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

Βελτιστοποίηση Ρυθμίσεων Στοιχείων Υπερέντασης σε Προσαρμοστικά ή μη Συστήματα Προστασίας Σύγχρονων Δικτύων Διανομής και Συστημάτων Μεταφοράς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Α. Παπασπηλιωτόπουλος

Αθήνα, Μάιος 2020

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

Βελτιστοποίηση Ρυθμίσεων Στοιχείων Υπερέντασης σε Προσαρμοστικά ή μη Συστήματα Προστασίας Σύγχρονων Δικτύων Διανομής και Συστημάτων Μεταφοράς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Α. Παπασπηλιωτόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : **Γεώργιος Ν. Κορρές**
Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 7η Μαΐου 2020.

.....	.....	.....
Γεώργιος Κορρές	Νικόλαος Χατζηαργυρίου	Παύλος Γεωργιλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
.....	.....	.....
Ιωάννης Προυσαλίδης	Σταύρος Παπαθανασίου	Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
	.....	
	Βασίλειος Νικολαΐδης	
	Επικ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.	

Αθήνα, Μάιος 2020

.....

Βασίλειος Α. Παπασπηλιωτόπουλος

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

Copyright © Βασίλειος Α. Παπασπηλιωτόπουλος, 2020.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την ανάπτυξη πρωτότυπων μεθόδων, όσον αφορά την εφαρμογή προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας σε σύγχρονα δίκτυα διανομής και τον αυτοματοποιημένο υπολογισμό βέλτιστων τιμών ρύθμισης για τα στοιχεία υπερέντασης προσαρμοστικών ή μη συστημάτων προστασίας, τόσο σε δίκτυα διανομής, όπου τα στοιχεία υπερέντασης παρέχουν πρωτεύουσα προστασία, όσο και σε συστήματα μεταφοράς, όπου τα στοιχεία υπερέντασης παρέχουν επικουρική προστασία επιπλέον της κύριας.

Αρχικά, αναλύονται οι βασικές αρχές που διέπουν την προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και παράλληλα περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων συστημάτων προστασίας. Επίσης, παρουσιάζεται περιεκτικά η θεωρία ανάλυσης βραχυκυκλωμάτων, παρέχοντας το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της φύσης των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και των τεχνικών προστασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ειδική περίπτωση του διφασικού βραχυκυκλώματος προς γη με αντίσταση σφάλματος σε επαρκώς γειωμένα δίκτυα, διερευνώντας τις συνθήκες υπό τις οποίες η παρουσία αντίστασης δεν περιορίζει το φασικό ρεύμα σφάλματος, αλλά αντίθετα οδηγεί σε αύξησή του.

Εν συνεχεία, εκπονείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναφορικά με τα προβλήματα προστασίας που ανακύπτουν στα σύγχρονα δίκτυα διανομής από την παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής. Τα ενδεχόμενα προβλήματα προστασίας διερευνώνται διεξοδικά, συναρτήσει της τεχνολογίας, της εγκατεστημένης ισχύος και της θέσης εγκατάστασης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η πιθανότητα εμφάνισής τους επιβεβαιώνεται σε αντιπροσωπευτικό τμήμα του Ελληνικού δικτύου διανομής, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για την πλήρη αντιμετώπιση των ενδεχόμενων προβλημάτων προστασίας σε ενεργά δίκτυα διανομής προτείνεται ολοκληρωμένη λύση, η οποία βελτιώνει το παραδοσιακό σχήμα προστασίας παθητικών δικτύων διανομής, χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές.

Τα προσαρμοστικά συστήματα προστασίας αποτελούν τη δημοφιλέστερη μέθοδο προστασίας ενεργών δικτύων διανομής. Στο πλαίσιο αξιολόγησης της συγκεκριμένης μεθόδου, αναπτύσσεται πρότυπη εργαστηριακή διάταξη, η οποία προσομοιώνει το εξεταζόμενο δίκτυο διανομής, με τη χρήση ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου, επιτηρεί αδιάλειπτα την τοπολογία του δικτύου, με τη χρήση κεντρικής μονάδας ελέγχου και προσαρμόζει αυτόματα τις ομάδες ρυθμίσεων των εμπλεκόμενων ηλεκτρονόμων προστασίας, σε περίπτωση σημαντικής αλλαγής της λειτουργικής κατάστασης του δικτύου. Η λειτουργικότητα του προσαρμοστικού συστήματος προστασίας επιδεικνύεται μέσω σειράς δοκιμών κλειστού βρόχου, χρησιμοποιώντας πραγματικές συσκευές προστασίας και ελέγχου.

Για το τεχνικό πρόβλημα υπολογισμού βέλτιστων τιμών ρύθμισης των χρησιμοποιούμενων στοιχείων υπερέντασης στους σύγχρονους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, προσαρμοστικών ή μη συστημάτων προστασίας, προτείνεται πρωτότυπη μαθηματική διατύπωση και καινοτόμος μέθοδος επίλυσής του, με χρήση προχωρημένων τεχνικών βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται εκτενώς οι πρόσφατες μέθοδοι που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και, εν συνεχεία, αναπτύσσονται νέα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία καλύπτουν πλήρως το τεχνικό πρόβλημα. Τα εν λόγω μοντέλα βελτιστοποίησης, καθώς και οι προηγμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυσή τους, ενσωματώνονται σε ένα πακέτο λογισμικού, το οποίο αυτοματοποιεί τη μελέτη επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης. Η αποδοτικότητα και η υψηλή επίδοση της προτεινόμενης μεθόδου επιδεικνύονται μέσω εφαρμογής της σε πρότυπα ηλεκτρικά δίκτυα της σχετικής βιβλιογραφίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστη επιλογική συνεργασία στοιχείων υπερέντασης, διεσπαρμένη παραγωγή, ενεργό δίκτυο διανομής, ένταση διέγερσης, ηλεκτρονόμος προστασίας, προσαρμοστικό σύστημα προστασίας, ρεύμα βραχυκύκλωσης, συντελεστής χρονικής προσαύξησης, σύστημα μεταφοράς, τεχνικές βελτιστοποίησης, χαρακτηριστική εξίσωση αντιστρόφου χρόνου, χρονικός πολλαπλασιαστής.

ABSTRACT

This PhD dissertation is concerned with the development of novel methods, regarding the concept of adaptive protection systems in modern distribution networks and the automated calculation of optimal relay setting values for the overcurrent elements of adaptive or non-adaptive protection systems. The latter method is appropriate for distribution networks, where overcurrent elements are applied as primary protection, as well as for transmission systems, where overcurrent elements serve as backup to the main protection.

As a first step, the fundamental principles of power system protection and the new features of modern protection systems are described. Moreover, the theory of fault analysis is explained concisely, providing the essential background for the comprehension of short-circuit current nature and protection techniques. Great emphasis is laid on the special case of double-phase-to-ground faults in effectively grounded power delivery networks, involving fault resistance. It is demonstrated that the presence of fault resistance can result in more severe faults than the bolted ones.

Subsequently, a thorough literature review is conducted, regarding the protection issues arisen in modern distribution networks, owing to the presence of dispersed generation. The potential protection issues are investigated extensively, based on the technology, capacity and location of dispersed generating units. A representative part of the Hellenic distribution network is studied, which is characterised by high penetration of renewables, verifying the possibility of protection gaps. A complete protection solution based on modern techniques is proposed, which addresses the potential protection problems in active distribution networks, improving the traditional protection scheme of passive distribution networks.

Adaptive protection systems have gained increasing interest in the last decade. Several pilot projects have been materialised, leveraging the superior performance of this solution. In this context, an adaptive protection testbed is developed, which simulates the examined distribution network, by means of a real-time digital simulator, supervises the network topology and connection status of dispersed generating units, with the use of a central controller, and adjusts automatically the setting values of employed protection relays, in case of a considerable change in network operation. The functionality of the proposed testbed is demonstrated through a series of hardware-in-the-loop tests, using off-the-shelf control and protection devices.

The engineering problem of calculating optimal setting values for the utilised overcurrent functions in modern digital relays, of either adaptive or non-adaptive protection systems, is stated as an optimisation problem, introducing a novel mathematical formulation. An innovative solution, which takes advantage of advanced optimisation techniques, is also proposed. Recently published works dealing with this problem are thoroughly reviewed and new mathematical models are developed, considering the engineering problem at length. The developed optimisation models are integrated with state-of-the-art solvers in a software package, which automates the overcurrent element coordination study. The efficacy and high performance of the proposed method are demonstrated through its application to standard power systems used in the pertinent literature.

KEY WORDS

Active distribution network, adaptive protection system, constant time adder, dispersed generation, inverse-time characteristic equation, optimal overcurrent element coordination, optimisation techniques, pickup current, protection relay, short-circuit current, time multiplier setting, transmission system.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί πόνημα ερευνητικού έργου, το οποίο ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2014 στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Γεώργιου Ν. Κορρέ. Το θέμα της διδακτορικής διατριβής εντάσσεται στο γνωστικό αντικείμενο της Προστασίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Έχοντας πλέον ολοκληρώσει το ερευνητικό μου έργο και τη σύνταξη της διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου, σε όλους όσους συνέβαλαν και συμπαραστάθηκαν στην προσπάθειά μου έως σήμερα.

Τις θερμότερες ευχαριστίες μου οφείλω στον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γ. Κορρέ, για την υποδειγματική καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, η περάτωση της οποίας δεν θα ήταν επιτυχής χωρίς την άρτια επιστημονική υποστήριξη και τη συνεχή ενθάρρυνσή του. Είχα την τύχη και τη χαρά να τον γνωρίσω πριν από δέκα χρόνια, κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, και έκτοτε διατηρούμε άψογη συνεργασία. Τον ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για τη διαρκή εμπιστοσύνη και την έμπρακτη στήριξή του στο πρόσωπό μου όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ν. Χατζηαργυρίου και τον Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κ. Βουρνά, μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για το ένθερμο ενδιαφέρον και τις εύστοχες υποδείξεις τους σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διατριβής, μεριμνώντας παράλληλα για τις συνθήκες εργασίας των ερευνητών του Εργαστηρίου και την ανάπτυξη ευρύτερων συνεργασιών.

Ειλικρινείς ευχαριστίες οφείλονται και στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητές κ. Π. Γεωργιλάκη, κ. Ι. Προυσαλίδη, κ. Σ. Παπαθανασίου, κ. Ι. Γκόνο και κ. Β. Νικολαΐδη, οι οποίοι με τίμησαν με τη συμμετοχή τους στις επιτροπές κρίσης και συνέβαλαν στην ποιοτική ενίσχυση της διδακτορικής μου διατριβής.

Ευχαριστώ, επίσης, την κ. Ε. Αυλωνίτου, την κ. Ε. Γασπαράκη και τον κ. Γ. Κατσαρό, για τη φιλική συνεργασία και τη βοήθεια που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα ως μέλη του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται και στον συνάδελφο κ. Βασίλη Κλεφτάκη, Διδάκτορα ΕΜΠ, για τη συνδρομή του στο εργαστηριακό μέρος της παρούσας διατριβής.

Επιπλέον, θα ήθελα να απευθύνω ξεχωριστές ευχαριστίες στον Διευθύνοντα Σύμβουλο της εταιρείας PROTASIS SA κ. Β. Γεωργίου και τους Προϊσταμένους μου κ. Η. Μήλη και κ. Δ. Τσακίρη, Διπλωματούχους ΕΜΠ και ειδήμονες σε θέματα προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, για την ειλικρινή τους κατανόηση και την προθυμία μεταλαμπάδευσης της μακράς πείρας τους.

Ειδική μνεία αξίζουν οι συνάδελφοι κ. Θ. Ξύγκης και κ. Ν. Κουτσούκης, Διδάκτορες ΕΜΠ, οι οποίοι υπήρξαν συνοδοιπόροι στην ακαδημαϊκή μου διαδρομή. Τους ευχαριστώ ειλικρινά για τις αναρίθμητες ώρες συζητήσεων επιστημονικού και γενικού ενδιαφέροντος, τους προβληματισμούς που μοιραστήκαμε και την αλληλεγγύη τους, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ, το οποίο δεν αρκεί για να αποτυπώσει τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου προς το πρόσωπό τους, το οφείλω στη σύζυγό μου Ιωάννα και τους γονείς μου Αντώνη και Σταθούλα, για την αμέριστη συμπαράσταση και την ηθική υποστήριξη που μου παρέχουν γενναιόδωρα σε κάθε βήμα της ακαδημαϊκής και επαγγελματικής μου πορείας.

Β. Παπασπηλιωτόπουλος

Μάιος 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΗΕ 1

1.1.1 Ζώνες & Σχήμα Προστασίας 2

1.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 3

1.2.1 Διακόπτες Ισχύος 4

1.2.2 Μετασχηματιστές Έντασης 4

1.2.3 Μετασχηματιστές Τάσης 4

1.2.4 Ηλεκτρονόμοι Προστασίας 5

1.2.5 Κυκλώματα Ελέγχου ΣΡ 6

1.2.6 Ηλεκτρονόμος Μανδάλωσης 6

1.2.7 Συστήματα Επικοινωνίας 6

1.2.8 Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Προστασίας 7

1.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 8

1.3.1 Χαρακτηριστικά Αξιόπιστου Συστήματος Προστασίας 9

1.3.1.1 Πλεονασμός 9

1.3.1.2 Υψηλή Επίδοση 9

1.3.1.3 Συντηρησιμότητα 10

1.3.1.4 Διαθεσιμότητα 10

1.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ & ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 10

1.4.1 Είδη Ηλεκτρικών Σφαλμάτων 10

1.4.2 Είδη Προστασίας Εξοπλισμού Ισχύος 11

1.5 ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 13

1.5.1 Προστασία Σύγχρονων Δικτύων Διανομής 13

1.5.2 Προσαρμοστική Προστασία 13

1.5.3 Σχήματα Προστασίας Ευρείας Περιοχής Συστημάτων Μεταφοράς 14

1.5.4 Ψηφιακοί Υποσταθμοί 15

1.6 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ Η/Ν 16

1.7 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ & ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 17

2. ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ 21

2.1 ΓΕΝΙΚΑ 21

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ 22

2.3 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΑΚΡΙΑ ΑΠΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 24

2.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 26

2.4.1 Βασικά Στοιχεία Θεωρίας Σύγχρονων Μηχανών 26

2.4.2 Ηλεκτρικές Παράμετροι Σύγχρονων Μηχανών 30

2.4.2.1 Επαγωγικές Αντιδράσεις 30

2.4.2.2 Ωμικές Αντιστάσεις 33

2.4.2.3 Χρονικές Σταθερές 34

2.4.3 Συμμετρικό Βραχυκύκλωμα Πλησίον Γεννήτριας 36

2.4.4 Συμπεριφορά Γεννήτριας σε Ασύμμετρο Σφάλμα 37

2.4.5 Καμπύλη Απομείωσης Συνεισφοράς Γεννήτριας 39

2.4.6 Συνεισφορά Κινητήρα στο Συμμετρικό Βραχυκύκλωμα ... 41
2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ... 41
2.5.1 Συμμετρικές Συνιστώσες ... 41
2.5.2 Ασύμμετρα Σφάλματα ... 42
2.5.3 Μελέτη Υπολογισμού Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης ... 46
2.5.3.1 Στάθμη Βραχυκύκλωσης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς & Δικτύου Διανομής ... 48
2.5.4 Εκτίμηση Αντίστασης Σφάλματος ... 48
2.6 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΦΑΣΙΚΟΥ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΓΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ... 49
2.6.1 Σύγκριση με Πλήρες Διφασικό Σφάλμα προς Γη ... 50
2.6.2 Σύγκριση με Πλήρες Τριφασικό Σφάλμα ... 51
2.6.3 Σύγκριση με Πλήρες Μονοφασικό Σφάλμα προς Γη ... 52
2.6.4 Υπολογισμοί σε Πραγματικό ΣΗΕ ... 53
3. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ... 59
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ... 59
3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ... 61
3.2.1 Βασικές Αρχές ... 61
3.2.2 Διεθνείς Πρακτικές & Κανόνες Εφαρμογής ... 62
3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ... 65
3.3.1 Συνεισφορά ΜΔΠ στο Ρεύμα Βραχυκύκλωσης ... 66
3.3.1.1 Μεταβολή Στάθμης Βραχυκύκλωσης ... 67
3.3.1.2 Αμφίδρομη Ροή Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης ... 68
3.3.2 Επίδραση Μ/Σ Διασύνδεσης ΜΔΠ στα Σφάλματα Γης ... 68
3.3.2.1 Συνδεσμολογίες Dd, Dyn, Yd ... 69
3.3.2.2 Συνδεσμολογία YNd ... 70
3.3.2.3 Συνδεσμολογία YNyn ... 71
3.3.3 Τύφλωση Προστασίας ... 72
3.3.4 Συμπαθητική Λειτουργία Προστασίας ... 75
3.3.5 Εκτέλεση Αυτόματης Επαναφοράς σε Νησιδοποιημένο Δίκτυο ... 77
3.3.6 Τήξη Ασφαλειών σε Παροδικό Σφάλμα ... 79
3.3.7 Απώλεια Επιλογικής Συνεργασίας Ασφαλειών ... 80
3.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.. 81
3.4.1 Περιγραφή Δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας ... 82
3.4.2 Προβλήματα Προστασίας Δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας ... 83
3.4.2.1 Αύξηση Στάθμης Βραχυκύκλωσης ... 83
3.4.2.2 Τύφλωση Προστασίας ... 84
3.4.2.3 Συμπαθητική Λειτουργία Προστασίας ... 88
3.4.2.4 Αποτυχία Αυτόματης Επαναφοράς ... 88
3.4.2.5 Απώλεια Επιλογικής Συνεργασίας Ασφαλειών ... 90
3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ... 91
3.5.1 Εκσυγχρονισμός Προστασίας ... 92
3.5.2 Προστασία Διασύνδεσης ΜΔΠ ... 93
3.5.3 Χαρακτηριστικά Ολοκληρωμένης Λύσης Προστασίας ... 95

4. ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 97
4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 97
4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ Η/Ν ΜΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ 99
4.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 100
4.3.1 Χαρακτηριστικά Βασικών Συνιστωσών Συστήματος 101
4.3.1.1 Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου 101
4.3.1.2 Ψηφιακοί Η/Ν Προστασίας 102
4.3.1.3 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου 104
4.3.2 Λειτουργικότητα Εργαστηριακού Συστήματος 105
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ 108
4.4.1 Στάδιο 1: Επιβεβαίωση Προβλημάτων Προστασίας 109
4.4.1.1 Δοκιμή Τύφλωσης Προστασίας 109
4.4.1.2 Δοκιμή Συμπαθητικής Λειτουργίας Προστασίας 112
4.4.2 Στάδιο 2: Έλεγχος Αλγορίθμου Προσαρμοστικής Προστασίας 115
4.4.3 Στάδιο 3: Έλεγχος Συνολικής Επίδοσης του Προσαρμοστικού Συστήματος Προστασίας 116
4.4.3.1 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C1 116
4.4.3.2 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C2 117
4.4.3.3 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C3 118
4.4.3.4 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C4 119
4.4.4 Συμπεράσματα Δοκιμών 119
5. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΙΚΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ 121
5.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΓΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ 121
5.1.1 Παράμετροι Ρύθμισης Στοιχείων Υπερέντασης 122
5.1.2 Εφαρμογές Προστασίας Υπερέντασης 123
5.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ 124
5.2.1 Ανασκόπηση Προτεινόμενων Μεθόδων Βελτιστοποίησης 124
5.2.2 Μαθηματική Διατύπωση Προβλήματος 127
5.2.2.1 Βασικοί Ορισμοί 127
5.2.2.2 Αντικειμενική Συνάρτηση 128
5.2.2.3 Περιορισμοί 129
5.2.2.4 Επιλογή Μεταβλητών και Καθορισμός Είδους Προβλήματος 131
5.2.3 Το Μοντέλο Τετραγωνικού Προγραμματισμού με Τετραγωνικούς Περιορισμούς 132
5.2.3.1 Εισαγωγή Νέων Μεταβλητών 133
5.2.3.2 Νέα Αντικειμενική Συνάρτηση 133
5.2.3.3 Νέοι Ανισοτικοί Περιορισμοί 133
5.2.3.4 Νέοι Ισοτικοί Περιορισμοί 134
5.3 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ 134
5.3.1 Λειτουργίες Λογισμικού 135
5.3.2 Δεδομένα Εισόδου 136
5.3.3 Μοντέλα και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης 137
5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 138

5.4.1 Βέλτιστη Πρακτική 138
5.4.2 Εφαρμοζόμενο Σχήμα Προστασίας 140
5.4.3 Αποτελέσματα Δοκιμών 141
5.4.3.1 Σύστημα Υπομεταφοράς 3 Ζυγών 141
5.4.3.2 Δίκτυο Διανομής με ΜΔΠ 5 Ζυγών 144
5.4.3.3 Σύστημα Μεταφοράς 8 Ζυγών 147
5.4.3.4 Σύστημα Μεταφοράς IEEE 39 Ζυγών 156
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 159
6.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ 159
6.2 ΣΥΜΒΟΛΗ – ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ 160
6.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ 161
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΧΡΟΝΟΥ. 163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 5 ΖΥΓΩΝ 165
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 167
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ 181

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1.1: Ζώνες προστασίας τυπικού ΣΗΕ. 2
Σχήμα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα προστασίας Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ. 3
Σχήμα 1.3: Παράδειγμα εφαρμογής προστασίας γραμμής μεταφοράς. 8
Σχήμα 1.4: Ροή εργασιών διαχείρισης ρυθμίσεων Η/Ν. [26] 16
Σχήμα 2.1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα για την περίπτωση τριφασικού σφάλματος. 24
Σχήμα 2.2: Ρεύμα σφάλματος μακριά από γεννήτρια όταν $\varphi = \pi/2$ και (α) $\alpha = \varphi$, (β) $\alpha = 0$. 26
Σχήμα 2.3: Τυλίγματα στάτη και δρομέα σύγχρονης γεννήτριας. [33] 27
Σχήμα 2.4: Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής στο σύστημα αξόνων d-q-0. [36] 28
Σχήμα 2.5: Αλληλεπίδραση πλασματικών τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής. [39] 29
Σχήμα 2.6: Διαδρομή μαγνητικής ροής στη μόνιμη, μεταβατική και υπομεταβατική κατάσταση. [49] 31
Σχήμα 2.7: Πιθανές διαδρομές μαγνητικής ροής στον ευθύ άξονα. 31
Σχήμα 2.8: Ισοδύναμη αντίδραση ευθέος άξονα στη (α) μόνιμη, (β) μεταβατική, (γ) υπομεταβατική κατάσταση. 32
Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό των υπομεταβατικών χρονικών σταθερών ευθέος άξονα. 34
Σχήμα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό των υπομεταβατικών χρονικών σταθερών εγκάρσιου άξονα. 35
Σχήμα 2.11: Ρεύμα τριφασικού σφάλματος πλησίον γεννήτριας. 37
Σχήμα 2.12: Ρεύμα μονοφασικού σφάλματος προς γη πλησίον γεννήτριας. 39
Σχήμα 2.13: Τύποι και αντιστάσεις σφάλματος. 43
Σχήμα 2.14: Σχέση φασιθετών ρεύματος σφάλματος για (α) $Z_0/Z_1=1$, (β) $Z_0/Z_1>1$, (γ) $Z_0/Z_1<1$. 46
Σχήμα 2.15: Μεταβολή του λόγου r_{2pg} ως προς k και R_G. 51
Σχήμα 2.16: Παράδειγμα πραγματικού ΣΗΕ. 53
Σχήμα 2.17: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 1). 54
Σχήμα 2.18: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 2). 55
Σχήμα 2.19: Μεταβολή του λόγου r_{2pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 3). 56
Σχήμα 2.20: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 4). 56
Σχήμα 2.21: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 6). 57
Σχήμα 3.1: Ζώνες προστασίας ΔΔΗΕ. 61
Σχήμα 3.2: Όρια κατάλληλης ρύθμισης Η/Ν στις αναχωρήσεις γραμμών διανομής, (1) μέγιστη ασφάλεια, (2)–(3) στοιχεία 51P και 51G του Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ του κύριου Υ/Σ, (4)–(5) στοιχεία 51P και 51G του Η/Ν στην πύλη αναχώρησης, (6) καμπύλη αντοχής αγωγών, (7) καμπύλη αντοχής Δ/Α. 63
Σχήμα 3.3: Σφάλμα μεταξύ φάσεων γειτονικών γραμμών πλησίον του κύριου Υ/Σ. 64
Σχήμα 3.4: Εκτέλεση αυτόματων επαναφορών και μείωση της αντοχής των αγωγών. 64
Σχήμα 3.5: Αμφίδρομη ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης λόγω ΜΔΠ. 68
Σχήμα 3.6: Παράδειγμα δικτύου διανομής με ΜΔΠ και υποψήφιες θέσεις σφάλματος. 68
Σχήμα 3.7: Ακολουθιακό κύκλωμα για σφάλμα 1pg στη θέση F1 (συνδεσμολογία Dyn). 69
Σχήμα 3.8: Ακολουθιακό κύκλωμα για σφάλμα 1pg στη θέση F1 (συνδεσμολογία YNd). 70
Σχήμα 3.9: Ακολουθιακό κύκλωμα για σφάλμα 1pg στη θέση F1 (συνδεσμολογία YNyn). 71
Σχήμα 3.10: Τύφλωση προστασίας σε ελάχιστο σφάλμα. 73
Σχήμα 3.11: Γραφική παράσταση των συναρτήσεων (α) $k_{sys}(m,n)$ και (β) $l_{tot}(m,n)$. 74
Σχήμα 3.12: Γραφική παράσταση του λόγου $k_{sys}(x)$ για διαφορετικό βαθμό διείσδυσης της ΜΔΠ. 75

Σχήμα 3.13: Συνεισφορά ΜΔΠ σε σφάλμα γειτονικής γραμμής και ανεπιθύμητη λειτουργία του Δ/Ι CB1. 76
Σχήμα 3.14: Γραφική παράσταση της συνάρτησης $r_{DG}(m)$. 77
Σχήμα 3.15: Συνεισφορά ΜΔΠ σε σφάλμα διακλάδωσης που προστατεύεται από ασφάλεια. 79
Σχήμα 3.16: Απώλεια επιλογικής συνεργασίας μεταξύ Δ/Ι ή Δ/ΑΕ και ασφάλειας. 80
Σχήμα 3.17: Απώλεια επιλογικής συνεργασίας μεταξύ ασφαλειών. 81
Σχήμα 3.18: Σχήμα προστασίας δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας. 83
Σχήμα 3.19: Μεταβολή των συνολικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης για φασικά σφάλματα. 85
Σχήμα 3.20: Τύφλωση Η/Ν της πύλης P215 για ελάχιστο σφάλμα 3ph στο άκρο της γραμμής P-22. 87
Σχήμα 3.21: Τήξη ασφάλειας 15T για παροδικό σφάλμα 3ph σε διακλάδωση της γραμμής P-24. 89
Σχήμα 3.22: Σωτηρία ασφάλειας 30T για παροδικό σφάλμα 1pg σε διακλάδωση της γραμμής P-22. 90
Σχήμα 3.23: Τήξη ασφαλειών 20T και 30T για σφάλμα 3ph στον στύλο 48_123 της γραμμής P-23. 91
Σχήμα 4.1: Έλεγχος Η/Ν προστασίας με δοκιμές CHIL. [194] 101
Σχήμα 4.2: Προσομοιούμενο σύστημα διανομής 5 ζυγών και πραγματικοί Η/Ν προστασίας. 102
Σχήμα 4.3: Κύκλωμα ελέγχου Η/Ν SEL–311B. 106
Σχήμα 4.4: Κύκλωμα ελέγχου λογικού ελεγκτή S7–300. 107
Σχήμα 4.5: Λειτουργία προτεινόμενου εργαστηριακού συστήματος. 107
Σχήμα 4.6: Έλεγχος λειτουργικότητας προσαρμοστικού συστήματος προστασίας μέσω δοκιμών κλειστού βρόχου. 109
Σχήμα 4.7: Δίκτυο διανομής 5 ζυγών (χωρίς ΜΔΠ, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 110
Σχήμα 4.8: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® (χωρίς ΜΔΠ, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 110
Σχήμα 4.9: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (χωρίς ΜΔΠ, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 110
Σχήμα 4.10: Δίκτυο διανομής 5 ζυγών (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 111
Σχήμα 4.11: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 111
Σχήμα 4.12: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 112
Σχήμα 4.13: Αύξηση χρόνου λειτουργίας Η/Ν SEL–311B για σφάλμα στον ζυγό 1.2 λόγω ΜΔΠ. 112
Σχήμα 4.14: Δίκτυο διανομής 5 ζυγών (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1). 113
Σχήμα 4.15: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1). 114
Σχήμα 4.16: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1). 114
Σχήμα 4.17: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® στο σημείο εγκατάστασης του Η/Ν SEL–587 (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1). 114
Σχήμα 4.18: Χρόνοι λειτουργίας Η/Ν SEL–311B, SEL–587 (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1). 115
Σχήμα 4.19: Καταγραφή αλλαγής ομάδας ρυθμίσεων στον Η/Ν SEL–311B. 115
Σχήμα 4.20: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C1, σφάλμα στον ζυγό 1.1). 117
Σχήμα 4.21: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C1, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 117
Σχήμα 4.22: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C2, σφάλμα στον ζυγό 1.2). 118
Σχήμα 4.23: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® στο σημείο εγκατάστασης του Η/Ν R7 (σενάριο λειτουργίας C2, σφάλμα στον ζυγό 2.1). 118
Σχήμα 4.24: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C3, σφάλμα στον ζυγό 1.1). 118
Σχήμα 4.25: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C4, σφάλμα στον ζυγό 1.1). 119
Σχήμα 5.1: Παράδειγμα κωδικοποίησης Δ/Ι, Η/Ν και στοιχείων υπερέντασης. 128
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης προσέγγισης. 135
Σχήμα 5.3: Προτεινόμενες θέσεις σφάλματος ως προς τον Δ/Ι CB1. 139
Σχήμα 5.4: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος 3 ζυγών. 142
Σχήμα 5.5: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 5 ζυγών. 144

Σχήμα 5.6: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος 8 ζυγών..... 147
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας πρωτεύουσας προστασίας {(2,6,1),1,1}. 152
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας πρωτεύουσας προστασίας {(1,7,1),1,1}. 152
Σχήμα 5.9: Χρόνοι λειτουργίας και διαβάθμιση προστασιών του συστήματος 8 ζυγών (Σφάλμα 1)..... 155
Σχήμα 5.10: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος IEEE 39 ζυγών "New England". [253]..... 156

Εικόνα 1.1: Τεχνολογίες Η/Ν: (α) ηλεκτρομηχανικοί, (β) στατικοί, (γ) ψηφιακοί, (δ) αριθμητικοί. 5
Εικόνα 4.1: Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου του Εργαστηρίου ΣΗΕ (2018)..... 102
Εικόνα 4.2: Ο πίνακας προστασίας του Εργαστηρίου ΣΗΕ. 103
Εικόνα 4.3: Δοκιμές κλειστού βρόχου με τον Η/Ν TPU S220–S. 104
Εικόνα 4.4: Η κεντρική μονάδα ελέγχου της προτεινόμενης εργαστηριακής διάταξης..... 105
Εικόνα 4.5: Σύνδεση του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου με τον ψηφιακό Η/Ν. 106
Εικόνα 4.6: Προσαρμογή των ομάδων ρυθμίσεων του Η/Ν SEL–311B με χρήση του λογισμικού AcSELerator QuickSet® SEL–5030. 108
Εικόνα 4.7: Προσαρμοστικό σύστημα προστασίας Εργαστηρίου ΣΗΕ: (α) φάση αρχικών και (β) φάση τελικών δοκιμών. 116

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Είδη προστασίας εξοπλισμού ισχύος 12
Πίνακας 2.1: Στατιστική κατανομή σφαλμάτων βάσει της διάρκειάς τους 22
Πίνακας 2.2: Στατιστική κατανομή σφαλμάτων βάσει του τύπου τους 23
Πίνακας 2.3: Τύποι δρομέα και επαγωγικές αντιδράσεις εγκάρσιου άξονα 32
Πίνακας 2.4: Σχέσεις υπολογισμού φασικών ρευμάτων και τάσεων σφάλματος 44
Πίνακας 2.5: Σχέσεις υπολογισμού ακολουθιακών ρευμάτων και τάσεων σφάλματος 45
Πίνακας 2.6: Προσεγγιστικές σχέσεις υπολογισμού αντίστασης τόξου 49
Πίνακας 3.1: Γραμμές κορμού δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας 82
Πίνακας 3.2: ΜΔΠ δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας 82
Πίνακας 3.3: Σχετική μεταβολή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο δίκτυο ΜΤ Σπερχειάδας 85
Πίνακας 3.4: Λειτουργία προστασίας γραμμών σε ελάχιστο φασικό σφάλμα 86
Πίνακας 3.5: Λειτουργία προστασίας γραμμών σε ελάχιστο σφάλμα γης 87
Πίνακας 3.6: Ανεπιθύμητες πτώσεις Δ/Ι 88
Πίνακας 4.1: Ψηφιακά σήματα ανά σενάριο λειτουργίας 106
Πίνακας 4.2: Τιμές ρύθμισης Η/Ν προστασίας γραμμής 1.1 (SEL–311B) 109
Πίνακας 4.3: Τιμές ρύθμισης Η/Ν προστασίας γραμμών 1.1 και 2.1 113
Πίνακας 5.1: Βασικές τεχνικές πόλωσης στοιχείων υπερέντασης–κατεύθυνσης 122
Πίνακας 5.2: Τυποποιημένες χαρακτηριστικές εξισώσεις στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου 123
Πίνακας 5.3: Κύριες δημοσιεύσεις επί του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας Η/Ν υπερέντασης–κατεύθυνσης 125
Πίνακας 5.4: Μοντέλα βελτιστοποίησης και αλγόριθμοι επίλυσης 138
Πίνακας 5.5: Δεδομένα στοιχείων υπερέντασης για το σύστημα 3 ζυγών 142
Πίνακας 5.6: Ρεύματα βραχυκύκλωσης για το σύστημα 3 ζυγών (Σφάλμα 1) 142
Πίνακας 5.7: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης συστήματος 3 ζυγών 144
Πίνακας 5.8: Δεδομένα στοιχείων υπερέντασης για το δίκτυο 5 ζυγών 145
Πίνακας 5.9: Ρεύματα βραχυκύκλωσης ανά σενάριο λειτουργίας για το δίκτυο 5 ζυγών (Σφάλμα 1) 145
Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλήματος NLP για το δίκτυο 5 ζυγών 146
Πίνακας 5.11: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης δικτύου 5 ζυγών 146
Πίνακας 5.12: Δεδομένα στοιχείων υπερέντασης για το σύστημα 8 ζυγών 147
Πίνακας 5.13: Ρεύματα βραχυκύκλωσης για το σύστημα 8 ζυγών (Σφάλματα 1, 3, 4, 5) 148
Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλήματος MINLP για το σύστημα 8 ζυγών 150
Πίνακας 5.15: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης συστήματος 8 ζυγών 151
Πίνακας 5.16: Χρόνοι λειτουργίας στοιχείων υπερέντασης συστήματος 8 ζυγών 153
Πίνακας 5.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλημάτων NLP και LP για το σύστημα 8 ζυγών 155
Πίνακας 5.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων με δημοσιευμένες εργασίες για το σύστημα 8 ζυγών 156
Πίνακας 5.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλήματος MINLP για το σύστημα IEEE 39 ζυγών 157
Πίνακας Β.1: Ισοδύναμο σύστημα 150 kV 165
Πίνακας Β.2: Μ/Σ κύριου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ 165
Πίνακας Β.3: Γραμμές διανομής 20 kV 165
Πίνακας Β.4: Συγκεντρωτικά φορτία 165
Πίνακας Β.5: Μ/Σ διασύνδεσης γεννήτριας ΜΔΠ 166
Πίνακας Β.6: Σύγχρονη γεννήτρια ΜΔΠ 166

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ – ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

Α/Γ	Ανεμογεννήτρια
Α/Ζ	Ασφαλειοαποζεύκτης
ΑΔΔ	Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης
ΑΜ/Σ	Αυτομετασχηματιστής
ΑΠΕ	Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας
Δ/Α	Διακόπτης Απομόνωσης
Δ/ΑΕ	Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς
Δ/Ι	Διακόπτης Ισχύος
ΔΔΗΕ	Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΕΡ	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
Η/Ν	Ηλεκτρονόμος
ΚΥΤ	Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης
Μ/Ε	Μετασχηματιστής Ένταση
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
Μ/Τ	Μετασχηματιστής Τάσης
ΜΔΠ	Μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής
ΜΤ	Μέση Τάση
μΥΗΣ	Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός
ΣΑΤΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΡ	Συνεχές Ρεύμα
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	Υπερυψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

ΒΑΣΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Adaptive protection	Προσαρμοστική προστασία
Backup/Standby protection	Επικουρική προστασία
Circuit breaker trip	Άνοιγμα ή πτώση Δ/Ι
Constant time adder	Συντελεστής χρονικής προσαύξησης
Coordination time interval	Περιθώριο χρονικής διαβάθμισης
Dependability	Εμπιστευσιμότητα
Directional overcurrent protection	Προστασία υπερέντασης–κατεύθυνσης
Electric fault	Ηλεκτρικό σφάλμα
Fault resistance	Αντίσταση σφάλματος
Forward fault	Σφάλμα ορθής φοράς
Hardware-in-the-loop test	Δοκιμή κλειστού βρόχου
Interoperability	Διαλειτουργικότητα
Main protection	Κύρια προστασία
Overcurrent protection	Προστασία υπερέντασης
Pickup current	Ένταση διέγερσης
Primary protection	Πρωτεύουσα προστασία ή Προστασία 1ης βαθμίδας
Protection blinding	Τύφλωση προστασίας
Protection coordination	Επιλογική συνεργασία προστασιών
Protection element	Στοιχείο προστασίας
Protection relay	Ηλεκτρονόμος προστασίας
Protection scheme	Σχήμα προστασίας
Protection system	Σύστημα προστασίας
Protection zone	Ζώνη προστασίας
Redundancy	Πλεονασμός
Reverse fault	Σφάλμα αντίθετης φοράς
Secondary protection	Δευτερεύουσα προστασία ή Προστασία 2ης βαθμίδας
Security	Ασφάλεια
Selectivity	Επιλογικότητα
Sensitivity	Ευαισθησία
Sympathetic tripping	Συμπαθητική λειτουργία προστασίας
Time dial/Time multiplier setting	Χρονικός πολλαπλασιαστής
Unit protection	Προστασία μονάδας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΗΕ

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) σχεδιάζονται, λειτουργούν, αναπτύσσονται και συντηρούνται με στόχο την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές και την υψηλότερη δυνατή ποιότητα ισχύος (ιδανικά, παροχή απολύτως ημιτονοειδούς τάσης σταθερής ενεργού τιμής και σταθερής συχνότητας). Ο στόχος αυτός καθίσταται εφικτός, υπό την προϋπόθεση ότι οι επιμέρους συνιστώσες των ΣΗΕ προστατεύονται επαρκώς από ενδεχόμενα ηλεκτρικά σφάλματα (electric faults). Ο όρος σφάλμα χρησιμοποιείται για κάθε περίπτωση ανώμαλης λειτουργίας ή διαταραχής (π.χ. υπερτάσεις, υπερφορτίσεις, βραχυκυκλώματα), η οποία ενδέχεται να προκαλέσει μερική ή μόνιμη βλάβη στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, τόσο στην πλευρά του δικτύου όσο και στην πλευρά του καταναλωτή. Η αιτία πρόκλησης του σφάλματος μπορεί να είναι εσωτερική (αστοχία υλικού, γήρανση μόνωσης, χαλαρές συνδέσεις κτλ.) ή εξωτερική (κεραυνικό πλήγμα, πτώση αντικειμένου, ανθρώπινο λάθος κτλ.) [1]–[3].

Η κατασκευή ηλεκτρικών δικτύων ικανών να υποστούν οποιοδήποτε σφάλμα, χωρίς να προκληθεί βλάβη στον εξοπλισμό τους, θα ήταν οικονομικά και χωροταξικά ασύμφορη. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη των ΣΗΕ, από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έως σήμερα, επιτελείται με βασικά κριτήρια την πρακτικότητα και τη βιωσιμότητά τους. Η ανάγκη για επαρκή προστασία του εξοπλισμού ισχύος των ΣΗΕ διαπιστώθηκε από τις πρώτες μέρες ανάπτυξής τους, γεγονός που οδήγησε στον σχεδιασμό, την κατασκευή και την εφαρμογή των πρώτων διατάξεων προστασίας. Προϊόντος του χρόνου, η τεχνολογία και οι τεχνικές προστασίας έχουν εξελιχθεί σημαντικά, ενώ αντίθετα η γενική φιλοσοφία εφαρμογής της παραμένει ίδια διαχρονικά.

Πλήρης προστασία εξοπλισμού επιτυγχάνεται όταν:

- ανιχνεύεται κάθε εκδηλωθέν σφάλμα,
- αναγνωρίζεται το είδος του σφάλματος,
- εντοπίζεται η ακριβής θέση του σφάλματος,
- απομονώνεται το πληγέν τμήμα του δικτύου,
- επαναφέρεται αυτόματα η τροφοδοσία, εάν το σφάλμα είναι παροδικό.

Στόχος της προστασίας εξοπλισμού είναι:

- η ταχύτατη απομόνωση του σφάλματος,
- ο περιορισμός της προκληθείσας βλάβης, και κατά συνέπεια η ελαχιστοποίηση του κόστους επισκευής και του χρόνου αποκατάστασης,
- ο περιορισμός των επιπτώσεων στα υγιή τμήματα του ΣΗΕ,
- η αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων για ζωντανούς οργανισμούς, καθώς και καταστροφικών συνθηκών για περιουσιακά στοιχεία.

Επιπλέον, στα σύγχρονα ΣΗΕ εφαρμόζονται ειδικά σχήματα για την προστασία συστήματος (special protection schemes), τα οποία δεν θα πρέπει να συγχέονται με την προστασία εξοπλισμού. Η μεν προστασία εξοπλισμού προλαμβάνει την καταστροφή των συνιστωσών του ΣΗΕ εξαιτίας ηλεκτρικού σφάλματος, η δε προστασία συστήματος προλαμβάνει την παραβίαση των ασφαλών ορίων λειτουργίας του συστήματος, αποτρέποντας την τοπική ή εκτεταμένη διακοπή της τροφοδοσίας (blackout) κατόπιν

διαταραχής. Η προστασία συστήματος μπορεί να διακριθεί σε προστασία από αστάθεια τάσης, απώλεια συγχρονισμού, αστάθεια συχνότητας και υπερφόρτιση. Συμπερασματικά, η προστασία εξοπλισμού και η προστασία συστήματος συνιστούν την προστασία ΣΗΕ. Στο εξής, ο όρος προστασία θα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για αναφορά σε προστασία εξοπλισμού, εκτός εάν επισημαίνεται διαφορετικά.

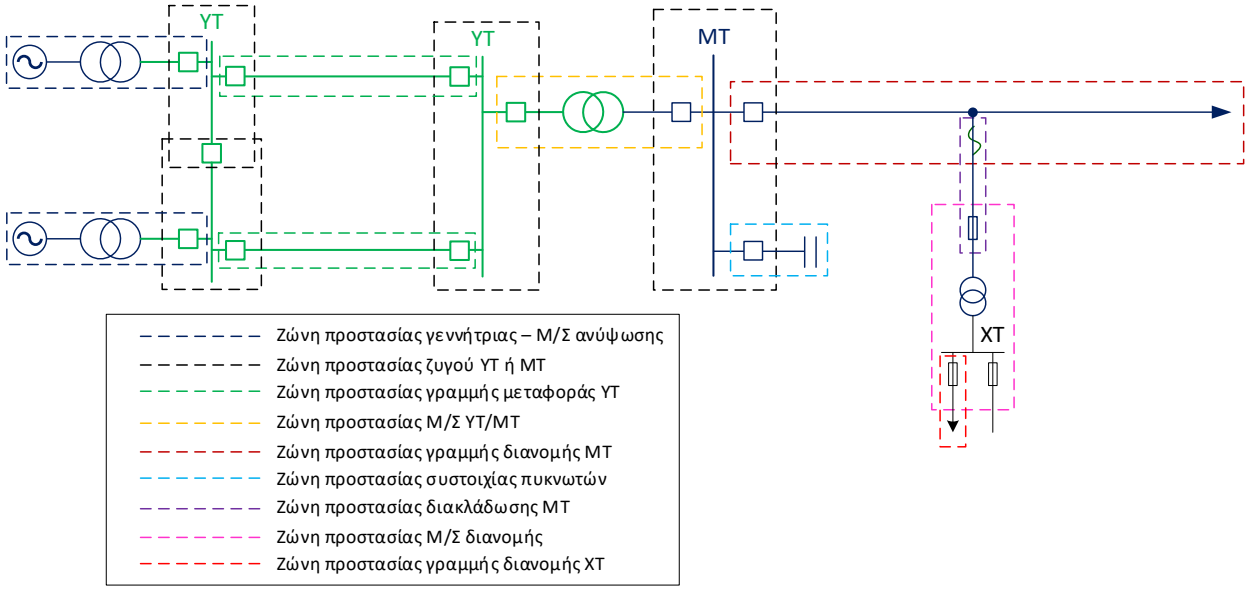
1.1.1 Ζώνες & Σχήμα Προστασίας

Η φιλοσοφία εφαρμογής της προστασίας εξοπλισμού βασίζεται στη διαίρεση του δικτύου σε ζώνες προστασίας (protection zones) [4], [5]. Ο προστατευόμενος εξοπλισμός καθορίζει το είδος της ζώνης προστασίας, ενώ τα διακοπτικά μέσα και οι μετασχηματιστές έντασης που τροφοδοτούν τους ηλεκτρονόμους προστασίας την οριοθετούν.

Βασικές ζώνες προστασίας είναι:

- η ζώνη προστασίας γραμμής ή καλωδίου,
- η ζώνη προστασίας μετασχηματιστή (Μ/Σ),
- η ζώνη προστασίας ζυγού,
- η ζώνη προστασίας γεννήτριας ή κοινή ζώνη γεννήτριας–Μ/Σ ανύψωσης,
- η ζώνη προστασίας εγκάρσιας συστοιχίας πυκνωτών ή πηνίων,
- η ζώνη προστασίας κινητήρα.

Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται παράδειγμα τυπικού ΣΗΕ, επί του οποίου έχουν σημειωθεί οι διάφορες ζώνες προστασίες. Όπως παρατηρείται, οι ζώνες προστασίας επικαλύπτονται, με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν ακάλυπτες περιοχές δικτύου. Η επικάλυψη των ζωνών περιορίζεται στα διακοπτικά στοιχεία, με στόχο την εκκαθάριση κάθε πιθανού σφάλματος, καθώς και την απομόνωση του μικρότερου δυνατού τμήματος του δικτύου.



Σχήμα 1.1: Ζώνες προστασίας τυπικού ΣΗΕ.

Κατόπιν της διαίρεσης του δικτύου σε ζώνες προστασίας, ακολουθεί ο καθορισμός του βέλτιστου σχήματος προστασίας (protection scheme) κατά περίπτωση. Ο εν λόγω καθορισμός περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού προστασίας με συγκεκριμένες δυνατότητες, την κατάστρωση της λογικής του σχήματος και τη συνολική αποτύπωσή του επί σχηματικού διαγράμματος. Για τον καθορισμό του σχήματος προστασίας λαμβάνονται υπόψη τυχόν υφιστάμενα σχήματα προστασίας παρακείμενων τμημάτων, καθώς και οι ισχύοντες κανονισμοί ή πρότυπα προστασίας, όπως έχουν υιοθετηθεί στο υπόλοιπο δίκτυο.

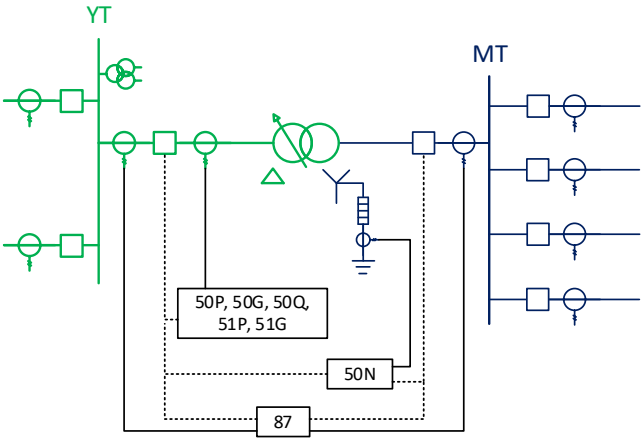
Εντός κάθε ζώνης προστασίας εφαρμόζεται πάντοτε μία κύρια προστασία (main protection) και μία ή περισσότερες επικουρικές (in-zone backup protection) διαφορετικού είδους, για λόγους εφεδρείας. Η

κύρια και οι επικουρικές προστασίες αποτελούν την πρωτεύουσα προστασία ή προστασία 1ης βαθμίδας (primary protection) για σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας. Σε περίπτωση αστοχίας της πρωτεύουσας προστασίας, γειτονικά μέσα προστασίας αναλαμβάνουν την εκκαθάριση του σφάλματος, παρέχοντας επικουρική προστασία (backup/standby protection) με χρονική διαβάθμιση, τα οποία βρίσκονται είτε στον ίδιο υποσταθμό (local backup) είτε σε παρακείμενο (remote backup). Το σύνολο των επικουρικών προστασιών εκτός της προστατευόμενης ζώνης συνιστά τη δευτερεύουσα προστασία ή προστασία 2ης βαθμίδας (secondary protection).

Ανεπιτυχής εκκαθάριση σφάλματος από την πρωτεύουσα προστασία είναι πιθανή εξαιτίας:

- προβληματικής λειτουργίας του ηλεκτρονόμου προστασίας,
- ανεπαρκούς μετασχηματιστή έντασης ή τάσης,
- διακοπής του κυκλώματος τροφοδοσίας του ηλεκτρονόμου προστασίας από τους μετασχηματιστές έντασης και τάσης,
- απώλειας της πηγής συνεχούς ρεύματος (ΣΡ),
- διακοπής του κυκλώματος μεταβίβασης της εντολής πτώσης από τον ηλεκτρονόμο προστασίας στον διακόπτη ισχύος,
- αστοχίας του διακόπτη ισχύος κατά το άνοιγμα.

Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται παράδειγμα εφαρμογής κύριας και επικουρικών προστασιών σε ζώνη προστασίας Μ/Σ εντός υποσταθμού (Υ/Σ) ΥΤ/ΜΤ. Το δίκτυο του παραδείγματος αποτελείται από τον Μ/Σ ισχύος, τον ζυγό ΜΤ και τις γραμμές διανομής που αναχωρούν από τον Υ/Σ. Κύρια προστασία για σφάλματα εντός της ζώνης του Μ/Σ παρέχεται από τη διαφορική προστασία (κωδικός ANSI/IEEE 87). Η προστασία υπερέντασης στην πλευρά ΥΤ (κωδικοί ANSI/IEEE 50/51P,G,Q) παρέχει επικουρική προστασία στον Μ/Σ έναντι εσωτερικών σφαλμάτων (in-zone backup protection) και δευτερεύουσα προστασία στο δίκτυο ΜΤ. Τέλος, η προστασία υπερέντασης γης στον γειωμένο ουδέτερο κόμβο του Μ/Σ (κωδικός ANSI/IEEE 50N) παρέχει δευτερεύουσα προστασία έναντι σφαλμάτων γης στο δίκτυο ΜΤ.



Σχήμα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα προστασίας Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ.

1.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η υλοποίηση του επιθυμητού σχήματος προστασίας επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση του επιλεγμένου εξοπλισμού προστασίας, τη σύνδεσή του με τα κυκλώματα ελέγχου και τα δίκτυα επικοινωνιών, καθώς και την εκτέλεση των απαραίτητων ελέγχων βάσει πρωτοκόλλου, προτού τεθούν όλες οι συνιστώσες σε λειτουργία. Τελικό αποτέλεσμα των προηγούμενων ενεργειών είναι η εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου τοπικού συστήματος προστασίας (protective relaying system). Τα συστήματα προστασίας δεν θα πρέπει να συγχέονται με τα συστήματα ελέγχου των ΣΗΕ. Τα μεν συστήματα προστασίας αποσυνδέουν αυτόματα συνιστώσες του ΣΗΕ, με στόχο την απομόνωση του σφάλματος και την αποφυγή βλάβης στον εξοπλισμό ισχύος, τα δε συστήματα ελέγχου προσαρμόζουν αυτόματα τις παραμέτρους λειτουργίας του ΣΗΕ (π.χ. τάση, συχνότητα), με στόχο την ασφαλή λειτουργία και την ακεραιότητα του ΣΗΕ.

Βασικές συνιστώσες των συστημάτων προστασίας είναι οι ηλεκτρονόμοι προστασίας, οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος, οι μετασχηματιστές έντασης, οι μετασχηματιστές τάσης, τα κυκλώματα ελέγχου ΣΡ, οι ηλεκτρονόμοι μανδάλωσης και τα δίκτυα επικοινωνιών.

1.2.1 Διακόπτες Ισχύος

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας ανιχνεύουν σφάλματα στο δίκτυο, δεν μπορούν όμως να τα εκκαθαρίσουν. Η εκκαθάριση των σφαλμάτων επιτελείται από τους αυτόματους διακόπτες (Α/Δ) ή διακόπτες ισχύος (Δ/Ι), όπως αποκαλούνται εναλλακτικά. Σε περίπτωση σφάλματος, ο σχετικός Η/Ν αποστέλλει εντολή για άνοιγμα (πτώση) του αντίστοιχου Δ/Ι, απομονώνοντας με αυτόν τον τρόπο το πληγέν τμήμα του δικτύου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πλήρης προστασία σε ένα ΣΗΕ επιτυγχάνεται, όταν οι γειτονικές ζώνες προστασίας επικαλύπτονται στις θέσεις των Δ/Ι. Επιπλέον, η επιθυμητή επίδοση ενός συστήματος προστασίας εξαρτάται άμεσα από την κατάλληλη διαστασιολόγηση και επιλογή των Δ/Ι, βάσει των ισχυόντων κανονισμών ανά είδος εγκατάστασης.

Σύμφωνα με τα πρότυπα [6], [7], βασικά στοιχεία καθορισμού των Δ/Ι είναι:

- η χαρακτηριστική τάση σε kV,
- το ονομαστικό ρεύμα συνεχούς λειτουργίας σε Α,
- το ονομαστικό ρεύμα διακοπής βραχυκυκλώματος σε kA,
- το ονομαστικό ρεύμα ζεύξης σε βραχυκύκλωμα σε kA,
- ο χρόνος διακοπής σε ms.

1.2.2 Μετασχηματιστές Έντασης

Οι μετασχηματιστές έντασης (Μ/Ε) αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των συστημάτων προστασίας, διότι τροφοδοτούν τους ηλεκτρονόμους και τα όργανα μέτρησης με το ρεύμα του επιτηρούμενου εξοπλισμού ισχύος, υποβιβασμένο σε κατάλληλο επίπεδο (τυπικά, 1 ή 5 Α). Διακρίνονται σε Μ/Ε προστασίας και Μ/Ε μέτρησης, κατ' αντιστοιχία με το είδος της συσκευής που τροφοδοτούν. Η επαρκής διαστασιολόγηση των Μ/Ε σε ένα δίκτυο είναι μείζονος σημασίας, διότι η ακρίβεια της λειτουργίας των στοιχείων προστασίας στους Η/Ν επηρεάζεται άμεσα από την ακρίβεια των Μ/Ε, τόσο κατά τη μεταβατική όσο και κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας των Μ/Ε.

Σύμφωνα με τα πρότυπα [8], [9], βασικά στοιχεία καθορισμού των Μ/Ε είναι:

- το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος σε Α,
- ο αριθμός δευτερευόντων τυλιγμάτων,
- το ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος σε Α,
- η ονομαστική ισχύς εξόδου ή επιφόρτιση σε VA,
- η κλάση ακρίβειας.

1.2.3 Μετασχηματιστές Τάσης

Ο ρόλος των μετασχηματιστών τάσης (Μ/Τ) στα συστήματα προστασίας είναι πανομοιότυπος με αυτόν των Μ/Ε. Συγκεκριμένα, οι Μ/Τ τροφοδοτούν τους ηλεκτρονόμους και τα όργανα μέτρησης με την τάση του δικτύου στο σημείο επιτήρησης, υποβιβασμένη σε κατάλληλο επίπεδο (τυπικά, 100, 110 ή 120 V). Διακρίνονται σε Μ/Τ προστασίας και Μ/Τ μέτρησης, ενώ χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες ως προς την κατασκευή τους: τους μαγνητικούς ή επαγωγικούς Μ/Τ (αναφέρονται απλώς ως Μ/Τ) και τους χωρητικούς Μ/Τ (capacitive voltage transformers, CVTs ή coupling-capacitor voltage transformers, CCVTs). Οι μεν επαγωγικοί Μ/Τ χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές δικτύων διανομής και υπομεταφοράς, ενώ οι χωρητικοί Μ/Τ εγκαθίστανται σε δίκτυα μεταφοράς ΥΤ και ΥΥΤ (> 138 kV) για λόγους οικονομίας.

Σύμφωνα με τα πρότυπα [9], [10], βασικά στοιχεία καθορισμού των Μ/Τ είναι:

- ο λόγος μετασχηματισμού,
- ο αριθμός δευτερευόντων τυλιγμάτων,

- η ονομαστική ισχύς εξόδου ή επιφόρτιση σε VA,
- η κλάση ακρίβειας.

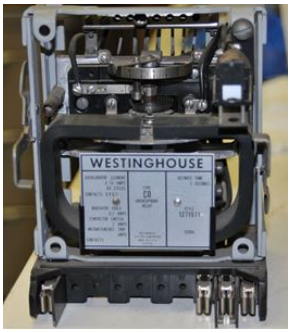
1.2.4 Ηλεκτρονόμοι Προστασίας

Ο όρος ηλεκτρονόμος (Η/Ν) χρησιμοποιείται γενικά για κάθε συσκευή που επιτηρεί ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά μεγέθη, δέχεται σήματα ελέγχου και επιφέρει προκαθορισμένες μεταβολές σε ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά κυκλώματα, όταν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Το σύνολο των ηλεκτρονόμων διαιρείται σε έξι γενικές κατηγορίες ως προς τη λειτουργία τους. Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρονόμοι διακρίνονται σε Η/Ν προστασίας (protection relays), Η/Ν επιτήρησης (monitoring relays), Η/Ν επαναφοράς (reclosing relays), ρυθμιστές (regulating relays), βοηθητικούς Η/Ν (auxiliary relays) και Η/Ν ελέγχου συγχρονισμού (synchro-check relays) [1]. Στο εξής, ο όρος Η/Ν θα χρησιμοποιείται για αναφορά σε Η/Ν προστασίας, εκτός εάν επισημαίνεται διαφορετικά.

Ο Η/Ν προστασίας αποτελεί ειδική συσκευή, η οποία δέχεται στις αναλογικές εισόδους της τα προς επιτήρηση ηλεκτρικά μεγέθη (εντάσεις και τάσεις), εκτελεί υπολογισμούς και αποστέλλει εντολές μέσω των ψηφιακών εξόδων της σε άλλες συσκευές, όταν πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια. Οι οίκοι κατασκευής Η/Ν έχουν αναπτύξει σημαντικά την τεχνολογία τους στο πέρασμα του χρόνου, επιτυγχάνοντας την αύξηση των δυνατοτήτων των Η/Ν με ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους τους.

Χρονολογικά, η τεχνολογία των Η/Ν εξελίχθηκε ως εξής:

- 1η γενιά: ηλεκτρομηχανικοί Η/Ν (χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυκλωμάτων),
- 2η γενιά: στατικοί Η/Ν (απουσία κινητών μερών και χρήση αναλογικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων),
- 3η γενιά: ψηφιακοί Η/Ν (αντικατάσταση αναλογικών κυκλωμάτων με ψηφιακά συστήματα),
- 4η γενιά: αριθμητικοί Η/Ν (χρήση προηγμένων επεξεργαστών).



(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 1.1: Τεχνολογίες Η/Ν: (α) ηλεκτρομηχανικοί, (β) στατικοί, (γ) ψηφιακοί, (δ) αριθμητικοί.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ηλεκτρομηχανικοί και οι στατικοί Η/Ν παρείχαν ένα είδος προστασίας (π.χ. Η/Ν υπερέντασης, Η/Ν υπότασης), ενώ οι ψηφιακοί και οι αριθμητικοί Η/Ν παρέχουν πληθώρα στοιχείων προστασίας (protection elements) και συνδυάζουν πολλαπλές λειτουργίες (multi-function relays). Ως εκ τούτου, η υλοποίηση του απαιτούμενου σχήματος προστασίας στις σύγχρονες εφαρμογές

επιτυγχάνεται με τη χρήση μικρότερου αριθμού Η/Ν, συγκριτικά με παλαιότερες εφαρμογές ίδιων απαιτήσεων. Στα πλεονεκτήματα των ψηφιακών και των αριθμητικών Η/Ν προστίθενται η ικανότητά τους να επικοινωνούν με άλλες συσκευές ή συστήματα, η εκτέλεση προηγμένων αλγορίθμων εντοπισμού σφάλματος, η εκτέλεση αυτοδιαγνωστικού ελέγχου, καθώς επίσης και η δυνατότητα καταγραφής και αποθήκευσης αρχείων συμβάντων. Οι Η/Ν τελευταίας γενιάς με τις προηγούμενες δυνατότητες ανήκουν στη γενική κατηγορία των έξυπνων ηλεκτρονικών συσκευών (intelligent electronic devices, IEDs).

Σύμφωνα με το πρότυπο [11], βασικά στοιχεία καθορισμού των Η/Ν είναι:

- τα απαιτούμενα στοιχεία προστασίας,
- οι ονομαστικές τιμές των αναλογικών εισόδων (τυπικά, 1 ή 5 A και 100, 110 ή 120 V)
- η παροχή τάσης σε Vac ή Vdc,
- η ονομαστική τάση των ψηφιακών εισόδων σε Vdc,
- ο απαιτούμενος αριθμός αναλογικών και ψηφιακών εισόδων/εξόδων (I/Os),
- οι διεπαφές και τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα επικοινωνίας.

1.2.5 Κυκλώματα Ελέγχου ΣΡ

Τα κυκλώματα ελέγχου ΣΡ σε ένα σύστημα προστασίας είναι υπεύθυνα για τη μετάδοση εντολών και σημάτων μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών, καθώς και για την τροφοδοσία των ψηφιακών συσκευών εντός της εγκατάστασης (Η/Ν, όργανα μέτρησης, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, επικοινωνιακός εξοπλισμός, ρυθμιστής τάσης Μ/Σ κτλ.). Ενδεικτικά παραδείγματα κυκλωμάτων ελέγχου είναι τα κυκλώματα εντολών πτώσης Δ/Ι, τα κυκλώματα εντολών κλεισίματος Δ/Ι, τα κυκλώματα αλληλομανδαλώσεων και τα κυκλώματα σημάνσεων. Η κρισιμότητα των συγκεκριμένων κυκλωμάτων καθιστά άκρως απαραίτητη την αδιάλειπτη παροχή ισχύος προς αυτά. Η αδιάλειπτη λειτουργία τους εξασφαλίζεται από ανεξάρτητο κύκλωμα ΣΡ, το οποίο τροφοδοτείται από ειδικό φορτιστή και κατάλληλες συστοιχίες συσσωρευτών μέσω πίνακα διανομής ΣΡ. Τα συνήθη επίπεδα συνεχούς τάσης που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι 24, 48, 110, 125, 220 και 250 Vdc. Τα κυκλώματα ελέγχου ΣΡ προστατεύονται με χρήση ασφαλειών ή μικροαυτόματων διακοπτών.

1.2.6 Ηλεκτρονόμος Μανδάλωσης

Ο Η/Ν μανδάλωσης (lockout relay) είναι βοηθητικός Η/Ν δύο καταστάσεων (δισταθής) με πολλές επαφές. Όταν διεγερθεί, μεταβαίνει στη νέα θέση και μανδαλώνει σε αυτή, ενώ η επαναφορά του επιτυγχάνεται είτε με τοπικό χειρισμό είτε με απομακρυσμένη εντολή. Ο ρόλος του Η/Ν μανδάλωσης είναι να διατηρεί τον Δ/Ι ανοικτό έπειτα από πτώση, με απώτερο στόχο την αποτροπή ακούσιου κλεισίματός του σε σφάλμα. Ως εκ τούτου, η φιλοσοφία εφαρμογής του επιτάσσει την αναγνώριση της διέγερσής του από το αρμόδιο προσωπικό και την επαναφορά του, μόνο εφόσον το αίτιο διέγερσής του έχει εξαλειφθεί.

1.2.7 Συστήματα Επικοινωνίας

Τα σύγχρονα συστήματα προστασίας, αποτελούμενα από ψηφιακούς ή αριθμητικούς Η/Ν με επικοινωνιακή ικανότητα, δεν εφαρμόζονται αυτόνομα. Αντιθέτως, ενσωματώνονται στο Ψηφιακό Σύστημα Ελέγχου (ΨΣΕ) της εγκατάστασης, ανταλλάσσοντας πληροφορίες και σήματα με τις υπόλοιπες συνιστώσες του, όπως είναι για παράδειγμα το τοπικό σύστημα επιτήρησης (SCADA). Εάν πρόκειται για δίκτυο εταιρείας ηλεκτρισμού, οι Η/Ν μπορούν επίσης να επικοινωνούν με το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) προσφέροντας πολλαπλά οφέλη στη διαχείριση λειτουργίας του ΣΗΕ, όπως είναι για παράδειγμα η επιτήρηση του συστήματος, η εκτέλεση χειρισμών, η αποστολή καταγραφών συμβάντων σε πραγματικό χρόνο, η πρόσβαση στις ρυθμίσεις των Η/Ν χωρίς να απαιτείται μετάβαση προσωπικού στον σχετικό Υ/Σ, η δυνατότητα εφαρμογής ειδικών σχημάτων προστασίας συστήματος κ.α.

Διαχρονικά, η μεγαλύτερη πρόκληση των συστημάτων επικοινωνίας στα ΣΗΕ ήταν η διαλειτουργικότητα (interoperability) των συνιστωσών τους, η οποία επιτυγχάνεται σήμερα με χρήση τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Πλέον, η διεθνής κοινότητα έχει στρέψει την προσοχή της στη βελτιστοποίηση της ασφάλειας των δικτύων έναντι κυβερνοεπιθέσεων (cybersecurity), λόγω της

κρισιμότητας της διακινούμενης πληροφορίας [12]. Συγκεκριμένα, η τεχνική επιτροπή Power System Communications and Cybersecurity Committee (PSCC) και η ομάδα εργασίας WG15 της τεχνικής επιτροπής IEC TC57, εργάζονται με στόχο την ανάπτυξη προτύπων και οδηγιών για την τυποποίηση των επικοινωνιών στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιγραμματικά, πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές προστασίας, και υποστηρίζονται από τους διαθέσιμους Η/Ν στην αγορά, είναι τα εξής:

- MODBUS (ευρεία εφαρμογή σε βιομηχανικά δίκτυα),
- DNP 3.0 (εφαρμογή σε συστήματα SCADA εταιρειών ηλεκτρισμού και ύδρευσης),
- IEC 60870-5-103 (εφαρμογή σε συστήματα επικοινωνίας ηλεκτρικών δικτύων),
- IEC 61850 (νέο πρότυπο για συστήματα προστασίας και ελέγχου ηλεκτρικών δικτύων),
- IEEE C37.118 (εφαρμογή στα συστήματα προστασίας με συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών).

Επιπλέον πρωτόκολλα επικοινωνίας των προαναφερθέντων έχουν αναπτυχθεί από οίκους κατασκευής Η/Ν, τα οποία όμως υποστηρίζονται αποκλειστικά και μόνο από τις συσκευές τους (vendor proprietary protocols). Η επιλογή των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας οδηγεί σε αναγκαστική χρήση εξοπλισμού από τον ίδιο οίκο σε όλη την εγκατάσταση, παραβιάζοντας την αρχή της διαλειτουργικότητας, και επομένως δεν προτιμάται στα σύγχρονα συστήματα προστασίας.

Οι ψηφιακοί και οι αριθμητικοί Η/Ν διαθέτουν μία ή περισσότερες σειριακές θύρες ή θύρες Ethernet, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως διεπαφή (interface) με τις υπόλοιπες συσκευές του ΨΣΕ. Ως φυσικά μέσα επικοινωνίας εντός της εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται είτε καλώδια επικοινωνίας (RS232, RS485) είτε οπτικές ίνες. Εάν πρόκειται για δίκτυο εταιρείας ηλεκτρισμού, στο οποίο είναι απαραίτητη η μετάδοση πληροφοριών μεταξύ απομακρυσμένων περιοχών (π.χ. επικοινωνία ΚΕΕ με Υ/Σ), ως μέσο επικοινωνίας χρησιμοποιείται σήμερα ειδική οπτική ίνα ενσωματωμένη στον αγωγό γης των γραμμών μεταφοράς (optical ground wire, OPGW), ενώ παραδοσιακά γινόταν χρήση φερεσυχνιακής ζεύξης (power line carrier, PLC) μέσω των ηλεκτροφόρων αγωγών των γραμμών μεταφοράς (συνήθως μέσω της φάσης Β).

Η αποστολή και λήψη σημάτων μέσω δικτύων επικοινωνίας, η ανάκτηση πληροφοριών από τις έξυπνες συσκευές σε πραγματικό χρόνο, η εκτέλεση των αλγορίθμων ελέγχου και προστασίας, καθώς και η καταγραφή συμβάντων απαιτούν ακριβή χρονοσυγχρονισμό (time synchronization) μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος προστασίας [4]. Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (global positioning system, GPS) παρέχει τη χρονική αναφορά στην πλειονότητα των εφαρμογών και κάθε διακινούμενη πληροφορία εντός του δικτύου επικοινωνίας φέρει χρονοσήμανση (time stamp). Ο χρονοσυγχρονισμός κάθε συσκευής μπορεί να επιτευχθεί είτε απευθείας είτε μέσω του τοπικού δικτύου (LAN). Ο απευθείας χρονοσυγχρονισμός απαιτεί ξεχωριστή καλωδίωση, ενώ το πρωτόκολλο που έχει επικρατήσει στα συστήματα προστασίας είναι το IRIG-B. Από την άλλη πλευρά, ο χρονοσυγχρονισμός μέσω LAN επιτυγχάνεται με χρήση των υφιστάμενων καλωδίων Ethernet και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συστημάτων προστασίας είναι τα SNTP (Simple Network Time Protocol) και IEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol).

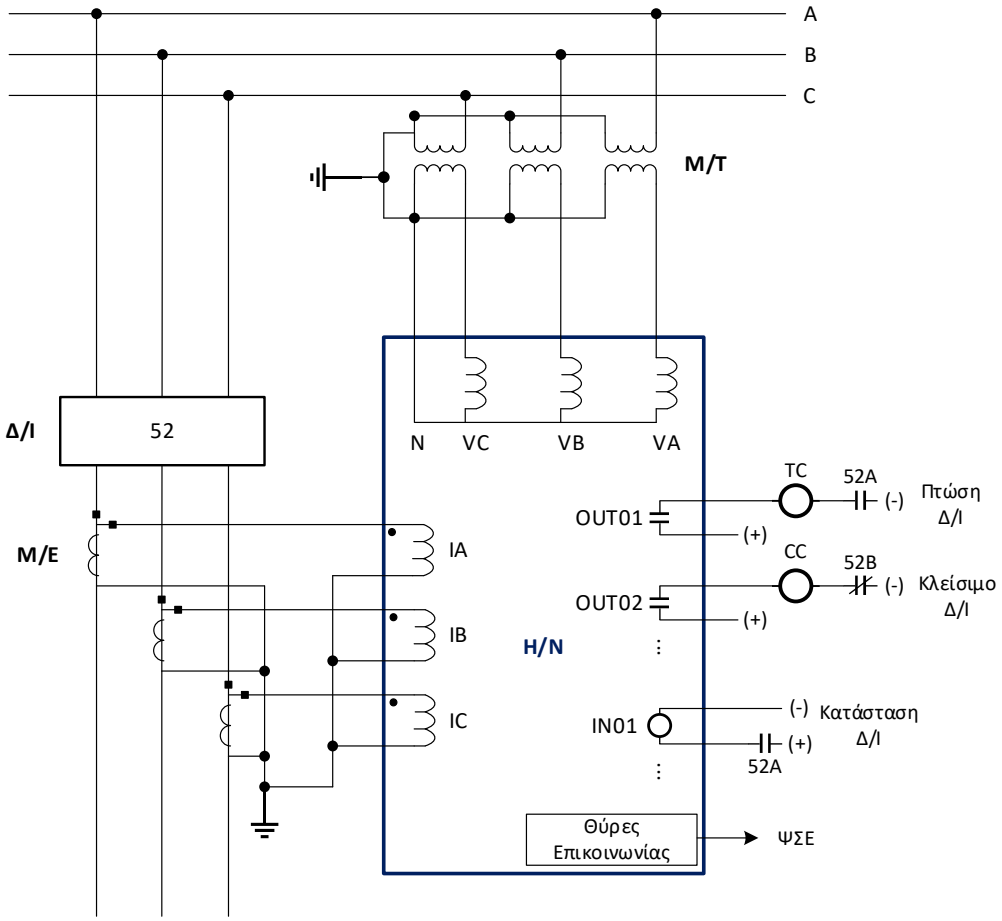
Τέλος, ειδική εφαρμογή των επικοινωνιών στα συστήματα προστασίας αποτελούν τα σχήματα τηλεπροστασίας (teleprotection ή pilot protection schemes), τα οποία παρέχουν ταχεία εκκαθάριση σφάλματος κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς ή καλωδίων ΥΤ, ενώ απαιτούν επικοινωνία μεταξύ των Η/Ν στα άκρα του προστατευόμενου τμήματος [1], [4], [13]. Γενικά, τα σχήματα τηλεπροστασίας διακρίνονται σε:

- σχήματα σύγκρισης κατεύθυνσης (directional comparison schemes),
- σχήματα σύγκρισης φάσης (phase comparison schemes),
- σχήματα διαφορικής προστασίας γραμμής (line differential schemes).

1.2.8 Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Προστασίας

Στο Σχήμα 1.3 αποτυπώνεται ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζονται όλες οι προηγούμενες συνιστώσες για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται απλουστευμένη εφαρμογή προστασίας γραμμής μεταφοράς. Επισημαίνεται ότι τα συστήματα προστασίας, όπως αναλύθηκαν έως τώρα, εφαρμόζονται σε δίκτυα ΥΥΤ, ΥΤ και ΜΤ. Σε δίκτυα ΧΤ (βιομηχανικά,

δημόσια, κτιριακά κτλ.) εφαρμόζονται απλούστερα μέσα προστασίας, για οικονομικούς και πρακτικούς λόγους, όπως είναι οι ασφάλειες, οι διακόπτες ΧΤ με ενσωματωμένη μονάδα προστασίας, οι μικροαυτόματοι διακόπτες και οι διακόπτες διαφυγής ρεύματος.



Σχήμα 1.3: Παράδειγμα εφαρμογής προστασίας γραμμής μεταφοράς.

1.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Ένα κατάλληλα σχεδιασμένο και αποτελεσματικό σύστημα προστασίας ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια στο μέγιστο δυνατό βαθμό, με στόχο τη διασφάλιση της «μακροβιότητας» του ΣΗΕ. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η πλήρης και ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των απαιτούμενων κριτηρίων είναι πρακτικά ανέφικτη, γεγονός που οδηγεί τους μηχανικούς προστασίας σε αναγκαίους συμβιβασμούς. Τα υποψήφια σενάρια συμβιβασμού εξετάζονται προσεκτικά, συγκρίνοντας τις επιπτώσεις τους στη λειτουργία του ΣΗΕ, και προκρίνονται αυτά που εγγυώνται ένα σύστημα προστασίας υψηλής ποιότητας. Βασικές παράμετροι σχεδιασμού που καθορίζουν την ποιότητα ενός συστήματος προστασίας είναι [1]:

- η αξιοπιστία (reliability),
- η απλότητα (simplicity),
- η οικονομικότητα (economics).

Η αξιοπιστία αποτελεί το βασικό κριτήριο σχεδιασμού των συστημάτων προστασίας και εξαρτάται άμεσα από τον κατάλληλο συγκερασμό δύο δεικτών [1]. Ο πρώτος δείκτης είναι η εμπιστευσιμότητα της προστασίας (dependability), δηλαδή ο βαθμός βεβαιότητας ότι η προστασία θα λειτουργήσει επιτυχώς για οποιοδήποτε σφάλμα εντός της ζώνης επιτήρησης, ενώ ο δεύτερος δείκτης είναι η ασφάλεια (security), δηλαδή ο βαθμός βεβαιότητας ότι η προστασία δεν θα λειτουργήσει ανεπιθύμητα για σφάλμα εκτός της επιτηρούμενης ζώνης. Είναι εμφανές, ότι η προσπάθεια βελτίωσης του ενός δείκτη οδηγεί σε υποβάθμιση

του άλλου. Συνεπώς, απώτερος στόχος είναι η επίτευξη του βέλτιστου συμβιβασμού μεταξύ των δύο δεικτών κατά περίπτωση.

Το κριτήριο της απλότητας έχει στόχο την υλοποίηση του επιθυμητού σχήματος προστασίας με τον ελάχιστο αριθμό συσκευών και συνδέσεων. Γενικά, τα συστήματα προστασίας πρέπει να σχεδιάζονται απλά, ούτως ώστε η συντήρησή τους και η αποκατάσταση προβλημάτων να πραγματοποιούνται με ευκολία.

Τέλος, το επιθυμητό σχήμα προστασίας θα πρέπει να υλοποιείται με το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει την προμήθεια, την εγκατάσταση, την παραμετροποίηση, τον έλεγχο και τη συντήρηση των μέσων προστασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η πολυπλοκότητα και η κρισιμότητα του προστατευόμενου εξοπλισμού, τόσο υψηλότερο είναι το κόστος της προστασίας. Η επιλογή συσκευών και παρελκομένων χαμηλής ποιότητας ενδέχεται να οδηγήσει σε καταστροφή πολύτιμου εξοπλισμού ή σε άσκοπη διακοπή της λειτουργίας του δικτύου, επιφέροντας επιπρόσθετες δαπάνες για την αποκατάσταση της φυσικής ή οικονομικής ζημίας. Κατά προσέγγιση, το κόστος της προστασίας κυμαίνεται από 1% έως 2% του προστατευόμενου εξοπλισμού ισχύος.

1.3.1 Χαρακτηριστικά Αξιόπιστου Συστήματος Προστασίας

Η αξιοπιστία αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του σχεδιασμού συστημάτων προστασίας. Ένα αξιόπιστο σύστημα προστασίας συνδυάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- πλεονασμό (redundancy),
- υψηλή επίδοση (high performance),
- συντηρησιμότητα (maintainability),
- διαθεσιμότητα (availability).

1.3.1.1 Πλεονασμός

Σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ή τμήματα ΣΗΕ, όπου η επιτυχής και έγκαιρη εκκαθάριση των σφαλμάτων είναι κρίσιμη για την ασφαλή λειτουργία τους, η αύξηση της αξιοπιστίας επιτυγχάνεται με τη χρήση εναλλακτικών συνιστωσών ίδιας λειτουργίας στο εφαρμοζόμενο σχήμα προστασίας [14]. Σύμφωνα με την οδηγία [15], ο πλεονασμός της προστασίας (protection redundancy) ορίζεται ως ο σχεδιασμός του συστήματος προστασίας με τέτοιο τρόπο ώστε να προλαμβάνεται η πιθανή δυσλειτουργία του σε εσωτερικά σφάλματα, εξαιτίας αστοχίας κάποιας συνιστώσας του. Τυπικά παραδείγματα πλεονασματικής προστασίας είναι η χρήση διπλών Η/Ν διαφορετικού κατασκευαστή στα δίκτυα ΥΥΤ, η εγκατάσταση διπλών Η/Ν προστασίας γεννητριών σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής, η τροφοδοσία της κύριας και της επικουρικής προστασίας από διαφορετικό Μ/Ε ή από ξεχωριστό πυρήνα κοινού Μ/Ε και η χρήση δύο διακριτών πηνίων πτώσης στους Δ/Ι ΥΤ.

1.3.1.2 Υψηλή Επίδοση

Η υψηλή επίδοση ενός συστήματος προστασίας εξαρτάται άμεσα από την ικανοποίηση των παρακάτω τεχνικών απαιτήσεων.

- **Ευαισθησία (sensitivity):** Η προστασία πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητη, να διεγείρεται δηλαδή για σφάλματα μικρής έντασης, εντός ή εκτός της ζώνης που επιτηρεί. Ταυτόχρονα, πρέπει να εξασφαλίζεται η αδράνειά της υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.
- **Επιλογικότητα (selectivity):** Η προστασία πρέπει να αποφασίζει ορθά εάν θα δράσει ταχύτατα, θα λειτουργήσει με καθυστέρηση ή θα αδρανήσει, έτσι ώστε να απομονωθεί η μικρότερη δυνατή περιοχή του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Η κύρια προστασία κρίσιμου εξοπλισμού ισχύος πρέπει να είναι απολύτως επιλογική, να λειτουργεί δηλαδή ακαριαία για εσωτερικά σφάλματα και να παραμένει αδρανής για εξωτερικά (π.χ. διαφορική προστασία Μ/Σ, τηλεπροστασία γραμμής μεταφοράς). Η συγκεκριμένη τεχνική ονομάζεται προστασία μονάδας (unit protection). Στις περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζεται προστασία μονάδας, το συγκεκριμένο κριτήριο ικανοποιείται με την κατάλληλη διαβάθμιση μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας (protection coordination).
- **Ταχύτητα (speed):** Η ταχύτητα λειτουργίας της προστασίας καθορίζει τον χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος, ο οποίος είναι κρίσιμος για τον περιορισμό της προκληθείσας βλάβης στον

προστατευόμενο εξοπλισμό, καθώς και για την ευστάθεια του ΣΗΕ. Η σκόπιμη χρονική καθυστέρηση είναι απαραίτητη σε πολλές περιπτώσεις για την επιλογική συνεργασία πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας, καθώς και για την αποφυγή ανεπιθύμητης λειτουργίας της προστασίας κατά τη διάρκεια παροδικών φαινομένων.

1.3.1.3 Συντηρησιμότητα

Τα συστήματα προστασίας σχεδιάζονται και εφαρμόζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η συντήρησή τους. Οι περιοδικές εργασίες συντήρησης του συστήματος προστασίας εξυπηρετούν ως διαγνωστικός έλεγχος, ο οποίος επιβεβαιώνει την καλή κατάσταση των συνιστωσών του και εντοπίζει τυχόν προβλήματα ή αδυναμίες στη λειτουργία τους, διαφυλάσσοντας με αυτόν τον τρόπο την εμπιστευσιμότητα και την ασφάλεια της προστασίας. Ως εκ τούτου, η αξιοπιστία των συστημάτων προστασίας εξαρτάται άμεσα από την επαρκή συντήρησή τους.

1.3.1.4 Διαθεσιμότητα

Η αξιοπιστία του συστήματος προστασίας εξαρτάται επίσης από τη διαθεσιμότητα των επιμέρους συνιστωσών του. Τυχόν αστοχία τους θα πρέπει να εντοπίζεται και να αποκαθίσταται εν ευθέτω χρόνω. Εάν η αποκατάσταση του προβλήματος απαιτεί απενεργοποίηση εξοπλισμού ισχύος ή προστασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα, η λειτουργία του δικτύου θα πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα, όπου είναι αναγκαίο, συνεκτιμώντας τις συνέπειες ενδεχόμενης επιπλέον αστοχίας του συστήματος προστασίας.

1.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ & ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

1.4.1 Είδη Ηλεκτρικών Σφαλμάτων

Με τον όρο ηλεκτρικό σφάλμα εννοείται, γενικά, κάθε περίπτωση ανωμαλίας στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου [1], [2]. Όπως έχει ήδη σημειωθεί, οι Η/Ν προστασίας διακρίνουν τα σφάλματα από τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας, επιτηρώντας τα ηλεκτρικά μεγέθη στο σημείο εγκατάστασής τους. Τα βασικά είδη σφαλμάτων είναι:

- το βραχυκύκλωμα,
- η βύθιση και η ανύψωση τάσης (βραχείας διάρκειας),
- η υπόταση και η υπέρταση (μακράς διάρκειας),
- η υποσυχνότητα και η υπερσυχνότητα,
- η υπερφόρτιση κλάδου,
- η ασύμμετρη φόρτιση μηχανής,
- η διακοπή αγωγών φάσεων (ανοικτοκύκλωμα).

Οι βασικές αιτίες που οδηγούν σε εκδήλωση σφάλματος μπορούν να ομαδοποιηθούν στις εξής πέντε γενικές κατηγορίες:

- απώλεια της μονωτικής ικανότητας (insulation failure) του εξοπλισμού ισχύος, εξαιτίας ελαττωματικών υλικών, κακής εγκατάστασης, γήρανσης του εξοπλισμού, χαλαρών συνδέσεων, ρύπανσης κτλ.,
- ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, π.χ. κεραυνικά πλήγματα, μεταβατικές υπερτάσεις χειρισμών, επανηλέκτριση εξοπλισμού ισχύος,
- θερμική καταπόνηση του εξοπλισμού ισχύος, εξαιτίας αστοχίας του συστήματος ψύξης, υπερβολικά υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, χαμηλής τάσης λειτουργίας κτλ.,
- μηχανική καταπόνηση του εξοπλισμού ισχύος, εξαιτίας ανθρωπίνου λάθους, φυσικών φαινομένων, εισβολής ζώων, πτώσης αντικειμένων κτλ.,
- βλάβη σε σύστημα ελέγχου, π.χ. σε ρυθμιστή στροφών γεννήτριας, σε αυτόματο ρυθμιστή τάσης γεννήτριας, σε σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) Μ/Σ.

Τα αίτια των σφαλμάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν επίσης να χωρισθούν σε «εξωτερικά» και «εσωτερικά» [5]. Τα κυριότερα «εξωτερικά» αίτια σφάλματος για τα εναέρια δίκτυα είναι οι

ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, η πτώση αντικειμένων, η ρύπανση των μονωτήρων, καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα, ενώ για τα υπόγεια δίκτυα είναι οι εκσκαφές. Από την άλλη πλευρά, «εσωτερικά» σφάλματα συμβαίνουν κυρίως εξαιτίας γήρανσης του εξοπλισμού, ελαττωματικής κατασκευής, χαλαρών συνδέσεων ή διαβρώσεων.

1.4.2 Είδη Προστασίας Εξοπλισμού Ισχύος

Η ανίχνευση σφαλμάτων σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων ειδών προστασίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα πρώτα χρόνια εφαρμογής των συστημάτων προστασίας, σε κάθε είδος προστασίας αντιστοιχούσε αποκλειστικός ηλεκτρομηχανικός Η/Ν, με συνέπεια την απαίτηση μεγάλου πλήθους συσκευών για την υλοποίηση του επιθυμητού σχήματος προστασίας. Στα σύγχρονα συστήματα προστασίας, χρησιμοποιούνται Η/Ν πολλαπλών λειτουργιών, οι οποίοι συνδυάζουν διαφορετικά είδη προστασίας, μειώνοντας σημαντικά το πλήθος των απαιτούμενων συσκευών.

Τα διάφορα είδη συσκευών και λειτουργιών που χρησιμοποιούνται στα ψηφιακά συστήματα ελέγχου και προστασίας Υ/Σ, ΚΥΤ, μονάδων παραγωγής, και γενικότερα ηλεκτρικών δικτύων κωδικοποιούνται σύμφωνα με τα σχετικά διεθνή πρότυπα [16], [17]. Για λόγους απλότητας, έχει επικρατήσει η αλφαριθμητική κωδικοποίηση βάσει του προτύπου [16], το οποίο εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1928. Πλέον, γίνεται εκτεταμένη χρήση και της κωδικοποίησης κατά IEC 61850, λόγω της καθολικής εφαρμογής του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου στα σύγχρονα συστήματα προστασίας. Σε αντίθεση με το πρότυπο [16] και το πρωτόκολλο IEC 61850, το πρότυπο [17] χρησιμοποιεί σύμβολο αντί αλφαριθμητικής τιμής για κάθε συσκευή ή λειτουργία, γεγονός που το καθιστά δύσχρηστο. Το εν λόγω πρότυπο χρησιμοποιείται από ευρωπαϊκούς οίκους κατασκευής Η/Ν, ενώ έχει περιορισμένη χρήση διεθνώς.

Ο εποπτικός Πίνακας 1.1 συγκεντρώνει τους τύπους σφάλματος, τα επιτηρούμενα ηλεκτρικά μεγέθη και το αντίστοιχο είδος προστασίας, ανά κατηγορία εξοπλισμού ισχύος. Επισημαίνεται ότι ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τα κύρια είδη προστασίας των βασικών συνιστωσών ισχύος ενός ΣΗΕ και δεν εξαντλεί όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, συγκεντρώνει όλα τα πιθανά είδη προστασίας που μπορούν να εφαρμοστούν ανά εξοπλισμό. Στην πράξη, ο αριθμός και το είδος των προστασιών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από το μέγεθος και την κρισιμότητα του προστατευόμενου εξοπλισμού.

Πίνακας 1.1: Είδη προστασίας εξοπλισμού ισχύος

ΤΥΠΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	ΚΩΔΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ [16]	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ						ΕΠΙΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ										
		ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	ΖΥΓΟΣ	ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ	$\lvert\tilde{I}_{ABC}\rvert$	$\lvert\tilde{I}_2\rvert$	$\lvert 3\tilde{I}_0\rvert$	$\lvert\tilde{V}_{ABC}\rvert$	$\lvert 3\tilde{V}_0\rvert$	$\angle(\tilde{V}_{ABC}, \tilde{I}_{ABC})$ ή $\angle(\tilde{V}_{012}, \tilde{I}_{012})$	$\tilde{Z}$	$\lvert\Delta\tilde{I}_{ABC}\rvert$	$\lvert\Delta\tilde{I}_0\rvert$	f	$\tilde{P}$
Βραχυκύκλωμα φάσεων	21	Ε		Κ										✓				
	50	Ε	Κ Ε	Ε	Κ	Ε	Κ	✓										
	51		Κ Ε	Ε	Κ	Ε	Κ	✓										
	51V	Ε						✓			✓							
	67			Κ Ε	Κ			✓					✓					
	87	Κ	Κ	Κ		Κ									✓			
Βραχυκύκλωμα γης	21G			Κ										✓				
	50G ή 50N	Ε	Κ Ε	Ε	Κ	Ε	Κ			✓								
	51G ή 51N		Κ Ε	Ε	Κ	Ε	Κ			✓								
	59G ή 59N	Κ										✓						
	67G ή 67N			Κ Ε	Κ					✓			✓					
	87G ή 64REF		Κ													✓		
Υπερφόρτιση	49	Κ	Κ				Κ	✓										
Απόκλιση Τάσης	27, 59	Κ					Κ				✓							
Απώλεια Συγχρονισμού	78	Κ												✓				
Απόκλιση Συχνότητας	81U, 81O	Κ															✓	
Ασύμμετρη Φόρτιση	46	Κ	Ε				Κ		✓									
Απώλεια Διέγερσης	40	Κ												✓				
Αντίθετη Ροή Ισχύος	32	Κ																✓
Υπερδιέγερση	24	Κ	Κ								✓						✓	
Αστοχία Δ/Ι	50BF	Ε	Ε	Ε	Ε	Ε	Ε	✓										

Σημειώσεις:

- Κ = κύρια προστασία, Ε = επικουρική προστασία.
- Οι καταλήξεις G και N στα στοιχεία προστασίας γης χρησιμοποιούνται για να διακρίνουν τον τρόπο με τον οποίο ο Η/Ν ανιχνεύει το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας (N για μέτρηση με αθροιστικό Μ/Ε ή Μ/Ε στον γειωμένο κόμβο Μ/Σ και G για εσωτερικό υπολογισμό από τον Η/Ν ή συνδεσμολογία Holmgreen). Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει κοινή σύμβαση μεταξύ των κατασκευαστών Η/Ν.
- Η προστασία αστοχίας Δ/Ι εφαρμόζεται ως τοπική επικουρική προστασία στους Υ/Σ. Χρησιμοποιεί ως κριτήρια την κατάσταση του σχετικού Δ/Ι ή/και την ανίχνευση ρεύματος, ενώ αποστέλλει εντολή πτώσης προς τους υπερκείμενους Δ/Ι, με σκοπό την απομόνωση του σφάλματος από κάθε πιθανή πηγή τροφοδοσίας.
- Οι αριθμοί 52, 79, 86 χρησιμοποιούνται για αναφορά σε Δ/Ι, στοιχεία αυτόματης επαναφοράς και Η/Ν μανδάλωσης, αντίστοιχα.

