυτό ως καινούριο αρχικό σημείο στην `fmincon` με την αντικειμενική συνάρτηση (5.1).

Για την εξέταση της επίδρασης του αρχικού σημείου στις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων δημιουργήθηκε ένας επαναληπτικός βρόχος που δημιουργεί ένα τυχαίο διάνυσμα x_0 με τιμές μέσα στα όρια lb, ub , μέσω της συνάρτησης `rand()` του Matlab:

```
low = lb;
high = ub;
numElements = size(lb,1);
% Generate floating point (fractional) number vector.
x_0 = low + (high-low) .* (rand(1, numElements))';
```

Για κάθε διαφορετικό x_0 καλείται η `fmincon`. Σκοπός είναι να βρεθεί το x_0 που εξασφαλίζει τη σύγκλιση του αλγορίθμου και ταυτόχρονα οδηγεί στη μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Προφανώς, τα διαφορετικά αρχικά σημεία x_0 μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά τοπικά ελάχιστα και κατά συνέπεια σε διαφορετικές ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων. Αυτός ο βρόχος έχει ουσιαστικά στόχο να βρει το ολικό ελάχιστο, η βεβαιότητα του οποίου εξαρτάται από το πόσες επαναλήψεις εκτελέσει. Η υλοποίηση του επαναληπτικού βρόχου έγινε στο δίκτυο των 8 ζυγών για λόγους απλότητας με 1.000 επαναλήψεις, δηλαδή για 1.000 διαφορετικά αρχικά σημεία, για να εξεταστεί μήπως υπάρχει καλύτερο x_0 από αυτό που έχει επιλεγεί στο Κεφάλαιο 6. Το αποτέλεσμα ήταν ότι δεν βρέθηκε κανένα αρχικό σημείο που

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

εξασφάλιζε έστω τη σύγκλιση του αλγορίθμου και μάλιστα μετά από πολλές ώρες εκτέλεσης. Θα μπορούσε να γίνει εκτέλεση με περισσότερες επαναλήψεις αλλά κάτι τέτοιο θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο και τα περισσότερα σημεία δεν θα συνέκλιναν σε κάποια λύση, με αποτέλεσμα να εξαντλούν τις προκαθορισμένες επαναλήψεις που έχουν δοθεί στα options κάνοντας τη διαδικασία ακόμα πιο χρονοβόρα.

7 Επίλογος

7.1 Συμπεράσματα

Η ρύθμιση των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης υλοποιήθηκε επιτυχώς σε διάφορα δίκτυα. Συγκεκριμένα, στα ακτινικά δίκτυα με μία πηγή, αυτοματοποιήθηκε η λειτουργία υπολογισμού των ρευμάτων σφάλματος και η ρύθμιση των ηλεκτρονόμων με βάση αυτά, σύμφωνα με τον επαναληπτικό αλγόριθμο της Ενότητας 4.1, με αποτελέσματα χρόνων και TDS που πληρούν τις προϋποθέσεις. Επιπλέον, έγινε παρουσίαση αυτών των ρυθμίσεων με διαγράμματα για όλες τις καμπύλες τύπου IAC.

Ακολούθησε η βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων σε βροχοειδή δίκτυα, όπου τηρήθηκαν οι περιορισμοί για το ρεύμα διέγερσης, το χρονικό πολλαπλασιαστή και για τους χρόνους λειτουργίας των ηλεκτρονόμων, και για την περίπτωση close-in σφάλματος και για συνδυασμό σφαλμάτων close-in και στο 15% της γραμμής μπροστά από κάθε ηλεκτρονόμο. Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα ρυθμίσεων και χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων και για τις δύο περιπτώσεις, για διάφορα είδη καμπυλών. Μάλιστα, στην περίπτωση close-in σφάλματος με τη χρήση της καμπύλης U.S.-Moderately Inverse βρέθηκε το ολικό ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή οι ρυθμίσεις που δίνουν τους χαμηλότερους χρόνους λειτουργίας, και για τις δύο περιπτώσεις δικτύων.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στο κομμάτι της βελτιστοποίησης των ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης σε βροχοειδή δίκτυα υπάρχουν κάποια βήματα που θα οδηγούσαν στην περαιτέρω βελτιστοποίηση της ήδη υπάρχουσας διαδικασίας. Η μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε αυτή τη διπλωματική πραγματεύεται τα τριφασικά συμμετρικά βραχυκυκλώματα με βάση τα οποία γίνεται ο καθορισμός των ορίων στο ρεύμα διέγερσης. Μία καλύτερη λύση θα ήταν να γίνεται μελέτη για όλα τα είδη σφαλμάτων (τριφασικά, διφασικά, μονοφασικά), ώστε το $I_{pu,max}$ να ορίζεται σύμφωνα με το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να μπορεί να δίνει ο χρήστης και τυχόν φορτία που θα υπάρχουν ανά ζυγό, έτσι ώστε να πραγματοποιείται μελέτη ροής φορτίου, για να υπολογιστούν τα ονομαστικά ρεύματα που ρέουν σε κάθε γραμμή για τον καλύτερο ορισμό των μετασχηματιστών εντάσεως και για τον υπολογισμό του $I_{pu,min}$.