1.5 ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

1.5.1 Προστασία Σύγχρονων Δικτύων Διανομής

Τα τελευταία χρόνια, κυβερνήσεις και ρυθμιστικές αρχές παγκοσμίως έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για την αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με απώτερο σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει ως στόχους για το 2020 (γνωστοί και ως στόχοι «20-20-20»):

- τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20%, συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990,
- το 20% της κατανάλωσης ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης να προέρχεται από ΑΠΕ,
- τη βελτίωση κατά 20% της ενεργειακής απόδοσης,

ενώ, επιπλέον στόχοι για μείωση των εκπομπών CO_2 κατά 40%, 60%, 80% έχουν τεθεί για τα έτη 2030, 2040, 2050, αντίστοιχα, σύμφωνα με τον οδικό χάρτη που δημοσιεύθηκε το 2011 [18].

Οι προηγούμενοι στόχοι, σε συνδυασμό με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, οδήγησαν στην ένταξη σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής πλησίον της κατανάλωσης, σε αντίθεση με τη λογική της κεντρικής παραγωγής που ίσχυε μέχρι σήμερα, ενώ με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών υλοποιείται συγχρόνως το όραμα των ευφυών δικτύων (smart grids). Τυπικά παραδείγματα νέων τεχνολογιών είναι:

- οι προηγμένες μετρητικές υποδομές (advanced metering infrastructure, AMI),
- τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης (demand response, DR),
- τα συστήματα διαχείρισης διανομής (distribution management system, DMS),
- οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (energy storage, ES),
- τα ηλεκτρικά οχήματα (electric vehicle, EV).

Ο εν λόγω εκσυγχρονισμός έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των ΣΗΕ, μετατρέποντας τα μέχρι πρότινος παθητικά δίκτυα διανομής σε ενεργά δίκτυα. Παραδοσιακά, τα δίκτυα διανομής λειτουργούσαν σε ακτινική τοπολογία και με μοναδική πηγή τροφοδοσίας τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Αντίθετα, στα σύγχρονα δίκτυα διανομής:

- εγκαθίστανται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίες αυξάνουν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης,
- επιτρέπεται η λειτουργία τους σε βροχοειδή ή δικτυωτή τοπολογία, με συνέπεια την αμφίδρομη ροή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης,
- επιτρέπεται υπό προϋποθέσεις η αυτόνομη λειτουργία τους, υπό τη μορφή μικροδικτύων (microgrids), με αποτέλεσμα τη σημαντική μεταβολή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Οι παραπάνω τομές στη λειτουργία των σύγχρονων δικτύων διανομής καθιστούν τις υφιστάμενες τεχνικές προστασίας ανεπαρκείς. Συνεπώς, απαιτείται σαφής προσδιορισμός όλων των ενδεχόμενων προβλημάτων προστασίας και ανάπτυξη προηγμένων λύσεων για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους, με στόχο τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των σύγχρονων δικτύων διανομής.

1.5.2 Προσαρμοστική Προστασία

Η έννοια της προσαρμοστικής προστασίας είναι γνωστή από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, με τις εργασίες [19], [20] να εισαγάγουν για πρώτη φορά τον συγκεκριμένο όρο και να παρουσιάζουν την εφαρμογή της στα συστήματα μεταφοράς. Ο όρος προσαρμοστική προστασία είναι γενικός και χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό τόσο συστημάτων τοπικής προστασίας ή προστασίας ευρείας περιοχής, όσο και αλγορίθμων προστασίας ή υπολογισμού ρυθμίσεων. Σύμφωνα με την εργασία [19], η προσαρμοστική προστασία γενικά ορίζεται ως η φιλοσοφία που επιτρέπει και επιζητά την κατάλληλη προσαρμογή των στοιχείων προστασίας, έτσι ώστε να εναρμονίζονται με τις τρέχουσες συνθήκες λειτουργίας του ΣΗΕ. Συνοπτικά, η προσαρμοστική προστασία έχει τα παρακάτω κύρια χαρακτηριστικά, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της:

- τα προσαρμοστικά συστήματα προστασίας (τοπικά ή ευρείας περιοχής) αλλάζουν αυτόματα και σε πραγματικό χρόνο τιμές παραμέτρων που αφορούν στοιχεία προστασίας, όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες λειτουργίας του δικτύου,
- οι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι υπολογισμού ρυθμίσεων προσδιορίζουν τις βέλτιστες τιμές ρύθμισης των στοιχείων προστασίας για τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας,
- οι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι προστασίας τροποποιούν κατάλληλα τη λειτουργία των στοιχείων προστασίας, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η επίδοσή τους υπό δυσμενείς συνθήκες, κυρίως κατά την εκδήλωση μεταβατικών φαινομένων.

Παρόλο που η προσαρμοστική προστασία προτάθηκε αρκετά χρόνια πριν, η εφαρμογή της στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και τους Υ/Σ έχει πραγματοποιηθεί με πολύ αργούς ρυθμούς. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απουσία κατάλληλης τεχνολογίας κατά τα πρώτα έτη εφαρμογής της (δεκαετία 1990), τόσο από πλευράς Η/Ν όσο και από πλευράς επικοινωνιών, όπως επίσης και στη διστακτικότητα των μηχανικών προστασίας να επιτρέψουν αυτόματες τροποποιήσεις των παραμέτρων στα συστήματα προστασίας. Επιπλέον, η διατήρηση της δομής των συστημάτων μεταφοράς στο πέρασμα του χρόνου και η επάρκεια των υφιστάμενων συστημάτων προστασίας τους συνέβαλαν εξίσου στην επιβράδυνση της αλλαγής φιλοσοφίας.

Σε αντίθεση με τα συστήματα μεταφοράς, η δομή και ο τρόπος λειτουργίας των δικτύων διανομής έχουν αλλάξει ριζικά την τελευταία δεκαετία. Ως εκ τούτου, η προσαρμοστική προστασία παραμένει εξαιρετικά επίκαιρο θέμα για τα δίκτυα διανομής, διότι προσφέρει το πλεονέκτημα της προσαρμογής της προστασίας στη διαρκώς μεταβαλλόμενη λειτουργική τους κατάσταση. Επίσης, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών στα ΣΗΕ και η επιτυχημένη εφαρμογή του πρωτοκόλλου IEC 61850 στα συστήματα προστασίας έχουν διευκολύνει σημαντικά την υλοποίηση και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας.

1.5.3 Σχήματα Προστασίας Ευρείας Περιοχής Συστημάτων Μεταφοράς

Η προστασία συστήματος επιτηρεί τη συνολική λειτουργία του ΣΗΕ και επενεργεί υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, σε αντίθεση με την προστασία εξοπλισμού, της οποίας η δράση περιορίζεται στην εκάστοτε ζώνη προστασίας. Σύμφωνα με την αναφορά [21], τα σχήματα προστασίας συστήματος διακρίνουν διαταραχές και εκτελούν προκαθορισμένες διορθωτικές ενέργειες, διαφορετικές από την απομόνωση σφάλματος, με στόχο τη διασφάλιση της συνοχής και της ασφαλούς λειτουργίας του ΣΗΕ. Τα σχήματα προστασίας συστήματος μπορούν να εκτελούν σε πραγματικό χρόνο αυτόματες διεργασίες προστασίας και ελέγχου, ανάλογα με το είδος προστασίας που υλοποιείται (π.χ. προστασία από αστάθεια τάσης), όπως είναι για παράδειγμα:

- η σύνδεση ή αποσύνδεση διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος,
- η απόρριψη παραγωγής ή ταχεία εκκίνηση μονάδων,
- η αποκοπή φορτίου,
- ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης του ΣΑΤΥΦ Μ/Σ,
- ο ελεγχόμενος διαχωρισμός περιοχών του διασυνδεδεμένου συστήματος,
- η επαναδιαμόρφωση του δικτύου.

Την τελευταία δεκαετία, έχει επιτελεσθεί σημαντική πρόοδος στις νέες τεχνολογίες προστασίας συστήματος, τόσο από πλευράς διατάξεων όσο και από πλευράς αλγορίθμων. Σήμερα, εφαρμόζονται διεθνώς σχήματα προστασίας, ελέγχου και παρακολούθησης ευρείας περιοχής (wide area protection, control & monitoring), αξιοποιώντας τις συγχρονισμένες μετρήσεις που προσφέρουν οι μονάδες μέτρησης φασιθέτη (phasor measurement units, PMUs). Επιπλέον, νέα πρωτοκόλλα επικοινωνίας αναπτύσσονται για σχήματα προστασίας ευρείας περιοχής, λόγω των αυστηρότερων απαιτήσεων ασφάλειας συγκριτικά με τα τοπικά δίκτυα επικοινωνίας εντός των Υ/Σ. Συγκεκριμένα, η ομάδα εργασίας IEC TC 57 ανέπτυξε ειδικό πρωτόκολλο για τη μετάδοση συγχρονισμένων φασιθετών (synchrophasors) σε σχήματα προστασίας ευρείας περιοχής, το οποίο προδιαγράφεται στην αναφορά [22].

1.5.4 Ψηφιακοί Υποσταθμοί

Στους συμβατικούς Υ/Σ, οι αναλογικές μετρήσεις και τα ψηφιακά σήματα διακινούνταν καλωδιακά από τον εξοπλισμό ισχύος προς τους Η/Ν και αντιστρόφως. Αντιθέτως, τα τελευταία χρόνια, η μετάδοση σημάτων ελέγχου και σημάνσεων επιτυγχάνεται μέσω των δικτύων επικοινωνίας του Υ/Σ, με τη χρήση του πρωτοκόλλου IEC 61850 να έχει επικρατήσει διεθνώς σε επικοινωνίες τύπου Ethernet, προσδίδοντας υψηλή αξιοπιστία, διαλειτουργικότητα και εναλλαξιμότητα (interchangeability) στα συστήματα προστασίας. Η ομάδα εργασίας WG10 της τεχνικής επιτροπής IEC TC57 έχει συσταθεί με στόχο την ανάπτυξη και τη βελτίωση της σειράς προτύπων IEC 61850.

Το όραμα των ευφυών δικτύων, σε συνδυασμό με την έως τώρα επιτυχημένη εφαρμογή του πρωτοκόλλου IEC 61850 στα ΨΣΕ συμβατικών Υ/Σ, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των πρώτων ψηφιακών Υ/Σ (digital substations), όπου τα αναλογικά κυκλώματα και τα κυκλώματα ελέγχου ΣΡ αντικαθίστανται από δίκτυα επικοινωνίας οπτικών ινών. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ψηφιακών Υ/Σ αποτελεί η ψηφιοποίηση των αναλογικών μετρήσεων πλησίον των Μ/Σ οργάνων και η μεταφορά των ψηφιακά επεξεργασμένων σημάτων στους Η/Ν. Ως εκ τούτου, οι Η/Ν που εγκαθίστανται στους ψηφιακούς Υ/Σ δεν διαθέτουν πλέον κάρτες εισόδων και εξόδων (I/O cards), σε αντίθεση με τους συμβατικούς Η/Ν. Οι εργασίες [23], [24] αποτελούν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα εφαρμογής της εν λόγω τεχνολογίας, παρουσιάζοντας τους πρώτους ψηφιακούς Υ/Σ που κατασκευάστηκαν σε Αυστραλία και Μεγάλη Βρετανία, αντίστοιχα.

Το ΨΣΕ συμβατικού Υ/Σ αποτελείται από δύο επίπεδα επικοινωνίας (station level, bay level) και έναν δίαυλο επικοινωνίας (station bus), ενώ το ΨΣΕ ψηφιακού Υ/Σ περιέχει επιπλέον ένα επίπεδο και έναν δίαυλο επικοινωνίας (process level, process bus). Στους συμβατικούς Υ/Σ, το πρωτόκολλο IEC 61850-8-1 εφαρμόζεται για τη διακίνηση ψηφιακών σημάτων ελέγχου, σημάτων κατάστασης και σημάνσεων μέσω μηνυμάτων GOOSE. Η ίδια μέθοδος ακολουθείται και στους ψηφιακούς Υ/Σ, όπου απαιτείται επιπλέον κατάλληλο πρότυπο επικοινωνίας για τη μετάδοση των ψηφιοποιημένων αναλογικών μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε το πρότυπο IEC 61850-9-2LE, βάσει του οποίου διακινούνται οι ψηφιοποιημένες μετρήσεις (sampled values, SV) στον δίαυλο επεξεργασίας (process bus). Για τη μετάδοση του χρόνου εφαρμόζεται το πρωτόκολλο IEEE 1588-PTP, όπως και στους συμβατικούς Υ/Σ.

Ένας απόλυτα ψηφιακός Υ/Σ χαρακτηρίζεται επιπλέον από τη χρήση μη συμβατικών Μ/Σ οργάνων (non-conventional instrument transformers, NCITs), όπως είναι οι οπτικοί αισθητήρες ρεύματος, οι οπτικοί αισθητήρες τάσης, τα πηνία Rogowski, οι διαιρέτες τάσης RC και οι ηλεκτρονικοί Μ/Τ και Μ/Ε. Αναλυτικές πληροφορίες για την αρχή λειτουργίας και τις ιδιότητες των μη συμβατικών Μ/Σ οργάνων δίνονται στην αναφορά [25]. Οι βασικές διαφορές τους από τους συμβατικούς Μ/Σ οργάνων είναι η έλλειψη πυρήνα σιδήρου, με αποτέλεσμα την απουσία φαινομένων κορεσμού, την υψηλή τους ακρίβεια για μεγάλο εύρος ρευμάτων και την πολύ μικρή παρεχόμενη ισχύ. Παρόλα αυτά, η επιλογή συμβατικών Μ/Σ οργάνων σε νέους Υ/Σ ή σε αναβαθμίσεις υφιστάμενων εγκαταστάσεων δεν έχει εγκαταλειφθεί, λόγω της πολύ υψηλής αξιοπιστίας και αντοχής τους.

Συμπερασματικά, η μετάβαση από τους συμβατικούς στους απόλυτα ψηφιακούς Υ/Σ προσφέρει τα εξής κύρια πλεονεκτήματα:

- δραστική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας χαλκού,
- μείωση των εργασιών όδευσης καλωδίων,
- μείωση του μεγέθους των Η/Ν και κατ' επέκταση των πινάκων προστασίας,
- χρήση κοινών Μ/Ε και Μ/Τ για προστασία και μετρήσεις,
- εξάλειψη φαινομένων κορεσμού Μ/Ε,
- ταχύτερη εκτέλεση των απαιτούμενων ελέγχων πριν την ηλέκτριση,
- διαγνωστικό έλεγχο και αποκατάσταση προβλήματος από απομακρυσμένη θέση,
- απλούστερη συντήρηση,
- μείωση του συνολικού κόστους και του χρόνου κατασκευής νέου Υ/Σ.

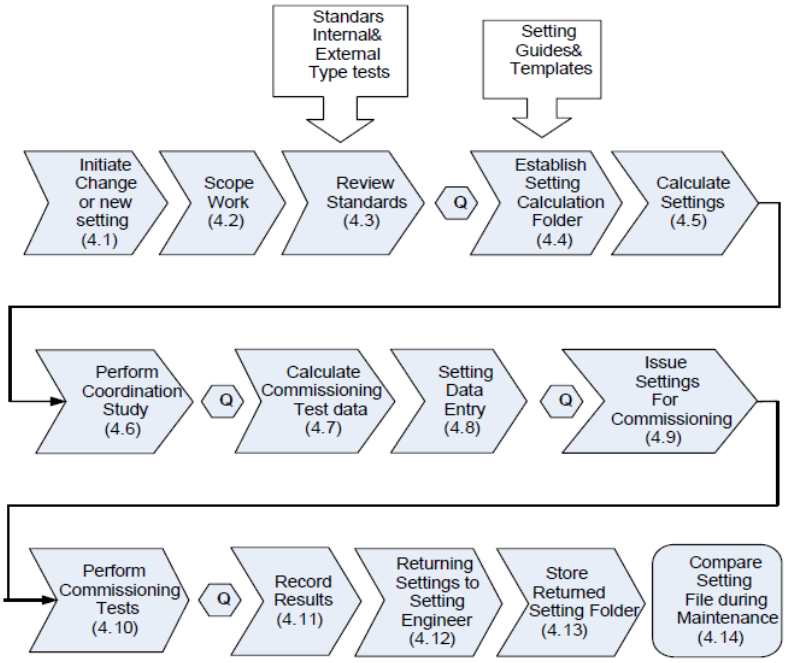
Προς το παρόν, η έλλειψη εμπειρίας των μηχανικών προστασίας σε θέματα διαχείρισης δικτύων επικοινωνιών επιβραδύνει δικαιολογημένα την εν λόγω μετάβαση, παρόλο που η απαιτούμενη τεχνολογία

είναι διαθέσιμη. Το εμπόδιο αυτό αναμένεται να ξεπεραστεί τα επόμενα χρόνια με την κατάλληλη εκπαίδευση και την απαραίτητη εξοικείωση του προσωπικού των ηλεκτρικών εταιρειών με τις νέες τεχνολογίες Υ/Σ.

1.6 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ Η/Ν

Εξίσου σημαντικός με τον σχεδιασμό του συνολικού συστήματος προστασίας είναι και ο τρόπος διαχείρισης των ρυθμίσεων κάθε Η/Ν, τόσο σε υφιστάμενες όσο και σε καινούριες εφαρμογές. Η εν λόγω διαχείριση περιλαμβάνει τον υπολογισμό κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους ρύθμισης των Η/Ν, την έκδοση δελτίων ρύθμισης και ελέγχου, τον ορθό προγραμματισμό των Η/Ν, καθώς και την οργάνωση βάσης δεδομένων με τις τρέχουσες ρυθμίσεις των Η/Ν και το ιστορικό προηγούμενων αλλαγών.

Ο ακριβής τρόπος διαχείρισης των ρυθμίσεων των Η/Ν διαφέρει μεταξύ των ηλεκτρικών εταιρειών. Ωστόσο, όλες οι διαφορετικές προσεγγίσεις μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα γενικό διάγραμμα ροής εργασιών [26], όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.4. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε βήμα της διαδικασίας είναι πιθανό το ενδεχόμενο μικρού ή μεγαλύτερου σφάλματος (π.χ. πρόταση ακατάλληλης τιμής ρύθμισης, τυπογραφικό λάθος σε δελτίο ρύθμισης, ελλιπής προγραμματισμός Η/Ν). Συνεπώς, είναι χρήσιμο να γίνεται έλεγχος εγκυρότητας σε καίρια σημεία (σύμβολο Q στο Σχήμα 1.4), διασφαλίζοντας την ποιότητα της όλης διαδικασίας.



Σχήμα 1.4: Ροή εργασιών διαχείρισης ρυθμίσεων Η/Ν. [26]

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων σημείων της προηγούμενης διαδικασίας. Σε παρένθεση αναφέρονται οι αντίστοιχες εργασίες βάσει του Σχήματος 1.4.

- **Μελέτη Ρύθμισης & Επιλογικής Συνεργασίας Προστασιών (Εργασίες 4.5, 4.6):** Ο προσδιορισμός κατάλληλων τιμών ρύθμισης για τους Η/Ν προϋποθέτει τον υπολογισμό των μέγιστων και ελαχίστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης στα εξεταζόμενα τμήματα του δικτύου, καθώς και της ροής ισχύος στο δίκτυο υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα των προηγούμενων υπολογισμών χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για τη μελέτη ρύθμισης των Η/Ν. Οι ηλεκτρικές εταιρείες υπολογίζουν τις τιμές ρύθμισης των Η/Ν βάσει της πολιτικής προστασίας και του κώδικα λειτουργίας του συστήματος, με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού προσομοίωσης. Η επίτευξη επιλογικής συνεργασίας μεταξύ των Η/Ν αποτελεί διαχρονική πρόκληση για τους μηχανικούς προστασίας και απαιτεί χρόνο, εξειδίκευση και εμπειρία.
- **Έκδοση Δελτίων Ρύθμισης & Ελέγχου Η/Ν (Εργασίες 4.7, 4.9):** Οι προσδιορισμένες τιμές ρύθμισης από την προηγούμενη μελέτη καταγράφονται στα δελτία ρύθμισης Η/Ν, τα οποία

αποστέλλονται στους μηχανικούς πεδίου για την κατάλληλη παραμετροποίηση και τον προγραμματισμό των Η/Ν. Επιπλέον, εκδίδονται δελτία ελέγχου Η/Ν, τα οποία αντιπαραβάλλουν τα αναμενόμενα θεωρητικά αποτελέσματα, βάσει της χαρακτηριστικής εξίσωσης λειτουργίας των εξεταζόμενων στοιχείων προστασίας, με τα αποτελέσματα από την πραγματική λειτουργία τους, όπως αυτά προκύπτουν από τους δευτερογενείς ελέγχους στους Η/Ν.

- **Παραμετροποίηση & Προγραμματισμός Η/Ν (Εργασία 4.8):** Η παραμετροποίηση των Η/Ν, δηλαδή η αλλαγή των τιμών ρύθμισης, και ο προγραμματισμός της λογικής και των επαφών τους επιτελούνται είτε κατά τη διάρκεια των δοκιμών αποδοχής στο πεδίο (site acceptance tests, SATs) είτε κατά τη διάρκεια των εργοστασιακών δοκιμών αποδοχής (factory acceptance tests, FATs) των πινάκων προστασίας, με χρήση ειδικού λογισμικού που παρέχεται από τον κατασκευαστή.
- **Έλεγχος Η/Ν (Εργασίες 4.10, 4.11):** Στα πλαίσια των τελικών ελέγχων πριν την ενεργοποίηση του εξοπλισμού ισχύος (commissioning), εκτελείται μεταξύ άλλων σειρά ελέγχων ορθής λειτουργίας των Η/Ν σύμφωνα με το ισχύον πρωτόκολλο της ηλεκτρικής εταιρείας. Οι συγκεκριμένοι έλεγχοι επιτυγχάνονται με χρήση ειδικών συσκευών, οι οποίες πραγματοποιούν έγχυση εντάσεων και τάσεων υποβιβασμένων στα επίπεδα του υπό δοκιμή Η/Ν. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ακρίβεια των στοιχείων προστασίας του Η/Ν και ελέγχεται εάν το σφάλμα λειτουργίας τους είναι εντός των ορίων ανοχής που προδιαγράφει ο κατασκευαστής. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας καταγράφονται αναλυτικά και αποθηκεύονται στα δελτία ελέγχου των Η/Ν.
- **Ανάγνωση Τελικών Ρυθμίσεων (Εργασία 4.12):** Μετά το πέρας των ελέγχων, ακολουθεί η ανάγνωση της ηλεκτρονικής βάσης δεδομένων των Η/Ν με τις τελικές ρυθμίσεις, για λόγους αρχειοθέτησης και μελλοντικής ανάλυσης. Ανά πάσα στιγμή, οι μηχανικοί προστασίας θα πρέπει να έχουν επίγνωση των τρεχουσών ρυθμίσεων στους Η/Ν του δικτύου ευθύνης τους, επιδεικνύοντας ετοιμότητα για την επίλυση προβλημάτων όποτε απαιτείται.
- **Σύγκριση Προτεινόμενων & Τελικών Ρυθμίσεων (Εργασία 4.14):** Στο τέλος της διαδικασίας, συγκρίνονται οι προτεινόμενες τιμές ρύθμισης από τη μελέτη με τις τιμές ρύθμισης που εφαρμόσθηκαν στο πεδίο και παράλληλα γίνεται έλεγχος για τυχόν παραλείψεις. Επιπλέον, δημιουργείται το τελικό δελτίο ρύθμισης για κάθε Η/Ν, το οποίο αποθηκεύεται μαζί με την ηλεκτρονική βάση δεδομένων του.

1.7 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ & ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η μέθοδος διαχείρισης των παραμέτρων ρύθμισης των Η/Ν καθορίζει την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος προστασίας, όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 1.6. Βασικό στάδιο στον κύκλο ζωής ενός συστήματος προστασίας, είτε πρόκειται για εφαρμογή δικτύου διανομής είτε συστήματος μεταφοράς, αποτελεί η μελέτη ρύθμισης και επιλογικής συνεργασίας των Η/Ν. Αντικείμενο της εν λόγω μελέτης είναι ο προσδιορισμός κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους των εξεταζόμενων Η/Ν, τέτοιων ώστε να εξασφαλίζονται η επαρκής κάλυψη του προστατευόμενου εξοπλισμού ισχύος υπό οποιεσδήποτε λειτουργικές συνθήκες και η αποφυγή ανεπιθύμητης λειτουργίας της προστασίας. Επιπλέον, η προσαρμογή της προστασίας στις τρέχουσες λειτουργικές συνθήκες αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των σύγχρονων συστημάτων προστασίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας στα σύγχρονα δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή, όπως επισημάνθηκε στο Εδάφιο 1.5.2.

Η εκπονηθείσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στην ανάπτυξη πρωτότυπων μεθόδων προστασίας για σύγχρονα δίκτυα διανομής και συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, το αντικείμενο της παρούσας διατριβής επικεντρώνεται σε τρεις κύριους άξονες. Αρχικά, καταγράφονται εκτενώς και διερευνώνται ενδελεχώς οι νέες προκλήσεις και οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν στα δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή και μεταβαλλόμενη τοπολογία, ως προς την προστασία του εξοπλισμού ισχύος, ενώ προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα αναβάθμισης των υφιστάμενων υποδομών προστασίας. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται πρότυπη εργαστηριακή διάταξη προσαρμοστικού συστήματος προστασίας, με χρήση πραγματικού ψηφιακού εξοπλισμού, και αξιολογείται ως πιθανή λύση για σύγχρονα δίκτυα διανομής μέσω ειδικών προσομοιώσεων. Το ερευνητικό έργο ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη πρωτότυπης μεθόδου για τον συστηματικό και αυτοματοποιημένο υπολογισμό κατάλληλων τιμών ρύθμισης των στοιχείων υπερέντασης στο εξεταζόμενο δίκτυο, με χρήση προχωρημένων τεχνικών

βελτιστοποίησης. Η προτεινόμενη μέθοδος αποτελεί ολοκληρωμένη λύση για τη μελέτη ρύθμισης και επιλογικής συνεργασίας των Η/Ν, η εφαρμογή της οποίας καλύπτει όλα τα ηλεκτρικά δίκτυα, ανεξαρτήτως κλίμακας.

Το περιεχόμενο της διατριβής διατάσσεται σε έξι κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται το γνωστικό αντικείμενο της ανάλυσης συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, επεκτείνοντας την κλασική θεωρία. Αρχικά, περιγράφεται η φύση των βραχυκυκλωμάτων και παρουσιάζεται η κατηγοριοποίησή τους βάσει διαφορετικών κριτηρίων. Ακολούθως, υπολογίζονται αναλυτικά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης στην απλή περίπτωση σφάλματος δικτύου μακριά από γεννήτρια, καθώς και στην περίπτωση σφάλματος πλησίον γεννήτριας. Επίσης, παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία συμμετρικών συνιστωσών, η οποία χρησιμοποιείται ως εργαλείο ανάλυσης ασύμμετρων σφαλμάτων.

Επιπλέον, γίνεται μελέτη της βιβλιογραφίας και παρουσιάζονται οι προτεινόμενες προσεγγιστικές σχέσεις υπολογισμού της αντίστασης σφάλματος, βάσει των αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάλυση της ειδικής περίπτωσης των διφασικών βραχυκυκλωμάτων προς γη με αντίσταση σφάλματος. Αποδεικνύεται μαθηματικά, ότι η παρουσία αντίστασης σφάλματος κατά την εκδήλωση διφασικού σφάλματος προς γη σε επαρκώς γειωμένο δίκτυο ενδέχεται να προκαλέσει την αύξηση των φασικών ρευμάτων σφάλματος και όχι τον περιορισμό τους, όπως θα ήταν αναμενόμενο. Το ιδιάζον αυτό χαρακτηριστικό των διφασικών βραχυκυκλωμάτων προς γη επιβεβαιώνεται μέσω αντιπροσωπευτικών παραδειγμάτων υπολογισμού σε πραγματικό ΣΗΕ.

Στο Κεφάλαιο 3, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των υφιστάμενων σχημάτων προστασίας, όπως εφαρμόζονταν στα παθητικά δίκτυα διανομής, σε σύγχρονα δίκτυα με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και μεταβαλλόμενη τοπολογία. Κατόπιν εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης, παρουσιάζονται λεπτομερώς τα προβλήματα προστασίας που ανακύπτουν, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές τεχνολογίες μονάδων παραγωγής που χρησιμοποιούνται. Το ενδεχόμενο εμφάνισης των εν λόγω προβλημάτων προστασίας επιβεβαιώνεται σε αντιπροσωπευτικό τμήμα του Ελληνικού δικτύου διανομής ΜΤ, στο οποίο συνδέονται έξι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί και μεγάλο πλήθος φωτοβολταϊκών πάρκων. Επιπλέον, καταγράφονται τα μέτρα αντιμετώπισης που εφαρμόζουν οι ηλεκτρικές εταιρείες διεθνώς, καθώς και οι σύγχρονες λύσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθενται συγκεκριμένες προτάσεις για την αναβάθμιση των υφιστάμενων και την εφαρμογή νέων συστημάτων προστασίας στα σύγχρονα δίκτυα διανομής.

Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει τη λύση των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας, ως προς την αποτελεσματικότητά της στην αντιμετώπιση των προηγούμενων προβλημάτων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτενούς βιβλιογραφικής έρευνας που εκπονήθηκε, όσον αφορά την εφαρμογή της εν λόγω φιλοσοφίας σε δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή. Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύσσεται εργαστηριακή διάταξη προσαρμοστικής προστασίας με χρήση πραγματικών συσκευών προστασίας και ελέγχου, η οποία προσομοιώνει το εξεταζόμενο δίκτυο διανομής, επιτηρεί διαρκώς την κατάσταση των διακοπτών ισχύος του δικτύου και προσαρμόζει αυτόματα τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων, όταν μεταβάλλεται η λειτουργική του κατάσταση. Η λειτουργικότητά και η επίδοση της προτεινόμενης διάταξης επιδεικνύεται μέσω σειράς δοκιμών κλειστού βρόχου.

Στο πρώτο στάδιο δοκιμών, επιβεβαιώνεται το ενδεχόμενο εμφάνισης προβλημάτων προστασίας σε σύγχρονα δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, θεωρώντας ότι οι Η/Ν διατηρούν τις αρχικές ρυθμίσεις τους, όπως είχαν προσδιοριστεί για την προστασία του δικτύου διανομής στην πρότερη λειτουργική κατάστασή του (ακτινική τοπολογία και απουσία τοπικής παραγωγής). Στη συνέχεια, ενεργοποιείται η κεντρική μονάδα ελέγχου, ενώ παράλληλα εκτελούνται αλλαγές στην τοπολογία του προσομοιούμενου δικτύου, επιβεβαιώνοντας την ορθή προσαρμογή των ρυθμίσεων προστασίας των Η/Ν. Στο τελευταίο στάδιο δοκιμών, επανεκτελούνται οι προσομοιώσεις σφάλματος του πρώτου σταδίου και επιβεβαιώνεται η αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων προστασίας.

Στο Κεφάλαιο 5, περιγράφεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας της προστασίας υπερέντασης και η εφαρμογή της στα διάφορα τμήματα ενός ΣΗΕ. Παρουσιάζονται οι τυποποιημένες χαρακτηριστικές εξισώσεις λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης που υλοποιούν οι σύγχρονοι Η/Ν. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση επί του προβλήματος της βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης σε δίκτυα διανομής και συστήματα μεταφοράς. Επιπλέον, διατυπώνεται μαθηματικά το συγκεκριμένο πρόβλημα ως πρόβλημα βελτιστοποίησης και αναπτύσσονται

αναλυτικά μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, μη γραμμικού προγραμματισμού, τετραγωνικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς και μεικτού ακέραιου–μη γραμμικού προγραμματισμού.

Τα εν λόγω μοντέλα βελτιστοποίησης και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι επίλυσής τους ενσωματώνονται σε ειδικό πακέτο λογισμικού, το οποίο αυτοματοποιεί τον υπολογισμό βέλτιστων τιμών ρύθμισης για τα στοιχεία υπερέντασης του μελετώμενου δικτύου. Το πακέτο λογισμικού δέχεται ως είσοδο από τον χρήστη τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου και της μελέτης βραχυκυκλωμάτων, τα ζεύγη πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας που εξετάζονται, τα δεδομένα ρύθμισης των Η/Ν, τα κριτήρια προστασίας που εφαρμόζονται στο δίκτυο και επιπλέον παραμέτρους σχετικές με και την επίδοση των αλγορίθμων επίλυσης. Η προτεινόμενη μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση και αποτελεσματικότητα στην επίλυση του πολύπλοκου τεχνικού προβλήματος, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της σε πρότυπα ηλεκτρικά δίκτυα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Το Κεφάλαιο 6 ανακεφαλαιώνει τα αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Αναλύονται εκτενώς τα συμπεράσματα, η πρωτοτυπία και η συμβολή της στον τομέα ανάπτυξης νέων μεθόδων προστασίας για σύγχρονα δίκτυα διανομής, καθώς επίσης και στον τομέα ανάπτυξης προηγμένων εργαλείων για τον αυτοματοποιημένο προσδιορισμό βέλτιστων ρυθμίσεων στοιχείων υπερέντασης, κατάλληλων και για συστήματα μεταφοράς. Στο τέλος του κεφαλαίου, περιγράφονται σαφώς οι προτεινόμενες κατευθύνσεις επέκτασης του παρόντος ερευνητικού έργου.

Στο Παράρτημα Α, αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρομηχανικών Η/Ν υπερέντασης και αποδεικνύεται η μαθηματική σχέση που διέπει τη λειτουργίας τους, βάσει της οποίας λειτουργούν και τα στοιχεία υπερέντασης των σύγχρονων ψηφιακών Η/Ν. Στο Παράρτημα Β, παρέχονται τα δεδομένα του δικτύου διανομής 5 ζυγών, το οποίο χρησιμοποιείται στις δοκιμές κλειστού βρόχου του Κεφαλαίου 4. Στο τέλος της διατριβής, παρατίθεται λεπτομερώς η αναφερόμενη βιβλιογραφία, καθώς επίσης και οι δημοσιεύσεις του συγγραφέα.

2. ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην εισαγωγή της διατριβής, έγινε εκτενής αναφορά στα διάφορα είδη ηλεκτρικών σφαλμάτων, καθώς και στις αιτίες πρόκλησής τους. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στο βραχυκύκλωμα (short circuit), το οποίο αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση ηλεκτρικού σφάλματος και συνεπώς τη μεγαλύτερη απειλή για τον εξοπλισμό ισχύος των ΣΗΕ. Αιτία πρόκλησης βραχυκυκλώματος στα ηλεκτρικά δίκτυα είναι η σημαντική μείωση της αντίστασης μόνωσης μεταξύ φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης, με αποτέλεσμα την αγώγιμη σύνδεση ακροδεκτών ή αγωγών με διαφορά δυναμικού. Όπως έχει ήδη σημειωθεί, μείωση ή ολική απώλεια της μονωτικής ικανότητας του εξοπλισμού ισχύος μπορεί να συμβεί από «εσωτερικά» ή «εξωτερικά» αίτια. Σπανιότερα, βραχυκυκλώματα μπορούν να συμβούν εξαιτίας ανθρωπίνου λάθους, εισβολής ζώων (π.χ. τρωκτικά, ερπετά, πτηνά) ή βανδαλισμών. Ειδικά για τα εναέρια δίκτυα μεταφοράς, η ανάστροφη διάσπαση (back-flashover) στους μονωτήρες των γραμμών, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα στους αγωγούς γης των πυλώνων, αποτελεί τη συχνότερη αιτία πρόκλησης βραχυκυκλώματος [27], [28]. Στο εξής, ο όρος σφάλμα θα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για αναφορά σε βραχυκύκλωμα, εκτός εάν επισημαίνεται διαφορετικά.

Η σφοδρότητα του βραχυκυκλώματος και κατ' επέκταση η σοβαρότητα των επιπτώσεών του στον εξοπλισμό ισχύος που πλήττεται εξαρτώνται πρωτίστως από τη διαθέσιμη ισχύ βραχυκύκλωσης και τη διάρκειά του και δευτερευόντως από το είδος και το σημείο εκδήλωσής του. Κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σφάλματος, το ρεύμα στις εμπλεκόμενες φάσεις χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή ένταση, με αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών και κατά συνέπεια την τήξη τους, εάν δεν επιτευχθεί ταχεία εκκαθάριση. Επιπλέον, η παρουσία αντίστασης σφάλματος προκαλεί την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας. Η αιφνίδια έκλυση θερμότητας οδηγεί σε απότομη αύξηση της πίεσης του περιβάλλοντος αέρα, η οποία ενδέχεται να εκτονωθεί μέσω έκρηξης. Εκτός των θερμικών φαινομένων, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης προκαλούν επίσης μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις, εξαιτίας της αμοιβαίας έλξης ή απώθησης των αγωγών. Τυχόν υπέρβαση της μηχανικής αντοχής του εξοπλισμού ισχύος συνεπάγεται ολοσχερή παραμόρφωση και αχρήστευσή του.

Εν ολίγοις, οι βασικές συνέπειες των σφαλμάτων στο σημείο εκδήλωσής τους είναι:

- η καταστροφή της μόνωσης λόγω υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας,
- η τήξη αγωγών και η συγκόλληση επαφών των διακοπτικών στοιχείων,
- η πιθανότητα έκρηξης και πρόκλησης πυρκαγιάς,
- οι μηχανικές καταπονήσεις του εξοπλισμού,

ενώ στο υπόλοιπο δίκτυο:

- η διακοπή της τροφοδοσίας τμήματός του, εξαιτίας της λειτουργίας μέσων προστασίας,
- η βύθιση της τάσης, η οποία διαταράσσει την ομαλή τροφοδότηση των καταναλωτών (απόζευξη κινητήρων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, διακοπή αυτόματων λειτουργιών, διακοπή συγκοινωνιών κτλ.),
- τα προβλήματα ευστάθειας, όταν πρόκειται για σφάλμα στο δίκτυο ΥΥΤ ή ΥΤ, εφόσον δεν επιτευχθεί ταχεία εκκαθάρισή του.

Σε κάθε σημείο του εκάστοτε ηλεκτρικού δικτύου, η ένταση του ρεύματος σφάλματος εξαρτάται κυρίως από τη διαθέσιμη ισχύ βραχυκύκλωσης, όπως σημειώθηκε προηγουμένως. Στη γενική περίπτωση, η ισχύς βραχυκύκλωσης παρέχεται από τις εξής τέσσερις πηγές:

- το ηλεκτρικό σύστημα που τροφοδοτεί το δίκτυο,
- τις γεννήτριες του δικτύου,
- τους σύγχρονους κινητήρες του δικτύου,
- τους επαγωγικούς (ασύγχρονους) κινητήρες του δικτύου.

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται εμπεριστατωμένη ταξινόμηση των σφαλμάτων και αναλύεται εκτενώς η φύση του ρεύματος σφάλματος, εμβαθύνοντας στη θεωρία των σύγχρονων μηχανών. Περιγράφονται, επίσης, τα βασικά στοιχεία της θεωρίας συμμετρικών συνιστωσών και τονίζεται η σημασία της μελέτης βραχυκυκλωμάτων, για τον επαρκή σχεδιασμό και την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Επιπλέον, αναλύεται η φύση της αντίστασης σφάλματος και παρουσιάζονται τα επικρατέστερα μοντέλα εκτίμησής της από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος, εξετάζεται η ειδική περίπτωση των διφασικών σφαλμάτων προς γη με αντίσταση σφάλματος και διερευνάται ενδελεχώς η επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ένταση του ρεύματος σφάλματος. Αποδεικνύεται ότι η παρουσία αντίστασης σφάλματος σε επαρκώς γειωμένα δίκτυα οδηγεί σε αύξηση, αντί για μείωση, των φασικών ρευμάτων σφάλματος, όταν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις [29].

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να ταξινομηθούν βάσει διαφορετικών κριτηρίων, όπως είναι για παράδειγμα ο χρόνος παραμονής τους στο δίκτυο, ο τρόπος εκδήλωσής τους, η τιμή της αντίστασης σφάλματος, η θέση τους, ή το αίτιο πρόκλησής τους. Εξ αυτών, τα κριτήρια ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι η διάρκεια, ο τύπος και η τιμή της αντίστασης σφάλματος.

Σύμφωνα με τις αναφορές [5], [30], τα βραχυκυκλώματα διακρίνονται ως προς τη διάρκειά τους σε:

- παροδικά, τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε:
  - ✓ αυτοαποσβεννύμενα, τα οποία εκκαθαρίζονται χωρίς διακοπή της τάσης του κυκλώματος στο οποίο παρουσιάστηκε το σφάλμα,
  - ✓ κυρίως παροδικά, τα οποία εκκαθαρίζονται με στιγμιαία διακοπή της τροφοδοσίας,
  - ✓ ημιμόνιμα, η εκκαθάριση των οποίων απαιτεί διακοπή της τροφοδοσίας για μερικά δευτερόλεπτα,
- μόνιμα, τα οποία διατηρούνται και προκαλούν μόνιμη βλάβη στον εξοπλισμό ισχύος, ενώ η λειτουργία του δικτύου αποκαθίσταται μόνο κατόπιν ανθρώπινης επέμβασης (π.χ. αντικατάσταση ή επισκευή του πληγέντος εξοπλισμού).

Η μονωτική ικανότητα του αέρα αποκαθίσταται ταχύτατα μετά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου που προκαλείται κατά τη διάσπασή του. Αντιθέτως, η διάσπαση των στερεών μονωτικών και η εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου προκαλεί μόνιμη καταστροφή της μονωτικής ικανότητας του υλικού. Βάσει των προαναφερθέντων, είναι προφανές ότι τα σφάλματα σε εναέρια δίκτυα είναι ως επί το πλείστον παροδικά, ενώ τα σφάλματα κατά μήκος υπογείων δικτύων είναι ή εξελίσσονται σε μόνιμα. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τυπική ποσοστιαία κατανομή των σφαλμάτων σε εναέρια δίκτυα ΜΤ, ΥΤ και ΥΥΤ, βάσει της διάρκειάς τους [5]:

Πίνακας 2.1: Στατιστική κατανομή σφαλμάτων βάσει της διάρκειάς τους

ΕΙΔΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
Μόνιμα	5%	7%
Ημιμόνιμα	1%	13%
Κυρίως παροδικά & αυτοαποσβεννύμενα	94%	80%

Επιπλέον, τα σφάλματα κατηγοριοποιούνται βάσει του τρόπου εκδήλωσής τους και του αριθμού των εμπλεκόμενων φάσεων, ως εξής:

- Φασικά σφάλματα (phase faults), τα οποία εκδηλώνονται μεταξύ φάσεων, ως:
  - ✓ τριφασικά (three-phase, 3ph),
  - ✓ διφασικά (double-phase, 2ph).
- Σφάλματα γης (ground faults), τα οποία εκδηλώνονται μεταξύ φάσης ή φάσεων και γης, ως:
  - ✓ μονοφασικά προς γη (single-phase-to-ground, 1pg),
  - ✓ διφασικά προς γη (double-phase-to-ground, 2pg).
- Εξελισσόμενα σφάλματα (evolving faults), των οποίων η φύση αλλάζει κατά τη διάρκεια της εκδήλωσής τους, όπως είναι για παράδειγμα ένα διφασικό βραχυκύκλωμα που εξελίσσεται σε τριφασικό προτού εκκαθαριστεί.
- Διαλείποντα σφάλματα (intermittent ή incipient faults), τα οποία είναι αυτοεκκαθαριζόμενα. Διαρκούν περίπου μισό κύκλο, η σβέση τους επέρχεται στον πρώτο μηδενισμό της ημιτονοειδούς τάσης, ενώ επανεμφανίζονται περιοδικά. Διαλείποντα σφάλματα παρατηρούνται κυρίως σε αγείωτα ή γειωμένα με μεγάλη αντίσταση ηλεκτρικά δίκτυα και η ανίχνευσή τους είναι ιδιαιτέρως δύσκολη, προκαλώντας συνήθως μόνιμη βλάβη στον εξοπλισμό που πλήττεται.
- Πολλαπλά σφάλματα (multiple faults), τα οποία συμβαίνουν ταυτόχρονα είτε στην ίδια θέση, όπως για παράδειγμα η πτώση εναέριου γυμνού αγωγού στο έδαφος (συνδυασμός ανοικτοκυκλώματος και μονοφασικού βραχυκυκλώματος προς γη), είτε σε διαφορετικά σημεία, όπως για παράδειγμα τα ταυτόχρονα μονοφασικά σφάλματα προς γη, στη φάση Α και τη φάση Β του ίδιου ή διαφορετικού κυκλώματος σε εναέρια γραμμή ΥΤ (cross-country faults).

Σημειώνεται ότι τα τριφασικά σφάλματα χαρακτηρίζονται ως συμμετρικά, διότι τροφοδοτούνται από συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων, ενώ τυχόν ασυμμετρίες του δικτύου είναι σχετικά πολύ μικρές και θεωρούνται αμελητέες (π.χ. αμοιβαίες επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις). Οι υπόλοιποι τύποι σφαλμάτων ανήκουν στη γενική κατηγορία των ασύμμετρων σφαλμάτων.

Στον Πίνακα 2.2, δίνεται ενδεικτική κατανομή των σφαλμάτων σε εναέρια δίκτυα ΜΤ, ΥΤ και ΥΥΤ, βάσει του τύπου τους [5]. Στην εργασία [31], παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία για τα δίκτυα ΥΤ και ΥΥΤ των ΗΠΑ. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη των συγκεκριμένων στατιστικών αναλύσεων είναι ότι τα μονοφασικά σφάλματα προς γη αποτελούν τη συντριπτική πλειονότητα των σφαλμάτων σε όλα τα ηλεκτρικά δίκτυα, ανεξαρτήτως κλίμακας.

Πίνακας 2.2: Στατιστική κατανομή σφαλμάτων βάσει του τύπου τους

ΤΥΠΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
Μονοφασικό προς γη	65%	80%
Διφασικό προς γη	8%	7%
Διφασικό	10%	6%
Τριφασικό	7%	5%
Εξελισσόμενο	10%	2%

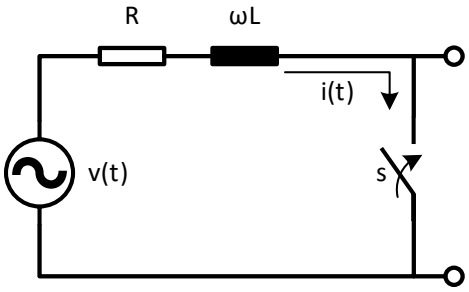
Τέλος, τα σφάλματα μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν βάσει της παρεμβαλλόμενης αντίστασης (fault resistance) σε:

- πλήρη ή στερεά σφάλματα (bolted ή solid faults), με μηδενική αντίσταση σφάλματος,
- σφάλματα (ηλεκτρικού) τόξου (arcing faults), με αντίσταση σφάλματος μη μηδενικής τιμής,
- σφάλματα διαρροής (high-impedance faults), με αντίσταση σφάλματος πολύ υψηλής τιμής.

2.3 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΑΚΡΙΑ ΑΠΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Ένα πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ηλεκτρικό δίκτυο προκαλεί τον μηδενισμό της τάσης στη θέση σφάλματος και τη βύθιση της τάσης στα παρακείμενα τμήματα του δικτύου. Κάθε σφάλμα τροφοδοτείται από όλες τις πηγές ισχύος του ΣΗΕ. Ο όρος σφάλμα μακριά από γεννήτρια χρησιμοποιείται για βραχυκυκλώματα που εκδηλώνονται σε μεγάλη «ηλεκτρική» απόσταση από την πηγή. Βασικό χαρακτηριστικό των ζυγών ενός ΣΗΕ είναι η ισχύς βραχυκύκλωσής τους, η οποία αναφέρεται και ως στάθμη βραχυκύκλωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η στάθμη βραχυκύκλωσης, τόσο «ηλεκτρικά» ισχυρότερος είναι ο ζυγός. Η τάση στους ισχυρούς ζυγούς ενός ΣΗΕ δεν παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή σε περίπτωση διαταραχής στο δίκτυο, σε αντίθεση με τους ασθενείς, οι οποίοι ενδέχεται να αντιμετωπίσουν πρόβλημα αστάθειας τάσης σε ανάλογη περίπτωση.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης για συμμετρικό σφάλμα μακριά από γεννήτρια μπορεί να υπολογιστεί βάσει της θεωρίας κυκλωμάτων, αναλύοντας την απλή περίπτωση του κυκλώματος *RL* σειράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, και εφαρμόζοντας το θεώρημα ισοδύναμης πηγής Thevenin[1] [32], [33].



Σχήμα 2.1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα για την περίπτωση τριφασικού σφάλματος.

Η ωμική αντίσταση R και η επαγωγική αντίδραση X συνθέτουν την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thevenin στη θέση του σφάλματος, ενώ η ισοδύναμη πηγή τάσης υ θεωρείται σταθερή και ίση με την τάση προ του σφάλματος στην εξεταζόμενη θέση. Έστω ότι το βραχυκύκλωμα συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t = 0$ (κλείνει ο διακόπτης s). Συνδυάζοντας τον νόμο τάσεων Kirchhoff και τον νόμο Faraday, προκύπτει η εξής διαφορική εξίσωση 1ης τάξης:

$$\upsilon(t) = L\frac{di}{dt} + Ri \Rightarrow L\frac{di}{dt} + Ri - \sqrt{2}V sin(\omega t + \alpha) = 0 \tag{2.1}$$

Θεωρώντας, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι η ένταση του ρεύματος είναι μηδενική τη στιγμή του σφάλματος, οι αρχικές συνθήκες του κυκλώματος είναι $i(t = 0^-) = i\left(t = 0^+\right) = 0$ και η λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.1) δίνεται από τη σχέση (2.2):

$$i_f(t) = Ke^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\sqrt{2}V}{Z}\sin(\omega t + \alpha - \phi) \tag{2.2}$$

όπου,

i_f, το ρεύμα σφάλματος,

V, η ενδεικνύμενη τιμή (rms) της τάσης υ,

α, η γωνία ζεύξης στο σφάλμα (switching ή closing angle),

$\phi = tan^{-1}(X/R)$, η γωνία έναρξης του σφάλματος (fault inception angle),

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, η σύνθετη αντίσταση Thevenin,

$K = -\left(\sqrt{2}V/Z\right)\sin(\alpha - \phi)$.

Επομένως, η σχέση (2.2) μπορεί να αναδιατυπωθεί ως εξής:

[1] Προς τιμήν του Léon Charles Thévenin (1857–1926), ο οποίος δημοσίευσε το συγκεκριμένο θεώρημα το 1883, αγνοώντας ότι είχε ήδη διατυπωθεί και δημοσιευθεί από τον Hermann von Helmholtz τριάντα χρόνια πριν [34].

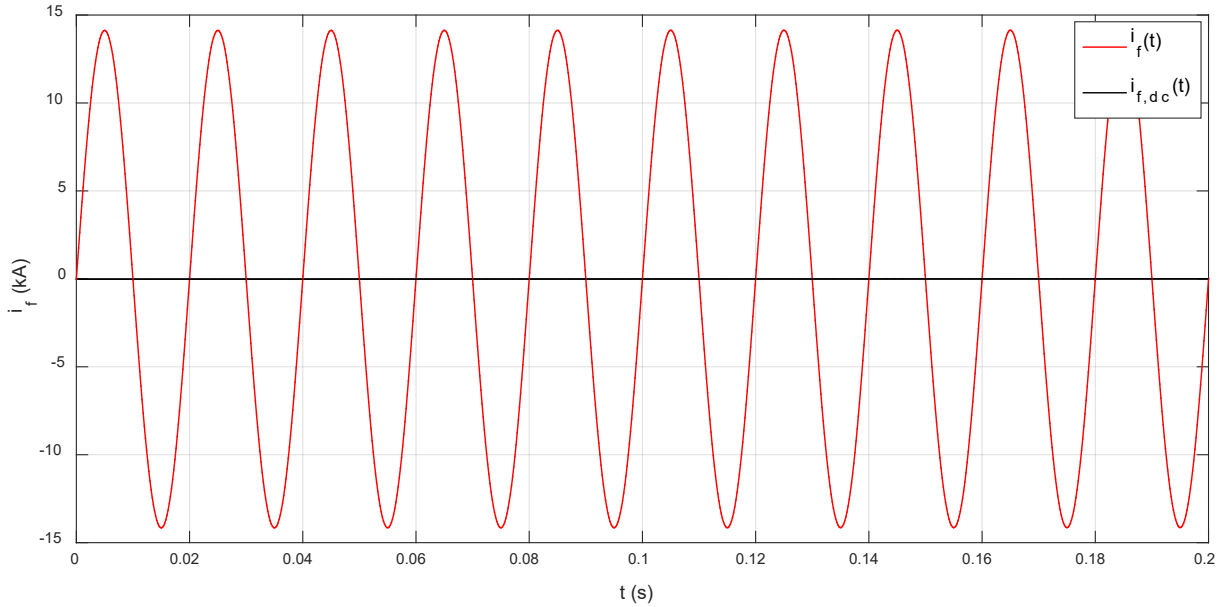
$$i_f(t) = i_{f,dc}(t) + i_{f,ac}(t) = \sqrt{2}I\left[\sin(\phi - \alpha)\, e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t + \alpha - \phi)\right] \tag{2.3}$$

όπου, $I = V/Z$ και $\tau = L/R$, η χρονική σταθερά του κυκλώματος. Τυπικά, η χρονική σταθερά κυμαίνεται μεταξύ 10 και 50 ms σε δίκτυα ΜΤ, μεταξύ 30 και 100 ms σε δίκτυα ΥΤ, ενώ σε δίκτυα ΥΥΤ μεταξύ 80 και 150 ms.

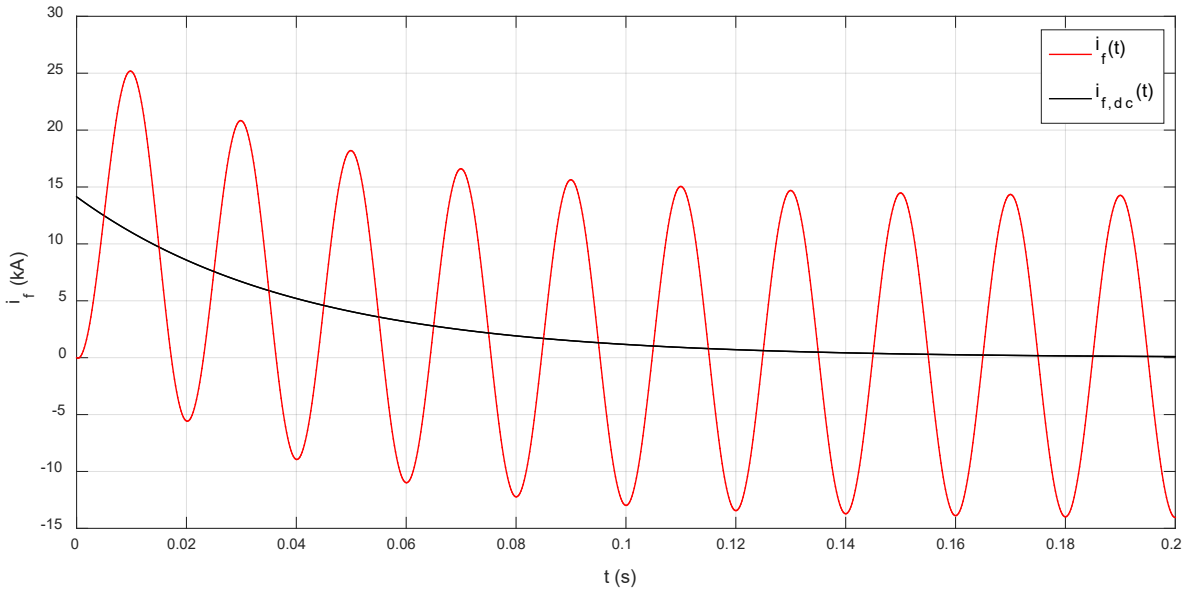
Από τη σχέση (2.3) προκύπτει ότι το ρεύμα σφάλματος δικτύου αποτελείται από μία συνεχή (DC) και μία εναλλασσόμενη (AC) συνιστώσα. Η συνιστώσα DC καλείται φυσική απόκριση του κυκλώματος (natural response) και εξαρτάται από τα στοιχεία του κυκλώματος, αποτελώντας τη μεταβατική απόκριση. Από την άλλη πλευρά, η συνιστώσα AC καλείται εξαναγκασμένη απόκριση του κυκλώματος (forced response) και εξαρτάται από τις διεγέρσεις του κυκλώματος (εν προκειμένω, την πηγή τάσης), αποτελώντας τη μόνιμη απόκριση [35].

Αναλύοντας τη σχέση (2.3), προκύπτουν τα εξής πρακτικά συμπεράσματα:

- Η ένταση του ρεύματος σφάλματος στους πρώτους κύκλους αυξάνεται όσο πιο επαγωγικό είναι το κύκλωμα ($\varphi \approx \pi/2$), λόγω της αργής απόσβεσης της συνιστώσας DC.
- Το ρεύμα σφάλματος είναι απόλυτα συμμετρικό, όταν $\sin(\varphi - \alpha) = 0$, ή ισοδύναμα, $\alpha = \varphi$ ή $\alpha = \varphi + \pi$ (Σχήμα 2.2(α)).
- Η μέγιστη ασυμμετρία στο ρεύμα σφάλματος προκύπτει όταν $\sin(\varphi - \alpha) = \pm 1$, ή ισοδύναμα, $\alpha - \varphi = \pm\pi/2$. Η συνθήκη αυτή δεν οδηγεί κατ' ανάγκη και στο μέγιστο ρεύμα σφάλματος.
- Δεδομένης της γωνίας φ και υπολογίζοντας τις μερικές παραγώγους της σχέσης (2.3) ως προς t και α, προκύπτει ότι η κυματομορφή του ρεύματος σφάλματος παρουσιάζει μέγιστη στιγμιαία τιμή όταν $\alpha = 0$ ή $\alpha = \pi$, δηλαδή όταν η τάση έχει μηδενική τιμή τη στιγμή του σφάλματος (Σχήμα 2.2(β)).



(α)



(β)

Σχήμα 2.2: Ρεύμα σφάλματος μακριά από γεννήτρια όταν $\varphi = \pi/2$ και (α) $\alpha = \varphi$, (β) $\alpha = 0$.

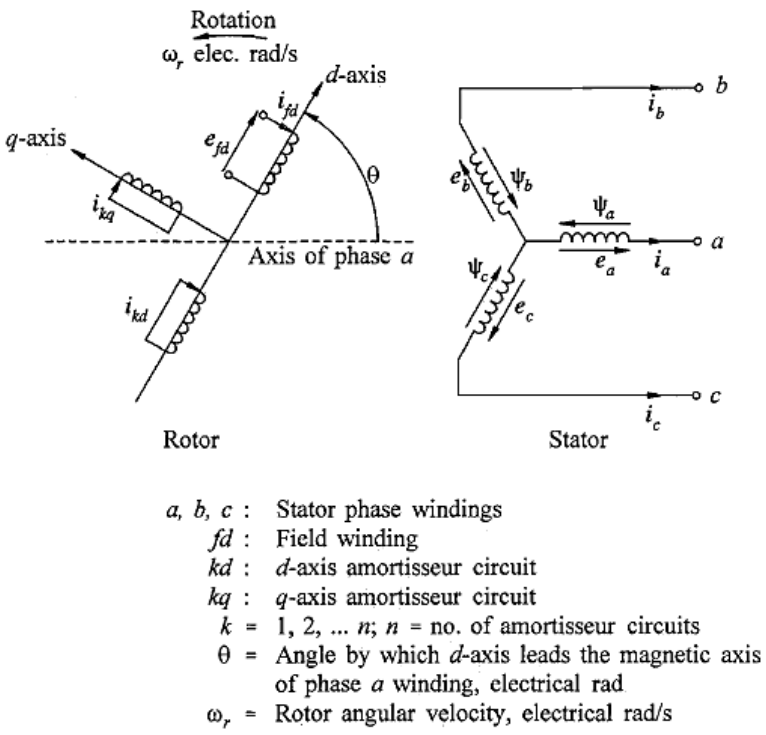
2.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

2.4.1 Βασικά Στοιχεία Θεωρίας Σύγχρονων Μηχανών

Η χαρακτηριστική του ρεύματος σφάλματος πλησίον γεννήτριας αποτελείται από μία συνιστώσα DC (φυσική απόκριση) και μία συνιστώσα AC (εξαναγκασμένη απόκριση), ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι για σφάλμα πλησίον γεννήτριας δεν ισχύει η παραδοχή περί σταθερής πηγής τάσης και σταθερής επαγωγικής αντίδρασης, λόγω της μεταβολής των πεπλεγμένων ροών στα τυλίγματα στάτη και δρομέα κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Συνεπώς, η σχέση (2.3) πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα για να αντικατοπτρίζει τη μεταβατική συμπεριφορά των σύγχρονων μηχανών [33], [36].

Από τη θεωρία σύγχρονων μηχανών, οι άξονες, οι σχετικές θέσεις και η αλληλεπίδραση των τυλιγμάτων της γεννήτριας απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3, θεωρώντας ως αναφορά τον άξονα του τυλίγματος της φάσης Α. Επιπλέον, στην ανάλυση που ακολουθεί, ο δρομέας διαθέτει δύο τυλίγματα απόσβεσης (damper windings ή amortisseurs) κάθετα μεταξύ τους. Τα τυλίγματα απόσβεσης αντιστοιχούν στους κλωβούς απόσβεσης που τοποθετούνται στον δρομέα μηχανών έκτυπων πόλων ή σε ισοδύναμα τυλίγματα που παριστάνουν τα δινορρεύματα στις μηχανές κυλινδρικού δρομέα [36], [37]. Επίσης, σημειώνεται ότι λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου των σύγχρονων μηχανών, οι οποίες δεν εισάγουν σημαντικό σφάλμα σε σχέση με την πραγματική λειτουργία τους [33], [36], [37]:

- Το τριφασικό τύλιγμα του στάτη είναι συμμετρικά κατανεμημένο στην περιφέρειά του.
- Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα δεν απομακρύνεται αισθητά από τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.
- Οι χωρητικότητες όλων των τυλιγμάτων αμελούνται.
- Οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις (ΜΕΔ) και οι μαγνητικές ροές έχουν ημιτονοειδή διανομή στο διάκενο, ενώ οι αρμονικές αμελούνται.
- Ο κορεσμός και η υστέρηση αμελούνται σε όλα τα μαγνητικά κυκλώματα.



Σχήμα 2.3: Τυλίγματα στάτη και δρομέα σύγχρονης γεννήτριας. [33]

Οι πεπλεγμένες ροές και οι τάσεις στο σύστημα αναφοράς στάτη δίνονται από τις σχέσεις (2.4) και (2.5), αντίστοιχα [36]:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} & L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} & L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} & L_{CD} & L_{CQ} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$\begin{bmatrix} \upsilon_A \\ \upsilon_B \\ \upsilon_C \\ -\upsilon_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

όπου,

Ψ_x, i_x, υ_x, η πεπλεγμένη ροή, το ρεύμα και η τάση στα άκρα του τυλίγματος x, αντίστοιχα,

R_x, L_{xx}, η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του τυλίγματος x, αντίστοιχα,

L_{xy}, η αλληλεπαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων x και y.

Οι αυτεπαγωγές και οι αλληλεπαγωγές των τυλιγμάτων του στάτη εξαρτώνται από τη μαγνητική αγωγιμότητα του διακένου, τον αριθμό των σπειρών, καθώς επίσης και από τη θέση του δρομέα, η οποία μεταβάλλεται διαρκώς κατά την περιστροφή του. Τα τυλίγματα του δρομέα έχουν σταθερή αυτεπαγωγή και αλληλεπαγωγή μεταξύ τους, η οποία εξαρτάται μόνο από τη μαγνητική αγωγιμότητα του διακένου και τον αριθμό των σπειρών τους. Επιπλέον, τα τυλίγματα f και D είναι κάθετα ως προς το τύλιγμα Q, συνεπώς $L_{fQ} = L_{Qf} = 0$ και $L_{DQ} = L_{QD} = 0$. Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των L_{xx} και L_{xy} για μηχανές κυλινδρικού δρομέα και έκτυπων πόλων δίνονται στην αναφορά [38]. Για την ανάλυση της μόνιμης κατάστασης, η υιοθέτηση του στάσιμου συστήματος αναφοράς στάτη, και κατά συνέπεια η

χρήση των σχέσεων (2.4), (2.5), δεν προκαλεί πρόβλημα. Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως, όταν απαιτείται ανάλυση ασύμμετρης ή μεταβατικής λειτουργίας, όπως είναι για παράδειγμα το βραχυκύκλωμα.

Η ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς των σύγχρονων μηχανών απλοποιείται σημαντικά με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Park[2], σύμφωνα με τον οποίο οι επαγωγικές αντιδράσεις της μηχανής προβάλλονται σε ένα σύστημα αξόνων d-q-0, δημιουργώντας τρία πλασματικά τυλίγματα. Ο άξονας "d" (ευθύς άξονας) ευθυγραμμίζεται με το τύλιγμα διέγερσης στον δρομέα της μηχανής και ο άξονας "q" (εγκάρσιος άξονας) θεωρείται, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι ακολουθεί τον ευθύ άξονα κατά 90°, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα στρεφόμενο σύστημα αναφοράς επί του δρομέα. Ο άξονας "0" δεν είναι μαγνητικά συζευγμένος με τους άλλους δύο άξονες, ενώ ο ίδιος μαγνητίζεται μόνο υπό ασύμμετρες συνθήκες λειτουργίας. Θεωρώντας ότι ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα σχεδόν ίση με τη σύγχρονη ($\omega \approx \omega_s$), οι επαγωγικές αντιδράσεις του στάτη, όπως φαίνονται από τα τυλίγματα του δρομέα, δεν μεταβάλλονται χρονικά, με αποτέλεσμα η μηχανή να μπορεί να παρασταθεί από μαγνητικά συζευγμένα τυλίγματα με σταθερές παραμέτρους. Ο μετασχηματισμός Park για τα ρεύματα δίνεται από τη σχέση (2.6) [36], [39]:

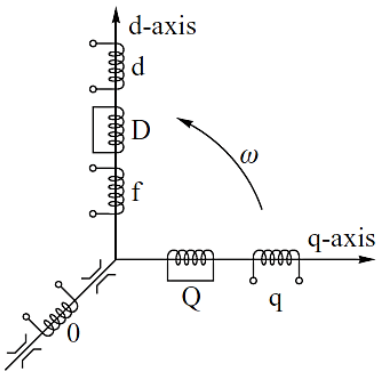
$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\vartheta & cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ sin\vartheta & sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \boldsymbol{P} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

όπου,

$\theta = \omega t + \theta_0$, η γωνία μεταξύ του ευθέος άξονα και του άξονα αναφοράς (τύλιγμα φάσης Α) και θ_0 η αρχική γωνία,

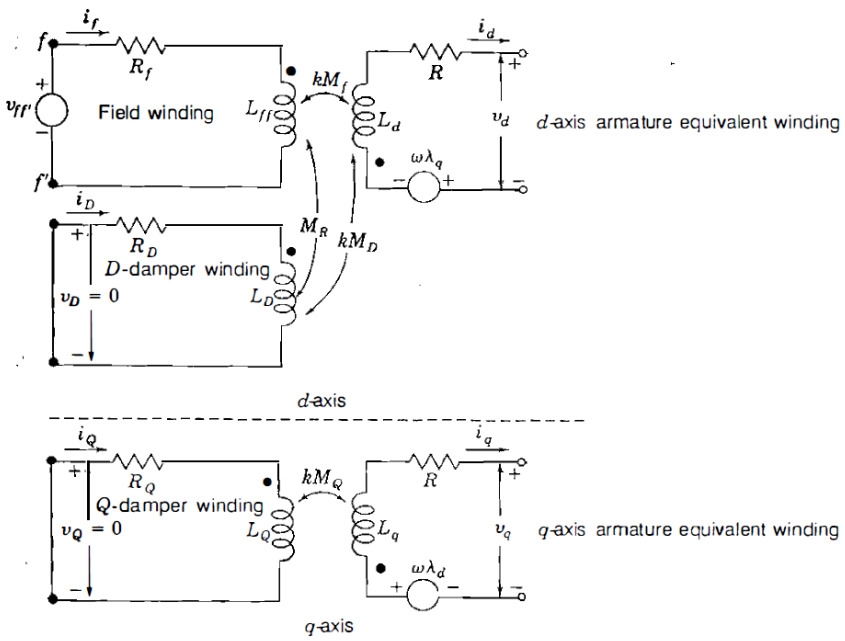
$\boldsymbol{P}$, η μήτρα μετασχηματισμού Park ($\boldsymbol{P}^{-1} = \boldsymbol{P}^T$).

Βάσει του μετασχηματισμού (2.6), για συμμετρικά ρεύματα i_A, i_B, i_C, τα ρεύματα i_d, i_q αποκτούν σταθερή τιμή ανεξάρτητη του χρόνου (συνεχή ρεύματα), ενώ το ρεύμα i_0 προκύπτει μηδενικό. Τα ρεύματα των τυλιγμάτων δρομέα δεν χρειάζονται μετασχηματισμό, διότι προσδιορίζονται ήδη στο στρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Οι άξονες και οι σχετικές θέσεις των τυλιγμάτων της μηχανής στο νέο σύστημα αναφοράς φαίνονται στο Σχήμα 2.4, ενώ το Σχήμα 2.5 απεικονίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των τυλιγμάτων στους δύο άξονες.



Σχήμα 2.4: Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής στο σύστημα αξόνων d-q-0. [36]

[2] Προς τιμήν του Robert H. Park, ο οποίος παρουσίασε τον εν λόγω μετασχηματισμό σε άρθρο του το 1929 [40]. Η ανάλυσή του βασίστηκε στην ήδη γνωστή θεωρία των «δύο αντιδράσεων» (two-reaction theory), την οποία ανέπτυξε πρώτος ο André-Eugène Blondel [41], για να αναλύσει τη λειτουργία των μηχανών έκτυπων πόλων, και επέκτειναν οι Doherty και Nickle [42]. Η αρχική μήτρα μετασχηματισμού, όπως προτάθηκε από τον R. H. Park, δεν ήταν ορθογώνια, με συνέπεια η μήτρα των ισοδύναμων επαγωγών να μην είναι συμμετρική. Η τροποποιημένη ορθογώνια μορφή του μετασχηματισμού, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως, οφείλεται στον Charles Concordia [43], παρόλα αυτά επικράτησε η αναφορά του ως μετασχηματισμός Park.



Σχήμα 2.5: Αλληλεπίδραση πλασματικών τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής. [39]

Ως αποτέλεσμα του μετασχηματισμού Park, οι πεπλεγμένες ροές στο νέο σύστημα αναφοράς δίνονται από τη σχέση (2.7) [36]:

$$\begin{bmatrix} \Psi_0 \\ \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_f & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_f & 0 & L_f & M_r & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_r & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

όπου,

L_x, η αυτεπαγωγή του τυλίγματος x,

M_r, η αλληλεπαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του δρομέα,

M_x, η αλληλεπαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων στάτη και του τυλίγματος x στον δρομέα,

$k = \sqrt{3/2}$.

Βάσει της σχέσης (2.7), όλες οι αυτεπαγωγές και οι αλληλεπαγωγές έχουν πλέον σταθερή τιμή και κατά συνέπεια είναι ανεξάρτητες του χρόνου, απλοποιώντας σημαντικά την ανάλυση λειτουργίας των μηχανών. Όσον αφορά την παράσταση των τάσεων στο στρεφόμενο σύστημα αναφοράς δρομέα, συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.5) και (2.6) προκύπτει η (2.8) [36]:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \\ -v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_s + 3R_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_0 \\ \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

όπου,

R_s, η αντίσταση AC του τυλίγματος στάτη,

R_n, η αντίσταση γείωσης του ουδετέρου κόμβου, εάν υπάρχει.

2.4.2 Ηλεκτρικές Παράμετροι Σύγχρονων Μηχανών

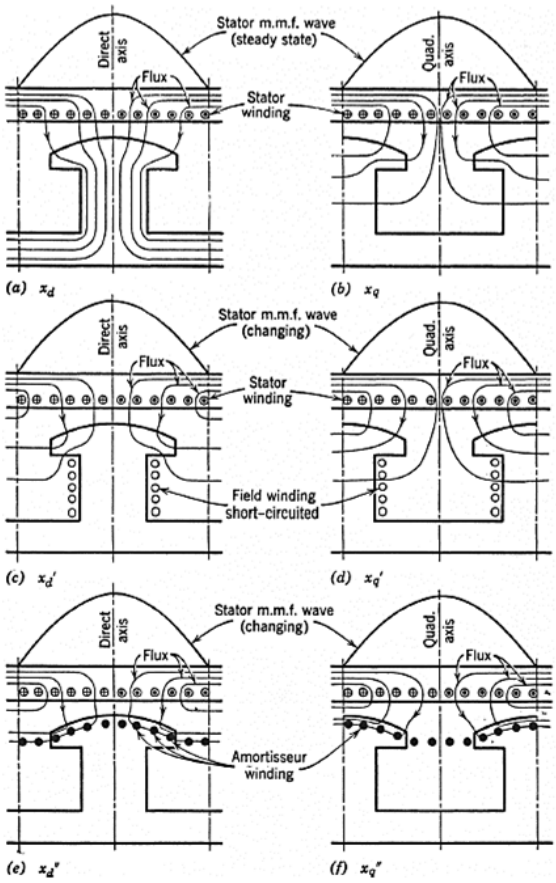
Η συμπεριφορά των τυλιγμάτων στον στάτη και τον δρομέα των σύγχρονων μηχανών είναι κυρίως επαγωγική και εξαρτάται από τη μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος. Χαμηλή μαγνητική αντίσταση συνεπάγεται μεγάλη μαγνητική ροή και κατ' επέκταση μεγάλη επαγωγική αντίδραση. Από την άλλη πλευρά, τα τυλίγματα της σύγχρονης μηχανής παρουσιάζουν ωμική αντίσταση χαμηλής τιμής, η οποία επηρεάζει τις χρονικές σταθερές των μεταβατικών καταστάσεων, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Οι ηλεκτρικές παράμετροι των σύγχρονων μηχανών προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές με ειδικές δοκιμές, βάσει των προτύπων [44], [45]. Η τιμή των επαγωγικών αντιδράσεων των τυλιγμάτων διαφέρει μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης μηχανής, συνεπώς προσδιορίζονται δύο διακριτές τιμές για κάθε αντίδραση. Ο προσδιορισμός των επαγωγικών αντιδράσεων ευθέος άξονα και αρνητικής ακολουθίας υπό συνθήκες κορεσμού είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, σύμφωνα με το πρότυπο [46]. Σημειώνεται ότι η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας δεν επηρεάζεται από τυχόν κορεσμό της μηχανής [47]. Τυπικές τιμές για τις αντιδράσεις, τις αντιστάσεις και τις χρονικές σταθερές των τυλιγμάτων διαφόρων τύπων σύγχρονης μηχανής δίνονται στις αναφορές [47], [48]. Στην ανάλυση που ακολουθεί, έχει θεωρηθεί ότι η σύγχρονη μηχανή διαθέτει ένα τύλιγμα απόσβεσης σε κάθε άξονα (μοντέλο Park ή μοντέλο 5ης τάξης). Επίσης, έχει υιοθετηθεί το πρότυπο [45] για τον συμβολισμό των ηλεκτρικών παραμέτρων.

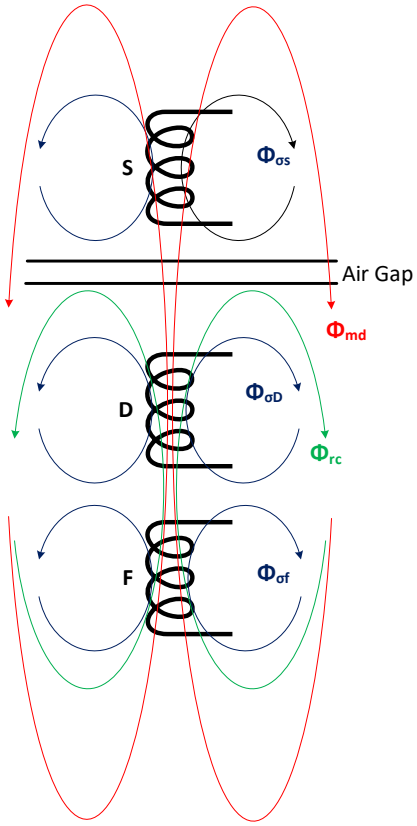
2.4.2.1 Επαγωγικές Αντιδράσεις

Στις σύγχρονες μηχανές, η διαδρομή της μαγνητικής ροής αποτελείται από επιμέρους τμήματα με διαφορετική μαγνητική αντίσταση. Επομένως, η συνισταμένη επαγωγική αντίδραση προκύπτει από τον συνδυασμό των διακριτών τμημάτων του μαγνητικού κυκλώματος. Η συνολική μαγνητική ροή αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες, τη ροή σκέδασης και τη ροή στον πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος. Στην πρώτη συνιστώσα της συνολικής μαγνητικής ροής αντιστοιχεί η επαγωγική αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος στάτη $X_{\sigma s}$. Η αντίδραση X_{md} αφορά τη ροή μέσω του πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος και αποτελείται από τις επιμέρους συνιστώσες X_{Fe} και $X_{\alpha g}$, οι οποίες αντιστοιχούν στη ροή μέσω του πυρήνα σιδήρου και τη ροή μέσω του διακένου αέρος. Επιπλέον, για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων, όπως είναι για παράδειγμα τα βραχυκυκλώματα, λαμβάνονται υπόψη και οι αντιδράσεις σκέδασης των τυλιγμάτων του ευθέος άξονα, δηλαδή του τυλίγματος πεδίου $X_{\sigma f}$ και του τυλίγματος απόσβεσης $X_{\sigma D}$. Τέλος, η ροή σκέδασης που συζευγνύει τα τυλίγματα πεδίου και απόσβεσης X_{rc} συνήθως αμελείται, διότι το τύλιγμα απόσβεσης βρίσκεται πολύ κοντά στο διάκενο. Στην πράξη, όμως, είναι μη μηδενική [33], [36].

Στο Σχήμα 2.6 αποτυπώνεται η επίδραση των αντιδράσεων μηχανής έκτυπων πόλων στη μαγνητική ροή κατά την υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμη κατάσταση, τόσο στον ευθύ όσο και τον εγκάρσιο άξονα. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζονται όλες οι πιθανές διαδρομές της μαγνητικής ροής στον ευθύ άξονα. Κατ' αντιστοιχία, προκύπτουν και οι διαδρομές της μαγνητικής ροής στον εγκάρσιο άξονα.

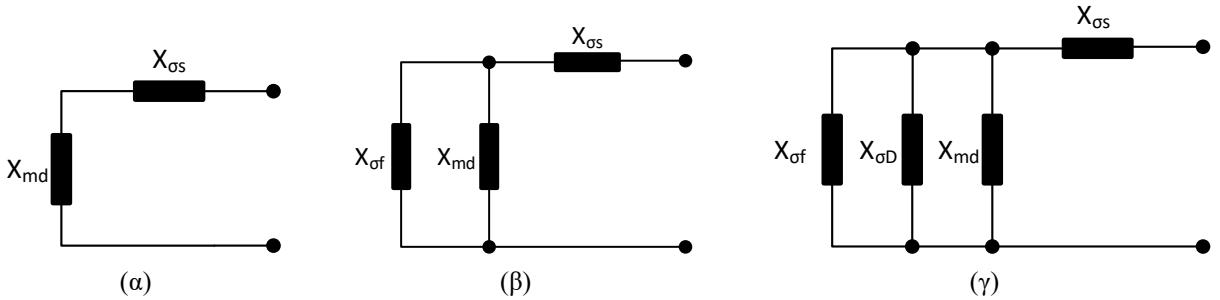


Σχήμα 2.6: Διαδρομή μαγνητικής ροής στη μόνιμη, μεταβατική και υπομεταβατική κατάσταση. [49]



Σχήμα 2.7: Πιθανές διαδρομές μαγνητικής ροής στον ευθύ άξονα.

Τα ισοδύναμα κυκλώματα του Σχήματος 2.8 χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των επαγωγικών αντιδράσεων ευθέος άξονα.



Σχήμα 2.8: Ισοδύναμη αντίδραση ευθέος άξονα στη (α) μόνιμη, (β) μεταβατική, (γ) υπομεταβατική κατάσταση.

Βάσει του Σχήματος 2.8, η σύγχρονη, η μεταβατική και η υπομεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.9), (2.10) και (2.11), αντίστοιχα:

$$X_d = X_{\sigma s} + X_{md} \tag{2.9}$$

$$X'_d = X_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}} = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_f} = \omega\left(L_d - k^2\frac{M_f^2}{L_f}\right) \tag{2.10}$$

$$X''_d = X_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}} = \omega\left(L_d - k^2\frac{M_f^2 L_D + M_D^2 L_f - 2M_f M_D M_r}{L_f L_D - M_r^2}\right) \tag{2.11}$$

Συμπεραίνεται ότι $X''_d < X'_d < X_d$. Επίσης, ισχύει γενικά $X''_d \leq 0{,}85X'_d$ [48].

Οι επαγωγικές αντιδράσεις εγκάρσιου άξονα εξαρτώνται άμεσα από τον βαθμό εκτυπότητας του δρομέα [36]. Η εκτυπότητα του δρομέα (rotor saliency) σχετίζεται άμεσα με την κατασκευαστική ιδιομορφία του και την παρουσία κυκλωμάτων απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα. Ομοίως με τις αντιδράσεις ευθέος άξονα, διακρίνονται σε υπομεταβατική, μεταβατική και σύγχρονη, οι οποίες προκύπτουν από αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα, με την ειδοποιό διαφορά ότι δεν υπάρχει τύλιγμα διέγερσης. Ως εκ τούτου, οι αντιδράσεις X'_q και X_q δεν διαφέρουν, εκτός εάν υπάρχουν περισσότερα του ενός τυλίγματα απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα. Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει τους διάφορους τύπους δρομέα και την αντίστοιχη περιοχή τιμών των αντιδράσεων εγκάρσιου άξονα [36].

Πίνακας 2.3: Τύποι δρομέα και επαγωγικές αντιδράσεις εγκάρσιου άξονα

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΤΥΠΟΣ ΔΡΟΜΕΑ	ΤΙΜΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ
Υπομεταβατική	Κυλινδρικού δρομέα ή δρομέα έκτυπων πόλων, με τύλιγμα απόσβεσης μόνο στον ευθύ άξονα	$X''_q > X''_d$
	Κυλινδρικού δρομέα ή δρομέα έκτυπων πόλων, με τύλιγμα απόσβεσης και στους δύο άξονες	$X''_q \approx X''_d$
Μεταβατική	Κυλινδρικού δρομέα	$X'_q > X'_d$
	Έκτυπων πόλων	$X'_q = X_q$
Μόνιμη	Κυλινδρικού δρομέα	$X_q \approx X_d$
	Έκτυπων πόλων	$X_q < X_d$

Από τον Πίνακα 2.3 συμπεραίνεται γενικά ότι: $X_d \geq X_q \geq X'_q > X'_d > X''_q \geq X''_d$.

Η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας X_2 των σύγχρονων μηχανών προσδιορίζεται, εφαρμόζοντας συμμετρική τριφασική τάση στο τύλιγμα στάτη με αντιστροφή των φάσεων Α και Β και στρέφοντας τον δρομέα με σύγχρονη ταχύτητα, χωρίς διέγερση και με βραχυκυκλωμένο το τύλιγμά του. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας που κυκλοφορεί στο τύλιγμα στάτη παράγει ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο αντίθετης φοράς και διπλάσιας συχνότητας της θεμελιώδους ως προς τον δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επάγονται ρεύματα διπλάσιας συχνότητας στα κυκλώματα του δρομέα και η διαδρομή της μαγνητικής ροής να είναι όμοια με αυτή της υπομεταβατικής κατάστασης, διατηρώντας τις πεπλεγμένες ροές σταθερές.

Η αντίδραση X_2 λαμβάνει τιμή μεταξύ X_d'' και X_q'', ενώ ο προσδιορισμός της εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας που εξετάζονται. Στη γενική περίπτωση ασύμμετρης φόρτισης, όπου το τύλιγμα στάτη της γεννήτριας συνδέεται σε σειρά με μεγάλη εξωτερική αντίδραση του δικτύου, χρησιμοποιείται ο αριθμητικός μέσος των X_d'' και X_q'' σύμφωνα με τη σχέση (2.12) [48], [50], ενώ για τις περιπτώσεις ασύμμετρου βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας, γίνεται χρήση του γεωμετρικού μέσου σύμφωνα με τη (2.13) [51]:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \tag{2.12}$$

$$X_2 = \sqrt{X_d'' X_q''} \tag{2.13}$$

Επίσης, σημειώνεται ότι η σχέση (2.14) δίνει την αντίδραση X_2, σε περίπτωση απουσίας τυλιγμάτων απόσβεσης [48], [50]:

$$X_2 = \frac{X_d' + X_q}{2} \tag{2.14}$$

Η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας X_0 των σύγχρονων μηχανών προσδιορίζεται, εφαρμόζοντας μονοφασική τάση στο τύλιγμα στάτη με τις τρεις φάσεις του συνδεδεμένες σε σειρά και στρέφοντας τον δρομέα με σύγχρονη ταχύτητα, χωρίς διέγερση και με βραχυκυκλωμένο το τύλιγμά του. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, τα διανύσματα των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας που κυκλοφορούν στις τρεις φάσεις του τυλίγματος στάτη συντρέχουν (ίδιο μέτρο και γωνία), με αποτέλεσμα να μην παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο θεμελιώδους συχνότητας και να μην προκύπτει μαγνητική ροή από τον στάτη στον δρομέα μέσω του διακένου. Ομοίως και για τις ΜΕΔ ανώτερων αρμονικών (τάξης 5ης, 7ης, 11ης, 13ης κτλ.), οι οποίες αλληλοαναιρούνται.

Δεν συμβαίνει, όμως, το ίδιο για τις ΜΕΔ 3ης τάξης και πολλαπλάσιων αυτής, οι οποίες προκαλούν μαγνητική ροή μεταξύ των κυκλωμάτων στάτη και δρομέα, όταν ο δρομέας διέρχεται από συγκεκριμένες θέσεις κατά την περιστροφή του (στάσιμο και παλλόμενο μαγνητικό πεδίο) [47]. Η τιμή της πεπλεγμένης ροής 3ης αρμονικής, και συνεπώς της αντίδρασης μηδενικής ακολουθίας, εξαρτάται από τον τρόπο εγκατάστασης των τυλιγμάτων στις αύλακες του τυμπάνου. Εξουδετέρωση των αρμονικών 3ης τάξης επιτυγχάνεται με τη χρήση τυλίγματος κλασματικού βήματος (τυπική τιμή 2/3), επειδή σε κάθε αύλακα εγκαθίστανται δύο αγωγοί διαφορετικών φάσεων με ρεύμα διαφορετικής φοράς [47]. Ο συγκεκριμένος τύπος τυλίγματος οδηγεί σε μικρή ροή σκεδάσεως γύρω από τις αύλακες του τυμπάνου διά μέσου του διακένου, με συνέπεια η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας να λαμβάνει πολύ μικρή τιμή. Γενικά, η τιμή της αντίδρασης X_0 εξαρτάται από τον λόγο του βήματος του τυλίγματος στάτη προς το πολικό βήμα και κυμαίνεται από 15% ως 60% της X_d'', ενώ ισχύει:

$$X_0 < X_{\sigma s} < X_2 \tag{2.15}$$

2.4.2.2 Ωμικές Αντιστάσεις

Όσον αφορά τις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων στις σύγχρονες μηχανές, η αντίσταση θετικής ακολουθίας R_1 είναι ίση με την αντίσταση AC του τυλίγματος στάτη R_s, διότι δεν επάγονται ρεύματα στα τυλίγματα του δρομέα υπό συμμετρικές συνθήκες λειτουργίας (η πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του

δρομέα δεν μεταβάλλεται). Σημειώνεται ότι η αντίσταση R_s είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση DC του τυλίγματος στάτη R_α, λόγω του επιδερμικού φαινομένου.

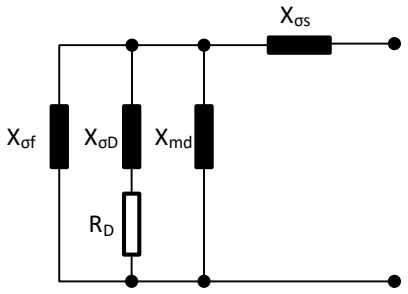
Αντίθετα, οι ασύμμετρες συνθήκες λειτουργίας προκαλούν την επαγωγή ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα. Η αντίσταση αρνητικής ακολουθίας R_2 εξαρτάται άμεσα από την R_D, εφόσον υπάρχει κύκλωμα απόσβεσης, καθώς και από την R_f [47]. Η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας R_0 είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της R_1, όμως σε αρκετές περιπτώσεις θεωρείται ότι έχουν ίδια τιμή. Γενικά ισχύει:

$$R_1 \leq R_0 < R_2 \tag{2.16}$$

2.4.2.3 Χρονικές Σταθερές

Ως γνωστόν, η χρονική σταθερά ενός κυκλώματος *RL* χαρακτηρίζει τον εκθετικό ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στο μαγνητικό κύκλωμα και κατ' επέκταση του ρεύματος που κυκλοφορεί στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Γενικά, η χρονική σταθερά εκθετικής χαρακτηριστικής μπορεί να οριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση της εξαρτημένης μεταβλητής, εν προκειμένω του ρεύματος, σε ποσοστό $e^{-1} = 36{,}8\%$ της αρχικής της τιμής. Η διάρκεια της υπομεταβατικής και της μεταβατικής κατάστασης των μηχανών, καθώς επίσης και της συνιστώσας DC, εξαρτάται από επιμέρους χρονικές σταθερές που χαρακτηρίζουν τη μεταβατική συμπεριφορά της μηχανής συνολικά. Οι εν λόγω χρονικές σταθερές επηρεάζονται σημαντικά από τις εξωτερικές συνθήκες ως προς το τύλιγμα στάτη. Ως εκ τούτου, δύο κατηγορίες χρονικών σταθερών προσδιορίζονται μέσω δοκιμών: οι χρονικές σταθερές βραχυκύκλωσης και ανοικτοκύκλωσης.

Οι υπομεταβατικές χρονικές σταθερές βραχυκύκλωσης και ανοικτοκύκλωσης ευθέος άξονα (T_d'', T_{do}'') εξαρτώνται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τυλίγματος απόσβεσης. Με τη βοήθεια του Σχήματος 2.9 και θεωρώντας ότι η αντίδραση $X_{\sigma s}$ είναι αμελητέα, προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού (2.17) και (2.18) για τις χρονικές σταθερές T_d'' και T_{do}'', αντίστοιχα.



Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό των υπομεταβατικών χρονικών σταθερών ευθέος άξονα.

$$T_d'' = \frac{X_{\sigma D}}{\omega R_D} \tag{2.17}$$

$$T_{do}'' = \frac{X_{\sigma D} + \dfrac{X_{md} X_{\sigma f}}{X_{md} + X_{\sigma f}}}{\omega R_D} \approx \frac{X_{\sigma D} + X_d'}{\omega R_D} \tag{2.18}$$

Με αμελητέα αντίδραση $X_{\sigma s}$, η $X_{\sigma D}$ υπολογίζεται ως εξής:

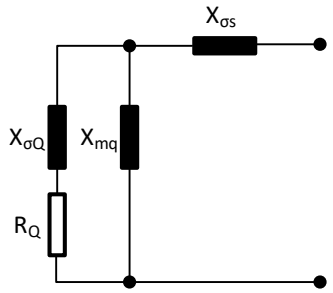
$$X_{\sigma D} \approx \frac{X_d' X_d''}{X_d' - X_d''} \tag{2.19}$$

Διαιρώντας τη (2.17) με τη (2.18) και κάνοντας χρήση της (2.19), προκύπτει η εξής βασική σχέση:

$$T_d'' \approx T_{do}'' \frac{X_d''}{X_d'} \tag{2.20}$$

Σημειώνεται ότι για τις αντιδράσεις X_d'' και X_d' στη σχέση (2.20), θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι τιμές που αντιστοιχούν σε κορεσμένη μηχανή, σύμφωνα με την οδηγία [52]. Η σχέση (2.20) είναι προσεγγιστική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της χρονικής σταθεράς T_{do}'', όταν δεν είναι γνωστή η τιμή της.

Ομοίως, οι χρονικές σταθερές εγκάρσιου άξονα υπολογίζονται με τη βοήθεια του Σχήματος 2.10 από τις σχέσεις (2.21)–(2.23):



Σχήμα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό των υπομεταβατικών χρονικών σταθερών εγκάρσιου άξονα.

$$T_q'' = \frac{X_{\sigma Q}}{\omega R_Q} \tag{2.21}$$

$$T_{qo}'' = \frac{X_{\sigma Q} + X_{mq}}{\omega R_Q} \tag{2.22}$$

$$T_q'' \approx T_{qo}'' \frac{X_q''}{X_q'} \tag{2.23}$$

Όσον αφορά τη μεταβατική κατάσταση σύγχρονης μηχανής, οι χρονικές σταθερές βραχυκύκλωσης και ανοικτοκύκλωσης ευθέος άξονα (T_d', T_{do}') εξαρτώνται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τυλίγματος πεδίου. Αγνοώντας την αντίδραση $X_{\sigma s}$, οι χρονικές σταθερές T_d', T_{do}' και η συσχέτισή τους δίνονται από τις σχέσεις (2.24)–(2.26):

$$T_d' = \frac{X_{\sigma f}}{\omega R_f} \tag{2.24}$$

$$T_{do}' = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{\omega R_f} \tag{2.25}$$

$$T_d' \approx T_{do}' \frac{X_d'}{X_d} \tag{2.26}$$

Ως επί το πλείστον, η μεταβατική αντίδραση και οι μεταβατικές χρονικές σταθερές εγκάρσιου άξονα δεν δίνονται από τους κατασκευαστές γεννητριών. Ειδικά για τις μηχανές έκτυπων πόλων, οι μεταβατικές παράμετροι εγκάρσιου άξονα δεν έχουν έννοια. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αντίδραση X_q χρησιμοποιείται στη θέση της X_q' στη σχέση (2.23).

Οι σχέσεις (2.17)–(2.26) ισχύουν θεωρώντας ότι κατά την υπομεταβατική περίοδο $R_f = R_Q = 0$, ενώ κατά τη μεταβατική περίοδο $R_D = 0$. Οι συγκεκριμένες παραδοχές απλοποιούν σημαντικά τον προσδιορισμό των χρονικών σταθερών, ενδέχεται όμως να οδηγήσουν σε σημαντικό σφάλμα συγκριτικά με τις μετρούμενες τιμές που προκύπτουν από τις δοκιμές. Οι αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού των χρονικών σταθερών δίνονται στην αναφορά [33].

Τέλος, η χρονική σταθερά τυλίγματος στάτη T_α αντιστοιχεί στον ρυθμό μείωσης της συνεχούς συνιστώσας των φασικών ρευμάτων, κατόπιν τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της

γεννήτριας. Η ροή συνεχούς ρεύματος στον στάτη προκαλεί εξ' επαγωγής ροή εναλλασσόμενου ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα [33]. Υπό αυτές τις συνθήκες, η αυτεπαγωγή του στάτη είναι ίση με την αυτεπαγωγή αρνητικής ακολουθίας και συνεπώς:

$$T_a = \frac{X_2}{\omega R_a} \tag{2.27}$$

Σημειώνεται ότι η τιμή της αντίδρασης X_2 που χρησιμοποιείται στη (2.27) εξαρτάται από τον τύπο του εξεταζόμενου βραχυκυκλώματος, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

2.4.3 Συμμετρικό Βραχυκύκλωμα Πλησίον Γεννήτριας

Ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης για σφάλμα πλησίον στρεφόμενης μηχανής βασίζεται στο θεώρημα σταθερής πεπλεγμένης ροής, όπως πρώτος παρουσίασε ο R. E. Doherty [53]. Το εν λόγω θεώρημα είναι ανάλογο της αρχής διατήρησης της ορμής και αποδεικνύει ότι η πεπλεγμένη ροή σε ένα κλειστό κύκλωμα με πεπερασμένη αντίσταση και τάση δεν μπορεί να αλλάξει ακαριαία. Η ιδιότητα αυτή των επαγωγικών κυκλωμάτων είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων σε κυκλώματα, όπου η αυτεπαγωγή ή η αλληλεπαγωγή τους με άλλα κυκλώματα μεταβάλλεται λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ τους.

Η ένταση και η μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης πλησίον γεννήτριας, από την έναρξη του σφάλματος μέχρι τη μόνιμη κατάσταση, εξαρτάται κυρίως από:

- τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας της γεννήτριας πριν το σφάλμα,
- την επαγωγική αντίδραση και την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων της γεννήτριας,
- την παρουσία τυλιγμάτων απόσβεσης στον δρομέα της γεννήτριας,
- τον τύπο διέγερσης.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιείται το μοντέλο Park για την αναπαράσταση της σύγχρονης γεννήτριας και θεωρείται ότι η μηχανή λειτουργεί «εν κενώ» πριν από βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) ή εσωτερική τάση E_i της γεννήτριας είναι ίδια κατά την υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμη κατάσταση και ίση με τη φασική τάση ακροδεκτών V_t, λόγω μηδενικού φορτίου πριν το σφάλμα. Τη στιγμή εκδήλωσης του βραχυκυκλώματος, η τάση ακροδεκτών και η τάση πεδίου μηδενίζονται. Συνεπώς, από το σύστημα διαφορικών εξισώσεων (2.8) και με μηδενικό αρχικό ρεύμα (πριν και ακριβώς μετά το σφάλμα, το ρεύμα έχει την ίδια ένταση, σύμφωνα με το θεώρημα σταθερής πεπλεγμένης ροής), προκύπτει η σχέση (2.28) για το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη φάση Α [36], [40], [43]:

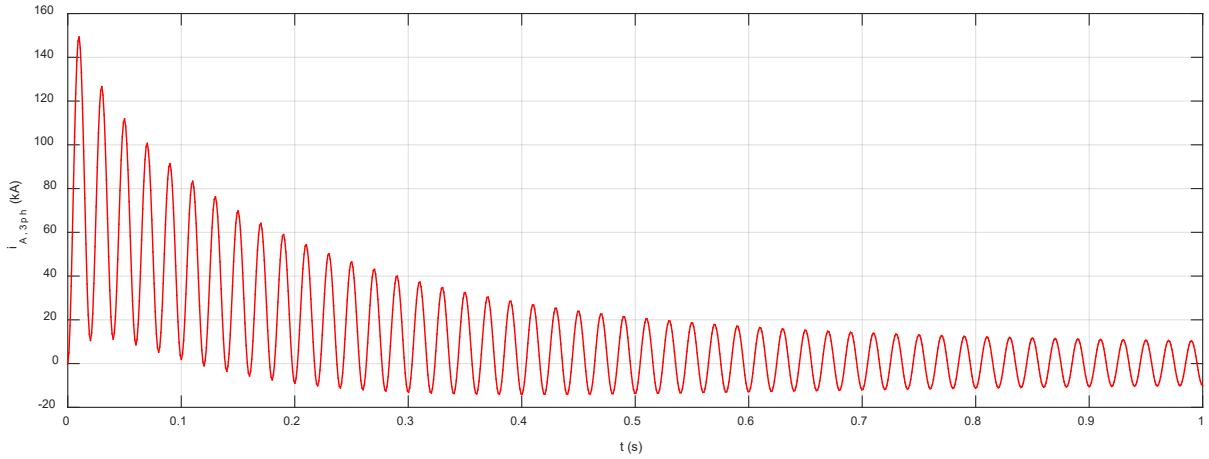
$$i_{A,3ph}(t) = -i_{ac,3ph}(t)\cos(\omega t + \theta_0) + i_{dc,3ph}(t) \tag{2.28}$$

όπου,

$$i_{ac,3ph}(t) = \sqrt{2}V_t\left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right)e^{-\frac{t}{T''_d}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right)e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{1}{X_d}\right] \tag{2.29}$$

$$i_{dc,3ph}(t) = \frac{\sqrt{2}V_t cos\theta_0}{X''_d}e^{-\frac{t}{T_a}} \tag{2.30}$$

Εάν αντικατασταθεί στη (2.28) ο όρος ωt από τους όρους $\omega t - 2\pi/3$ και $\omega t + 2\pi/3$, προκύπτουν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης για τις φάσεις Β και C, αντίστοιχα. Η σχέση (2.28) έχει την ίδια μορφή με τη (2.3), με την ειδοποιό διαφορά ότι η τιμή του συμμετρικού όρου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Η κυματομορφή της (2.28) απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Ρεύμα τριφασικού σφάλματος πλησίον γεννήτριας.

Η σχέση (2.28) ισχύει όταν $X_q'' \approx X_d''$. Αντίθετα, εάν η μηχανή παρουσιάζει υπομεταβατική εκτυπότητα ($X_q'' > X_d''$), προκύπτει επιπλέον συνιστώσα AC με διπλάσια συχνότητα της ονομαστικής (αρμονική 2ης τάξης), ενώ μεταβάλλεται και η τιμή της συνιστώσας DC. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα βραχυκύκλωσης της φάσης A δίνεται από τη σχέση (2.31) [36], [43]:

$$i_{A,3ph}(t) = -i_{ac,3ph}(t)\cos(\omega t + \theta_0) + i_{dc,3ph}(t) + i_{2h,3ph}(t)cos(2\omega t + \theta_0) \tag{2.31}$$

όπου,

$$i_{dc,3ph}(t) = \frac{\sqrt{2}V_t cos\theta_0}{2}\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''}\right)e^{-\frac{t}{T_a}} \tag{2.32}$$

$$i_{2h,3ph}(t) = \frac{\sqrt{2}V_t}{2}\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''}\right)e^{-\frac{t}{T_a}} \tag{2.33}$$

Εάν θεωρηθεί $X_q'' \approx X_d''$, η σχέση (2.31) παίρνει τη μορφή της (2.28). Η γενική περίπτωση της φορτισμένης γεννήτριας πριν από βραχυκύκλωμα περιγράφεται λεπτομερώς στις αναφορές [36], [43], όπου δίνεται και η πλήρης σχέση για το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

2.4.4 Συμπεριφορά Γεννήτριας σε Ασύμμετρο Σφάλμα

Τα ασύμμετρα σφάλματα πλησίον σύγχρονης γεννήτριας αναλύονται λεπτομερώς στις αναφορές [36], [43]. Η σχέση (2.34) δίνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης που ρέει στις φάσεις B και C για την περίπτωση διφασικού σφάλματος στους ακροδέκτες αφόρτιστης γεννήτριας, ενώ η (2.35) αντιστοιχεί στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη στη φάση A, όταν $X_q'' \approx X_d''$ και $R_\alpha \approx 0$:

$$i_{C,2ph}(t) = -i_{B,2ph}(t) = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\sqrt{2}V_t}{X_d''}\left[\sin(\omega t + \theta_0) - sin\theta_0\right] \tag{2.34}$$

$$i_{A,1pg}(t) = \frac{3\sqrt{2}V_t}{2X_d'' + X_0}\left[cos(\omega t + \theta_0) - cos\theta_0\right] \tag{2.35}$$

Εάν η μηχανή παρουσιάζει υπομεταβατική εκτυπότητα ($X_q'' > X_d''$), οι σχέσεις (2.34) και (2.35) γίνονται:

$$i_{C,2ph}(t) = -i_{B,2ph}(t) = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2}V_t\left[\sin(\omega t + \theta_0) - sin\theta_0\right]}{X_d'' + X_q'' - \left(X_d'' - X_q''\right)\cos 2(\omega t + \theta_0)} \tag{2.36}$$

$$i_{A,1pg}(t) = \frac{3\sqrt{2}V_t\left[\cos(\omega t + \theta_0) - cos\theta_0\right]}{X_d'' + X_q'' + \left(X_d'' - X_q''\right)\cos 2(\omega t + \theta_0) + X_0} \tag{2.37}$$

Τέλος, εάν ληφθεί υπόψη και η αντίσταση του τυλίγματος στάτη, προκύπτουν οι παρακάτω πλήρεις σχέσεις για τα διφασικά σφάλματα και τα μονοφασικά σφάλματα προς γη στους ακροδέκτες γεννήτριας, αντίστοιχα, αναπαριστώντας τις (2.36) και (2.37) με τη μορφή σειρών Fourier:

$$\begin{aligned} & i_{C,2ph}(t) = -i_{B,2ph}(t) = \\ & = \sqrt{6}V_t\left[\left(\frac{1}{X_d'' + X_2} - \frac{1}{X_d' + X_2}\right)e^{-\frac{t}{T_{d,2}''}} + \left(\frac{1}{X_d' + X_2} - \frac{1}{X_d + X_2}\right)e^{-\frac{t}{T_{d,2}'}} + \frac{1}{X_d + X_2}\right] \cdot \\ & \left(sin\vartheta - bsin3\vartheta + b^2 sin5\vartheta \mp \cdots\right) - \frac{\sqrt{6}V_t sin\theta_0}{X_2}e^{-\frac{t}{T_{a,2}}}\left(0{,}5 - bcos2\vartheta + b^2 cos4\vartheta \mp \cdots\right) \end{aligned} \tag{2.38}$$

$$\begin{aligned} i_{A,1pg}(t) = 3\sqrt{2}V_t & \left[\left(\frac{1}{X_d'' + X_2 + X_0} - \frac{1}{X_d' + X_2 + X_0}\right)e^{-\frac{t}{T_{d,1}''}}\right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{X_d' + X_2 + X_0} - \frac{1}{X_d + X_2 + X_0}\right)e^{-\frac{t}{T_{d,1}'}} + \frac{1}{X_d + X_2 + X_0}\right] \cdot \end{aligned} \tag{2.39}$$

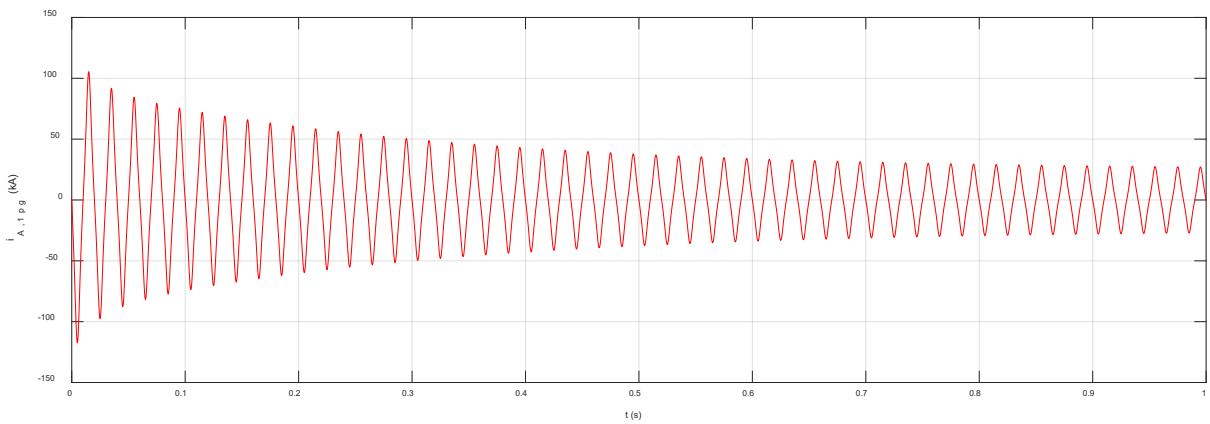
$$\left(cos\vartheta + b_0 cos3\vartheta + b_0^2 cos5\vartheta + \cdots\right) - \frac{3\sqrt{2}V_t cos\theta_0}{X_2 + 0{,}5X_0}e^{-\frac{t}{T_{a,1}}}\left(0{,}5 + b_0 cos2\vartheta + b_0^2 cos4\vartheta + \cdots\right)$$

όπου, οι όροι b και b_0 καλούνται συντελεστές ασυμμετρίας και δίνονται από τις σχέσεις (2.40), (2.41):

$$b = \frac{\sqrt{X_q''} - \sqrt{X_d''}}{\sqrt{X_q''} + \sqrt{X_d''}} \tag{2.40}$$

$$b_0 = \frac{\sqrt{X_q'' + 0.5X_0} - \sqrt{X_d'' + 0.5X_0}}{\sqrt{X_q'' + 0.5X_0} + \sqrt{X_d'' + 0.5X_0}} \tag{2.41}$$

Η κυματομορφή της σχέσης (2.39) απεικονίζεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Ρεύμα μονοφασικού σφάλματος προς γη πλησίον γεννήτριας.

Εάν θεωρηθεί $X_q'' = X_d''$ και $R_\alpha = 0$, τότε $b = b_0 = 0$ και οι σχέσεις (2.38), (2.39) παίρνουν τη μορφή των (2.34), (2.35). Οι χρονικές σταθερές για τα ασύμμετρα ρεύματα βραχυκύκλωσης, όπως αυτά εκφράζονται στις (2.38), (2.39), δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$T_{d,2}'' = T_{do}'' \left(\frac{X_d'' + X_2}{X_d' + X_2} \right) \tag{2.42}$$

$$T_{d,2}' = T_{do}' \left(\frac{X_d' + X_2}{X_d + X_2} \right) \tag{2.43}$$

$$T_{a,2} = \frac{X_2}{\omega R_a} \tag{2.44}$$

$$T_{d,1}'' = T_{do}'' \frac{X_d'' + X_2 + X_0}{X_d' + X_2 + X_0} \tag{2.45}$$

$$T_{d,1}' = T_{do}' \frac{X_d' + X_2 + X_0}{X_d + X_2 + X_0} \tag{2.46}$$

$$T_{a,1} = \frac{2X_2 + X_0}{\omega(2R_a + R_0)} \tag{2.47}$$

Σημειώνεται ότι η αντίδραση X_2 προσδιορίζεται με διαφορετικό τρόπο για τα τριφασικά, τα διφασικά και τα μονοφασικά προς γη σφάλματα (σχέσεις 207, 208, 204, αντίστοιχα, στην αναφορά [43]). Η περίπτωση του διφασικού σφάλματος προς γη στους ακροδέκτες σύγχρονης γεννήτριας παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και δεν καλύπτεται στο παρόν κεφάλαιο. Ο αναγνώστης ενθαρρύνεται να ανατρέξει στις αναφορές [43], [54] για τη λεπτομερή ανάλυση της συγκεκριμένης περίπτωσης.

2.4.5 Καμπύλη Απομείωσης Συνεισφοράς Γεννήτριας

Η σχέση (2.29) αποτελεί την περιβάλλουσα του συμμετρικού όρου του ρεύματος βραχυκύκλωσης, όπως έχει οριστεί στη (2.28), ενώ η (2.30) δίνει τη συνιστώσα DC του ρεύματος. Από τον συνδυασμό των (2.29) και (2.30) προκύπτει η καμπύλη απομείωσης συνεισφοράς της γεννήτριας (short-circuit decrement curve) σε τριφασικό βραχυκύκλωμα. Η ενδεικνύμενη τιμή της (2.29) είναι ίση με:

$$I_{sym} = \left(I_d'' - I_d'\right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(I_d' - I_d\right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_d \tag{2.48}$$

όπου,

$$I_d'' = \frac{V_t}{X_d''}\ \alpha\mu \tag{2.49}$$

$$I_d' = \frac{V_t}{X_d'}\ \alpha\mu \tag{2.50}$$

$$I_d = k\frac{V_t}{X_d}\ \alpha\mu, k \geq 1 \tag{2.51}$$

Στην ανάλυση σφαλμάτων που προηγήθηκε, θεωρήθηκε ότι η σύγχρονη γεννήτρια δεν λειτουργεί με αυτόματη ρύθμιση τάσης, με το ρεύμα διέγερσης να παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου ($k = 1$, στη (2.51)). Αντίθετα, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης αυξάνει για πεπερασμένο χρονικό διάστημα την τάση διέγερσης, και κατ' επέκταση το ρεύμα διέγερσης, με στόχο τη διατήρηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας εντός των επιθυμητών ορίων. Η εν λόγω συμπεριφορά του ρυθμιστή έχει επίδραση στη μόνιμη κατάσταση του σφάλματος, οδηγώντας στην αύξηση του ρεύματος I_d ($k > 1$, στη (2.51)).

Εάν η γεννήτρια είναι φορτισμένη τη στιγμή του σφάλματος, ο όρος V_t στις σχέσεις (2.49), (2.50) αντικαθίσταται από τους όρους $E'' = V_t + I_L X_d''(sin\theta + jcos\theta)$ και $E' = V_t + I_L X_d'(sin\theta + jcos\theta)$, αντίστοιχα, όπου I_L το αρχικό ρεύμα φόρτισης και $cos\theta$ ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας. Αναλυτικό παράδειγμα προσδιορισμού της καμπύλης απομείωσης συνεισφοράς για γεννήτρια ΜΤ δίνεται στην εργασία [55].

Η μέγιστη τιμή της (2.30) προκύπτει για $\theta_0 = 0$ και δίνεται από τη σχέση (2.52):

$$I_{dc-max} = \sqrt{2} I_d'' e^{-\frac{t}{T_a}} \tag{2.52}$$

ενώ η ενδεικνύμενη τιμή του συνολικού ρεύματος τριφασικού βραχυκυκλώματος δίνεται από τη σχέση (2.53):

$$I_{asym} = \sqrt{I_{sym}^2 + I_{dc-max}^2} \tag{2.53}$$

Στην περίπτωση διφασικού σφάλματος, οι σχέσεις (2.48), (2.52) και (2.53) γίνονται βάσει της (2.38), αντίστοιχα:

$$I_{sym,2} = \left(I_{d,2}'' - I_{d,2}'\right)e^{-\frac{t}{T_{d,2}''}} + \left(I_{d,2}' - I_{d,2}\right)e^{-\frac{t}{T_{d,2}'}} + I_{d,2} \tag{2.54}$$

$$I_{dc-max,2} = \frac{\sqrt{6}V_t}{X_2} e^{-\frac{t}{T_{a,2}}} \tag{2.55}$$

$$I_{asym,2} = \sqrt{I_{sym,2}^2 + I_{dc-max,2}^2} \tag{2.56}$$

ενώ για το μονοφασικό σφάλμα προς γη προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις βάσει της (2.39):

$$I_{sym,1} = \left(I_{d,1}'' - I_{d,1}'\right)e^{-\frac{t}{T_{d,1}''}} + \left(I_{d,1}' - I_{d,1}\right)e^{-\frac{t}{T_{d,1}'}} + I_{d,1} \tag{2.57}$$

$$I_{dc-max,1} = \frac{3\sqrt{2}V_t}{X_2 + 0{,}5X_0} e^{-\frac{t}{T_{a,1}}} \tag{2.58}$$

$$I_{asym,1} = \sqrt{I_{sym,1}^2 + I_{dc-max,1}^2} \tag{2.59}$$

2.4.6 Συνεισφορά Κινητήρα στο Συμμετρικό Βραχυκύκλωμα

Στην κανονική λειτουργία, οι κινητήρες τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο υπό κανονική τάση λειτουργίας και τη μετατρέπουν σε μηχανική ενέργεια οδηγώντας το φορτίο τους. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες του κινητήρα, η τάση βυθίζεται σε πολύ χαμηλή τιμή, η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στον κινητήρα σταματά και ο κινητήρας αρχίζει να επιβραδύνεται. Όπως έχει ήδη επισημανθεί στην αρχή του κεφαλαίου, η πεπλεγμένη μαγνητική ροή στον δρομέα δεν μπορεί να μηδενιστεί ακαριαία. Επιπλέον, η αδράνεια του φορτίου οδηγεί τον κινητήρα κατά την επιβράδυνσή του, όπως οι κινητήριες μηχανές οδηγούν τις γεννήτριες. Ο συνδυασμός της παγιδευμένης μαγνητικής ροής και της διατηρούμενης περιστροφής του δρομέα της μηχανής συνεπάγεται ανάπτυξη εσωτερικής τάσης και συνεισφοράς του κινητήρα στο βραχυκύκλωμα [56].

Η συνεισφορά των επαγωγικών κινητήρων διαρκεί τυπικά από έναν έως τέσσερις κύκλους, ενώ αυτή των σύγχρονων κινητήρων μπορεί να διαρκέσει από έξι έως οκτώ κύκλους, λόγω του συστήματος διέγερσης στον δρομέα της μηχανής που διατηρεί για περισσότερο χρονικό διάστημα την εσωτερική τάση [57]. Σε κάθε περίπτωση, οι κινητήρες συνεισφέρουν στο βραχυκύκλωμα για τουλάχιστον έναν κύκλο, αυξάνοντας το συνολικό ρεύμα σφάλματος, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καταπόνηση του εξοπλισμού ισχύος και των διακοπτικών μέσων του δικτύου.

Η συχνότητα του ρεύματος συνεισφοράς του επαγωγικού κινητήρα αρχικά αποκλίνει ελαφρώς από τη συχνότητα συστήματος λόγω της ολίσθησης, ενώ στη συνέχεια μειώνεται με ρυθμό εξαρτώμενο από την αδράνεια του φορτίου και του ίδιου του κινητήρα. Οι σύγχρονες μηχανές, είτε πρόκειται για γεννήτριες είτε για κινητήρες, έχουν υπομεταβατική, μεταβατική και σύγχρονη αντίδραση. Αντίθετα, στους επαγωγικούς κινητήρες δεν υπάρχει ξεχωριστό σύστημα διέγερσης και οι βραχυκυκλωμένες ράβδοι του τυλίγματος δρομέα συμπεριφέρονται όπως τα τυλίγματα απόσβεσης στον δρομέα των σύγχρονων γεννητριών. Επομένως, οι επαγωγικοί κινητήρες απλού κλωβού ή τυλιγμένου δρομέα παρουσιάζουν μόνο υπομεταβατική αντίδραση, ενώ οι κινητήρες διπλού κλωβού ή βαθιάς αύλακας παρουσιάζουν επιπλέον μεταβατική αντίδραση.

Η συνεισφορά των επαγωγικών κινητήρων περιγράφεται από τις σχέσεις (2.28)–(2.30) των σύγχρονων μηχανών, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες αντιδράσεις και χρονικές σταθερές [58]. Η ένταση του ρεύματος συνεισφοράς εξαρτάται από τη σύνθετη αντίσταση μπροστά από την εσωτερική τάση του κινητήρα, η οποία λαμβάνεται, με ικανοποιητική ακρίβεια, ίση με τη σύνθετη αντίσταση του κινητήρα σε απευθείας εκκίνηση, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα ειδικών δοκιμών [59], [60].

Σημειώνεται ότι οι επαγωγικές γεννήτριες έχουν ίδια συμπεριφορά με τους επαγωγικούς κινητήρες στο βραχυκύκλωμα, λόγω έλλειψης εξωτερικής διέγερσης, με τη διαφορά ότι η συχνότητα του ρεύματος συνεισφοράς παραμένει σταθερή λόγω της διατηρούμενης περιστροφής του δρομέα.

2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

2.5.1 Συμμετρικές Συνιστώσες

Η ανάλυση των τριφασικών, και γενικά πολυφασικών, συστημάτων απλοποιείται σημαντικά με τη βοήθεια των ισοδύναμων μονοφασικών κυκλωμάτων. Βασική προϋπόθεση για την εν λόγω απλοποίηση είναι η συμμετρία του τριφασικού συστήματος. Ένα τριφασικό σύστημα είναι συμμετρικό όταν:

- οι σύνθετες αντιστάσεις των φάσεων είναι ίδιες (διαγώνια συμμετρία),
- απουσιάζουν ζεύξεις μεταξύ των φάσεων, ή όταν υπάρχουν οι τιμές τους είναι όλες ίσες μεταξύ τους (κυκλική συμμετρία),
- τροφοδοτείται από συμμετρικό σύστημα τάσεων.

Η μονοφασική ισοδυναμία ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος αποδεικνύεται αναλυτικά στην αναφορά [50]. Στην πράξη, όμως, τα συστήματα δεν είναι απολύτως συμμετρικά. Συνήθεις περιπτώσεις ασυμμετρίας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- τα ασύμμετρα σφάλματα,

- τα ανοικτοκυκλώματα (μονοπολική ή διπολική διακοπή αγωγού),
- τα πολλαπλά σφάλματα,
- οι μη αντιμετατεθειμένοι αγωγοί σε γραμμές μεταφοράς και διανομής,
- τα ασύμμετρα φορτία (μονοφασικές καταναλώσεις).

Γενικά, η ανάλυση των ασύμμετρων τριφασικών συστημάτων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη λόγω των ζεύξεων μεταξύ των φάσεων. Εάν υποθέσουμε ότι τα τριφασικά συστήματα είναι εν γένει συμμετρικά (ίσες σύνθετες αντιστάσεις φάσεων και ίσες αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ φάσεων), η ανάλυση απλοποιείται εξόχως μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού του αρχικού φυσικού συστήματος σε άλλο σύστημα συνιστωσών. Συγκεκριμένα, κάθε τριφασικό συμμετρικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε τρία τριφασικά συστήματα (δύο συμμετρικά και ένα ασύμμετρο). Η εν λόγω προσέγγιση ονομάζεται μέθοδος συμμετρικών συνιστωσών (symmetrical components) και ο μετασχηματισμός που τη διέπει παρουσιάζεται αναλυτικά στις αναφορές [28], [39], [50]. Καθένα από τα τρία συστήματα συμμετρικών συνιστωσών αντιστοιχεί σε μία φάση και αποτελείται από:

- το κύκλωμα ευθείας συνιστώσας ή θετικής ακολουθίας (1 ή +),
- το κύκλωμα αντίστροφης συνιστώσας ή αρνητικής ακολουθίας (2 ή –),
- το κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας ή μηδενικής ακολουθίας (0).

Οι ομοπολικές συνιστώσες είναι ίσες και παράλληλες, οι ευθείες συνιστώσες αποτελούν συμμετρικό σύστημα με συμβατική ακολουθία φασιθετών (αντιωρολογιακή) και οι αντίστροφες συνιστώσες αποτελούν επίσης συμμετρικό σύστημα αλλά με αντίστροφη ακολουθία (ωρολογιακή). Τα ισοδύναμα μονοφασικά κυκλώματα που προκύπτουν ονομάζονται κυκλώματα ακολουθίας (sequence networks), τα οποία είναι ανεξάρτητα και μη συζευγμένα. Σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας υπάρχει μόνο στο σημείο του δικτύου όπου παρουσιάζεται η ασυμμετρία. Οι τιμές των ρευμάτων και τάσεων ακολουθίας μπορούν να μετασχηματισθούν ξανά στο σύστημα φάσεων, προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις φασικές τάσεις και τα φασικά ρεύματα που προκύπτουν στο σημείο ασυμμετρίας.

Η ανάλυση ασύμμετρων σφαλμάτων στη μόνιμη κατάσταση γίνεται αποκλειστικά με τη μέθοδο συμμετρικών συνιστωσών[3] χάρη στην απλότητα της εφαρμογής της. Επίσης, η εισαγωγή του συστήματος συμμετρικών συνιστωσών προσέφερε ένα σπουδαίο εργαλείο για την ανάλυση διαταραχών και συμβάντων στα ηλεκτρικά δίκτυα, ενώ συνέβαλε θετικά στην ανάπτυξη των μεθόδων προστασίας. Η λειτουργία πολλών στοιχείων προστασίας και αλγορίθμων εντοπισμού θέσης σφάλματος στους σύγχρονους Η/Ν βασίζεται στον υπολογισμό των συμμετρικών συνιστωσών.

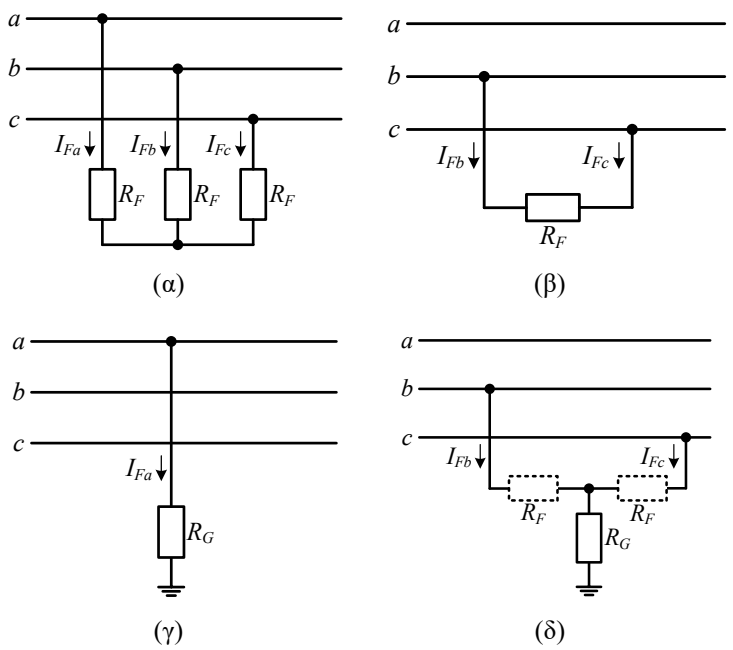
2.5.2 Ασύμμετρα Σφάλματα

Ως ασύμμετρα χαρακτηρίζονται τα σφάλματα, κατά τη διάρκεια των οποίων δεν υφίσταται συμμετρία φασικών τάσεων και ρευμάτων. Όλα τα σφάλματα, πλην του τριφασικού, ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία. Το τριφασικό κύκλωμα που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο σφάλματος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία αντίστασης σφάλματος (R_F, η αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσεων και R_G, η αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσης ή φάσεων και γης).

Ως σύμβαση και για λόγους απλοποίησης θεωρείται ότι:

- το διφασικό σφάλμα (χωρίς και προς γη) συμβαίνει μεταξύ των φάσεων B και C,
- το μονοφασικό σφάλμα προς γη συμβαίνει στη φάση A.

[3] Το 1912, ο L. G. Stokvis δημοσίευσε πρώτος εργασία για τη δυνατότητα ανάλυσης ενός ασύμμετρου συστήματος ρευμάτων σε συνιστώσες ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αλλά η ιδέα είχε συλληφθεί νωρίτερα, περίπου το 1895, ως αποτέλεσμα της μελέτης λειτουργίας των πρώτων μονοφασικών κινητήρων από τους Ferraris, Lamme και τους συνεργάτες τους [61]. Το 1918, ο Charles L. Fortesque εισήγαγε την ομοπολική συνιστώσα και γενικώς απέδειξε τη δυνατότητα ανάλυσης ενός N-φασικού συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες [62]. Η δημοσίευση αυτή ήταν αποτέλεσμα ομαδικής εργασίας μηχανικών της εταιρίας Westinghouse Electric Corporation και ψηφίστηκε ως το σημαντικότερο άρθρο στον τομέα ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως για τον 20ο αιώνα. Κατόπιν, οι E. L. Harder, W. A. Lewis και E. Clarke, μεταξύ άλλων, απλοποίησαν σημαντικά τη μέθοδο στη μορφή που χρησιμοποιείται σήμερα.



Σχήμα 2.13: Τύποι και αντιστάσεις σφάλματος.

Εάν η αντίσταση R_F θεωρηθεί μεταξύ των φάσεων για το τριφασικό σφάλμα (συνδεσμολογία τριγώνου), τότε στην ισοδύναμη συνδεσμολογία του Σχήματος 2.13(α) (συνδεσμολογία αστέρα) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τιμή $R_F/3$ αντί της R_F.

Η εφαρμογή της μεθόδου συμμετρικών συνιστωσών συνίσταται στην κατασκευή των ισοδύναμων κυκλωμάτων ακολουθίας, την κατάλληλη σύνδεσή τους στο σημείο του σφάλματος, τον υπολογισμό των ρευμάτων και τάσεων ακολουθίας και τέλος τον αντίστροφο μετασχηματισμό για τον προσδιορισμό των φασικών ρευμάτων και τάσεων. Λεπτομερής περιγραφή της εφαρμογής της μεθόδου και αναλυτικά παραδείγματα δίνονται στις αναφορές [27], [28], [61], [63].

Οι Πίνακες 2.4 και 2.5 συγκεντρώνουν τις πλήρεις σχέσεις υπολογισμού των φασικών και ακολουθιακών, αντίστοιχα, ηλεκτρικών μεγεθών στο σημείο του σφάλματος, αντίστοιχα, με δεδομένες τις ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις ακολουθίας (Z_0, Z_1, Z_2) και την τάση προ του σφάλματος $(\tilde{V}_F)$ της φάσης Α, η οποία θεωρείται συμμετρική. Οι αντιστάσεις σφάλματος θεωρούνται καθαρά ωμικές, όπως εξηγείται στο Εδάφιο 2.5.4. Η πλήρης μορφή των σχέσεων στους Πίνακες 2.4 και 2.5 προκύπτει εάν αντικατασταθεί η αντίσταση R_F με $Z_F = R_F + jX_F$ και η R_G με $Z_G = R_G + jX_G$.

Πίνακας 2.4: Σχέσεις υπολογισμού φασικών ρευμάτων και τάσεων σφάλματος

	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	ΤΥΠΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ			
		3ph	**2ph**	**2pg**	**1pg**
ΦΑΣΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ	$\tilde{I}_A$	$\frac{\tilde{V}_F}{Z_1+R_F}$	0	0	$\frac{3\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+Z_0+3R_G}$
	$\tilde{I}_B$	$\alpha^2\tilde{I}_A$	$\frac{-j\sqrt{3}\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+R_F}$	$\frac{-j\sqrt{3}\left[(Z_0+3R_G+R_F)-\alpha(Z_2+R_F)\right]\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	0
	$\tilde{I}_C$	$\alpha\tilde{I}_A$	$-\tilde{I}_B$	$\frac{j\sqrt{3}\left[(Z_0+3R_G+R_F)-\alpha^2(Z_2+R_F)\right]\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	0
ΦΑΣΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	$\tilde{V}_A$	$R_F\tilde{I}_A$	$\frac{(2Z_2+R_F)\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+R_F}$	$\frac{3\left[Z_2(Z_0+3R_G)+R_F(Z_2+Z_0+3R_G+R_F)\right]\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	$R_G\tilde{I}_A$
	$\tilde{V}_B$	$\alpha^2\tilde{V}_A$	$\frac{\left(\alpha^2R_F-Z_2\right)\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+R_F}$	$\frac{-j\sqrt{3}R_F\left[(Z_0+3R_G+R_F)-\alpha(Z_2+R_F)\right]\tilde{V}_F-3R_G(Z_2+R_F)\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	$\frac{\alpha^2\left[\left(1-\alpha^2\right)Z_2+(1-\alpha)Z_0+3R_G\right]\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+Z_0+3R_G}=\alpha^2EFF_1\tilde{V}_F$
	$\tilde{V}_C$	$\alpha\tilde{V}_A$	$\frac{(\alpha R_F-Z_2)\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+R_F}$	$\frac{j\sqrt{3}R_F\left[(Z_0+3R_G+R_F)-\alpha^2(Z_2+R_F)\right]\tilde{V}_F-3R_G(Z_2+R_F)\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	$\frac{\alpha\left[(1-\alpha)Z_2+\left(1-\alpha^2\right)Z_0+3R_G\right]\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+Z_0+3R_G}=\alpha EFF_2\tilde{V}_F$

Σημειώσεις:

- $\alpha = 1\angle 120^o$, $\alpha^2 = 1\angle 240^o$.
- EFF = Earth Fault Factor: Συντελεστής σφάλματος γης. Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος «παράγοντας γείωσης».
- Εάν χρησιμοποιηθεί $R_F/2$ αντί για R_F στο Σχήμα 2.12(δ), ο όρος R_F στις σχέσεις ρεύματος και τάσης σφάλματος 2pg θα πρέπει να αντικατασταθεί από τον όρο $R_F/2$.

Πίνακας 2.5: Σχέσεις υπολογισμού ακολουθιακών ρευμάτων και τάσεων σφάλματος

	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	**ΤΥΠΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ**			
		3ph	**2ph**	**2pg**	**1pg**
ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ	$\tilde{I}_1$	$\frac{\tilde{V}_F}{Z_1+R_F}$	$\frac{\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+R_F}$	$\frac{\left[(Z_2+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)\right]\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	$\frac{\tilde{V}_F}{Z_1+Z_2+Z_0+3R_G}$
	$\tilde{I}_2$	0	$-\tilde{I}_1$	$\frac{-(Z_0+3R_G+R_F)\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	$\tilde{I}_1$
	$\tilde{I}_0$	0	0	$\frac{-(Z_2+R_F)\tilde{V}_F}{(Z_1+R_F)(Z_2+R_F)+(Z_2+R_F)(Z_0+3R_G+R_F)+(Z_0+3R_G+R_F)(Z_1+R_F)}$	$\tilde{I}_1$
ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	$\tilde{V}_1$	$R_F\tilde{I}_1$	$(Z_2+R_F)\tilde{I}_1$	$R_F\tilde{I}_1-(Z_2+R_F)\tilde{I}_2$	$(Z_2+Z_0+3R_G)\tilde{I}_1$
	$\tilde{V}_2$	0	$Z_2\tilde{I}_1$	$-Z_2\tilde{I}_2$	$-Z_2\tilde{I}_1$
	$\tilde{V}_0$	0	0	$-Z_0\tilde{I}_0$	$-Z_0\tilde{I}_1$

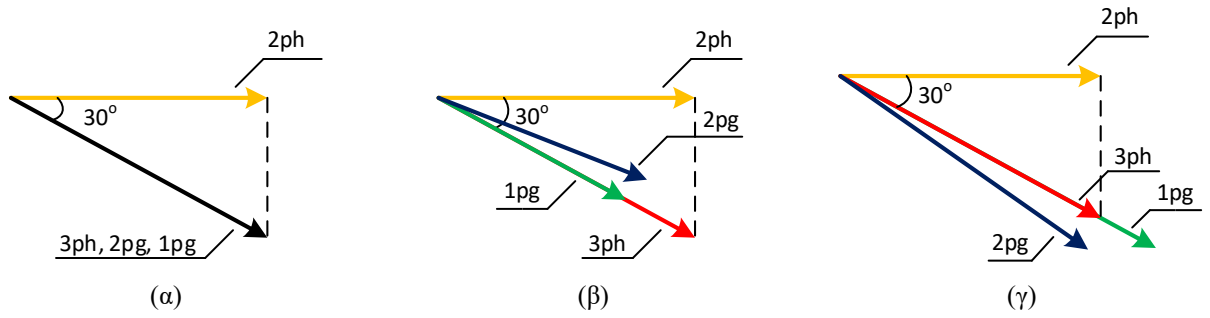
Σημειώσεις:

- Εάν χρησιμοποιηθεί $R_F/2$ αντί για R_F στο Σχήμα 2.12(δ), ο όρος R_F στις σχέσεις ρεύματος και τάσης σφάλματος 2pg θα πρέπει να αντικατασταθεί από τον όρο $R_F/2$.

Ο δυσμενέστερος τύπος σφάλματος διαφέρει κατά περίπτωση και εξαρτάται από τους λόγους Z_0/Z_1 και Z_2/Z_1 των ισοδύναμων σύνθετων αντιστάσεων στο σημείο του σφάλματος [64]. Στη γενική περίπτωση, όπου $Z_1 \neq Z_2$, ισχύει:

- εάν $Z_1 Z_0 > Z_2^2$, τότε το μονοφασικό σφάλμα προς γη αποτελεί το δυσμενέστερο σφάλμα γης,
- εάν $Z_1 Z_0 < Z_2^2$, τότε το διφασικό σφάλμα προς γη αποτελεί το δυσμενέστερο σφάλμα γης.

Για σφάλματα μακριά από γεννήτριες, μπορεί να θεωρηθεί $Z_1 \approx Z_2$, συνεπώς ο λόγος Z_0/Z_1 καθορίζει αποκλειστικά τη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος. Στα διανυσματικά διαγράμματα του Σχήματος 2.14 φαίνεται καθαρά η σύγκριση των τεσσάρων τύπων σφάλματος, ανάλογα με την τιμή του λόγου Z_0/Z_1, θεωρώντας μηδενική αντίσταση σφάλματος.



Σχήμα 2.14: Σχέση φασιθετών ρεύματος σφάλματος για (α) $Z_0/Z_1=1$, (β) $Z_0/Z_1>1$, (γ) $Z_0/Z_1<1$.

Παρατηρώντας τα προηγούμενα διανυσματικά διαγράμματα, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα:

- Το ρεύμα διφασικού σφάλματος δεν εξαρτάται από τον λόγο Z_0/Z_1 και είναι πάντα $\sqrt{3/2} = 0{,}866$ φορές το ρεύμα τριφασικού σφάλματος.
- Εάν $Z_0/Z_1 = 1$, τότε τα ρεύματα τριφασικού σφάλματος και των σφαλμάτων γης έχουν την ίδια ένταση.
- Εάν $0 < Z_0/Z_1 < 1$, τότε τα σφάλματα γης είναι πιο ισχυρά από το τριφασικό σφάλμα.
- Εάν $Z_0/Z_1 > 1$, τότε το τριφασικό σφάλμα είναι η δυσμενέστερη περίπτωση.

Επιπρόσθετα, τα σφάλματα γης χαρακτηρίζονται από ανύψωση τάσης στις υγιείς φάσεις. Η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης στην εσφαλμένη φάση και η υπέρταση στις υγιείς φάσεις εξαρτώνται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δικτύου και κυρίως από τη μέθοδο γείωσης που εφαρμόζεται. Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων γείωσης αποτυπώνεται αναλυτικά στον Πίνακα 1 της οδηγίας [65].

Για παράδειγμα, σε δίκτυα με αποτελεσματική, ή επαρκή όπως ισοδύναμα αποκαλείται, γείωση (effectively grounded), ισχύει $0 < X_0/X_1 \leq 3$ και $0 < R_0/X_1 < 1$ [65], [66]. Για τον χαρακτηρισμό της μεθόδου γείωσης των ηλεκτρικών δικτύων σε αποτελεσματική ή μη, χρησιμοποιείται ο συντελεστής σφάλματος γης (EFF), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης υγιούς φασικής τάσης κατά τη διάρκεια σφάλματος γης προς την τιμή της ίδιας φασικής τάσης πριν το σφάλμα [65], [67]. Ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται ως επαρκώς γειωμένο, όταν $EEF \leq 0{,}8\sqrt{3}$, δηλαδή όταν η μέγιστη υγιής φασική τάση κατά τη διάρκεια σφάλματος γης δεν υπερβαίνει το 80% της πολικής τάσης κανονικής λειτουργίας.

2.5.3 Μελέτη Υπολογισμού Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης

Ο εξοπλισμός ισχύος των ΣΗΕ πρέπει να αντέχει στις μηχανικές καταπονήσεις από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται εξαιτίας των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Επιπλέον, πρέπει να αντέχει και στις θερμικές καταπονήσεις από τη ραγδαία ανύψωση της θερμοκρασίας που προκαλείται εξαιτίας των μεγάλων ωμικών απωλειών κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων. Από την άλλη πλευρά, οι Η/Ν προστασίας πρέπει να είναι ρυθμισμένοι κατάλληλα, έτσι ώστε να διεγείρονται για ρεύματα βραχυκύκλωσης μικρής έντασης.

Ως εκ τούτου, η μελέτη υπολογισμού ρευμάτων βραχυκύκλωσης, ή απλώς μελέτη βραχυκυκλωμάτων, καθορίζει τόσο τη μέγιστη ένταση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, η οποία χρησιμεύει για την κατάλληλη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού ισχύος, καθώς και την επιλογή Δ/Ι με επαρκή ικανότητα διακοπής, όσο και το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος, το οποίο χρησιμεύει για τον καθορισμό της απαραίτητης ευαισθησίας των Η/Ν προστασίας.

Για τον υπολογισμό των εναλλασσόμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης και την επαρκή διαστασιολόγηση εξοπλισμού ισχύος σε ηλεκτρικά δίκτυα, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διεθνείς κανονισμοί:

- η σειρά προτύπων IEC 60909,
- η σειρά προτύπων ANSI/IEEE C37,
- η οδηγία ANSI/IEEE 551.

Εκτός από τους προηγούμενους διεθνείς κανονισμούς, υπάρχουν και εθνικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης από τα αντίστοιχα κράτη, όπως είναι για παράδειγμα το Γερμανικό VDE 0102 και τα Ρωσικά GOST 28249, GOST R 52735.

Τα βασικά μεγέθη υπολογισμού της μελέτης βραχυκυκλωμάτων ορίζονται ως εξής:

- Αρχικό ή υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_k'') καλείται η ενδεικνύμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης, τη στιγμή εκδήλωσης του σφάλματος (initial short-circuit current κατά IEC, first-cycle current κατά ANSI/IEEE).
- Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (i_p) καλείται η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (peak ή making current κατά IEC, close-and-latch rating ή crest current κατά ANSI/IEEE).
- Μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_k) καλείται η ενδεικνύμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που παραμένει μετά την παρέλευση των μεταβατικών φαινομένων (steady-state short-circuit current κατά IEC, 30-cycle current κατά ANSI/IEEE).
- Ρεύμα διακοπής (I_b) καλείται η ενδεικνύμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης τη χρονική στιγμή διακοπής του πρώτου πόλου του Δ/Ι (breaking current κατά IEC, interrupting current κατά ANSI/IEEE).

Ο υπολογισμός των μέγιστων τιμών των προηγούμενων μεγεθών βασίζεται στις παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες γενικά οδηγούν σε πιο συντηρητικά αποτελέσματα, χωρίς όμως να εισαγάγουν σημαντικό σφάλμα στους υπολογισμούς:

- Κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σφάλματος, ο τύπος του και η τοπολογία του δικτύου δεν αλλάζουν.
- Όλες οι πηγές έχουν την ίδια εσωτερική τάση και αντικαθίστανται από μία ισοδύναμη πηγή τάσης με τιμή ίση με τη μέγιστη δυνατή λειτουργική τάση (συνήθως, λαμβάνεται ίση με 110% της ονομαστικής τάσης του δικτύου).
- Οι γεννήτριες και οι κινητήρες συνεισφέρουν στο βραχυκύκλωμα βάσει της υπομεταβατικής τους αντίδρασης.
- Δεν λαμβάνονται υπόψη τα ρεύματα φορτίου.
- Αμελείται η αντίσταση σφάλματος.
- Οι μετασχηματιστές ισχύος λειτουργούν στην ονομαστική τους σχέση μετασχηματισμού.
- Οι χωρητικότητες και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες αμελούνται, πλην αυτών του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας.

Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός των αρχικών και μόνιμων ρευμάτων βραχυκύκλωσης για τη ρύθμιση των Η/Ν προστασίας, δεν βασίζεται στις προηγούμενες παραδοχές. Αντιθέτως, γίνεται διερεύνηση των βασικών σεναρίων λειτουργίας, προσδιορίζοντας την τάση κάθε ζυγού ή κόμβου και το ρεύμα κάθε κλάδου μέσω ανάλυσης ροών φορτίου, εκτιμώντας ρεαλιστικά τη λειτουργική κατάσταση του δικτύου πριν το σφάλμα.

2.5.3.1 Στάθμη Βραχυκύκλωσης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς & Δικτύου Διανομής

Η στάθμη βραχυκύκλωσης του Ελληνικού συστήματος μεταφοράς και δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ανά επίπεδο τάσης έχει διαμορφωθεί ως εξής [68]:

- Επίπεδο τάσης 400 kV: Η στάθμη βραχυκύκλωσης είναι 40 kA σε τάση 420 kV.
- Επίπεδο τάσης 150 kV: Ο παλαιός εξοπλισμός 150 kV ήταν σχεδιασμένος για στάθμη βραχυκύκλωσης ίση με 20 kA σε τάση 170 kV, εκτός από ορισμένα ΚΥΤ και μεγάλους σταθμούς παραγωγής, όπου προβλεπόταν στάθμη των 25 kA επίσης στα 170 kV. Για τον νέο εξοπλισμό 150 kV, προβλέπεται στάθμη βραχυκύκλωσης ίση με 31 kA.
- Επίπεδο τάσης 66 kV: Η στάθμη βραχυκύκλωσης είναι 12 kA σε τάση 72,5 kV.
- Επίπεδο τάσης 20 kV: Ο παλαιός εξοπλισμός ήταν σχεδιασμένος για ισχύ βραχυκύκλωσης 250 MVA (7 kA σε τάση 21 kV), ενώ για τον νέο εξοπλισμό προβλέπεται στάθμη βραχυκύκλωσης ίση με 10 kA σε τάση 24 kV.

2.5.4 Εκτίμηση Αντίστασης Σφάλματος

Τα βραχυκυκλώματα σπανίως εκδηλώνονται ως πλήρη. Αντιθέτως, η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης περιορίζεται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό κατά περίπτωση από την αντίσταση σφάλματος, η οποία ως επί το πλείστον θεωρείται καθαρά ωμική. Η εν λόγω παραδοχή είναι κοινώς αποδεκτή. Στην πραγματικότητα, όμως, η αντίσταση σφάλματος μπορεί να έχει και επαγωγική φύση, ειδικά όταν εμπλέκονται οι αγωγοί προστασίας (γης) των γραμμών μεταφοράς. Στα εναέρια δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, η τιμή της συνολικής αντίστασης σφάλματος επηρεάζεται από:

- την αντίσταση του ηλεκτρικού τόξου (arc resistance, R_{arc}),
- την αντίσταση των πυλώνων/στύλων (tower structure resistance, R_{st}),
- την αντίσταση βασικής γείωσης των πυλώνων/στύλων (tower footing resistance, R_t),
- την παρουσία αγωγών προστασίας (γης),
- την αντίσταση του πλέγματος γείωσης των Υ/Σ (substation grounding resistance, R_e),
- την ειδική αντίσταση του εδάφους (soil resistivity, ρ_0),
- τα εξωτερικά αντικείμενα που πιθανόν συμμετέχουν στο σφάλμα, όπως για παράδειγμα κλαδί δένδρου, πτηνό, κτλ. (external object resistance, R_{ext}).

Εργαστηριακές δοκιμές έχουν αποδείξει την ωμική φύση της αντίστασης R_{arc}. Τα αποτελέσματα των εν λόγω δοκιμών αξιοποιήθηκαν από ερευνητικές ομάδες για την ανάπτυξη προσεγγιστικών σχέσεων, οι σημαντικότερες εκ των οποίων συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2.6. Ιστορικά, η πρώτη δημοσιευμένη εργασία για τον υπολογισμό της αντίστασης τόξου ανήκει στην H. Ayrton το 1902 [69].

Η τιμή της αντίστασης R_{arc} μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σφάλματος. Αρχικά, εμφανίζει πολύ χαμηλή τιμή (τυπικά, 1÷2 Ω) για περίπου 0,5 s, στη συνέχεια η τιμή της αυξάνεται (τυπικά, 25÷50 Ω) λόγω της επιμήκυνσης του τόξου και εν τέλει καταλήγει εκ νέου σε χαμηλή τιμή κατά τη σβέση του τόξου [2].

Η αντίσταση R_{st} είναι πρακτικά αμελητέα σε πυλώνες γραμμών μεταφοράς, λόγω της μεταλλικής κατασκευής τους, ενώ αντίθετα λαμβάνει υψηλή τιμή για μη μεταλλικές κατασκευές, όπως είναι π.χ. οι ξύλινοι ή τσιμεντένιοι στύλοι γραμμών διανομής.

Η αντίσταση R_t κυμαίνεται από 1 Ω ή λιγότερο έως μερικές εκατοντάδες Ω και εξαρτάται κυρίως από την ειδική αντίσταση του εδάφους στο σημείο εγκατάστασης [70]. Στην πράξη, η αντίσταση R_t θεωρείται ότι κυμαίνεται στο εύρος 5÷20 Ω [71], με τυπική τιμή τα 10 Ω [72], [73]. Η ελαχιστοποίηση της τιμής της είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, διότι σχετίζεται άμεσα με την εμφάνιση ανάστροφων διασπάσεων (back-flashovers) επί των αλυσίδων μονωτήρων σε γραμμές μεταφοράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα.

Η αντίσταση R_e στους Υ/Σ του συστήματος μεταφοράς εξαρτάται κυρίως από το εμβαδό του πλέγματος, το βάθος τοποθέτησής του και το συνολικό μήκος των αγωγών που το αποτελούν. Τυπικά, η τιμή της αντίστασης R_e κυμαίνεται μεταξύ 0,01 Ω και 5 Ω, ενώ αναλυτική σχέση υπολογισμού της δίνεται στην οδηγία [74].

Τυπικές τιμές της ειδικής αντίστασης ρ_0 για διαφορετικούς τύπους εδάφους δίνονται στις αναφορές [74], [75]. Γενικά, έδαφος με $\rho_0 \leq 250\ \Omega$m θεωρείται ότι έχει μικρή ειδική αντίσταση, διευκολύνοντας την αποτελεσματική γείωση του δικτύου.

Τέλος, η αντίσταση R_{ext} μπορεί να λάβει από σχεδόν μηδενική έως πολύ μεγάλη τιμή, καθιστώντας αδύνατη την ασφαλή εκτίμησή της εκ των προτέρων.

Πίνακας 2.6: Προσεγγιστικές σχέσεις υπολογισμού αντίστασης τόξου

ΣΧΕΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	ΑΝΑΦΟΡΑ
$R_{arc} = \dfrac{28700(L_{arc} + 2v_w t_{arc})}{I_{arc}{}^{1,4}}$	[76]
$R_{arc} = \dfrac{1443{,}6 L_{arc}}{I_{arc}}$	[2], [77]
$R_{arc} = \dfrac{2\sqrt{2} E_{arc} L_{arc}}{\pi I_{arc}}$	[78]

όπου,

L_{arc}, το μήκος του τόξου σε m

I_{arc}, το ρεύμα σφάλματος σε A

v_w, η ταχύτητα του ανέμου σε m/s

t_{arc}, η διάρκεια εκδήλωσης του τόξου σε s

E_{arc}, η πτώση τάσης κατά μήκος του τόξου σε V/m, η οποία μπορεί να λάβει τις εξής τιμές:

$E_{arc} = 1200$ V/m

$E_{arc} = 1500$ V/m

$E_{arc} = 950 + 5000/I_{arc}$ V/m

2.6 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΦΑΣΙΚΟΥ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΓΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Παρατηρώντας τις σχέσεις των φασικών ρευμάτων του Πίνακα 2.4, συμπεραίνεται ότι η παρουσία αντίστασης σφάλματος οδηγεί σε περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης για τις περιπτώσεις των τριφασικών, διφασικών και μονοφασικών προς γη σφαλμάτων. Δεν ισχύει, όμως, το ίδιο απαραίτητα και για την περίπτωση διφασικού σφάλματος προς γη, διότι ο όρος R_G εμφανίζεται τόσο στον αριθμητή όσο και στον παρονομαστή της σχέσης υπολογισμού του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Για τον συγκεκριμένο τύπο σφάλματος, απαιτείται διερεύνηση των τιμών της αντίστασης R_G, οι οποίες προκαλούν ροή φασικών ρευμάτων υψηλότερης έντασης συγκριτικά με το πλήρες διφασικό σφάλμα προς γη, καθώς και με το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα κατά περίπτωση. Φερ' ειπείν, το μέγιστο σφάλμα κατά μήκος γραμμής μεταφοράς ή διανομής είναι το τριφασικό βραχυκύκλωμα, ενώ πλησίον ΚΥΤ το μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη αποτελεί συνήθως τη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος.

Ο τύπος του μέγιστου σφάλματος κατά περίπτωση εξαρτάται από τις συμμετρικές συνιστώσες της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο σημείο του σφάλματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το Σχήμα 7 του προτύπου [64] προσδιορίζει ποιοτικά το μέγιστο σφάλμα βάσει των λόγων Z_2/Z_1 και Z_0/Z_1, θεωρώντας ότι οι σύνθετες αντιστάσεις Z_1, Z_2, Z_0 έχουν την ίδια γωνία.

Στην παρούσα ενότητα, αποδεικνύεται για επαρκώς γειωμένα δίκτυα η ύπαρξη ανοικτών διαστημάτων $S_f = (R_{G,f}^{min}, R_{G,f}^{max})$, όπου $f \in \{2pg, 3ph, 1pg\}$, εντός των οποίων ισχύουν οι παρακάτω ανισώσεις:

$$I_{b,2pg}\left(R_G \in S_{2pg}\right) > I_{b,2pg}(R_G = 0) \tag{2.60}$$

$$I_{b,2pg}\left(R_G \in S_{3ph}\right) > I_{a,3ph}(R_G = 0) \tag{2.61}$$

$$I_{b,2pg}\left(R_G \in S_{1pg}\right) > I_{a,1pg}(R_G = 0) \tag{2.62}$$

Στην ανάλυση που ακολουθεί, θεωρείται δεδομένο ότι $I_{b,2pg} > I_{c,2pg}$. Η παραδοχή αυτή ισχύει όταν $(R_0 + 3R_G)/R_2 > X_0/X_2$, όπως προκύπτει από τις σχέσεις των φασικών ρευμάτων του Πίνακα 2.4. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, οι ανισώσεις (2.60)–(2.62) επιλύονται εξετάζοντας ξεχωριστά τις εξής δύο ρεαλιστικές παραδοχές για σφάλματα μακριά από γεννήτρια:

i. $Z_1 = Z_2$, η οποία συνάδει τόσο με τα συστήματα μεταφοράς όσο και με τα δίκτυα διανομής.

ii. $X_1 = X_2$, $R_1 = R_2 = R_0 = 0$ και $X_0 = kX_1, k > 0$, η οποία συνάδει με τα συστήματα μεταφοράς, όπου $X \gg R$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ισχύς των ανισώσεων (2.60)–(2.62) εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο γείωσης του δικτύου. Όπως συμπεραίνεται από τα αριθμητικά παραδείγματα στο τέλος της παρούσας ενότητας, οι παρακάτω ιδιότητες έχουν πρακτική αξία στα επαρκώς γειωμένα εναέρια δίκτυα.

2.6.1 Σύγκριση με Πλήρες Διφασικό Σφάλμα προς Γη

Στην πρώτη περίπτωση διερεύνησης, το διφασικό σφάλμα προς γη με αντίσταση R_G συγκρίνεται με το αντίστοιχο πλήρες σφάλμα και η (2.60) γίνεται:

$$\begin{aligned}&\frac{\left(\frac{R_2}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}X_2+R_0+3R_G\right)^2+\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R_2+\frac{X_2}{2}+X_0\right)^2}{\left[R_1R_2-X_1X_2+(R_1+R_2)(R_0+3R_G)-X_0(X_1+X_2)\right]^2+\left[R_1X_2+X_1R_2+(X_1+X_2)(R_0+3R_G)+X_0(R_1+R_2)\right]^2}\\&-\frac{\left(\frac{R_2}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}X_2+R_0\right)^2+\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R_2+\frac{X_2}{2}+X_0\right)^2}{\left[R_1R_2-X_1X_2+R_0(R_1+R_2)-X_0(X_1+X_2)\right]^2+\left[R_1X_2+X_1R_2+R_0(X_1+X_2)+X_0(R_1+R_2)\right]^2}>0\end{aligned} \tag{2.63}$$

Θεωρώντας την πρώτη παραδοχή, η (2.63) ισχύει στο διάστημα S_{2pg} με ακραίες τιμές:

$$R_{G,2pg}^{min} = 0 \tag{2.64}$$

$$\begin{aligned}&R_{G,2pg}^{max} =\\&=\frac{1}{3}\frac{\sqrt{3}\left[\left(X_1^2+R_1^2\right)(X_1+4X_0)+4X_1\left(X_0^2+2R_1R_0-R_0^2\right)\right]-3\left(X_1^2+R_1^2\right)(R_1+2R_0)}{3\left(X_1^2+R_1^2\right)+4\sqrt{3}(X_1R_0-X_0R_1)}\end{aligned} \tag{2.65}$$

Για να είναι η αντίσταση R_G^{max} πρακτικά αποδεκτή λύση της (2.63) θα πρέπει να είναι θετικός πραγματικός αριθμός, δηλαδή οι παραστάσεις του αριθμητή και του παρονομαστή της (2.65) να έχουν το ίδιο πρόσημο.

Για τη δεύτερη παραδοχή που αφορά συστήματα μεταφοράς, υπάρχει πάντα διάστημα S_{2pg} για το οποίο ισχύει:

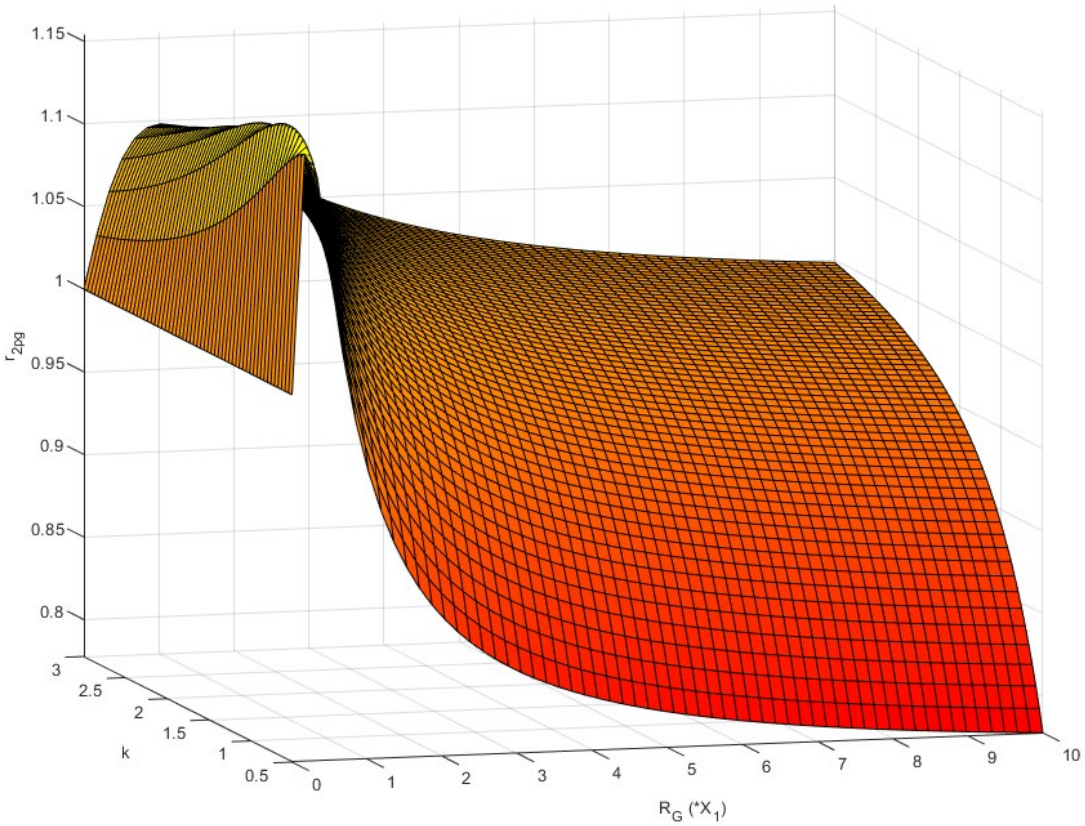
$$S_{2pg} = \left(0, \frac{\sqrt{3}}{9}(2k+1)^2X_1\right) \tag{2.66}$$

Η γραφική παράσταση στο Σχήμα 2.15 απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου $r_{2pg} = I_{b,2pg}(R_G > 0)/I_{b,2pg}(R_G = 0)$ στο διάστημα S_{2pg}. Είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντίδρασης X_0 σε σχέση με την αντίδραση X_1, τόσο ευρύτερο γίνεται το διάστημα S_{2pg}. Αντίθετα, όσο μικρότερη είναι η τιμή της αντίδρασης X_0 σε σχέση με την αντίδραση X_1, τόσο υψηλότερος γίνεται ο λόγος r_{2pg}. Επίσης, ο λόγος r_{2pg} παρουσιάζει τοπικό μέγιστο στο διάστημα S_{2pg} για σταθερό k, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Με χρήση των αρχών διαφορικού λογισμού, υπολογίζεται ότι το εν λόγω τοπικό

μέγιστο παρουσιάζεται στο σημείο R_{G0}, ενώ η μέγιστη τιμή του λόγου r_{2pg} προκύπτει όταν $k \to 1$. Οι σχέσεις (2.67) και (2.68) δίνουν τις τιμές $R_{G0,2pg}$ και r_{2pg}^{max}, αντίστοιχα:

$$R_{G0,2pg} = \frac{1}{12}\left[\sqrt{(4k+2)^2+3} - \sqrt{3}\right]X_1 \tag{2.67}$$

$$r_{2pg}^{max} = \lim_{k\to 1} r_{2pg} = 1{,}15 \tag{2.68}$$



Σχήμα 2.15: Μεταβολή του λόγου r_{2pg} ως προς k και R_G.

2.6.2 Σύγκριση με Πλήρες Τριφασικό Σφάλμα

Στη δεύτερη περίπτωση διερεύνησης, το διφασικό σφάλμα προς γη με αντίσταση R_G συγκρίνεται με το πλήρες τριφασικό σφάλμα, όταν αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις σφάλματος κατά μήκος των γραμμών του ηλεκτρικού δικτύου. Η ανίσωση (2.61) σε αυτήν την περίπτωση γίνεται:

$$\frac{3\left[\left(\frac{R_2}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}X_2+R_0+3R_G\right)^2+\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R_2+\frac{X_2}{2}+X_0\right)^2\right]}{\left[R_1R_2-X_1X_2+(R_1+R_2)(R_0+3R_G)-X_0(X_1+X_2)\right]^2+\left[R_1X_2+X_1R_2+(X_1+X_2)(R_0+3R_G)+X_0(R_1+R_2)\right]^2} - \frac{1}{(R_1^2+X_1^2)} > 0 \tag{2.69}$$

Για την πρώτη παραδοχή, η (2.69) ισχύει στο διάστημα S_{3ph} με ακραίες τιμές:

$$R_{G,3ph}^{min} = \frac{1}{6}\left[3\sqrt{3}X_1 - (R_1+2R_0) - \sqrt{35X_1^2+9R_1^2-4X_0(X_1+X_0)-6\sqrt{3}R_1(X_1+2X_0)}\right] \tag{2.70}$$

$$R_{G,3ph}^{max} = \frac{1}{6}\left[3\sqrt{3}X_1 - (R_1+2R_0) + \sqrt{35X_1^2+9R_1^2-4X_0(X_1+X_0)-6\sqrt{3}R_1(X_1+2X_0)}\right] \tag{2.71}$$

Οι αντιστάσεις R_G^{min} και R_G^{max}, όπως προκύπτουν από τις σχέσεις (2.70) και (2.71), αποτελούν πρακτικά αποδεκτές λύσεις της (2.69), εφόσον $S_{3ph} \cap \mathbb{R}^+ \neq \emptyset$.

Για τη δεύτερη παραδοχή που αφορά συστήματα μεταφοράς, το διάστημα S_{3ph} γίνεται:

$$S_{3ph} = \left(\frac{1}{6}\left[3\sqrt{3} - \sqrt{(7+2k)(5-2k)}\right]X_1, \frac{1}{6}\left[3\sqrt{3} + \sqrt{(7+2k)(5-2k)}\right]X_1\right) \tag{2.72}$$

Αναλύοντας τη σχέση (2.72), συμπεραίνεται ότι υπάρχει περιοχή τιμών της αντίστασης R_G εντός της οποίας το διφασικό σφάλμα προς γη προκύπτει ισχυρότερο από το πλήρες τριφασικό, εφόσον $0 < k < 2{,}5$. Η εν λόγω συνθήκη ισχύει για σφάλματα δικτύου, είτε κατά μήκος γραμμής μεταφοράς, είτε πλησίον ΚΥΤ. Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, ο λόγος $r_{3ph} = I_{b,2pg}(R_G > 0)/I_{a,3ph}(R_G = 0)$ παρουσιάζει τοπικό μέγιστο για σταθερό k στο ίδιο σημείο R_{G0}, ενώ λαμβάνει μέγιστη τιμή για $k \to 0$. Ισχύει δηλαδή:

$$R_{G0,3ph} = R_{G0,2pg} \tag{2.73}$$

$$r_{3ph}^{max} = \lim_{k \to 0} r_{3ph} = 1{,}9 \tag{2.74}$$

2.6.3 Σύγκριση με Πλήρες Μονοφασικό Σφάλμα προς Γη

Η τελευταία περίπτωση διερεύνησης καλύπτει τη σύγκριση με το πλήρες μονοφασικό σφάλμα προς γη, όταν αυτό αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος. Αυτό συμβαίνει πλησίον Υ/Σ που διαθέτουν Μ/Σ με ομοπολική αντίδραση μικρής τιμής, όπως είναι για παράδειγμα:

- οι αυτομετασχηματιστές (ΑΜ/Σ) με συνδεσμολογία τυλίγματος YNa0(d), όπως συναντώνται στα ΚΥΤ,
- οι Μ/Σ ανύψωσης με συνδεσμολογία τυλίγματος YNd, όπως συναντώνται στους σταθμούς παραγωγής,
- οι Μ/Σ διανομής με συνδεσμολογία τυλίγματος Dyn ή Yzn.

Η ανίσωση (2.62) σε αυτήν την περίπτωση γίνεται:

$$\frac{\left(\frac{R_2}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}X_2 + R_0 + 3R_G\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R_2 + \frac{X_2}{2} + X_0\right)^2}{\left[R_1R_2 - X_1X_2 + (R_1+R_2)(R_0+3R_G) - X_0(X_1+X_2)\right]^2 + \left[R_1X_2 + X_1R_2 + (X_1+X_2)(R_0+3R_G) + X_0(R_1+R_2)\right]^2} - \frac{3}{(R_0+R_1+R_2)^2 + (X_0+X_1+X_2)^2} > 0 \tag{2.75}$$

Εξαιτίας της μεγάλης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η επίλυση της ανίσωσης (2.75), εξετάζεται μόνο η δεύτερη παραδοχή. Επομένως, αγνοώντας την ωμική αντίσταση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Thevenin, η (2.75) ισχύει στο διάστημα S_{1pg} με ακραίες τιμές:

$$R_{G,1pg}^{min} = \frac{1}{6}\frac{\sqrt{3}(k+2)^2 - \sqrt{(2k^3+9k^2-6k+4)(-2k^3-9k^2+18k+20)}}{8-4k-k^2}X_1 \tag{2.76}$$

$$R_{G,1pg}^{max} = \frac{1}{6}\frac{\sqrt{3}(k+2)^2 + \sqrt{(2k^3+9k^2-6k+4)(-2k^3-9k^2+18k+20)}}{8-4k-k^2}X_1 \tag{2.77}$$

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, οι τιμές R_G^{min} και R_G^{max}, όπως προκύπτουν από τις σχέσεις (2.76) και (2.77), αντίστοιχα, συνιστούν πρακτικά αποδεκτές λύσεις της (2.75), εφόσον $S_{1pg} \cap \mathbb{R}^+ \neq \emptyset$. Η εν λόγω συνθήκη ισχύει για σφάλματα πλησίον ΚΥΤ και Υ/Σ σταθμών παραγωγής, όπου συνήθως είναι $0 < k < 1$. Ο λόγος $r_{1pg} = I_{b,2pg}(R_G > 0)/I_{a,1pg}(R_G = 0)$ παρουσιάζει τοπικό μέγιστο για σταθερό k στο ίδιο σημείο R_{G0} και λαμβάνει την ίδια μέγιστη τιμή για $k \to 1$ με την περίπτωση του πλήρους διφασικού σφάλματος προς γη. Ισχύει δηλαδή:

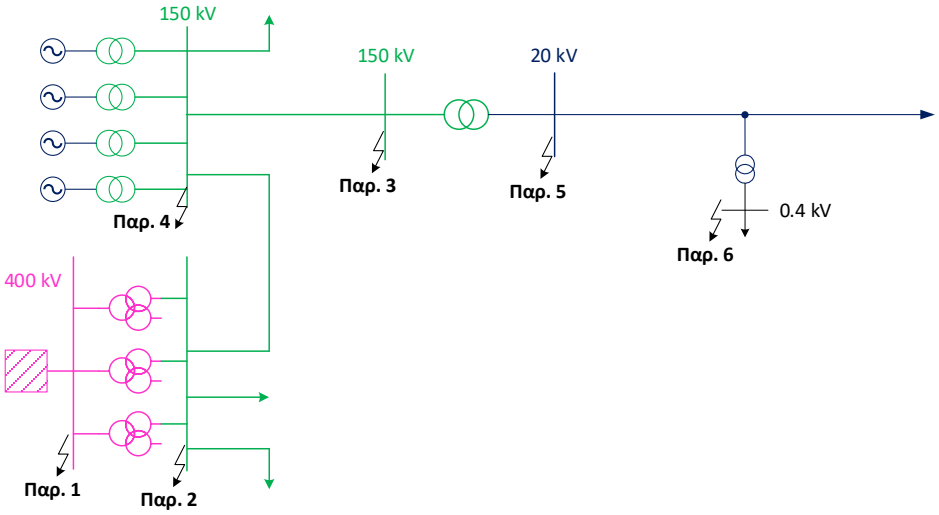
$$R_{G0,1pg} = R_{G0,2pg} \tag{2.78}$$

$$r_{1pg}^{max} = r_{2pg}^{max} \tag{2.79}$$

2.6.4 Υπολογισμοί σε Πραγματικό ΣΗΕ

Για λόγους επίδειξης των προηγούμενων ιδιοτήτων, χρησιμοποιείται το ρεαλιστικό ΣΗΕ του Σχήματος 2.16, όμοιο του Ελληνικού συστήματος μεταφοράς και δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, και εξετάζονται διαφορετικές θέσεις σφάλματος, καλύπτοντας συνολικά το σύστημα από τους σταθμούς παραγωγής μέχρι τους Υ/Σ διανομής.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, έχουν θεωρηθεί οι πλήρεις ανισώσεις (2.63), (2.69) και (2.75), ενώ οι απαραίτητοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB (έκδοση R2015a). Τα επόμενα παραδείγματα αποδεικνύουν τη γενική εφαρμογή των ιδιοτήτων που διερευνήθηκαν στην παρούσα ενότητα και την ισχύ τους στα επαρκώς γειωμένα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.16: Παράδειγμα πραγματικού ΣΗΕ.

Παράδειγμα 1: Σφάλμα στον ζυγό 400 kV ΚΥΤ με τρεις ΑΜ/Σ 250 MVA, YNa0(d1) (στερεά γείωση του ουδετέρου κόμβου των ΑΜ/Σ). Οι σύνθετες αντιστάσεις ακολουθίας του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin στο σημείο σφάλματος είναι:

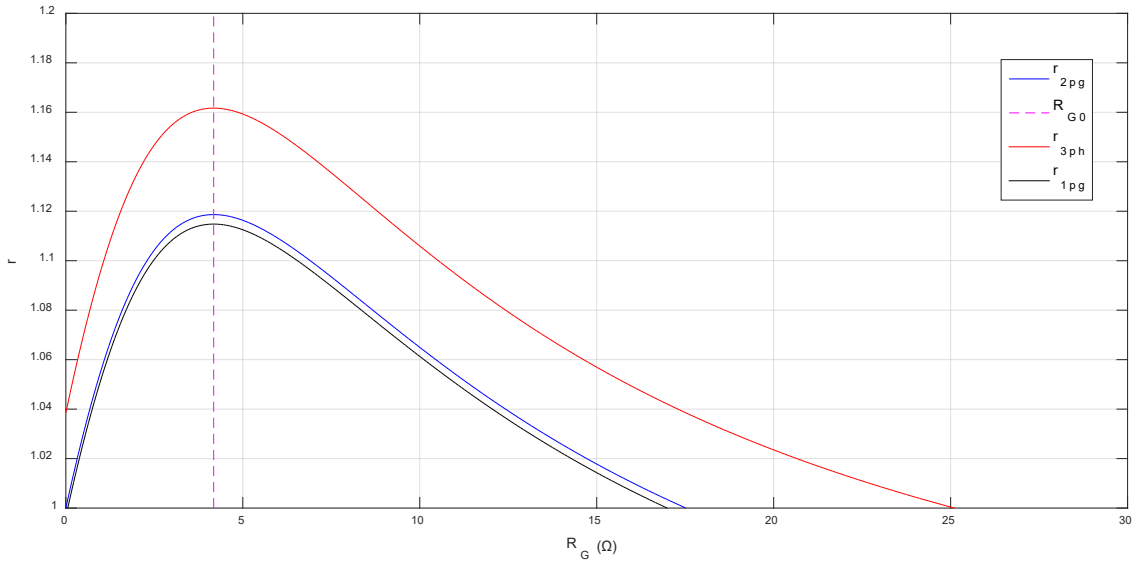
- $Z_1 = 1{,}000 + j12{,}672\ \Omega$
- $Z_2 = 0{,}944 + j12{,}032\ \Omega$
- $Z_0 = 1{,}648 + j11{,}715\ \Omega$

Παρατηρώντας τις παραπάνω τιμές, επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα και των δύο παραδοχών στην ανάλυση που προηγήθηκε. Το εξεταζόμενο δίκτυο 400 kV είναι επαρκώς γειωμένο, διότι:

- $R_0/X_1 = 0{,}130 < 1$
- $k = X_0/X_1 = 0{,}924 \leq 3$

Επιπλέον, οι συνθήκες $k < 2{,}5$ και $k < 1$ ικανοποιούνται στη συγκεκριμένη περίπτωση, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη των διαστημάτων S_{3ph} και S_{1pg}, αντίστοιχα. Η επίλυση των ανισώσεων (2.63), (2.69) και (2.75) οδηγεί στα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία αποτυπώνονται και στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 2.17:

$S_{2pg}(\Omega) = (0, 17{,}52)$, $S_{3ph}(\Omega) = (0, 25{,}12)$, $S_{1pg}(\Omega) = (0{,}05, 17{,}00)$, $R_{G0} = 4{,}18\ \Omega$, $r_{2pg}^{max} = 1{,}119$, $r_{3ph}^{max} = 1{,}162$, $r_{1pg}^{max} = 1{,}115$.



Σχήμα 2.17: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 1).

Όπως προκύπτει από τις τιμές των αποτελεσμάτων, το φασικό ρεύμα διφασικού σφάλματος προς γη έχει τη μεγαλύτερη ένταση συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους σφάλματος, όταν $R_G \in S_{1pg}$, και μεγιστοποιείται για αντίσταση σφάλματος ίση με 4,18 Ω.

Παράδειγμα 2: Σφάλμα στον ζυγό 150 kV του ΚΥΤ του Παραδείγματος 1. Οι σύνθετες αντιστάσεις ακολουθίας του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin στο σημείο σφάλματος είναι:

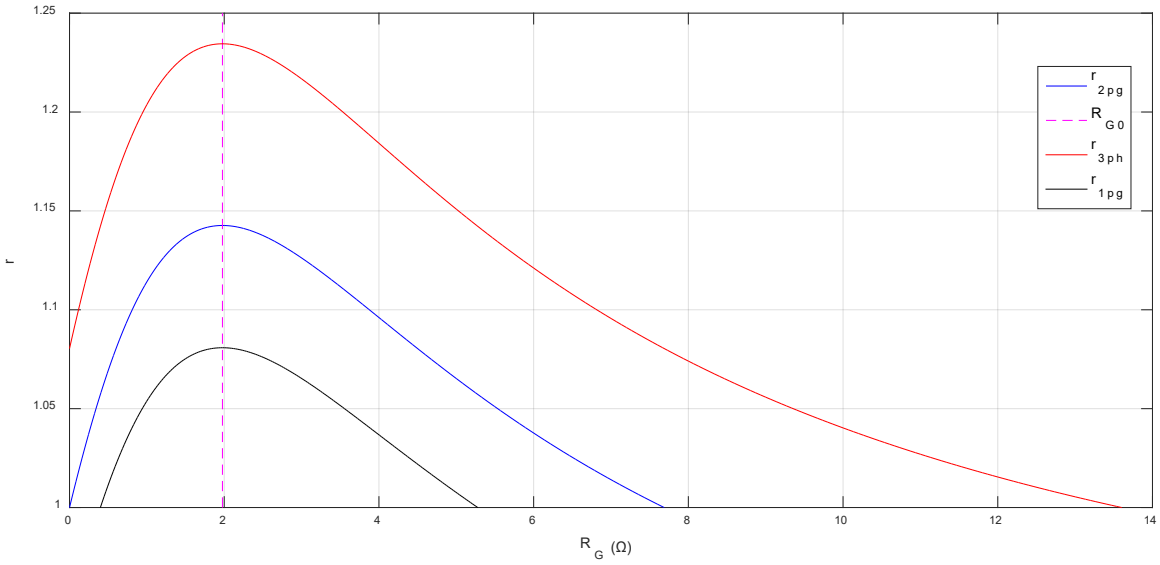
- $Z_1 = 0{,}632 + j7{,}671\ \Omega$
- $Z_2 = 0{,}623 + j7{,}622\ \Omega$
- $Z_0 = 1{,}231 + j4{,}869\ \Omega$

Παρατηρώντας τις παραπάνω τιμές, επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα της πρώτης παραδοχής στην ανάλυση που προηγήθηκε. Ομοίως με το προηγούμενο παράδειγμα, συμπεραίνεται ότι και το δίκτυο 150 kV είναι επαρκώς γειωμένο, διότι:

- $R_0/X_1 = 0{,}030 < 1$
- $k = X_0/X_1 = 0{,}635 \leq 3$

Επιπλέον, οι συνθήκες $k < 2{,}5$ και $k < 1$ ικανοποιούνται και στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η επίλυση των ανισώσεων (2.63), (2.69) και (2.75) οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα, όπως αποτυπώνονται και στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 2.18:

$S_{2pg}(\Omega) = (0, 7{,}69)$, $S_{3ph}(\Omega) = (0, 13{,}61)$, $S_{1pg}(\Omega) = (0{,}40, 5{,}28)$, $R_{G0} = 1{,}98\ \Omega$, $r_{2pg}^{max} = 1{,}143$, $r_{3ph}^{max} = 1{,}235$, $r_{1pg}^{max} = 1{,}081$.



Σχήμα 2.18: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 2).

Όπως προκύπτει από τις τιμές των αποτελεσμάτων, το φασικό ρεύμα διφασικού σφάλματος προς γη έχει τη μεγαλύτερη ένταση συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους σφάλματος, όταν $R_G \in S_{1pg}$, και μεγιστοποιείται για αντίσταση σφάλματος ίση με 1,98 Ω.

Παράδειγμα 3: Σφάλμα στον ζυγό 150 kV Y/Σ διανομής 150/20 kV με έναν Μ/Σ 40/50 MVA, Dyn1 (γείωση του ουδετέρου κόμβου του Μ/Σ στην πλευρά ΜΤ μέσω ωμικής αντίστασης 12 Ω). Οι σύνθετες αντιστάσεις ακολουθίας του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin στο σημείο σφάλματος είναι:

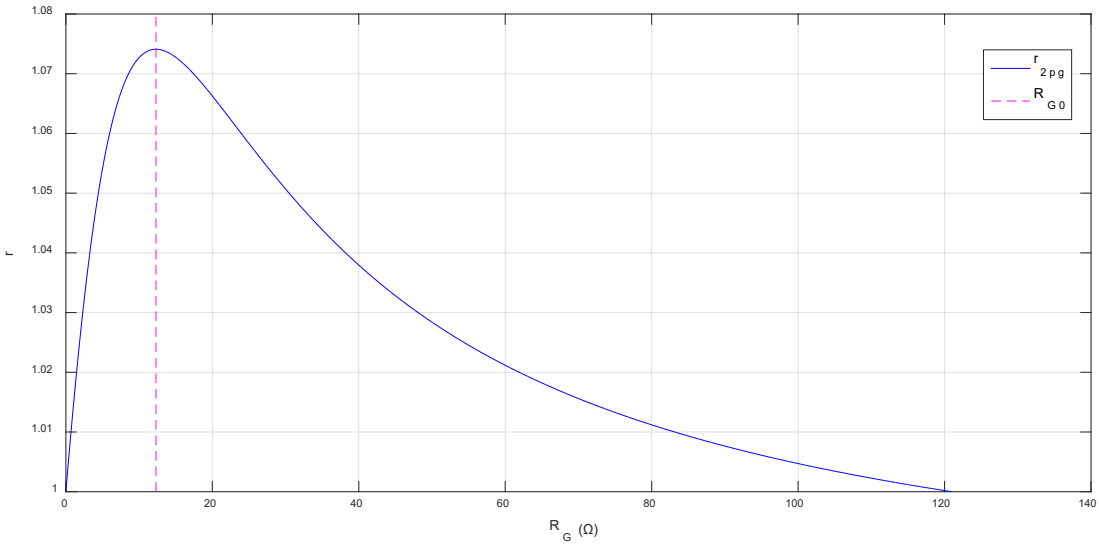
- $Z_1 = 2{,}458 + j11{,}291\ \Omega$
- $Z_2 = 2{,}433 + j11{,}204\ \Omega$
- $Z_0 = 7{,}501 + j35{,}802\ \Omega$

Παρατηρώντας τις παραπάνω τιμές, επιβεβαιώνεται και σε αυτήν την περίπτωση η εγκυρότητα της πρώτης παραδοχής. Το δίκτυο 150 kV θεωρείται πρακτικά επαρκώς γειωμένο, διότι:

- $R_0/X_1 = 0{,}664 < 1$
- $k = X_0/X_1 = 3{,}171 \approx 3$

Αντίθετα με τις προηγούμενες περιπτώσεις, στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει $k > 2{,}5$, επομένως αναμένεται ότι το φασικό ρεύμα διφασικού σφάλματος προς γη θα είναι ασθενέστερο των αντίστοιχων ρευμάτων τριφασικού και μονοφασικού προς γη σφάλματος, για οποιαδήποτε τιμή της αντίστασης R_G. Όμως, η παρουσία αντίστασης R_G ενδέχεται να προκαλέσει μεγαλύτερο φασικό ρεύμα διφασικού σφάλματος προς γη από το αντίστοιχο πλήρες σφάλμα. Πράγματι, η επίλυση των ανισώσεων (2.63), (2.69) και (2.75) οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα, και η γραφική παράσταση του λόγου r_{2pg} δίνεται στο Σχήμα 2.19:

$S_{2pg}(\Omega) = (0, 7{,}69)$, $S_{3ph} = \varnothing$, $S_{1pg} = \varnothing$, $R_{G0} = 12{,}30\ \Omega$, $r_{2pg}^{max} = 1{,}074$.



Σχήμα 2.19: Μεταβολή του λόγου r_{2pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 3).

Παράδειγμα 4: Σφάλμα στον ζυγό 150 kV Y/Σ σταθμού παραγωγής 15,75/150 kV με τέσσερις Μ/Σ 120 MVA, YNd1 (στερεά γείωση του ουδετέρου κόμβου των Μ/Σ ανύψωσης στην πλευρά ΥΤ). Οι σύνθετες αντιστάσεις ακολουθίας του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin στο σημείο σφάλματος είναι:

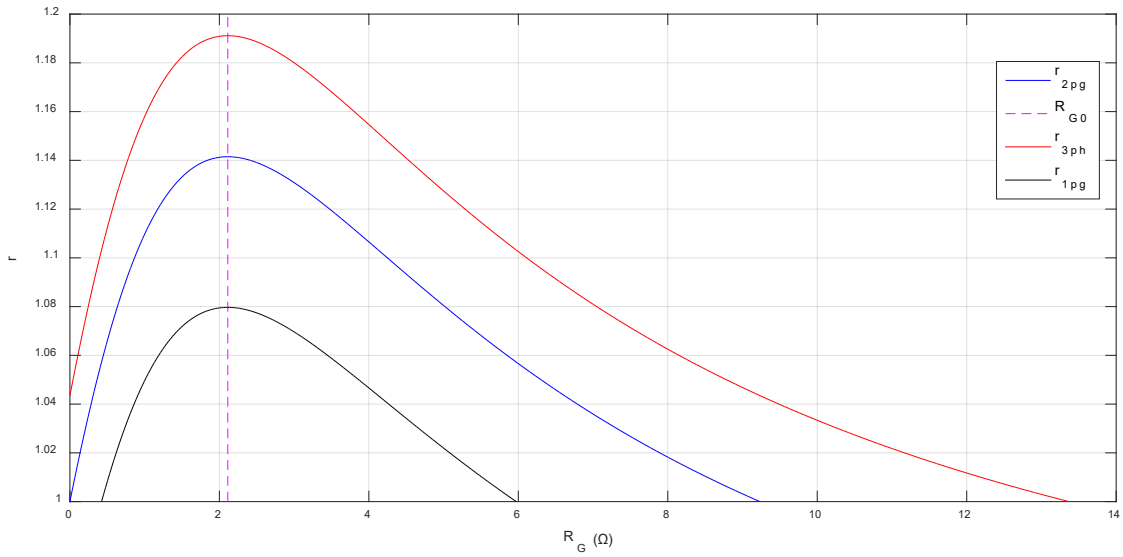
- $Z_1 = 0{,}849 + j7{,}050\ \Omega$
- $Z_2 = 0{,}768 + j6{,}813\ \Omega$
- $Z_0 = 0{,}369 + j5{,}344\ \Omega$

Το συγκεκριμένο παράδειγμα αποδεικνύει τη γενικότητα των ιδιοτήτων στα επαρκώς γειωμένα δίκτυα, χωρίς απαραίτητα να ισχύουν οι δύο παραδοχές. Το εξεταζόμενο δίκτυο 150 kV είναι επαρκώς γειωμένο, διότι:

- $R_0/X_1 = 0{,}052 < 1$
- $k = X_0/X_1 = 0{,}758 \leq 3$

Η επίλυση των ανισώσεων (2.63), (2.69) και (2.75) οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα, όπως αποτυπώνονται και στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 2.20:

$S_{2pg}(\Omega) = (0, 9{,}23)$, $S_{3ph}(\Omega) = (0, 13{,}37)$, $S_{1pg}(\Omega) = (0{,}42, 5{,}97)$, $R_{G0} = 2{,}11\ \Omega$, $r_{2pg}^{max} = 1{,}142$, $r_{3ph}^{max} = 1{,}191$, $r_{1pg}^{max} = 1{,}080$.