Σε δεύτερο στάδιο, η βελτιστοποίηση προσφέρει πολλές επιλογές ως προς τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί και το αρχικό σημείο x_0 . Όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιήθηκε μη γραμμικός προγραμματισμός για τη λύση του προβλήματος, έτσι μία άλλη δυνατότητα θα ήταν να χρησιμοποιηθεί μία άλλη τεχνική, όπως αυτές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 5.1 και να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Ακόμη, ο αλγόριθμος Interior-point ήταν μία από τις επιλογές αλγορίθμου που προσφέρει η `fmincon`. Θα ήταν δόκιμη η εξέταση των υπόλοιπων αλγορίθμων `sqr`, `sqr-legacy`, `trust-region-reflective` και `active-set`. Επιπλέον, έχει ήδη τονιστεί η σημασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επίλογος

της επιλογής του αρχικού σημείου x_0 για τη σύγκλιση του αλγόριθμου και το πώς αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματα ρυθμίσεων. Έτσι, μία ακόμη πρόκληση είναι να βρεθεί το καταλληλότερο αρχικό σημείο που οδηγεί στη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Τέλος, ένα αδύναμο σημείο της f είναι ότι έχει τη δυνατότητα εύρεσης τοπικού ελαχίστου (local minimum) και όχι ολικού ελαχίστου (global minimum), οπότε ο βέλτιστος τρόπος θα ήταν ένας αλγόριθμος που βρίσκει το ολικό ελάχιστο.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κορρές, Διαφάνειες μαθήματος «Προστασία Σ.Η.Ε.».
- [2] J. L. Blackburn, T. J. Domin, *Protective Relaying, Principles and Applications*, Third Edition, CRC Press, 2007.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2002.
- [4] D. S. Alkaran, M. R. Vatani, M. J. Sanjari, G. B. Gharehpetian, A. H. Yatim, “*Overcurrent relays coordination in interconnected networks using accurate analytical method and based on determination of fault critical point*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 870-877, Apr. 2015.
- [5] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1993.
- [6] Γ. Κορρές, Σημειώσεις «*Θεωρία Προστασίας Υπερέντασης*», Αθήνα 2005.
- [7] Juan M. Gers and Edward J. Holmes *Protection of Electricity Distribution Networks*, 3rd Edition, 2011.
- [8] A. R. van C. Warrington, *Protective Relays: Their Theory and Practice, Volume 1*, Second Edition, Springer, 1968.
- [9] D. Birla, R.P. Maheshwari, H.O. Gupta, “*Time-overcurrent relay coordination: a review*”, International Journal Emerging Electrical Power System, vol. 2, no. 2, Jan. 2005.
- [10] A. J. Urdaneta, R. Nadira, L. Perez, “*Optimal coordination of directional overcurrent relay in interconnected power systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 2, pp. 903-911, July 1988.
- [11] H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, H.K. Karegar, S.H.H Sadeghi, R.A.H. Khan, “*A new optimal approach for coordination overcurrent relays in interconnected power systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, pp. 430-435, Apr. 2003.
- [12] A. S. Noghabi, J. Sadeh, H.R. Mashhadi, “*Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no.2, pp. 1857-1863, Oct. 2009.
- [13] P. P. Bedekar, S.R. Bhide, “*Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA-NLP approach*”, IEEE Transactions on Power Delivery vol. 26, no. 1, pp. 109-119, Jan. 2011.
- [14] V. Rashtchi, J. Gholinezhad, P. Farhang, “*Optimal coordination of overcurrent relays using Honey Bee algorithm*” in 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2010, pp. 401-405.
- [15] F. Razavi, H.A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, H. Torkaman, “*A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination*”, Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 4, pp. 713-720, Apr. 2008.