Σχήμα 2.20: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 4).

Όπως προκύπτει από τις τιμές των αποτελεσμάτων, το φασικό ρεύμα διφασικού σφάλματος προς γη έχει τη μεγαλύτερη ένταση συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους σφάλματος, όταν $R_G \in S_{1pg}$, και μεγιστοποιείται για αντίσταση σφάλματος ίση με 2,11 Ω.

Παράδειγμα 5: Σφάλμα στον ζυγό 20 kV του Υ/Σ του Παραδείγματος 3:

- $Z_1 = Z_2 = 0{,}647 + j2{,}528\ \Omega$
- $Z_0 = 36{,}095 + j2{,}731\ \Omega$

Το δίκτυο 20 kV γειώνεται μέσω αντίστασης 12 Ω στον ουδέτερο κόμβο του Μ/Σ στον Υ/Σ 150/20 kV. Οι ανισώσεις (2.63), (2.69) και (2.75) είναι αδύνατες στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναμενόταν, επιβεβαιώνοντας ότι οι ιδιότητες δεν ισχύουν σε δίκτυα μη επαρκώς γειωμένα.

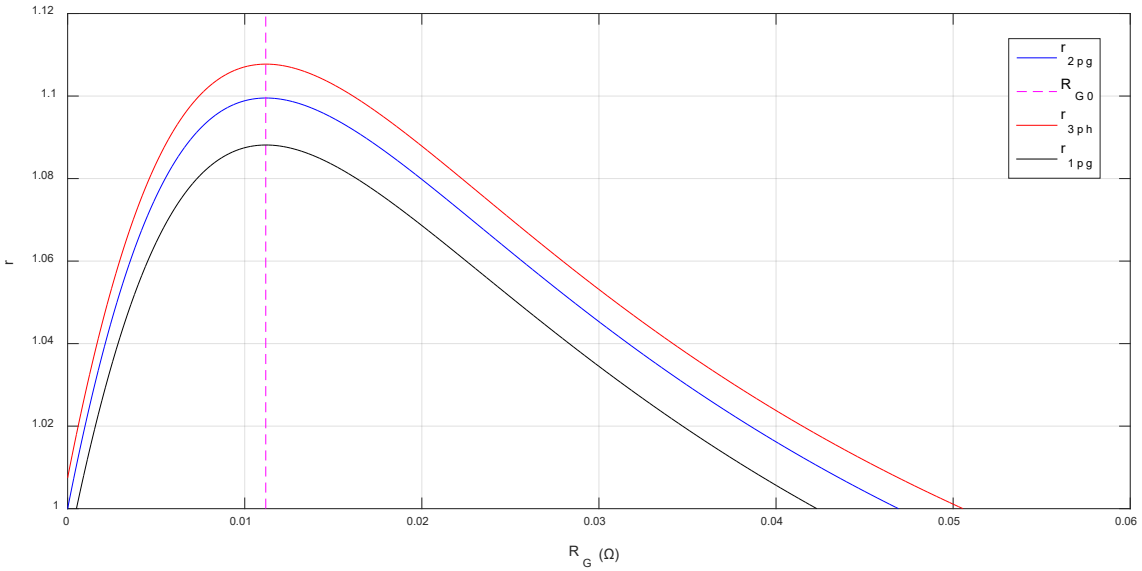
Παράδειγμα 6: Σφάλμα στους ακροδέκτες 400 V Υ/Σ διανομής 20/0,4 kV 200 kVA, Dyn1 (στερεά γείωση του ουδετέρου κόμβου του Μ/Σ στην πλευρά 0,4 kV).

- $Z_1 = Z_2 = 0{,}00866 + j0{,}03374\ \Omega$
- $Z_0 = 0{,}008 + j0{,}032\ \Omega$

Το εξεταζόμενο δίκτυο 0,4 kV είναι επαρκώς γειωμένο, διότι:

- $R_0/X_1 = 0{,}237 < 1$
- $k = X_0/X_1 = 0{,}948 \leq 3$

Η επίλυση των ανισώσεων (2.63), (2.69) και (2.75) οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα, όπως αποτυπώνονται και στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 2.21:
$S_{2pg}(\Omega) = (0, 0{,}047)$, $S_{3ph}(\Omega) = (0, 0{,}051)$, $S_{1pg}(\Omega) = (0{,}0005, 0{,}042)$, $R_{G0} = 0{,}011\ \Omega$, $r_{2pg}^{max} = 1{,}0995$, $r_{3ph}^{max} = 1{,}1077$, $r_{1pg}^{max} = 1{,}0881$.



Σχήμα 2.21: Μεταβολή των λόγων r_{2pg}, r_{3ph}, r_{1pg} ως προς την αντίσταση R_G (Παράδειγμα 6).

Όπως προκύπτει από τις τιμές των αποτελεσμάτων, το φασικό ρεύμα διφασικού σφάλματος προς γη έχει τη μεγαλύτερη ένταση συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους σφάλματος, όταν $R_G \in S_{1pg}$, και μεγιστοποιείται για αντίσταση σφάλματος ίση με 0,011 Ω.

3. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Παραδοσιακά, τα μεν εναέρια δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) σχεδιάζονταν ακτινικά, τα δε υπόγεια ΔΔΗΕ με βροχοειδή ή ατρακτοειδή τοπολογία [79]. Και στις δύο περιπτώσεις, οι κλάδοι του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους, με μοναδική πηγή τροφοδοσίας τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Ο σχεδιασμός, η λειτουργία και η ανάπτυξη των συμβατικών ΔΔΗΕ έχει αναλυθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία [80]–[83].

Τα τελευταία χρόνια, η διαρκώς αυξανόμενη παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) στα ΔΔΗΕ έχει οδηγήσει σε θεμελιώδεις αλλαγές, όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας των δικτύων [84]. Σημειώνεται ότι εκτός από τον όρο διεσπαρμένη παραγωγή (dispersed generation, DG), ο όρος διανεμημένη παραγωγή (distributed generation) είναι εξίσου διαδεδομένος [85]. Ως ΜΔΠ ορίζεται η πηγή ηλεκτρικής ισχύος που συνδέεται είτε απευθείας στο ΔΔΗΕ, είτε στην πλευρά του καταναλωτή ως προς το σημείο μέτρησης [86]. Οι ΜΔΠ, οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και τα αποκρινόμενα φορτία συνιστούν τις διανεμημένες πηγές ενέργειας (distributed energy resources, DERs) ενός δικτύου [83], [85].

Οι ΜΔΠ ταξινομούνται σε τέσσερις γενικές κατηγορίες με κριτήριο την εγκατεστημένη ισχύ τους, σύμφωνα με την εργασία [86]:

- πολύ μικρής ισχύος: ~1 W έως 5 kW,
- μικρής ισχύος: 5 kW έως 5 MW,
- μεσαίας ισχύος: 5 MW έως 50 MW,
- μεγάλης ισχύος: 50 MW έως 300 MW.

Κατηγοριοποίηση των ΜΔΠ μπορεί επίσης να γίνει βάσει της τεχνολογίας τους. Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης των ΜΔΠ στο δίκτυο αποτελεί αντικείμενο τεχνοοικονομικής μελέτης, η οποία εξετάζει μεταξύ άλλων την ονομαστική ισχύ, το κόστος των απαιτούμενων έργων ενίσχυσης και επέκτασης του υφιστάμενου δικτύου, καθώς και τις ενεργειακές απώλειες καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης [87]. Παρόλο που η ονομαστική ισχύς της ΜΔΠ δεν ορίζει μονοσήμαντα τον τρόπο σύνδεσής της στο δίκτυο, στην πράξη λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω ενδεικτικά κριτήρια [88]:

- έως 20 kW, σύνδεση απευθείας σε γραμμή ΧΤ (πιθανή ενίσχυση της γραμμής),
- έως 100 kW, σύνδεση σε υφιστάμενο ή νέο Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ,
- έως 4 MW, σύνδεση απευθείας σε γραμμή ΜΤ (πιθανή ενίσχυση της γραμμής),
- έως 6 MW, σύνδεση μέσω αποκλειστικής γραμμής ΜΤ απλού κυκλώματος (εάν δεν υπάρχει ελεύθερη πύλη αναχώρησης ΜΤ στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, γίνεται επέκταση του Υ/Σ με εγκατάσταση επιπλέον Μ/Σ),
- έως 20 MW, σύνδεση μέσω αποκλειστικής γραμμής ΜΤ διπλού κυκλώματος (εάν δεν υπάρχουν ελεύθερες πύλες αναχώρησης ΜΤ στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, γίνεται επέκταση του Υ/Σ με εγκατάσταση επιπλέον Μ/Σ),
- άνω των 20 MW, σύνδεση στο σύστημα ΥΤ μέσω ιδιαίτερου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ.

Η υψηλή διείσδυση ΜΔΠ στα ΔΔΗΕ τα τελευταία χρόνια οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, κυβερνήσεις και ρυθμιστικές αρχές παγκοσμίως έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ και ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών CO_2 κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με απώτερο σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Δεύτερον, προωθείται διεθνώς η φιλοσοφία του ευφυούς δικτύου (smart grid) με στόχο την περιβαλλοντική αειφορία, την υγιή οικονομική ανταγωνιστικότητα και γενικότερα τη βελτίωση των υπηρεσιών που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια. Το ευφυές δίκτυο χαρακτηρίζεται από τις εξής επτά ιδιότητες, σύμφωνα με την εργασία [89]:

- αυτόματη αποκατάσταση λειτουργίας κατόπιν διαταραχής,
- ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών στην απόκριση ζήτησης,
- ανθεκτική λειτουργία ενάντια σε φυσικά φαινόμενα και κυβερνοεπιθέσεις,
- εξασφάλιση υψηλής ποιότητας ισχύος,
- φιλοξενία μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετικών τεχνολογιών,
- παροχή σύγχρονων προϊόντων και υπηρεσιών,
- βέλτιστη διαχείριση στοιχείων δικτύου και αποδοτική λειτουργία.

Για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση ΜΔΠ από ΑΠΕ και να υλοποιηθεί το όραμα του ευφυούς δικτύου, απαιτείται η μετατροπή των συμβατικών ΔΔΗΕ από παθητικά σε ενεργά δίκτυα διανομής (active distribution networks), υπό την έννοια του αποκεντρωμένου ελέγχου των διαθέσιμων διανεμημένων πηγών ενέργειας και της δυνατότητας παροχής επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο [90], [91]. Η λογική της συγκεντρωμένης παραγωγής σε μεγάλους σταθμούς εγκαταλείπεται ολοένα και περισσότερο, ενώ παράλληλα προωθείται η αποκεντρωμένη εγκατάσταση μικρών σταθμών παραγωγής πλησίον των σημείων κατανάλωσης, μετατρέποντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα δίκτυα διανομής σε συστήματα μεταφοράς μικρής κλίμακας.

Κύριο χαρακτηριστικό των ενεργών δικτύων είναι η ευελιξία τους να προσαρμόζουν σε πραγματικό χρόνο την παραγόμενη ισχύ των ΜΔΠ βάσει της ζήτησης των καταναλωτών. Από οικονομικής άποψης, η μετάβαση των ΔΔΗΕ από παθητικά σε ενεργά απαιτεί μεγάλου ύψους επενδύσεις, ενώ ο εκσυγχρονισμός των υφιστάμενων υποδομών δικτύου, σε συνδυασμό με την εφαρμογή προηγμένων πληροφοριακών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, αποτελεί τον βασικό τεχνικό σκόπελο που πρέπει να υπερκεραστεί. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενεργού δικτύου διανομής είναι το μικροδίκτυο (microgrid), το οποίο θεωρείται ως η πιο πρωτοποριακή δομή για τα μελλοντικά δίκτυα διανομής, βάσει των σημερινών τεχνολογικών δυνατοτήτων. Σύμφωνα με τον ορισμό της αναφοράς [92], τα μικροδίκτυα είναι συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με φορτία και διανεμημένες πηγές ενέργειας, τα οποία μπορούν να λειτουργούν πλήρως ελεγχόμενα, είτε διασυνδεδεμένα με το σύστημα μεταφοράς είτε νησιδοποιημένα.

Η παρουσία ΜΔΠ πλησίον των σημείων κατανάλωσης προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Η ισχύς μεταφέρεται σε μικρότερη απόσταση, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών επί των γραμμών. Επίσης, επιτυγχάνεται μείωση της ροής ισχύος από υψηλότερα επίπεδα τάσης προς το φορτίο, αποτρέποντας πιθανές υπερφορτίσεις των γραμμών μεταφοράς σε περιόδους υψηλής ζήτησης [85]. Από την άλλη πλευρά, η διαρκώς αυξανόμενη διείσδυση ΜΔΠ διαφορετικών τεχνολογιών στα ΔΔΗΕ έχει προκαλέσει προβλήματα λειτουργίας, τα οποία δεν είχαν εμφανιστεί στα συμβατικά δίκτυα έως σήμερα [93]. Τα εν λόγω προβλήματα αφορούν κυρίως την ποιότητα ισχύος, την αξιοπιστία, τον έλεγχο και την προστασία του δικτύου, στρέφοντας την προσοχή της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας στην ανάπτυξη λύσεων για την αντιμετώπισή τους. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΜΔΠ στα ΔΔΗΕ περιγράφονται αναλυτικά στην αναφορά [85].

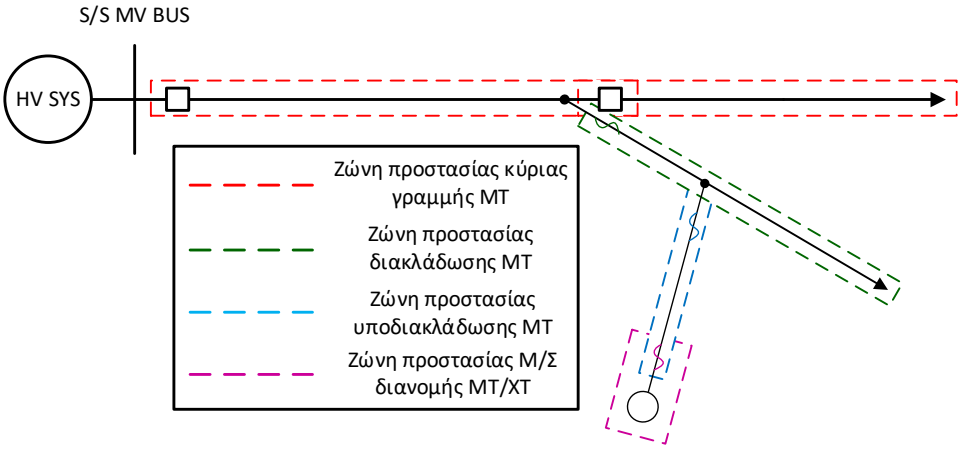
Το παρόν κεφάλαιο καταγράφει και διερευνά τα ενδεχόμενα προβλήματα προστασίας στα σύγχρονα ΔΔΗΕ εξαιτίας της υψηλής διείσδυσης ΜΔΠ, κατόπιν εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η διερεύνηση εστιάζει ιδιαίτερα στην περίπτωση των ΜΔΠ που δεν χρησιμοποιούν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, λόγω της μεγάλης επίδρασής τους στα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Αρχικά, παρουσιάζονται οι παραδοσιακές τεχνικές προστασίας, όπως εφαρμόζονται διαχρονικά στα δίκτυα διανομής διεθνώς, ενώ στη συνέχεια, αναλύονται σε βάθος οι αδυναμίες των συγκεκριμένων τεχνικών, όταν εφαρμόζονται σε σύγχρονα δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή. Η πιθανότητα εμφάνισης των εξεταζόμενων προβλημάτων προστασίας επιβεβαιώνεται και από ειδική μελέτη που εκπονήθηκε σε τμήμα του Ελληνικού δικτύου

διανομής ΜΤ, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλο πλήθος μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών (μΥΗΣ) και φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάρκων [94].

3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

3.2.1 Βασικές Αρχές

Όλες οι προστατευόμενες περιοχές ενός ΔΔΗΕ που έχουν κοινή πρωτεύουσα προστασία συνιστούν μία ζώνη προστασίας (π.χ. ζώνη προστασίας γραμμής κορμού, διακλάδωσης, υποδιακλάδωσης κτλ.), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή της διατριβής, η πρωτεύουσα προστασία είναι υπεύθυνη για την έγκαιρη εκκαθάριση του σφάλματος εντός της ζώνης που επιτηρεί, ενώ η δευτερεύουσα προστασία αναλαμβάνει δράση με χρονική καθυστέρηση μόνο σε περίπτωση αστοχίας της πρώτης.



Σχήμα 3.1: Ζώνες προστασίας ΔΔΗΕ.

Κάθε δίκτυο διανομής αποτελείται από επιμέρους ζώνες προστασίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, εκ των οποίων:

- η γραμμή κορμού ή κύρια γραμμή προστατεύεται από τον διακόπτη ισχύος (Δ/Ι), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην αναχώρηση της γραμμής εντός του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και από τυχόν εγκατεστημένο διακόπτη αυτόματης επαναφοράς (Δ/ΑΕ) κατά μήκος της γραμμής (συνήθως, πλησίον του μέσου γραμμής μεγάλου μήκους),
- οι διακλαδώσεις και υποδιακλαδώσεις προστατεύονται από διακόπτες απομόνωσης (Δ/Α) ή ασφαλειοαποζεύκτες (Α/Ζ), οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στο σημείο αναχώρησής τους,
- οι Υ/Σ διανομής προστατεύονται από Α/Ζ, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι είτε επί του ικριώματος των Υ/Σ είτε στην αρχή της υποδιακλάδωσης μικρού μήκους που τους τροφοδοτεί.

Επαρκής προστασία των ΔΔΗΕ ισοδυναμεί με ικανοποίηση των ακόλουθων απαιτήσεων [30]:

i. Σε περίπτωση κυρίως παροδικού σφάλματος επί του δικτύου, το ποσοστό των οποίων εκτιμάται περίπου στο 90% των καταγεγραμμένων συμβάντων, δεν πρέπει να προκαλείται μόνιμη διακοπή (π.χ. τήξη ασφάλειας), παρά μόνο στιγμιαία πτώση και επαναφορά του Δ/Ι.

ii. Σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος, θα πρέπει να απομονώνεται η μικρότερη δυνατή περιοχή του δικτύου, να δρα δηλαδή η πρωτεύουσα προστασία και να διακόπτει την τροφοδοσία του πληγέντος τμήματος μέχρι να αποκατασταθεί η βλάβη.

iii. Επίσης, σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος, η πρωτεύουσα προστασία θα πρέπει να λειτουργεί εντός εύλογου χρονικού διαστήματος ($\leq 4 \div 5$ s), ακόμη και υπό συνθήκες ελαχίστου βραχυκυκλώματος, για την αποφυγή εκτεταμένης βλάβης στο δίκτυο.

Στην πράξη, η ικανοποίηση της πρώτης απαίτησης δεν μπορεί να επιτευχθεί για παροδικά σφάλματα στην πλευρά ΜΤ των Υ/Σ διανομής, διότι χρησιμοποιούνται ασφάλειες ταχείας τήξης που τήκονται

ακαριαία σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Επιπλέον, η πρώτη απαίτηση δεν ικανοποιείται πάντα για ημιμόνιμα σφάλματα σε διακλαδώσεις ή υποδιακλαδώσεις που προστατεύονται από Α/Ζ. Αντίθετα, οι άλλες δύο απαιτήσεις πρέπει να ικανοποιούνται πάντα.

3.2.2 Διεθνείς Πρακτικές & Κανόνες Εφαρμογής

Στο παρόν εδάφιο, παρουσιάζονται οι βασικοί κανόνες και πρακτικές προστασίας που εφαρμόζουν οι ηλεκτρικές εταιρίες διεθνώς, όπως έχουν καταγραφεί στη σχετική βιβλιογραφία [5], [95]–[97]. Τα κύρια ευρήματα αποτυπώνονται συνοπτικά στα παρακάτω σημεία.

i. Τα παραδοσιακά σχήματα προστασίας των ΔΔΗΕ βασίζονται σε μέσα απλής προστασίας υπερέντασης, χωρίς διάκριση της κατεύθυνσης του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

ii. Η εξεταζόμενη περιοχή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης για τους Δ/Ι των γραμμών κορμού είναι στην περίπτωση φασικών σφαλμάτων:
   - ✓ Μέγιστο ρεύμα, I_{3ph}^{max}, για πλήρες τριφασικό σφάλμα στην αρχή της γραμμής.
   - ✓ Ελάχιστο ρεύμα, I_{2ph}^{min}, για διφασικό σφάλμα στο άκρο της γραμμής με αντίσταση σφάλματος, όπου $I_{2ph}^{min} = (0{,}5 \div 0{,}7) I_{3ph}^{max}$ σε εναέρια δίκτυα, ενώ $I_{2ph}^{min} = 0{,}8 I_{3ph}^{max}$ σε υπόγεια δίκτυα.

iii. Η εξεταζόμενη περιοχή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης για τους Δ/Ι γραμμών κορμού είναι στην περίπτωση σφαλμάτων γης:
   - ✓ Μέγιστο ρεύμα, I_{1pg}^{max}, για πλήρες μονοφασικό σφάλμα προς γη στην αρχή της γραμμής.
   - ✓ Ελάχιστο ρεύμα, I_{1pg}^{min}, για μονοφασικό σφάλμα προς γη στο άκρο της γραμμής με αντίσταση σφάλματος 40 Ω σε εναέρια δίκτυα και 20 Ω σε υπόγεια δίκτυα.

iv. Ειδικά για τα εναέρια δίκτυα διανομής, η ρύθμιση των στοιχείων προστασίας υπερέντασης φάσης των Η/Ν στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια:
   - ✓ Ένταση διέγερσης στοιχείου αντιστρόφου χρόνου (51P): $I_{pu,51P} = (1{,}5 \div 3) I_{L,max}$, όπου $I_{L,max}$ είναι το μέγιστο αναμενόμενο φορτίο της γραμμής. Με την προτεινόμενη ρύθμιση εξασφαλίζεται ότι ο Η/Ν δεν θα διεγερθεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, κατά την ηλέκτριση μεγάλου Μ/Σ διανομής εξαιτίας του ρεύματος ζεύξης (inrush current), καθώς και υπό συνθήκες ψυχρής φόρτισης της γραμμής (cold-load pickup), έπειτα από παρατεταμένη διακοπή της τροφοδοσίας.
   - ✓ Χρονικός πολλαπλασιαστής στοιχείου 51P: Επιλέγεται τιμή που εξασφαλίζει επιλογική συνεργασία με τον Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και ικανοποιεί τον εμπειρικό κανόνα: $t_{op} > 5\ s$ για $I = 3 I_{L,max}$, για την αποφυγή λειτουργίας της προστασίας σε περίπτωση ψυχρής φόρτισης της γραμμής.
   - ✓ Τύπος χαρακτηριστικής λειτουργίας στοιχείου 51P: Επιλέγονται καμπύλες που προδιαγράφονται σε διεθνή πρότυπα [98], [99]. Συνήθης πρακτική είναι η χρήση καμπύλης πολύ αντιστρόφου χρόνου (π.χ. IEC Very Inverse) σε δίκτυα, όπου η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαρτάται κυρίως από τη θέση του σφάλματος και όχι από την πηγή. Σε αντίθετη περίπτωση, επιλέγεται καμπύλη απλώς αντιστρόφου χρόνου (π.χ. IEC Standard/Normal Inverse).
   - ✓ Ένταση διέγερσης στοιχείου σταθερού χρόνου (50P): $I_{pu,50P} = (1{,}2 \div 1{,}5) I_{3ph}$, όπου I_{3ph} είναι το ρεύμα πλήρους τριφασικού σφάλματος στο άκρο της γραμμής ή στο σημείο εγκατάστασης του Δ/ΑΕ, εάν υπάρχει.
   - ✓ Χρονική καθυστέρηση στοιχείου 50P: $t_{d,50P} = 0{,}1 \div 0{,}3\ s$.

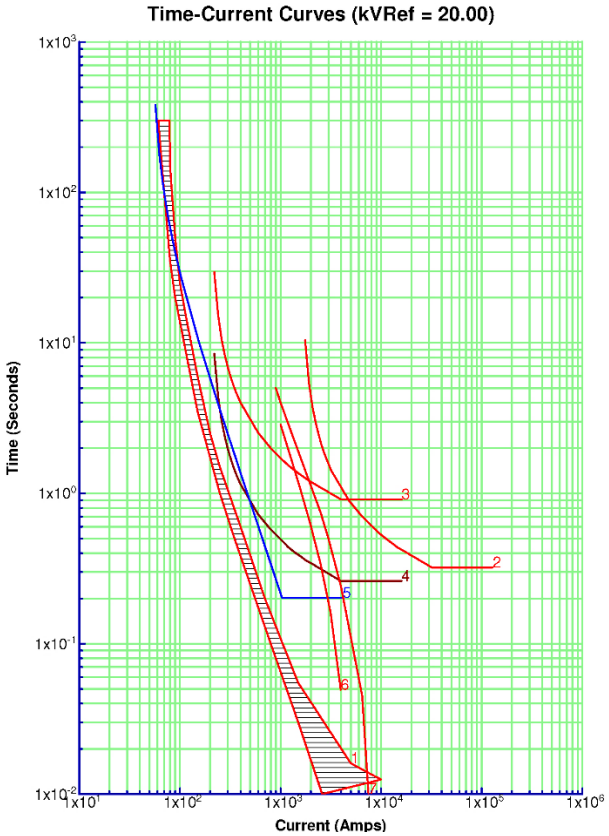
v. Η ρύθμιση των στοιχείων προστασίας υπερέντασης γης των Η/Ν στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής βασίζεται στα παρακάτω κριτήρια:
   - ✓ Ένταση διέγερσης στοιχείου αντιστρόφου χρόνου (51G/N): Πρέπει να εξασφαλίζεται διέγερση σε ελάχιστα σφάλματα γης και αναισθησία σε ρεύματα ασυμμετρίας που δύνανται να εμφανιστούν στην κανονική λειτουργία. Συνήθως, επιλέγεται: $I_{pu,51G} = 0{,}5 I_{L,max}$ ή $I_{pu,51G} = (0{,}25 \div 0{,}5) I_{pu,51P}$.

- ✓ Χρονικός πολλαπλασιαστής στοιχείου 51G: Επιλέγεται τιμή που εξασφαλίζει επιλογική συνεργασία με τον Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και ελαχιστοποιεί τον χρόνο λειτουργίας για μέγιστα σφάλματα.
- ✓ Τύπος χαρακτηριστικής λειτουργίας στοιχείου 51G: Χρησιμοποιούνται κυρίως καμπύλες εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου (π.χ. IEC Extremely Inverse), λόγω της ταχείας απόκρισής τους και της καλής επιλογικής συνεργασίας με τις ασφάλειες.
- ✓ Ένταση διέγερσης στοιχείου σταθερού χρόνου (50G/N): $I_{pu,50G} = (1{,}2 \div 1{,}5) I_{1pg}$, όπου I_{1pg} είναι το ρεύμα πλήρους μονοφασικού σφάλματος στο άκρο της γραμμής ή στο σημείο εγκατάστασης του Δ/ΑΕ, εάν υπάρχει.
- ✓ Χρονική καθυστέρηση στοιχείου 50G: $t_{d,50G} = 0{,}1 \div 0{,}3\ s$.

vi. Επίσης, για την κατάλληλη ρύθμιση των Η/Ν στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής ορίζονται τα παρακάτω τεχνικά όρια, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής προστασία του δικτύου, καθώς και να εξασφαλίζεται επιλογική συνεργασία μεταξύ των διαδοχικών μέσων προστασίας:

- ✓ Άνω όρια: Καμπύλη Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (δευτερεύουσα προστασία) και καμπύλες αντοχής των αγωγών των γραμμών και των Δ/Α.
- ✓ Κάτω όρια: Χαρακτηριστική λειτουργίας μέγιστης ασφάλειας και καμπύλη Η/Ν πελάτη ΜΤ (παροχή ΒΚ-ΙΙ), εάν υπάρχει.

Η προηγούμενη περιγραφή απεικονίζεται στο διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας του Σχήματος 3.2 (οι καμπύλες που ορίζουν τα παραπάνω όρια έχουν σχεδιασθεί με κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 3.2: Όρια κατάλληλης ρύθμισης Η/Ν στις αναχωρήσεις γραμμών διανομής, (1) μέγιστη ασφάλεια, (2)–(3) στοιχεία 51P και 51G του Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ του κύριου Υ/Σ, (4)–(5) στοιχεία 51P και 51G του Η/Ν στην πύλη αναχώρησης, (6) καμπύλη αντοχής αγωγών, (7) καμπύλη αντοχής Δ/Α.

vii. Όταν χρησιμοποιείται Δ/Ι που εκτελεί αυτόματες επαναφορές ή Δ/ΑΕ, θα πρέπει:

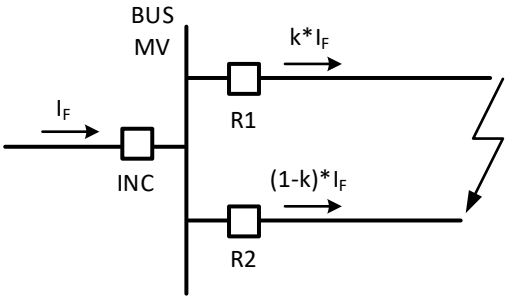
- ✓ $I_{pu,50P} = I_{pu,51P}$,
- ✓ $I_{pu,50G} = I_{pu,51G}$,
- ✓ $t_{d,50P} = t_{d,50G} \leq 0{,}1\ s$.

viii. Εάν $I_{pu,50P} > I_{pu,51P}$ και συμβεί φασικό σφάλμα σε διακλάδωση με ένταση ρεύματος μεταξύ $I_{pu,51P}$ και $I_{pu,50P}$, τότε ο Δ/Ι (ή ο Δ/ΑΕ) θα εκτελέσει μόνο αργές πτώσεις, με αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη τήξη της ασφάλειας που προστατεύει τη διακλάδωση.

ix. Σε περιπτώσεις που απαιτείται αυξημένη ευαισθησία της προστασίας για διφασικά σφάλματα, γίνεται χρήση στοιχείων υπερέντασης αρνητικής ακολουθίας (50Q, 51Q). Τα εν λόγω στοιχεία έχουν, επίσης, την ικανότητα ανίχνευσης καταστάσεων ανοικτοκυκλώματος, καθώς και μονοφασικών σφαλμάτων προς γη στην πλευρά ΧΤ των Μ/Σ διανομής με συνδεσμολογία Dyn (η εν λόγω συνδεσμολογία χρησιμοποιείται και στο Ελληνικό ΔΔΗΕ). Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη ρύθμιση της έντασης διέγερσης του στοιχείου, έτσι ώστε να υπερβαίνει πάντα το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα ασυμμετρίας στην κανονική λειτουργία.

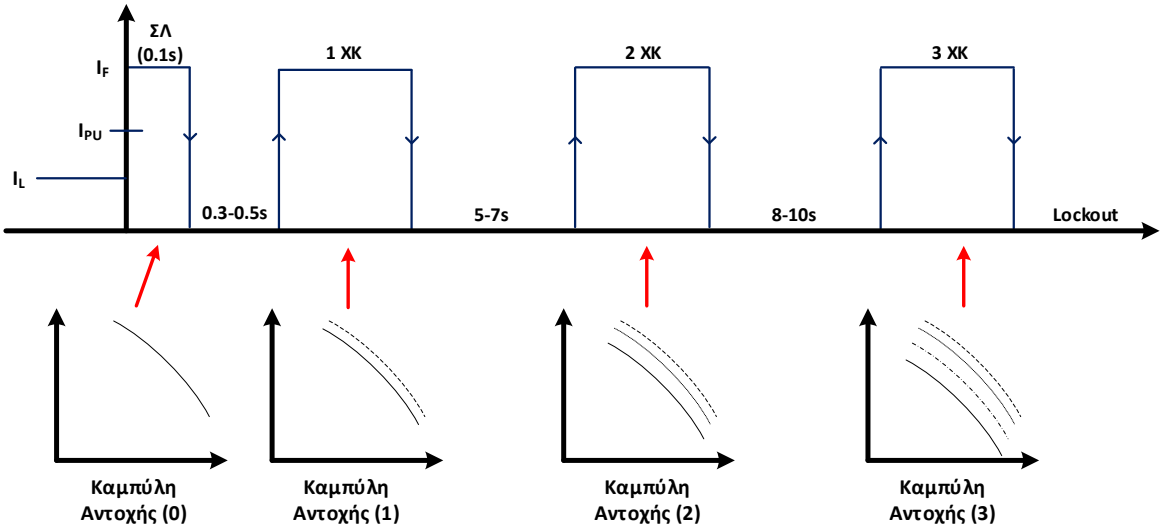
x. Εάν δεν χρησιμοποιείται το στοιχείο στιγμιαίας λειτουργίας (ΣΛ), ενδέχεται να προκύψει πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας μεταξύ των Η/Ν των γραμμών και του Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ σε περίπτωση σφάλματος μεταξύ φάσεων γειτονικών γραμμών πλησίον του Υ/Σ (intercircuit fault). Το Σχήμα 3.3 απεικονίζει την εν λόγω ειδική περίπτωση, όπου ο Η/Ν INC μετράει το συνολικό ρεύμα σφάλματος, ενώ οι Η/Ν R1 και R2 ποσοστό αυτού. Σύμφωνα με εμπειρικούς κανόνες, επαρκής επιλογική συνεργασία εξασφαλίζεται όταν το επιθυμητό περιθώριο χρονικής διαβάθμισης εφαρμόζεται μεταξύ:

- ✓ της καμπύλης χρονικής καθυστέρησης (ΧΚ) του Η/Ν κάθε πύλης αναχώρησης, για ρεύμα σφάλματος ίσο με το 50% του μέγιστου σφάλματος στον ζυγό ΜΤ του Υ/Σ,
- ✓ και της καμπύλης ΧΚ του Η/Ν στην πύλη εισόδου ΜΤ του Υ/Σ, για ρεύμα σφάλματος ίσο με το 100% του μέγιστου σφάλματος στον ζυγό ΜΤ.



Σχήμα 3.3: Σφάλμα μεταξύ φάσεων γειτονικών γραμμών πλησίον του κύριου Υ/Σ.

xi. Η αντοχή των αγωγών κατά τη διάρκεια εκδήλωσης μόνιμου σφάλματος και εκτέλεσης αυτόματων επαναφορών μειώνεται, εξαιτίας της σταδιακής αύξησης της θερμοκρασίας των αγωγών. Συνεπώς, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή στην καμπύλη αντοχής τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Εκτέλεση αυτόματων επαναφορών και μείωση της αντοχής των αγωγών.

xii. Για να αυξηθεί η πιθανότητα επιτυχίας των αυτόματων επαναφορών, ο χρόνος εκτέλεσής τους θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο που απαιτείται για την εξάλειψη του ηλεκτρικού τόξου, επιτρέποντας την αποκατάσταση της μονωτικής ικανότητας του αέρα. Ο χρόνος αποκατάστασης εξαρτάται από το επίπεδο τάσης του δικτύου. Για δίκτυα ΜΤ έως 23 kV, έχει προσδιορισθεί πειραματικά ότι ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος αποκατάστασης ισούται με 4 κύκλους [80].

xiii. Στα εναέρια δίκτυα ΜΤ αγροτικών και γενικά επαρχιακών περιοχών, τόσο οι Δ/Ι στις αναχωρήσεις όσο και οι Δ/ΑΕ κατά μήκος των γραμμών κορμού εκτελούν αυτόματες επαναφορές. Στο εν λόγω σχήμα προστασίας, ο Δ/Ι (ή ο Δ/ΑΕ) ρυθμίζεται με ένα στοιχείο ΣΛ και ένα στοιχείο ΧΚ, με στόχο τη «σωτηρία» των ασφαλειών στις διακλαδώσεις σε περίπτωση παροδικού σφάλματος (fuse-saving scheme) και κατ' επέκταση την ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου αποκατάστασης της βλάβης. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η σύντομη διακοπή της ηλεκτροδότησης, την οποία υφίστανται όλοι οι καταναλωτές που τροφοδοτούνται από την πληγείσα γραμμή.

xiv. Αντίθετα, στα υπόγεια δίκτυα ΜΤ αστικών περιοχών, οι Δ/Ι των αναχωρήσεων δεν ρυθμίζονται με στοιχείο ΣΛ και δεν εκτελούν αυτόματες επαναφορές, διότι τα σφάλματα που εμφανίζονται στα καλώδια είναι εκ φύσεως μόνιμα. Σε περίπτωση σφάλματος επί διακλάδωσης, οι αντίστοιχες ασφάλειες τήκονται (fuse-blowing scheme), απομονώνοντας μόνο την πληγείσα περιοχή και αποτρέποντας τις διακοπές ηλεκτροδότησης στα υγιή τμήματα του δικτύου. Το ίδιο σχήμα χρησιμοποιείται και σε γραμμές διανομής που τροφοδοτούν ευαίσθητα φορτία σε διακύμανση τάσης (π.χ. βιομηχανικοί ή μεγάλοι εμπορικοί καταναλωτές). Βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο σχετικά μεγάλος χρόνος αποκατάστασης της βλάβης.

xv. Για την πλήρη επιλογική συνεργασία των ασφαλειών στα δίκτυα διανομής υιοθετείται γενικά ο εξής κανόνας: ο πλήρης χρόνος τήξης της ασφάλειας που παρέχει πρωτεύουσα προστασία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 75% του ελαχίστου χρόνου τήξης της ασφάλειας που παρέχει δευτερεύουσα προστασία.

xvi. Όπως έχει ήδη επισημανθεί στο Κεφάλαιο 2, το πιο συχνό σφάλμα στα εναέρια δίκτυα διανομής είναι το μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη. Για λόγους αξιοπιστίας, συνεπώς, εφαρμόζεται τριπολική πτώση–επαναφορά από τους Δ/Ι ή τους Δ/ΑΕ, σε συνδυασμό με μονοφασικούς Δ/Α. Με αυτήν την τεχνική, δίνεται η δυνατότητα απομόνωσης μόνο της προβληματικής φάσης σε περίπτωση σφάλματος διακλάδωσης, ενώ οι λοιπές φάσεις παραμένουν υπό τάση [100]. Η εφαρμογή σχήματος μονοπολικής πτώσης–επαναφοράς θα προκαλούσε έντονη ασυμμετρία στο δίκτυο, η οποία εξαρτάται άμεσα από το φορτίο των γραμμών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων ευαισθησίας και επιλογικής συνεργασίας των μέσων προστασίας. Η προηγούμενη δυσκολία αντιμετωπίζεται με τη χρήση σύγχρονων Η/Ν, οι οποίοι με κατάλληλο προγραμματισμό καθιστούν εφικτή την ασφαλή υλοποίηση σχήματος μονοπολικής πτώσης–επαναφοράς, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αξιοπιστία των δικτύων διανομής [101].

3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Καθώς το όραμα του ευφυούς δικτύου υλοποιείται σταδιακά σε όλα τα ανεπτυγμένα κράτη διεθνώς, τα δίκτυα διανομής υφίστανται μοιραία σημαντικές αλλαγές ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους. Η πιο κομβική αλλαγή στη φιλοσοφία λειτουργίας οφείλεται στην εγκατάσταση και σύνδεση ΜΔΠ, μετατρέποντας τα συμβατικά δίκτυα διανομής από παθητικά σε ενεργά. Η εν λόγω μετατροπή εισάγει νέες προκλήσεις στον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας των δικτύων, οι οποίες χρήζουν αποτελεσματικής αντιμετώπισης [93], [102]. Παραδοσιακά, οι δημόσιες εταιρίες ηλεκτρισμού διαχειρίζονταν τη συνολική παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Σήμερα, όμως, η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει απελευθερωθεί, με αποτέλεσμα σταθμοί ανεξάρτητων παραγωγών να συνδέονται στα συστήματα μεταφοράς και στα δίκτυα διανομής. Ο συνολικός έλεγχος της ενεργειακής αγοράς επιτελείται πλέον από τις ρυθμιστικές αρχές ενέργειας των κρατών.

Από την άλλη πλευρά, οι ηλεκτρικές εταιρείες, στόχος των οποίων είναι η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος υψηλής ποιότητας στους καταναλωτές, καλούνται να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά

τις αρνητικές επιπτώσεις των ΜΔΠ στη λειτουργία των δικτύων τους. Οι εν λόγω επιπτώσεις αφορούν κυρίως τη διακύμανση της τάσης, την υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος, την αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης, καθώς και την προβληματική επίδοση των μέσων προστασίας [84], [103].

Ως εκ τούτου, οι διαχειριστές δικτύων διανομής έχουν προβεί σε αναθεώρηση του κώδικα λειτουργίας τους, προδιαγράφοντας τις τεχνικές απαιτήσεις και τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται για την ασφαλή διασύνδεση των ΜΔΠ. Ενδεικτικά παραδείγματα κανονισμών δίνονται στις αναφορές [104], [105]. Εκτός από τους κώδικες λειτουργίας, εκδόθηκε το 2003 και αναθεωρήθηκε το 2018 από τη Συντονιστική Επιτροπή Προτύπων 21 (Standards Coordinating Committee 21) του ινστιτούτου IEEE το πρότυπο 1547 [106], το οποίο αποτελεί γενικό οδηγό διασύνδεσης ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής, παρέχοντας εκτενή περιγραφή των τεχνικών απαιτήσεων όσον αφορά την παράλληλη λειτουργία δικτύου–ΜΔΠ. Αναλυτική περιγραφή και ανασκόπηση των βασικών απαιτήσεων διασύνδεσης ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής, από επιλεγμένες ηλεκτρικές εταιρείες παγκοσμίως, δίνονται στην εργασία [107].

Οι ΜΔΠ συνδέονται σε συμβατικά δίκτυα διανομής, τα οποία διατηρούν τις υφιστάμενες υποδομές τους. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα παραδοσιακά μέσα προστασίας των δικτύων διανομής, εξαιτίας της παρουσίας ΜΔΠ, αναλύονται στην παρούσα ενότητα, αναδεικνύοντας την ανάγκη εκσυγχρονισμού τους. Παρουσιάζονται εκτενώς οι εν λόγω προκλήσεις, όπως έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία, και διερευνάται σε βάθος η έκτασή τους, συναρτήσει βασικών χαρακτηριστικών των ΜΔΠ, όπως είναι το μέγεθος, το σημείο εγκατάστασης και η τεχνολογία τους. Γενική περιγραφή των προβλημάτων προστασίας σε δίκτυα διανομής με ΜΔΠ μπορεί να αναζητηθεί στις αναφορές [93], [102], [103], [108].

3.3.1 Συνεισφορά ΜΔΠ στο Ρεύμα Βραχυκύκλωσης

Η εγκατάσταση ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής μεταβάλλει σημαντικά την ένταση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, ενώ παράλληλα προκαλεί την αμφίδρομη ροή τους ανάλογα με τη θέση του σφάλματος [109]. Οι ΜΔΠ που χρησιμοποιούν σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες μπορούν να τροφοδοτήσουν σφάλματα με ρεύμα πολλαπλάσιο του ονομαστικού τους και για αρκετό χρονικό διάστημα, ανάλογα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μηχανών και του συστήματος διέγερσης, εάν διαθέτουν. Αντίθετα, οι μονάδες ΑΠΕ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος συνεισφέρουν στο βραχυκύκλωμα με ρεύμα της τάξης του ονομαστικού τους για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Επεκτείνοντας την κατηγοριοποίηση της εργασίας [110] για τους διαφορετικούς τύπους ανεμογεννητριών (Α/Γ), οι ΜΔΠ συνολικά μπορούν να ομαδοποιηθούν βάσει της τεχνολογίας τους ως εξής:

- τύπος 1, χρήση γεννήτριας επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα,
- τύπος 2, χρήση γεννήτριας επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα,
- τύπος 3, χρήση γεννήτριας επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα διπλής τροφοδότησης (doubly fed induction generator, DFIG),
- τύπος 4, σύνδεση στο δίκτυο μέσω μετατροπέα (full converter),
- τύπος 5, χρήση σύγχρονης γεννήτριας.

Οι τύποι 1 έως 3 αφορούν αποκλειστικά Α/Γ. Στον τύπο 4 κατατάσσονται οι μονάδες ΑΠΕ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα (Α/Γ, Φ/Β). Ο τύπος 5 είναι ευρύτερος των προηγούμενων και περιλαμβάνει Α/Γ με σύγχρονη μηχανή, μΥΗΣ, σταθμούς βιομάζας, γεωθερμικές μονάδες, ηλιοθερμικούς σταθμούς, μικρές μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (μΣΗΘ) κ.α.

Οι ΜΔΠ με σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες συμπεριφέρονται κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος ως πηγή τάσης πίσω από αντίδραση και διέπονται από την κλασική θεωρία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2. Από την άλλη πλευρά, η συμπεριφορά στο βραχυκύκλωμα των μονάδων ΑΠΕ που συνδέονται με ηλεκτρονικά ισχύος καθορίζεται από το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα και προσομοιώνεται ως πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση πίσω από AC φίλτρο [111], [112]. Η απόκριση των συγκεκριμένων ΜΔΠ στο βραχυκύκλωμα έχει γενικά τα εξής χαρακτηριστικά [113]–[118]:

- Η ένταση και η διάρκεια του ρεύματος συνεισφοράς εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας πριν το σφάλμα, τον αλγόριθμο ελέγχου που υλοποιεί ο μετατροπέας και τη βύθιση τάσης στους ακροδέκτες του μετατροπέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος.
- Δεν υπάρχει συνεισφορά ρεύματος μηδενικής ακολουθίας.

- Σε μισό κύκλο μετά την έναρξη του σφάλματος, το ρεύμα συνεισφοράς μπορεί να φτάσει 2 έως 3 φορές το ονομαστικό, ανάλογα με τη βύθιση της τάσης και τον τύπο των ημιαγώγιμων στοιχείων του μετατροπέα. Τυπικά, θεωρείται υπομεταβατικό ρεύμα ίσο με 2,5 αμ.
- Η προστασία των πυλών του μετατροπέα ενεργοποιείται ταχύτατα και μειώνει το ρεύμα συνεισφοράς σε 0,9 έως 1,6 αμ. Τυπικά, θεωρείται μεταβατικό ρεύμα ίσο με 1,5 αμ.
- Σήμερα, οι ηλεκτρικές εταιρείες διεθνώς θέτουν ως απαίτηση για τη σύνδεση ΜΔΠ στο δίκτυο την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε βύθιση τάσης (low voltage ride through, LVRT ή fault ride through, FRT), με στόχο την υποστήριξη της τάσης του δικτύου κατά τη διάρκεια παροδικών διαταραχών και την αποφυγή προβλημάτων ευστάθειας. Η χαρακτηριστική τάσης–χρόνου που υλοποιείται από τον αλγόριθμο ελέγχου του μετατροπέα καθορίζει τη χρονική διάρκεια παραμονής της ΜΔΠ στο δίκτυο και επομένως τη συνεισφορά της στο σφάλμα. Το ρεύμα συνεισφοράς είναι κατά μέγιστο της τάξης 1,0÷1,2 αμ.

Η Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (τύπου 3) αποτελεί ειδική περίπτωση, λόγω της διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα (crowbar) που χρησιμοποιούν. Σε απομακρυσμένα σφάλματα που δεν προκαλούν μεγάλη βύθιση τάσης στο σημείο σύνδεσης, η Α/Γ τύπου 3 συνεισφέρει μέσω του μετατροπέα της, όπως ακριβώς η Α/Γ τύπου 4. Σε περίπτωση, όμως, πλήρους βραχυκυκλώματος πλησίον της εγκατάστασης, όπου η τάση στην έξοδο του μετατροπέα πρακτικά μηδενίζεται, ενεργοποιείται η διάταξη crowbar με κριτήριο την τάση στην DC σύνδεση μεταξύ των επιμέρους μετατροπέων ή το ρεύμα δρομέα, ενώ παράλληλα ο μετατροπέας απενεργοποιείται, με αποτέλεσμα η Α/Γ να συμπεριφέρεται ως τυπική ασύγχρονη γεννήτρια με αυξημένη αντίσταση δρομέα. Πριν θέσουν σε ισχύ οι ηλεκτρικές εταιρείες την απαίτηση από τους ιδιώτες παραγωγούς για ικανότητα LVRT, η διάταξη crowbar παρέμενε ενεργοποιημένη μέχρι να αποσυνδεθεί η Α/Γ. Στις σύγχρονες εφαρμογές, η διάταξη crowbar μπορεί να απενεργοποιείται όταν ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια και η Α/Γ μπορεί να συνεχίσει να συνεισφέρει στο βραχυκύκλωμα μέσω του μετατροπέα της [115]. Η συγκεκριμένη λογική ελέγχου οδηγεί σε έντονα ασυνεχή χαρακτηριστική του ρεύματος συνεισφοράς της Α/Γ.

3.3.1.1 Μεταβολή Στάθμης Βραχυκύκλωσης

Η αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης στα σύγχρονα δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή δοκιμάζει την αντοχή του εξοπλισμού ισχύος, τη διακοπτική ικανότητα των μέσων προστασίας, την απόκριση των Μ/Ε και την επιλογική συνεργασία των Η/Ν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μικρή συνεισφορά των ΜΔΠ τύπου 4 δεν προκαλεί πρόβλημα στην επιλογική συνεργασία των στοιχείων προστασίας υπερέντασης του δικτύου. Λαμβάνεται υπόψη, όμως, για τον έλεγχο της αντοχής του εξοπλισμού ισχύος, της επάρκειας των διακοπτικών μέσων και της τήξης των ασφαλειών σε παροδικό σφάλμα [119].

Επομένως, η επανεξέταση των παρακάτω βασικών κριτηρίων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη διασφάλιση της επαρκούς προστασίας των σύγχρονων ΔΔΗΕ:

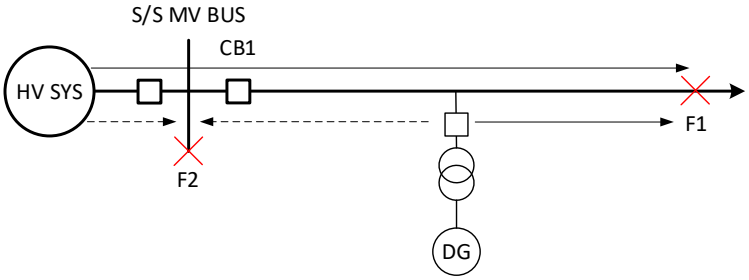
- Το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 90% της ονομαστικής αντοχής του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του δικτύου.
- Η ικανότητα διακοπής και ζεύξης σε βραχυκύκλωμα των μέσων προστασίας του δικτύου (Δ/Ι, ασφάλειες, Δ/ΑΕ) θα πρέπει να καλύπτουν τα μέγιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης στα σημεία εγκατάστασής τους.
- Η επάρκεια των Μ/Ε στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής θα πρέπει να εξασφαλίζεται υπό συνθήκες μέγιστου βραχυκυκλώματος. Στις περιπτώσεις που οι εγκαταστημένοι Μ/Ε είναι διπλού λόγου μετασχηματισμού (π.χ. 400–600/5) και χρησιμοποιείται η μικρή λήψη (400/5), θα πρέπει να εξετάζεται η αντιμετώπιση ενδεχόμενου προβλήματος κορεσμού με χρήση της υψηλής λήψης (600/5), ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο το κόστος αποκατάστασης της επάρκειας των Μ/Ε.
- Τα μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης κατά μήκος του δικτύου μεταβάλλονται σημαντικά και η αναμενόμενη περιοχή ρευμάτων σφάλματος μετατοπίζεται. Τα υφιστάμενα μέσα προστασίας είναι ρυθμισμένα να λειτουργούν ικανοποιητικά σε διαφορετική περιοχή ρευμάτων σφάλματος, με αποτέλεσμα να ελλοχεύει ο κίνδυνος ελλιπούς επίδοσής τους. Η πολιτική των ηλεκτρικών εταιρειών της Βορείου Αμερικής προβλέπει την αναθεώρηση της μελέτης επιλογικής συνεργασίας των προστασιών για το σύστημα μεταφοράς, όταν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης μεταβληθούν κατά 15% συγκριτικά με την τρέχουσα έκδοση της μελέτης [120]. Παρόμοια πολιτική μπορεί να υιοθετηθεί και στα δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση ΜΔΠ. Ως γενικός κανόνας

προτείνεται η αναθεώρηση της μελέτης επιλογικής συνεργασίας των προστασιών δικτύου διανομής, όταν επίκειται σύνδεση μεγάλης ΜΔΠ [103]. Στις εργασίες [121], [122], παρουσιάζεται συστηματική διαδικασία εκπόνησης των απαιτούμενων μελετών λειτουργίας για την αδειοδότηση και σύνδεση ΜΔΠ σε δίκτυο διανομής.

Από την άλλη πλευρά, η μείωση της στάθμης βραχυκύκλωσης είναι πιθανή σε δίκτυα διανομής που τροφοδοτούνται από ασθενή συστήματα μεταφοράς, σε περιοχές με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και ταυτόχρονο παροπλισμό συμβατικών μονάδων παραγωγής (π.χ. λιγνιτικές μονάδες). Η μείωση των διαθέσιμων ρευμάτων βραχυκύκλωσης ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλεια ευαισθησίας των μέσων προστασίας υπερέντασης του δικτύου. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο στα δίκτυα ΧΤ, τα οποία προστατεύονται αποκλειστικά από ασφάλειες, η τήξη των οποίων απαιτεί ισχυρό ρεύμα βραχυκύκλωσης.

3.3.1.2 Αμφίδρομη Ροή Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης

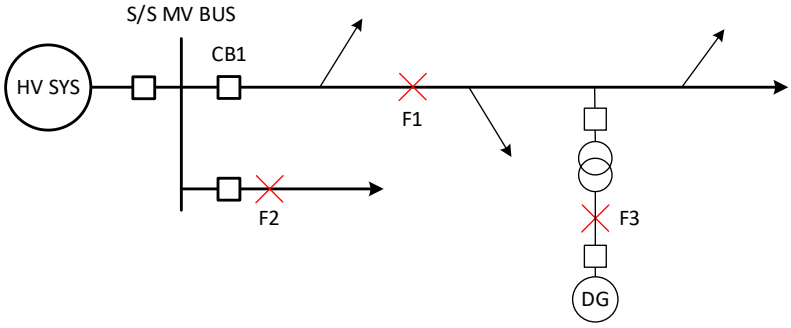
Στα συμβατικά δίκτυα διανομής, το ρεύμα βραχυκύκλωσης έχει μοναδική κατεύθυνση, από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ προς το σημείο εκδήλωσης του σφάλματος. Συνεπώς, τα μέσα προστασίας υπερέντασης του δικτύου δεν συνοδεύονται από στοιχείο κατεύθυνσης. Αντίθετα, στα σύγχρονα δίκτυα διανομής είναι πιθανή η αμφίδρομη ροή ρευμάτων μέσω του Δ/Ι στην αρχή των γραμμών κορμού, στις οποίες συνδέονται ΜΔΠ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Για σφάλμα στη θέση F1, το ρεύμα βραχυκύκλωσης που τροφοδοτεί ο Υ/Σ ρέει μέσω του Δ/Ι CB1 προς τα κατάντη του δικτύου, ενώ για σφάλμα στη θέση F2, το ρεύμα συνεισφοράς από τη ΜΔΠ ρέει μέσω του Δ/Ι προς τον ζυγό του Υ/Σ. Και στις δύο περιπτώσεις, ο Δ/Ι αντιλαμβάνεται ρεύμα βραχυκύκλωσης διαφορετικής έντασης και φοράς, χωρίς να διακρίνει εάν το σφάλμα είναι εντός ή εκτός της ζώνης προστασίας που επιτηρεί.



Σχήμα 3.5: Αμφίδρομη ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης λόγω ΜΔΠ.

3.3.2 Επίδραση Μ/Σ Διασύνδεσης ΜΔΠ στα Σφάλματα Γης

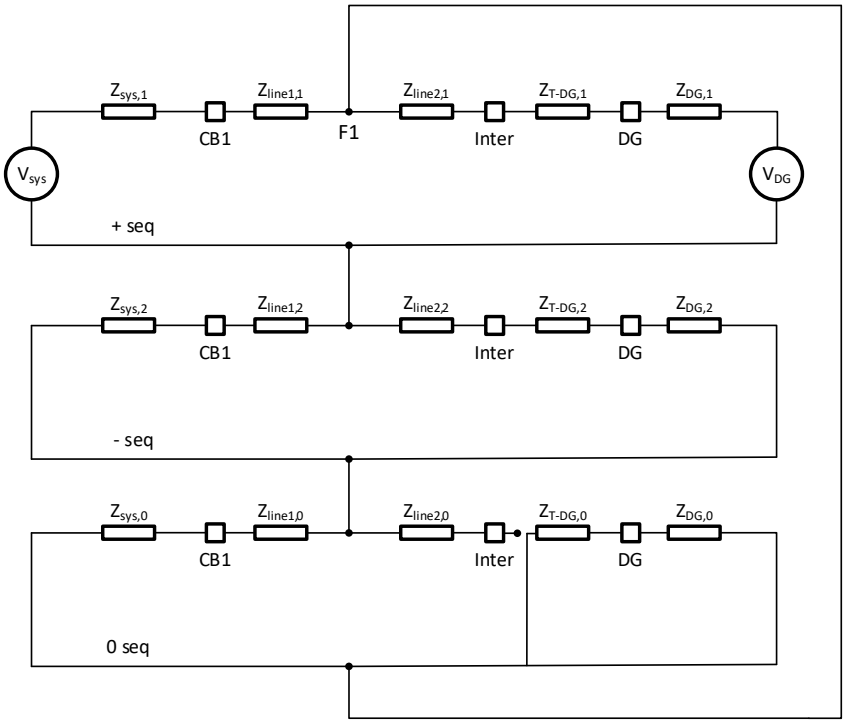
Η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων και η μέθοδος γείωσης των Μ/Σ διασύνδεσης ΜΔΠ επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ασφαλή λειτουργία των δικτύων διανομής. Βάσει των διεθνών προτύπων και της σχετικής βιβλιογραφίας, δεν υπάρχει ομολογουμένως βέλτιστη επιλογή συνδεσμολογίας Μ/Σ. Όλες οι υποψήφιες συνδεσμολογίες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [102], [123]–[125], τα οποία αναλύονται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα το δίκτυο του Σχήματος 3.6. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα σφάλματα γης, διότι οι ΜΔΠ συνεισφέρουν πάντα στα σφάλματα μεταξύ φάσεων, ανεξαρτήτως συνδεσμολογίας των Μ/Σ διασύνδεσης. Σημειώνεται ότι ο ουδέτερος κόμβος του Μ/Σ στον κύριο Υ/Σ είναι γειωμένος κατάλληλα, βάσει της μεθόδου γείωσης που εφαρμόζει η εκάστοτε ηλεκτρική εταιρεία.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα δικτύου διανομής με ΜΔΠ και υποψήφιες θέσεις σφάλματος.

3.3.2.1 Συνδεσμολογίες Dd, Dyn, Yd

Η μοναδική πηγή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας του δικτύου σε αυτήν την περίπτωση είναι ο κύριος Υ/Σ. Επομένως, η σύνδεση ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής δεν επηρεάζει την προστασία υπερέντασης γης των γραμμών. Για παράδειγμα, εάν συμβεί μονοφασικό σφάλμα προς γη στη θέση F1, το ρεύμα γης θα τροφοδοτείται αποκλειστικά από τον ουδέτερο κόμβο του Μ/Σ στον κύριο Υ/Σ και ο Δ/Ι CB1 αναμένεται να εκκαθαρίσει ανεπηρέαστος το σφάλμα. Το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας από τον κύριο Υ/Σ αυξάνεται, όταν η ΜΔΠ είναι εντός λειτουργίας, λόγω της μείωσης των αντιδράσεων Thevenin θετικής και αρνητικής ακολουθίας, όπως φαίνεται στο ακολουθιακό κύκλωμα του Σχήματος 3.7.



Σχήμα 3.7: Ακολουθιακό κύκλωμα για σφάλμα 1pg στη θέση F1 (συνδεσμολογία Dyn).

Παρόλα αυτά, το άνοιγμα του Δ/Ι CB1 θα οδηγήσει σε μεταβατικές υπερτάσεις, διότι το σφάλμα τροφοδοτείται πλέον από αγείωτο δίκτυο. Συγκεκριμένα, προκαλείται απότομη αύξηση της τάσης στις υγιείς φάσεις στο επίπεδο της πολικής τάσης, με αποτέλεσμα την καταπόνηση της μόνωσης του εξοπλισμού ισχύος και τον κορεσμό του πυρήνα των Μ/Σ διανομής. Από την άλλη πλευρά, εάν συμβεί το ίδιο σφάλμα στη θέση F3, ο Η/Ν του Δ/Ι CB1 δεν θα ανιχνεύσει ρεύμα μηδενικής ακολουθίας και τα μέσα προστασίας της ΜΔΠ θα είναι αποκλειστικά υπεύθυνα για την εκκαθάρισή του. Η συνδεσμολογία Dyn επιλέγεται ευρέως στα Ευρωπαϊκά δίκτυα διανομής, συμπεριλαμβανομένου του Ελληνικού, και στη Βόρεια Αμερική, σε περιοχές όπου δεν χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός στο δίκτυο ΜΤ.

Κύρια πλεονεκτήματα της συνδεσμολογίας Dyn είναι τα ακόλουθα:

- Δεν συνεισφέρει ως πηγή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη στο δίκτυο διανομής (θέσεις F1, F2).
- Δεν επιτρέπει τη συνεισφορά του δικτύου σε μονοφασικό σφάλμα προς γη εντός του σταθμού παραγωγής (θέση F3).
- Αμβλύνει τις βυθίσεις τάσης στην πλευρά της ΜΔΠ κατά τη διάρκεια εκδήλωσης μονοφασικού σφάλματος προς γη στο δίκτυο.
- Αποτρέπεται η ροή αρμονικών ρευμάτων $3^{ης}$ τάξης από τη ΜΔΠ προς το δίκτυο διανομής.

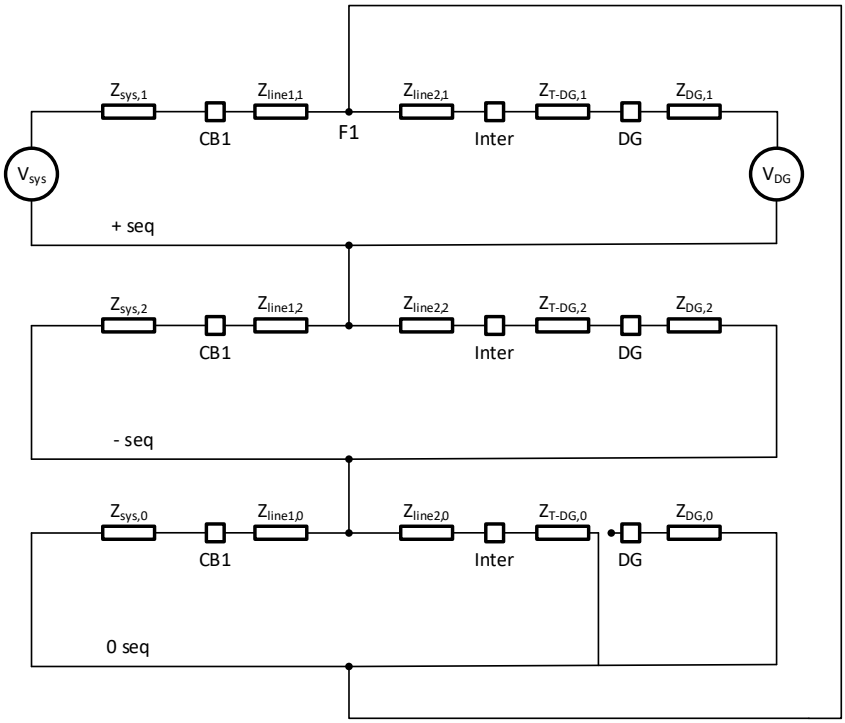
Κύρια μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας Dyn:

- Τα μονοφασικά σφάλματα προς γη στο δίκτυο διανομής ανιχνεύονται δύσκολα.
- Σε περίπτωση λειτουργίας του Δ/Ι της γραμμής κορμού λόγω σφάλματος γης στο δίκτυο, ενδέχεται να αναπτυχθούν επικίνδυνες υπερτάσεις στο αγείωτο τμήμα του νησιδοποιημένου δικτύου.

- Ελλοχεύει ο κίνδυνος σιδηροσυντονισμού, ειδικά σε δίκτυα που χρησιμοποιούν μεγάλα μήκη καλωδίων, σε περίπτωση ανοικτοκυκλώματος. Ως εκ τούτου, προτείνεται η κατάργηση της μονοπολικής διακοπής από Δ/Α, εάν εφαρμόζεται, σε κυκλώματα στα οποία συνδέονται ΜΔΠ,.

3.3.2.2 Συνδεσμολογία YNd

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η χρήση της συγκεκριμένης συνδεσμολογίας, με στερεά γείωση του ουδέτερου κόμβου, προσθέτει επιπλέον πηγή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την επίδοση της προστασίας υπερέντασης γης του δικτύου. Σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη στη θέση F1, το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας διαιρείται πάντα σε δύο συνιστώσες, ανεξάρτητα από την κατάσταση του Δ/Ι DG, όπως φαίνεται στο ακολουθιακό κύκλωμα του Σχήματος 3.8. Επίσης, σε περίπτωση σφάλματος γης στη θέση F2, είναι πιθανόν να προκληθεί ανεπιθύμητη λειτουργία των στοιχείων υπερέντασης γης του Η/Ν που ελέγχει τον Δ/Ι CB1, εξαιτίας της συνεισφοράς του Μ/Σ διασύνδεσης.



Σχήμα 3.8: Ακολουθιακό κύκλωμα για σφάλμα 1pg στη θέση F1 (συνδεσμολογία YNd).

Η συνδεσμολογία YNd με στερεά γείωση αποτελεί τη βασική επιλογή των περισσότερων ηλεκτρικών εταιρειών διεθνώς για τη σύνδεση μεγάλων ΜΔΠ στο σύστημα μεταφοράς. Σπανίως επιλέγεται για τη διασύνδεση ΜΔΠ σε δίκτυο διανομής που εξυπηρετεί καταναλωτές.

Κύρια πλεονεκτήματα της συνδεσμολογίας YNd είναι τα ακόλουθα:

- Τα μονοφασικά σφάλματα προς γη στο δίκτυο διανομής ανιχνεύονται εύκολα και γίνεται γρήγορη αποσύνδεση της ΜΔΠ (θέση F1).
- Σε περίπτωση λειτουργίας του Δ/Ι της γραμμής κορμού λόγω σφάλματος γης στο δίκτυο, το δίκτυο εξακολουθεί να είναι γειωμένο και αποτρέπεται η ανάπτυξη υπερτάσεων (θέση F1).
- Δεν επιτρέπει τη συνεισφορά του δικτύου σε μονοφασικό σφάλμα προς γη εντός του σταθμού παραγωγής (θέση F3).
- Αποτρέπεται η ροή αρμονικών ρευμάτων $3^{ης}$ τάξης από τη ΜΔΠ προς το δίκτυο.

Κύρια μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας YNd:

- Εισάγει επιπλέον πηγή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας, αυξάνοντας το συνολικό ρεύμα σφάλματος γης.
- Ελλοχεύει ο κίνδυνος συμπαθητικής πτώσης του Δ/Ι γραμμής για σφάλμα γης σε γειτονική γραμμή, εξαιτίας της συνολικής συνεισφοράς ρεύματος γης των Μ/Σ διασύνδεσης.

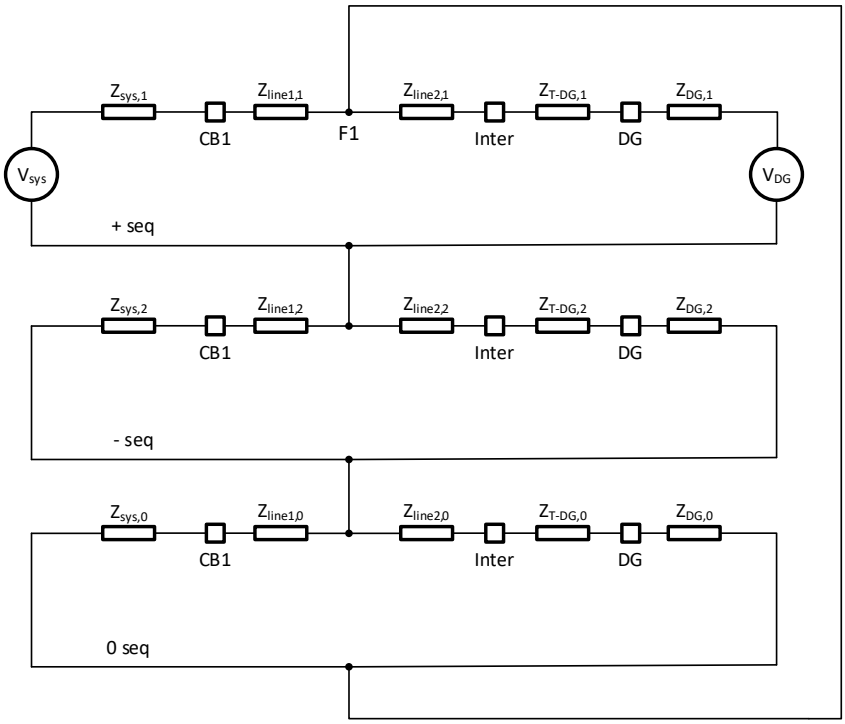
- Ελλοχεύει ο κίνδυνος απώλειας ευαισθησίας ή αργής λειτουργίας του Η/Ν για σφάλμα γης στην επιτηρούμενη γραμμή, εξαιτίας της διαίρεσης του ρεύματος γης μεταξύ του Μ/Σ στον κύριο Υ/Σ και των Μ/Σ διασύνδεσης. Η μείωση της συνεισφοράς του κύριου Υ/Σ γίνεται εντονότερη όταν ο διακόπτης διασύνδεσης είναι κλειστός και η ΜΔΠ είναι εκτός λειτουργίας.
- Καταπονούνται οι Μ/Σ διασύνδεσης σε περίπτωση σφάλματος γης στο δίκτυο.
- Επιτρέπεται η ροή αρμονικών ρευμάτων 3ης τάξης στο πρωτεύον τύλιγμα του Μ/Σ, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του. Το συγκεκριμένο πρόβλημα γίνεται εντονότερο σε Μ/Σ διασύνδεσης μικρής ισχύος, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μικρή τάση βραχυκύκλωσης (τυπική τιμή 4%).

Συνήθης πρακτική σε δίκτυα διανομής της Βορείου Αμερικής είναι η γείωση του ουδέτερου κόμβου μέσω επαγωγικής αντίδρασης, όταν επιλέγεται η συνδεσμολογία YNd για τη διασύνδεση ΜΔΠ [102]. Η παρουσία κατάλληλα διαστασιολογημένης αντίδρασης γείωσης οδηγεί σε μικρότερες υπερτάσεις και μικρότερη μεταβολή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας σε περίπτωση σφάλματος γης στο δίκτυο, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των συνδεσμολογιών Dyn και YNd. Ενδεικτικά, η εταιρεία BC Hydro έχει υιοθετήσει τα εξής κριτήρια επιλογής [102]:

- η υπέρταση που αναπτύσσεται στις υγιείς φάσεις να περιορίζεται στο 122% της ονομαστικής τιμής,
- η μείωση στην ευαισθησία των στοιχείων υπερέντασης γης των γραμμών κορμού να περιορίζεται στο 5%, συγκριτικά με τη λειτουργία χωρίς ΜΔΠ.

3.3.2.3 Συνδεσμολογία YNyn

Η εν λόγω συνδεσμολογία εισάγει επιπλέον πηγή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας μόνο όταν το τύλιγμα στάτη της γεννήτριας έχει συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα. Στην περίπτωση αυτή, ενδέχεται να διαταραχθεί η σωστή λειτουργία του Η/Ν που ελέγχει τον Δ/Ι CB1 σε σφάλμα γης επί του δικτύου (π.χ. θέση F1), ενώ μπορεί να διεγερθεί και να λειτουργήσει σε σφάλμα γης εντός του σταθμού ΔΠ (π.χ. θέση F3). Επομένως, η σωστή ρύθμιση και η επίτευξη επιλογικής συνεργασίας μεταξύ των μέσων προστασίας του δικτύου γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη. Αναλύοντας το ακολουθιακό κύκλωμα του Σχήματος 3.9, γίνεται εμφανές ότι η συνεισφορά των ΜΔΠ σε πιθανή εκδήλωση σφάλματος γης εξαρτάται από τη λειτουργική τους κατάσταση. Ουσιαστικά, συνεισφέρουν μόνο όταν είναι ενεργοποιημένες (Δ/Ι Inter και DG κλειστοί).



Σχήμα 3.9: Ακολουθιακό κύκλωμα για σφάλμα 1pg στη θέση F1 (συνδεσμολογία YNyn).

Η συνδεσμολογία YNyn με στερεά γείωση χρησιμοποιείται συχνά στα δίκτυα διανομής της Βορείου Αμερικής, για τη διασύνδεση ΜΔΠ με μετατροπείς, οι οποίοι εκ φύσεως δεν συνεισφέρουν ρεύματα μηδενικής ακολουθίας.

Κύρια πλεονεκτήματα της συνδεσμολογίας YNyn είναι τα ακόλουθα:

- Αποτελεί οικονομική λύση.
- Αποτρέπει την πρόκληση υπερτάσεων κατά τη διάρκεια σφάλματος γης στο δίκτυο.
- Μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης φαινομένων σιδηροσυντονισμού.

Κύρια μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας YNyn:

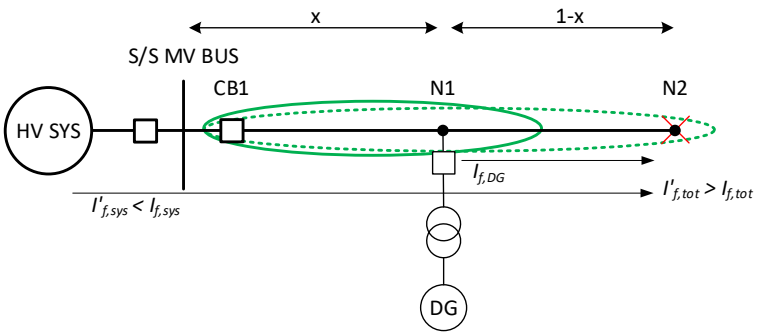
- Επιτρέπει τη ροή αρμονικών ρευμάτων 3ης τάξης από τη ΜΔΠ προς το δίκτυο.
- Επιτρέπει τη συνεισφορά της ΜΔΠ σε κάθε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο.
- Επιτρέπει τη συνεισφορά του δικτύου σε μονοφασικό σφάλμα προς γη εντός του σταθμού.
- Σε περίπτωση πτώσης του Δ/Ι της γραμμής κορμού λόγω σφάλματος γης στο δίκτυο, η γείωση του νησιδοποιημένου τμήματος του δικτύου εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο γείωσης της ΜΔΠ.

3.3.3 Τύφλωση Προστασίας

Παραδοσιακά, τα δίκτυα διανομής είχαν μία πηγή ρεύματος βραχυκύκλωσης, δηλαδή τον κύριο Υ/Σ, και ο Η/Ν προστασίας υπερέντασης στην αναχώρηση κάθε γραμμής ρυθμιζόταν κατάλληλα, έτσι ώστε να διεγείρεται σε περίπτωση ελαχίστου βραχυκυκλώματος στο άκρο της γραμμής. Σήμερα, τα δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή διαθέτουν πολλαπλές πηγές ρεύματος βραχυκύκλωσης, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τα υφιστάμενα μέσα προστασίας. Συγκεκριμένα, εάν συμβεί βραχυκύκλωμα στα κατάντη του δικτύου διανομής ως προς το σημείο σύνδεσης της ΜΔΠ, το συνολικό ρεύμα σφάλματος θα αυξηθεί, ενώ αντίθετα η συνεισφορά του κύριου Υ/Σ θα μειωθεί λόγω της διαίρεσης των εντάσεων μεταξύ Υ/Σ και ΜΔΠ.

Ως εκ τούτου, η προστασία υπερέντασης της γραμμής ενδέχεται να απωλέσει την ευαισθησία της ή να λειτουργήσει με πολύ μεγάλη καθυστέρηση. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο στην περίπτωση ελαχίστου σφάλματος στο άκρο της γραμμής, με ή χωρίς αντίσταση σφάλματος, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή ένταση και χωρίς την παρουσία ΜΔΠ. Το εν λόγω φαινόμενο είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως «τύφλωση» της προστασίας (protection blinding), και αφορά δίκτυα διανομής με ΜΔΠ τύπου 1, 2, 3 ή 5 [126]–[128].

Το συγκεκριμένο πρόβλημα διερευνάται εκτενώς για την περίπτωση των συμμετρικών σφαλμάτων. Ανάλυση του φαινομένου για τους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων δίνεται στην αναφορά [103]. Ιδιαίτερα για τα μονοφασικά σφάλματα προς γη, η κατανομή των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας στο δίκτυο εξαρτάται από τη συνδεσμολογία των Μ/Σ διασύνδεσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ανεξάρτητα από την τεχνολογία των ΜΔΠ. Ποιοτικά, η τύφλωση της προστασίας εξηγείται με τη βοήθεια του Σχήματος 3.10, θεωρώντας ότι σφάλμα εκδηλώνεται στο άκρο της γραμμής (κόμβος Ν2). Η συνεισφορά $I'_{f,sys}$ του κύριου Υ/Σ, όταν η μονάδα DG είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, μειώνεται σε σχέση με την αρχική $I_{f,sys}$, όταν ο κύριος Υ/Σ τροφοδοτούσε αποκλειστικά το σφάλμα, ενώ αντίθετα το συνολικό ρεύμα σφάλματος $I'_{f,tot}$ αυξάνεται, λόγω της επιπρόσθετης συνεισφοράς $I_{f,DG}$. Επιπλέον, η έκταση της ζώνης προστασίας που κάλυπτε ο Η/Ν του Δ/Ι CB1 (διακεκομμένη γραμμή) μειώνεται (συνεχής γραμμή), με αποτέλεσμα να προκύπτουν τυφλά σημεία ως προς την προστασία, μεταξύ του ορίου της νέας ζώνης προστασίας και του άκρου της γραμμής.



Σχήμα 3.10: Τύφλωση προστασίας σε ελάχιστο σφάλμα.

Πιο αναλυτικά, η έκταση του προβλήματος διερευνάται ως προς το μέγεθος της ΜΔΠ, τη στάθμη βραχυκύκλωσης στον ζυγό ΜΤ του κύριου Υ/Σ και το σημείο σφάλματος. Έστω V_f η τάση προ του σφάλματος στον κόμβο N2, Z_{ustr} η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου συστήματος στα ανάντη ως προς τη ΜΔΠ, Z_{dstr} η σύνθετη αντίσταση του δικτύου στα κατάντη ως προς τη ΜΔΠ και Z_{DG} η σύνθετη αντίσταση της ΜΔΠ, συμπεριλαμβανόμενης της αντίδρασης του Μ/Σ διασύνδεσης. Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης πριν και μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ, αντίστοιχα, προκύπτει από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_{f,tot} = \frac{V_f}{Z_{ustr} + Z_{dstr}} = I_{f,sys} \tag{3.1}$$

$$I'_{f,tot} = \frac{V_f}{\frac{Z_{ustr} Z_{DG}}{Z_{ustr} + Z_{DG}} + Z_{dstr}} \tag{3.2}$$

Από τις σχέσεις (3.1) και (3.2), γίνεται σαφές ότι $I'_{f,tot} > I_{f,tot}$, όπως αναμενόταν. Με χρήση των νόμων ρευμάτων και τάσεων Kirchhoff, μπορεί να υπολογιστεί η νέα συνεισφορά του συστήματος $I'_{f,sys}$ ως εξής:

$$I'_{f,sys} = \frac{V_f}{Z_{ustr}\left(\frac{Z_{dstr}}{Z_{DG}} + 1\right) + Z_{dstr}} \tag{3.3}$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (3.1) και (3.3) συμπεραίνεται ότι $I_{f,sys} > I'_{f,sys}$. Οι σύνθετες αντιστάσεις της ΜΔΠ και της γραμμής διανομής μπορούν να εκφραστούν ως ποσοστό της σύνθετης αντίστασης του ισοδύναμου συστήματος πίσω από τον κόμβο N1, δηλαδή $m = Z_{DG}/Z_{ustr}$ και $n = Z_{dstr}/Z_{ustr}$. Επομένως, ο λόγος k_{sys} των συνεισφορών του συστήματος, πριν και μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ, προκύπτει από τις σχέσεις (3.1) και (3.3), ενώ ο λόγος l_{tot} των συνολικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από τις (3.1) και (3.2), αντίστοιχα, ως εξής:

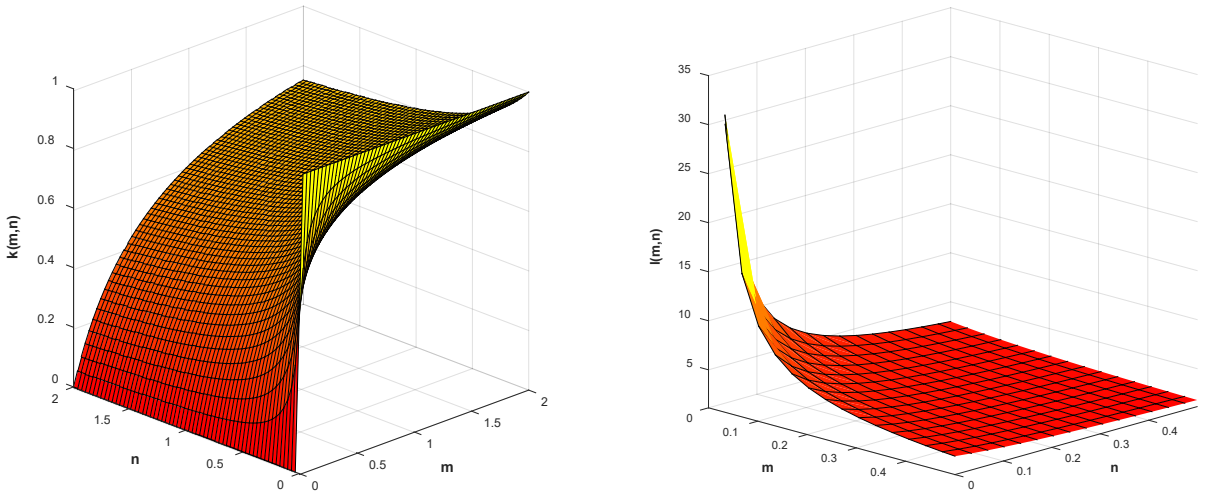
$$k_{sys}(m,n) = \frac{I'_{f,sys}}{I_{f,sys}} = \frac{(m+1)n}{(m+1)n + m} \tag{3.4}$$

$$l_{tot}(m,n) = \frac{I'_{f,tot}}{I_{f,tot}} = \frac{(m+1)(n+1)}{(m+1)n + m} \tag{3.5}$$

Η γραφική παράσταση των λόγων $k_{sys}(m,n)$ και $l_{tot}(m,n)$ φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Για $n = 0$, δηλαδή για σφάλμα στο σημείο σύνδεσης, ο λόγος k_{sys} ισούται με 1, διότι η μονάδα DG δεν επηρεάζει τη συνεισφορά του συστήματος. Θεωρώντας ότι η μεταβλητή n έχει σταθερή τιμή, ο λόγος k_{sys} μειώνεται όσο η τιμή της μεταβλητής m επίσης ελαττώνεται. Ουσιαστικά, όσο μεγαλύτερη είναι η μονάδα DG, ή ισοδύναμα όσο μικρότερη είναι η τιμή της Z_{DG}, τόσο μικρότερη είναι η συνεισφορά του συστήματος. Επιπλέον, εάν υποτεθεί ότι η μεταβλητή m παραμένει σταθερή, επιβεβαιώνεται ότι καθώς η θέση

σφάλματος κινείται προς το άκρο της γραμμής, ή ισοδύναμα καθώς η μεταβλητή n αυξάνεται, η συνεισφορά του συστήματος επίσης μειώνεται.

Όσον αφορά τον λόγο l_{tot}, είναι εμφανές ότι το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται ραγδαία καθώς μειώνεται η τιμή των Z_{DG} και Z_{dstr}. Επιπρόσθετα, εάν $m, n \gg 1$, τότε $l_{tot} \cong 1$, δηλαδή δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στο συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης όταν συνδέεται μικρή ΜΔΠ και το βραχυκύκλωμα εκδηλώνεται σε μεγάλη απόσταση από τον κύριο Υ/Σ (π.χ. στο άκρο της γραμμής).



(α) (β)

Σχήμα 3.11: Γραφική παράσταση των συναρτήσεων (α) $k_{sys}(m,n)$ και (β) $l_{tot}(m,n)$.

Εκτός από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κύριου Υ/Σ και του δικτύου διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή, η μεταβολή της συνεισφοράς του συστήματος στο ρεύμα βραχυκύκλωσης επηρεάζεται σημαντικά και από τη θέση εγκατάστασης της ΜΔΠ κατά μήκος της γραμμής [128], [129]. Έστω Z_{sys} η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου συστήματος στον ζυγό ΜΤ του κύριου Υ/Σ, Z_{line} η σύνθετη αντίσταση της γραμμής διανομής και x η σχετική θέση της ΜΔΠ ως προς το συνολικό μήκος της γραμμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Οι σχέσεις (3.1), (3.3) και (3.4) διαμορφώνονται ως εξής:

$$I_{f,sys} = \frac{V_f}{Z_{sys} + Z_{line}} \tag{3.6}$$

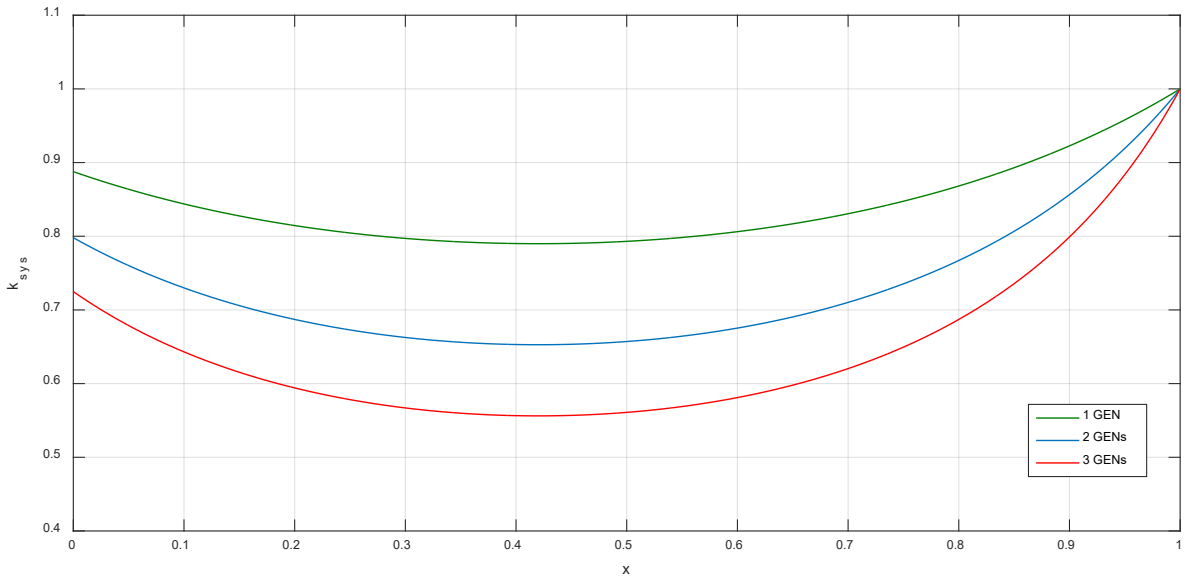
$$I'_{f,sys}(x) = \frac{V_f}{\left(Z_{sys} + xZ_{line}\right)\left[\frac{(1-x)Z_{line}}{Z_{DG}} + 1\right] + (1-x)Z_{line}} \tag{3.7}$$

$$k_{sys}(x) = \frac{I'_{f,sys}(x)}{I_{f,sys}} = \frac{Z_{sys} + Z_{line}}{Z_{sys} + Z_{line} + \frac{(1-x)Z_{line}}{Z_{DG}}\left(Z_{sys} + xZ_{line}\right)} \tag{3.8}$$

Η γραφική παράσταση της $k_{sys}(x)$ φαίνεται στο Σχήμα 3.12, εξετάζοντας σφάλμα στο άκρο της γραμμής με τη ΜΔΠ και τρία διαφορετικά σενάρια διείσδυσης. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η ισχύς της ΜΔΠ, τόσο μειώνεται η συνεισφορά του συστήματος στο σφάλμα, ενώ το σημείο εγκατάστασης που οδηγεί στη μεγαλύτερη μείωση βρίσκεται πλησίον του μέσου της γραμμής. Η συγκεκριμένη γραφική παράσταση αντιστοιχεί σε δίκτυο διανομής με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Στάθμη βραχυκύκλωσης στον ζυγό 20 kV του κύριου Υ/Σ: 250 MVA.
- Μήκος γραμμής διανομής: 25 km.
- Σύνθετη αντίσταση γραμμής: 0,4 Ω/km.
- ΜΔΠ με 3 σύγχρονες γεννήτριες: 3 MVA, 6,6 kV, $X'_d = 20\%$.

- Μ/Σ διασύνδεσης κάθε γεννήτριας: 3.125 MVA, 20/6,6 kV, $U_{sc} = 6\%$.



Σχήμα 3.12: Γραφική παράσταση του λόγου $k_{sys}(x)$ για διαφορετικό βαθμό διείσδυσης της ΜΔΠ.

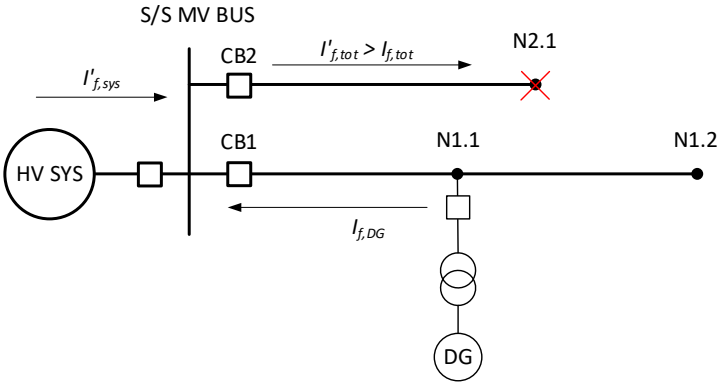
3.3.4 Συμπαθητική Λειτουργία Προστασίας

Συχνό φαινόμενο στα δίκτυα διανομής είναι η «συμπαθητική» λειτουργία (sympathetic tripping) των Η/Ν και κατά συνέπεια η πτώση των αντίστοιχων Δ/Ι, για σφάλματα που συμβαίνουν εκτός της ζώνης επιτήρησής τους, με αποτέλεσμα τη διακοπή της τροφοδοσίας υγιών γραμμών ή διακλαδώσεων [126], [127]. Κύρια αίτια εμφάνισης του συγκεκριμένου φαινομένου στα δίκτυα διανομής είναι:

- Η καθυστερημένη αποκατάσταση της τάσης σε γραμμή που τροφοδοτεί βιομηχανικό φορτίο, έπειτα από σφάλμα σε γειτονικό τμήμα του δικτύου. Η υπερφόρτιση των στρεφόμενων φορτίων, εξαιτίας της παρατεταμένης υπότασης, οδηγεί σε αύξηση του συνολικού ρεύματος γραμμής, διεγείροντας την προστασία υπερέντασης στην αναχώρηση της γραμμής που τα τροφοδοτεί.
- Η εκδήλωση ασύμμετρου σφάλματος σε βιομηχανικό ηλεκτρικό δίκτυο, και κατ' επέκταση η παρουσία ασυμμετρίας στην τάση δικτύου, με ενδεχόμενη ενεργοποίηση στοιχείων προστασίας έναντι ασυμμετρίας σε υγιείς κλάδους που τροφοδοτούν μεγάλους κινητήρες.
- Η εκδήλωση σφάλματος γης σε δίκτυο ΜΤ με Μ/Σ διανομής ή διασύνδεσης ΜΔΠ σε συνδεσμολογία αστέρα γειωμένου στην πλευρά του δικτύου. Εξαιτίας της ύπαρξης πολλαπλών διαδρομών κυκλοφορίας ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας, ενδέχεται να προκληθεί ανεπιθύμητη λειτουργία της προστασίας υπερέντασης γης υγιούς γραμμής.
- Η υπόταση που υφίσταται το δίκτυο κατά τη διάρκεια εκδήλωσης σφάλματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε άσκοπη αποσύνδεση ΜΔΠ.
- Η αντίστροφη συνεισφορά των ΜΔΠ κατά την εκδήλωση σφάλματος σε παρακείμενη γραμμή, μέσω του Δ/Ι της γραμμής στην οποία συνδέονται, η οποία ενδέχεται να προκαλέσει τη διέγερση και τη λειτουργία της προστασίας υπερέντασης στην αναχώρηση της γραμμής.

Στο παρόν εδάφιο αναλύεται η τελευταία εκδοχή του φαινομένου, συναρτήσει της θέσης εγκατάστασης και του μεγέθους της ΜΔΠ. Όπως και στην περίπτωση της τύφλωσης της προστασίας, πρόβλημα συμπαθητικής λειτουργίας της προστασίας γραμμής δεν αναμένεται σε δίκτυα διανομής με αποκλειστική παρουσία ΜΔΠ τύπου 4. Το συγκεκριμένο πρόβλημα διερευνάται εκτενώς για την περίπτωση συμμετρικού σφάλματος. Για μονοφασικό σφάλμα προς γη, η συνεισφορά των ΜΔΠ εξαρτάται από τη συνδεσμολογία του Μ/Σ διασύνδεσής τους και όχι από την τεχνολογία τους. Στην ανάλυση που ακολουθεί έχει θεωρηθεί ότι ο Μ/Σ διασύνδεσης έχει συνδεσμολογία τριγώνου στην πλευρά του δικτύου ΜΤ, συνεπώς δεν διαταράσσεται η ροή των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας.

Το πρόβλημα της ανεπιθύμητης δράσης των μέσων προστασίας γίνεται κατανοητό με τη βοήθεια του Σχήματος 3.13, όπου η μονάδα DG συνεισφέρει κατά την εκδήλωση φασικού σφάλματος γειτονικής γραμμής. Σε περίπτωση που ο σταθμός DG διαθέτει μεγάλες μονάδες και ο Η/Ν του Δ/Ι CB2 είναι ρυθμισμένος με μικρότερη ευαισθησία (π.χ. γραμμή με υψηλότερο φορτίο), ο Η/Ν του Δ/Ι CB1 ενδέχεται να διεγερθεί και να λειτουργήσει πριν προλάβει να επενεργήσει ο Η/Ν του Δ/Ι CB2, παραβιάζοντας την αρχή της επιλογικότητας. Ανεπιθύμητες πτώσεις Δ/Ι συμβαίνουν συχνά στα δίκτυα διανομής με ΜΔΠ, διότι παραδοσιακά οι Η/Ν προστασίας γραμμής δεν χρησιμοποιούσαν στοιχείο κατεύθυνσης, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διακρίνουν τη φορά του ρεύματος σφάλματος.



Σχήμα 3.13: Συνεισφορά ΜΔΠ σε σφάλμα γειτονικής γραμμής και ανεπιθύμητη λειτουργία του Δ/Ι CB1.

Έστω τριφασικό σφάλμα στον κόμβο N2.1 και Z_{line2} η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μέχρι τον συγκεκριμένο κόμβο. Στην αρχική λειτουργική κατάσταση χωρίς ΜΔΠ, το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$I_{f,tot} = \frac{V_f}{Z_{sys} + Z_{line2}} = I_{f,sys} \tag{3.9}$$

ενώ, μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ πλησίον του Υ/Σ ($Z_{line1} \cong 0$), η ένταση του συνολικού ρεύματος σφάλματος αυξάνεται σε:

$$I'_{f,tot} = \frac{V_f}{\dfrac{Z_{sys}(Z_{line1} + Z_{DG})}{Z_{sys} + Z_{line1} + Z_{DG}} + Z_{line2}} \tag{3.10}$$

Οι συνεισφορές από το σύστημα μεταφοράς και τη ΜΔΠ προκύπτουν με χρήση των νόμων ρευμάτων και τάσεων Kirchhoff, ως εξής:

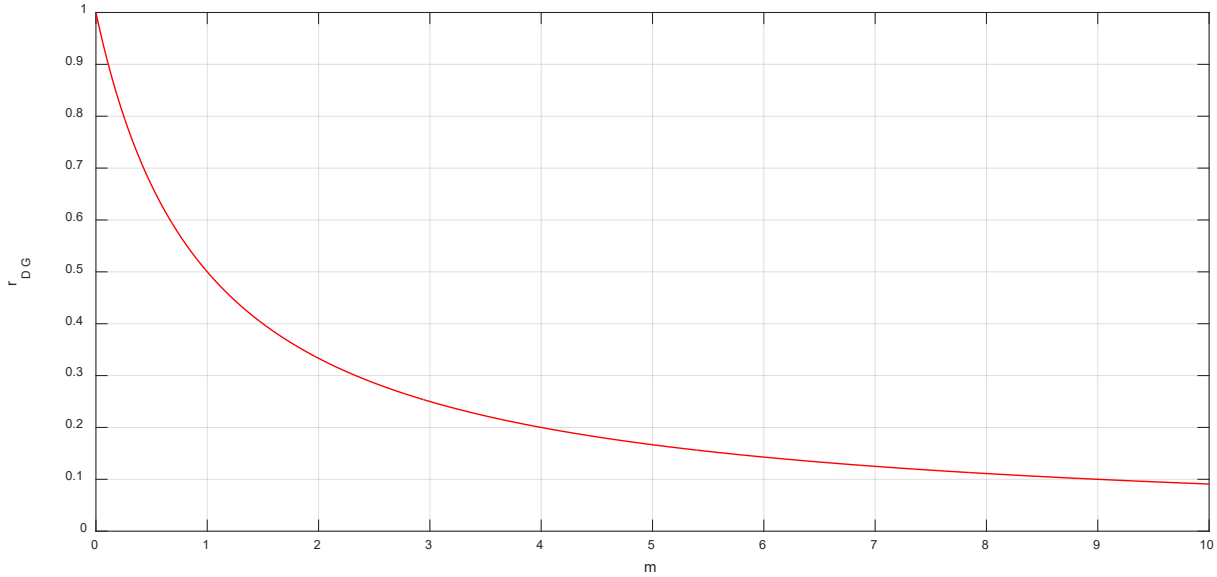
$$I'_{f,sys} = \frac{V_f}{Z_{sys} + Z_{line2}\left(1 + \dfrac{Z_{sys}}{Z_{line1} + Z_{DG}}\right)} \tag{3.11}$$

$$I_{f,DG} = \frac{V_f}{Z_{DG} + Z_{line2}\left(1 + \dfrac{Z_{line1} + Z_{DG}}{Z_{sys}}\right)} \tag{3.12}$$

Από τις σχέσεις (3.11) και (3.12) συμπεραίνεται ότι όσο το σημείο σφάλματος προσεγγίζει τον κύριο Υ/Σ, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η συνεισφορά και από τις δύο πηγές. Επίσης, ο λόγος του ρεύματος συνεισφοράς της ΜΔΠ προς το συνολικό ρεύμα σφάλματος υπολογίζεται με χρήση των σχέσεων (3.10) και (3.12), θεωρώντας ότι $(Z_{DG} + Z_{line1})/Z_{sys} = m$ και $Z_{line2}/Z_{sys} = n$:

$$r_{DG} = \frac{I_{f,DG}}{I'_{f,tot}} = \frac{m + n + mn}{(m+1)m + (m+1)^2 n} = \frac{m + n(m+1)}{(m+1)[m + n(m+1)]} \Rightarrow r_{DG}(m) = \frac{1}{m+1} \tag{3.13}$$

Η γραφική παράσταση της συνάρτησης $r_{DG}(m)$ φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Είναι εμφανές, ότι όσο μικρότερη είναι η σύνθετη αντίσταση του κλάδου της ΜΔΠ, τόσο μεγαλύτερη είναι η σχετική συνεισφορά της ΜΔΠ ως προς το συνολικό ρεύμα σφάλματος. Στην ακραία περίπτωση της νησιδοποιημένης λειτουργίας, $m \to 0$ και $r_{DG} \to 1$. Επίσης, βάσει της σχέσης (3.13), το σημείο σφάλματος δεν επηρεάζει καθόλου τη σχετική συνεισφορά της ΜΔΠ. Συμπερασματικά, η παρουσία μεγάλης ΜΔΠ (Z_{DG} μικρής τιμής) πλησίον του κύριου Υ/Σ (Z_{line1} μικρής τιμής), αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα συμπαθητικής λειτουργίας της προστασίας της γραμμής στην οποία συνδέεται, για σφάλματα γειτονικής γραμμής.



Σχήμα 3.14: Γραφική παράσταση της συνάρτησης $r_{DG}(m)$.

Ως υπολογιστικό παράδειγμα, χρησιμοποιείται το δίκτυο διανομής που διερευνήθηκε στο Εδάφιο 3.3.3, θεωρώντας ότι η ΜΔΠ συνδέεται στο 10% της γραμμής διανομής (2,5 km από τον κύριο Υ/Σ) και ότι λειτουργεί υπό συνθήκες μέγιστης διείσδυσης (σύνολο 9 MVA). Σε αυτήν την περίπτωση, προκύπτει $m = 2{,}88$ και $r_{DG} = 0{,}26$, δηλαδή το 26% του συνολικού ρεύματος προέρχεται από τη ΜΔΠ για σφάλμα σε γειτονική γραμμή. Επομένως, για ρεύμα σφάλματος $I'_{f,tot} = 5\ kA$, η ΜΔΠ συνεισφέρει με ρεύμα υψηλής έντασης $I_{f,DG} = 1{,}3\ kA$, προκαλώντας τη διέγερση και ενδεχομένως τη συμπαθητική λειτουργία της προστασίας γραμμής πριν δράσει η πρωτεύουσα προστασία.

3.3.5 Εκτέλεση Αυτόματης Επαναφοράς σε Νησιδοποιημένο Δίκτυο

Η αυτόματη επαναφορά θεωρείται επιτυχής όταν το νεκρό χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών πτώσεων–επαναφορών είναι αρκετό για να εξαλειφθεί πλήρως το ηλεκτρικό τόξο παροδικού σφάλματος [4]. Η παρουσία, όμως, ΜΔΠ στο νησιδοποιημένο δίκτυο ευνοεί τη διατήρηση του τόξου και το σφάλμα από παροδικό ενδέχεται να εξελιχθεί σε μόνιμο, προκαλώντας ανεπανόρθωτη βλάβη στον εξοπλισμό που πλήττεται. Σε αυτήν την περίπτωση, οι καταναλωτές υφίστανται παρατεταμένη διακοπή της ηλεκτροδότησης και η αξιοπιστία του συστήματος υποβαθμίζεται σημαντικά.

Ως εκ τούτου, απαιτείται έγκαιρη ανίχνευση της νησιδοποίησης του δικτύου και ταχεία αποσύνδεση των ΜΔΠ πριν την εκτέλεση της πρώτης επαναφοράς. Η διάρκεια του πρώτου νεκρού διαστήματος, όταν εφαρμόζεται στιγμιαία επαναφορά, κυμαίνεται μεταξύ 0,2 s και 0,5 s [127], πρακτική που αυξάνει την πιθανότητα αποτυχίας της ΜΔΠ να αποσυνδεθεί έγκαιρα από το δίκτυο. Σε γραμμές διανομής με παρουσία ΜΔΠ τύπου 1, 2, 3 ή 5, προτείνεται η κατάργηση των στιγμιαίων αυτόματων επαναφορών και η χρήση μεγαλύτερου νεκρού διαστήματος για τον πρώτο κύκλο πτώσης–επαναφοράς (της τάξης του 1 s), εξασφαλίζοντας την έγκαιρη αποσύνδεση της ΜΔΠ, με τίμημα την υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος. Αντίθετα, η παρουσία ΜΔΠ τύπου 4 δεν προκαλούν πρόβλημα στην εκτέλεση στιγμιαίων αυτόματων επαναφορών.

Εκτός από τη διατήρηση του ηλεκτρικού τόξου, η παραμονή της ΜΔΠ στο νησιδοποιημένο δίκτυο ενδέχεται να οδηγήσει στην κατάργηση του ισοζυγίου παραγόμενης–καταναλισκόμενης ισχύος, ανάλογα με τη διαθέσιμη ισχύ και το εξυπηρετούμενο φορτίο τη δεδομένη χρονική στιγμή. Σε αυτήν την περίπτωση, η συχνότητα και η τάση του δικτύου μεταβάλλονται σημαντικά, με αποτέλεσμα τυχόν ΜΔΠ με σύγχρονες γεννήτριες να αποσυγχρονίζονται σε σχέση με το κύριο σύστημα. Επομένως, ελλοχεύει ο κίνδυνος καταστροφής του εξοπλισμού ισχύος, εάν ο κύκλος των αυτόματων επαναφορών του Δ/Ι αναχώρησης στον κύριο Υ/Σ, ή του εγκατεστημένου Δ/ΑΕ κατά μήκος της γραμμής, εκτελείται χωρίς έλεγχο, όπως συνέβαινε μέχρι σήμερα στα παθητικά δίκτυα διανομής.

Η σφοδρότητα του συγκεκριμένου προβλήματος εξαρτάται από τη φασική απόκλιση μεταξύ της τάσης του νησιδοποιημένου δικτύου και της τάσης του συστήματος τη στιγμή της επανασύνδεσης (out-of-phase reclosing) [130]. Έστω V_{CB}, V_{sys}, V_{DG} και δ η τάση στους πόλους του Δ/Ι ή του Δ/ΑΕ, η τάση συστήματος, η τάση του νησιδοποιημένου δικτύου και η γωνία μεταξύ V_{sys} και V_{DG}, αντίστοιχα. Τότε, η τάση V_{CB} που αναπτύσσεται στους πόλους του Δ/Ι, ή του Δ/ΑΕ, δίνεται από τη σχέση (3.14):

$$V_{CB} = \sqrt{V_{sys}^2 + V_{DG}^2 - 2V_{sys}V_{DG}cos(\delta)} \tag{3.14}$$

Εάν θεωρηθεί ότι $V_{sys} = -V_{DG} = 1\ \alpha\mu$, η τάση V_{CB} μεγιστοποιείται για $\delta = 180°$ και γίνεται $V_{CB} = 2\ \alpha\mu$. Η επανασύνδεση σε αυτήν την περίπτωση εκτελείται υπό συνθήκες αντίθεσης φάσης και ο Δ/Ι, ή ο Δ/ΑΕ, ενδέχεται να καταστραφεί ολοσχερώς. Στην πράξη, η γωνία δ αναμένεται μικρότερη από 180°. Για παράδειγμα, εάν υποτεθεί ότι η προκληθείσα υποσυχνότητα στο δίκτυο είναι υψηλότερη από το κατώφλι διέγερσης του στοιχείου προστασίας υποσυχνότητας της ΜΔΠ και ίση με 49,5 Hz, ενώ ο χρόνος έως την πρώτη επαναφορά είναι 0,5 s, τότε $\delta = (50 - 49{,}5) \cdot 360° \cdot 0{,}5 = 90°$ και $V_{CB} = \sqrt{2} = 1{,}414\ pu$.

Έστω ακόμη $Z_{sys}, Z_{line}, X_{T,DG}$ και $X''_{d,DG}$ η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου συστήματος, η σύνθετη αντίσταση της γραμμής διανομής όπου συνδέεται η ΜΔΠ, η αντίδραση του Μ/Σ διασύνδεσης της ΜΔΠ και η υπομεταβατική αντίδραση της ΜΔΠ, αντίστοιχα. Το μέγιστο ρεύμα ζεύξης προκύπτει υπό συνθήκες αντίθεσης φάσης και δίνεται από τη σχέση (3.15). Επιπλέον, το ρεύμα τριφασικού σφάλματος στο σημείο επανασύνδεσης με τα δύο συστήματα σε συγχρονισμό και σε κανονική λειτουργία δίνεται από τη σχέση (3.16). Ο λόγος των δύο προηγούμενων εντάσεων υπολογίζεται από την (3.17) για λόγους σύγκρισης:

$$I_{inrush,max} = \frac{2V_{sys}}{Z_{sys} + Z_{line} + X_{T,DG} + X''_{d,DG}} \tag{3.15}$$

$$I_{f,3ph} = \frac{V_{sys}\left(Z_{sys} + Z_{line} + X_{T,DG} + X''_{d,DG}\right)}{Z_{sys}\left(Z_{line} + X_{T,DG} + X''_{d,DG}\right)} \tag{3.16}$$

$$r_{inrush} = \frac{2Z_{sys}\left(Z_{line} + X_{T,DG} + X''_{d,DG}\right)}{\left(Z_{sys} + Z_{line} + X_{T,DG} + X''_{d,DG}\right)^2} \tag{3.17}$$

Ο λόγος r_{inrush} γίνεται μέγιστος και ίσος με 0,5, όταν $Z_{sys} = Z_{line} + X_{T,DG} + X''_{d,DG}$. Η ικανοποίηση της συγκεκριμένης συνθήκης είναι αδύνατη στα δίκτυα διανομής και σχεδόν απίθανη στα συστήματα μεταφοράς σε σημεία διασύνδεσης. Συγκεκριμένα για τα συστήματα μεταφοράς, έχει παρατηρηθεί ότι το ρεύμα που καλείται να διακόψει ο Δ/Ι υπό συνθήκες αποσυγχρονισμού σπάνια υπερβαίνει το 25% το ρεύματος βραχυκύκλωσης στη θέση του διακόπτη [131].

Συνοψίζοντας, το κύριο πρόβλημα που προκύπτει από την παρουσία ΜΔΠ κατά την επανασύνδεση του δικτύου διανομής με το σύστημα μεταφοράς είναι η τάση που αναπτύσσεται στους πόλους των αντίστοιχων Δ/Ι ή Δ/ΑΕ. Το ρεύμα ζεύξης δεν αναμένεται να προκαλέσει πρόβλημα μηχανικής ή θερμικής καταπόνησης στον εξοπλισμό λόγω της χαμηλής έντασής του συγκριτικά με το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Παρόλα αυτά, η μεταβατική ροπή της γεννήτριας υπερβαίνει δύο έως τρεις φορές την αντίστοιχη ροπή κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της, προκαλώντας μηχανική

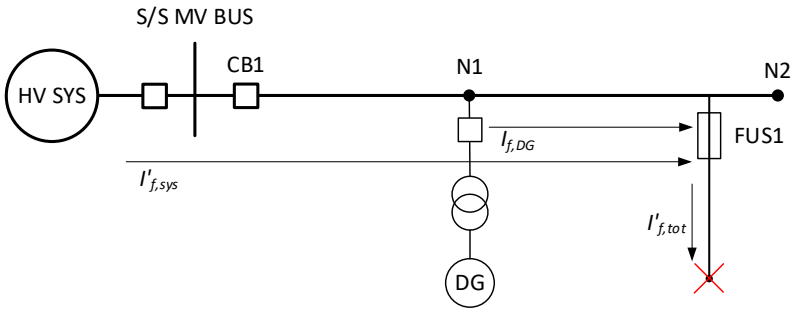
καταπόνηση στην κινητήρια μηχανή και στην ίδια τη γεννήτρια, η οποία μεγιστοποιείται για $\delta = 120°$ [130]. Παρόμοιο πρόβλημα αντιμετωπίζουν και τα στρεφόμενα φορτία του δικτύου.

Για την αποφυγή των προηγούμενων προβλημάτων, οι ηλεκτρικές εταιρείες απαιτούν την ύπαρξη μέσων ανίχνευσης νησιδοποίησης στο σύστημα διασύνδεσης ΜΔΠ με το δίκτυο (π.χ. στοιχεία τάσης 27/59, στοιχεία συχνότητας 81O/81U/81R). Τα μέσα προστασίας αντι-νησιδοποίησης, όπως εναλλακτικά αποκαλούνται στη διεθνή βιβλιογραφία, ελέγχουν τον αυτόματο διακόπτη διασύνδεσης (ΑΔΔ) και ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε να δίνουν εντολή για αποσύνδεση της ΜΔΠ πριν την απόπειρα εκτέλεσης της πρώτης επαναφοράς. Οι βασικές τεχνικές προστασίας αντι-νησιδοποίησης περιγράφονται στην Ενότητα 3.5. Ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογής και ρύθμισης των μέσων ανίχνευσης νησιδοποίησης, από διάφορους διαχειριστές δικτύων διανομής διεθνώς, παρουσιάζονται αναλυτικά στην αναφορά [132].

3.3.6 Τήξη Ασφαλειών σε Παροδικό Σφάλμα

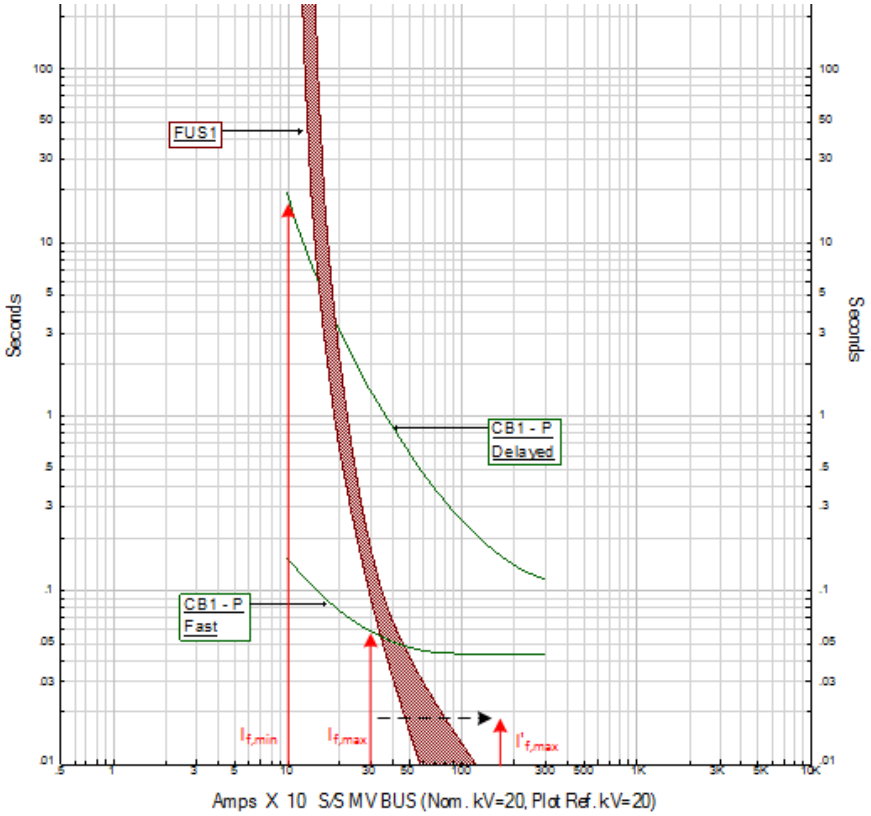
Εκτός από την εκτέλεση αυτόματων επαναφορών υπό συνθήκες αποσυγχρονισμού, η παρουσία ΜΔΠ προκαλεί σημαντικό πρόβλημα και στην επιλογική συνεργασία μεταξύ των ασφαλειών και του υπερκείμενου Δ/ΑΕ ή Δ/Ι που εκτελεί αυτόματες επαναφορές [97], [103], [129]. Παραδοσιακά, στόχος της προστασίας των δικτύων διανομής ήταν η «σωτηρία» των ασφαλειών σε περίπτωση παροδικού σφάλματος επί της διακλάδωσης που προστατεύουν. Επιλογική συνεργασία πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας μπορεί να επιτευχθεί υπό την προϋπόθεση ότι μέσω της ασφάλειας (πρωτεύουσα προστασία) διέρχεται ρεύμα σφάλματος ίδιας έντασης με το μετρούμενο ρεύμα από τον Η/Ν του υπερκείμενου Δ/Ι ή από τον Δ/ΑΕ (δευτερεύουσα προστασία).

Η προηγούμενη προϋπόθεση δεν ισχύει απαραίτητα σε δίκτυα διανομής με ΜΔΠ, όπως φαίνεται και στο δίκτυο του Σχήματος 3.15. Το συνολικό ρεύμα σφάλματος που διέρχεται μέσω της ασφάλειας έχει μεγαλύτερη ένταση από το ρεύμα συνεισφοράς του συστήματος που διέρχεται μέσω του Δ/Ι, λόγω της επιπρόσθετης συνεισφοράς από τη γειτονική ΜΔΠ. Ως εκ τούτου, η αυξημένη θερμική ενέργεια που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της ασφάλειας επιταχύνει την τήξη της, ενώ παράλληλα ο χρόνος εκκαθάρισης παραμένει ίδιος ή αυξάνεται σε περίπτωση μείωσης της συνεισφοράς του συστήματος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα σχετίζεται με όλους τους τύπους ΜΔΠ, λόγω της ταχείας τήξης των ασφαλειών.



Σχήμα 3.15: Συνεισφορά ΜΔΠ σε σφάλμα διακλάδωσης που προστατεύεται από ασφάλεια.

Το εν λόγω πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας των προστασιών αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.16, όπου απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές λειτουργίας του Η/Ν που ελέγχει τον Δ/Ι CB1 και της ασφάλειας, καθώς και η περιοχή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης εντός της οποίας συνεργάζονται ιδανικά. Στην αρχική λειτουργική κατάσταση του δικτύου διανομής χωρίς ΜΔΠ, ο Δ/Ι μπορούσε να εκκαθαρίσει παροδικό σφάλμα έντασης μεταξύ $I_{f,min}$ και $I_{f,max}$, με χρήση του στοιχείου ΣΛ, προτού η ασφάλεια αρχίσει να τήκεται. Όμως, η παρουσία ΜΔΠ στο δίκτυο αυξάνει το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, η ένταση του οποίου τίθεται εκτός του προαναφερθέντος εύρους, προκαλώντας την τήξη της ασφάλειας ακόμη και σε παροδικό σφάλμα.



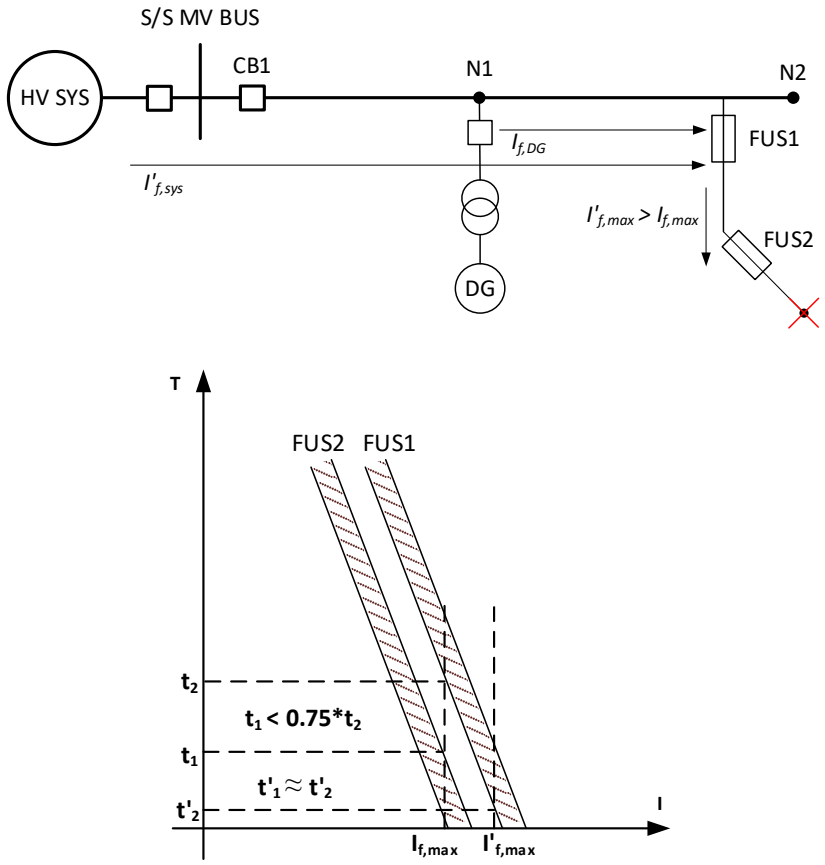
Σχήμα 3.16: Απώλεια επιλογικής συνεργασίας μεταξύ Δ/Ι ή Δ/ΑΕ και ασφάλειας.

Σημειώνεται ότι το προηγούμενο πρόβλημα προκύπτει κυρίως υπό συνθήκες μέγιστου σφάλματος. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος κατά μήκος της διακλάδωσης με αντίσταση σφάλματος, η επιλογική συνεργασία των προστασιών συνήθως δεν διαταράσσεται. Οι ηλεκτρικές εταιρείες διεθνώς απαιτούν ταχεία λειτουργία της προστασίας διασύνδεσης των ΜΔΠ έναντι εξωτερικών σφαλμάτων, με στόχο την αποφυγή της τήξης των ασφαλειών ΜΤ. Ως τυπικός χρόνος τήξης των ασφαλειών θεωρούνται τα 200 ms [133], και βάσει αυτού καθορίζεται ο απαιτούμενος χρόνος αποσύνδεσης των ΜΔΠ για σφάλματα δικτύου.

3.3.7 Απώλεια Επιλογικής Συνεργασίας Ασφαλειών

Όπως συζητήθηκε στο Εδάφιο 3.2.2, η επιλογική συνεργασία μεταξύ ασφαλειών επιτυγχάνεται για ρεύμα σφάλματος εντός συγκεκριμένου εύρους, όταν ο πλήρης χρόνος τήξης της ασφάλειας πρωτεύουσας προστασίας δεν υπερβαίνει το 75% του ελαχίστου χρόνου τήξης της ασφάλειας δευτερεύουσας προστασίας. Η παρουσία, όμως, ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής αυξάνει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Συνεπώς, η ένταση του μέγιστου αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος σε διακλάδωση ενδέχεται να λάβει υψηλότερη τιμή από το όριο επιλογικής συνεργασίας του εξεταζόμενου ζεύγους πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη τήξη των ασφαλειών. Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, το πρόβλημα απώλειας επιλογικής συνεργασίας ασφαλειών σχετίζεται με όλους τους τύπους ΜΔΠ.

Η προηγούμενη περιγραφή αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.17. Όταν το δίκτυο λειτουργεί χωρίς τη μονάδα DG, το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο σημείο εγκατάστασης της ασφάλειας FUS2 έχει ένταση $I_{f,max}$ και η επιλογική συνεργασία με την ασφάλεια FUS1 εξασφαλίζεται για κάθε πιθανό σφάλμα. Αντίθετα, με τη σύνδεση της μονάδας DG, η ένταση του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης για την ασφάλεια FUS2 αυξάνεται σε $I'_{f,max}$. Η ταυτόχρονη τήξη της ασφάλειας FUS1 είναι πλέον πιθανή, με συνέπεια την απώλεια της επιλογικής συνεργασίας των προστασιών στο συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου.



Σχήμα 3.17: Απώλεια επιλογικής συνεργασίας μεταξύ ασφαλειών.

Το πρόβλημα απώλειας επιλογικής συνεργασίας ασφαλειών αναλύεται εκτενώς στην εργασία [134]. Συγκεκριμένα, διερευνάται η μείωση του χρόνου τήξης διαφορετικών τύπων ασφάλειας σε διακλαδώσεις γραμμής 12 kV, συναρτήσει της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στην εξεταζόμενη γραμμή.

3.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Το Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από υψηλή διείσδυση ΜΔΠ διαφορετικών τεχνολογιών, ως αποτέλεσμα του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για την επίτευξη της συμβολής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020, βάσει της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/28/ΕΚ. Το συγκεκριμένο ποσοστό ανήλθε στο 15,23% για το έτος 2016, ενώ εκτιμάται ότι ο στόχος του 20% έως το 2020 είναι εφικτός, σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας [135].

Ως προς την εγκατεστημένη ισχύ των ΑΠΕ, στο σύστημα μεταφοράς 150 kV επικρατεί η παρουσία μεγάλων αιολικών πάρκων και υδροηλεκτρικών σταθμών, ενώ στο δίκτυο διανομής 20 kV και 0,4 kV επικρατούν τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) μεσαίας και μικρής κλίμακας. Επιπλέον, υπάρχουν μΥΗΣ ισχύος μικρότερης των 10 MW διεσπαρμένοι στο δίκτυο διανομής 20 kV, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος άνω των 200 MW [135].

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα του Ελληνικού ΔΔΗΕ με υψηλή διείσδυση Φ/Β και μΥΗΣ αποτελεί το δίκτυο 20 kV που τροφοδοτείται από τον Υ/Σ Σπερχειάδας, το οποίο εξετάσθηκε ως προς την επάρκεια των υφιστάμενων μέσων προστασίας, στο πλαίσιο ερευνητικού έργου μεταξύ της ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. και του ΕΠΙΣΕΥ/ΕΜΠ. Στόχος του συγκεκριμένου έργου ήταν η διερεύνηση των προβλημάτων προστασίας εξαιτίας της έντονης παρουσίας ΑΠΕ, καθώς επίσης και η πρόταση μέτρων για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Τα κύρια αποτελέσματα και τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν περιγράφονται

στα επόμενα εδάφια. Το μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου 20 kV της Σπερχειάδας επισυνάπτεται στο τέλος της διατριβής, όπως ήταν διαμορφωμένο το 2016.

3.4.1 Περιγραφή Δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας

Το δίκτυο διανομής της Σπερχειάδας τροφοδοτείται από τον ομώνυμο Υ/Σ 150 kV, ο οποίος είναι εν σειρά συνδεδεμένος με τη γραμμή μεταφοράς Κρεμαστών (Ρ50)–Λαμίας (Ρ90). Η γραμμή μεταφοράς διακόπτεται και συνδέεται στον Υ/Σ μέσω δύο απλών πυλών χωρίς προστασία. Στον ζυγό 20 kV συνδέονται έξι κύριες γραμμές, μέσω των αντίστοιχων πυλών Ρ210–Ρ260, οι οποίες εξυπηρετούν τους καταναλωτές της περιοχής. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει συγκεντρωτικά το μήκος των γραμμών κορμού, τις διασυνδέσεις με άλλες κύριες γραμμές του ίδιου ή γειτονικού Υ/Σ και το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο ανά γραμμή, συμπεριλαμβανομένων των Μ/Σ διασύνδεσης και εσωτερικής υπηρεσίας των ΜΔΠ.

Πίνακας 3.1: Γραμμές κορμού δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας

ΓΡΑΜΜΗ	ΜΗΚΟΣ (km)	ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ (kVA)
Ρ-21*	9,885	Ρ-23 ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ	200
Ρ-22	17,883	Ρ-25 ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ / Ρ-34, Ρ-38 ΛΑΜΙΑΣ	12290
Ρ-23	5,387	Ρ-21, Ρ-24 ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ / Ρ-34 ΛΑΜΙΑΣ	13290
Ρ-24	28,079	Ρ-23, Ρ-25, Ρ-26 ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ / Ρ-26 ΚΑΡΠΕΝΗΣΙΟΥ	14135
Ρ-25	7,775	Ρ-22, Ρ-24, Ρ-26 ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ	16635
Ρ-26	28,270	Ρ-25, Ρ-24 ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ / Ρ-21 ΚΑΡΠΕΝΗΣΙΟΥ	6750
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ:			63300
* Αποκλειστική γραμμή μΥΗΣ			

Η ιδιαιτερότητα του δικτύου διανομής της Σπερχειάδας έγκειται στη μεγάλη διείσδυση ΜΔΠ, η οποία προκαλεί αντιστροφή της ροής ισχύος και έγχυση ενέργειας στο σύστημα μεταφοράς σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (κυρίως, μεταξύ Ιανουαρίου και Απριλίου). Συγκεκριμένα, 109 Φ/Β και 6 μΥΗΣ συνδέονται στο δίκτυο ΜΤ, μέσω Μ/Σ συνδεσμολογίας Dyn11 (τρίγωνο στην πλευρά του δικτύου). Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά ο αριθμός των ΜΔΠ και η εγκατεστημένη τους ισχύς ανά γραμμή.

Πίνακας 3.2: ΜΔΠ δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας

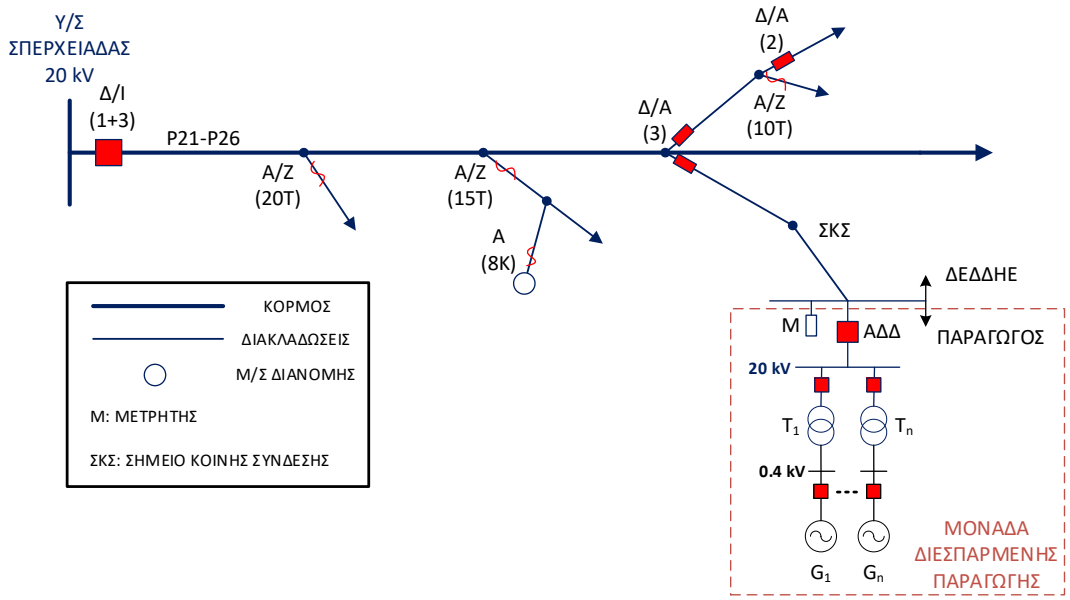
ΓΡΑΜΜΗ	Φ/Β		μΥΗΣ	
	ΠΛΗΘΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ	P_n (kW)	ΠΛΗΘΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ	P_n (kW)
Ρ-21	–	–	1	4500
Ρ-22	20	3300	–	–
Ρ-23	11	940	1	3500
Ρ-24	49	3240	2	2935
Ρ-25	24	6929	–	–
Ρ-26	5	500	2	2100
ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	109	14909	6	13035
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	Πλήθος Σταθμών:	115	Εγκατεστημένα kW:	27944

Το σχήμα προστασίας, τα ονομαστικά μεγέθη των μέσων προστασίας και οι ρυθμίσεις των Η/Ν του δικτύου της Σπερχειάδας έχουν καθοριστεί βάσει της οδηγίας [30]. Η πύλη εισόδου Ρ215 στον ζυγό ΜΤ του Υ/Σ, η πύλη Ρ315 του συγκροτήματος πυκνωτών, καθώς και οι πύλες αναχώρησης των γραμμών διανομής (Ρ210–Ρ260) είναι εφοδιασμένες με Η/Ν προστασίας υπερέντασης. Στους Η/Ν υπερέντασης των γραμμών, είναι επίσης ενεργοποιημένο το στοιχείο αυτόματης επαναφοράς. Ο κύκλος πτώσεων–αυτόματων επαναφορών αποτελείται από μία ακαριαία πτώση, βάσει του στοιχείου υπερέντασης ΣΛ, και τρεις αργές πτώσεις του Δ/Ι, βάσει του στοιχείου ΧΚ, εκτελώντας συνολικά τρεις αυτόματες επαναφορές. Επιπλέον, ο ουδέτερος κόμβος του ΜΣ1 γειώνεται μέσω αντίστασης 12 Ω, για τον περιορισμό του μέγιστου ρεύματος σφάλματος γης στα 1000 Α και την αποφυγή επικίνδυνων υπερτάσεων [79]. Επίσης, χρησιμοποιείται Η/Ν υπερέντασης για την προστασία της αντίστασης γείωσης καθώς και για την ανίχνευση σφαλμάτων διαρροής στο δίκτυο.

Στο δίκτυο της Σπερχειάδας δεν χρησιμοποιούνται Δ/ΑΕ, συνεπώς οι γραμμές κορμού προστατεύονται αποκλειστικά από τους Δ/Ι των αναχωρήσεων στον Υ/Σ. Οι διακλαδώσεις και οι υποδιακλαδώσεις προστατεύονται από Α/Ζ ή Δ/Α. Οι Α/Ζ χρησιμοποιούν ασφάλειες εκτόνωσης με τηκτό βραδείας τήξης (τύπου Τ) και είναι εγκατεστημένοι σε διακλαδώσεις με μέγιστο φορτίο μικρότερο από 25 Α. Σε διακλαδώσεις με μέγιστο αναμενόμενο φορτίο άνω των 25 Α ή με συνδεδεμένη ΜΔΠ, χρησιμοποιείται Δ/Α, ο οποίος συνεργάζεται με τον υπερκείμενο Δ/Ι που εκτελεί αυτόματες επαναφορές. Για την προστασία των Μ/Σ διανομής χρησιμοποιούνται ασφάλειες εκτόνωσης ταχείας τήξης (τύπου Κ), οι οποίες επιλέγονται βάσει της ονομαστικής ισχύος κάθε Μ/Σ.

Οι ΜΔΠ συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσω ΑΔΔ, ο οποίος έχει ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης και ελέγχεται από Η/Ν προστασίας. Ο Η/Ν είναι εφοδιασμένος με στοιχεία προστασίας υπό-/ υπέρτασης, υπό-/ υπερσυχνότητας, μετατόπισης τάσης ουδετέρου και υπερέντασης.

Η προηγούμενη περιγραφή αποτυπώνεται συνολικά στο Σχήμα 3.18, ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά, η φιλοσοφία λειτουργίας και οι ρυθμίσεις των Η/Ν προστασίας του δικτύου παρουσιάζονται αναλυτικά στις αναφορές [136], [137].



Σχήμα 3.18: Σχήμα προστασίας δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας.

3.4.2 Προβλήματα Προστασίας Δικτύου ΜΤ Σπερχειάδας

3.4.2.1 Αύξηση Στάθμης Βραχυκύκλωσης

Ο νέος εξοπλισμός ισχύος προς εγκατάσταση στο Ελληνικό ΔΔΗΕ προδιαγράφεται βάσει των ακόλουθων χαρακτηριστικών τιμών, όσον αφορά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης:

- Στάθμη βραχυκύκλωσης στους ζυγούς 20 kV: 10 kA.
- Πίνακες ΜΤ και περιεχόμενα στοιχεία:

- ✓ Ονομαστική ένταση βραχυκύκλωσης βραχείας διάρκειας (rated short-time withstand current): 14,5 kA rms (3 s) στα 20 kV.
- ✓ Ονομαστική κρουστική ένταση (rated peak withstand current): 36 kA peak.

- Δ/Ι ΜΤ:
  - ✓ Ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης (rated short-circuit breaking current): 14,5 kA rms στα 20 kV.
  - ✓ Ικανότητα ζεύξης σε βραχυκύκλωμα (rated short-circuit making current): 2,5 φορές την ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης στα 20 kV.

Η παρουσία 6 μΥΗΣ και 109 Φ/Β στην περιοχή της Σπερχειάδας έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης στο δίκτυο ΜΤ. Λαμβάνοντας υπόψη το σενάριο μέγιστου βραχυκυκλώματος, υπολογίστηκε το ρεύμα τριφασικού σφάλματος στις αναχωρήσεις των γραμμών κορμού. Η ένταση του μέγιστου αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος στο δίκτυο ΜΤ της Σπερχειάδας εκτιμάται στα 6,6 kA rms (ένταση συμμετρικού ρεύματος κατά την υπομεταβατική περίοδο του σφάλματος). Επομένως, ο υφιστάμενος εξοπλισμός ισχύος του δικτύου κρίνεται επαρκής, εφόσον έχει διαστασιολογηθεί βάσει των παραπάνω προδιαγραφών. Σημειώνεται ότι σε περίπτωση που ο εξοπλισμός ισχύος είχε προδιαγραφεί για στάθμη βραχυκύκλωσης 250 MVA (7,2 kA στα 20 kV), όπως ίσχυε μέχρι πρότινος στο Ελληνικό ΔΔΗΕ, το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης υπερβαίνει οριακά το 90% της προδιαγεγραμμένης τιμής, προκαλώντας πρόβλημα επάρκειας σε ενδεχόμενη μελλοντική σύνδεση νέας ΜΔΠ.

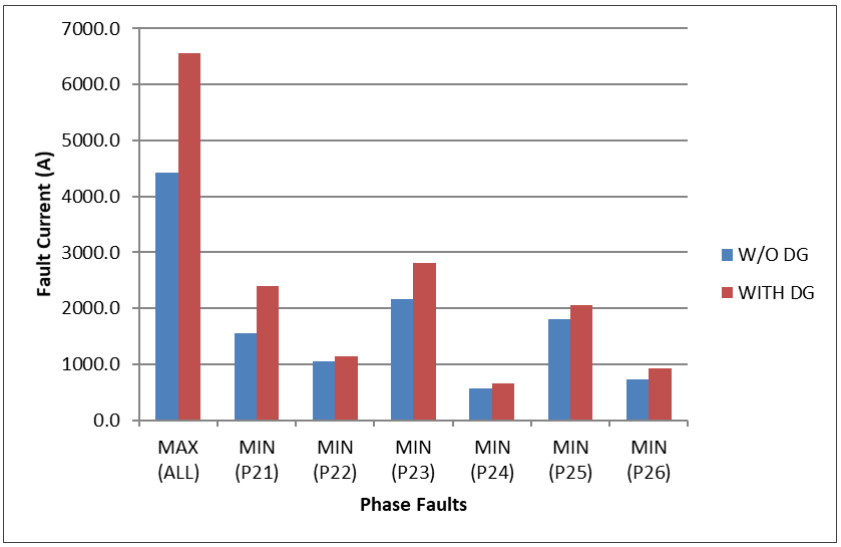
3.4.2.2 Τύφλωση Προστασίας

Στην παρούσα παράγραφο, διερευνάται το ενδεχόμενο μερικής ή ολικής απώλειας της ευαισθησίας των μέσων προστασίας του δικτύου ΜΤ, εξαιτίας της μεγάλης διείσδυσης μΥΗΣ. Τα αποτελέσματα της μελέτης βραχυκυκλωμάτων παρουσιάζονται εκτενώς στην αναφορά [137]. Ο Πίνακας 3.3 παρουσιάζει τη σχετική αύξηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης ως προς τη λειτουργική κατάσταση χωρίς ΑΠΕ. Για τα φασικά σφάλματα (μέγιστα και ελάχιστα), είναι εμφανές ότι το συνολικό ρεύμα σφάλματος και το ρεύμα σφάλματος που μετράει ο Η/Ν κάθε πύλης γραμμής αυξάνονται σημαντικά λόγω των μΥΗΣ (μέγιστη αύξηση: 53,85% και 48,19%, αντίστοιχα), σε αντίθεση με τη συνεισφορά του συστήματος μεταφοράς που μετράει ο Η/Ν της πύλης Ρ215, η οποία μειώνεται (μέγιστη μείωση: 25,05%). Για τα σφάλματα γης, παρουσιάζεται μεταβολή στα ρεύματα φάσης, όμως το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που μετρούν οι Η/Ν πρακτικά δεν μεταβάλλεται, διότι ο γειωμένος ουδέτερος κόμβος του ΜΣ1 στον Υ/Σ Σπερχειάδας παραμένει η μοναδική πηγή ρευμάτων γης στο δίκτυο. Συνεπώς, η απόκριση των στοιχείων υπερέντασης γης δεν επηρεάζεται από την υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Πίνακας 3.3: Σχετική μεταβολή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο δίκτυο ΜΤ Σπερχειάδας

ΣΕΝΑΡΙΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ			**ΓΡΑΜΜΗ / ΜΕΤΑΒΟΛΗ (%)**					
			P-21	P-22	P-23	P-24	P-25	P-26
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΑΣΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ	Ρεύμα μέσω της πύλης P215	max(I_A, I_B, I_C)	-0,33%					
	Ρεύμα μέσω της πύλης γραμμής		30,14%	48,19%	33,99%	39,81%	48,19%	40,23%
	Συνολικό ρεύμα σφάλματος		48,19%					
ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΦΑΣΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ	Ρεύμα μέσω της πύλης P215	max(I_A, I_B, I_C)	-10,22%	-21,79%	-11,26%	-25,05%	-16,78%	-22,34%
		I_2	4,52%	-12,78%	-0,87%	-16,38%	-7,91%	-11,11%
	Ρεύμα μέσω της πύλης γραμμής	max(I_A, I_B, I_C)	13,44%	7,83%	11,64%	-9,03%	13,53%	-1,13%
		I_2	19,72%	8,71%	16,49%	0,71%	14,85%	6,74%
	Συνολικό ρεύμα σφάλματος		53,85%	8,35%	29,39%	13,65%	14,34%	28,46%
ΜΕΓΙΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΓΗΣ	Ρεύμα μέσω της πύλης P215	max(I_A, I_B, I_C)	-23,30%					
		$3I_0$	2,65%					
	Ρεύμα μέσω της πύλης γραμμής	max(I_A, I_B, I_C)	-16,10%	21,56%	11,83%	12,97%	29,15%	4,99%
		$3I_0$	2,65%					
	Συνολικό ρεύμα σφάλματος		2,65%					
ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΓΗΣ	Ρεύμα μέσω της πύλης P215	max(I_A, I_B, I_C)	-27,93%	-26,83%	-27,30%	-27,04%	-26,89%	-27,25%
		$3I_0$	4,56%	1,87%	2,41%	5,12%	1,79%	6,64%
	Ρεύμα μέσω της πύλης γραμμής	max(I_A, I_B, I_C)	-39,93%	1,87%	-19,26%	-20,53%	1,80%	-25,00%
		$3I_0$	4,56%	1,87%	2,41%	5,12%	1,79%	6,64%
	Συνολικό ρεύμα σφάλματος							

Τα συνολικά ρεύματα βραχυκύκλωσης για μέγιστα και ελάχιστα φασικά σφάλματα επί των γραμμών διανομής, με και χωρίς παρουσία των ΑΠΕ, απεικονίζονται στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 3.19.



Σχήμα 3.19: Μεταβολή των συνολικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης για φασικά σφάλματα.

Για να εκτιμηθεί ασφαλώς η έκταση του συγκεκριμένου προβλήματος, καλύπτοντας παράλληλα κάθε πιθανή περίπτωση σφάλματος, υπολογίσθηκε ο χρόνος λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου για ελάχιστο μόνιμο σφάλμα στο άκρο κάθε γραμμής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για φασικά σφάλματα και σφάλματα γης στους Πίνακες 3.4 και 3.5, αντίστοιχα. Οι Η/Ν στις αναχωρήσεις των γραμμών λειτουργούν σε πολύ μικρό χρόνο για ελάχιστο φασικό σφάλμα στο άκρο της γραμμής και δεν επηρεάζονται αρνητικά από την παρουσία των μΥΗΣ. Γενικά, αναμένεται ταχύτατη απόκριση των στοιχείων φάσης, λόγω των μΥΗΣ στις γειτονικές γραμμές, οι οποίοι αυξάνουν το ρεύμα σφάλματος που μετράει ο Η/Ν της πληγείσας γραμμής. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η πρωτεύουσα προστασία των γραμμών δεν αναμένεται να αντιμετωπίσει πρόβλημα τύφλωσης.

Δεν συμβαίνει το ίδιο, όμως, με τον Η/Ν δευτερεύουσας προστασίας της πύλης Ρ215, ο οποίος λειτουργεί ιδανικά για φασικά σφάλματα επί των γραμμών Ρ-21, Ρ-23, Ρ-25, αλλά παραμένει αναίσθητος σε περίπτωση σφάλματος πλησίον του άκρου των γραμμών Ρ-22, Ρ-24, Ρ-26. Όπως φαίνεται καθαρά στον Πίνακα 3.4, το ρεύμα ελαχίστου φασικού σφάλματος που ανιχνεύει ο Η/Ν του Δ/Ι Ρ215 έχει ένταση μικρότερη των 1600 Α (ένταση διέγερσης του στοιχείου 51Ρ), διότι οι μΥΗΣ προκαλούν μείωση της συνεισφοράς από το σύστημα μεταφοράς.

Όσον αφορά την απόκριση των προστασιών σε σφάλματα γης, ο Πίνακας 3.5 περιέχει τους χρόνους λειτουργίας τόσο των στοιχείων γης όσο και των στοιχείων φάσης των Η/Ν, για ελάχιστο μονοφασικό σφάλμα προς γη στο άκρο κάθε γραμμής. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η παρουσία μΥΗΣ δεν προκαλεί πρόβλημα τύφλωσης των προστασιών σε σφάλμα γης. Η πρωτεύουσα προστασία κάθε γραμμής διεγείρεται σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ αντίθετα η δευτερεύουσα προστασία (Η/Ν πύλης Ρ215) δεν διεγείρεται σε καμία περίπτωση. Παρόλα αυτά, το ελάχιστο ρεύμα μηδενικής ακολουθίας ανιχνεύεται από τον Η/Ν υπερέντασης στον κόμβο του ΜΣ1, ο οποίος χρησιμοποιείται για προειδοποίηση (alarm) και όχι για εντολή πτώσης του Δ/Ι Ρ215.

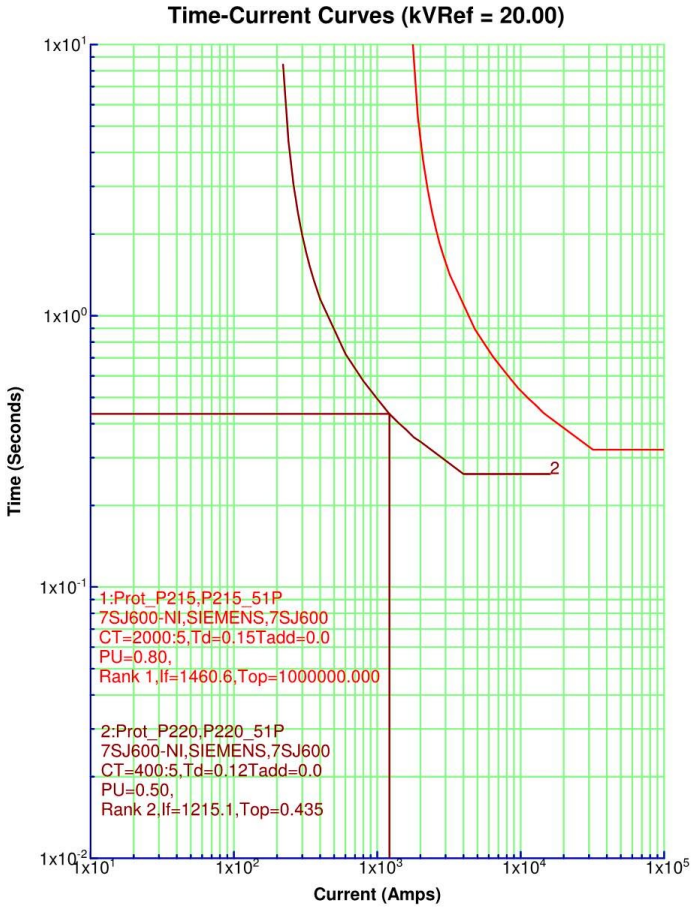
Πίνακας 3.4: Λειτουργία προστασίας γραμμών σε ελάχιστο φασικό σφάλμα

ΓΡΑΜΜΗ	ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ			ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ		
	Δ/Ι (ΣΤΟΙΧΕΙΟ)	max(I_A, I_B, I_C) (prim. A)	ΧΡΟΝΟΣ (s)	Δ/Ι (ΣΤΟΙΧΕΙΟ)	max(I_A, I_B, I_C) (prim. A)	ΧΡΟΝΟΣ (s)
Ρ-21	Ρ210 (51Ρ)	1714,3	0,334	Ρ215 (51Ρ)	2091,8	3,691
Ρ-22	Ρ220 (51Ρ)	1215,1	0,435	Ρ215 (51Ρ)	1460,6	∞
Ρ-23	Ρ230 (51Ρ)	2495,5	0,338	Ρ215 (51Ρ)	2511,8	2,188
Ρ-24	Ρ240 (51Ρ)	672,6	1,076	Ρ215 (51Ρ)	1110,3	∞
Ρ-25	Ρ250 (51Ρ)	2132,4	0,473	Ρ215 (51Ρ)	2094,4	3,676
Ρ-26	Ρ260 (51Ρ)	775,7	0,862	Ρ215 (51Ρ)	1248,3	∞

Πίνακας 3.5: Λειτουργία προστασίας γραμμών σε ελάχιστο σφάλμα γης

ΓΡΑΜΜΗ	ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ			ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ		
	Δ/Ι (ΣΤΟΙΧΕΙΟ)	$3I_0$ max(I_A, I_B, I_C) (prim. A)	ΧΡΟΝΟΣ (s)	Δ/Ι (ΣΤΟΙΧΕΙΟ)	$3I_0$ max(I_A, I_B, I_C) (prim. A)	ΧΡΟΝΟΣ (s)
P-21	P210 (51N)	215,3	4,564	P215 (51N)	215,3	∞
	P210 (51P)	123,9	∞	P215 (51P)	856,2	∞
P-22	P220 (51N)	184,8	6,901	P215 (51N)	184,8	∞
	P220 (51P)	369,8	1,300	P215 (51P)	848,9	∞
P-23	P230 (51N)	212,5	5,093	P215 (51N)	212,5	∞
	P230 (51P)	352,2	2,096	P230 (51P)	861,9	∞
P-24	P240 (51N)	164,0	8,967	P215 (51N)	164,0	∞
	P240 (51P)	291,5	8,978	P215 (51P)	829,4	∞
P-25	P250 (51N)	204,4	5,537	P215 (51N)	204,4	∞
	P250 (51P)	462,7	5,792	P215 (51P)	861,7	∞
P-26	P260 (51N)	179,7	7,336	P215 (51N)	179,7	∞
	P260 (51P)	208,8	∞	P215 (51P)	835,8	∞

Στο Σχήμα 3.20 αποτυπώνεται η επιλογική συνεργασία των στοιχείων υπερέντασης φάσης για τις πύλες P215 και P220, όπου φαίνεται καθαρά το πρόβλημα τύφλωσης που αντιμετωπίζει η προστασία της πύλης P215, στην περίπτωση ελαχίστου φασικού σφάλματος επί της γραμμής P-22.



Σχήμα 3.20: Τύφλωση Η/Ν της πύλης P215 για ελάχιστο σφάλμα 3ph στο άκρο της γραμμής P-22.

3.4.2.3 Συμπαθητική Λειτουργία Προστασίας

Εκτός από τύφλωση του Η/Ν στην πύλη εισόδου Ρ215, προβλήματα συμπαθητικής πτώσης Δ/Ι ενδέχεται να παρουσιαστούν στις γραμμές κορμού όπου συνδέονται οι μΥΗΣ, εξαιτίας της αντίστροφης συνεισφοράς τους σε σφάλμα γειτονικής γραμμής. Όπως έχει ήδη συζητηθεί στο Εδάφιο 3.4.1, κάθε γραμμή κορμού προστατεύεται από Δ/Ι που εκτελεί αυτόματες επαναφορές. Συγκεκριμένα, εκτελείται μία στιγμιαία πτώση με χρήση του στοιχείου υπερέντασης φάσης ή γης σταθερού χρόνου, το οποίο στη συνέχεια δεσμεύεται και αναλαμβάνει δράση το στοιχείο αντιστρόφου χρόνου, εφόσον το σφάλμα παραμένει. Επίσης, υπενθυμίζεται ότι οι Η/Ν που ελέγχουν τους Δ/Ι των γραμμών δεν διαθέτουν στοιχείο κατεύθυνσης, με συνέπεια να διεγείρονται και να δίνουν εντολή πτώσης για σφάλματα εκτός της ζώνης προστασίας τους, εάν η συνεισφορά των μΥΗΣ υπερβεί την ένταση διέγερσης του στοιχείου υπερέντασης.

Για να διερευνηθεί το ενδεχόμενο πρόκλησης ανεπιθύμητων πτώσεων στο δίκτυο της Σπερχειάδας, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μέγιστων φασικών σφαλμάτων και σφαλμάτων γης επί των γραμμών και υπολογίστηκε η συνεισφορά των μΥΗΣ. Οι γραμμές Ρ-22 και Ρ-25, στις οποίες συνδέονται μόνο Φ/Β, δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα. Ο Πίνακας 3.6 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα της διερεύνησης. Είναι σαφές ότι σε περίπτωση μέγιστου φασικού σφάλματος αναμένεται στιγμιαία λειτουργία των στοιχείων 50Ρ στις γραμμές που συνδέονται μΥΗΣ, διότι το μερικό ρεύμα συνεισφοράς υπερβαίνει την ένταση διέγερσής τους, προκαλώντας την ανεπιθύμητη πτώση των αντίστοιχων Δ/Ι. Συνεπώς, οι κύριες γραμμές υφίστανται απροσδόκητη στιγμιαία διακοπή τροφοδοσίας, ενώ οι ΜΔΠ αποσυνδέονται άσκοπα λόγω νησιδοποίησης, υποβαθμίζοντας την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία του δικτύου.

Πίνακας 3.6: Ανεπιθύμητες πτώσεις Δ/Ι

Δ/Ι	ΡΕΥΜΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 50Ρ (prim. A)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΑΣΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ		ΜΕΓΙΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΓΗΣ	
		max(I_A, I_B, I_C) (prim. A)	ΑΝΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΠΤΩΣΗ	max(I_A, I_B, I_C) (prim. A)	ΑΝΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΠΤΩΣΗ
Ρ210	200	799,9	ΝΑΙ	176,1	ΟΧΙ
Ρ230	320	629,7	ΝΑΙ	203,8	ΟΧΙ
Ρ240	320	373,9	ΝΑΙ	159,4	ΟΧΙ
Ρ260	320	352,9	ΝΑΙ	60,0	ΟΧΙ

Σημειώνεται ότι εξετάστηκαν μόνο τα στοιχεία υπερέντασης φάσης, διότι οι μΥΗΣ και τα Φ/Β δεν εισάγουν επιπλέον πηγές ρεύματος μηδενικής ακολουθίας στο δίκτυο και επομένως τα στοιχεία υπερέντασης γης στις αναχωρήσεις δεν διεγείρονται σε σφάλμα γης γειτονικής γραμμής. Όπως συμπεραίνεται και από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.6, δεν προκαλείται ανεπιθύμητη διέγερση και λειτουργία των στοιχείων φάσης στην ακραία περίπτωση του μέγιστου μονοφασικού σφάλματος προς γη γειτονικής γραμμής.

3.4.2.4 Αποτυχία Αυτόματης Επαναφοράς

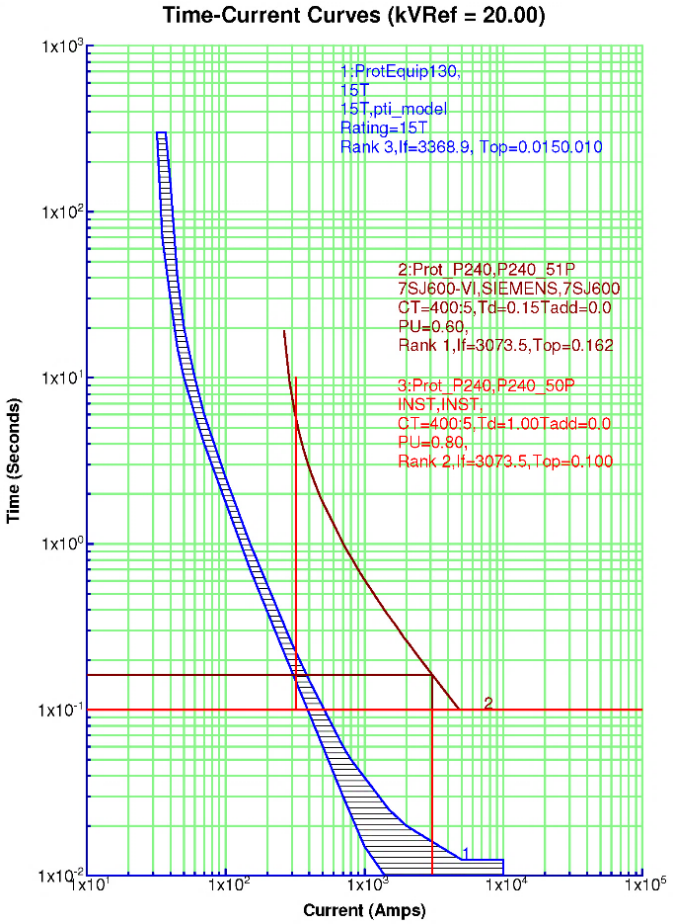
Όπως αναλύθηκε εκτενώς στα Εδάφια 3.3.5 και 3.3.6, ελλοχεύουν οι παρακάτω κίνδυνοι κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κύκλου πτώσεων–αυτόματων επαναφορών των Δ/Ι:

- καθυστερημένη αποσύνδεση των ΜΔΠ, οι οποίες συνδέονται στην πληγείσα γραμμή,
- τήξη ασφαλειών διακλάδωσης σε παροδικό σφάλμα.

Ο πρώτος κίνδυνος μπορεί να αποτραπεί με κατάλληλες ρυθμίσεις τόσο στον Η/Ν του Δ/Ι που εκτελεί τις αυτόματες επαναφορές όσο και στον Η/Ν που ελέγχει τον ΑΔΔ κάθε ΜΔΠ. Στην πράξη αυτό επιτυγχάνεται όταν το πρώτο νεκρό διάστημα (χρόνος μεταξύ 1^{ης} πτώσης και 1^{ης} αυτόματης επαναφοράς) διαρκεί περισσότερο από το άθροισμα του χρόνου λειτουργίας της προστασίας αντι-νησιδοποίησης των ΜΔΠ και του χρόνου ανοίγματος του ΑΔΔ. Συγκεκριμένα στο δίκτυο της Σπερχειάδας, το πρώτο νεκρό διάστημα στους Δ/Ι των πυλών Ρ210–Ρ260 είναι ρυθμισμένο στα 0,5 s, ενώ το στοιχείο υπότασης και τα στοιχεία συχνότητας έχουν ρυθμιστεί με χρονική καθυστέρηση ίση με 0,1 s, ικανοποιώντας την προηγούμενη συνθήκη. Συνεπώς, εάν τα μέσα προστασίας λειτουργήσουν ιδανικά σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο, δεν αναμένεται πρόβλημα ασύγχρονης επαναφοράς.

Όσον αφορά τον δεύτερο κίνδυνο, η παρουσία ΑΠΕ αυξάνει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης στο δίκτυο, σε βαθμό που οι ασφάλειες τήκονται ακόμη και σε παροδικό σφάλμα. Ιδανικά, ο σχετικός Δ/Ι θα λειτουργούσε ακαριαία (πρακτικά, σε 0,1 s) για σφάλμα σε διακλάδωση με στόχο τη «σωτηρία» της ασφάλειας που παρέχει πρωτεύουσα προστασία. Σε μόνιμο σφάλμα, ο Δ/Ι θα χρησιμοποιούσε την καμπύλη ΧΚ μετά την πρώτη επαναφορά, παρέχοντας το απαραίτητο χρονικό περιθώριο στην ασφάλεια να εκκαθαρίσει το σφάλμα και να απομονώσει την ελάχιστη δυνατή περιοχή του δικτύου.

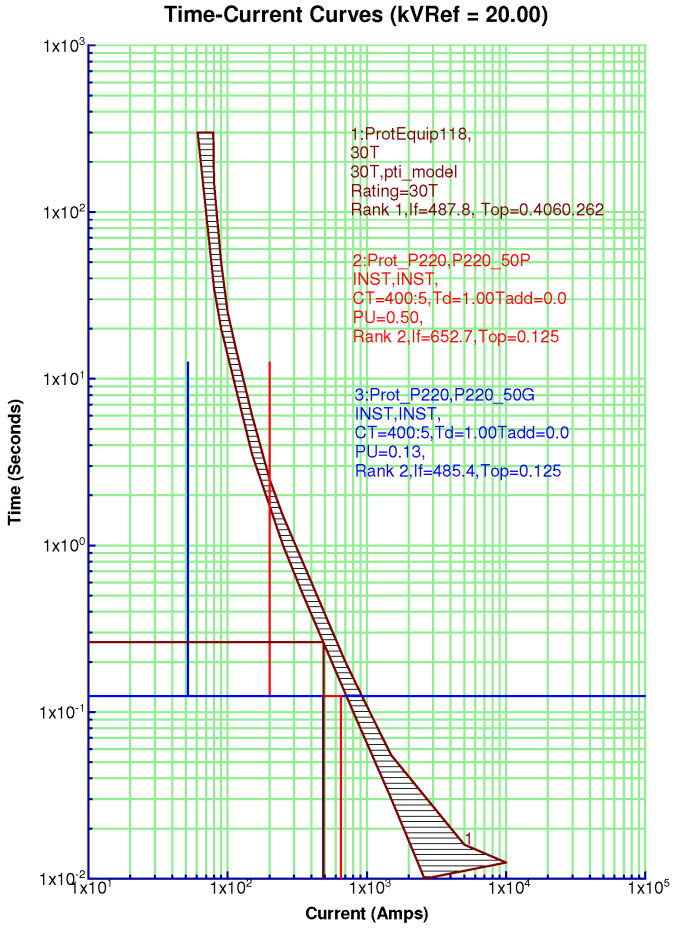
Τα ρεύματα βραχυκύκλωσης στις αρχές των κύριων διακλαδώσεων του δικτύου κυμαίνονται από 1 kA έως 6,5 kA για φασικά σφάλματα, περιοχή στην οποία οι ασφάλειες 10T, 15T, 20T και 30T του δικτύου Σπερχειάδας τήκονται ακαριαία (πλήρης χρόνος διακοπής ≤ 0,1 s). Αυτό σημαίνει ότι η αποφυγή τήξης των ασφαλειών στην αρχή των κύριων διακλαδώσεων είναι ανέφικτη κατά την εκδήλωση φασικού σφάλματος, με συνέπεια τη σημαντική υποβάθμιση της αξιοπιστίας του δικτύου. Ενδεικτικά, εξετάζεται η επιλογική συνεργασία μεταξύ του Η/Ν που ελέγχει τον Δ/Ι P240 και της ασφάλειας τύπου 15T στην αρχή της διακλάδωσης που αναχωρεί από τον στύλο 41 της γραμμής P-24. Στο διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας του Σχήματος 3.21 φαίνεται καθαρά ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν και ο χρόνος τήξης της ασφάλειας για παροδικό τριφασικό σφάλμα στην αρχή της διακλάδωσης. Συγκεκριμένα, η ασφάλεια τήκεται ακαριαία (σε 15 ms), ενώ ο Δ/Ι δεν προλαβαίνει να εκτελέσει την πρώτη πτώση (το στοιχείο ΣΛ επενεργεί σε 0,1 s).



Σχήμα 3.21: Τήξη ασφάλειας 15T για παροδικό σφάλμα 3ph σε διακλάδωση της γραμμής P-24.

Για σφάλμα γης στο άκρο της γραμμής, όπου το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μικρής έντασης, η εκτέλεση αυτόματης επαναφοράς αναμένεται επιτυχής, αποτρέποντας την τήξη της ασφάλειας. Για παράδειγμα, η τήξη των ασφαλειών τύπου 30T μπορεί να αποτραπεί με λειτουργία του στοιχείου ΣΛ του Δ/Ι για ρεύμα σφάλματος μικρότερο των 600 A. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η συνεργασία του Δ/Ι P220 με την ασφάλεια 30T στον στύλο 181 της γραμμής P-22. Το μέγιστο ρεύμα που διέρχεται μέσω της ασφάλειας είναι της τάξης των 490 A σε παροδικό σφάλμα γης, το οποίο προκαλεί την τήξη της ασφάλειας σε 262 ms (πλήρης χρόνος τήξης), ενώ ταυτόχρονα διεγείρονται τα στοιχεία ΣΛ φάσης και γης του Δ/Ι P220. Επομένως, αναμένεται η λειτουργία της προστασίας σε 100 ms, συνυπολογίζοντας και τον

χρόνο πτώσης του Δ/Ι, διασώζοντας με αυτόν τον τρόπο την ασφάλεια. Το διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας της ασφάλειας και των στοιχείων ΣΛ του Δ/Ι P220 αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.22, όπου έχει χρησιμοποιηθεί συντελεστής μετατόπισης ίσος με 1,25, σύμφωνα με την αναφορά [97]. Η τομή των καμπυλών ΣΛ και της ασφάλειας δίνει το μέγιστο ρεύμα σφάλματος για το οποίο επιτυγχάνεται επιλογική συνεργασία, εν προκειμένω τα 700 Α.



Σχήμα 3.22: Σωτηρία ασφάλειας 30T για παροδικό σφάλμα 1pg σε διακλάδωση της γραμμής P-22.

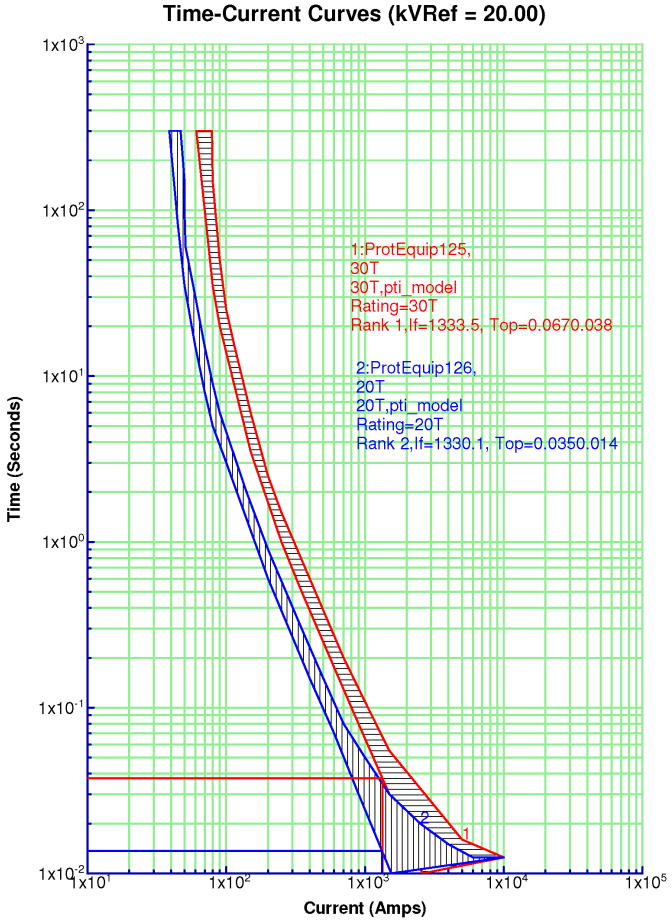
3.4.2.5 Απώλεια Επιλογικής Συνεργασίας Ασφαλειών

Επιπλέον των προαναφερθέντων προβλημάτων, διερευνάται και το ενδεχόμενο απώλειας της επιλογικής συνεργασίας ασφαλειών σε διακλαδώσεις και υποδιακλαδώσεις του δικτύου. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με χρήση των διαγραμμάτων επιλογικής συνεργασίας και μπορεί να πραγματοποιηθεί για όλα τα ζεύγη ασφαλειών του δικτύου, αξιολογώντας έτσι την προστασία του δικτύου συνολικά. Για το δίκτυο ΜΤ της Σπερχειάδας, αναλύεται η παρακάτω αντιπροσωπευτική περίπτωση.

Από τον στύλο 48 της γραμμής P-23 αναχωρεί κύρια διακλάδωση, στην αρχή της οποίας είναι εγκατεστημένη ασφάλεια εκτόνωσης τύπου 30T, ενώ στον στύλο 81 της διακλάδωσης υπάρχει ασφάλεια εκτόνωσης τύπου 20T. Ιδανικά, τα σφάλματα από τον κόμβο 48_81 μέχρι το τέλος της διακλάδωσης θα πρέπει να εκκαθαρίζονται από την ασφάλεια 20T και μόνο σε περίπτωση αστοχίας της θα πρέπει να τήκεται η ασφάλεια 30T, ικανοποιώντας την αρχή της επιλογικότητας. Το εξεταζόμενο ζεύγος ασφαλειών βρίσκεται πλησίον μΥΗΣ, ο οποίος συνδέεται στη διακλάδωση που αναχωρεί από τον στύλο 43 της γραμμής P-23.

Το ρεύμα τριφασικού σφάλματος στον κόμβο 48_123 (εντός της ζώνης προστασίας της ασφάλειας 20T) υπολογίζεται ίσο με 1330,1 Α, προκαλώντας την τήξη της ασφάλειας 20T σε χρόνο τάξης 30 ms, ενώ ταυτόχρονα αρχίζει και η τήξη της ασφάλειας 30T, όπως φαίνεται στο διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας του Σχήματος 3.23. Σύμφωνα με τις αναφορές [79], [97], οι ασφάλειες 20T και 30T συνεργάζονται ιδανικά για ρεύμα βραχυκύκλωσης έντασης έως 990 Α. Επομένως, η αύξηση του ρεύματος

βραχυκύκλωσης στο δίκτυο Σπερχειάδας λόγω των ΑΠΕ ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλεια επιλογικής συνεργασίας του συγκεκριμένου ζεύγος ασφαλειών, όπου εφαρμόζεται.



Σχήμα 3.23: Τήξη ασφαλειών 20Τ και 30Τ για σφάλμα 3ph στον στύλο 48_123 της γραμμής Ρ-23.

3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Όπως αναδείχθηκε στις Ενότητες 3.3 και 3.4, οι παραδοσιακές τεχνικές προστασίας δεν καλύπτουν πλήρως τα σύγχρονα δίκτυα διανομής. Ως πρώτο βήμα, οι ηλεκτρικές εταιρείες επιδιώκουν την αντιμετώπιση των προβλημάτων προστασίας με κατάλληλη αναπροσαρμογή των ρυθμίσεων των Η/Ν, στο βαθμό που είναι εφικτό, λόγω του μηδενικού κόστους και της απλής εφαρμογής της συγκεκριμένης λύσης.

Στόχος της αναθεώρησης των ρυθμίσεων των Η/Ν είναι η αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων τύφλωσης προστασίας, συμπαθητικής πτώσης Δ/Ι και τήξης ασφαλειών σε παροδικά σφάλματα. Οι παρακάτω βασικοί κανόνες μπορούν να υιοθετηθούν για την αναθεώρηση των ρυθμίσεων Η/Ν προστασίας γραμμών με ΜΔΠ:

- Η επιλογική συνεργασία μεταξύ ασφαλειών και Δ/ΑΕ, ή Δ/Ι που εκτελεί αυτόματες επαναφορές, θα πρέπει να επανεξετάζεται σε γραμμές διανομής, στις οποίες η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ υπερβαίνει το 1 MW [97], με στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος τήξης των ασφαλειών σε παροδικό σφάλμα.
- Η ένταση διέγερσης του Η/Ν υπερέντασης στην πύλη αναχώρησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μέγιστου ρεύματος σφάλματος στα ανάντη του δικτύου και μικρότερη του ελαχίστου στα κατάντη, όπου είναι εφαρμόσιμο [103], συνεκτιμώντας πιθανή μελλοντική αύξηση του φορτίου, με στόχο την αποφυγή συμπαθητικής λειτουργίας της προστασίας σε σφάλμα γειτονικής γραμμής.

- Η ένταση διέγερσης του Η/Ν υπερέντασης στην πύλη αναχώρησης, ή του Δ/ΑΕ κατά μήκος της γραμμής διανομής με ΜΔΠ, θα πρέπει να αναπροσαρμόζεται με συντελεστή ανάλογο του ποσοστού μείωσης της συνεισφοράς από το σύστημα μεταφοράς σε βραχυκύκλωμα [138].

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αναθεώρηση των ρυθμίσεων Η/Ν προστασίας δεν οδηγεί στην πλήρη εξάλειψη των προβλημάτων. Νέες τεχνικές προστασίας, οι οποίες τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής διεθνώς σε δίκτυα διανομής με έντονη παρουσία ΑΠΕ, παρουσιάζονται στα εδάφια που ακολουθούν. Αρχικά, περιγράφονται οι απαιτούμενες εργασίες αναβάθμισης των υφιστάμενων διατάξεων προστασίας δικτύων διανομής, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται το γενικό σχήμα προστασίας των ΜΔΠ στο σημείο διασύνδεσής τους με το δίκτυο. Στο τέλος της ενότητας, καταγράφονται τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας για σύγχρονα δίκτυα διανομής.

3.5.1 Εκσυγχρονισμός Προστασίας

Κύριο κριτήριο απόφασης για την αναγκαιότητα αναβάθμισης των υφιστάμενων διατάξεων προστασίας του δικτύου διανομής αποτελεί ο βαθμός διείσδυσης της εγκατεστημένης διεσπαρμένης παραγωγής. Στην εργασία [102], προτείνεται το κριτήριο της διατηρήσιμης νησίδας. Ως πρακτικός κανόνας, θεωρείται ότι η νησιδοποιημένη λειτουργία γραμμής διανομής δεν μπορεί να διατηρηθεί, όταν το φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει υπερβαίνει το διπλάσιο της διαθέσιμης ισχύος από τις συνδεδεμένες ΜΔΠ (κανόνας «2 προς 1»). Η οδηγία [139] συστήνει τον πιο αυστηρό λόγο «3 προς 1», λαμβάνοντας υπόψη πιθανή μελλοντική μείωση του ελαχίστου φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν απαιτείται αναβάθμιση της προστασίας.

Αντίθετα, απαιτείται εκσυγχρονισμός των συστημάτων προστασίας χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές, όταν η διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής είναι ιδιαίτερα υψηλή. Οι βασικές αλλαγές στη φιλοσοφία προστασίας σύγχρονων δικτύων διανομής συνοψίζονται στις επόμενες γραμμές.

i. Η παρουσία ΜΔΠ εισάγει επιπλέον πηγές ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο δίκτυο διανομής, με αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης του δικτύου ΜΤ. Ως εκ τούτου, απαιτείται έλεγχος επάρκειας του εξοπλισμού ισχύος του Υ/Σ. Αντίθετα, δεν υφίσταται πρόβλημα συνεχούς φόρτισης, λόγω της μειωμένης ζήτησης ισχύος από το σύστημα μεταφοράς. Στην πράξη, οι Υ/Σ διαστασιολογούνται για αντοχή σε ρεύμα βραχυκύκλωσης αρκετά υψηλότερο του αναμενόμενου. Εάν, παρόλα αυτά, ο υφιστάμενος εξοπλισμός ισχύος κρίνεται ανεπαρκής, προτείνεται η χρήση ειδικών διατάξεων περιορισμού του ρεύματος σφάλματος (fault current limiters, FCLs) [140]–[142]. Επιπλέον, η χρήση των διατάξεων FCL προσφέρει λύση στο πρόβλημα τήξης των ασφαλειών σε παροδικό σφάλμα, καθώς επίσης και στο πρόβλημα της απώλειας επιλογικής συνεργασίας μεταξύ ασφαλειών.

ii. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των συμπαθητικών πτώσεων Δ/Ι στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής, ή Δ/ΑΕ κατά μήκος των γραμμών, προτείνεται η χρήση Η/Ν που διαθέτουν στοιχεία υπερέντασης με έλεγχο κατεύθυνσης [102], [132]. Οι συγκεκριμένοι Η/Ν δεν λειτουργούν για σφάλματα εκτός της ζώνης προστασίας τους, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ανεπιθύμητες στιγμιαίες ή εκτεταμένες διακοπές τροφοδοσίας των καταναλωτών και να αυξάνεται η αξιοπιστία του δικτύου. Ο αλγόριθμος των εν λόγω στοιχείων προστασίας χρησιμοποιεί το διάνυσμα του φασιθέτη τάσης ως αναφορά και το συγκρίνει με το διάνυσμα του φασιθέτη ρεύματος, διακρίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη φορά του ρεύματος σφάλματος (από ή προς το προστατευόμενο μέρος). Επομένως, η αντικατάσταση των υφιστάμενων απλών Η/Ν υπερέντασης, με σύγχρονους ψηφιακούς Η/Ν που διαθέτουν στοιχεία υπερέντασης–κατεύθυνσης, προϋποθέτει την εγκατάσταση Μ/Τ, οι οποίοι απουσιάζουν από τα συμβατικά δίκτυα διανομής. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία των στοιχείων υπερέντασης–κατεύθυνσης δίνονται στο Κεφάλαιο 5.

iii. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχήμα προστασίας με Η/Ν αποστάσεως (impedance ή distance relaying schemes) [143]–[147]. Η προστασία αποστάσεως χαρακτηρίζεται από την ικανότητά της να διακρίνει τη συνθήκη σφάλματος από τη συνθήκη κανονικής λειτουργίας. Επιπλέον, διακρίνει εγγενώς την κατεύθυνση του ρεύματος σφάλματος και η λειτουργία της δεν επηρεάζεται από το φορτίο της γραμμής. Αντίθετα, η ρύθμιση της έντασης διέγερσης των απλών στοιχείων υπερέντασης περιορίζεται από το μέγιστο ρεύμα γραμμής, με αποτέλεσμα να μειώνεται εκ των πραγμάτων η ευαισθησία της προστασίας σε ελάχιστα σφάλματα φάσεων. Η κατάλληλη ρύθμιση των Η/Ν αποστάσεως και η επίτευξη επιλογικής συνεργασίας βασίζεται σε διαφορετικές αρχές

συγκριτικά με τους Η/Ν υπερέντασης [4], [72]. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, οι Η/Ν αποστάσεως απαιτούν Μ/Τ επιπλέον των Μ/Ε. Η συγκεκριμένη λύση έχει προκριθεί και εφαρμόζεται σε αρκετά Ευρωπαϊκά δίκτυα διανομής, όπως είναι για παράδειγμα αυτά της Αυστρίας, της Γερμανίας και της Νορβηγίας [132].

iv. Η εκτέλεση αυτόματων επαναφορών σε νησιδοποιημένο δίκτυο μπορεί να αποτραπεί με απευθείας μεταβίβαση εντολής πτώσης (direct transfer trip, DTT) από τον Η/Ν στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ προς τον ΑΔΔ της ΜΔΠ [129], [132]. Η λογική του συγκεκριμένου σχήματος βασίζεται στην ανίχνευση της νησιδοποίησης μέσω ελέγχου της κατάστασης του Δ/Ι στην αναχώρηση της γραμμής. Το εν λόγω σχήμα προστασίας απαιτεί την εξασφάλιση φυσικού μέσου και υποδομής δικτύου επικοινωνίας. Επιπλέον, προτείνεται η αναστολή της αυτόματης επαναφοράς σε περίπτωση αποτυχίας της τηλεπικοινωνίας ή αστοχίας του ΑΔΔ της ΜΔΠ να ανοίξει για οποιοδήποτε λόγο, με λογική ελέγχου «νεκρής» γραμμής (dead-line logic) [102]. Η συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί τη χρήση κατάλληλου Η/Ν, ο οποίος υποστηρίζει τη λειτουργία ελέγχου συγχρονισμού (synchro-check), καθώς και την εγκατάσταση Μ/Τ στην πλευρά της γραμμής μετά τον Δ/Ι (load-side VT).

v. Τα προβλήματα τήξης των ασφαλειών σε παροδικό σφάλμα και απώλειας επιλογικής συνεργασίας μεταξύ ασφαλειών μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με τη χρήση σχημάτων τηλεπροστασίας, τα οποία εφαρμόζονται επιτυχώς επί δεκαετίες στις γραμμές μεταφοράς [129]. Τα εν λόγω σχήματα προϋποθέτουν τη χρήση Η/Ν που διακρίνουν την κατεύθυνση του ρεύματος σφάλματος (στοιχείο προστασίας υπερέντασης–κατεύθυνσης ή αποστάσεως). Επιπλέον, προβλήματα ανεπιθύμητης αποσύνδεσης ΜΔΠ σε σφάλματα γειτονικής γραμμής παρατηρούνται συχνά στα δίκτυα διανομής, εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας και της γρήγορης απόκρισης των στοιχείων προστασίας του Η/Ν στο σημείο διασύνδεσης των ΜΔΠ με το δίκτυο. Τα σχήματα τηλεπροστασίας επιτυγχάνουν την ακαριαία αποσύνδεση των ΜΔΠ για σφάλμα στη γραμμή στην οποία συνδέονται, αποτρέποντας παράλληλα την αποσύνδεσή τους σε σφάλμα γειτονικής γραμμής.

vi. Τέλος, η τύφλωση της προστασίας, εξαιτίας των επιμέρους συνεισφορών στο βραχυκύκλωμα από τις ΜΔΠ, μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εφαρμογή προσαρμοστικού συστήματος προστασίας (adaptive protection system), το οποίο τροποποιεί κατάλληλα τις τιμές ρύθμισης των Η/Ν βάσει της τρέχουσας λειτουργικής κατάστασης του δικτύου [148]. Στην πράξη, η προσαρμογή των ρυθμίσεων επιτυγχάνεται με τη χρήση σύγχρονων ψηφιακών ή αριθμητικών Η/Ν, οι οποίοι διαθέτουν πολλαπλές ομάδες ρυθμίσεων (setting groups) και δέχονται ως ψηφιακές εισόδους τις καταστάσεις των διακοπτών του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, επιτηρείται διαρκώς η τοπολογία του δικτύου και ο Η/Ν αποφασίζει εάν απαιτείται αλλαγή ομάδας ρυθμίσεων και ποια ομάδα πρέπει να ενεργοποιηθεί.

Σημειώνεται ότι οι προηγούμενες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν και σε μικροδίκτυα, όταν λειτουργούν διασυνδεδεμένα με το δίκτυο διανομής. Στη νησιδοποιημένη λειτουργία τους, όμως, απαιτούνται λύσεις ικανές να διαχειριστούν τα σφάλματα μικρής έντασης που προκύπτουν, καθώς επίσης και την αλλαγή της μεθόδου γείωσης του δικτύου, λόγω της απώλειας του κύριου Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Η ανάλυση των μεθόδων προστασίας μικροδικτύων δεν εμπίπτει στο αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

3.5.2 Προστασία Διασύνδεσης ΜΔΠ

Εκ των βασικών προϋποθέσεων για την ένταξη διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής είναι η ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων προστασίας στο σημείο διασύνδεσης, όπως προβλέπεται από τον κώδικα λειτουργίας της εκάστοτε ηλεκτρικής εταιρείας. Το πρότυπο [106] προδιαγράφει τις βασικές απαιτήσεις διασύνδεσης και διαλειτουργικότητας των ΜΔΠ με τα ηλεκτρικά δίκτυα, είτε πρόκειται για σύστημα μεταφοράς είτε για δίκτυο διανομής. Η αναφορά [139] παρέχει αναλυτικές οδηγίες εφαρμογής του προτύπου, καλύπτοντας και την προστασία διασύνδεσης. Η προστασία διασύνδεσης (interconnection ή intertie protection) επενεργεί στον ΑΔΔ και δεν πρέπει να συγχέεται με την προστασία των γεννητριών της ΜΔΠ.

Στόχος της προστασίας διασύνδεσης ΜΔΠ είναι [149]:

- η αποσύνδεση της μονάδας σε περίπτωση νησιδοποίησης του δικτύου,
- η προστασία του δικτύου διανομής από τη συμβολή της μονάδας σε σφάλμα δικτύου,
- η προστασία του εξοπλισμού ισχύος της ΜΔΠ από τη συμβολή του δικτύου σε εσωτερικό σφάλμα.

Ακρογωνιαίο λίθο της προστασίας διασύνδεσης αποτελούν τα μέσα ανίχνευσης και προστασίας του δικτύου έναντι νησιδοποίησης (decoupling ή loss-of-mains protection). Η διατήρηση του δικτύου σε νησιδοποιημένη λειτουργία δεν συνιστάται [102], [106], [124], λόγω:

- διακινδύνευσης της ασφάλειας προσωπικού κατά τη διάρκεια εργασιών στο δίκτυο,
- απώλειας ελέγχου της ποιότητας ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές,
- πιθανής εξέλιξης των παροδικών σφαλμάτων σε μόνιμα, εξαιτίας της διατήρησης του ηλεκτρικού τόξου, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καταπόνηση του πληγέντος εξοπλισμού,
- υπερβολικής καταπόνησης και ενδεχόμενης καταστροφής εξοπλισμού κατά την αυτόματη επαναφορά χωρίς συγχρονισμό,
- πιθανής εκδήλωσης φαινομένων συντονισμού σειράς ή σιδηροσυντονισμού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη επικίνδυνων υπερτάσεων στο δίκτυο.