- [16] M. Singh, B.K. Panigrahi, A.R. Abhyankar, "*Optimal overcurrent relay coordination in distribution system*", in Proceedings - 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, ICEAS - 2011, pp. 822-827.
- [17] Z. Moravej, M. Jazaeri, M. Gholamzadeh, "*Optimal coordination of distance and overcurrent relays in series compensated systems based on MAPSO*", Energy Conversion and Management, vol. 56, pp. 140-151, Apr. 2012.
- [18] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, S.R., V.S. Kale, "*Optimum time coordination of overcurrent relays in distribution system using Big-M (penalty) method*", WSEAS Transactions on Power Systems, vol. 4, no. 11, pp. 341-350, Nov. 2009.
- [19] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, S.R., V.S. Kale, "*Optimum time coordination of overcurrent relays using two phase simplex method*", World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 3, no. 4, pp. 903-907, 2009.
- [20] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, S.R., V.S. Kale, "*Coordination of overcurrent relays in distribution system using linear programming technique*", in 2009 International Conference on Control Automation, Communication and Energy Conservation, INCACEC 2009, June 2009.
- [21] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, S.R., V.S. Kale, "*Optimum coordination of overcurrent relays in distribution system using dual simplex method*" in 2009 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2009, Dec. 2009.
- [22] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, S.R., V.S. Kale, "*Determining optimum TMS and PS of overcurrent relays using linear programming technique*" in ECTICON 2011-8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand Conference, May 2011, pp. 700-703.
- [23] M. Ezzeddine, R. Kaczmarek, "*A novel method for optimal coordination of directional overcurrent relays considering their available discrete settings and several operation characteristics*", Electric Power Systems Research, vol. 81, no. 7, pp. 1475-1481, July 2011.
- [24] H. A. Abyane, K. Faez, H.K. Karegar, "*A new method for overcurrent relay (O/C) using neural network and fuzzy logic*" in IEEE TENCON, Speed and Image Technologies for Computing and Telecommunications, Dec. 1997, pp. 407-410.
- [25] C. W. So, K.K. Li, K.T. Lai, K.Y. Fung, "*Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination*", in IEEE Conference Developments in Power System Protection Mar. 1997, pp. 66-69.
- [26] D. Uthitsunthom, T. Kulworawanichpong, "*Optimal overcurrent relay coordination using genetic algorithms*", in 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering, ICAEE 2010, June 2010, pp. 162-165.
- [27] A. Koochaki, M.R. Asadi, M. Mahmoodan, R.A. Naghizadeh, "*Optimal overcurrent relays coordination using genetic algorithm*" in 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2008, May 2008, pp. 197-202.

- [28] P. P. Bedekar, S.R. Bhide, V.S. Kale, "Optimum coordination of overcurrent relays in distribution system using genetic algorithm" in 2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09, Dec. 2009.
- [29] D. K. Singh, S. Gupta, "Optimal coordination of directional overcurrent relays: A genetic algorithm approach" in 2012 IEEE Student's Conference on Electrical, Electronics and Computer Science: Innovation for Humanity, SCEECS 2012, Mar. 2012.
- [30] P. P. Bedekar, S.R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm", Expert Systems with Applications, vol. 38, no. 9, pp. 11286-11292, Sept. 2011.
- [31] C. W. So, K.K. Li, "Overcurrent relay coordination by evolutionary programming", Electric Power Systems Research, vol. 53, no. 2, pp. 83-90, Feb. 2000.
- [32] M. Barzegari, S.M.T. Bathaee, M. Alizadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using harmony search algorithm" in 2010 9th Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2010, May 2010, pp. 321-324.
- [33] V. Rashtchi, J. Gholinezhad, P. Farhang, "Optimal coordination of overcurrent relays using Honey Bee Algorithm" in 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2010, Oct. 2010, pp. 401-405.
- [34] D. Uthitsunthorn, P. Pao-La-Or, T. Kulworawanichpong, "Optimal overcurrent relay coordination using artificial bee colony algorithm" in ECTICON 2011 - 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011, May 2011, pp. 901-904.
- [35] V. Papaspiliotopoulos, G.N. Korres, N.G. Maratos, "A novel quadratically constrained quadratic programming method for optimal coordination of directional overcurrent relays", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.32, no. 1, pp. 3-10, Feb. 2017.
- [36] D. Birla, R.P. Maheshwari, H.O. Gupta, "A new nonlinear directional overcurrent relay coordination technique, and banes and boons of near-end faults based approach", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.21, no. 3, pp. 1176-1182, July 2006.
- [37] 8-bus: H. Zeineldin, E. El-Saadany, and M. Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization", Elect. Power Syst. Res., vol. 76, no. 11, pp. 988-995, July 2006.
- [38] 15-bus: T. Amraee, "Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1415-1422, July 2012.
- [39] Lectures 18,19,20:
<http://doctord.dyndns.org/Courses/BEI/ECE477/LectureNotes.pdf>
- [40] Mathworks Help:
<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#brnpd5f>
- [41] Mathworks Help:
<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>