Στην αναφορά [150], οι μέθοδοι αντι-νησιδοποίησης κατηγοριοποιούνται σε τοπικές και απομακρυσμένες. Οι τοπικές μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε παθητικές και ενεργητικές. Οι παθητικές μέθοδοι βασίζονται στη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος στο σημείο διασύνδεσης των ΜΔΠ. Οι ενεργητικές μέθοδοι είναι πιο πολύπλοκες και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην επιβολή μικρής διαταραχής στο δίκτυο (π.χ. έγχυση ρεύματος μη χαρακτηριστικής αρμονικής τάξης), η οποία προκαλεί μεταβολή των ηλεκτρικών μεγεθών του (π.χ. της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης). Η διάκριση της νησιδοποιημένης από τη διασυνδεδεμένη λειτουργία επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση της εν λόγω μεταβολής, η οποία είναι σημαντική σε περίπτωση νησιδοποίησης, ενώ είναι αμελητέα στη διασυνδεδεμένη λειτουργία. Τέλος, οι απομακρυσμένες μέθοδοι βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων ελέγχου και προστασίας της ΜΔΠ και του κύριου Υ/Σ, ενώ η ανίχνευση της νησιδοποίησης επιτελείται με έλεγχο κατάστασης διακοπτών. Η προηγούμενη ταξινόμηση χρησιμοποιείται διεθνώς τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στον βιομηχανικό τομέα. Επιπλέον, έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία υβριδικές μέθοδοι, οι οποίες συνδυάζουν διαφορετικές τεχνικές αντι-νησιδοποίησης, όπως περιγράφεται στην εργασία [151].

Στην πράξη, έχει επικρατήσει η χρήση παθητικών μεθόδων αντι-νησιδοποίησης, λόγω του χαμηλού κόστους, της απλής εφαρμογής και της ανεξαρτησίας τους από την τεχνολογία της ΜΔΠ. Το πιο διαδεδομένο σχήμα αντι-νησιδοποίησης χρησιμοποιεί στοιχεία προστασίας υπερ-/υποσυχνότητας (81U/O) και υπο-/υπέρτασης (27/59), τα οποία ενσωματώνονται στον Η/Ν προστασίας που επενεργεί στον ΑΔΔ. Η λειτουργία των στοιχείων τάσης βασίζεται στην απόκλιση μεταξύ της ζητούμενης από τα τοπικά φορτία και της παραγόμενης από τη ΜΔΠ αέργου ισχύος, ενώ τα στοιχεία συχνότητας λειτουργούν όταν υπάρχει απόκλιση μεταξύ καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενεργού ισχύος μεγαλύτερη ενός προκαθορισμένου ορίου. Σε πολλές περιπτώσεις διεθνώς, όπως για παράδειγμα στα δίκτυα διανομής της Μεγάλης Βρετανίας, της Αυστραλίας, της Νότιας Αφρικής και άλλων κρατών [132], χρησιμοποιούνται στοιχεία μετατόπισης διανύσματος τάσης (voltage vector shift, VVS) και ρυθμού μεταβολής συχνότητας (rate of change of frequency, RoCoF), ως εναλλακτικές ή συμπληρωματικές παθητικές μέθοδοι.

Σε περίπτωση που η ΜΔΠ τροφοδοτεί το δίκτυο πριν τη νησιδοποίηση με ισχύ που αποκλίνει ελάχιστα ή καθόλου από τη ζήτηση των φορτίων της γραμμής δημιουργείται νεκρή ζώνη (non-detection zone, NDZ), εντός της οποίας τα παθητικά στοιχεία αντι-νησιδοποίησης ενδέχεται να αποτύχουν [150]. Αντίθετα, υπάρχει κίνδυνος διέγερσης των εν λόγω στοιχείων και ανεπιθύμητης λειτουργίας τους, εάν δεν ρυθμιστούν κατάλληλα, κατά τη διάρκεια διαταραχών, παροδικών φαινομένων ή σφαλμάτων, η εκκαθάριση των οποίων είναι ευθύνη άλλων μέσων προστασίας [152], [153]. Επιπλέον, τα όρια αδιάλειπτης λειτουργίας σε βύθιση τάσης των ΜΔΠ πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη ρύθμιση των παθητικών στοιχείων αντι-νησιδοποίησης, όταν η συγκεκριμένη λειτουργία απαιτείται από τον κώδικα λειτουργίας του δικτύου διανομής και εφαρμόζεται στις ΜΔΠ.

Οι απομακρυσμένες μέθοδοι αντι-νησιδοποίησης χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις, είτε αποκλειστικά είτε συνδυαστικά με τα παθητικά μέσα, όταν υπάρχει κίνδυνος διατήρησης του ισοζυγίου παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος κατά τη νησιδοποίηση, που θα οδηγούσε σε πιθανή αποτυχία των παθητικών μεθόδων. Παράδειγμα απομακρυσμένης τεχνικής αποτελεί το σχήμα απευθείας μεταβίβασης εντολής πτώσης (DTT). Οι ενεργητικές μέθοδοι αφορούν κυρίως τις ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος, η λειτουργία των οποίων δεν επηρεάζεται από την κατάσταση του ισοζυγίου ισχύος κατά τη νησιδοποίηση. Η εφαρμογή ενεργητικών μεθόδων δεν συνηθίζεται στην πράξη,

εξαιτίας του επιπρόσθετου κόστους που εισάγουν και της υποβάθμισης που προκαλούν στην ποιότητα ισχύος με την εγχεόμενη παραμόρφωση, ειδικά στην περίπτωση υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ ίδιας τεχνολογίας.

Εκ των βασικών απαιτήσεων προστασίας στο σημείο διασύνδεσης των ΜΔΠ, αποτελούν εκτός από τα στοιχεία αντι-νησιδοποίησης και τα στοιχεία προστασίας έναντι σφαλμάτων δικτύου και έναντι εσωτερικών σφαλμάτων στις εγκαταστάσεις του παραγωγού. Το είδος της προστασίας που εφαρμόζεται για ανίχνευση σφαλμάτων δικτύου εξαρτάται από τη συνδεσμολογία και τον τρόπο γείωσης του Μ/Σ διασύνδεσης. Όταν ο Μ/Σ είναι αγείωτος στην πλευρά του δικτύου, όπως συμβαίνει στο Ελληνικό ΔΔΗΕ, επικρατεί η χρήση προστασίας μετατόπισης τάσης ουδετέρου (59N), η οποία αποτελεί αξιόπιστη λύση για την ανίχνευση σφαλμάτων γης τροφοδοτούμενων από αγείωτη πηγή. Στην περίπτωση γειωμένου Μ/Σ στην πλευρά του δικτύου, χρησιμοποιείται στοιχείο υπερέντασης γης, με μέτρηση του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας στον γειωμένο ουδέτερο κόμβο του Μ/Σ. Η προστασία έναντι εσωτερικών φασικών σφαλμάτων ή σφαλμάτων γης επιτυγχάνεται με τη χρήση απλού στοιχείου υπερέντασης. Επιπλέον στοιχεία προστασίας ενδέχεται να απαιτηθούν στο σημείο διασύνδεσης από τον διαχειριστή, βάσει του κώδικα λειτουργίας του. Τυπικά σχηματικά διαγράμματα προστασίας, ανάλογα με τον τύπο των γεννητριών και τη συνδεσμολογία του Μ/Σ διασύνδεσης της ΜΔΠ δίνονται στην αναφορά [139].

3.5.3 Χαρακτηριστικά Ολοκληρωμένης Λύσης Προστασίας

Η δομή και ο τρόπος λειτουργίας ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας, το οποίο συνδυάζει τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα εδάφια και εξασφαλίζει την πλήρη προστασία των δικτύων διανομής με υψηλή διείσδυση ΜΔΠ, περιγράφονται εκτενώς στην αναφορά [132]. Οι Η/Ν ενός σύγχρονου συστήματος προστασίας δικτύων διανομής χαρακτηρίζονται από ικανότητα τηλεπικοινωνίας με άλλες έξυπνες συσκευές του συστήματος, καθώς επίσης και από ικανότητα προσαρμογής των ρυθμίσεών τους σε πραγματικό χρόνο. Τα προσαρμοστικά συστήματα προστασίας αναλύονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 4.

Εν κατακλείδι, προτείνονται οι εξής δυνατότητες κατ' ελάχιστο, όσον αφορά το σύστημα προστασίας, σε δίκτυο διανομής με έντονη παρουσία ΜΔΠ:

- προστασία υπερέντασης–κατεύθυνσης στον Δ/Ι κύριας γραμμής με ΜΔΠ. Το συγκεκριμένο στοιχείο αποτρέπει τυχόν πτώση του Δ/Ι για σφάλμα που εκδηλώνεται εκτός της ζώνης προστασίας του,
- τηλεπροστασία για την έγκαιρη αποσύνδεση των ΜΔΠ σε περίπτωση σφάλματος επί της γραμμής, στην οποία συνδέονται (κύρια προστασία αντι-νησιδοποίησης),
- ανίχνευση νησιδοποίησης τοπικά στον ΑΔΔ κάθε ΜΔΠ, για την περίπτωση αστοχίας του σχήματος τηλεπροστασίας (επικουρική προστασία αντι-νησιδοποίησης),
- προστασία έναντι εσωτερικών σφαλμάτων στον ΑΔΔ κάθε ΜΔΠ,
- προστασία έναντι σφαλμάτων δικτύου στον ΑΔΔ κάθε ΜΔΠ,
- ελεγχόμενη εκτέλεση αυτόματων επαναφορών από Δ/Ι ή Δ/ΑΕ, με κριτήριο νεκρής γραμμής ή ανοικτού ΑΔΔ,
- χρήση πολλαπλών ομάδων ρυθμίσεων στους Η/Ν προστασίας των γραμμών διανομής και αυτόματη προσαρμογή τους, για την κάλυψη του δικτύου υπό όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας.

Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των προηγούμενων μέτρων προστασίας, είτε μερικώς είτε στο σύνολό τους, απαιτεί σημαντική οικονομική επένδυση. Επομένως, η αναβάθμιση και ο εκσυγχρονισμός της προστασίας θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά για κάθε δίκτυο διανομής, βάσει των ιδιαιτεροτήτων και των αναγκών του.

4. ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η προσαρμογή της λειτουργίας των Η/Ν προστασίας βάσει της κατάστασης του επιτηρούμενου μεγέθους, αποτελεί εγγενή ιδιότητά τους ανεξαρτήτως τεχνολογίας. Για παράδειγμα, η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου σε ηλεκτρομηχανικό Η/Ν υπερέντασης, και κατά συνέπεια ο χρόνος λειτουργίας του, προσαρμόζεται ανάλογα με την ένταση του μετρούμενου ρεύματος σφάλματος. Τυχόν αύξηση του ρεύματος κατά την εξέλιξη του σφάλματος προκαλεί επιτάχυνση της περιστροφής του δίσκου, ενώ αντίθετα μείωση του ρεύματος λόγω αντίστασης σφάλματος οδηγεί σε επιβράδυνση της περιστροφής του. Η προσαρμοστική λειτουργία των Η/Ν αποτελεί μόνιμο χαρακτηριστικό τους, εξαρτάται από τον σχεδιασμό, την κατασκευή και το είδος της προστασίας που παρέχουν, ενώ επηρεάζεται μόνο από την κατάσταση του επιτηρούμενου μεγέθους και όχι από τη λειτουργική κατάσταση του ΣΗΕ.

Από την άλλη πλευρά, η προσαρμοστική προστασία, η οποία παρακολουθεί την τοπολογία και τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και σε ενδεχόμενη αλλαγή τους μεταβάλλει κατάλληλα την απόκρισή της, είναι πιο σύγχρονη έννοια. Εισήχθη για πρώτη φορά το 1987 από δύο διαφορετικές ερευνητικές ομάδες την ίδια χρονική περίοδο, οι εργασίες των οποίων δημοσιεύθηκαν στο ίδιο τεύχος επιστημονικού περιοδικού τον Οκτώβριο του 1988 [19], [20]. Στην εργασία [19], ως προσαρμοστική προστασία ορίζεται η φιλοσοφία προστασίας, η οποία επιτρέπει και εξετάζει τη μεταβολή των παραμέτρων των διαφόρων συνιστωσών της, έτσι ώστε να εναρμονίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό με τις τρέχουσες συνθήκες λειτουργίας του ΣΗΕ. Στην εργασία [20], γίνεται διαχωρισμός των εννοιών προσαρμοστικής προστασίας (adaptive protection) και προσαρμοστικού Η/Ν (adaptive relaying). Η μεν προσαρμοστική προστασία αναφέρεται σε επίπεδο συστήματος, ο δε προσαρμοστικός Η/Ν σε επίπεδο συσκευής και εσωτερικών αλγορίθμων. Η σύλληψη της ιδέας για σχήματα προσαρμοστικής προστασίας συμπίπτει χρονικά με την ανάπτυξη των πρώτων ψηφιακών Η/Ν 3ης γενιάς. Η σύμπτωση αυτή δεν ήταν τυχαία, διότι οι δυνατότητες των Η/Ν ψηφιακής τεχνολογίας κάλυψαν τις βασικές απαιτήσεις των σχημάτων προσαρμοστικής προστασίας, οι οποίες δεν ήταν δυνατό να ικανοποιηθούν από τους Η/Ν παλαιότερης τεχνολογίας.

Ο προσδιορισμός κατάλληλων ρυθμίσεων για τα στοιχεία προστασίας που χρησιμοποιούν οι εγκατεστημένοι Η/Ν ενός ΣΗΕ είναι απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία. Ο υψηλός βαθμός δυσκολίας της έγκειται στο γεγονός ότι η πρόβλεψη όλων των πιθανών σεναρίων κανονικής λειτουργίας, καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, ενδεχόμενων διαταραχών και συνθηκών σφάλματος είναι πρακτικά αδύνατη, με αποτέλεσμα οι τιμές ρύθμισης των Η/Ν να επιλέγονται τελικά βάσει αναγκαίων συμβιβασμών, καλύπτοντας μερικώς το προστατευόμενο σύστημα. Η πρόκληση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων προστασίας, οι οποίοι σε συνδυασμό με τις επικοινωνιακές δυνατότητες των ψηφιακών Η/Ν, μπορούν να προσαρμόζουν κατάλληλα την επίδοση των στοιχείων προστασίας των Η/Ν.

Ενδεικτικά παραδείγματα προσαρμοστικών αλγορίθμων σε σύγχρονους Η/Ν που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη είναι:

- η επέκταση της χαρακτηριστικής λειτουργίας της προστασίας αποστάσεως, για την κάλυψη έναντι ισχυρών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων πλησίον του Δ/Ι και βραχυκυκλωμάτων με υψηλή αντίσταση σφάλματος,
- η ανίχνευση αρμονικών ρεύματος συγκεκριμένης τάξης και η αναστολή λειτουργίας της διαφορικής προστασίας ή της προστασίας υπερέντασης (harmonic restraint) κατά την ενεργοποίηση Μ/Σ,
- η παρακολούθηση της φόρτισης γραμμής διανομής και η προσαρμογή της έντασης διέγερσης των στοιχείων υπερέντασης φάσης, με στόχο τη μέγιστη δυνατή ευαισθησία της προστασίας σε κάθε χρονική στιγμή,
- η προσαρμογή της προστασίας υπερφόρτισης Μ/Σ στο πραγματικό μέγιστο όριο φόρτισής του, σε κάθε χρονική στιγμή, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του και στον περιβάλλοντα χώρο,
- η ανίχνευση ψυχρής φόρτισης γραμμής διανομής, αποτρέποντας την ανεπιθύμητη λειτουργία των στοιχείων υπερέντασης φάσης έπειτα από παρατεταμένη διακοπή της τροφοδοσίας,
- η προσαρμογή του φίλτρου εκτίμησης του φασιθέτη ρεύματος (adaptive filtering), αποτρέποντας την καθυστερημένη λειτουργία του στιγμιαίου στοιχείου υπερέντασης εξαιτίας κορεσμένου Μ/Ε.

Αρχικά, η προσαρμοστική προστασία προτάθηκε ως αποτελεσματική λύση για τα συστήματα μεταφοράς, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεταβλητή τοπολογία, καθώς επίσης και από πληθώρα σεναρίων κανονικής λειτουργίας, λειτουργίας έκτακτης ανάγκης και ενδεχόμενης διαταραχής [19], [20], [154]. Τα τελευταία χρόνια, όμως, εξετάζεται η εφαρμογή της προσαρμοστικής προστασίας και σε σύγχρονα δίκτυα διανομής ή μικροδίκτυα, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως συστήματα διανομής λόγω της παρουσίας τοπικής παραγωγής. Η κάλυψη όλων των πιθανών σεναρίων λειτουργίας ενός δικτύου διανομής με ΜΔΠ από μία συγκεκριμένη ομάδα ρυθμίσεων δεν είναι συνήθως εφικτή, αναδεικνύοντας την ανάγκη αναβάθμισης των υφιστάμενων μέσων προστασίας. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στον σχεδιασμό και τον έλεγχο κατάλληλου προσαρμοστικού συστήματος προστασίας για σύγχρονα δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και μεταβλητή λειτουργική κατάσταση, στο πλαίσιο εκσυγχρονισμού των συστημάτων ελέγχου και προστασίας των δικτύων διανομής [155].

Η προσαρμοστική προστασία ως λύση για δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην εργασία [156], στην οποία προτείνεται αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του τύπου σφάλματος, τον εντοπισμό του πληγέντος τμήματος του δικτύου, την εκκαθάριση του σφάλματος, την αποκατάσταση της λειτουργίας και τον επανυπολογισμό των ρυθμίσεων προστασίας, λαμβάνοντας υπόψη τα υφιστάμενα μέσα προστασίας και τη διαθέσιμη τεχνολογία τη δεδομένη χρονική περίοδο. Στα τέλη της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα, η εξέλιξη της τεχνολογίας των Η/Ν και η ευρεία εφαρμογή των ψηφιακών συστημάτων ελέγχου και προστασίας στα δίκτυα διανομής οδήγησαν στη γενική ιδέα της εκμετάλλευσης πολλαπλών ομάδων ρυθμίσεων, τις οποίες διαθέτουν οι σύγχρονοι Η/Ν. Σε αυτήν την κατεύθυνση, σημαντική ήταν η συνεισφορά της εργασίας [148], στην οποία αναπτύχθηκε η λογική του προσαρμοστικού συστήματος προστασίας, όπως έχει επικρατήσει μέχρι σήμερα.

Ένα προσαρμοστικό σύστημα προστασίας αποτελείται από τον κεντρικό ελεγκτή, από τους ψηφιακούς Η/Ν προστασίας του δικτύου με πολλαπλές ομάδες ρυθμίσεων, καθώς και από το δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ των ψηφιακών συσκευών. Για κάθε πιθανή λειτουργική κατάσταση, ή σύνολο καταστάσεων με παρόμοια χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται αποκλειστική ομάδα ρυθμίσεων στους Η/Ν, ενώ οι τιμές ρύθμισης των στοιχείων προστασίας κάθε ομάδας προκαθορίζονται βάσει ειδικής μελέτης. Ο ελεγκτής δέχεται ως σήμα εισόδου την κατάσταση των Δ/Ι του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου του ΑΔΔ κάθε ΜΔΠ, αναγνωρίζει διαρκώς την τοπολογία και τη λειτουργική κατάσταση του δικτύου και αποστέλλει σήμα για αλλαγή ομάδας ρυθμίσεων στους Η/Ν, όποτε απαιτείται, προσαρμόζοντας κατάλληλα την επίδοση της προστασίας στις τρέχουσες λειτουργικές συνθήκες.

Την τελευταία δεκαετία, μεγάλο πλήθος μεθόδων προσαρμοστικής προστασίας για δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή έχει παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία, χρησιμοποιώντας είτε την προαναφερθείσα κεντρική προσέγγιση είτε διαφορετικές τεχνικές. Η μέθοδος που παρουσιάζεται στην εργασία [157] εφαρμόζει την πολυπρακτορική (multi-agent) λογική, στην οποία κάθε στοιχείο του δικτύου (Η/Ν, εξοπλισμός ισχύος, δευτερεύων εξοπλισμός, ΜΔΠ) αποτελεί έναν πράκτορα που μπορεί να

επικοινωνεί απευθείας με οποιονδήποτε άλλο πράκτορα της ίδιας ή διαφορετικής κοινωνίας, με στόχο την κατάλληλη προσαρμογή της προστασίας. Στην εργασία [158], προτείνεται απλή μέθοδος προσαρμοστικής προστασίας, η οποία τροποποιεί κατάλληλα τις ρυθμίσεις των Η/Ν, όταν το δίκτυο μεταβαίνει από διασυνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία και αντίστροφα, χωρίς να χρησιμοποιεί δίκτυο επικοινωνίας, βασιζόμενη μόνο στις τοπικές μετρήσεις των Η/Ν.

Μέθοδος προσαρμοστικής προστασίας υπερέντασης, η οποία επίσης βασίζεται σε τοπικές μετρήσεις και εκτιμά την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thevenin στα εξεταζόμενα σημεία, προτείνεται στις εργασίες [159]–[161]. Επίσης, μέθοδοι προσαρμοστικής προστασίας για τη διατήρηση της επιλογικής συνεργασίας των ασφαλειών με τους υπερκείμενους Δ/ΑΕ ή Δ/Ι που εκτελούν αυτόματες επαναφορές σε δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής προτείνονται στις εργασίες [162]–[164], οι οποίες τροποποιούν κατάλληλα την ένταση διέγερσης των στοιχείων υπερέντασης.

Στην εργασία [165] παρουσιάζεται προσαρμοστικό σύστημα προστασίας με δίκτυο επικοινωνίας, κατάλληλο για δίκτυα διανομής με ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα, εστιάζοντας στην επιλογή κατάλληλων στοιχείων προστασίας για ανίχνευση συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων στη νησιδοποιημένη λειτουργία, ανάλογα με τον αλγόριθμο ελέγχου του μετατροπέα. Η εργασία [166] παρουσιάζει προσαρμοστικό σύστημα προστασίας, το οποίο επανυπολογίζει τις ρυθμίσεις των στοιχείων προστασίας όποτε απαιτείται, χωρίς να χρησιμοποιεί προκαθορισμένες ομάδες ρυθμίσεων. Λύση προσαρμοστικής προστασίας παρόμοιας λογικής προτείνεται και στην εργασία [167] για δίκτυα διανομής με Α/Γ, με πιλοτική εφαρμογή στο σύστημα διαχείρισης διανομής της ηλεκτρικής εταιρείας της Ταϊβάν. Παραδείγματα πραγματικής υλοποίησης και εφαρμογής προσαρμοστικού συστήματος προστασίας παρουσιάζονται στις εργασίες [168], [169], επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου για δίκτυα διανομής που μπορούν να λειτουργούν και ως μικροδίκτυα.

Η μέθοδος προσαρμοστικής προστασίας που προτείνεται στην εργασία [170] ομαδοποιεί όλα τα παρεμφερή σενάρια λειτουργίας σε συστάδες (clusters), ο αριθμός των οποίων συμπίπτει με τον διαθέσιμο αριθμό ομάδων ρυθμίσεων στους ψηφιακούς Η/Ν του συστήματος προστασίας. Η εργασία [171] παρουσιάζει μέθοδο προσαρμοστικής προστασίας και ελέγχου για δίκτυο διανομής με ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα, χρησιμοποιώντας σύστημα πολυπρακτόρων, με στόχο την αποτελεσματική ανταλλαγή πληροφοριών και τη συνεργασία μεταξύ των Η/Ν προστασίας του δικτύου και των ελεγκτών των ΜΔΠ. Η εργασία [172] προτείνει μέθοδο προσαρμογής των ρυθμίσεων των στοιχείων υπερέντασης του δικτύου διανομής, με χρήση γραμμικού προγραμματισμού, ελέγχοντας κάθε χρονική στιγμή τη διείσδυση των ΜΔΠ. Τέλος, στις εργασίες [173]–[175] προτείνονται προσαρμοστικά συστήματα προστασίας κατάλληλα τόσο για διασυνδεδεμένα όσο και για νησιδοποιημένα δίκτυα, τα οποία τροποποιούν δυναμικά τις τιμές ρύθμισης των στοιχείων προστασίας χωρίς να γίνεται χρήση πολλαπλών ομάδων ρυθμίσεων.

4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ Η/Ν ΜΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Η προσδοκώμενη απόκριση των ψηφιακών Η/Ν επιβεβαιώνεται στην πράξη μέσω σειράς δευτερογενών ελέγχων, κατά τη διάρκεια των οποίων παρακάμπτονται οι Μ/Ε και Μ/Τ, ενώ παράλληλα οι Η/Ν τροφοδοτούνται με σήματα ρεύματος και τάσης υποβιβασμένα σε κατάλληλες δευτερεύουσες τιμές. Δευτερογενής έλεγχος ψηφιακού Η/Ν μπορεί να πραγματοποιηθεί με δοκιμές ανοιχτού ή κλειστού βρόχου. Στις δοκιμές ανοιχτού βρόχου, χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές ελέγχου, οι οποίες αναπαράγουν μεταβατικά φαινόμενα ή σφάλματα, καταγράφουν την απόκριση των Η/Ν και την αξιολογούν βάσει κριτηρίων που ορίζονται από τον χρήστη. Με αυτή τη μέθοδο, η συσκευή ελέγχεται αυτόνομα, χωρίς να συνδέεται στο πραγματικό ΣΗΕ, και επομένως η απόκρισή της δεν επηρεάζει τη λειτουργία του.

Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος δοκιμών κλειστού βρόχου (closed-loop ή hardware-in-the-loop tests) αποτελεί την πλέον σύγχρονη και διαδεδομένη τεχνική προσομοίωσης και εκτέλεσης δοκιμών σε επίπεδο συστήματος, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών προσομοιώσεων (π.χ. ευελιξία, ασφάλεια) και των εργαστηριακών δοκιμών (π.χ. έλεγχος πραγματικής συσκευής) [176]. Εξοπλισμός, ο οποίος δύσκολα μοντελοποιείται σε λογισμικό προσομοίωσης (π.χ. μετατροπέας ισχύος, Η/Ν προστασίας), μπορεί να συνδεθεί στο προσομοιούμενο ΣΗΕ και να ελεγχθεί υπό συνθήκες σχεδόν

πανομοιότυπες με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Το προσομοιούμενο ΣΗΕ μπορεί να τροποποιηθεί ταχύτατα, ως προς την τοπολογία, τον εξοπλισμό και τις παραμέτρους του, προσαρμόζοντας εύκολα τις δοκιμές στις επιθυμητές συνθήκες. Επίσης, διαταραχές και ακραίες συνθήκες σφάλματος μπορούν να προσομοιωθούν χωρίς κίνδυνο για τον υπό δοκιμή εξοπλισμό, φωτίζοντας τυχόν κρυφές αδυναμίες ή ελαττωματική συμπεριφορά του.

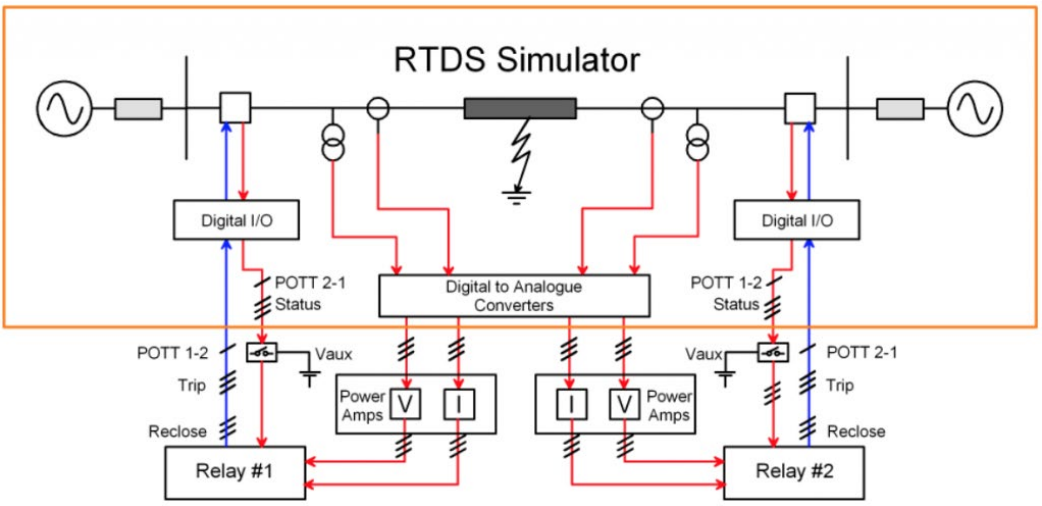
Βασική συνιστώσα των δοκιμών κλειστού βρόχου αποτελεί ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (real-time digital simulator), ο οποίος αλληλεπιδρά με τον υπό δοκιμή εξοπλισμό. Πρόκειται στην ουσία για επεξεργαστή υψηλής ταχύτητας, ο οποίος διαθέτει επίσης αναλογικές και ψηφιακές κάρτες εισόδου και εξόδου. Η κατάσταση του μοντέλου που προσομοιώνει το πραγματικό ΣΗΕ υπολογίζεται σε διακριτές χρονικές στιγμές, ενώ ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμών ονομάζεται βήμα προσομοίωσης (Δt). Οι εμπορικοί προσομοιωτές πραγματικού χρόνου μπορούν να επιλύσουν πολύπλοκα δίκτυα με βήμα προσομοίωσης της τάξης των 50 μs, το οποίο μπορεί να φτάσει έως 1 μs για την προσομοίωση πολύ γρήγορων φαινομένων.

Οι δοκιμές κλειστού βρόχου χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: τις δοκιμές κλειστού βρόχου ισχύος (Power Hardware-In-The-Loop, PHIL) και τις δοκιμές κλειστού βρόχου ελεγκτή (Controller Hardware-In-The-Loop, CHIL), βάσει του υπό δοκιμή εξοπλισμού. Στις δοκιμές PHIL συμμετέχει εξοπλισμός ισχύος, π.χ. μετατροπέας Φ/Β, κινητήρας, συστοιχία μπαταριών κτλ. [177]–[180], ενώ στις δοκιμές CHIL, ως πραγματικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται μονάδα ελέγχου ή συσκευή προστασίας, π.χ. ψηφιακός Η/Ν, προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής κτλ. [181]–[190]. Σημειώνεται, ότι οι δοκιμές CHIL, ως μέθοδος ελέγχου ψηφιακών Η/Ν, παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά στην εργασία [191].

Τόσο οι δοκιμές CHIL όσο και οι δοκιμές PHIL χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, όπως είναι οι αυτοκινητοβιομηχανίες, οι εφαρμογές ρομποτικής, τα ΣΗΕ κ.α. Επίσης, χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς σε πανεπιστημιακά ιδρύματα και ερευνητικά κέντρα, όπως ισχύει και στην περίπτωση του εργαστηριακού συστήματος που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

4.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος “SuSTAINABLE”, χρηματοδοτούμενου από το έβδομο πρόγραμμα πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, αναπτύχθηκε πρότυπη εργαστηριακή διάταξη, με στόχο την επαλήθευση των προβλημάτων προστασίας στα δίκτυα διανομής που χαρακτηρίζονται από υψηλή διείσδυση ΜΔΠ, την αξιολόγηση της επίδοσης των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας ως προτεινόμενη λύση για τα προηγούμενα προβλήματα, καθώς και την εκπαίδευση νέων μηχανικών στα συστήματα προστασίας [192], [193]. Βασικές συνιστώσες της προτεινόμενης διάταξης αποτελούν ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου, οι ψηφιακοί Η/Ν προστασίας και η κεντρική μονάδα ελέγχου. Ο έλεγχος των Η/Ν προστασίας του συστήματος επιτυγχάνεται με τη μέθοδο δοκιμών κλειστού βρόχου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη εργαστηριακή διάταξη αποτελεί λύση προσαρμοστικής προστασίας σε επίπεδο συστήματος και όχι σε επίπεδο Η/Ν ή αλγορίθμου.



Σχήμα 4.1: Έλεγχος Η/Ν προστασίας με δοκιμές CHIL. [194]

4.3.1 Χαρακτηριστικά Βασικών Συνιστωσών Συστήματος

4.3.1.1 Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου

Το εργαστήριο ΣΗΕ διαθέτει έναν ειδικά διαμορφωμένο ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου, της εταιρείας RTDS Technologies Inc., ο οποίος προσομοιώνει το ηλεκτρικό δίκτυο και αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες συνιστώσες της εργαστηριακής διάταξης. Ο εν λόγω τύπος προσομοιωτή αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1993, ως εξέλιξη του λογισμικού προσομοιώσεων ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών (EMTP), και χρησιμοποιείται κατά κανόνα για προσομοιώσεις ΣΗΕ. Τα μοντέλα των επιμέρους στοιχείων ισχύος και ελέγχου του ΣΗΕ εκτελούνται σε διαφορετικές κάρτες επεξεργασίας, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, επιτυγχάνοντας μικρό βήμα προσομοίωσης.

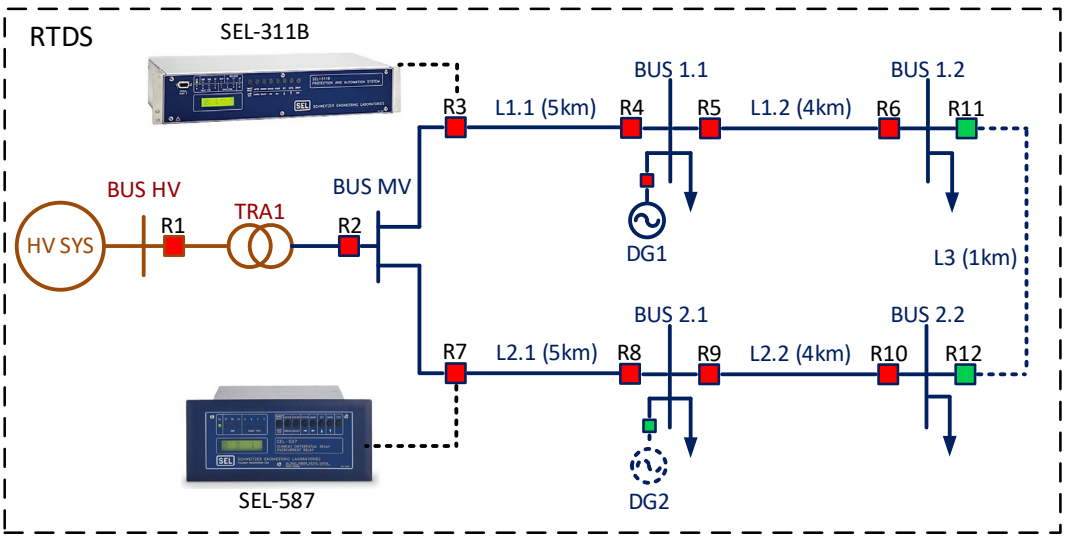
Στην Εικόνα 4.1, φαίνεται η διαμόρφωση του προσομοιωτή κατά την περίοδο των τελικών δοκιμών. Συγκεκριμένα, ο προσομοιωτής αποτελείται από:

- Δύο κάρτες επεξεργασίας GPC (Giga Processor Card), οι οποίες λειτουργούν παράλληλα για την επίλυση των μοντέλων και την εκτέλεση των υπολογισμών.
- Μία κάρτα WIF (Workstation InterFace), η οποία είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία μεταξύ των καρτών επεξεργασίας και την επικοινωνία του προσομοιωτή με τον Η/Υ του χρήστη.
- Περιφερειακές κάρτες επικοινωνίας (GTAO – Giga-Transceiver Analogue Output Card, GTAI – Giga-Transceiver Analogue Input Card, GTFPI – Gigabit Transceiver Front Panel Interface, GTDI – Giga-Transceiver Digital Input Card), οι οποίες παρέχουν ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους για τη σύνδεση εξωτερικών συσκευών. Το εύρος τάσης των αναλογικών εισόδων/εξόδων είναι ± 10 Vac, ενώ το λογικό «1» στις ψηφιακές εισόδους/εξόδους αντιστοιχεί σε τάση ± 5 Vdc.
- Το λογισμικό RSCAD για τη μοντελοποίηση του προσομοιούμενου ΣΗΕ και την παραμετροποίηση του προσομοιωτή.

Εικόνα 4.1: Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου του Εργαστηρίου ΣΗΕ (2018).

Σημειώνεται ότι στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης της προτεινόμενης διάταξης προσαρμοστικής προστασίας, ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου διέθετε 18 κάρτες επεξεργασίας TPC (Tandem Processor Card), ενώ στη συνέχεια αναβαθμίστηκε σε 16 κάρτες TPC και μία κάρτα 3PC (Triple Processor Card), πριν διαμορφωθεί όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Στην πρόσφατη αναβάθμιση του προσομοιωτή (τέλη 2019), προστέθηκε μία ισχυρή μονάδα επεξεργασίας τύπου NovaCor, η οποία χρησιμοποιεί προηγμένη αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, διαφορετικής τεχνολογίας από αυτή των προηγούμενων καρτών επεξεργασίας.

Στο λογισμικό RSCAD μοντελοποιήθηκε το απλοποιημένο σύστημα διανομής πέντε ζυγών του Σχήματος 4.2, το οποίο περιλαμβάνει τον κύριο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, δύο γραμμές κορμού στις οποίες συνδέονται ΜΔΠ, συγκεντρωτικά φορτία στους ζυγούς του δικτύου, τους Δ/Ι στις αναχωρήσεις των γραμμών κορμού, καθώς και τους Μ/Σ έντασης που τροφοδοτούν τους Η/Ν προστασίας. Οι Η/Ν SEL–311B και SEL–587 επιτελούν τον ρόλο της προστασίας υπερέντασης των κύριων γραμμών διανομής στις δοκιμές κλειστού βρόχου. Τα δεδομένα του ηλεκτρικού δικτύου δίνονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 4.2: Προσομοιούμενο σύστημα διανομής 5 ζυγών και πραγματικοί Η/Ν προστασίας.

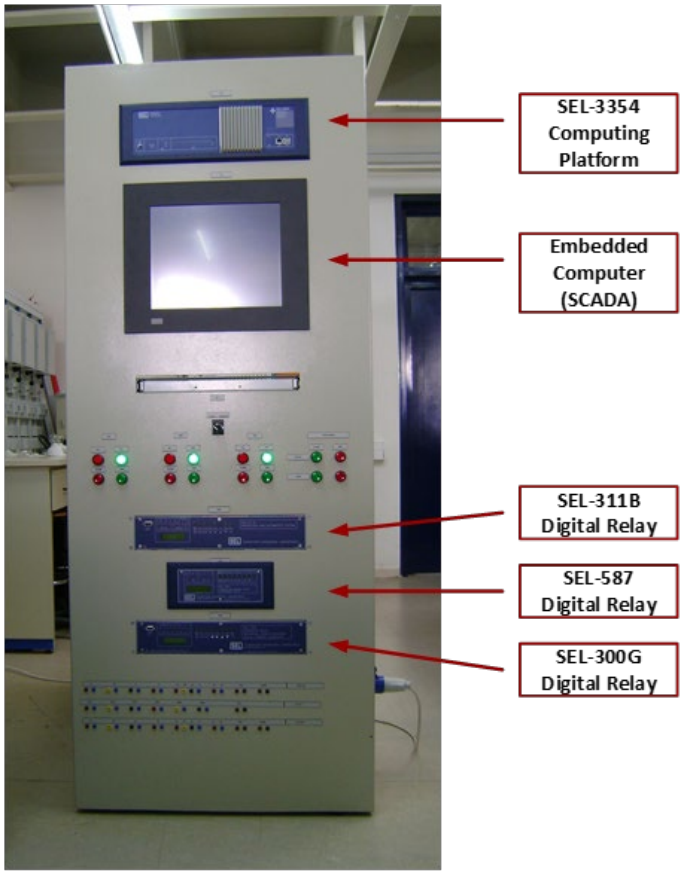
4.3.1.2 Ψηφιακοί Η/Ν Προστασίας

Για την ανάπτυξη της εργαστηριακής διάταξης, αξιοποιήθηκε ο πίνακας προστασίας του Εργαστηρίου ΣΗΕ [195], [196], ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι

ψηφιακοί Η/Ν SEL–311B και SEL–587, του οίκου Schweitzer, ενσωματώθηκαν στη διάταξη και χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές κλειστού βρόχου.

Ο Η/Ν SEL–311B παρέχει πλήρη επιτήρηση και προστασία γραμμών μεταφοράς και διανομής. Κύρια προστασία του Η/Ν αποτελεί το στοιχείο αποστάσεως φάσης και γης τριών ζωνών (21P/G), με χαρακτηριστική λειτουργίας τύπου offset mho. Μεταξύ άλλων, διαθέτει στοιχεία υπερέντασης φάσης, γης και αρνητικής ακολουθίας (50–51P/G/Q), με δυνατότητα χρήσης στοιχείου κατεύθυνσης (67), καθώς επίσης και στοιχεία υπό-/υπέρτασης (27, 59). Η αλληλεπίδραση του Η/Ν με άλλες συσκευές επιτυγχάνεται μέσω έξι ψηφιακών εισόδων, επτά προγραμματιζόμενων επαφών εξόδου και μίας επαφής alarm. Εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου Η/Ν είναι η υποστήριξη έξι διαφορετικών ομάδων ρυθμίσεων. Στην εργαστηριακή διάταξη, ο Η/Ν SEL–311B χρησιμοποιείται ως προστασία υπερέντασης κύριας γραμμής διανομής του προσομοιούμενου δικτύου, προσαρμόζοντας την ενεργή ομάδα ρυθμίσεών του βάσει της τρέχουσας λειτουργικής κατάστασης του δικτύου.

Ο Η/Ν SEL–587 αποτελεί ψηφιακή λύση διαφορικής προστασίας εξοπλισμού ισχύος. Εκτός από στοιχείο διαφορικής προστασίας, διαθέτει επιπλέον δύο διακριτές ομάδες στοιχείων υπερέντασης φάσης, γης και αρνητικής ακολουθίας (50–51P/G/Q). Η αλληλεπίδραση του Η/Ν με άλλες συσκευές επιτυγχάνεται μέσω δύο ψηφιακών εισόδων, τεσσάρων προγραμματιζόμενων επαφών εξόδου και μίας επαφής alarm. Στην εργαστηριακή διάταξη, ο Η/Ν SEL–587, όπως και ο Η/Ν SEL–311B, επιτελεί τον ρόλο της προστασίας υπερέντασης κύριας γραμμής διανομής του προσομοιούμενου δικτύου.



Εικόνα 4.2: Ο πίνακας προστασίας του Εργαστηρίου ΣΗΕ.

Στην προτεινόμενη εργαστηριακή διάταξη, δεν είναι δεσμευτική η χρήση των προηγούμενων τύπων συσκευών. Για λόγους επίδειξης, στις δοκιμές κλειστού βρόχου χρησιμοποιήθηκε εναλλακτικά ο Η/Ν προστασίας TPU S220–S (Εικόνα 4.3), του οίκου Efacec, ο οποίος αποτελεί ψηφιακή λύση πολλαπλών λειτουργιών για την προστασία γραμμών διανομής. Εφαρμόζεται επίσης ως επικουρική προστασία εξοπλισμού ισχύος και ως προστασία διασύνδεσης ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής. Όσον αφορά τα κύρια στοιχεία προστασίας του Η/Ν, διαθέτει στοιχεία υπερέντασης φάσης, γης και αρνητικής ακολουθίας (50–51P/G/Q) με δυνατότητα χρήσης στοιχείου κατεύθυνσης (67), στοιχείο υπερφόρτισης (49), στοιχείο

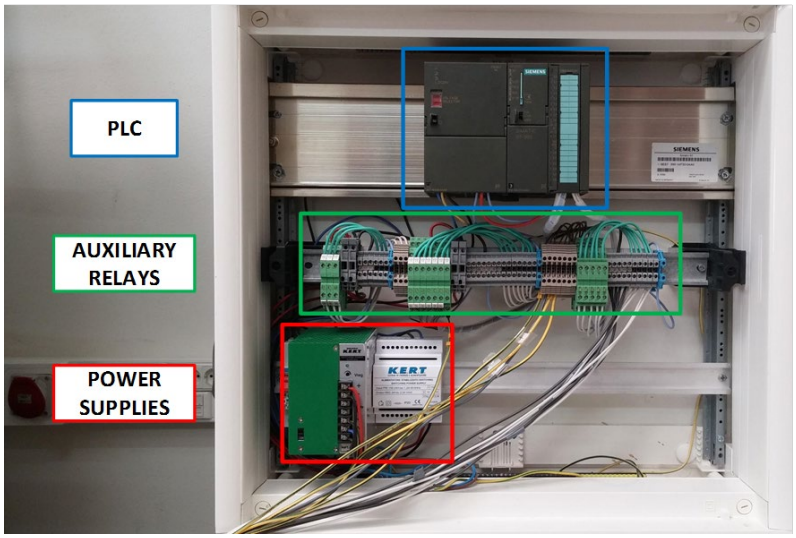
αντίθετης ροής ισχύος (32), στοιχείο μετατόπισης τάσης ουδετέρου (59N), στοιχείο τάσης αρνητικής ακολουθίας (47), στοιχείο υπό-/υπέρτασης (27/59) και στοιχείο υπό-/υπερσυχνότητας (81).

Εικόνα 4.3: Δοκιμές κλειστού βρόχου με τον Η/Ν TPU S220–S.

4.3.1.3 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου

Πυρήνα της εργαστηριακής διάταξης αποτελεί ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (programmable logic controller, PLC). Ο αλγόριθμος προσαρμογής του συστήματος προστασίας εκτελείται με λογική κεντρικού ελέγχου (centralized control), σε έναν ελεγκτή τύπου SIMATIC S7–300, του οίκου Siemens. Ο ελεγκτής S7–300 αποτελείται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας 312C, μία υβριδική κάρτα 10 ψηφιακών εισόδων και 6 ψηφιακών εξόδων, και μία κάρτα 8 αναλογικών εισόδων. Η εφαρμογή αυτοματισμού προγραμματίζεται με χρήση των ειδικών γλωσσών προγραμματισμού Ladder Diagram (LAD) και Statement List (STL) και φορτώνεται στον ελεγκτή μέσω του λογισμικού STEP7.

Εκτός από τον ελεγκτή PLC, η μονάδα ελέγχου αποτελείται και από επιμέρους βοηθητικές συσκευές, και συγκεκριμένα από βοηθητικούς ηλεκτρονόμους και τροφοδοτικά. Οι βοηθητικές συσκευές συνιστούν το κύκλωμα ελέγχου ΣΡ της διάταξης, το οποίο έχει ως σκοπό την ανταλλαγή εντολών και σημάτων μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών της. Ο ρόλος του φορτιστή και των συστοιχιών συσσωρευτών επιτελείται από τα τροφοδοτικά, τα οποία παρέχουν ισχύ στο κύκλωμα ΣΡ σε δύο επίπεδα τάσης, 24 Vdc και 48 Vdc. Οι εντολές μεταδίδονται μέσω των βοηθητικών ηλεκτρονόμων, σκοπός των οποίων είναι η ενοποίηση συσκευών που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης DC. Συγκεκριμένα, ο προσομοιωτής RTDS®, ο ελεγκτής S7–300 και ο Η/Ν SEL–311B χρησιμοποιούν 5 Vdc, 24 Vdc και 48 Vdc, αντίστοιχα. Η κεντρική μονάδα ελέγχου της εργαστηριακής διάταξης φαίνεται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Η κεντρική μονάδα ελέγχου της προτεινόμενης εργαστηριακής διάταξης.

4.3.2 Λειτουργικότητα Εργαστηριακού Συστήματος

Στο εργαστηριακό σύστημα προσαρμοστικής προστασίας, το μελετώμενο ηλεκτρικό δίκτυο μοντελοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού RSCAD και η κατάστασή του κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται στον ψηφιακό προσομοιωτή RTDS®. Επίσης, οι ψηφιακοί Η/Ν SEL–311B και SEL–587 παρέχουν προστασία υπερέντασης στις κύριες γραμμές του δικτύου, ενώ ο λογικός ελεγκτής S7–300 επιτηρεί την τοπολογία του δικτύου αδιαλείπτως και προσαρμόζει την ενεργή ομάδα ρυθμίσεων στον Η/Ν SEL–311B, όποτε απαιτείται. Τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή, μία για κάθε πιθανό σενάριο λειτουργίας, οι τιμές των οποίων έχουν προϋπολογιστεί για να καλύπτουν πλήρως τις γραμμές διανομής σε ενδεχόμενη εκδήλωση σφάλματος.

Πιο συγκεκριμένα, ο κύκλος λειτουργίας του εργαστηριακού συστήματος προσαρμοστικής προστασίας αποτελείται από τα παρακάτω διακριτά βήματα:

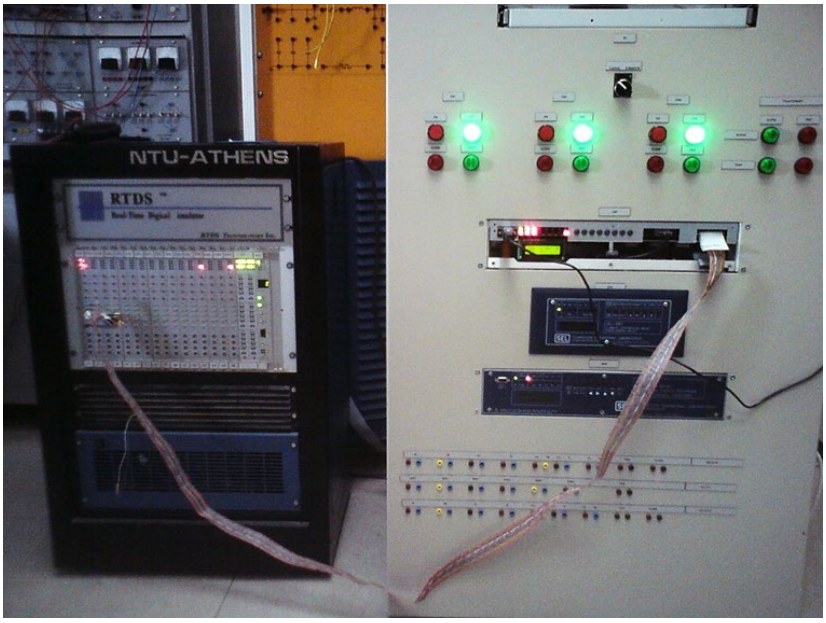
i. Τα παραγόμενα αναλογικά σήματα τάσης εγχέονται από αναλογική κάρτα εισόδων/εξόδων του προσομοιωτή RTDS® στη διεπαφή χαμηλού επιπέδου (low–level interface) του Η/Ν SEL–311B μέσω καλωδιοταινίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5. Τα εν λόγω σήματα αντιστοιχούν στα φασικά ρεύματα της προστατευόμενης γραμμής. Με τη συγκεκριμένη τεχνική, παρακάμπτεται το στάδιο εισόδου του Η/Ν, το οποίο διαθέτει κανάλια εντάσεων ονομαστικής έντασης 5 A και επομένως δεν απαιτείται η χρήση ενδιάμεσων ενισχυτών για παροχή σημάτων ισχύος.

ii. Ο προσομοιωτής RTDS® στέλνει από ψηφιακή κάρτα εισόδου/εξόδου την κατάσταση των Δ/Ι του δικτύου στις ψηφιακές εισόδους “DI0.1–DI0.4” του λογικού ελεγκτή S7–300 (λογικό «0» αντιστοιχεί σε ανοιχτό Δ/Ι και λογικό «1» σε κλειστό Δ/Ι). Επίσης, στέλνει στην ψηφιακή είσοδο “IN101” του Η/Ν SEL–311B την κατάσταση του Δ/Ι που επιτηρεί.

iii. Βάσει των σημάτων εισόδου, ο λογικός ελεγκτής αναγνωρίζει την τοπολογία του δικτύου και επιλέγει την κατάλληλη ομάδα ρυθμίσεων, στέλνοντας σήμα πέντε δυαδικών ψηφίων στις ψηφιακές εισόδους “IN102–IN106” του Η/Ν προστασίας.

iv. Ο Η/Ν SEL–311B προσαρμόζει την ενεργή ομάδα ρυθμίσεών του, βάσει των σημάτων εισόδου που δέχεται από τον λογικό ελεγκτή. Τα ψηφιακά σήματα εισόδου στον λογικό ελεγκτή και τον Η/Ν προστασίας δίνονται στον Πίνακα 4.1 ανά σενάριο λειτουργίας.

v. Στην προσομοίωση βραχυκυκλώματος, ο Η/Ν SEL–311B λειτουργεί βάσει της τρέχουσας ομάδας ρυθμίσεων, στέλνοντας στην ψηφιακή κάρτα εισόδων/εξόδων του προσομοιωτή RTDS® εντολή ανοίγματος προς τον προσομοιούμενο Δ/Ι. Τέλος, επιβεβαιώνεται η εκκαθάριση του σφάλματος.

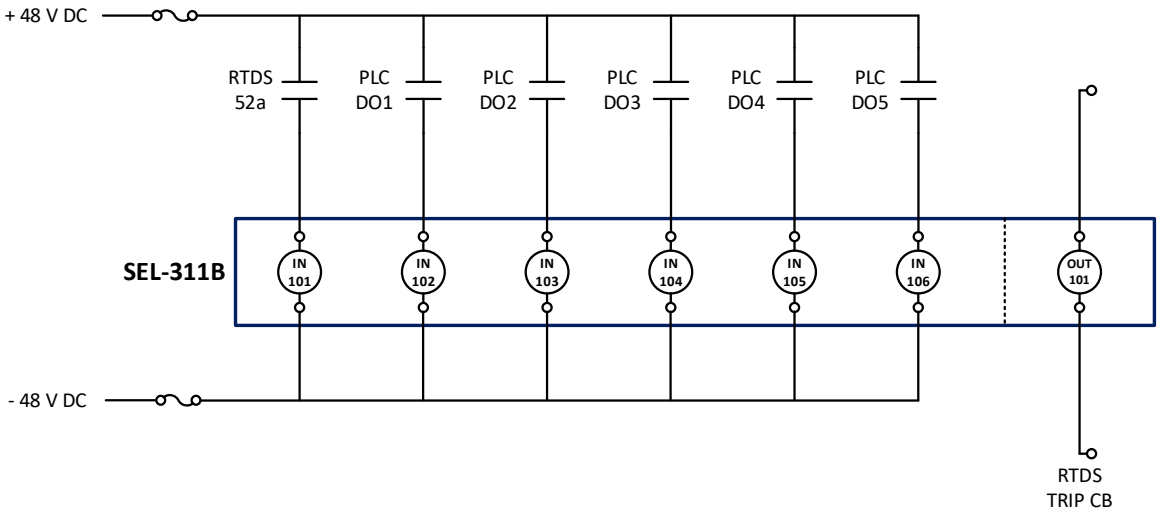


Εικόνα 4.5: Σύνδεση του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου με τον ψηφιακό Η/Ν.

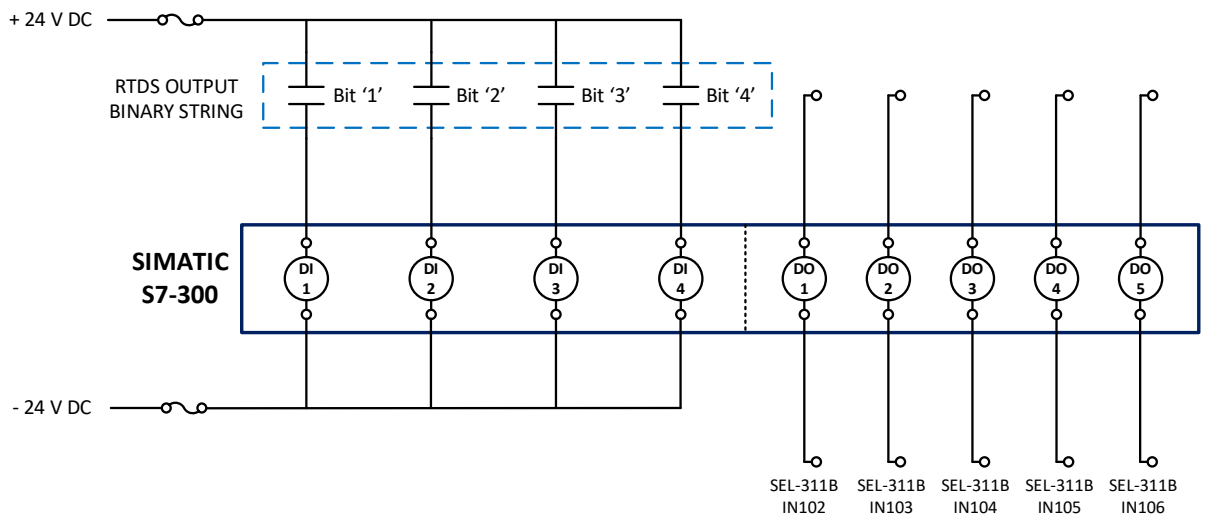
Πίνακας 4.1: Ψηφιακά σήματα ανά σενάριο λειτουργίας

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΗΜΑ ΑΠΟ RTDS ΠΡΟΣ PLC (DI0.1-DI0.2-DI0.3-DI0.4)	ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΗΜΑ ΑΠΟ PLC ΠΡΟΣ Η/Ν (IN102-IN103-IN104-IN105-IN106)	ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΟΜΑΔΑ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ Η/Ν
C1: Χωρίς ΜΔΠ	0-0-0-0	1-0-0-0-0	SG1
C2: Σύνδεση της DG1	1-0-0-0	0-1-0-0-0	SG2
C3: Σύνδεση της DG2	1-0-1-0	0-0-1-0-0	SG3
C4: Σύνδεση των DG1 & DG2	1-1-0-0	0-0-0-1-0	SG4

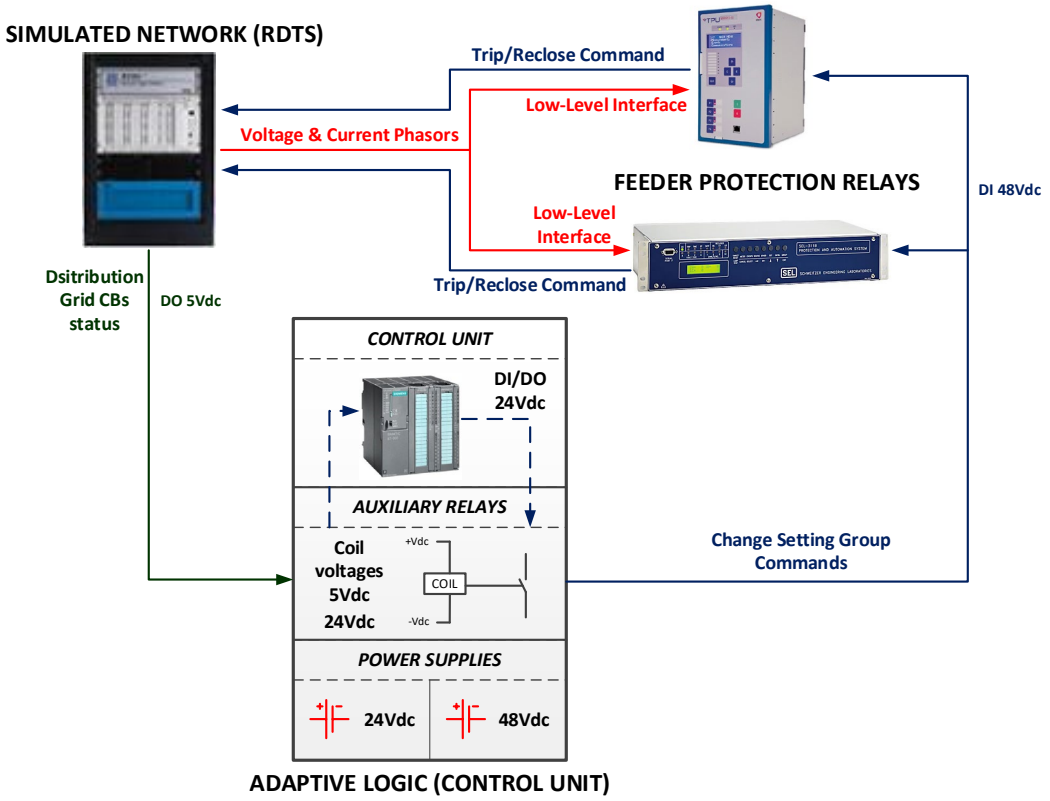
Οι εντολές που ανταλλάσσονται μεταξύ του Η/Ν SEL–311B, του ελεγκτή S7–300 και του προσομοιωτή RTDS®, μέσω των βοηθητικών Η/Ν, αποτυπώνονται αναλυτικά στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Στο Σχήμα 4.5 αποτυπώνεται συνολικά η λειτουργία της προτεινόμενης εργαστηριακής διάταξης.



Σχήμα 4.3: Κύκλωμα ελέγχου Η/Ν SEL–311B.

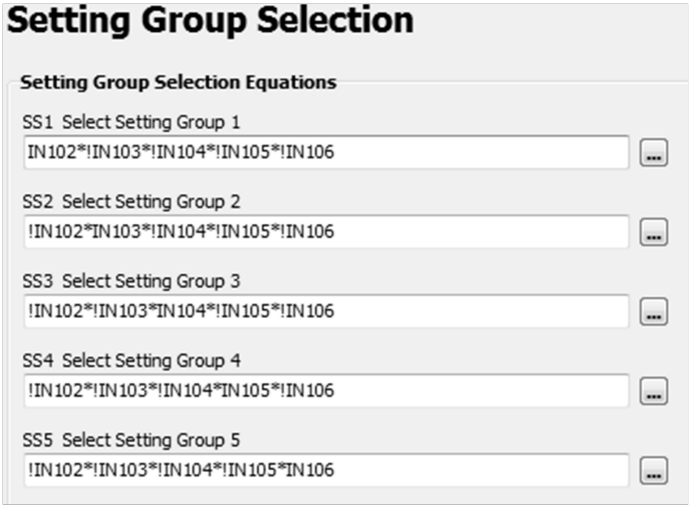


Σχήμα 4.4: Κύκλωμα ελέγχου λογικού ελεγκτή S7–300.



Σχήμα 4.5: Λειτουργία προτεινόμενου εργαστηριακού συστήματος.

Για τον προγραμματισμό των λογικών εξισώσεων και την παραμετροποίηση των τιμών ρύθμισης των Η/Ν SEL–311B και SEL–587, χρησιμοποιείται το ειδικό λογισμικό AcSELerator QuickSet® SEL–5030, του οίκου Schweitzer. Η λογική ελέγχου της ενεργής ομάδας ρυθμίσεων στον Η/Ν SEL–311B αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.6. Όταν μία εκ των μεταβλητών SS1–SS5 λάβει την τιμή λογικό «1», ενεργοποιείται η αντίστοιχη ομάδα ρυθμίσεων. Για παράδειγμα, όταν SS3=1, ενεργοποιείται η ομάδα ρυθμίσεων SG3 και παραμένει ενεργή για όσο χρονικό διάστημα η SS3 έχει τιμή ίση με λογικό «1». Υπογραμμίζεται ότι η τρέχουσα ομάδα ρυθμίσεων έχει προτεραιότητα στο χρονικό διάστημα που παραμένει ενεργοποιημένη, ανεξάρτητα από το πόσες μεταβλητές SSx λάβουν παράλληλα τιμή λογικό «1». Επομένως, για να ολοκληρωθεί επιτυχώς η αλλαγή ομάδας ρυθμίσεων πρέπει να εξασφαλίζεται ταυτόχρονα η απενεργοποίηση της τρέχουσας ομάδας ρυθμίσεων και η ενεργοποίηση της νέας.



Εικόνα 4.6: Προσαρμογή των ομάδων ρυθμίσεων του Η/Ν SEL–311B με χρήση του λογισμικού AcSELerator QuickSet® SEL–5030.

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Η λειτουργικότητα και η επίδοση της εργαστηριακής διάταξης προσαρμοστικής προστασίας επιβεβαιώνονται συστηματικά μέσω συγκεκριμένης σειράς δοκιμών κλειστού βρόχου. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, οι εν λόγω δοκιμές αφορούν αποκλειστικά τριφασικά βραχυκυκλώματα λόγω της περιορισμένης επεξεργαστικής ικανότητας του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου την περίοδο των δοκιμών.

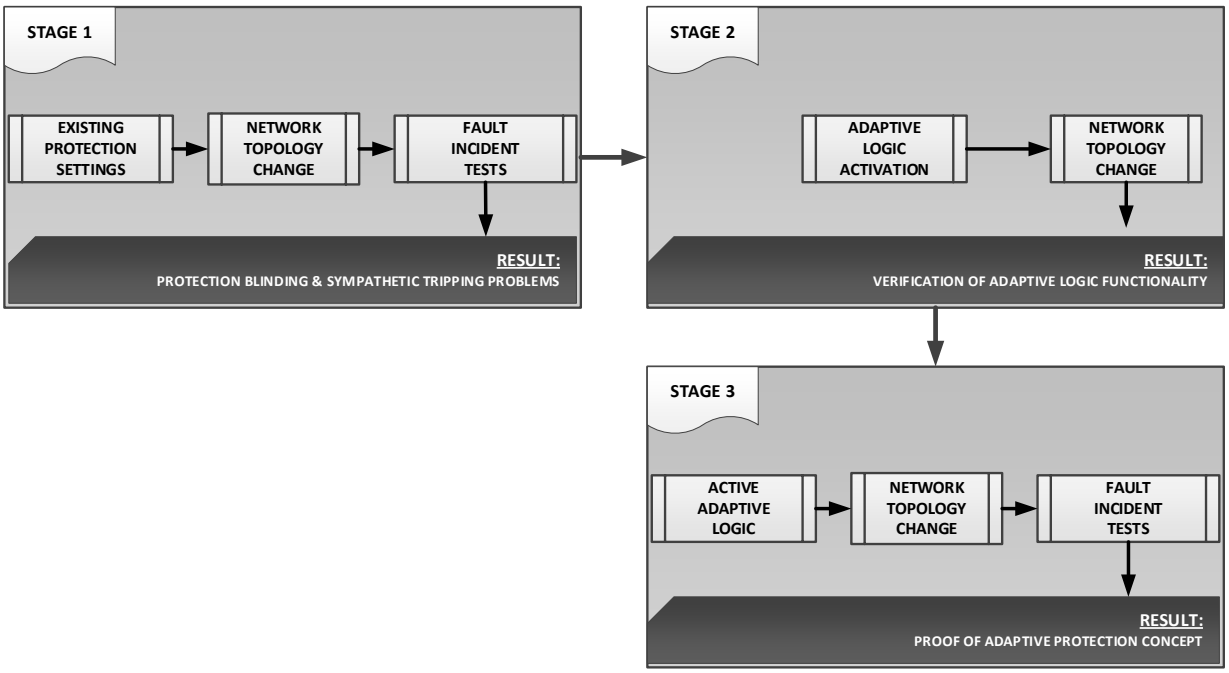
Η προτεινόμενη διαδικασία δοκιμών χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια:

i. Αρχικά, η κεντρική μονάδα ελέγχου που εκτελεί τον αλγόριθμο της προσαρμοστικής προστασίας είναι ανενεργή και το προσομοιούμενο δίκτυο προστατεύεται από τους Η/Ν προστασίας με τις αρχικές ρυθμίσεις τους, όπως είχαν προσδιορισθεί για το ακτινικό δίκτυο διανομής χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή. Επιβεβαιώνεται μέσω προσομοιώσεων βραχυκυκλωμάτων η πιθανότητα εμφάνισης των προβλημάτων τύφλωσης και συμπαθητικής λειτουργίας της προστασίας, εφόσον οι Η/Ν προστασίας παραμείνουν με τις αρχικές τους ρυθμίσεις μετά την ένταξη μεγάλων ΜΔΠ.

ii. Στη συνέχεια, ελέγχεται ο αλγόριθμος προσαρμοστικής προστασίας. Συγκεκριμένα, ενεργοποιείται η κεντρική μονάδα ελέγχου, ενώ παράλληλα εκτελούνται αλλαγές στη λειτουργική κατάσταση του προσομοιούμενου δικτύου, με στόχο την επιβεβαίωση της επιτυχούς προσαρμογής των ομάδων ρυθμίσεων του Η/Ν προστασίας που συμμετέχει στο προσαρμοστικό σύστημα προστασίας. Οι εν λόγω αλλαγές αφορούν την ένταξη ή αποσύνδεση ΜΔΠ.

iii. Στο τελικό στάδιο των δοκιμών, επανεκτελούνται οι προσομοιώσεις βραχυκυκλώματος του πρώτου σταδίου, με τον αλγόριθμο προσαρμοστικής προστασίας ενεργό, επιδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος προστασίας και την καταλληλότητά του για σύγχρονα συστήματα διανομής.

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας δοκιμών κλειστού βρόχου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Έλεγχος λειτουργικότητας προσαρμοστικού συστήματος προστασίας μέσω δοκιμών κλειστού βρόχου.

4.4.1 Στάδιο 1: Επιβεβαίωση Προβλημάτων Προστασίας

Στις δοκιμές κλειστού βρόχου του πρώτου σταδίου, εκτελούνται προσομοιώσεις σφαλμάτων δικτύου και ελέγχεται αντίστοιχα η επίδοση των Η/Ν προστασίας. Στόχος του συγκεκριμένου σταδίου είναι η επιβεβαίωση του ενδεχομένου εμφάνισης προβλημάτων τύφλωσης και συμπαθητικής λειτουργίας των Η/Ν προστασίας σε δίκτυα διανομής με έντονη παρουσία ΜΔΠ, καθώς και η ανάδειξη της ανάγκης για αναβάθμιση των παραδοσιακών μέσων προστασίας των δικτύων διανομής. Ο αλγόριθμος προσαρμοστικής προστασίας είναι ανενεργός σε αυτό το στάδιο και το δίκτυο διανομής προστατεύεται με χρήση απλών μη κατευθυντικών στοιχείων υπερέντασης, όπως συμβαίνει στα παθητικά δίκτυα διανομής έως σήμερα.

4.4.1.1 Δοκιμή Τύφλωσης Προστασίας

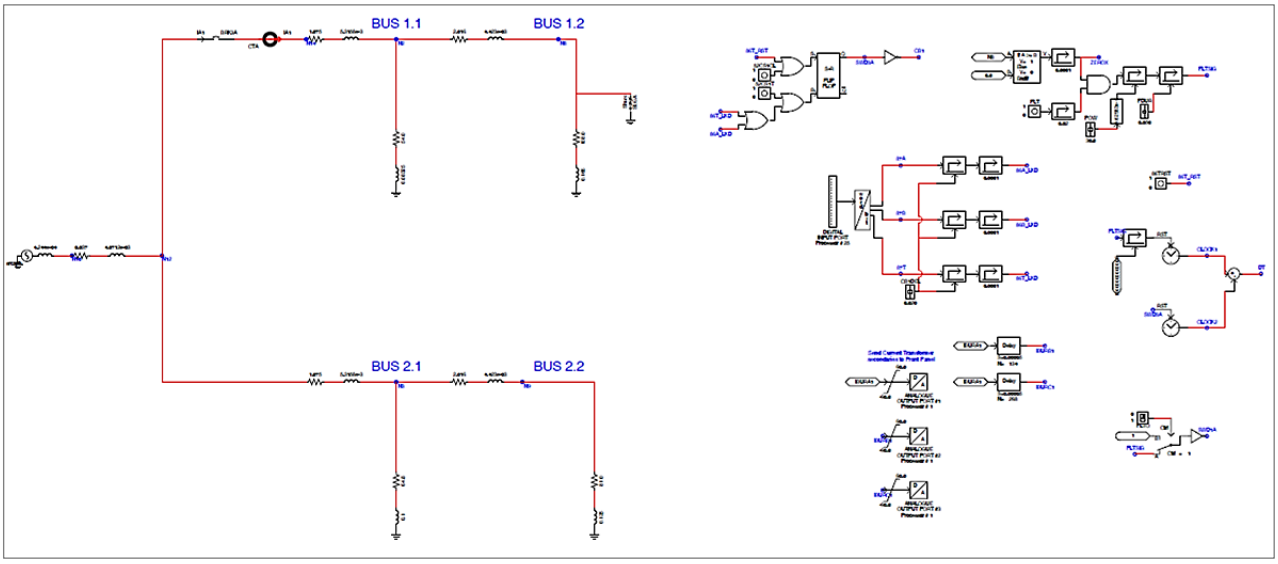
Η πρώτη σειρά δοκιμών κλειστού βρόχου αφορά το πρόβλημα τύφλωσης του Η/Ν προστασίας γραμμής διανομής, η οποία φιλοξενεί μεγάλη ΜΔΠ. Αρχικά, το δίκτυο διανομής του Σχήματος 4.2 λειτουργεί χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή και οι τιμές ρύθμισης του απλού στοιχείου υπερέντασης φάσης (51P) στον Η/Ν SEL–311B δίνονται στον Πίνακα 4.2, υπολογισμένες για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Το στοιχείο υπερέντασης 51P λειτουργεί με χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου της οικογένειας IEC.

Πίνακας 4.2: Τιμές ρύθμισης Η/Ν προστασίας γραμμής 1.1 (SEL–311B)

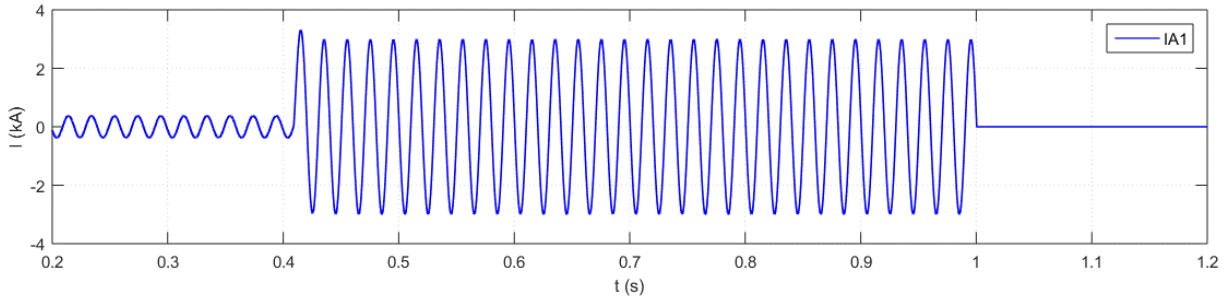
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΙΜΗ
Στοιχείο προστασίας	51P
Λόγος μετασχηματισμού Μ/Ε	800/5
Χαρακτηριστική λειτουργίας	IEC Class B, Curve C2 (VI)
Ένταση διέγερσης	3,38 A (sec.)
Χρονικός πολλαπλασιαστής	0,12

Στη συγκεκριμένη δοκιμή, προσομοιώνεται πλήρες τριφασικό σφάλμα στο άκρο της γραμμής κορμού 1.1 (ζυγός 1.2). Η μοντελοποίηση του δικτύου διανομής στο λογισμικό RSCAD φαίνεται στο Σχήμα 4.7, ενώ τα παλμογραφήματα των φασικών ρευμάτων σφάλματος δίνονται στα Σχήματα 4.8 και 4.9, όπως καταγράφηκαν από τον ψηφιακό προσομοιωτή RTDS® και τον Η/Ν προστασίας SEL–311B,

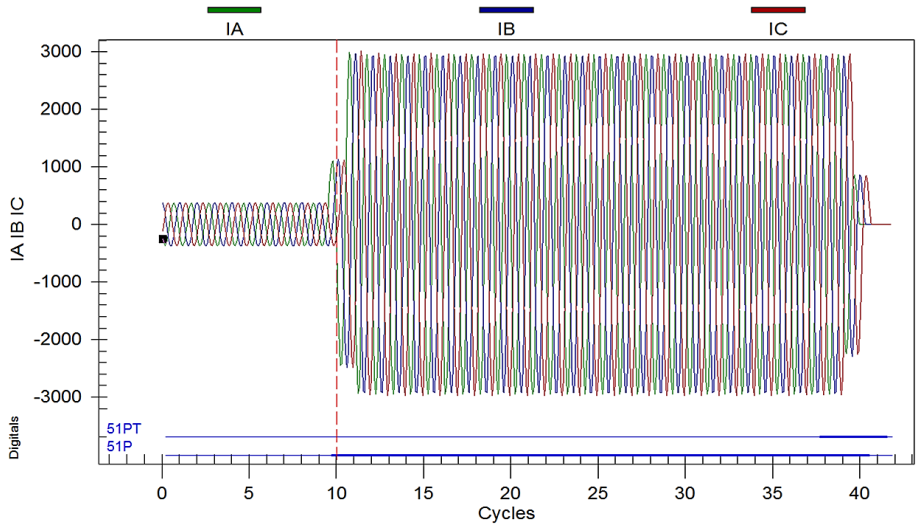
αντίστοιχα. Στο παλμογράφημα του Σχήματος 4.9 απεικονίζονται επιπλέον τα δυαδικά ψηφία 51P και 51PT του Η/Ν SEL–311B, τα οποία αντιστοιχούν στη διέγερση και τη λειτουργία του στοιχείου υπερέντασης 51P. Παρατηρώντας τις συγκεκριμένες καταγραφές, το ρεύμα βραχυκύκλωσης ανήλθε στα 2,12 kA, τροφοδοτούμενο αποκλειστικά από τον κύριο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Βάσει των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης δοκιμής, ο Η/Ν SEL–311B λειτούργησε σωστά και εκκαθάρισε το σφάλμα σε 30 κύκλους (600 ms), όπως αναμενόταν.



Σχήμα 4.7: Δίκτυο διανομής 5 ζυγών (χωρίς ΜΔΠ, σφάλμα στον ζυγό 1.2).



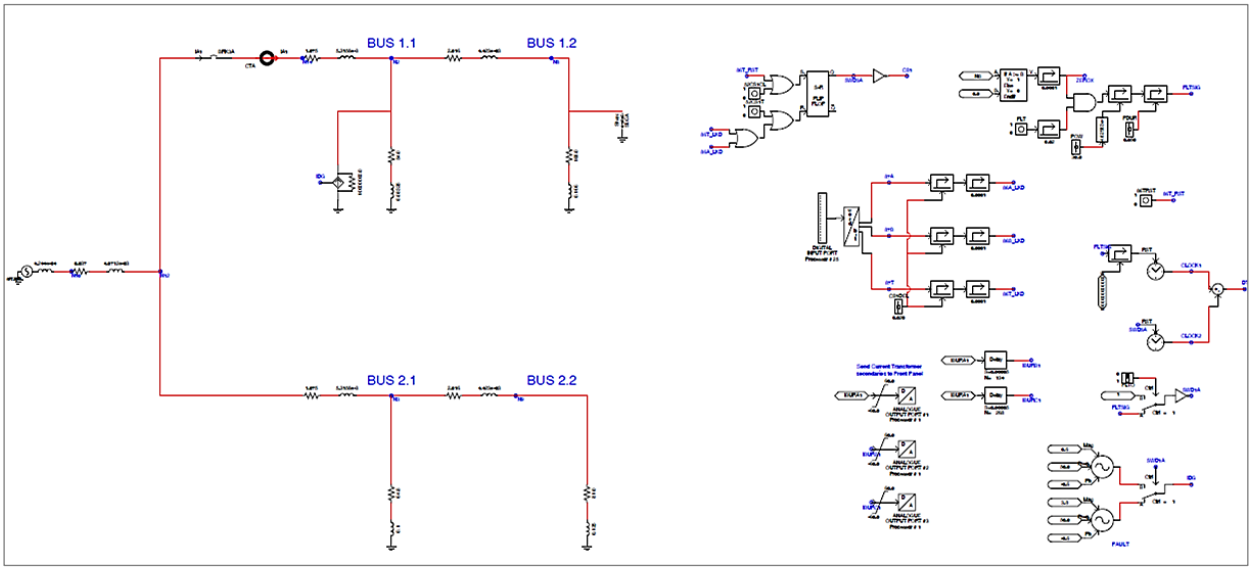
Σχήμα 4.8: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® (χωρίς ΜΔΠ, σφάλμα στον ζυγό 1.2).



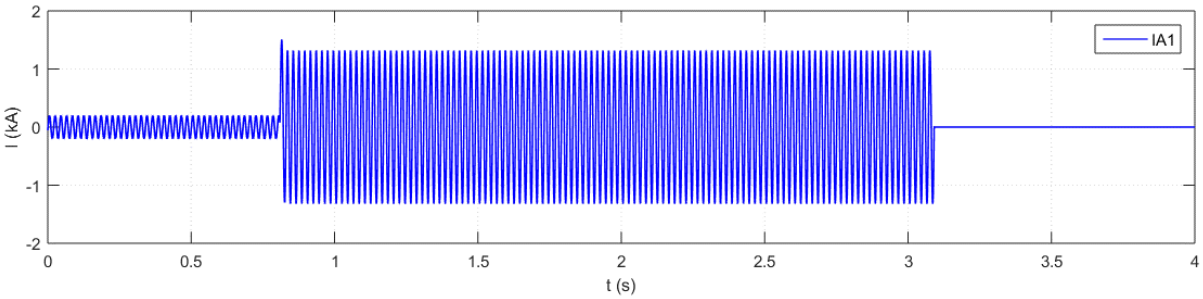
Σχήμα 4.9: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (χωρίς ΜΔΠ, σφάλμα στον ζυγό 1.2).

Ακολούθως, προσομοιώνεται το ίδιο σενάριο βραχυκυκλώματος με τη διαφορά ότι στον ζυγό 1.1 συνδέεται μεγάλη ΜΔΠ ισχύος 9×1,8 = 16,2 MW. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ΜΔΠ δίνονται στο Παράρτημα Β. Η μοντελοποίηση του δικτύου διανομής στο λογισμικό RSCAD για τη συγκεκριμένη δοκιμή φαίνεται στο Σχήμα 4.10, ενώ τα παλμογραφήματα των φασικών ρευμάτων σφάλματος δίνονται στα Σχήματα 4.11 και 4.12, όπως καταγράφηκαν από τον ψηφιακό προσομοιωτή RTDS® και τον Η/Ν προστασίας SEL–311B, αντίστοιχα. Το συνολικό ρεύμα σφάλματος αυξήθηκε από τα 2,12 kA στα 3,43 kA, όμως η συνεισφορά του κύριου Υ/Σ μειώθηκε από τα 2,12 kA στα 932 A, λόγω της παρουσίας μεγάλης ΜΔΠ μεταξύ του κύριου Υ/Σ και του σημείου σφάλματος.

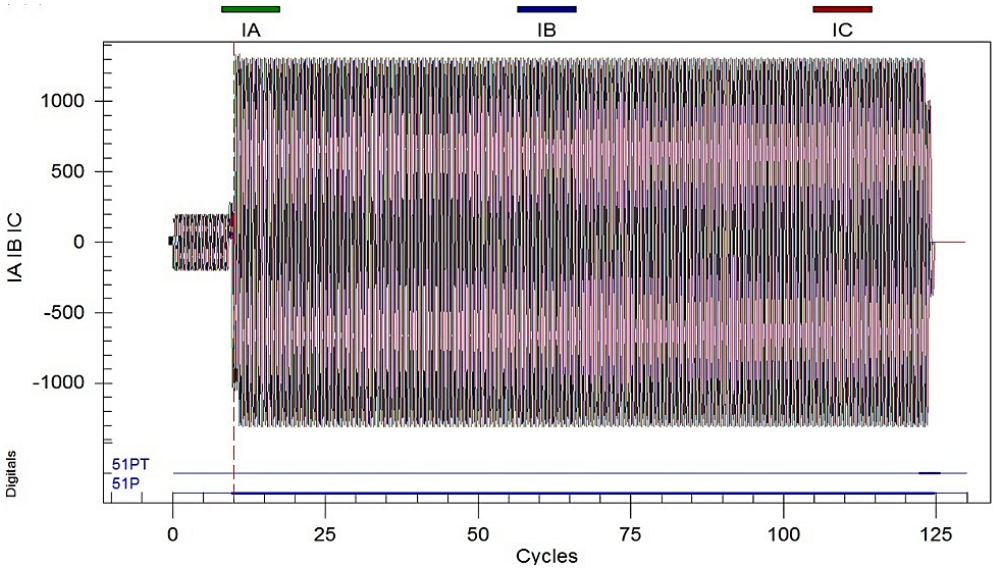
Η μειωμένη συνεισφορά από το σύστημα μεταφοράς στο βραχυκύκλωμα είχε ως αποτέλεσμα την καθυστερημένη λειτουργία του Η/Ν SEL–311B. Όπως φαίνεται στην καταγραφή του Σχήματος 4.12, το σφάλμα εκκαθαρίστηκε έπειτα από 115 κύκλους (2,3 s). Ο εξαιρετικά αργός χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος επιβεβαιώνει το ενδεχόμενο τύφλωσης της προστασίας και συνεπάγεται την εκτεταμένη βλάβη της προστατευόμενης γραμμής κορμού. Η αύξηση του χρόνου λειτουργίας του Η/Ν SEL–311B λόγω της μεταβολής του ρεύματος συνεισφοράς από τον κύριο Υ/Σ, αποτυπώνεται στο διάγραμμα ρεύματος–χρόνου του Σχήματος 4.13.



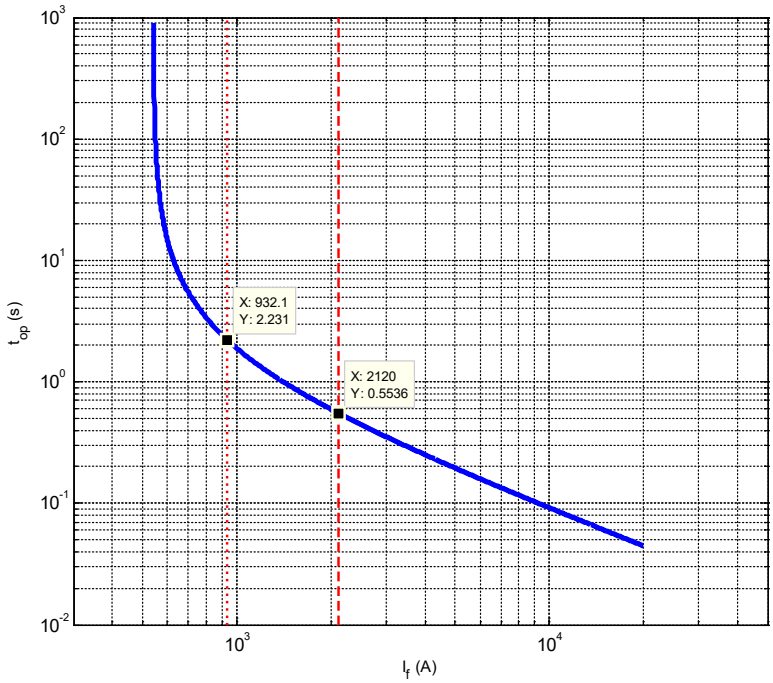
Σχήμα 4.10: Δίκτυο διανομής 5 ζυγών (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 1.2).



Σχήμα 4.11: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 1.2).



Σχήμα 4.12: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 1.2).



Σχήμα 4.13: Αύξηση χρόνου λειτουργίας Η/Ν SEL–311B για σφάλμα στον ζυγό 1.2 λόγω ΜΔΠ.

4.4.1.2 Δοκιμή Συμπαθητικής Λειτουργίας Προστασίας

Στη δοκιμή συμπαθητικής λειτουργίας της προστασίας, εξετάζεται η συνεισφορά μεγάλης ΜΔΠ σε σφάλμα γειτονικής γραμμής. Στο δίκτυο διανομής 5 ζυγών, η γραμμή κορμού 1.1 προστατεύεται από τον Η/Ν SEL–311B, όπως και στις προηγούμενες δοκιμές, ενώ η γραμμή κορμού 2.1 προστατεύεται από τον Η/Ν SEL–587. Η προστασία έναντι φασικών σφαλμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση απλών στοιχείων υπερέντασης 51P, οι τιμές ρύθμισης των οποίων δίνονται στον Πίνακα 4.3.

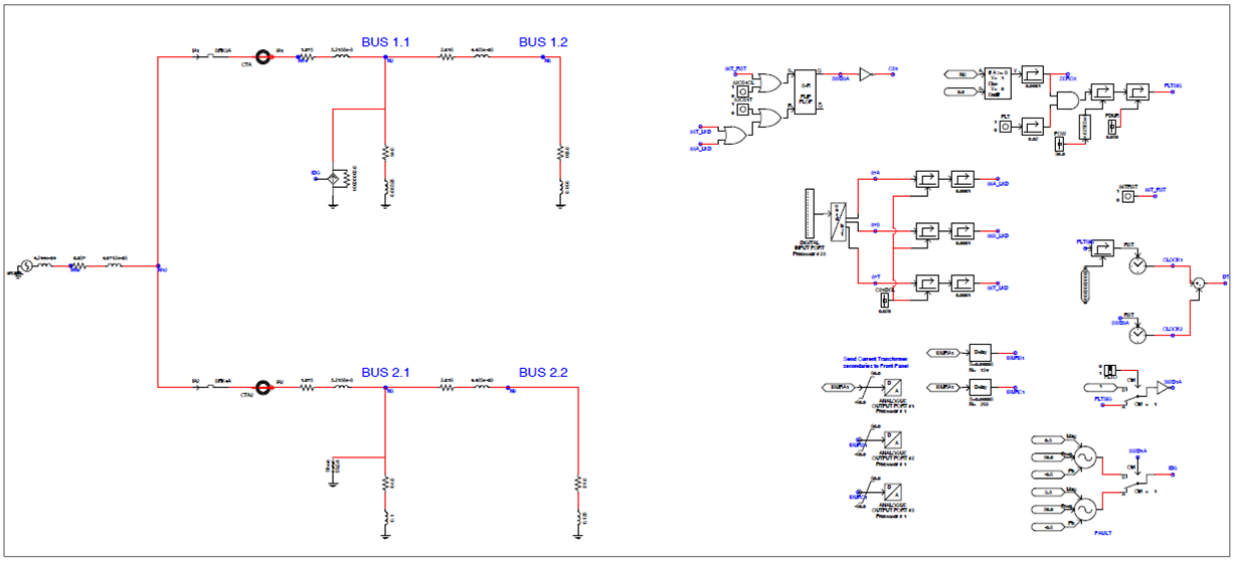
Πίνακας 4.3: Τιμές ρύθμισης Η/Ν προστασίας γραμμών 1.1 και 2.1

Η/Ν SEL–311B		**Η/Ν SEL–587**	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	**ΤΙΜΗ**	**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**	**ΤΙΜΗ**
Στοιχείο προστασίας	51P	Στοιχείο προστασίας	51P
Λόγος μετασχηματισμού Μ/Ε	800/5	Λόγος μετασχηματισμού Μ/Ε	800/1
Χαρακτηριστική λειτουργίας	IEC Class B, Curve C2 (VI)	Χαρακτηριστική λειτουργίας	IEC Class B, Curve C2 (SI)
Ένταση διέγερσης	2,06 A (sec.)	Ένταση διέγερσης	0,45 A (sec.)
Χρονικός πολλαπλασιαστής	0,10	Χρονικός πολλαπλασιαστής	0,15

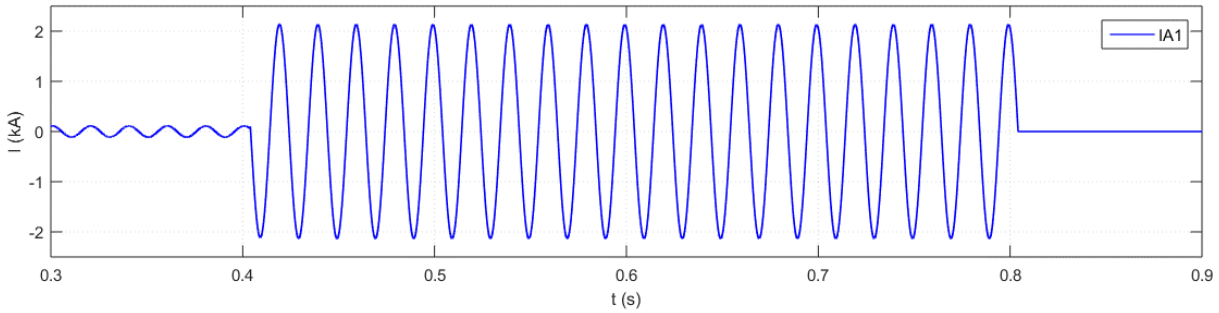
Στη συγκεκριμένη δοκιμή, προσομοιώνεται πλήρες τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 2.1. Η μοντελοποίηση του δικτύου διανομής στο λογισμικό RSCAD φαίνεται στο Σχήμα 4.14, ενώ τα παλμογραφήματα των φασικών ρευμάτων σφάλματος δίνονται στα Σχήματα 4.15 και 4.16, όπως καταγράφηκαν από τον ψηφιακό προσομοιωτή RTDS® και τον Η/Ν προστασίας SEL–311B, αντίστοιχα. Ο Η/Ν SEL–587 μετρά το συνολικό ρεύμα σφάλματος, το οποίο ανήλθε στα 3,95 kA στη συγκεκριμένη δοκιμή, ενώ ο Η/Ν SEL–311B μετρά τη συνεισφορά της ΜΔΠ, η οποία ήταν ίση με 1,51 kA. Ως πρωτεύουσα προστασία, ο Η/Ν SEL–587 θα έπρεπε να λειτουργήσει πρώτος, ενώ η λειτουργία του Η/Ν SEL–311B και η απρόσμενη διακοπή τροφοδοσίας της υγιούς γραμμής θα έπρεπε να αποτραπεί.

Όπως φαίνεται στην καταγραφή του Σχήματος 4.16, το στοιχείο υπερέντασης 51P του Η/Ν SEL–311B διεγέρθηκε από την αντίστροφη συνεισφορά της ΜΔΠ και εν τέλει λειτούργησε σε 20 κύκλους (0,4 s). Η πρωτεύουσα προστασία, δηλαδή ο Η/Ν SEL–587, λειτούργησε καθυστερημένα σε 0,56 s, όπως φαίνεται και στο παλμογράφημα του Σχήματος 4.17.

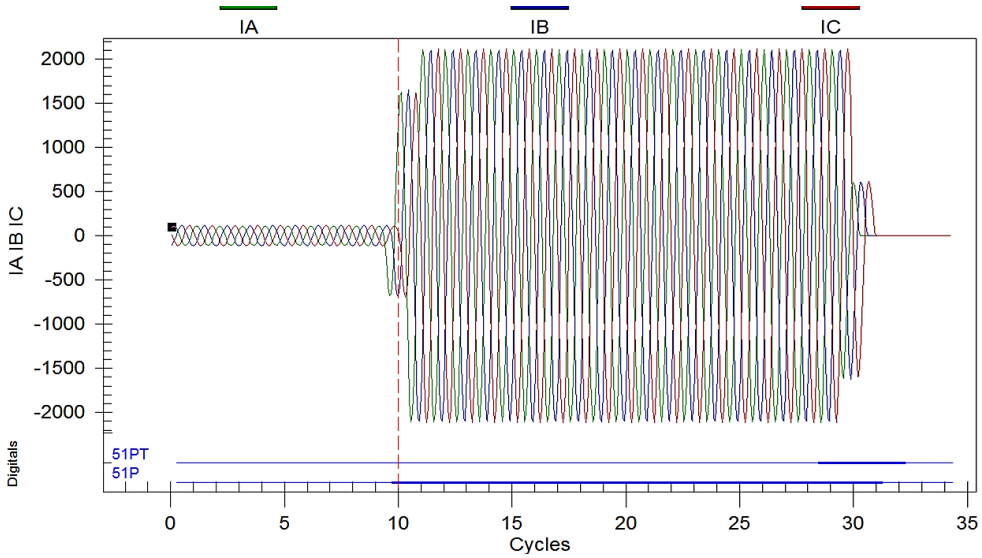
Οι χρόνοι λειτουργίας των δύο εξεταζόμενων Η/Ν και το μετρούμενο ρεύμα αποτυπώνονται στο διάγραμμα ρεύματος–χρόνου του Σχήματος 4.18. Όπως παρατηρείται, ο πραγματικός χρόνος λειτουργίας του Η/Ν SEL–311B (0,4 s) ήταν σχεδόν ταυτόσημος με τον θεωρητικό (0,377 s), ενώ προέκυψε μικρή απόκλιση μεταξύ πραγματικού (0,56 s) και θεωρητικού χρόνου (0,428 s) για τον Η/Ν SEL–587. Η εν λόγω απόκλιση οφείλεται στο γεγονός ότι στη δοκιμή κλειστού βρόχου το ρεύμα σφάλματος μειώθηκε μετά τη λειτουργία του Η/Ν SEL–311B και την αποσύνδεση της ΜΔΠ, ενώ ο θεωρητικός χρόνος προκύπτει με την υπόθεση ότι το αρχικό ρεύμα σφάλματος διατηρείται σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου.



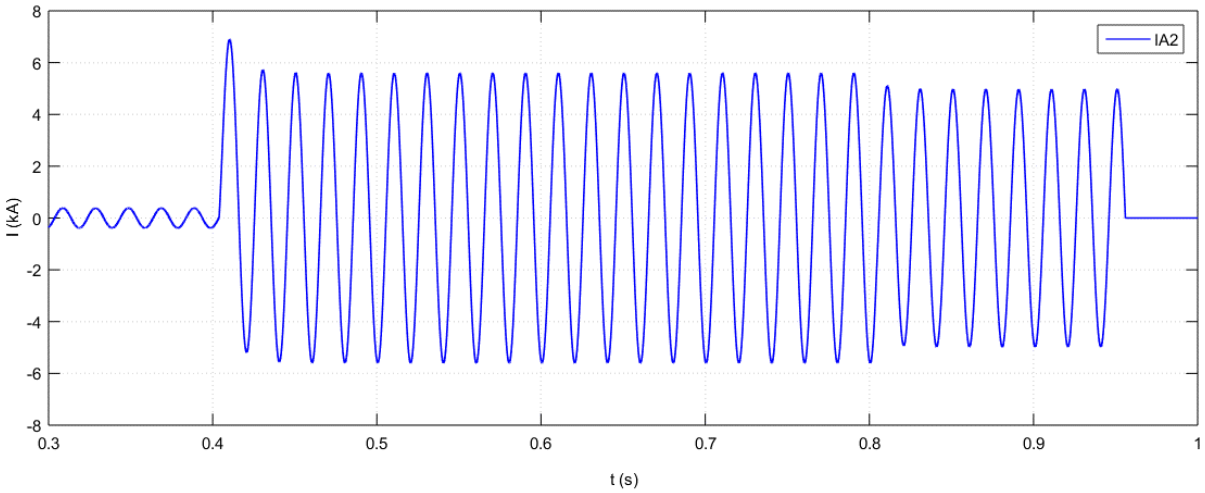
Σχήμα 4.14: Δίκτυο διανομής 5 ζυγών (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1).



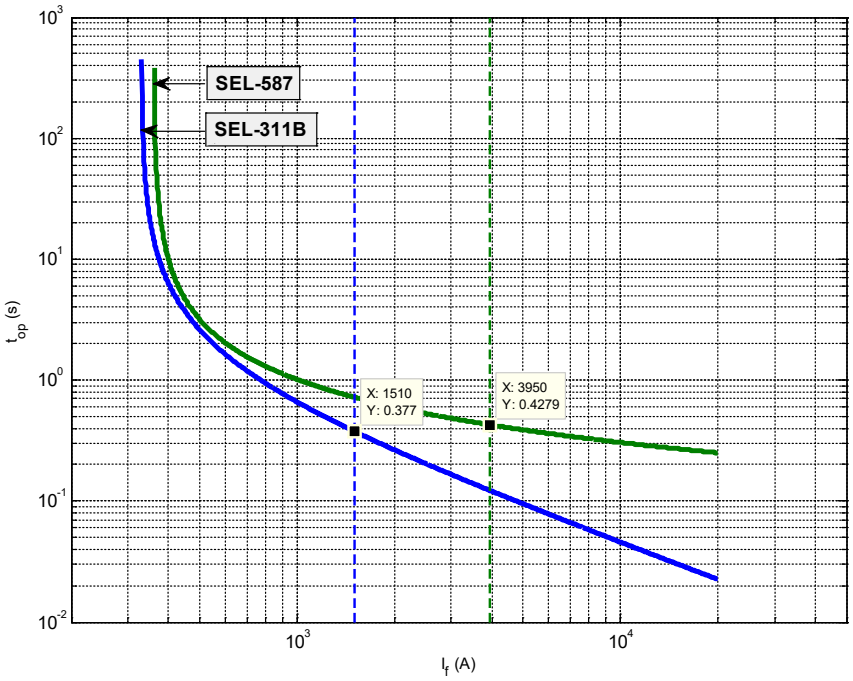
Σχήμα 4.15: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1).



Σχήμα 4.16: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1).



Σχήμα 4.17: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® στο σημείο εγκατάστασης του Η/Ν SEL–587 (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1).



Σχήμα 4.18: Χρόνοι λειτουργίας Η/Ν SEL–311B, SEL–587 (ΜΔΠ στον ζυγό 1.1, σφάλμα στον ζυγό 2.1).

4.4.2 Στάδιο 2: Έλεγχος Αλγορίθμου Προσαρμοστικής Προστασίας

Στις δοκιμές κλειστού βρόχου του δεύτερου σταδίου, εκτελούνται προσομοιώσεις αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου και ελέγχεται η προσαρμογή των ομάδων ρυθμίσεων στον Η/Ν SEL–311B. Τα σενάρια λειτουργίας που εξετάζονται, παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.1. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η κατάσταση των ΑΔΔ των ΜΔΠ αλλάζει στο προσομοιούμενο δίκτυο από τον ψηφιακό προσομοιωτή, σύμφωνα με το τρέχον σενάριο λειτουργίας, και στη συνέχεια η κεντρική μονάδα ελέγχου δίνει εντολή για ενεργοποίηση της κατάλληλης ομάδας ρυθμίσεων στον Η/Ν προστασίας μέσω ψηφιακών σημάτων.

Το Σχήμα 4.19 επιδεικνύει την επιτυχημένη προσαρμογή των ρυθμίσεων του υπό δοκιμή Η/Ν, έπειτα από τοπολογική μεταβολή στο δίκτυο διανομής. Πρόκειται για το αρχείο καταγραφής (log file) του Η/Ν SEL–311B, το οποίο αποτυπώνει όλα τα ενδιάμεσα βήματα επεξεργασίας της συσκευής, από τη στιγμή που δέχεται την εντολή για αλλαγή από τον λογικό ελεγκτή μέχρι την ολοκλήρωσή της. Στη συγκεκριμένη δοκιμή, το δίκτυο διανομής αρχικά λειτουργεί χωρίς ΜΔΠ και ο Η/Ν προστασίας χρησιμοποιεί την ομάδα ρυθμίσεων SG1. Τη χρονική στιγμή 10:22:22, πραγματοποιείται ένταξη της ΜΔΠ DG1 στο δίκτυο και ο Η/Ν SEL–311B δέχεται σήμα για αλλαγή ομάδας ρυθμίσεων από τη μονάδα ελέγχου του εργαστηριακού συστήματος.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.19, η ενεργοποίηση της νέας ομάδας ρυθμίσεων SG2 συνοδεύεται ορθώς από ταυτόχρονη απενεργοποίηση της τρέχουσας (SG1). Τέλος, παράγεται ενδεικτικό μήνυμα που επιβεβαιώνει την επιτυχή αλλαγή της ομάδας ρυθμίσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος που απαιτείται για την επανεκκίνηση των αλγορίθμων προστασίας, κατά την οποία εγγράφονται οι νέες ρυθμίσεις στη μόνιμη μνήμη EEPROM της συσκευής, είναι της τάξης των 1÷2 s. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τα στοιχεία προστασίας του Η/Ν είναι ανενεργά. Ως εκ τούτου, είναι κρίσιμη η πρόβλεψη επικουρικής προστασίας, η οποία θα καλύπτει διαρκώς το δίκτυο.

```
                                                    Active SG: SG1
10:22:22.798   IN103                Asserted   <-- Signal to activate SG2
10:22:22.808   IN102                Deasserted <-- Signal to deactivate SG1
10:22:22.898   SG2                  Asserted   <-- SG2 activated
10:22:22.898   SG1                  Deasserted <-- SG1 deactivated
10:22:24.763    Relay settings changed         <-- Successful transition from SG1 to SG2
........
```

Σχήμα 4.19: Καταγραφή αλλαγής ομάδας ρυθμίσεων στον Η/Ν SEL–311B.

4.4.3 Στάδιο 3: Έλεγχος Συνολικής Επίδοσης του Προσαρμοστικού Συστήματος Προστασίας

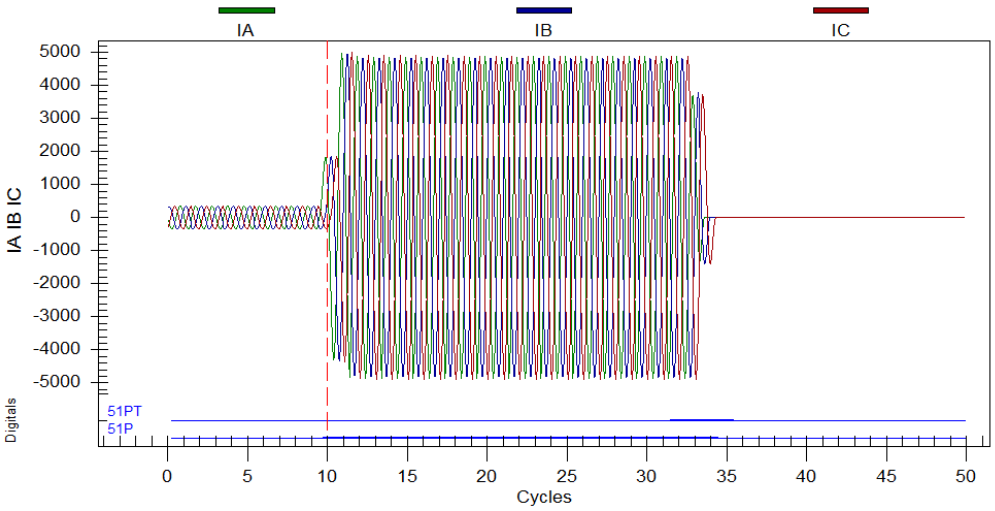
Στο τρίτο στάδιο δοκιμών, επαναλαμβάνονται προσομοιώσεις βραχυκυκλώματος όμοιες με αυτές του πρώτου σταδίου, με τη διαφορά ότι το προσαρμοστικό σύστημα προστασίας είναι πλέον σε λειτουργία. Σκοπός του τελικού σταδίου δοκιμών είναι ο έλεγχος της προτεινόμενης λύσης προστασίας και η αξιολόγηση της εφαρμογής της σε σύγχρονα δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή. Όπως και στις προηγούμενες δοκιμές, ο Η/Ν SEL–311B συμμετέχει ως πραγματική συσκευή και επιτελεί τον ρόλο του Η/Ν προστασίας γραμμής. Οι ομάδες ρυθμίσεών του παραμετροποιούνται κατάλληλα πριν τη θέση του προσαρμοστικού συστήματος προστασίας σε λειτουργία. Η προτεινόμενη εργαστηριακή διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 4.7, στη φάση εκτέλεσης των αρχικών και των τελικών δοκιμών.

(α) (β)

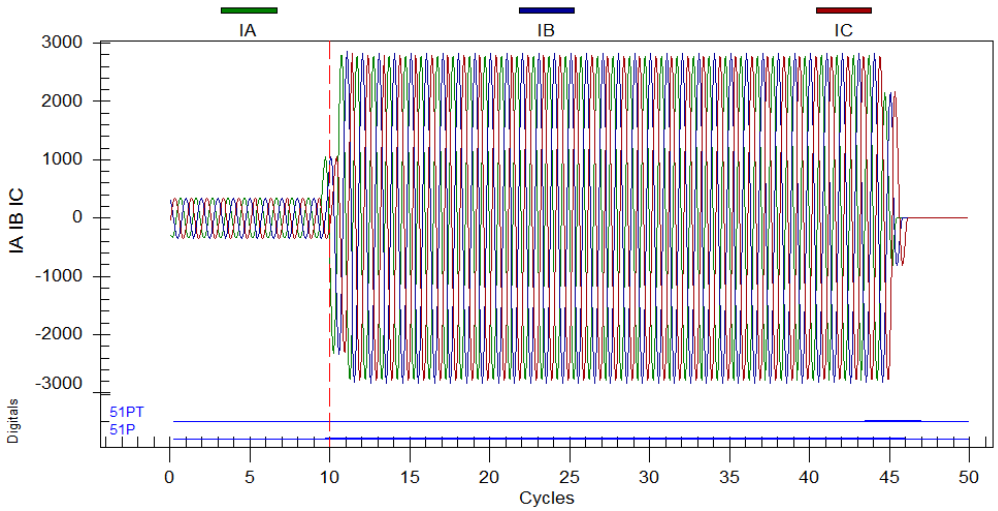
Εικόνα 4.7: Προσαρμοστικό σύστημα προστασίας Εργαστηρίου ΣΗΕ: (α) φάση αρχικών και (β) φάση τελικών δοκιμών.

4.4.3.1 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C1

Στην πρώτη δοκιμή, το δίκτυο διανομής 5 ζυγών λειτουργεί χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή και ο Η/Ν SEL–311B χρησιμοποιεί την αντίστοιχη ομάδα ρυθμίσεων SG1. Δύο περιπτώσεις συμμετρικού σφάλματος προσομοιώνονται, για να αξιολογηθεί η επίδοση του εξεταζόμενου Η/Ν ως πρωτεύουσα και ως δευτερεύουσα προστασία. Συγκεκριμένα, προσομοιώνεται τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 1.1, το οποίο εκκαθαρίστηκε από τον Η/Ν SEL–311B σε χρόνο 0,456 s, όπως φαίνεται και στο παλμογράφημα του Σχήματος 4.20. Επιπλέον, προσομοιώθηκε τριφασικό σφάλμα στο άκρο της κύριας γραμμής θεωρώντας αστοχία της πρωτεύουσας προστασίας R5 (Σχήμα 4.2). Το εν λόγω σφάλμα εκκαθαρίστηκε από τον Η/Ν SEL–311B, ο οποίος έδρασε ως δευτερεύουσα προστασία, έπειτα από 0,698 s, όπως δείχνει το παλμογράφημα του Σχήματος 4.21. Επισημαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις σφάλματος, ο Η/Ν SEL–311B μετρά το συνολικό ρεύμα σφάλματος, το οποίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από τον κύριο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Η επίδοση του Η/Ν SEL–311B ως πρωτεύουσα και ως δευτερεύουσα προστασία κρίνεται επαρκής.



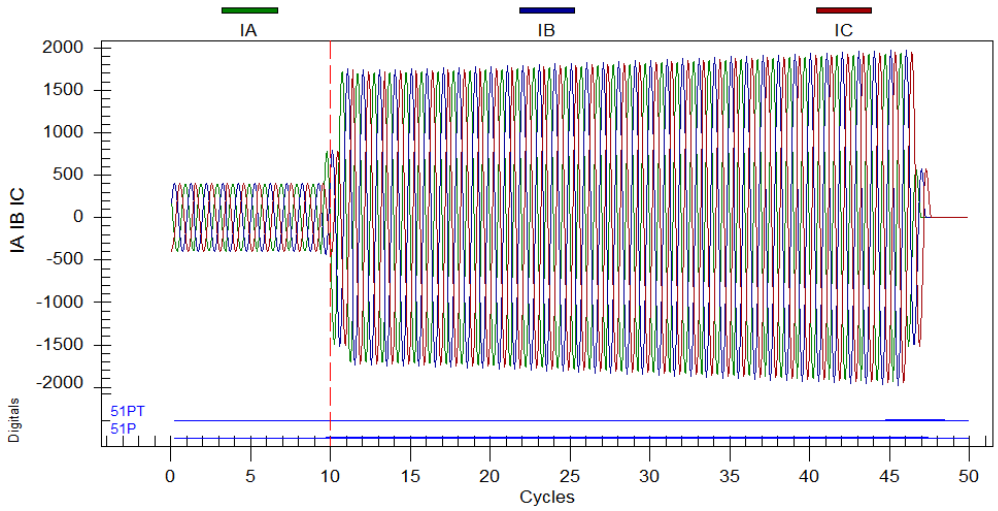
Σχήμα 4.20: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C1, σφάλμα στον ζυγό 1.1).



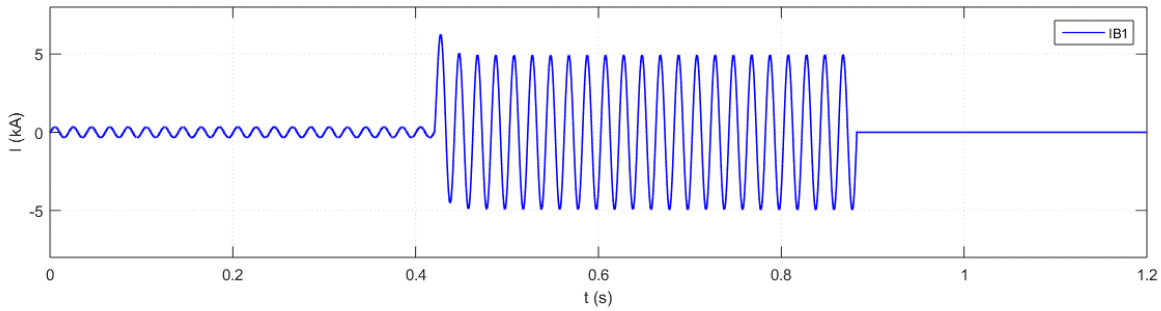
Σχήμα 4.21: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C1, σφάλμα στον ζυγό 1.2).

4.4.3.2 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C2

Στη δεύτερη δοκιμή, μεγάλη ΜΔΠ ισχύος 9×1,8 = 16,2 MW συνδέεται στον ζυγό 1.1 του δικτύου διανομής και προσομοιώνεται τριφασικό σφάλμα στους ζυγούς 1.2 και 2.1. Σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής είναι η επίδειξη της αποτελεσματικότητας των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας στην αντιμετώπιση των προβλημάτων τύφλωσης και συμπαθητικής λειτουργίας των Η/Ν προστασίας. Ο Η/Ν SEL–311B αρχικά προσαρμόζει επιτυχώς την ενεργή ομάδα ρυθμίσεων του από SG1 σε SG2. Στην προσομοίωση τριφασικού σφάλματος στον ζυγό 1.2, το σφάλμα εκκαθαρίστηκε από τον Η/Ν SEL–311B σε χρόνο 0,726 s, αντιμετωπίζοντας επιτυχώς το πρόβλημα τύφλωσης της προστασίας, ακόμη και υπό συνθήκες ελαχίστου σφάλματος. Υπενθυμίζεται ότι στην αντίστοιχη δοκιμή του πρώτου σταδίου, ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος ήταν 2,3 s. Η καταγραφή του Η/Ν SEL–311B από τη συγκεκριμένη δοκιμή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.22. Επιπρόσθετα, το Σχήμα 4.23 αποτυπώνει το ρεύμα που μετρά ο Η/Ν R7 σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος στον ζυγό 2.1. Το σφάλμα εκκαθαρίστηκε από την πρωτεύουσα προστασία σε χρόνο 0,454 s, χωρίς να παρατηρηθεί συμπαθητική λειτουργία του Η/Ν SEL–311B.



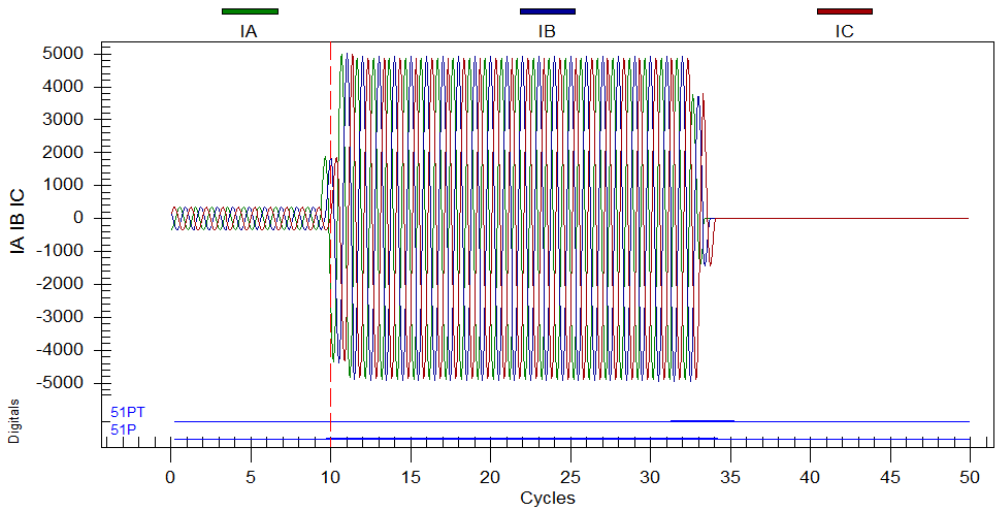
Σχήμα 4.22: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C2, σφάλμα στον ζυγό 1.2).



Σχήμα 4.23: Καταγραφή προσομοιωτή RDTS® στο σημείο εγκατάστασης του Η/Ν R7 (σενάριο λειτουργίας C2, σφάλμα στον ζυγό 2.1).

4.4.3.3 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C3

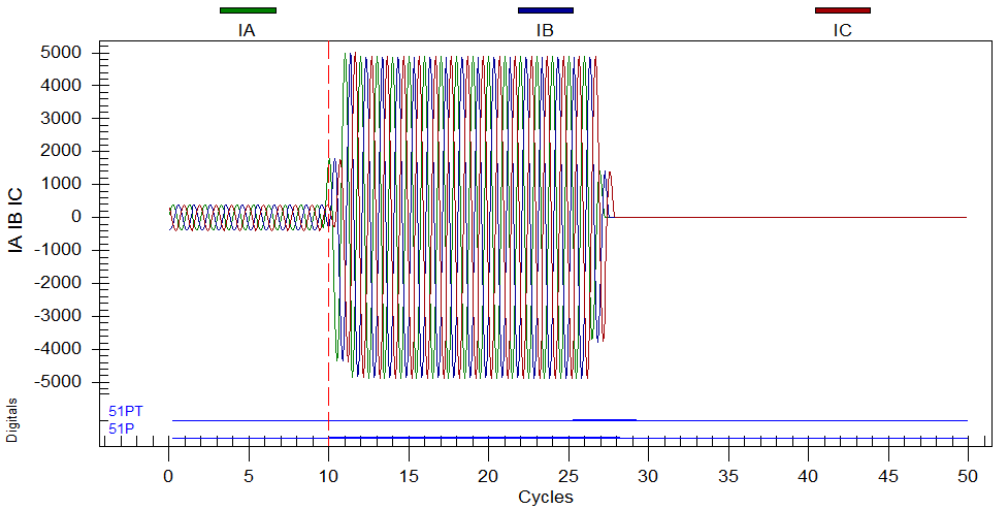
Στην τρίτη δοκιμή, η ΜΔΠ του ζυγού 1.1 αποσυνδέεται, ενώ συνδέεται ΜΔΠ ισχύος 2×1,8 = 3,6 MW στον ζυγό 2.1. Συμμετρικά σφάλματα προσομοιώνονται σε όλους τους ζυγούς του δικτύου. Σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής είναι η επιβεβαίωση της προσαρμογής και της επιλογικής συνεργασίας των προστασιών του δικτύου στο νέο λειτουργικό σενάριο. Ενδεικτικά, το καταγεγραμμένο σφάλμα στον ζυγό 1.1 από τον Η/Ν SEL–311B απεικονίζεται στο Σχήμα 4.24. Ο Η/Ν SEL–311B λειτούργησε ταχύτατα ως πρωτεύουσα προστασία και εκκαθάρισε το σφάλμα σε 0,455 s.



Σχήμα 4.24: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C3, σφάλμα στον ζυγό 1.1).

4.4.3.4 Δοκιμή Σεναρίου Λειτουργίας C4

Στην τελευταία δοκιμή, το δίκτυο διανομής λειτουργεί υπό συνθήκες μέγιστου βραχυκυκλώματος και με τις δύο ΜΔΠ συνδεδεμένες. Ομοίως με την προηγούμενη δοκιμή, συμμετρικά σφάλματα προσομοιώνονται σε όλους τους ζυγούς του δικτύου, με σκοπό την αξιολόγηση του πραγματικού και των προσομοιούμενων Η/Ν προστασίας. Η κατάλληλη προσαρμογή του Η/Ν SEL–311B και η επιλογική συνεργασία των Η/Ν προστασίας του δικτύου επιβεβαιώνεται και σε αυτό το σενάριο λειτουργίας. Ενδεικτικά, η απόκριση του Η/Ν SEL–311B σε τριφασικό σφάλμα στο πέρας της ζώνης προστασίας του (ζυγός 1.1) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.25. Το σφάλμα εκκαθαρίστηκε επιτυχώς έπειτα από 0,329 s.



Σχήμα 4.25: Καταγραφή Η/Ν SEL–311B (σενάριο λειτουργίας C4, σφάλμα στον ζυγό 1.1).

4.4.4 Συμπεράσματα Δοκιμών

Οι παραδοσιακές τεχνικές προστασίας αδυνατούν να καλύψουν πλήρως τα σύγχρονα δίκτυα διανομής. Όπως συνάγεται από τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών, η εφαρμογή προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας αποτελεί ενδεδειγμένη λύση για δίκτυα διανομής με διεσπαρμένες πηγές και μεταβλητή τοπολογία. Με τη χρήση ψηφιακών ή αριθμητικών Η/Ν που υποστηρίζουν πολλαπλές ομάδες ρυθμίσεων και την αυτόματη προσαρμογή τους βάσει της τρέχουσας λειτουργικής κατάστασης του δικτύου αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά τα πιθανά προβλήματα προστασίας του δικτύου από την έντονη παρουσία ΜΔΠ. Η ευαισθησία, η ταχύτητα και η επιλογικότητα της προστασίας εξασφαλίζονται με την εκπόνηση διεξοδικής μελέτης προσδιορισμού των ομάδων ρυθμίσεων των Η/Ν προστασίας, η οποία καλύπτει όλα τα πιθανά σενάρια λειτουργίας του δικτύου. Συστηματική μέθοδος υπολογισμού ρυθμίσεων για τα στοιχεία υπερέντασης των Η/Ν προστασίας με χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης παρουσιάζεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 5 της διατριβής. Λεπτομερής παρουσίαση των ομάδων ρυθμίσεων, όπως υπολογίστηκαν για τους Η/Ν του προσομοιούμενου δικτύου, δίνεται στην Παράγραφο 5.4.3.2.

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας στα σύγχρονα δίκτυα διανομής εισάγουν σημαντικές τεχνικές προκλήσεις, η αντιμετώπιση των οποίων είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της πλήρους και αδιάλειπτης προστασίας του δικτύου. Η πρώτη βασική πρόκληση ανακύπτει από τον περιορισμένο αριθμό των διαθέσιμων ομάδων ρυθμίσεων στους Η/Ν. Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της Ενότητας 4.1, οι προτεινόμενες λύσεις προσαρμοστικής προστασίας μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία προτείνει την ομαδοποίηση των παρεμφερών σεναρίων λειτουργίας, ως προς τις ροές φορτίων και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης, έτσι ώστε όλα τα πιθανά λειτουργικά σενάρια να καλύπτονται από τον διαθέσιμο αριθμό ομάδων ρυθμίσεων. Οι τιμές των ομάδων ρυθμίσεων των Η/Ν υπολογίζονται και φορτώνονται στις συσκευές πριν τη θέση του συστήματος σε λειτουργία. Στην εν λόγω κατηγορία ανήκει και η προτεινόμενη εργαστηριακή διάταξη της παρούσας διατριβής.

Εναλλακτικά, η δεύτερη κατηγορία λύσεων προσαρμοστικής προστασίας προτείνει τη χρήση μίας και μοναδικής ομάδας ρυθμίσεων στους Η/Ν, προσφέροντας ανεξαρτησία από τις λειτουργικές συνθήκες,

ο ακριβής προσδιορισμός των οποίων είναι αδύνατος εκ των προτέρων σε πολλές περιπτώσεις. Οι τιμές της ομάδας ρυθμίσεων υπολογίζονται αυτόματα και σε πραγματικό χρόνο, βάσει των τρεχουσών συνθηκών λειτουργίας, από ειδικό λογισμικό προσομοίωσης ΣΗΕ. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες στην πρακτική εφαρμογή της. Πρώτον, η πιθανότητα λανθασμένου προσδιορισμού ρυθμίσεων μέσω του αυτόματου υπολογισμού, καθώς και το ενδεχόμενο αποτυχημένης ή καθυστερημένης αποστολής και φόρτωσής τους στους Η/Ν, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της αξιοπιστίας της προστασίας. Επιπλέον, ο τρόπος αποστολής των υπολογισμένων ρυθμίσεων προς τους Η/Ν προστασίας παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα. Στην πράξη, η αποστολή των ρυθμίσεων θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω επικοινωνίας του λογισμικού προσομοίωσης με τους Η/Ν του συστήματος. Συνεπώς, η συγκεκριμένη λύση, εκτός από υποβάθμιση της αξιοπιστίας, οδηγεί και σε κατάλυση της αρχής της απλότητας, η οποία πρέπει να διέπει όλα τα συστήματα προστασίας.

Εκτός από τον περιορισμένο αριθμό των διαθέσιμων ομάδων ρυθμίσεων στους Η/Ν, ο χρόνος που απαιτείται για την εγγραφή των νέων ρυθμίσεων και την επανεκκίνηση των αλγορίθμων προστασίας (warm restart), κατά την αλλαγή της ενεργής ομάδας, αποτελεί πρόσθετη πρόκληση στην πρακτική εφαρμογή των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, διότι τα στοιχεία προστασίας των υπό προσαρμογή Η/Ν αδρανοποιούνται, με αποτέλεσμα να προκύπτει κενό προστασίας στην επιτηρούμενη ζώνη. Ο απαιτούμενος χρόνος αλλαγής της ενεργής ομάδας ρυθμίσεων ενδέχεται να διαφέρει σημαντικά μεταξύ συσκευών διαφορετικού κατασκευαστή, αλλά και μεταξύ μοντέλων Η/Ν του ίδιου κατασκευαστή. Επομένως, το νεκρό χρονικό διάστημα θα πρέπει να εκτιμάται ανεξάρτητα για κάθε εφαρμογή, και να παρέχεται εναλλακτικός τρόπος προστασίας στις ζώνες τις οποίες επιτηρούν οι Η/Ν του προσαρμοστικού συστήματος, τηρώντας την αρχή της διαθεσιμότητας της προστασίας. Επιπλέον τεχνική πρόκληση των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας αποτελεί η οικονομία στις απαιτούμενες επανεκκινήσεις των αλγορίθμων προστασίας, με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης εσωτερικού σφάλματος στους Η/Ν.

5. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΙΚΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ

5.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΓΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ

Η προστασία υπερέντασης (overcurrent protection) αποτελεί το απλούστερο και οικονομικότερο είδος προστασίας έναντι βραχυκυκλώματος, με καθολική εφαρμογή ανεξαρτήτως κλίμακας δικτύου [2], [4], [5]. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην υπέρβαση ενός προκαθορισμένου κατωφλίου έντασης από το ρεύμα σφάλματος. Εφαρμόζεται ως κύρια προστασία απλού εξοπλισμού ισχύος (π.χ. καλώδια ΧΤ ή ΜΤ, Μ/Σ μικρής ισχύος, γραμμές διανομής, μικροί κινητήρες) και ως επικουρική σε πιο κρίσιμες συνιστώσες του ηλεκτρικού δικτύου (π.χ. Μ/Σ μεγάλης ισχύος, γραμμές μεταφοράς, μεγάλοι κινητήρες, γεννήτριες). Προς αποφυγή σύγχυσης, σημειώνεται ότι ο όρος υπερένταση χρησιμοποιείται για ρεύμα έντασης τουλάχιστον διπλάσιας της ονομαστικής τιμής του προστατευόμενου εξοπλισμού και αναφέρεται σε βραχυκύκλωμα, ενώ αντίθετα ο όρος υπερφόρτιση χρησιμοποιείται για ρεύμα έντασης μεταξύ της ονομαστικής τιμής του εξοπλισμού και της διπλάσιας αυτής. Στο εξής, κάθε μέσο προστασίας υπερέντασης (Η/Ν υπερέντασης, στοιχείο υπερέντασης ψηφιακού Η/Ν πολλαπλών λειτουργιών, Δ/ΑΕ, ασφάλεια κτλ.) θα αναφέρεται απλώς ως στοιχείο υπερέντασης για την οικονομία του λόγου.

Τα απλά στοιχεία υπερέντασης (κωδικοί ANSI/IEEE 50, 51 για στοιχεία σταθερού και αντιστρόφου χρόνου, αντίστοιχα) επιτηρούν την ένταση του ρεύματος στον προστατευόμενο εξοπλισμό, χωρίς να διακρίνουν τη φορά του (non-directional overcurrent elements). Αντίθετα, τα κατευθυντικά στοιχεία υπερέντασης (directional overcurrent elements), ή αλλιώς στοιχεία υπερέντασης–κατεύθυνσης (κωδικός ANSI/IEEE 67), έχουν την ικανότητα αναγνώρισης της φοράς του ρεύματος σφάλματος, βάσει της διαφοράς φάσης μεταξύ του μεγέθους λειτουργίας (operating quantity) και του μεγέθους αναφοράς ή πόλωσης (reference ή polarizing quantity). Ως μέγεθος αναφοράς επιλέγεται κατάλληλος φασιθέτης, του οποίου η γωνία παραμένει σταθερή ή μεταβάλλεται ελάχιστα υπό οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας. Αντίθετα, ως μέγεθος λειτουργίας επιλέγεται φασιθέτης, του οποίου το μέτρο και η γωνία μεταβάλλονται σημαντικά σε περίπτωση ανωμαλίας, ως προς την κανονική λειτουργία, διακρίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις συνθήκες σφάλματος. Η παροχή του μεγέθους αναφοράς στον σχετικό Η/Ν, επιτυγχάνεται με τη χρήση ξεχωριστού Μ/Τ ή Μ/Ε, ανάλογα με την τεχνική πόλωσης που εφαρμόζεται, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος της εφαρμογής.

Παραδοσιακά, κάθε φάση του προστατευόμενου κυκλώματος διέθετε ξεχωριστό κατευθυντικό στοιχείο, το οποίο χρησιμοποιούσε ως μέγεθος λειτουργίας το ρεύμα της αντίστοιχης φάσης, δηλαδή I_A, I_B, I_C και ως μέγεθος αναφοράς την πολική τάση V_{BC}, V_{CA}, V_{AB}, αντίστοιχα [197]. Η συγκεκριμένη τεχνική πόλωσης, γνωστή και ως «Σύνδεση 90°» [5], είναι κατάλληλη για τη διάκριση της φοράς ρεύματος τριφασικού σφάλματος, έχει όμως προβληματική συμπεριφορά στην περίπτωση εξωτερικού ασύμμετρου σφάλματος [198]. Αξιοποιώντας την προηγούμενη θεμελιώδη τεχνική, οι οίκοι κατασκευής Η/Ν εξέλιξαν τους αλγορίθμους τους, με στόχο τη βελτίωση της εμπιστευσιμότητας και της ασφάλειας του συγκεκριμένου είδους προστασίας. Όσον αφορά την ανίχνευση σφαλμάτων γης, ως μεγέθη λειτουργίας και αναφοράς χρησιμοποιούνται οι φασιθέτες έντασης ή τάσης, μηδενικής ή αρνητικής ακολουθίας, με μέτρηση από Μ/Ε ή Μ/Τ κατάλληλης συνδεσμολογίας ή με εσωτερικό υπολογισμό από τον Η/Ν.

Ο Πίνακας 5.1 συγκεντρώνει τα βασικά μεγέθη λειτουργίας και αναφοράς που χρησιμοποιούνται για την πόλωση των κατευθυντικών στοιχείων υπερέντασης στους σύγχρονους Η/Ν, χωρίς να απεικονίζεται τυχόν περαιτέρω εσωτερική επεξεργασία (π.χ. στροφή φασιθετών, αριθμητική πράξη μεγεθών, τάση πόλωσης με μνήμη), καθώς επίσης και τα σφάλματα που ανιχνεύονται ανά περίπτωση. Συμπεραίνεται ότι η πόλωση με χρήση ρεύματος και τάσης αρνητικής ακολουθίας είναι κατάλληλη για την ανίχνευση ασύμμετρων σφαλμάτων, ενώ ο συνδυασμός των μεγεθών θετικής και αρνητικής ακολουθίας καθιστά δυνατή την ανίχνευση όλων των ειδών σφάλματος, με χρήση ενός μόνου στοιχείου. Πέραν των ακόλουθων βασικών τεχνικών, έχουν αναπτυχθεί επιπλέον προηγμένοι αλγόριθμοι, οι οποίοι αυξάνουν την αξιοπιστία των κατευθυντικών στοιχείων, όπως είναι για παράδειγμα η μέθοδος σύνθετης αντίστασης αρνητικής ακολουθίας [199].

Πίνακας 5.1: Βασικές τεχνικές πόλωσης στοιχείων υπερέντασης–κατεύθυνσης

ΜΕΓΕΘΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ
I_A, I_B, I_C	V_{BC}, V_{CA}, V_{AB}	3ph
I_1	V_1	3ph
I_2	V_2	2ph, 2pg, 1pg
$f(I_1, I_2)$	$f(V_1, V_2)$	3ph, 2ph, 2pg, 1pg
I_0	V_0	2pg, 1pg
I_0	I_N (ρεύμα ουδετέρου κόμβου Μ/Σ)	2pg, 1pg
I_0	$f(I_0, V_0)$	2pg, 1pg

5.1.1 Παράμετροι Ρύθμισης Στοιχείων Υπερέντασης

Τα απλά στοιχεία υπερέντασης των σύγχρονων Η/Ν ρυθμίζονται ως προς την ένταση διέγερσής τους, ως προς τον χρόνο καθυστέρησης της λειτουργίας τους, καθώς επίσης και ως προς τη χαρακτηριστική λειτουργίας τους. Τα στοιχεία υπερέντασης που λειτουργούν ακαριαία, όταν το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπερβεί την ένταση διέγερσής τους, ονομάζονται στιγμιαία στοιχεία υπερέντασης (instantaneous overcurrent elements). Αντίθετα, τα στοιχεία υπερέντασης που λειτουργούν με χρονική καθυστέρηση διακρίνονται σε:

- στοιχεία υπερέντασης σταθερού χρόνου (definite–time overcurrent elements), τα οποία λειτουργούν με συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση, ανεξάρτητα από το ύψος της υπερέντασης,
- στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου (inverse–time overcurrent elements), των οποίων ο χρόνος λειτουργίας μειώνεται, άρα η ταχύτητά τους αυξάνεται, όσο η υπερένταση αυξάνεται.

Η λειτουργία των στιγμιαίων στοιχείων υπερέντασης βασίζεται στο κριτήριο της υπέρβασης της έντασης διέγερσης, ενώ τα στοιχεία υπερέντασης σταθερού χρόνου λειτουργούν όταν η υπέρβαση της έντασης διέγερσης διαρκέσει για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της τιμής ρύθμισης. Σε περίπτωση πτώσης της υπερέντασης κάτω από την ένταση διέγερσης, προτού εξαντληθεί ο χρόνος που ορίζει η τιμή ρύθμισης, τα στοιχεία υπερέντασης σταθερού χρόνου αποδιεγείρονται και επαναφέρονται (reset) ακαριαία.

Η λειτουργία των στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου είναι πιο πολύπλοκη και διέπεται από την εξίσωση (5.1) [98], [99]:

$$t_{op} = TD\left(\frac{A}{M^B - 1} + C\right) \tag{5.1}$$

όπου, t_{op} ο χρόνος λειτουργίας του στοιχείου υπερέντασης, TD ο χρονικός πολλαπλασιαστής, M ο λόγος του ρεύματος σφάλματος προς την ένταση διέγερσης του στοιχείου και A, B, C σταθερές παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν τον τύπο της χαρακτηριστικής εξίσωσης.

Η εξίσωση (5.1) αναπαριστά την περιστροφική κίνηση δίσκου, προσομοιώνοντας την απόκριση των ηλεκτρομηχανικών Η/Ν πρώτης γενιάς κατά τη διάρκεια διέγερσής τους. Σημειώνεται ότι οι σύγχρονοι

Η/Ν υποστηρίζουν ακαριαία επαναφορά, επαναφορά σταθερού χρόνου ή επαναφορά αντιστρόφου χρόνου, με χαρακτηριστική εξίσωση όμοια της (5.1) κατά την αποδιέγερσή τους. Στο Παράρτημα Α, αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρομηχανικών Η/Ν και παράλληλα αποδεικνύονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις λειτουργίας και επαναφοράς των στοιχείων υπερέντασης, όπως υλοποιούνται και στους ψηφιακούς Η/Ν τελευταίας γενιάς. Ο Πίνακας 5.2 συγκεντρώνει τους πλέον διαδεδομένους τύπους χαρακτηριστικής εξίσωσης αντιστρόφου χρόνου.

Πίνακας 5.2: Τυποποιημένες χαρακτηριστικές εξισώσεις στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου

ΤΥΠΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ	ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ	*A*	*B*	*C*
IEC Standard Inverse (Type A)	European (IEC)	0,14	0,02	0
IEC Very Inverse (Type B)		13,5	1	0
IEC Extremely Inverse (Type C)		80	2	0
UK Long Time Inverse		120	1	0
FR Short Time Inverse		0,05	0,04	0
IEEE Moderately Inverse	North American (ANSI/IEEE)	0,0515	0,02	0,114
IEEE Very Inverse		19,61	2	0,491
IEEE Extremely Inverse		28,2	2	0,1217
US CO8 Inverse		5,95	2	0,18
US CO2 Short Time Inverse		0,02394	0,02	0,01694

Επιπλέον των προηγούμενων βασικών παραμέτρων, τα στοιχεία υπερέντασης–κατεύθυνσης ρυθμίζονται ως προς τη μέθοδο πόλωσής τους, ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος προς ανίχνευση, καθώς επίσης και ως προς τη χαρακτηριστική γωνία (relay characteristic angle, RCA), ή γωνία μέγιστης ροπής (maximum torque angle, MTA), βάσει της οποίας ορίζονται οι περιοχές θετικής και αρνητικής ροπής [5]. Όταν ο φασιθέτης λειτουργίας βρίσκεται εντός της περιοχής θετικής ροπής, το κατευθυντικό στοιχείο αντιλαμβάνεται σφάλμα ορθής φοράς (forward fault), ενώ σε αντίθετη περίπτωση, αντιλαμβάνεται σφάλμα αντίθετης φοράς (reverse fault).

5.1.2 Εφαρμογές Προστασίας Υπερέντασης

Η εφαρμογή των στοιχείων υπερέντασης εξαρτάται άμεσα από την κλίμακα του δικτύου και την κρισιμότητα του προστατευόμενου εξοπλισμού, ενώ η επιλογή μεταξύ απλού και κατευθυντικού στοιχείου υπερέντασης πραγματοποιείται με κριτήριο την αναμενόμενη φορά των ρευμάτων βραχυκύκλωσης [15]. Τα απλά στοιχεία υπερέντασης εφαρμόζονται ως κύρια προστασία σε κλάδους ακτινικών δικτύων (π.χ. συμβατικά δίκτυα διανομής, βιομηχανικά δίκτυα, δημόσια δίκτυα ΧΤ), και ως επικουρική προστασία σε κρισιμότερο εξοπλισμό ισχύος (π.χ. Μ/Σ ισχύος, γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες). Από την άλλη πλευρά, τα στοιχεία υπερέντασης–κατεύθυνσης εφαρμόζονται σε δίκτυα ή περιοχές δικτύων, όπου η φορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης δεν είναι προβλέψιμη (π.χ. βροχοειδή συστήματα μεταφοράς, Υ/Σ με παραλληλισμένους Μ/Σ, αγείωτα δίκτυα με μεγάλα μήκη καλωδίων) [4].

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, η εφαρμογή απλών μέσων προστασίας υπερέντασης (Η/Ν υπερέντασης, Δ/ΑΕ, ασφάλειες) είχε επικρατήσει στα συμβατικά δίκτυα διανομής ΜΤ και ΧΤ έως σήμερα, ενώ πλέον στα σύγχρονα δίκτυα διανομής με ΜΔΠ εφαρμόζονται στοιχεία υπερέντασης–κατεύθυνσης. Τα στοιχεία υπερέντασης–κατεύθυνσης (67P, 67G) εφαρμόζονται ως πρωτεύουσα προστασία και σε δίκτυα υπομεταφοράς. Στα συστήματα μεταφοράς, κύρια προστασία παρέχουν τα στοιχεία αποστάσεως (21P, 21G), ενώ τα στοιχεία 67P και 67G των Η/Ν προστασίας γραμμής χρησιμοποιούνται ως επικουρική προστασία. Τα απλά στοιχεία υπερέντασης φάσης και γης (50P, 51P, 50G, 51G) χρησιμοποιούνται συνήθως ως επικουρική προστασία έκτακτης ανάγκης (emergency), σε περίπτωση απώλειας της τροφοδοσίας από τους Μ/Τ (loss of potential) [200]. Ειδικά, τα στοιχεία 50G και 51G εφαρμόζονταν παλαιότερα και ως κύρια προστασία σε γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους [201]. Επίσης στο παρελθόν, τα στοιχεία 67G επιλέγονταν αντί των στοιχείων 21G ως κύρια προστασία των

γραμμών μεταφοράς, χάρη στη μεγάλη ευαισθησία που επιτυγχάνουν και κατ' επέκταση στην ικανότητά τους να ανιχνεύουν σφάλματα γης με μεγάλη αντίσταση σφάλματος [202].

Η προστασία υπερέντασης δεν αποτελεί είδος προστασίας μονάδας, διεγείρεται δηλαδή και σε σφάλματα εκτός της ζώνης επιτήρησής της. Επομένως, απαιτείται επιλογική συνεργασία μεταξύ της πρωτεύουσας προστασίας και των γειτονικών στοιχείων υπερέντασης που παρέχουν δευτερεύουσα προστασία, με κατάλληλη διαβάθμιση του χρόνου λειτουργίας τους [1], [2], [4], [5]. Η διαφορά στον χρόνο λειτουργίας μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας καλείται περιθώριο χρονικής διαβάθμισης (grading margin ή coordination time interval). Το ελάχιστο επιτρεπτό περιθώριο χρονικής διαβάθμισης προσδιορίζεται πάντα από την ασφαλή πλευρά, λαμβάνοντας υπόψη:

- τον συνολικό χρόνο ανοίγματος του Δ/Ι, δηλαδή το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ο Η/Ν κλείσει την αντίστοιχη επαφή εξόδου του και αποστείλει εντολή πτώσης προς τον Δ/Ι, έως ότου ολοκληρωθεί η σβέση του ηλεκτρικού τόξου,
- το εγγενές σφάλμα υπολογισμού του στοιχείου υπερέντασης, με πιθανή συνέπεια τη μικρή καθυστέρηση στη λειτουργία του,
- το αναμενόμενο σφάλμα μέτρησης των Μ/Ε,
- τον χρόνο υπερακόντισης του στοιχείου υπερέντασης (overshoot ή overtravel time), όταν πρόκειται για ηλεκτρομηχανικούς Η/Ν, ή τον χρόνο υστέρησης (retardation time), όταν πρόκειται για Η/Ν νεότερης γενιάς,
- επιπλέον περιθώριο ασφαλείας, για την κάλυψη πιθανής περαιτέρω καθυστέρησης της πρωτεύουσας προστασίας, εξαιτίας κορεσμού των Μ/Ε, παρουσίας βοηθητικού Η/Ν μανδάλωσης στο κύκλωμα μεταβίβασης εντολής πτώσης στον Δ/Ι κτλ.

Σύμφωνα με την οδηγία [203], το ελάχιστο επιτρεπτό περιθώριο χρονικής διαβάθμισης για τους ηλεκτρομηχανικούς Η/Ν προσδιορίζεται στα 0,3 s, με τυπική τιμή τα 0,4 s, ενώ για τους στατικούς Η/Ν στα 0,2 s, με τυπική τιμή τα 0,3 s. Σε εφαρμογές με σύγχρονους ψηφιακούς ή αριθμητικούς Η/Ν, το περιθώριο χρονικής διαβάθμισης θεωρείται ασφαλές, όταν κυμαίνεται μεταξύ 0,2 s και 0,25 s. Αναλυτική σχέση υπολογισμού του περιθωρίου χρονικής διαβάθμισης, λαμβάνοντας υπόψη και τον χρόνο λειτουργίας του στοιχείου υπερέντασης, δίνεται στην αναφορά [4].

5.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

5.2.1 Ανασκόπηση Προτεινόμενων Μεθόδων Βελτιστοποίησης

Ο υπολογισμός των τιμών ρύθμισης και η επιλογική συνεργασία των στοιχείων υπερέντασης σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξαρτήτως κλίμακας, τοπολογίας και πλήθους πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί γενικά να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, με αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση τον συνολικό χρόνο λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης. Το εν λόγω πρόβλημα βελτιστοποίησης υπόκειται σε κατάλληλους περιορισμούς, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός αξιόπιστου συστήματος προστασίας (ευαισθησία, επιλογικότητα, ταχύτητα), καθώς και την πολιτική ρύθμισης των προστασιών που επιθυμεί να εφαρμόσει ο μελετητής.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχει προταθεί πληθώρα μεθόδων υπολογισμού βέλτιστων ρυθμίσεων για Η/Ν υπερέντασης–κατεύθυνσης σε συστήματα μεταφοράς, υπομεταφοράς και δίκτυα διανομής με ΜΔΠ. Οι προτεινόμενες μέθοδοι διαφοροποιούνται κυρίως ως προς το μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται, το οποίο εξαρτάται από τις μεταβλητές του προβλήματος, τη μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιείται, καθώς και τις παραδοχές, στις οποίες στηρίζεται η ανάλυσή τους. Στον Πίνακα 5.3, καταγράφονται με χρονολογική σειρά οι κυριότερες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά, με συνοπτική αναφορά στα μοντέλα βελτιστοποίησης και τους αλγορίθμους επίλυσης που προτείνονται, καθώς επίσης και στην κύρια συνεισφορά τους.

Πίνακας 5.3: Κύριες δημοσιεύσεις επί του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας Η/Ν υπερέντασης–κατεύθυνσης

ΕΤΟΣ	ΠΡΩΤΟΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΚΥΡΙΑ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ
1988	A. J. Urdaneta	[204]	LP, NLP	Simplex, Reduced Gradient	Συστήματα Μεταφοράς	Πρώτη μαθηματική διατύπωση του τεχνικού προβλήματος.
1996	A. J. Urdaneta	[205]	LP	Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Προσδιορισμός του απαιτούμενου αριθμού Η/Ν υπερέντασης προς αναρρύθμιση, έπειτα από μόνιμη αλλαγή της τοπολογίας του συστήματος.
1996	B. Chattopadhyay	[206]	LP	Two-phase Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Προσαρμογή ρυθμίσεων βάσει της τρέχουσας λειτουργικής κατάστασης και τοπολογίας.
1997	A. J. Urdaneta	[207]	LP	Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Εισαγωγή περιορισμών αλλαγής τοπολογίας του συστήματος κατά την εκκαθάριση του σφάλματος και εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρομηχανικών Η/Ν υπερέντασης.
1999	L. G. Perez	[208]	LP	Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Εισαγωγή περιορισμών επιλογικής συνεργασίας με Η/Ν αποστάσεως και Η/Ν αστοχίας Δ/Ι.
2006	H. H. Zeineldin	[209]	MINLP	Hybrid IPM-PSO	Συστήματα Μεταφοράς	Παρουσίαση μοντέλου μεικτού ακέραιου-μη γραμμικού προγραμματισμού και εφαρμογή προηγμένης μεθευρετικής μεθόδου.
2006	D. Birla	[210]	NLP	SQP	Συστήματα Μεταφοράς	Προσθήκη έντασης διέγερσης Η/Ν υπερέντασης στις μεταβλητές του προβλήματος.
2007	D. Birla	[211]	NLP	SQP	Συστήματα Μεταφοράς	Προσθήκη περιορισμών για την αποτροπή συμπαθητικής λειτουργίας των Η/Ν υπερέντασης.
2007	M. M. Mansour	[212]	LP	PSO	Συστήματα Μεταφοράς	Εφαρμογή μεθευρετικής μεθόδου υψηλότερης επίδοσης, συγκριτικά με τις μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού.
2009	A. S. Noghabi	[213]	MINLP	Hybrid GA-Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Εύρωστη μέθοδος που ικανοποιεί πολλούς περιορισμούς ταυτόχρονα.
2010	A. S. Noghabi	[214]	ILP	Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Προσαρμογή περιορισμών λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των αλλαγών τοπολογίας.
2011	P. P. Bedekar	[215]	NLP	Hybrid GA-SQP	Συστήματα Μεταφοράς	Συνδυασμός πλεονεκτημάτων των γενετικών αλγορίθμων και των τεχνικών βελτιστοποίησης.
2012	T. Amraee	[216]	MINLP	Seeker	Συστήματα Μεταφοράς	Υψηλή επίδοση αλγορίθμου στην επίλυση προβλημάτων μεικτού ακέραιου-μη γραμμικού προγραμματισμού.
2013	H. H. Zeineldin	[217]	NLP	Reduced Gradient	Δίκτυα Διανομής με ΜΔΠ	Εισαγωγή χρόνων λειτουργίας δευτερεύουσας προστασίας στην αντικειμενική συνάρτηση. Υπολογισμός μέγιστης διείσδυσης ΜΔΠ για την αποφυγή προβλημάτων προστασίας.

ΕΤΟΣ	ΠΡΩΤΟΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΚΥΡΙΑ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ
2015	R. Corrêa	[218]	BIP	CPLEX	Συστήματα Υπομεταφοράς & Δίκτυα Διανομής	Μοντέλο υπολογισμού διακριτών τιμών ρύθμισης για τον χρονικό πολλαπλασιαστή και την ένταση διέγερσης των Η/Ν υπερέντασης.
2015	K. A. Saleh	[219]	NLP	SQP	Δίκτυα Διανομής με ΜΔΠ	Εξέταση πολλαπλών θέσεων σφάλματος και πρόταση διπλών τιμών ρύθμισης ανά Η/Ν υπερέντασης, με στόχο την κάλυψη όλων των πιθανών σεναρίων σφάλματος.
2016	L. Huchel	[220]	LP	Simplex	Δίκτυα Διανομής με ΜΔΠ	Πρόβλεψη μελλοντικών αλλαγών του δικτύου διανομής στον υπολογισμό βέλτιστων ρυθμίσεων.
2016	M. N. Alam	[221]	MINLP	Hybrid IPM-BBM & IPM-IPM	Συστήματα Μεταφοράς	Υψηλή επίδοση σε συστήματα μεταφοράς μεγάλης κλίμακας.
2017	H. Saberi	[222]	MINLP	Hybrid SBB-CPLEX	Δίκτυα Διανομής με ΜΔΠ	Αποτελεσματική αντιμετώπιση περιπτώσεων ανέφικτης λύσης.
2018	A. Yazdaninejadi	[223]	NLP	PSO	Συστήματα Μεταφοράς	Χρήση μη τυποποιημένων χαρακτηριστικών εξισώσεων.
2018	R. M. Chabanloo	[224]	LP	GA-Simplex	Δίκτυα Διανομής με ΜΔΠ	Ομαδοποίηση σεναρίων λειτουργίας βάσει των διαθέσιμων ομάδων ρυθμίσεων σε προσαρμοστικό σύστημα προστασίας.
2019	T. S. Aghdam	[225]	NLP	SQP	Δίκτυα Διανομής με ΜΔΠ	Ενσωμάτωση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης στους περιορισμούς του προβλήματος, για δίκτυα διανομής με συμβατικές ΜΔΠ.
2019	Srinivas STP	[226]	LP	Simplex	Συστήματα Μεταφοράς	Κυρτή χαλάρωση του αρχικού προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού με χρήση φακέλων McCormick.

Συντομεύσεις:
LP: Linear Programming, NLP: Nonlinear Programming, SQP: Sequential Quadratic Programming, PSO: Particle Swarm Optimization, GA: Genetic Algorithm,
ILP: Interval Linear Programming, MINLP: Mixed Integer-Nonlinear Programming, BIP: Binary Integer Programming, IPM: Interior Point Method, BBM: Branch and Bound Method,
SBB: Standard Branch and Bound.

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καμία πρόταση έως σήμερα δεν ενσωματώνει τα απαιτούμενα τεχνικά κριτήρια και τα βασικά μοντέλα βελτιστοποίησης στο σύνολό τους, σε ένα κοινό λογισμικό υπολογισμού ρυθμίσεων Η/Ν, ενώ παράλληλα δεν έχει παρουσιαστεί συστηματική διατύπωση του μαθηματικού προβλήματος. Στις περισσότερες εργασίες, λαμβάνεται υπόψη ένα μοναδικό σενάριο σφάλματος στον υπολογισμό των ρυθμίσεων, καθιστώντας αβέβαιη την επιλογική συνεργασία των Η/Ν υπό διαφορετικές συνθήκες σφάλματος.

Επίσης, σε όλες τις εργασίες υιοθετείται το σχήμα προστασίας με έναν Η/Ν υπερέντασης–κατεύθυνσης σε κάθε άκρο κλάδου. Η συγκεκριμένη παραδοχή απλοποιεί σε πολύ μεγάλο βαθμό την πραγματική κατάσταση των συστημάτων μεταφοράς και των δικτύων διανομής. Στην πράξη, είναι δυνατή η χρήση πολλαπλών Η/Ν ανά Δ/Ι (π.χ. συστήματα ΥΥΤ), οι οποίοι με τη σειρά τους διαθέτουν πολλαπλά στοιχεία προστασίας υπερέντασης (π.χ. στοιχείο υπερέντασης φάσης ορθής κατεύθυνσης, στοιχείο υπερέντασης γης αντίθετης κατεύθυνσης, απλό στοιχείο υπερέντασης φάσης).

Η μοντελοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης που προτείνεται στην παρούσα ενότητα καλύπτει πλήρως το πρόβλημα επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης, χωρίς να υιοθετούνται οι προηγούμενες απλουστευτικές παραδοχές.

5.2.2 Μαθηματική Διατύπωση Προβλήματος

Στο παρόν εδάφιο, προτείνεται πρωτότυπη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης χρονικής καθυστέρησης (50, 51, 67). Αξιοποιούνται παράλληλα οι βασικές αρχές της θεωρίας γράφων [227], με στόχο τη συστηματική ονομασία των Δ/Ι, των Η/Ν και των στοιχείων προστασίας, βάσει της τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου και σε πλήρη εναρμόνιση με την κωδικοποίηση των ζυγών. Σημειώνεται ότι στην πλήρη μορφή του προβλήματος που αναπτύσσεται στη συνέχεια, θεωρούνται ως μεταβλητές όλες οι παράμετροι της εξίσωσης (5.1), προσδιορίζοντας για κάθε στοιχείο υπερέντασης την ένταση διέγερσης I_{pu}, τον χρονικό πολλαπλασιαστή TD, καθώς και τον τύπο της χαρακτηριστικής εξίσωσης λειτουργίας μέσω των παραμέτρων A, B, C.

Επιπλέον των προηγούμενων μεταβλητών, στην παρούσα διατριβή εισάγεται ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης CTA (constant time adder), ως προσθετέος στην εξίσωση (5.1), ο οποίος υποστηρίζεται στους σύγχρονους ψηφιακούς και αριθμητικούς Η/Ν, βελτιώνοντας την προσαρμογή του χρόνου λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης. Η χαρακτηριστική εξίσωση των στοιχείων υπερέντασης σταθερού χρόνου προκύπτει από την εξίσωση (5.1), θέτοντας $A = 0$ και $B = C = 1$.

Οι μεταβλητές I_{pu}, TD και CTA θεωρούνται συνεχείς, λόγω της μεγάλης ακρίβειας των τιμών ρύθμισης στους σύγχρονους Η/Ν. Σημειώνεται ότι το μαθηματικό πρόβλημα της βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης ανήκει στη γενική κατηγορία των μη κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης (non-convex optimization) και ως προς την πολυπλοκότητά του στην κλάση NP-hard [228].

5.2.2.1 Βασικοί Ορισμοί

Έστω Ω_B και Ω_L τα σύνολα κόμβων και κλάδων, αντίστοιχα, του μελετώμενου δικτύου. Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου μπορεί να αναπαρασταθεί με έναν πολυγράφο (multigraph) $G(V, E)$, ο οποίος αποτελείται από:

- ένα σύνολο κορυφών (vertices) $V(G) \equiv \Omega_B$, με πληθάριθμο (cardinality) $N_B = |\Omega_B|$,
- ένα σύνολο ακμών (edges) $E(G) \equiv \Omega_L$, με πληθάριθμο $N_L = |\Omega_L|$, όπου $E(G) \subseteq V \times V \times \mathbb{N}$.

Σημειώνεται ότι ένας πολυγράφος μπορεί να περιέχει παράλληλες ακμές, αλλά όχι βρόχους. Η ακμή που ενώνει τις κορυφές i και j συμβολίζεται ως $\{(i, j), k\}$, όπου ο φυσικός αριθμός k χρησιμοποιείται για τη διάκριση μεταξύ παράλληλων ακμών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τους παράλληλους κλάδους του δικτύου (π.χ. παράλληλα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς ή παράλληλοι Μ/Σ σε Υ/Σ). Όταν μοναδική ακμή συνδέει δύο κορυφές, χρησιμοποιείται $k = 1$.

Οι κορυφές i και j λέγονται γειτονικές (adjacent), όταν $\{(i, j), k\} \in E(G)$, και αποτελούν τα τερματικά σημεία (endpoints) της συγκεκριμένης ακμής. Η γειτονιά (neighborhood) της κορυφής i ορίζεται ως $N(i) = \{j \in V : \{(i, j), k\} \in E, k \in \mathbb{N}\}$, ενώ βαθμός (degree ή valency) της κορυφής i

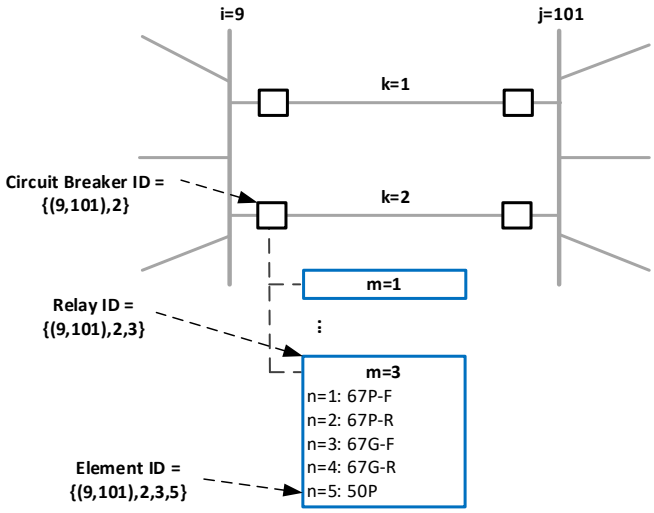
ονομάζεται το πλήθος των ακμών που προσπίπτουν στη συγκεκριμένη κορυφή και συμβολίζεται με $d(i)$, ενώ ισχύει $d(i) = |N(i)|$.

Ένας κατευθυνόμενος πολυγράφος (multidigraph ή directed multigraph) $D(V, A)$ αποτελείται από:

- ένα σύνολο κορυφών $V(D)$,
- ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών κορυφών $A(D)$, τα οποία ονομάζονται τόξα (arcs).

Κάθε ακμή του πολυγράφου $G(V, E)$ αντικαθίσταται από δύο τόξα αντίθετης κατεύθυνσης $\{(i,j),k\} \not\equiv \{(j,i),k\}$, δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον κατευθυνόμενο πολυγράφο $D(G)$. Τα τόξα του γράφου $D(G)$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση των Δ/Ι, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στα δύο άκρα κάθε κλάδου του δικτύου. Εάν Ω_{CB} το σύνολο των Δ/Ι, ισχύει $\Omega_{CB} \subseteq A(D)$. Ο Δ/Ι $l = \{(i,j),k\}$ μπορεί να ελέγχεται από διαφορετικούς Η/Ν, για την κωδικοποίηση των οποίων χρησιμοποιείται ο αύξων αριθμός m. Το σύνολο όλων των Η/Ν $r = \{(i,j),k,m\}$ του δικτύου συμβολίζεται με Ω_R και έχει πλήθος N_R.

Επιπλέον, κάθε Η/Ν δύναται να χρησιμοποιεί πολλαπλά στοιχεία υπερέντασης, για την κωδικοποίηση των οποίων χρησιμοποιείται ο αύξων αριθμός n. Το σύνολο όλων των στοιχείων υπερέντασης $e = \{(i,j),k,m,n\}$ του δικτύου συμβολίζεται με Ω_E και έχει πλήθος N_E. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει αποκλειστική ονομασία για κάθε Δ/Ι, Η/Ν και στοιχείο υπερέντασης, βάσει της κωδικοποίησης των κόμβων και της τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου. Η προηγούμενη περιγραφή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα κωδικοποίησης Δ/Ι, Η/Ν και στοιχείων υπερέντασης.

Το σύνολο των στοιχείων υπερέντασης πρωτεύουσας προστασίας p συμβολίζεται με Ω_P και ισχύει $\Omega_P \subseteq \Omega_E$. Επίσης, το σύνολο των στοιχείων υπερέντασης b που λειτουργούν ως δευτερεύουσα προστασία προς το στοιχείο p, είτε τοπικά σε Η/Ν του ίδιου Υ/Σ, είτε απομακρυσμένα σε Η/Ν γειτονικού Υ/Σ, συμβολίζεται με Ω_B^p και ισχύει $\Omega_B^p \subseteq \Omega_E$. Σημειώνεται ότι γίνεται διάκριση μεταξύ Ω_E και Ω_P, διότι σε πολλές εφαρμογές υπάρχουν στοιχεία υπερέντασης που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως δευτερεύουσα προστασία.

5.2.2.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης είναι το άθροισμα z των χρόνων λειτουργίας όλων των πιθανών ζευγών πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας, για ένα προκαθορισμένο σύνολο σεναρίων σφάλματος f, όπως αποτυπώνεται στη σχέση (5.2):

$$\min z = \sum_{\forall p \in \Omega_P} \sum_{f=1}^{N_F} \sum_{g=1}^{N_C} \left(q_{p,g} t_{p,f}(I_{p,f}, g) + \sum_{\forall b \in \Omega_B^p} q_{b,g} t_{b,f}^p (I_{b,f}^p, g) \right) \tag{5.2}$$

όπου,

N_F, το πλήθος των εξεταζόμενων σεναρίων σφάλματος,

N_C, το πλήθος των υποψήφιων χαρακτηριστικών εξισώσεων λειτουργίας,

$q_{p,g}$, η δυαδική μεταβλητή απόφασης για την επιλογή ή μη της χαρακτηριστικής εξίσωσης με αύξοντα αριθμό g, για το στοιχείο υπερέντασης p,

$t_{p,f}$, ο χρόνος λειτουργίας του στοιχείου υπερέντασης πρωτεύουσας προστασίας p (σε s), για το σενάριο σφάλματος f,

$I_{p,f}$, το υποβιβασμένο ρεύμα που μετρά το στοιχείο υπερέντασης πρωτεύουσας προστασίας p (σε A), για το σενάριο σφάλματος f,

$q_{b,g}$, η δυαδική μεταβλητή απόφασης για την επιλογή ή μη της χαρακτηριστικής εξίσωσης με αύξοντα αριθμό g, για το στοιχείο υπερέντασης b,

$t^p_{b,f}$, ο χρόνος λειτουργίας του στοιχείου υπερέντασης δευτερεύουσας προστασίας b (σε s), όταν δρα ως δευτερεύουσα προστασία του στοιχείου p, για το σενάριο σφάλματος f,

$I^p_{b,f}$, το υποβιβασμένο ρεύμα που μετρά το στοιχείο υπερέντασης b (σε A), όταν δρα ως δευτερεύουσα προστασία του στοιχείου p, για το σενάριο σφάλματος f.

Οι χρόνοι λειτουργίας t_p και t^p_b της αντικειμενικής συνάρτησης (5.2) προκύπτουν βάσει της εξίσωσης (5.1) ως εξής:

$$t_{p,f}(I_{p,f}, g) = TD_p \left(\frac{A_g}{\left(I_{p,f}/I_{pu,p}\right)^{B_g} - 1} + C_g \right) + CTA_p \tag{5.3}$$

$$t^p_{b,f}(I^p_{b,f}, g) = TD_b \left(\frac{A_g}{\left(I^p_{b,f}/I_{pu,b}\right)^{B_g} - 1} + C_g \right) + CTA_b \tag{5.4}$$

όπου,

TD_i, ο χρονικός πολλαπλασιαστής του στοιχείου υπερέντασης i,

$I_{pu,i}$, η ένταση διέγερσης του στοιχείου υπερέντασης i,

A_j, B_j, C_j, οι παράμετροι της χαρακτηριστικής εξίσωσης τύπου j,

CTA_i, ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης του στοιχείου υπερέντασης i.

Σκοπός της επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ο υπολογισμός των συνεχών μεταβλητών TD_e, $I_{pu,e}$ και CTA_e, $\forall e \in \Omega_E$, καθώς επίσης και των δυαδικών μεταβλητών $q_{e,g}$, $\forall e \in \Omega_E, g = 1, \ldots, N_C$. Σημειώνεται ότι η ένταση των ρευμάτων σφάλματος που εξετάζονται θεωρείται σταθερή, επομένως η ελαχιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας των στοιχείων προστασίας, οδηγεί ταυτόχρονα σε ελαχιστοποίηση της θερμικής καταπόνησης του πληγέντος εξοπλισμού.

5.2.2.3 Περιορισμοί

Εκτός από την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (5.2), απαιτείται και η ικανοποίηση συγκεκριμένων τεχνικών περιορισμών, οι οποίοι αφορούν:

i. τη διαθέσιμη περιοχή ρύθμισης των παραμέτρων,
ii. την ευαισθησία και την ασφάλεια της προστασίας,
iii. την ταχύτητα λειτουργίας της πρωτεύουσας προστασίας,
iv. την ταχύτητα λειτουργίας της δευτερεύουσας προστασίας,
v. την επιλογική συνεργασία μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας,

Οι προηγούμενοι τεχνικοί περιορισμοί αποτυπώνονται, με την ίδια σειρά αναγραφής, στις σχέσεις (5.5)–(5.10):

$$TD_e^{min} \leq TD_e \leq TD_e^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.5}$$

$$CTA_e^{min} \leq CTA_e \leq CTA_e^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.6}$$

$$I_{pu,e}^{min} \leq I_{pu,e} \leq I_{pu,e}^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.7}$$

$$t_{p,f}^{min} \leq \sum_{g=1}^{N_C} q_{p,g} t_{p,f}\left(I_{p,f}, g\right) \leq t_{p,f}^{max}, \forall p \in \Omega_P, f = 1, \ldots, N_F \tag{5.8}$$

$$t_{b,f}^{p,min} \leq \sum_{g=1}^{N_C} q_{b,g} t_{b,f}^{p}\left(I_{b,f}^{p}, g\right) \leq t_{b,f}^{p,max}, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \ldots, N_F \tag{5.9}$$

$$\sum_{g=1}^{N_C} \left(q_{b,g} t_{b,f}^{p}\left(I_{b,f}^{p}, g\right) - q_{p,g} t_{p,f}\left(I_{p,f}, g\right) \right) \geq CTI_f, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \ldots, N_F \tag{5.10}$$

όπου,

TD_e^{min}, TD_e^{max}, ο ελάχιστος και μέγιστος, αντίστοιχα, χρονικός πολλαπλασιαστής, για το στοιχείο e,

CTA_e^{min}, CTA_e^{max}, ο ελάχιστος και μέγιστος, αντίστοιχα, συντελεστής χρονικής προσαύξησης, για το στοιχείο e,

$I_{pu,e}^{min}, I_{pu,e}^{max}$, η ελάχιστη και μέγιστη, αντίστοιχα, ένταση διέγερσης, για το στοιχείο e,

$t_{p,f}^{min}, t_{p,f}^{max}$, ο ελάχιστος και μέγιστος, αντίστοιχα, χρόνος λειτουργίας της πρωτεύουσας προστασίας p, για το σενάριο σφάλματος f,

$t_{b,f}^{p,min}, t_{b,f}^{p,max}$, ο ελάχιστος και μέγιστος, αντίστοιχα, χρόνος λειτουργίας της δευτερεύουσας προστασίας b προς το στοιχείο υπερέντασης p, για το σενάριο σφάλματος f,

CTI_f, το περιθώριο χρονικής διαβάθμισης, μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας, για το σενάριο σφάλματος f.

Τα όρια TD_e^{min}, TD_e^{max} και CTA_e^{min}, CTA_e^{max} καθορίζονται βάσει των διαθέσιμων ορίων ρύθμισης των στοιχείων υπερέντασης στους εξεταζόμενους Η/Ν. Το κάτω όριο $I_{pu,e}^{min}$ καθορίζει τη μέγιστη δυνατή ευαισθησία του στοιχείου υπερέντασης e και προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα κανονικής ή έκτακτης λειτουργίας, ούτως ώστε να λειτουργεί μόνο σε περίπτωση σφάλματος. Το άνω όριο $I_{pu,e}^{max}$ προσδιορίζεται από τον μελετητή βάσει του ελαχίστου σφάλματος, το οποίο θα πρέπει να ανιχνεύεται από το στοιχείο υπερέντασης e.

Οι χρόνοι λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης, δρώντας είτε ως πρωτεύουσα ($t_{p,f}^{min}, t_{p,f}^{max}$) είτε ως δευτερεύουσα προστασία ($t_{b,f}^{p,min}, t_{b,f}^{p,max}$), περιορίζονται από τεχνικά κριτήρια, όπως η διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος, η επιλογική συνεργασία με άλλα είδη προστασίας (π.χ. προστασία αποστάσεως) και η αποφυγή ανεπανόρθωτης βλάβης στον προστατευόμενο εξοπλισμό, λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή του σε βραχυκύκλωμα. Η τιμή του περιθωρίου χρονικής διαβάθμισης CTI_f, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο σφάλματος f, προσδιορίζεται από τον μελετητή βάσει της πολιτικής ρύθμισης των προστασιών που εφαρμόζει. Σημειώνεται ότι όλες οι προαναφερθείσες τιμές ορίων είναι θετικοί πραγματικοί αριθμοί.

Επιπλέον των τεχνικών περιορισμών (5.5)–(5.10), απαιτείται και ο μαθηματικός περιορισμός (5.11), ο οποίος εξασφαλίζει την επιλογή ενός μοναδικού τύπου χαρακτηριστικής εξίσωσης για κάθε στοιχείο υπερέντασης:

$$\sum_{g=1}^{N_C} q_{e,g} = 1, \forall e \in \Omega_E \tag{5.11}$$

5.2.2.4 Επιλογή Μεταβλητών και Καθορισμός Είδους Προβλήματος

Η πλήρης μορφή του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης, όπως περιγράφεται μαθηματικά από τις σχέσεις (5.2)–(5.11), αποτελεί πρόβλημα μεικτού ακέραιου–μη γραμμικού προγραμματισμού (mixed integer-nonlinear programming, MINLP). Όπως προκύπτει από την ανασκόπηση του Εδαφίου 5.2.1, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν επικρατήσει οι εξής δύο υποπεριπτώσεις του πλήρους προβλήματος, όταν η ένταση διέγερσης και ο χρονικός πολλαπλασιαστής θεωρούνται συνεχείς μεταβλητές:

- το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (linear programming, LP),
- το πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear programming, NLP).

Στο πρόβλημα LP, η ένταση διέγερσης κάθε στοιχείου υπερέντασης ($I_{pu,e}$) προκαθορίζεται από τον μελετητή, ενώ παράλληλα θεωρείται κοινός τύπος χαρακτηριστικής εξίσωσης για όλα τα στοιχεία (A, B, C $\sigma\tau\alpha\theta.$). Επομένως, μεταβλητές του προβλήματος αποτελούν ο χρονικός πολλαπλασιαστής (TD_e) και ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης (CTA_e) κάθε στοιχείου υπερέντασης. Το πρόβλημα LP αποτελείται από γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς, όπως αποτυπώνεται στις σχέσεις (5.12)–(5.19), κατόπιν κατάλληλης τροποποίησης των (5.2)–(5.11):

$$\min z = \sum_{\forall p \in \Omega_P} \sum_{f=1}^{N_F} \left(u_{p,f} TD_p + CTA_p + \sum_{\forall b \in \Omega_B^p} \left(u_{b,f}^p TD_b + CTA_b \right) \right) \tag{5.12}$$

$$u_{p,f} = \frac{A}{\left(I_{p,f} / I_{pu,p} \right)^B - 1} + C = \sigma\tau\alpha\theta. \tag{5.13}$$

$$u_{b,f}^p = \frac{A}{\left(I_{b,f}^p / I_{pu,b} \right)^B - 1} + C = \sigma\tau\alpha\theta. \tag{5.14}$$

$$TD_e^{min} \le TD_e \le TD_e^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.15}$$

$$CTA_e^{min} \le CTA_e \le CTA_e^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.16}$$

$$t_{p,f}^{min} \le u_{p,f} TD_p + CTA_p \le t_{p,f}^{max}, \forall p \in \Omega_P, f = 1, \dots, N_F \tag{5.17}$$

$$t_{b,f}^{p,min} \le u_{b,f}^p TD_b + CTA_b \le t_{b,f}^{p,max}, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \dots, N_F \tag{5.18}$$

$$u_{b,f}^p TD_b + CTA_b - u_{p,f} TD_p - CTA_p \ge CTI_f, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \dots, N_F \tag{5.19}$$

Στο πρόβλημα NLP, η ένταση διέγερσης ($I_{pu,e}$), ο χρονικός πολλαπλασιαστής (TD_e) και ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης (CTA_e) κάθε στοιχείου υπερέντασης αποτελούν μεταβλητές, ενώ ο τύπος χαρακτηριστικής εξίσωσης είναι κοινός για όλα τα στοιχεία και προκαθορίζεται από τον μελετητή (A, B, C $\sigma\tau\alpha\theta.$). Το πρόβλημα NLP αποτελείται από μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και μη γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς, όπως αποτυπώνεται στις σχέσεις (5.20)–(5.28), κατόπιν κατάλληλης τροποποίησης των (5.2)–(5.11):

$$\min z = \sum_{\forall p \in \Omega_P} \sum_{f=1}^{N_F} \left(t_{p,f} + \sum_{\forall b \in \Omega_B^p} t_{b,f}^p \right) \tag{5.20}$$

$$t_{p,f} = TD_p \left(\frac{A}{\left(I_{p,f}/I_{pu,p}\right)^B - 1} + C \right) + CTA_p \tag{5.21}$$

$$t^p_{b,f} = TD_b \left(\frac{A}{\left(I^p_{b,f}/I_{pu,b}\right)^B - 1} + C \right) + CTA_b \tag{5.22}$$

$$TD_e^{min} \leq TD_e \leq TD_e^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.23}$$

$$CTA_e^{min} \leq CTA_e \leq CTA_e^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.24}$$

$$I_{pu,e}^{min} \leq I_{pu,e} \leq I_{pu,e}^{max}, \forall e \in \Omega_E \tag{5.25}$$

$$t_{p,f}^{min} \leq t_{p,f} \leq t_{p,f}^{max}, \forall p \in \Omega_P, f = 1, \dots, N_F \tag{5.26}$$

$$t_{b,f}^{p,min} \leq t_{b,f}^p \leq t_{b,f}^{p,max}, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \dots, N_F \tag{5.27}$$

$$t_{b,f}^p - t_{p,f} \geq CTI_f, \forall p \in P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \dots, N_F \tag{5.28}$$

5.2.3 Το Μοντέλο Τετραγωνικού Προγραμματισμού με Τετραγωνικούς Περιορισμούς

Στο παρόν εδάφιο προτείνεται πρωτότυπη διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης, η οποία προκύπτει από μετασχηματισμό του προβλήματος NLP σε μαθηματικά ισοδύναμο πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (quadratically constrained quadratic programming, QCQP) [229]. Η προτεινόμενη μέθοδος απλοποιεί σημαντικά την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς (5.20)–(5.28), με απαλοιφή των μη γραμμικών παραστάσεων, διευκολύνοντας τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης στον υπολογισμό της κλίσης (gradient) και της μήτρας δευτέρων παραγώγων (Hessian matrix). Συγκεκριμένα, το νέο πρόβλημα QCQP αποτελείται από γραμμική αντικειμενική συνάρτηση, γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς και ισοτικούς τετραγωνικούς περιορισμούς. Η ισοδυναμία των δύο προβλημάτων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα QCQP παραμένει μη κυρτό. Εντούτοις, διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους αλγορίθμους επίλυσης, λόγω των απλούστερων παραστάσεων που διαθέτει.

Η γενική μορφή των προβλημάτων QCQP αποτυπώνεται στις σχέσεις (5.29)–(5.32):

$$\min_x x^T Q_0 x + a_0^T x \tag{5.29}$$

$$x^T Q_i x + a_i^T x \leq b_i, i \in I \tag{5.30}$$

$$x^T Q_i x + a_i^T x = b_i, i \in E \tag{5.31}$$

$$l \leq x \leq u \tag{5.32}$$

όπου,

x,	το διάνυσμα μεταβλητών, διάστασης $n \times 1$,
a_0, a_i, b_i,	διανύσματα παραμέτρων, διάστασης $n \times 1$,
Q_0, Q_i,	συμμετρικές μήτρες παραμέτρων, διάστασης $n \times n$,
I,	το σύνολο των δεικτών που αντιστοιχούν σε ανισοτικούς περιορισμούς,

E, το σύνολο των δεικτών που αντιστοιχούν σε ισοτικούς περιορισμούς,

l, u τα διανύσματα κάτω και άνω ορίου των μεταβλητών, αντίστοιχα, διάστασης $n \times 1$.

5.2.3.1 Εισαγωγή Νέων Μεταβλητών

Η σχέση (5.21) μπορεί να αναδιατυπωθεί γενικά για το στοιχείο υπερέντασης e, ως εξής:

$$\left(t_{e,f} - TD_e \cdot C - CTA_e\right)\left(\left(I_{e,f}/I_{pu,e}\right)^B - 1\right) = TD_e \cdot A \tag{5.33}$$

και να λάβει τη μορφή της (5.37), εάν εισαχθούν οι βοηθητικές μεταβλητές βάσει των (5.34)–(5.36):

$$y_{e,f} = t_{e,f} - TD_e \cdot C - CTA_e \tag{5.34}$$

$$x_{e,f} = \left(I_{e,f}/I_{pu,e}\right)^B \tag{5.35}$$

$$w_e = TD_e \cdot A \tag{5.36}$$

$$y_{e,f}\left(x_{e,f} - 1\right) = w_e \tag{5.37}$$

Συνδυάζοντας τις (5.34) και (5.36), προκύπτουν οι σχέσεις (5.38) και (5.39) για τους χρόνους λειτουργίας πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας, αντίστοιχα:

$$t_{p,f} = y_{p,f} + \frac{C}{A} w_p + CTA_p \tag{5.38}$$

$$t^p_{b,f} = y^p_{b,f} + \frac{C}{A} w^p_b + CTA_b = y^p_{b,f} + \frac{C}{A} w_b + CTA_b \tag{5.39}$$

Η μεταβλητή w^p_b αντιστοιχεί στον χρονικό πολλαπλασιαστή του στοιχείου b και διατηρεί την τιμή της, τόσο σε λειτουργία πρωτεύουσας όσο και σε λειτουργία δευτερεύουσας προστασίας. Επομένως, ισχύει $w^p_b = w_b$. Οι μεταβλητές $y_{p,f}$ και $y^p_{b,f}$ σχετίζονται με τους χρόνους λειτουργίας της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας. Από τις τιμές των προαναφερθεισών μεταβλητών υπολογίζεται έμμεσα η ένταση διέγερσης κάθε στοιχείου υπερέντασης.

5.2.3.2 Νέα Αντικειμενική Συνάρτηση

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (5.38) και (5.39) στην (5.20), προκύπτει η νέα αντικειμενική συνάρτηση (5.40):

$$\min z = \sum_{\forall p \in \Omega_P} \sum_{f=1}^{N_F} \left(\left(y_{p,f} + \frac{C}{A} w_p + CTA_p \right) + \sum_{\forall b \in \Omega^p_B} \left(y^p_{b,f} + \frac{C}{A} w_b + CTA_b \right) \right) \tag{5.40}$$

Η προηγούμενη παράσταση αποτελεί γραμμική συνάρτηση της μορφής $a_0^T x$, ενώ μεταβλητές του νέου προβλήματος είναι τα μεγέθη w_e, $y_{p,f}$, $y^p_{b,f}$ και CTA_e, $\forall e \in \Omega_E$, $\forall p \in \Omega_P$, $\forall b \in \Omega^p_B$, $f = 1, \ldots, N_F$.

5.2.3.3 Νέοι Ανισοτικοί Περιορισμοί

Αρχικά, προσδιορίζονται τα όρια των νέων μεταβλητών. Από τις σχέσεις (5.23) και (5.36) προκύπτει για τη μεταβλητή w_e,

$$TD_e^{min} \cdot A \le w_e \le TD_e^{max} \cdot A, \forall e \in \Omega_E \tag{5.41}$$

ενώ με αντικατάσταση των (5.38) και (5.39) στις (5.26) και (5.27), αντίστοιχα, προκύπτει για τις μεταβλητές $y_{p,f}$ και $y^p_{b,f}$:

$$t^{min}_{p,f} \le y_{p,f} + \frac{C}{A} w_p \le t^{max}_{p,f}, \forall p \in \Omega_P, f = 1, \ldots, N_F \tag{5.42}$$

$$t_{b,f}^{p,min} \leq y_{b,f}^{p} + \frac{C}{A} w_b \leq t_{b,f}^{p,max}, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \dots, N_F \tag{5.43}$$

Με χρήση των σχέσεων (5.38) και (5.39), ο περιορισμός (5.28) λαμβάνει την εξής μορφή:

$$y_{b,f}^{p} + \frac{C}{A} w_b - y_{p,f} - \frac{C}{A} w_p \geq CTI_f, \forall p \in \Omega_P, \forall b \in \Omega_B^p, f = 1, \dots, N_F \tag{5.44}$$

Ο περιορισμός (5.24) διατηρείται ως έχει, ενώ ο περιορισμός (5.25) μετασχηματίζεται με χρήση των (5.35) και (5.37) στον διπλό περιορισμό (5.45):

$$\begin{cases} w_e - \left(x_{e,f}^{max} - 1\right) y_{e,f} \leq 0 \\ -w_e + \left(x_{e,f}^{min} - 1\right) y_{e,f} \leq 0 \end{cases}, \forall e \in \Omega_E, f = 1, \dots, N_F \tag{5.45}$$

Οι περιορισμοί (5.41)–(5.45) είναι γραμμικοί ανισοτικοί της μορφής $a_i^T x \leq b_i$.

5.2.3.4 Νέοι Ισοτικοί Περιορισμοί

Η ένταση διέγερσης δεν αποτελεί πλέον μεταβλητή του προβλήματος βελτιστοποίησης και υπολογίζεται έμμεσα, μετά τον υπολογισμό των νέων μεταβλητών. Συνεπώς, απαιτείται κατάλληλος περιορισμός, ο οποίος θα εξασφαλίζει ότι διατηρείται η ίδια τιμή για την ένταση διέγερσης του στοιχείου e, τόσο σε λειτουργία πρωτεύουσας όσο και σε λειτουργία δευτερεύουσας προστασίας. Έστω Ω_S^e το σύνολο των στοιχείων υπερέντασης s, στα οποία παρέχει δευτερεύουσα προστασία το στοιχείο e ($\Omega_S^e \subseteq \Omega_E$). Τότε, ισχύει:

$$I_{pu,e} = I_{pu,e}^{s}, \forall e \in \Omega_E, \forall s \in \Omega_S^e \tag{5.46}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.35), (5.37) και (5.46), προκύπτει ο παρακάτω ισοτικός περιορισμός της μορφής $x^T Q_i x = b_i$, ο οποίος αφορά τα στοιχεία υπερέντασης που παρέχουν πρωτεύουσα και δευτερεύουσα προστασία:

$$\begin{gathered} w_p y_{p,f}^{s} - \left(I_{p,f}/I_{p,f}^{s}\right)^B w_p y_{p,f} + \left[1 - \left(I_{p,f}/I_{p,f}^{s}\right)^B\right] y_{p,f} y_{p,f}^{s} = 0, \\ \forall p \in \Omega_P, \forall s \in \Omega_S^p, f = 1, \dots, N_F \end{gathered} \tag{5.47}$$

Για τα στοιχεία υπερέντασης που παρέχουν αποκλειστικά δευτερεύουσα προστασία, ο ισοτικός περιορισμός (5.47) τροποποιείται κατάλληλα.

5.3 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ

Ο υπολογισμός κατάλληλων τιμών ρύθμισης για τα στοιχεία υπερέντασης των Η/Ν προστασίας δικτύου διανομής ή συστήματος μεταφοράς απαιτεί την εκπόνηση ειδικής μελέτης, η οποία εξασφαλίζει την ικανοποίηση των κριτηρίων της ευαισθησίας, της ταχύτητας και της επιλογικότητας των προστασιών. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων της εν λόγω μελέτης είναι ιδιαιτέρως κρίσιμη για την ακεραιότητα του εξοπλισμού ισχύος και την ασφαλή λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Στην πράξη, οι μελετητές μηχανικοί προστασίας εκπονούν τις μελέτες ρύθμισης και επιλογικής συνεργασίας των προστασιών με τη μέθοδο δοκιμής–σφάλματος (trial–error), χρησιμοποιώντας ειδικό λογισμικό προσομοίωσης της λειτουργίας ηλεκτρικών δικτύων, σε συνδυασμό με απλά υπολογιστικά μέσα (π.χ. υπολογιστικά φύλλα). Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός κατάλληλων τιμών ρύθμισης για κάθε Η/Ν ξεχωριστά αποτελεί μία εξαιρετικά απαιτητική και χρονοβόρα εργασία, η οποία επιβαρύνει το καθημερινό έργο του μελετητή.

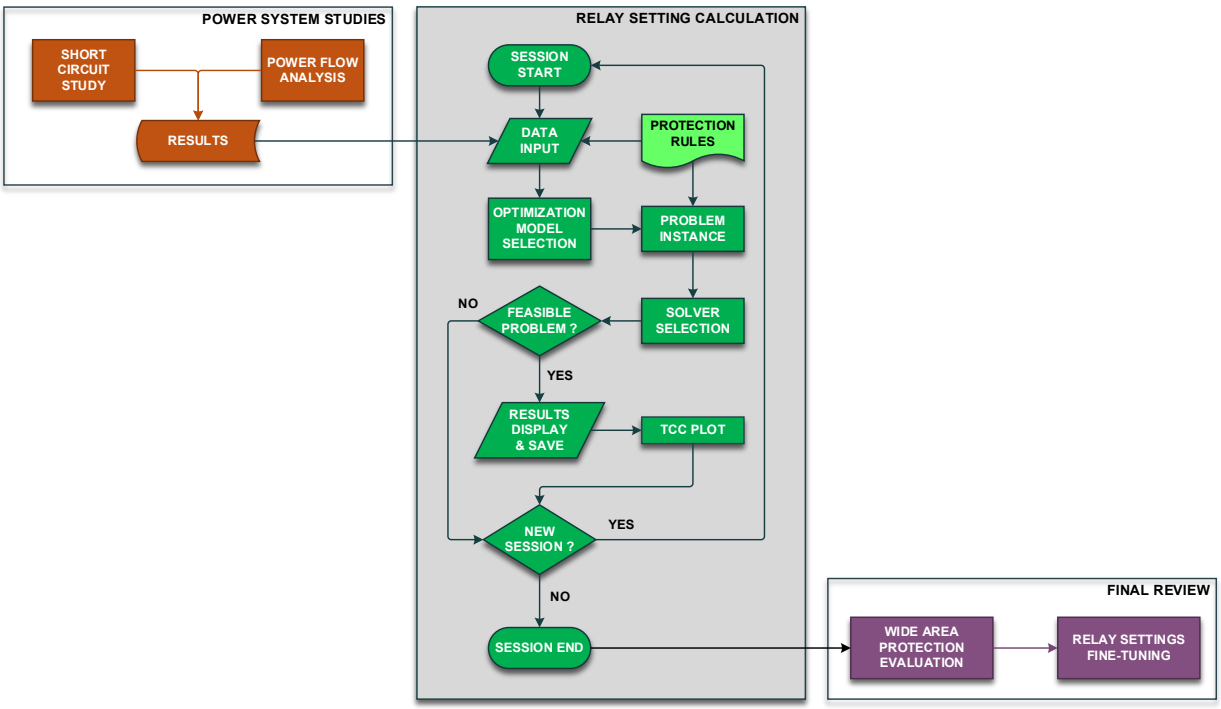
Στην παρούσα ενότητα, προτείνεται νέα μέθοδος για την αυτοματοποίηση της προηγούμενης διαδικασίας, η οποία επιταχύνει σημαντικά την εκπόνηση μελετών προστασίας. Παρόμοιες λύσεις συστηματικού υπολογισμού ρυθμίσεων Η/Ν αναπτύσσονται εσωτερικά στις ηλεκτρικές εταιρείες, χρησιμοποιώντας όμως απλούς επαναληπτικούς αλγορίθμους για την ικανοποίηση των τεχνικών περιορισμών, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις δημοσιευμένες εργασίες [230]–[239]. Η προτεινόμενη

μέθοδος υπολογίζει αυτόματα τις τιμές ρύθμισης των επιλεγμένων στοιχείων υπερέντασης με χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη τα σενάρια σφάλματος και τα τεχνικά κριτήρια που καθορίζει ο μελετητής [240]. Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι κατάλληλη για τη ρύθμιση σύγχρονων ψηφιακών ή αριθμητικών Η/Ν, οι οποίοι προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων για τις παραμέτρους ρύθμισής τους.

Βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου, έναντι των προηγούμενων δημοσιευμένων εργασιών, είναι η πλήρης μαθηματική διατύπωση του πραγματικού τεχνικού προβλήματος, όπως αναλύθηκε στο Εδάφιο 5.2.2, και κατόπιν η επίλυσή του με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων. Επιπλέον, εισάγεται ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης ως παράμετρος ρύθμισης και παράλληλα δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού κατάλληλης χαρακτηριστικής εξίσωσης για κάθε στοιχείο υπερέντασης ανεξάρτητα. Η προστιθέμενη αξία από τον συνδυασμό των δύο προηγούμενων δυνατοτήτων αποδεικνύεται σε περιπτώσεις όπου η επίλυση του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας των προστασιών είναι ανέφικτη με χρήση των διαθέσιμων μεθόδων (π.χ. μεγάλη διακύμανση του εύρους των αναμενόμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης στις εξεταζόμενες ζώνες προστασίας, μέτρηση ρεύματος σφάλματος ίδιας έντασης από πρωτεύουσα και δευτερεύουσα προστασία, επιλογική συνεργασία με στοιχεία προστασίας των οποίων οι ρυθμίσεις δεν μπορούν να τροποποιηθούν κ.α.). Βάσει των προηγούμενων παρατηρήσεων, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να αξιοποιηθεί στην πράξη ως εργαλείο, το οποίο επιταχύνει την εκπόνηση μελετών επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης.

5.3.1 Λειτουργίες Λογισμικού

Ο αυτοματοποιημένος υπολογισμός βέλτιστων ρυθμίσεων για τα εξεταζόμενα στοιχεία υπερέντασης επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη πακέτου λογισμικού στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB [241], σε συνδυασμό με την εργαλειοθήκη ανοικτού κώδικα OPTI [242]. Η χρήση του λογισμικού προϋποθέτει την εκπόνηση ανάλυσης ροών φορτίου και μελέτης βραχυκυκλωμάτων εκ των προτέρων, για τον προσδιορισμό των βασικών δεδομένων εισόδου. Το διάγραμμα ροής του Σχήματος 5.2 απεικονίζει τη συνολική προσέγγιση εκπόνησης μελετών επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης, ενώ στο γκρι πλαίσιο αποτυπώνεται η δομή του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης προσέγγισης.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους στάδια εκτέλεσης του πακέτου λογισμικού.

- Έναρξη (session start): Ο χρήστης εκκινεί την εκτέλεση του λογισμικού και επιλέγει μεταξύ διαδραστικής και μαζικής καταχώρησης των δεδομένων εισόδου. Στη διαδραστική καταχώρηση, ο

χρήστης καλείται μέσω μηνύματος να εισαγάγει διαδοχικά τα απαιτούμενα δεδομένα, ενώ αντίθετα στη μαζική καταχώρηση, όλα τα δεδομένα δίνονται εξαρχής μέσω αρχείου. Επίσης, δημιουργείται αρχείο καταγραφής (log file), στο οποίο αποθηκεύονται όλα τα βήματα εκτέλεσης του λογισμικού.

- Είσοδος δεδομένων (data input): Ο χρήστης εισάγει τα απαιτούμενα δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου και της μελέτης βραχυκυκλωμάτων, καθώς επίσης και τα τεχνικά κριτήρια που επιθυμεί να εφαρμόσει. Συγκεκριμένα, καθορίζονται ποια σενάρια σφάλματος, εξ όσων εξετάστηκαν στη μελέτη βραχυκυκλωμάτων, θα ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό ρυθμίσεων, τα ζεύγη πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας ανά σενάριο και το απαιτούμενο περιθώριο χρονικής διαβάθμισης (*CTI*). Επιπλέον, επιλέγεται η οικογένεια χαρακτηριστικών εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθεί και ορίζεται η ακρίβεια των παραμέτρων ρύθμισης σε πλήθος δεκαδικών ψηφίων, όπως προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή των Η/Ν. Τέλος, ο χρήστης καθορίζει τις αποδεκτές οριακές τιμές για τους χρόνους λειτουργίας πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας, σύμφωνα με την πολιτική προστασίας που επιθυμεί να εφαρμόσει.
- Επιλογή μοντέλου και σχηματισμός προβλήματος βελτιστοποίησης (optimization model selection & problem instance building): Ο χρήστης επιλέγει το μοντέλο βελτιστοποίησης που επιθυμεί να επιλύσει, ενώ παράλληλα αποφασίζει εάν θα χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης (*CTA*) στη χαρακτηριστική εξίσωση και για ποια στοιχεία υπερέντασης. Επίσης, ορίζει τυχόν στοιχεία υπερέντασης, για τα οποία απαιτείται η διατήρηση των τρεχουσών τιμών ρύθμισης. Τέλος, καθορίζει επιπλέον περιορισμούς της μορφής $t_e(I_{e,f}) \geq t_{lim}$, εάν απαιτούνται, για την ενίσχυση της ασφάλειας της πρωτεύουσας προστασίας κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων (π.χ. ρεύμα ζεύξης κατά την ηλέκτριση Μ/Σ, ψυχρή φόρτιση γραμμής διανομής έπειτα από παρατεταμένη διακοπή) ή την επιλογική συνεργασία της με στοιχεία υπερέντασης σταθερής χαρακτηριστικής εξίσωσης (π.χ. ασφάλειες).
- Επιλογή αλγορίθμου επίλυσης (solver selection): Ανάλογα με το είδος του προβλήματος βελτιστοποίησης που έχει σχηματιστεί στο προηγούμενο στάδιο, επιλέγεται από τον χρήστη ο κατάλληλος αλγόριθμος επίλυσης. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα παραμετροποίησης του επιλεχθέντος αλγορίθμου, προσαρμόζοντας την επίδοσή του ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Στο τέλος του συγκεκριμένου σταδίου, εκκινείται η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος.
- Προβολή και αποθήκευση αποτελεσμάτων (results display & save): Τα αποτελέσματα, εν προκειμένω οι ρυθμίσεις των στοιχείων υπερέντασης, προβάλλονται στην οθόνη του χρήστη. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων σε εξωτερικό αρχείο, για λόγους αρχειοθέτησης ή περαιτέρω ανάλυσης.
- Γραφική αναπαράσταση χαρακτηριστικών εξισώσεων (time-current characteristic plot): Ο χρήστης δύναται να επιλέξει στοιχείο υπερέντασης πρωτεύουσας προστασίας και να αναπαραστήσει γραφικά τη χαρακτηριστική εξίσωση λειτουργίας του, σε κοινό διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές εξισώσεις όλων των στοιχείων που παρέχουν δευτερεύουσα προστασία προς αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, οπτικοποιείται η επιλογική συνεργασία των στοιχείων υπερέντασης.
- Τερματισμός (session end): Ο χρήστης επιλέγει την εκπόνηση νέας μελέτης ή την έξοδο από το λογισμικό.

5.3.2 Δεδομένα Εισόδου

Στην αρχή της εκτέλεσης του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού, ο χρήστης καλείται να εισαγάγει τα βασικά δεδομένα υπό τη μορφή αρχείου κειμένου (*.dat, *.txt, *.csv) ή υπολογιστικού βιβλίου (*.xls, *.xlsx). Το αρχείο εισόδου περιέχει τα παρακάτω δεδομένα:

- κωδικοποίηση στοιχείων υπερέντασης,
- ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος του αντίστοιχου Μ/Ε που τροφοδοτεί κάθε Η/Ν,
- ονομαστικό ρεύμα κάθε Η/Ν,
- οικογένεια χαρακτηριστικών εξισώσεων λειτουργίας στοιχείων υπερέντασης,

- μέγιστο ρεύμα κανονικής ή έκτακτης λειτουργίας που ενδέχεται να μετρήσει κάθε στοιχείο υπερέντασης,
- ελάχιστο ρεύμα σφάλματος που ενδέχεται να μετρήσει κάθε στοιχείο υπερέντασης,
- ζεύγη στοιχείων υπερέντασης πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας, για κάθε σενάριο σφάλματος που μελετάται,
- μετρούμενο ρεύμα σφάλματος από την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα προστασία, ανά σενάριο σφάλματος.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πακέτου λογισμικού, ο χρήστης καλείται να εισαγάγει επιπλέον δεδομένα που αφορούν κυρίως τα εξής:

- υποσύνολο των σεναρίων σφάλματος που περιέχει το αρχείο εισόδου, το οποίο θα ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό βέλτιστων ρυθμίσεων,
- ακρίβεια σε δεκαδικά ψηφία των μεταβλητών, I_{pu}, TD και CTA βάσει των προδιαγραφών των εξεταζόμενων Η/Ν,
- συντελεστή ασφαλείας επί του ελαχίστου ρεύματος σφάλματος,
- απαιτούμενες οριακές τιμές $t_e^{min}, t_e^{max}, t_b^{e,min}$ και $t_b^{e,max}$ για κάθε στοιχείο υπερέντασης,
- επιλογή ή μη του συντελεστή χρονικής προσαύξησης, CTA,
- τύπο χαρακτηριστικής εξίσωσης, όταν δεν θεωρείται μεταβλητή του προβλήματος,
- απαιτούμενο περιθώριο χρονικής διαβάθμισης, CTI, ανά σενάριο σφάλματος,
- μοντέλο βελτιστοποίησης που θα επιλυθεί,
- αλγόριθμο επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί,
- εξαγωγή αποτελεσμάτων σε αρχείο κειμένου ή υπολογιστικό βιβλίο,
- γραφική αναπαράσταση της επιλογικής συνεργασίας των επιλεγμένων στοιχείων υπερέντασης.

Επιπρόσθετα, δίνεται η δυνατότητα παραμετροποίησης του επιλεχθέντος αλγορίθμου επίλυσης, προσαρμόζοντας την επίδοσή του στις απαιτήσεις του χρήστη, κυρίως μέσω:

- καθορισμού του αριθμού επαναλήψεων ή κόμβων υπολογισμού,
- καθορισμού του χρόνου εκτέλεσης,
- παράλληλης επεξεργασίας, εάν υποστηρίζεται,
- τερματισμού της εκτέλεσης, κατόπιν εύρεσης συγκεκριμένου αριθμού εφικτών λύσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το προτεινόμενο πακέτο λογισμικού παρέχει πλήρη ευελιξία στον χρήστη, όσον αφορά τη χρήση των στοιχείων υπερέντασης στο σχήμα προστασίας που εφαρμόζεται. Συγκεκριμένα, κάθε στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιείται:

- ως πρωτεύουσα προστασία της επιτηρούμενης ζώνης και ως δευτερεύουσα προστασία γειτονικής (π.χ. στοιχείο προστασίας γραμμής 67-F),
- μόνο ως πρωτεύουσα προστασία (π.χ. στοιχείο προστασίας Μ/Σ ανύψωσης 67-F στην πλευρά ΥΤ),
- μόνο ως δευτερεύουσα προστασία (π.χ. στοιχείο προστασίας γραμμής 67-R).

5.3.3 Μοντέλα και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Τα μοντέλα βελτιστοποίησης του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις θεωρούμενες μεταβλητές και κατ' επέκταση ως προς το είδος του προβλήματος βελτιστοποίησης που αναπαριστούν. Επομένως, αναπτύσσονται τέσσερα διακριτά μοντέλα, τα οποία αντιστοιχούν στα μαθηματικά προβλήματα LP, NLP, QCQP και MINLP, όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 5.2. Η επίλυση των μοντέλων επιτυγχάνεται με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή επίδοση κατά την επίλυση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι επίλυσης του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Μοντέλα βελτιστοποίησης και αλγόριθμοι επίλυσης

ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣ ΡΥΘΜΙΣΗ			
		I_{pu}	TD	A, B, C	CTA
LP	CPLEX 12.10	Σταθερά	Μεταβλητή	Σταθερές	Μεταβλητή*
NLP	IPOPT 3.12.9	Μεταβλητή		Σταθερές	
QCQP	SCIP 5.0.1	Μεταβλητή		Σταθερές	
MINLP	BARON 19.12.7	Μεταβλητή		Μεταβλητές	
*Ο χρήστης επιλέγει εάν θα χρησιμοποιήσει τον συντελεστή χρονικής προσαύξησης και σε ποιο στοιχείο.					

Ο αλγόριθμος CPLEX αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρεία ILOG, η οποία πλέον αποτελεί θυγατρική του ομίλου IBM, και διατίθεται δωρεάν σε μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς που παράγουν ερευνητικό έργο [243]. Το όνομά του προέκυψε από τον προγραμματισμό του αλγορίθμου Simplex σε γλώσσα C. Ο αλγόριθμος CPLEX επιλύει προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού, γραμμικού προγραμματισμού μεγάλης κλίμακας, κυρτά και μη κυρτά προβλήματα τετραγωνικού προγραμματισμού και κυρτά προβλήματα τετραγωνικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς, τα οποία λύνονται ισοδύναμα ως προβλήματα κωνικού προγραμματισμού 2ης τάξης.

Η αρχική έκδοση του αλγορίθμου IPOPT (**I**nterior **P**oint **OPT**imizer) αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon από τον ερευνητή A. Wächter, ως μέρος του ερευνητικού προγράμματος COIN-OR, ενώ προγραμματίστηκε εκ νέου σε γλώσσα C++ και πλέον συντηρείται από την εταιρεία IBM Research [244], [245]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλύει προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού.

Ο αλγόριθμος SCIP (**S**olving **C**onstraint **I**nteger **P**rograms) αναπτύχθηκε από ερευνητική ομάδα του ιδρύματος Zuse Institute Berlin (ZIB), σε γλώσσα προγραμματισμού C, και επιλύει μη κυρτά προβλήματα μεικτού ακέραιου και μεικτού ακέραιου-μη γραμμικού προγραμματισμού [246]–[248].

Ο αλγόριθμος BARON (**B**ranch-**A**nd-**R**educe **O**ptimization **N**avigator) επιλύει μη κυρτά προβλήματα μη γραμμικού και μεικτού ακέραιου-μη γραμμικού προγραμματισμού, με ικανότητα προσδιορισμού του ολικού (ή γενικού) ακροτάτου [249]–[251]. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου αλγορίθμου ξεκίνησε στο Πανεπιστήμιο Illinois (Urbana-Champaign) και συνεχίστηκε στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon, υπό την επίβλεψη του καθηγητή N. Σαχινίδη. Αποτελεί διεθνώς δημοφιλή επιλογή για την επίλυση προβλημάτων μεικτού ακέραιου-μη γραμμικού προγραμματισμού, λόγω της εξαιρετικής επίδοσης που επιδεικνύει στην επίλυση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας.

5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η προτεινόμενη μέθοδος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης εφαρμόζεται σε πρότυπα συστήματα μεταφοράς και υπομεταφοράς της σχετικής βιβλιογραφίας, καθώς και στο δίκτυο διανομής που προσομοιώθηκε στις δοκιμές κλειστού βρόχου του Κεφαλαίου 4. Στόχος των εφαρμογών είναι η ανάδειξη της λειτουργικότητας, των δυνατοτήτων και των πλεονεκτημάτων της προτεινόμενης μεθόδου έναντι προηγούμενων δημοσιευμένων μεθόδων, καθώς και της αποδοτικότητάς της σε πολύπλοκα προβλήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών και περιορισμών. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Core i3 στα 2,50 GHz, χρησιμοποιώντας έναν πυρήνα επεξεργασίας, και μνήμη RAM των 8 GB.

5.4.1 Βέλτιστη Πρακτική

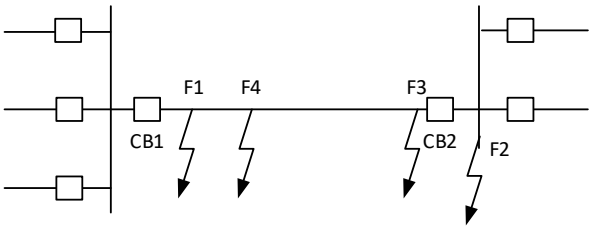
Όπως αναφέρθηκε στο Εδάφιο 5.3.1, η μελέτη ρύθμισης και επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης απαιτεί ως είσοδο τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου και της μελέτης βραχυκυκλωμάτων για το εξεταζόμενο δίκτυο. Στην ανάλυση ροών φορτίου, εξετάζονται, μεταξύ άλλων, τα σενάρια κανονικής και έκτακτης λειτουργίας υπό συνθήκες μέγιστου φορτίου, προσδιορίζοντας τη μέγιστη ένταση του ρεύματος φόρτισης για κάθε ζώνη προστασίας του εξεταζόμενου δικτύου. Βάσει της συγκεκριμένης τιμής, προσδιορίζεται η ελάχιστη αποδεκτή ένταση διέγερσης για τα στοιχεία

υπερέντασης, η οποία καθορίζει την ευαισθησία της προστασίας και εξασφαλίζει τη λειτουργία της μόνο σε συνθήκες σφάλματος.

Η μελέτη βραχυκυκλωμάτων εξετάζει διαφορετικά σενάρια σφάλματος και προσδιορίζει το εύρος των αναμενόμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε κάθε ζώνη προστασίας. Τα αποτελέσματά της επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές ρύθμισης των στοιχείων υπερέντασης. Συγκεκριμένα, τα υπολογιζόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των οριακών τιμών έντασης διέγερσης κάθε στοιχείου υπερέντασης, για τον περιορισμό των χρόνων λειτουργίας των στοιχείων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας, καθώς επίσης και για τη χρονική διαβάθμιση μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας.

Για κάθε ζώνη προστασίας, απαιτείται η εξέταση κατάλληλα επιλεγμένων σεναρίων σφάλματος, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής προστασία του εξοπλισμού σε κάθε ενδεχόμενη περίπτωση σφάλματος. Τα εν λόγω σενάρια καθορίζονται από τον μελετητή, βάσει των συνθηκών λειτουργίας του δικτύου πριν το σφάλμα (π.χ. μέγιστη ή ελάχιστη παραγωγή, κανονική τοπολογία ή ενδεχόμενη διαταραχή "N–1"), του τύπου σφάλματος (π.χ. τριφασικό) και της θέσης σφάλματος. Προτείνεται η εξέταση των παρακάτω βασικών σεναρίων, θεωρώντας ως αναφορά τον Δ/Ι CB1 του Σχήματος 5.3:

- Σφάλμα 1: Μέγιστο σφάλμα πλησίον του Δ/Ι CB1 (θέση F1), για το οποίο πρέπει να εξασφαλίζεται επιλογική συνεργασία μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας (κλειστός ο Δ/Ι CB2).
- Σφάλμα 2: Ελάχιστο σφάλμα στο άκρο της ζώνης προστασίας (θέση F2), το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το μέγιστο ρεύμα φορτίου για τον καθορισμό της ελάχιστης επιτρεπτής έντασης διέγερσης της πρωτεύουσας προστασίας. Η εξέταση των σεναρίων σφάλματος 1 και 2 είναι απαραίτητη σε κάθε περίπτωση. Από τα σενάρια σφάλματος που ακολουθούν, θα πρέπει να καλύπτονται όσο το δυνατόν περισσότερα, με την αναγραφόμενη σειρά προτεραιότητας.
- Σφάλμα 3: Εάν πρόκειται για γραμμή μεταφοράς, σφάλμα στο άκρο της γραμμής με ανοικτό τον απέναντι Δ/Ι CB2 (θέση F3), το οποίο μεγιστοποιεί το ρεύμα συνεισφοράς που μετρά η δευτερεύουσα προστασία, για την επίτευξη επιλογικής συνεργασίας μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας κατά τη διαδοχική λειτουργία των προστασιών (sequential tripping).
- Σφάλμα 4: Εάν πρόκειται για γραμμή μεταφοράς, σφάλμα κατά μήκος της γραμμής (θέση F4), σε ποσοστό επιλογής του μελετητή, ή στο όριο λειτουργίας του στιγμιαίου στοιχείου υπερέντασης, εάν χρησιμοποιείται.
- Σφάλμα 5: Σενάριο σφάλματος, για το οποίο μεγιστοποιείται ο λόγος του ρεύματος δευτερεύουσας προστασίας προς το ρεύμα πρωτεύουσας προστασίας, εάν δεν καλύπτεται από τα προηγούμενα σενάρια, για την εξασφάλιση της επιλογικότητας σε όλο το εύρος των αναμενόμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 5.3: Προτεινόμενες θέσεις σφάλματος ως προς τον Δ/Ι CB1.

Ο τύπος σφάλματος που εξετάζεται στα προηγούμενα σενάρια εξαρτάται από το είδος του στοιχείου υπερέντασης προς ρύθμιση. Πιο συγκεκριμένα, για τα στοιχεία υπερέντασης φάσης, γης και αρνητικής ακολουθίας εξετάζονται τριφασικά, μονοφασικά προς γη και διφασικά σφάλματα, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η ανάλυση στα ακόλουθα παραδείγματα εφαρμογών περιορίζεται στα στοιχεία υπερέντασης φάσης, λόγω έλλειψης δεδομένων μηδενικής και αρνητικής ακολουθίας για τα πρότυπα δίκτυα που μελετώνται. Η διαδικασία υπολογισμού ρυθμίσεων για τα στοιχεία υπερέντασης γης και αρνητικής ακολουθίας είναι πανομοιότυπη, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης για τον αντίστοιχο τύπο σφάλματος.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου και της μελέτης βραχυκυκλωμάτων ως δεδομένα εισόδου, η προτεινόμενη μέθοδος υπολογίζει βέλτιστες τιμές ρύθμισης για τις παραμέτρους

των στοιχείων υπερέντασης του μελετώμενου δικτύου. Στο τελικό στάδιο της ανάλυσης, ο μελετητής καλείται να επαληθεύσει την ποιότητα των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου, μέσω προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων σφάλματος (συνδυασμός παραγωγής, φορτίου, τοπολογίας δικτύου, θέσης και τύπου σφάλματος) και να τροποποιήσει συγκεκριμένες τιμές ρύθμισης, όπου και αν απαιτείται, καταλήγοντας στις τελικές ρυθμίσεις για τα στοιχεία υπερέντασης των εξεταζόμενων Η/Ν.

5.4.2 Εφαρμοζόμενο Σχήμα Προστασίας

Τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές του επόμενου εδαφίου περιλαμβάνουν τους εξής τέσσερις τύπους ζώνης προστασίας:

- ζώνη Μ/Σ ανύψωσης σταθμού παραγωγής,
- ζώνη γραμμής μεταφοράς ή υπομεταφοράς,
- ζώνη Μ/Σ υποβιβασμού σε Υ/Σ,
- ζώνη γραμμής διανομής.

Στη συνέχεια, περιγράφεται το σχήμα προστασίας που εφαρμόζεται στις δοκιμές. Στον Η/Ν προστασίας Μ/Σ ανύψωσης σταθμού παραγωγής, εφαρμόζεται στοιχείο διαφορικής προστασίας (87), ως κύρια προστασία, κατευθυντικό στοιχείο υπερέντασης ορθής φοράς (67P/G-F) σταθερού ή αντιστρόφου χρόνου, ως επικουρική προστασία έναντι εσωτερικών σφαλμάτων, και απλό στοιχείο υπερέντασης (51P/G) ή κατευθυντικό στοιχείο υπερέντασης αντίθετης φοράς (67P/G-R) αντιστρόφου χρόνου, ως δευτερεύουσα προστασία έναντι εξωτερικών σφαλμάτων συστήματος.

Στον Η/Ν προστασίας γραμμής μεταφοράς, εφαρμόζεται στοιχείο αποστάσεως (21P/G), ως κύρια προστασία, κατευθυντικό στοιχείο υπερέντασης ορθής φοράς (67P/G-F) αντιστρόφου χρόνου, ως επικουρική προστασία έναντι εσωτερικών σφαλμάτων γραμμής, και κατευθυντικό στοιχείο υπερέντασης αντίθετης φοράς (67P/G-R) αντιστρόφου χρόνου, ως δευτερεύουσα προστασία έναντι εξωτερικών σφαλμάτων γειτονικών γραμμών. Ως επικουρική προστασία έκτακτης ανάγκης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλό στοιχείο υπερέντασης (51P/G), για την κάλυψη της επιτηρούμενης ζώνης προστασίας σε περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα μεταξύ Μ/Τ και Η/Ν, το οποίο παρέχει επιπλέον δευτερεύουσα προστασία έναντι εξωτερικών σφαλμάτων.

Στον Η/Ν προστασίας Μ/Σ υποβιβασμού σε Υ/Σ, εφαρμόζεται στοιχείο διαφορικής προστασίας (87), ως κύρια προστασία, και απλά στοιχεία υπερέντασης (50P/Q/G, 51P/Q/G), ως επικουρική προστασία έναντι εσωτερικών σφαλμάτων. Τα στοιχεία 51P/Q/G παρέχουν επίσης δευτερεύουσα προστασία έναντι σφαλμάτων φάσης και γης, αντίστοιχα, στην πλευρά ΜΤ του Υ/Σ. Επίσης, χρησιμοποιείται ξεχωριστός Η/Ν υπερέντασης γης (51N), ο οποίος μετρά το ρεύμα του γειωμένου ουδετέρου κόμβου, παρέχοντας δευτερεύουσα προστασία έναντι σφαλμάτων γης στο δίκτυο διανομής. Στην είσοδο ΜΤ του Υ/Σ διανομής, εφαρμόζεται απλό στοιχείο υπερέντασης (51P/G), το οποίο παρέχει δευτερεύουσα προστασία έναντι σφαλμάτων δικτύου.

Τέλος, στον Η/Ν προστασίας γραμμής διανομής ή υπομεταφοράς, εφαρμόζεται απλό ή κατευθυντικό στοιχείο υπερέντασης ορθής φοράς (51P/G, 67P/G-F) ως κύρια προστασία, το οποίο παρέχει δευτερεύουσα προστασία έναντι εξωτερικών σφαλμάτων διακλάδωσης ή γειτονικής γραμμής. Ως επιπλέον δευτερεύουσα προστασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθυντικό στοιχείο υπερέντασης αντίθετης φοράς (67P/G-R). Εάν υλοποιείται σχήμα αυτόματων επαναφορών, ως κύρια προστασία προστίθεται απλό ή κατευθυντικό στιγμιαίο στοιχείο υπερέντασης (50P/G, 67P/G-F).

Όσον αφορά τα επιτρεπτά όρια για τον χρόνο λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης, θεωρούνται τα εξής:

- Το κάτω όριο του χρόνου λειτουργίας πρωτεύουσας προστασίας λαμβάνεται ίσο με τον συνολικό χρόνο εκκαθάρισης βάσει της κύριας προστασίας, όπως προκύπτει από το άθροισμα του χρόνου λειτουργίας του σχετικού στοιχείου προστασίας ($1^{η}$ ζώνη στοιχείου αποστάσεως, διαφορική προστασία, στιγμιαίο στοιχείο υπερέντασης, ασφάλεια κτλ.) και του χρόνου ανοίγματος του Δ/Ι.
- Το άνω όριο του χρόνου λειτουργίας πρωτεύουσας προστασίας λαμβάνεται ίσο με τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, ως προς τη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος, για το εξεταζόμενο σφάλμα.

- Το κάτω όριο του χρόνου λειτουργίας δευτερεύουσας προστασίας λαμβάνεται ίσο ή μεγαλύτερο από τον αναμενόμενο χρόνο λειτουργίας της επικουρικής ή δευτερεύουσας προστασίας διαφορετικού είδους (π.χ. 2η ζώνη στοιχείου αποστάσεως).
- Το άνω όριο του χρόνου λειτουργίας δευτερεύουσας προστασίας προσδιορίζεται βάσει της καμπύλης αντοχής του προστατευόμενου εξοπλισμού, ούτως ώστε να διασφαλίζεται πάντα η ακεραιότητά του.

5.4.3 Αποτελέσματα Δοκιμών

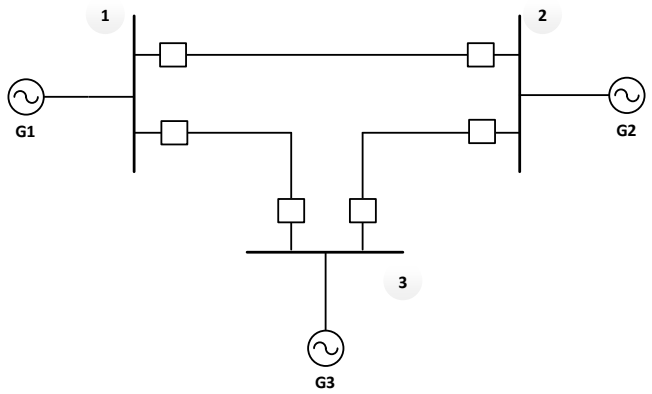
Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετικής κλίμακας. Στόχος των εν λόγω δοκιμών είναι η ανάδειξη των δυνατοτήτων, της αποτελεσματικότητας και της επίδοσης του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού. Στις δοκιμές που ακολουθούν εξετάζονται όλες οι χαρακτηριστικές εξισώσεις του Πίνακα 5.2, ως προς την καταλληλότητά τους. Το εύρος ρύθμισης του χρονικού πολλαπλασιαστή κυμαίνεται από 0,05 έως 1, εάν πρόκειται για τις Ευρωπαϊκές χαρακτηριστικές εξισώσεις, και από 0,5 έως 10, εάν πρόκειται για την Αμερικανική οικογένεια χαρακτηριστικών. Ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης κυμαίνεται μεταξύ 0 s και 1 s, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων τιμών. Για τις παραμέτρους ρύθμισης των στοιχείων υπερέντασης στους εξεταζόμενους Η/Ν, θεωρείται ότι διαθέτουν ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων.

Επίσης, σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις που προκύπτει $I_{pu}^{max} < I_{pu}^{min}$, λόγω ελαχίστων σφαλμάτων πολύ μικρής έντασης, χρησιμοποιείται $I_{pu}^{max} = 1.05 I_{pu}^{min}$. Η αντικειμενική συνάρτηση των μοντέλων που επιλύονται στις ακόλουθες δοκιμές αποτελείται από το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας τόσο της πρωτεύουσας όσο και της δευτερεύουσας προστασίας, για μέγιστο σφάλμα πλησίον του Δ/Ι της πρωτεύουσας προστασίας (Σφάλμα 1). Η ικανοποίηση των ορίων χρόνου λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης απαιτείται για την περίπτωση του μέγιστου από τα εξεταζόμενα σφάλματα, ενώ ο περιορισμός επιλογικής συνεργασίας μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας ικανοποιείται για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια σφάλματος.

5.4.3.1 Σύστημα Υπομεταφοράς 3 Ζυγών

Το απλοποιημένο σύστημα υπομεταφοράς 3 ζυγών χρησιμοποιείται για λόγους επίδειξης του νέου μοντέλου βελτιστοποίησης QCQP. Το μονογραμμικό διάγραμμα του εν λόγω συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4, ενώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού ισχύος δίνονται στην εργασία [204]. Το σύστημα διαθέτει 6 Η/Ν, 6 κατευθυντικά στοιχεία υπερέντασης φάσης ορθής φοράς (67P-F) και 6 ζεύγη πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή, εξετάζεται η προστασία των γραμμών, στις οποίες παρέχεται δευτερεύουσα προστασία από το στοιχείο 67P-F του παρακείμενου Υ/Σ (remote backup).

Επιπλέον, η μελέτη βραχυκυκλωμάτων που προηγήθηκε εξέτασε τα σενάρια σφάλματος 1 και 2, όπως περιγράφονται στο Εδάφιο 5.4.1. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπτής έντασης διέγερσης κάθε στοιχείου υπερέντασης χρησιμοποιείται το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος στο πέρας της αντίστοιχης ζώνης προστασίας (Σφάλμα 2), θεωρώντας συντελεστή ασφαλείας 1,5. Οι Πίνακες 5.5 και 5.6 περιέχουν τα δεδομένα εισόδου της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα όρια έντασης διέγερσης και τα ρεύματα σφάλματος δίνονται σε πρωτεύουσες τιμές.



Σχήμα 5.4: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος 3 ζυγών.

Πίνακας 5.5: Δεδομένα στοιχείων υπερέντασης για το σύστημα 3 ζυγών

#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (e)	ΚΩΔΙΚΟΣ ANSI	ΛΟΓΟΣ Μ/Ε	$I_{pu,e}^{min}$ (A)	$I_{pu,e}^{max}$ (A)
1	{(1,2,1),1,1}	67P-F	300/5	240	1147
2	{(2,1,1),1,1}	67P-F	200/5	160	976
3	{(2,3,1),1,1}	67P-F	200/5	160	1235
4	{(3,2,1),1,1}	67P-F	300/5	240	1097
5	{(3,1,1),1,1}	67P-F	200/5	160	801
6	{(1,3,1),1,1}	67P-F	400/5	320	1010

Πίνακας 5.6: Ρεύματα βραχυκύκλωσης για το σύστημα 3 ζυγών (Σφάλμα 1)

#	ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ		ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	
	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (p)	$I_{p,1}$ (A)	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (b)	$I_{b,1}^{p}$ (A)
1	{(1,2,1),1,1}	4972	{(3,1,1),1,1}	801
2	{(2,1,1),1,1}	3412	{(3,2,1),1,1}	1097
3	{(2,3,1),1,1}	3460	{(1,2,1),1,1}	1147
4	{(3,2,1),1,1}	2739	{(1,3,1),1,1}	1010
5	{(3,1,1),1,1}	2969	{(2,3,1),1,1}	1235
6	{(1,3,1),1,1}	5150	{(2,1,1),1,1}	976

Το ελάχιστο επιτρεπτό περιθώριο χρονικής διαβάθμισης λαμβάνεται ίσο με 0,25 s. Ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας ορίζεται στα 0,1 s και 0,4 s, αντίστοιχα, ενώ ο μέγιστος χρόνος λειτουργίας τους θεωρείται ίσος με 0,6 s και 1 s, αντίστοιχα.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο QCQP για την περίπτωση της χαρακτηριστικής εξίσωσης IEC Standard Inverse (Type A). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι τρεις γραμμές του συστήματος είναι μονού κυκλώματος, ενώ κάθε Δ/Ι επιτηρείται από έναν Η/Ν που χρησιμοποιεί ένα στοιχείο υπερέντασης. Επομένως, στις σχέσεις που ακολουθούν χρησιμοποιείται η απλοποιημένη κωδικοποίηση (i, j) αντί της $\{(i, j, 1), 1,1\}$, για την ονομασία των στοιχείων υπερέντασης, για λόγους απλότητας.

Βάσει της σχέσης (5.40), το διάνυσμα x των μεταβλητών του προβλήματος είναι

$$x^T = \left[w_{12}\ \ w_{21}\ \ w_{23}\ \ w_{32}\ \ w_{31}\ \ w_{13}\ \ y_{12}\ \ y_{21}\ \ y_{23}\ \ y_{32}\ \ y_{31}\ \ y_{13}\ \ y_{31}^{12}\ \ y_{32}^{21}\ \ y_{12}^{23}\ \ y_{13}^{32}\ \ y_{23}^{31}\ \ y_{21}^{13}\right] \quad (5.48)$$

και η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση

$$z = c^T x = y_{12} + y_{21} + y_{23} + y_{32} + y_{31} + y_{13} + y_{31}^{12} + y_{32}^{21} + y_{12}^{23} + y_{13}^{32} + y_{23}^{31} + y_{21}^{13} \tag{5.49}$$

όπου, $c^T = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1]$.

Τα όρια των μεταβλητών του προβλήματος προσδιορίζονται βάσει των σχέσεων (5.41)–(5.43) ως εξής:

$$0{,}007 \le w_{12}, w_{21}, w_{23}, w_{32}, w_{31}, w_{13} \le 0{,}14 \tag{5.50}$$

$$0{,}1 \le y_{12}, y_{21}, y_{23}, y_{32}, y_{31}, y_{13} \le 0{,}6 \tag{5.51}$$

$$0{,}4 \le y_{31}^{12}, y_{32}^{21}, y_{12}^{23}, y_{13}^{32}, y_{23}^{31}, y_{21}^{13} \le 1 \tag{5.52}$$

Το σύνολο των περιορισμών επιλογικής συνεργασίας πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας προκύπτει βάσει της (5.44):

$$\begin{cases} y_{12} - y_{31}^{12} + 0{,}25 \le 0 \\ y_{21} - y_{32}^{21} + 0{,}25 \le 0 \\ y_{23} - y_{12}^{23} + 0{,}25 \le 0 \\ y_{32} - y_{13}^{32} + 0{,}25 \le 0 \\ y_{31} - y_{23}^{31} + 0{,}25 \le 0 \\ y_{13} - y_{21}^{13} + 0{,}25 \le 0 \end{cases} \tag{5.53}$$

Ο διπλός περιορισμός (5.45) που αφορά τα όρια ρύθμισης της έντασης διέγερσης των στοιχείων υπερέντασης δίνεται αναλυτικά από τις παρακάτω ομάδες περιορισμών:

$$\begin{cases} w_{12} - 0{,}0625 y_{12} \le 0 \\ w_{21} - 0{,}0631 y_{21} \le 0 \\ w_{23} - 0{,}0634 y_{23} \le 0 \\ w_{32} - 0{,}0499 y_{32} \le 0 \\ w_{31} - 0{,}0602 y_{31} \le 0 \\ w_{13} - 0{,}0571 y_{13} \le 0 \end{cases} \tag{5.54}$$

$$\begin{cases} -w_{12} + 0{,}0382 y_{12} \le 0 \\ -w_{21} + 0{,}0347 y_{21} \le 0 \\ -w_{23} + 0{,}035 y_{23} \le 0 \\ -w_{32} + 0{,}0268 y_{32} \le 0 \\ -w_{31} + 0{,}0349 y_{31} \le 0 \\ -w_{13} + 0{,}0415 y_{13} \le 0 \end{cases} \tag{5.55}$$

Τέλος, οι ισοτικοί περιορισμοί (5.47) διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{cases} w_{12} y_{12}^{23} - 1{,}0298 w_{12} y_{12} - 0{,}0298 y_{12} y_{12}^{23} = 0 \\ w_{21} y_{21}^{13} - 1{,}0253 w_{21} y_{21} - 0{,}0253 y_{21} y_{21}^{13} = 0 \\ w_{23} y_{23}^{31} - 1{,}0208 w_{23} y_{23} - 0{,}0208 y_{23} y_{23}^{31} = 0 \\ w_{32} y_{32}^{21} - 1{,}0185 w_{32} y_{32} - 0{,}0185 y_{32} y_{32}^{21} = 0 \\ w_{31} y_{31}^{12} - 1{,}0265 w_{31} y_{31} - 0{,}0265 y_{31} y_{31}^{12} = 0 \\ w_{13} y_{13}^{32} - 1{,}0331 w_{13} y_{13} - 0{,}0331 y_{13} y_{13}^{32} = 0 \end{cases} \tag{5.56}$$

Το μοντέλο QCQP στη συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελείται από 18 μεταβλητές, 30 ανισοτικούς περιορισμούς και 6 ισοτικούς περιορισμούς. Για την επίλυσή του, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SCIP, ο οποίος υπολογίζει αιτιοκρατικά το ολικό ελάχιστο εφικτών προβλημάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξετάστηκαν όλες οι χαρακτηριστικές εξισώσεις του Πίνακα 5.2, ως προς την καταλληλότητά τους για την προστασία του μελετώμενου συστήματος. Ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης δεν χρησιμοποιείται

στην παρούσα μελέτη. Βάσει των δοκιμών που εκτελέστηκαν, το πρόβλημα ρύθμισης και επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης είναι εφικτό όταν χρησιμοποιείται μία εκ των χαρακτηριστικών εξισώσεων:

- IEC Standard Inverse (Type A),
- IEC Very Inverse (Type B),
- FR Short Time Inverse,
- US CO8 Inverse,
- US CO2 Short Time Inverse.

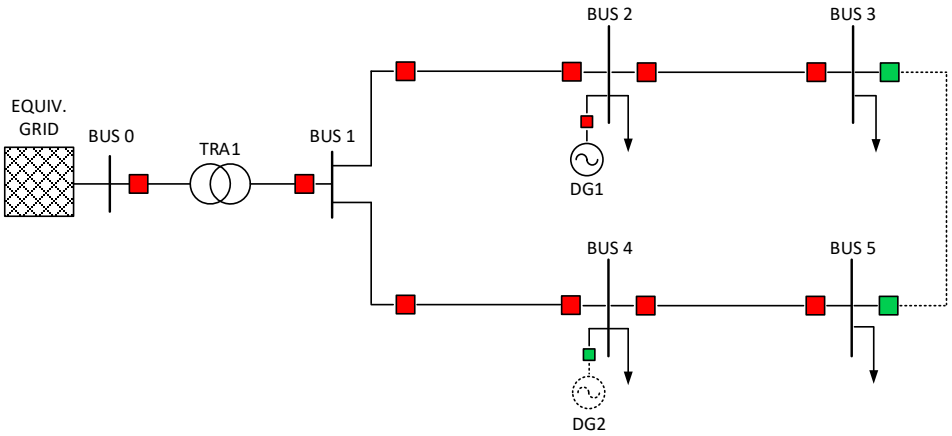
Οι ρυθμίσεις των στοιχείων υπερέντασης, όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο QCQP, δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.7. Όπως παρατηρείται, τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με χρήση της χαρακτηριστικής εξίσωσης FR Short Time Inverse, τόσο από πλευράς αντικειμενικής συνάρτησης όσο και από πλευράς ταχύτητας σύγκλισης του αλγορίθμου SCIP.

Πίνακας 5.7: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης συστήματος 3 ζυγών

ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (e)	**IEC SI**		**IEC VI**		**FR STI**		**US CO8**		**US CO2**	
	$I_{pu,e}$ (A)	TD_e	$I_{pu,e}$ (A)	TD_e	$I_{pu,e}$ (A)	TD_e	$I_{pu,e}$ (A)	TD_e	$I_{pu,e}$ (A)	TD_e
{(1,2,1),1,1}	8,563	0,050	4,000	0,146	11,638	0,163	5,873	0,500	5,965	0,500
{(2,1,1),1,1}	10,249	0,050	4,100	0,147	15,500	0,147	7,496	0,500	6,770	0,500
{(2,3,1),1,1}	13,171	0,050	11,488	0,050	15,500	0,224	9,485	0,500	8,954	0,500
{(3,2,1),1,1}	7,869	0,050	6,803	0,050	12,189	0,131	5,617	0,500	5,340	0,500
{(3,1,1),1,1}	8,421	0,050	4,000	0,130	12,738	0,146	6,152	0,500	5,718	0,500
{(1,3,1),1,1}	5,789	0,050	4,000	0,112	7,158	0,184	4,000	0,500	4,072	0,500
ΑΝΤΙΚΕΙΜ. ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ (s)	3,488		3,482		3,088		3,114		4,444	
ΧΡΟΝΟΣ CPU (s)	0,52		1,03		0,28		1,13		0,47	

5.4.3.2 Δίκτυο Διανομής με ΜΔΠ 5 Ζυγών

Στην παρούσα παράγραφο, μελετάται η περίπτωση του δικτύου διανομής 5 ζυγών με ΜΔΠ, όπως χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές κλειστού βρόχου του Κεφαλαίου 4. Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου και τα υπό ρύθμιση μέσα προστασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5, ενώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού ισχύος δίνονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 5.5: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 5 ζυγών.

Στο μελετώμενο δίκτυο, εφαρμόζεται προσαρμοστικό σύστημα προστασίας, το οποίο επιλέγει την κατάλληλη ομάδα ρυθμίσεων για κάθε Η/Ν του συστήματος βάσει των τρεχουσών συνθηκών λειτουργίας. Επιπλέον των σεναρίων λειτουργίας του Πίνακα 4.1 (C1–C4), θεωρείται ότι το δίκτυο μπορεί να λειτουργεί και σε τοπολογία δακτυλίου με τις δύο ΜΔΠ συνδεδεμένες (C5). Στο δίκτυο είναι εγκατεστημένοι 12 Η/Ν, στους οποίους ενεργοποιείται το στοιχείο υπερέντασης φάσης ορθής κατεύθυνσης (67P-F), ενώ έχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης αυτόματων επαναφορών.

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπτής έντασης διέγερσης κάθε στοιχείου υπερέντασης λαμβάνεται υπόψη το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος στο πέρας της αντίστοιχης ζώνης προστασίας (Σφάλμα 2). Ως ελάχιστο περιθώριο χρονικής διαβάθμισης θεωρούνται τα 0,3 s. Ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας ορίζεται στα 0,1 s και 0,4 s, αντίστοιχα, ενώ ο μέγιστος χρόνος λειτουργίας της θεωρείται ίσος με 1 s και 2 s, αντίστοιχα.

Για την επίτευξη της βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας, εξετάζεται το μέγιστο σφάλμα πλησίον Δ/Ι (Σφάλμα 1). Οι Πίνακες 5.8 και 5.9 περιέχουν τα δεδομένα εισόδου της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα όρια έντασης διέγερσης και τα ρεύματα σφάλματος δίνονται σε πρωτεύουσες τιμές. Βάσει του Πίνακα 5.9, υπάρχουν σενάρια λειτουργίας, κατά τη διάρκεια των οποίων ορισμένα στοιχεία υπερέντασης δεν ανιχνεύουν σφάλμα ή το προστατευόμενο κύκλωμα είναι εκτός λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο Η/Ν δεν μεταβαίνει σε νέα ομάδα ρυθμίσεων, επομένως δεν υπολογίζονται νέες τιμές για τις παραμέτρους των στοιχείων υπερέντασης.

Πίνακας 5.8: Δεδομένα στοιχείων υπερέντασης για το δίκτυο 5 ζυγών

#	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ** (e)	**ΚΩΔΙΚΟΣ ANSI**	**ΛΟΓΟΣ Μ/Ε**	$I_{pu,e}^{min}$ (A)	$I_{pu,e}^{max}$ (A)
1	{(0,1),1,1,1}	67P-F	200/1	200	1100
2	{(1,0),1,1,1}	67P-F	1500/5	100	500
3	{(1,2),1,1,1}	67P-F	600/5	500	2000
4	{(2,1),1,1,1}	67P-F	600/5	500	1500
5	{(2,3),1,1,1}	67P-F	400/5	300	2000
6	{(3,2),1,1,1}	67P-F	400/5	300	2000
7	{(1,4),1,1,1}	67P-F	600/5	500	2000
8	{(4,1),1,1,1}	67P-F	400/5	100	480
9	{(4,5),1,1,1}	67P-F	400/5	300	2000
10	{(5,4),1,1,1}	67P-F	400/5	300	2000
11	{(3,5),1,1,1}	67P-F	200/5	300	700
12	{(5,3),1,1,1}	67P-F	200/5	300	700

Πίνακας 5.9: Ρεύματα βραχυκύκλωσης ανά σενάριο λειτουργίας για το δίκτυο 5 ζυγών (Σφάλμα 1)

#	**ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ**						**ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ**					
	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (p)	$I_{p,1}$ (A)					**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ** (b)	$I_{b,1}^{p}$ (A)				
		C1	C2	C3	C4	C5		C1	C2	C3	C4	C5
1	{(0,1),1,1,1}	11,664					–					
2	{(1,0),1,1,1}	0	1708	477	2183	2238	{(2,1),1,1,1}	0	1708	0	1708	1534
3							{(4,1),1,1,1}	0	0	477	477	706
4	{(1,2),1,1,1}	8178	8178	8654	8654	8872	{(0,1),1,1,1}	1090	1090	1090	1090	1090
5							{(4,1),1,1,1}	0	0	477	477	706
6	{(2,1),1,1,1}	0	2308	0	2308	3084	{(3,2),1,1,1}	0	0	0	0	886

#	ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ						ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ					
	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (p)	$I_{p,1}$ (A)					ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (b)	$I^{p}_{b,1}$ (A)				
		C1	C2	C3	C4	C5		C1	C2	C3	C4	C5
7	{(2,3),1,1,1}	3538	5767	3618	5842	5598	{(1,2),1,1,1}	3538	3538	3618	3618	3345
8	{(3,2),1,1,1}	0	0	0	0	1744	{(5,3),1,1,1}	-	-	-	-	1744
9	{(1,4),1,1,1}	8178	9868	8178	9868	9704	{(0,1),1,1,1}	1090	1090	1090	1090	1090
10							{(2,1),1,1,1}	0	1708	0	1708	1534
11	{(4,1),1,1,1}	0	0	513	513	1567	{(5,4),1,1,1}	0	0	0	0	1126
12	{(4,5),1,1,1}	3538	3788	4025	4270	4058	{(1,4),1,1,1}	3538	3538	3538	3788	3566
13	{(5,4),1,1,1}	0	0	0	0	2040	{(3,5),1,1,1}	-	-	-	-	2040
14	{(3,5),1,1,1}	-	-	-	-	2383	{(2,3),1,1,1}	-	-	-	-	2383
15	{(5,3),1,1,1}	-	-	-	-	2008	{(4,5),1,1,1}	-	-	-	-	2008

Στο μελετώμενο δίκτυο διανομής, θεωρείται ότι όλα τα στοιχεία υπερέντασης χρησιμοποιούν τη χαρακτηριστική εξίσωση IEC Standard Inverse (Type A), ενώ μεταβλητές του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας αποτελούν η ένταση διέγερσης και ο χρονικός πολλαπλασιαστής κάθε στοιχείου. Ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη. Για τον υπολογισμό των ρυθμίσεων επιλύθηκε το μοντέλο NLP, με χρήση των λογισμικών BARON και IPOPT.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και οι ρυθμίσεις των στοιχείων υπερέντασης δίνονται ανά σενάριο λειτουργίας στους Πίνακες 5.10 και 5.11, αντίστοιχα. Όπως γίνεται αντιληπτό, το πρόβλημα NLP είναι εφικτό για κάθε πιθανό σενάριο λειτουργίας, ενώ παρατηρείται υψηλή ταχύτητα σύγκλισης των αλγορίθμων στο ολικό ελάχιστο. Η επίδοση των αλγορίθμων είναι συγκρίσιμη για όλα τα σενάρια λειτουργίας, εκτός από την τελευταία περίπτωση, στην οποία ο αλγόριθμος IPOPT επιδεικνύει εξαιρετικά ταχύτερη σύγκλιση από τον αλγόριθμο BARON, αποδεικνύοντας την ανωτερότητά του στην επίλυση μοντέλων NLP, με βασική προϋπόθεση τον ορισμό κατάλληλου αρχικού σημείου.

Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλήματος NLP για το δίκτυο 5 ζυγών

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ		NLP (IEC SI)				
		C1	C2	C3	C4	C5
Αριθμός μεταβλητών		10	14	14	16	24
Αριθμός μη γραμμικών περιορισμών		13	19	19	24	40
Αντικειμενική συνάρτηση (s)		2,712	4,165	6,401	5,559	11,856
Χρόνος CPU (s)	BARON	0,17	0,16	0,17	0,33	18,31
Χρόνος CPU (s)	IPOPT	0,11	0,17	0,38	0,31	0,62

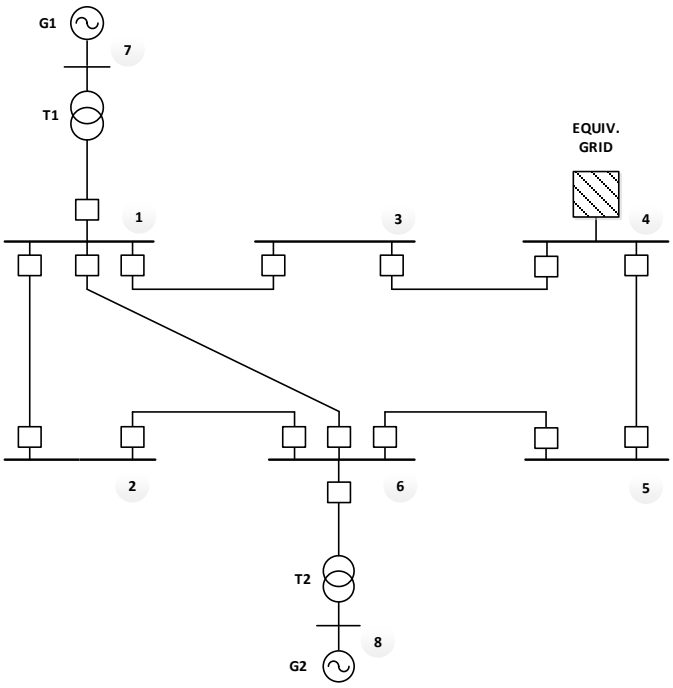
Πίνακας 5.11: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης δικτύου 5 ζυγών

#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (e)	ΛΟΓΟΣ Μ/Ε	$I_{pu,e}$ (A)					TD_e				
			C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5
1	{(0,1),1,1,1}	200/1	2,761	2,740	2,755	2,724	2,871	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
2	{(1,0),1,1,1}	1500/5	–	1,000	1,000	1,000	1,000	–	0,050	0,050	0,050	0,050
3	{(1,2),1,1,1}	600/5	13,353	12,773	13,623	13,049	15,500	0,050	0,050	0,050	0,050	0,055
4	{(2,1),1,1,1}	600/5	–	7,080	–	7,048	6,734	–	0,050	–	0,050	0,050
5	{(2,3),1,1,1}	400/5	3,750	3,750	3,750	3,750	15,500	0,050	0,050	0,050	0,050	0,076

#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (e)	ΛΟΓΟΣ Μ/Ε	$I_{pu,e}$ (A)					TD_e				
			C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5
6	{(3,2),1,1,1}	400/5	–	–	–	–	5,937	–	–	–	–	0,050
7	{(1,4),1,1,1}	600/5	13,353	14,198	13,183	14,035	15,500	0,050	0,050	0,050	0,050	0,058
8	{(4,1),1,1,1}	400/5	–	–	4,279	2,980	4,642	–	–	0,050	0,050	0,050
9	{(4,5),1,1,1}	400/5	3,750	3,750	3,750	3,750	15,500	0,050	0,050	0,050	0,050	0,055
10	{(5,4),1,1,1}	400/5	–	–	–	–	7,389	–	–	–	–	0,050
11	{(3,5),1,1,1}	200/5	–	–	–	–	15,500	–	–	–	–	0,100
12	{(5,3),1,1,1}	200/5	–	–	–	–	15,500	–	–	–	–	0,084

5.4.3.3 Σύστημα Μεταφοράς 8 Ζυγών

Το μονογραμμικό διάγραμμα του πρότυπου συστήματος 8 ζυγών απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6, ενώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δίνονται στην εργασία [209]. Το σύστημα διαθέτει 16 Η/Ν, 32 στοιχεία υπερέντασης φάσης και 58 ζεύγη πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας. Κάθε Δ/Ι του συστήματος επιτηρείται από έναν Η/Ν, ο οποίος χρησιμοποιεί δύο στοιχεία υπερέντασης, βάσει της περιγραφής του Εδαφίου 5.4.2. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπτής έντασης διέγερσης κάθε στοιχείου υπερέντασης χρησιμοποιείται το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος στο πέρας της αντίστοιχης ζώνης προστασίας (Σφάλμα 2), με συντελεστή ασφαλείας 1,5. Οι Πίνακες 5.12 και 5.13 περιέχουν τα δεδομένα εισόδου της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα όρια έντασης διέγερσης και τα ρεύματα σφάλματος δίνονται σε πρωτεύουσες τιμές, ενώ παρατηρείται ότι σε αρκετές περιπτώσεις προκύπτει $I_{pu}^{max} < I_{pu}^{min}$.



Σχήμα 5.6: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος 8 ζυγών.

Πίνακας 5.12: Δεδομένα στοιχείων υπερέντασης για το σύστημα 8 ζυγών

#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (e)	ΚΩΔΙΚΟΣ ANSI	ΛΟΓΟΣ Μ/Ε	$I_{pu,e}^{min}$ (A)	$I_{pu,e}^{max}$ (A)
1	{(2,1,1),1,1}	67P-F	400/5	320	162
2	{(2,1,1),1,2}	67P-R	400/5	320	154
3	{(1,3,1),1,1}	67P-F	600/5	480	1157
4	{(1,3,1),1,2}	67P-R	600/5	480	199

#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (e)	ΚΩΔΙΚΟΣ ANSI	ΛΟΓΟΣ Μ/Ε	$I_{pu,e}^{min}$ (A)	$I_{pu,e}^{max}$ (A)
5	{(3,4,1),1,1}	67P-F	400/5	320	636
6	{(3,4,1),1,2}	67P-R	400/5	320	608
7	{(4,5,1),1,1}	67P-F	600/5	480	1182
8	{(4,5,1),1,2}	67P-R	600/5	480	68
9	{(5,6,1),1,1}	67P-F	400/5	320	632
10	{(5,6,1),1,2}	67P-R	400/5	320	669
11	{(6,2,1),1,1}	67P-F	600/5	480	1104
12	{(6,2,1),1,2}	67P-R	600/5	480	0
13	{(6,1,1),1,1}	67P-F	400/5	320	307
14	{(6,1,1),1,2}	67P-R	400/5	320	0
15	{(1,2,1),1,1}	67P-F	600/5	480	1004
16	{(1,2,1),1,2}	67P-R	600/5	480	0
17	{(3,1,1),1,1}	67P-F	400/5	320	608
18	{(3,1,1),1,2}	67P-R	400/5	320	636
19	{(4,3,1),1,1}	67P-F	600/5	480	1214
20	{(4,3,1),1,2}	67P-R	600/5	480	41
21	{(5,4,1),1,1}	67P-F	400/5	320	669
22	{(5,4,1),1,2}	67P-R	400/5	320	632
23	{(6,5,1),1,1}	67P-F	600/5	480	1195
24	{(6,5,1),1,2}	67P-R	600/5	480	222
25	{(2,6,1),1,1}	67P-F	400/5	320	154
26	{(2,6,1),1,2}	67P-R	400/5	320	162
27	{(1,6,1),1,1}	67P-F	400/5	320	292
28	{(1,6,1),1,2}	67P-R	400/5	320	0
29	{(1,7,1),1,1}	67P-F	800/5	400	800
30	{(1,7,1),1,2}	67P-R	800/5	720	1473
31	{(6,8,1),1,1}	67P-F	800/5	400	800
32	{(6,8,1),1,2}	67P-R	800/5	720	1487

Πίνακας 5.13: Ρεύματα βραχυκύκλωσης για το σύστημα 8 ζυγών (Σφάλματα 1, 3, 4, 5)

ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ						ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ					
#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (p)	$I_{p,1}$ (A)	$I_{p,3}$ (A)	$I_{p,4}$ (A)	$I_{p,5}$ (A)	#	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (b)	$I_{b,1}^{p}$ (A)	$I_{b,3}^{p}$ (A)	$I_{b,4}^{p}$ (A)	$I_{b,5}^{p}$ (A)
1	{(2,1,1),1,1}	2209	3043	–	2308	11	{(6,2,1),1,1}	2209	3043	–	2308
		2209	3043	1587	2308	26	{(2,6,1),1,2}	2209	3043	1587	2308
3	{(1,3,1),1,1}	3628	3511	–	2342	1	{(2,1,1),1,1}	666	745	–	808
		3628	3511	–	2160	13	{(6,1,1),1,1}	1264	1414	–	1415
		3628	3511	3024	2342	16	{(1,2,1),1,2}	666	745	499	808

ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ						**ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ**					
#	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*p*)**	$I_{p,1}\ (A)$	$I_{p,3}\ (A)$	$I_{p,4}\ (A)$	$I_{p,5}\ (A)$	**#**	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*b*)**	$I^{p}_{b,1}\ (A)$	$I^{p}_{b,3}\ (A)$	$I^{p}_{b,4}\ (A)$	$I^{p}_{b,5}\ (A)$
		3628	3511	3024	2160	28	{(1,6,1),1,2}	1264	1414	946	1415
		3628	3357	2927	1423	30	{(1,7,1),1,2}	1698	1368	1583	1558
5	{(3,4,1),1,1}	2299	2968	–	2230	3	{(1,3,1),1,1}	2299	2968	–	2230
		2299	2968	1926	2230	18	{(3,1,1),1,2}	2299	2968	1926	2230
7	{(4,5,1),1,1}	2941	3010	–	2514	5	{(3,4,1),1,1}	1405	2038	–	2038
		2941	3010	2171	2514	20	{(4,3,1),1,2}	1405	2038	1071	2038
9	{(5,6,1),1,1}	1914	2799	–	2265	7	{(4,5,1),1,1}	1914	2799	–	2265
		1914	2799	1561	2265	22	{(5,4,1),1,2}	1914	2799	1561	2265
11	{(6,2,1),1,1}	3983	3694	–	2286	9	{(5,6,1),1,1}	1040	935	–	1040
		3983	3694	–	2270	27	{(1,6,1),1,1}	1247	1390	–	1419
		3983	3694	3176	1256	24	{(6,5,1),1,2}	1040	935	863	796
		3983	3694	3176	2270	14	{(6,1,1),1,2}	1247	1390	730	1419
		3983	3494	2972	1563	32	{(6,8,1),1,2}	1698	1389	1593	1560
13	{(6,1,1),1,1}	3393	3539	–	1696	9	{(5,6,1),1,1}	1040	1097	–	1040
		3393	3539	–	2158	25	{(2,6,1),1,1}	657	1094	–	1127
		3393	3539	2468	1172	24	{(6,5,1),1,2}	1040	1097	746	858
		3393	3539	2468	2158	12	{(6,2,1),1,2}	657	1094	124	1127
		3393	3355	2305	1178	32	{(6,8,1),1,2}	1698	1368	1607	1582
15	{(1,2,1),1,1}	3968	3613	–	2272	17	{(3,1,1),1,1}	1008	892	–	1008
		3968	3613	–	2237	13	{(6,1,1),1,1}	1264	1379	–	1416
		3968	3613	3085	1143	4	{(1,3,1),1,2}	1008	892	816	746
		3968	3613	3085	2237	28	{(1,6,1),1,2}	1264	1379	694	1416
		3968	3422	2891	1458	30	{(1,7,1),1,2}	1698	1362	1585	1555
17	{(3,1,1),1,1}	1970	2772	–	2244	19	{(4,3,1),1,1}	1970	2772	–	2244
		1970	2772	1580	2244	6	{(3,4,1),1,2}	1970	2772	1580	2244
19	{(4,3,1),1,1}	3006	3034	–	2285	21	{(5,4,1),1,1}	1469	2064	–	1270
		3006	3034	2230	2285	8	{(4,5,1),1,2}	1469	2064	1131	1270
21	{(5,4,1),1,1}	2384	3015	–	2254	23	{(6,5,1),1,1}	2384	3015	–	2254
		2384	3015	1999	2254	10	{(5,6,1),1,2}	2384	3015	1999	2254
23	{(6,5,1),1,1}	3602	3578	–	1904	27	{(1,6,1),1,1}	1247	1439	–	1247
		3602	3578	–	2368	25	{(2,6,1),1,1}	657	758	–	817
		3602	3578	3054	1258	14	{(6,1,1),1,2}	1247	1439	959	824
		3602	3578	3054	2368	12	{(6,2,1),1,2}	657	758	505	817
		3602	3420	2959	1467	32	{(6,8,1),1,2}	1698	1493	1593	1568
25	{(2,6,1),1,1}	2042	3040	–	2307	15	{(1,2,1),1,1}	2042	3040	–	2307
		2042	3040	1489	2307	2	{(2,1,1),1,2}	2042	3040	1489	2307
27	{(1,6,1),1,1}	3371	3533	–	2152	1	{(2,1,1),1,1}	666	1108	–	1139
		3371	3533	–	1674	17	{(3,1,1),1,1}	1008	1075	–	1008

ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ						**ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ**					
#	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*p*)**	$I_{p,1}\ (A)$	$I_{p,3}\ (A)$	$I_{p,4}\ (A)$	$I_{p,5}\ (A)$	**#**	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*b*)**	$I^{p}_{b,1}\ (A)$	$I^{p}_{b,3}\ (A)$	$I^{p}_{b,4}\ (A)$	$I^{p}_{b,5}\ (A)$
		3371	3533	2449	2152	16	{(1,2,1),1,2}	666	1108	133	1139
		3371	3533	2449	1674	4	{(1,3,1),1,2}	1008	1075	716	1008
		3371	3350	2291	1165	30	{(1,7,1),1,2}	1698	1369	1608	1584
29	{(1,7,1),1,1}	2938	–	–	2627	1	{(2,1,1),1,1}	666	–	–	621
		2938	–	–	1076	17	{(3,1,1),1,1}	1008	–	–	608
		2938	–	–	2627	13	{(6,1,1),1,1}	1264	–	–	1178
		2938	–	–	2627	16	{(1,2,1),1,2}	666	–	–	621
		2938	–	–	1076	4	{(1,3,1),1,2}	1008	–	–	608
		2938	–	–	2627	28	{(1,6,1),1,2}	1264	–	–	1178
31	{(6,8,1),1,1}	2943	–	–	2631	25	{(2,6,1),1,1}	657	–	–	614
		2943	–	–	2631	27	{(1,6,1),1,1}	1247	–	–	1165
		2943	–	–	1406	9	{(5,6,1),1,1}	1040	–	–	824
		2943	–	–	2631	12	{(6,2,1),1,2}	657	–	–	614
		2943	–	–	2631	14	{(6,1,1),1,2}	1247	–	–	1165
		2943	–	–	1406	24	{(6,5,1),1,2}	1040	–	–	824

Το ελάχιστο επιτρεπτό περιθώριο χρονικής διαβάθμισης θεωρείται ίσο με 0,2 s. Ως ελάχιστος χρόνος λειτουργίας πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας λαμβάνονται τα 0,1 s και 0,4 s, αντίστοιχα, ενώ ο μέγιστος χρόνος λειτουργίας θεωρείται ίσος με 0,6 s και 2 s, αντίστοιχα.

Για την επίλυση του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης, εκτελέσθηκαν και τα τέσσερα μοντέλα βελτιστοποίησης του πακέτου λογισμικού, εξετάζοντας την επίδραση του συντελεστή χρονικής προσαύξησης στη λύση κάθε προβλήματος. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου MINLP, δίνονται στον Πίνακα 5.14, καλύπτοντας όλα τα σενάρια σφάλματος βάσει της περιγραφής του Εδαφίου 5.4.1. Η επίλυση του μοντέλου έγινε με χρήση του αλγορίθμου BARON. Σημειώνεται ότι ως κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου επίλυσης χρησιμοποιήθηκε η εύρεση συγκεκριμένου αριθμού εφικτών λύσεων, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος και των μεγάλων απαιτήσεων σε πόρους και χρόνο εκτέλεσης.

Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλήματος MINLP για το σύστημα 8 ζυγών

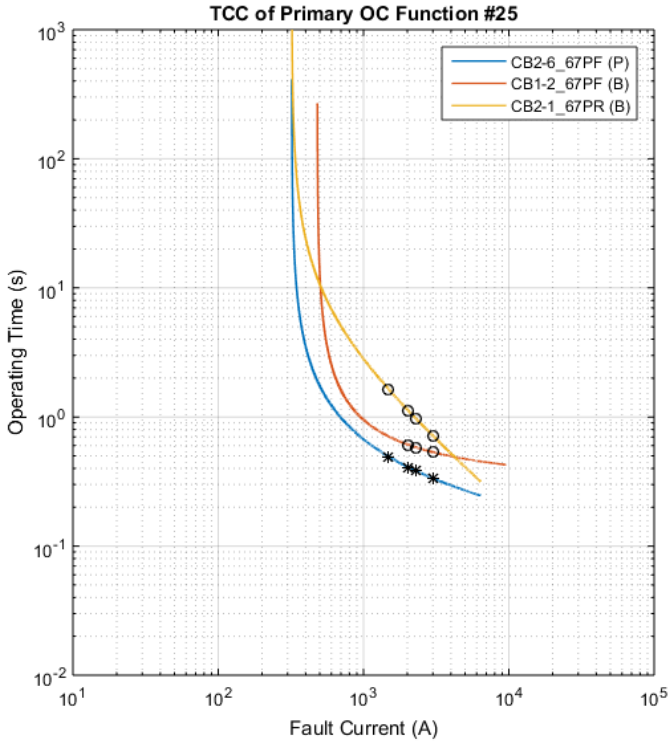
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	**MINLP (EUR)**		**MINLP (US)**	
	$CTA = 0$	$CTA \geq 0$	$CTA = 0$	$CTA \geq 0$
Αριθμός μεταβλητών	224	256	224	256
Αριθμός γραμμικών περιορισμών	32	32	32	32
Αριθμός μη γραμμικών περιορισμών	262	336	262	336
Αριθμός εφικτών λύσεων	5	5	5	5
Αντικειμενική συνάρτηση (s)	63,522	58,899	66,808	66,032
Χρόνος CPU (s)	38,33	23,99	40,62	9,80

Βάσει των αποτελεσμάτων, η χρήση του συντελεστή χρονικής προσαύξησης οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης, ανεξαρτήτως οικογένειας χαρακτηριστικών εξισώσεων, ενώ παράλληλα μειώνει σημαντικά και τον χρόνο επίλυσης, παρά το γεγονός ότι εισάγει επιπλέον μεταβλητές και περιορισμούς στο μοντέλο. Η ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των

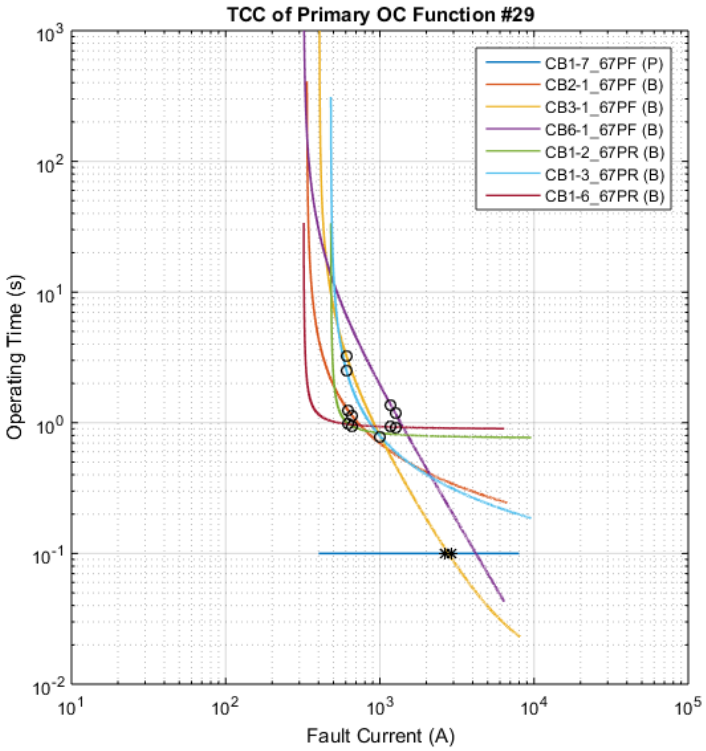
Ευρωπαϊκών χαρακτηριστικών (EUR). Οι ρυθμίσεις των στοιχείων υπερέντασης για τη συγκεκριμένη περίπτωση δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.15. Τα διαγράμματα επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης που αναγράφονται με έντονη γραμματοσειρά στον Πίνακα 5.15 απεικονίζονται στα Σχήματα 5.7 και 5.8. Στα εν λόγω διαγράμματα, σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις λειτουργίας της πρωτεύουσας προστασίας και όλων των στοιχείων που παρέχουν δευτερεύουσα προστασία προς αυτή, ενώ σημειώνεται και το μετρούμενο ρεύμα σφάλματος για κάθε στοιχείο επί της χαρακτηριστικής του.

Πίνακας 5.15: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης συστήματος 8 ζυγών

#	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ** (e)	$I_{pu,e}$ (A)	TD_e	**ΧΑΡ. ΕΞΙΣΩΣΗ**	CTA_e (s)
1	{(2,1,1),1,1}	4,200	0,621	FR STI	0
2	{(2,1,1),1,2}	4,000	0,050	UK LTI	0
3	{(1,3,1),1,1}	6,310	0,619	FR STI	0
4	{(1,3,1),1,2}	4,000	0,473	FR STI	0
5	{(3,4,1),1,1}	5,300	0,167	IEC EI	0
6	{(3,4,1),1,2}	5,067	0,352	FR STI	0,180
7	{(4,5,1),1,1}	5,869	0,050	FR STI	0,356
8	{(4,5,1),1,2}	4,000	0,050	IEC EI	0,304
9	{(5,6,1),1,1}	5,267	0,053	IEC EI	0,002
10	{(5,6,1),1,2}	5,575	0,135	IEC EI	0,204
11	{(6,2,1),1,1}	4,000	0,076	IEC SI	0,255
12	{(6,2,1),1,2}	4,000	0,050	FR STI	0,705
13	{(6,1,1),1,1}	4,000	0,214	IEC EI	0
14	{(6,1,1),1,2}	4,200	0,050	IEC EI	0,554
15	{(1,2,1),1,1}	4,000	0,073	IEC SI	0,261
16	{(1,2,1),1,2}	4,000	0,050	FR STI	0,751
17	{(3,1,1),1,1}	5,067	0,050	IEC EI	0,013
18	{(3,1,1),1,2}	5,300	0,167	IEC EI	0,200
19	{(4,3,1),1,1}	4,000	0,162	IEC EI	0
20	{(4,3,1),1,2}	4,000	0,050	FR STI	0,562
21	{(5,4,1),1,1}	4,000	0,270	IEC EI	0
22	{(5,4,1),1,2}	4,174	0,050	IEC EI	0,342
23	{(6,5,1),1,1}	4,894	0,712	FR STI	0
24	{(6,5,1),1,2}	4,000	0,050	IEC EI	0
25	**{(2,6,1),1,1}**	4,000	0,627	FR STI	0
26	{(2,6,1),1,2}	4,000	0,064	IEC EI	0,487
27	{(1,6,1),1,1}	4,000	0,165	IEC EI	0,084
28	{(1,6,1),1,2}	4,000	0,050	FR STI	0,882
29	**{(1,7,1),1,1}**	2,500	0,100	DEFINITE TIME (DT)	0
30	{(1,7,1),1,2}	6,138	0,526	FR STI	0
31	{(6,8,1),1,1}	2,500	0,100	DT	0
32	{(6,8,1),1,2}	6,196	0,590	FR STI	0



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας πρωτεύουσας προστασίας {(2,6,1),1,1}.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα επιλογικής συνεργασίας πρωτεύουσας προστασίας {(1,7,1),1,1}.

Βάσει των τιμών ρύθμισης του Πίνακα 5.15, οι χρόνοι λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.16, για όλα τα σενάρια σφάλματος που έχουν εξετασθεί. Όπως επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα, οι χρόνοι

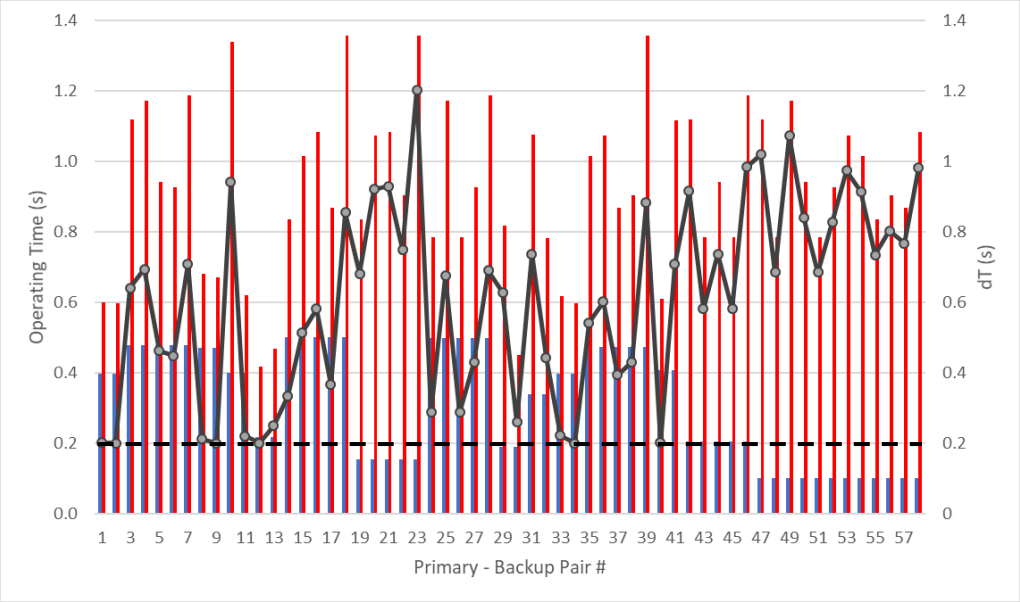
λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης, καθώς και η χρονική τους διαβάθμιση, ικανοποιούν τα απαιτούμενα όρια. Επίσης, παρατηρούνται δύο περιπτώσεις αναισθησίας της δευτερεύουσας προστασίας (Σφάλμα 4), εξαιτίας της πολύ μικρής έντασης του ρεύματος σφάλματος (χρόνος λειτουργίας, 9999 s).

Πίνακας 5.16: Χρόνοι λειτουργίας στοιχείων υπερέντασης συστήματος 8 ζυγών

#	ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ					ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ				
	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*p*)	$t_{p,1}$ (s)	$t_{p,3}$ (s)	$t_{p,4}$ (s)	$t_{p,5}$ (s)	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*b*)**	$t^{p}_{b,1}$ (s)	$t^{p}_{b,3}$ (s)	$t^{p}_{b,4}$ (s)	$t^{p}_{b,5}$ (s)
1	{(2,1,1),1,1}	0,397	0,337	–	0,387	{(6,2,1),1,1}	0,598	0,538	–	0,588
2		0,397	0,337	0,485	0,387	{(2,6,1),1,2}	0,597	0,544	0,704	0,587
3	{(1,3,1),1,1}	0,479	0,489	–	0,670	{(2,1,1),1,1}	1,119	0,959	–	0,869
4		0,479	0,489	–	0,723	{(6,1,1),1,1}	1,172	0,924	–	0,923
5		0,479	0,489	0,543	0,670	{(1,2,1),1,2}	0,941	0,892	2,360	0,870
6		0,479	0,489	0,543	0,723	{(1,6,1),1,2}	0,926	0,923	0,938	0,923
7		0,479	0,504	0,557	1,211	{(1,7,1),1,2}	1,188	1,971	1,364	1,412
8	{(3,4,1),1,1}	0,470	0,278	–	0,501	{(1,3,1),1,1}	0,681	0,551	–	0,701
9		0,470	0,278	0,680	0,501	{(3,1,1),1,2}	0,670	0,478	0,880	0,701
10	{(4,5,1),1,1}	0,398	0,398	–	0,404	{(3,4,1),1,1}	1,339	0,604	–	0,604
11		0,398	0,398	0,410	0,404	{(4,3,1),1,2}	0,619	0,604	0,639	0,604
12	{(5,6,1),1,1}	0,218	0,100	–	0,154	{(4,5,1),1,1}	0,417	0,400	–	0,408
13		0,218	0,100	0,335	0,154	{(5,4,1),1,2}	0,468	0,400	0,534	0,431
14	{(6,2,1),1,1}	0,501	0,510	–	0,591	{(5,6,1),1,1}	0,835	1,083	–	0,835
15		0,501	0,510	–	0,592	{(1,6,1),1,1}	1,015	0,823	–	0,791
16		0,501	0,510	0,531	0,803	{(6,5,1),1,2}	1,083	1,431	1,792	2,286
17		0,501	0,510	0,531	0,592	{(6,1,1),1,2}	0,867	0,802	1,629	0,792
18		0,501	0,518	0,542	0,700	{(6,8,1),1,2}	1,356	2,172	1,540	1,612
19	{(6,1,1),1,1}	0,154	0,141	–	0,632	{(5,6,1),1,1}	0,835	0,736	–	0,835
20		0,154	0,141	–	0,385	{(2,6,1),1,1}	1,074	0,622	–	0,607
21		0,154	0,141	0,293	1,379	{(6,5,1),1,2}	1,083	0,947	2,826	1,822
22		0,154	0,141	0,293	0,385	{(6,2,1),1,2}	0,903	0,780	9999	0,777
23		0,154	0,157	0,336	1,364	{(6,8,1),1,2}	1,356	2,275	1,512	1,563
24	{(1,2,1),1,1}	0,498	0,509	–	0,585	{(3,1,1),1,1}	0,785	1,054	–	0,785
25		0,498	0,509	–	0,588	{(6,1,1),1,1}	1,172	0,974	–	0,921
26		0,498	0,509	0,531	0,845	{(1,3,1),1,2}	0,785	0,942	1,102	1,329
27		0,498	0,509	0,531	0,588	{(1,6,1),1,2}	0,926	0,924	0,961	0,923
28		0,498	0,516	0,541	0,716	{(1,7,1),1,2}	1,188	1,997	1,360	1,418
29	{(3,1,1),1,1}	0,190	0,100	–	0,148	{(4,3,1),1,1}	0,818	0,401	–	0,621
30		0,190	0,100	0,295	0,148	{(3,4,1),1,2}	0,450	0,400	0,495	0,428
31	{(4,3,1),1,1}	0,339	0,333	–	0,598	{(5,4,1),1,1}	1,076	0,532	–	1,464
32		0,339	0,333	0,630	0,598	{(4,5,1),1,2}	0,782	0,533	1,183	0,971
33	{(5,4,1),1,1}	0,396	0,246	–	0,444	{(6,5,1),1,1}	0,618	0,526	–	0,644
34		0,396	0,246	0,568	0,444	{(5,6,1),1,2}	0,596	0,446	0,770	0,644

#	ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ					ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ				
	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*p*)	$t_{p,1}$ (s)	$t_{p,3}$ (s)	$t_{p,4}$ (s)	$t_{p,5}$ (s)	**ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (*b*)**	$t^{p}_{b,1}$ (s)	$t^{p}_{b,3}$ (s)	$t^{p}_{b,4}$ (s)	$t^{p}_{b,5}$ (s)
35	{(6,5,1),1,1}	0,473	0,475	–	0,739	{(1,6,1),1,1}	1,015	0,771	–	1,015
36		0,473	0,475	–	0,621	{(2,6,1),1,1}	1,074	0,893	–	0,821
37		0,473	0,475	0,522	1,151	{(6,1,1),1,2}	0,867	0,785	1,114	1,352
38		0,473	0,475	0,522	0,621	{(6,2,1),1,2}	0,903	0,841	1,935	0,821
39		0,473	0,488	0,533	0,954	{(6,8,1),1,2}	1,356	1,786	1,540	1,594
40	{(2,6,1),1,1}	0,407	0,333	–	0,381	{(1,2,1),1,1}	0,609	0,533	–	0,581
41		0,407	0,333	0,494	0,381	{(2,1,1),1,2}	1,115	0,706	1,642	0,966
42	{(1,6,1),1,1}	0,204	0,193	–	0,382	{(2,1,1),1,1}	1,119	0,635	–	0,620
43		0,204	0,193	–	0,585	{(3,1,1),1,1}	0,785	0,676	–	0,785
44		0,204	0,193	0,313	0,382	{(1,2,1),1,2}	0,941	0,824	9999	0,822
45		0,204	0,193	0,313	0,585	{(1,3,1),1,2}	0,785	0,722	1,467	0,785
46		0,204	0,206	0,347	1,161	{(1,7,1),1,2}	1,188	1,966	1,320	1,362
47	{(1,7,1),1,1}	0,100	–	–	0,100	{(2,1,1),1,1}	1,119	–	–	1,248
48		0,100	–	–	0,100	{(3,1,1),1,1}	0,785	–	–	3,214
49		0,100	–	–	0,100	{(6,1,1),1,1}	1,172	–	–	1,364
50		0,100	–	–	0,100	{(1,2,1),1,2}	0,941	–	–	0,992
51		0,100	–	–	0,100	{(1,3,1),1,2}	0,785	–	–	2,489
52		0,100	–	–	0,100	{(1,6,1),1,2}	0,926	–	–	0,929
53	{(6,8,1),1,1}	0,100	–	–	0,100	{(2,6,1),1,1}	1,074	–	–	1,187
54		0,100	–	–	0,100	{(1,6,1),1,1}	1,015	–	–	1,161
55		0,100	–	–	0,100	{(5,6,1),1,1}	0,835	–	–	1,503
56		0,100	–	–	0,100	{(6,2,1),1,2}	0,903	–	–	0,958
57		0,100	–	–	0,100	{(6,1,1),1,2}	0,867	–	–	0,917
58		0,100	–	–	0,100	{(6,5,1),1,2}	1,083	–	–	2,055

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται πιο εποπτική με τη βοήθεια του Σχήματος 5.9, το οποίο απεικονίζει τους χρόνους λειτουργίας κάθε ζεύγους πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας, καθώς και τη χρονική τους διαβάθμιση, για το σενάριο σφάλματος 1. Όπως αποτυπώνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, ο χρόνος λειτουργίας των στοιχείων πρωτεύουσας προστασίας (μπλε ράβδοι) δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση τα 0,6 s, σύμφωνα με τον σχετικό περιορισμό, ενώ αντίστοιχα ο χρόνος λειτουργίας των στοιχείων δευτερεύουσας προστασίας (κόκκινες ράβδοι) είναι μικρότερος των 2 s. Επίσης, η χρονική διαβάθμιση για κάθε ζεύγος προστασίας (μαύρη γραμμή) είναι τουλάχιστον 0,2 s, σύμφωνα με την εφαρμοζόμενη πολιτική προστασίας.



Σχήμα 5.9: Χρόνοι λειτουργίας και διαβάθμιση προστασιών του συστήματος 8 ζυγών (Σφάλμα 1).

Ο Πίνακας 5.17 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα προβλήματα NLP και LP. Για την επίλυση του μοντέλου NLP, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος BARON. Η επίδοση του αλγορίθμου IPOPT εξαρτάται άμεσα από το αρχικό σημείο που ορίζεται, με συνέπεια τον ενδεχόμενο εγκλωβισμό του σε μη εφικτή περιοχή, όταν καλείται να επιλύσει προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Σημειώνεται ότι όπως και στην περίπτωση του μοντέλου MINLP, χρησιμοποιήθηκε ο εντοπισμός συγκεκριμένου αριθμού εφικτών λύσεων ως κριτήριο τερματισμού. Το μοντέλο LP επιλύθηκε με χρήση του αλγορίθμου CPLEX, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Εφικτή λύση επιτυγχάνεται μόνο όταν χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική εξίσωση IEC Very Inverse, καλύπτοντας τέσσερα από τα πέντε προτεινόμενα σενάρια σφάλματος (Σφάλματα 1–4). Βάσει των αποτελεσμάτων, επιβεβαιώνεται εκ νέου η βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης και η υψηλή ταχύτητα σύγκλισης που επιδεικνύουν οι αλγόριθμοι επίλυσης, όταν χρησιμοποιείται ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης.

Πίνακας 5.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλημάτων NLP και LP για το σύστημα 8 ζυγών

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	**NLP (IEC VI)**		**LP (IEC VI)**	
	$CTA = 0$	$CTA \geq 0$	$CTA = 0$	$CTA \geq 0$
Αριθμός μεταβλητών	64	96	32	64
Αριθμός γραμμικών περιορισμών	0	0	204	278
Αριθμός μη γραμμικών περιορισμών	204	278	0	0
Αριθμός εφικτών λύσεων	5	5	–	–
Αντικειμενική συνάρτηση (s)	48,790	47,459	49,731	48,279
Χρόνος CPU (s)	3,24	1,34	<0,01	<0,01

Για λόγους επίδειξης της υπεροχής των προτεινόμενων μοντέλων έναντι προηγούμενων δημοσιευμένων μεθόδων [213], [216], επιλύονται εκ νέου τα μοντέλα NLP και QCQP αποκλειστικά για τα στοιχεία υπερένταση φάσης ορθής κατεύθυνσης (67P-F), εξετάζοντας μόνο την περίπτωση του μέγιστου σφάλματος πλησίον Δ/Ι (Σφάλμα 1). Τα ρεύματα βραχυκύκλωσης για κάθε ζεύγος πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας, τα δεδομένα εισόδου, καθώς και οι οριακές τιμές των μεταβλητών και των περιορισμών αντλήθηκαν από την εργασία [216]. Επιπλέον, η αντικειμενική συνάρτηση σε αυτήν την περίπτωση αποτελείται αποκλειστικά από το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας της πρωτεύουσας προστασίας, ενώ χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική εξίσωση IEC Standard Inverse (Type A). Οι προαναφερθείσες παραδοχές έχουν στόχο την κατάστρωση πανομοιότυπου προβλήματος βελτιστοποίησης, ούτως ώστε η σύγκριση των μεθόδων να είναι βάσιμη.

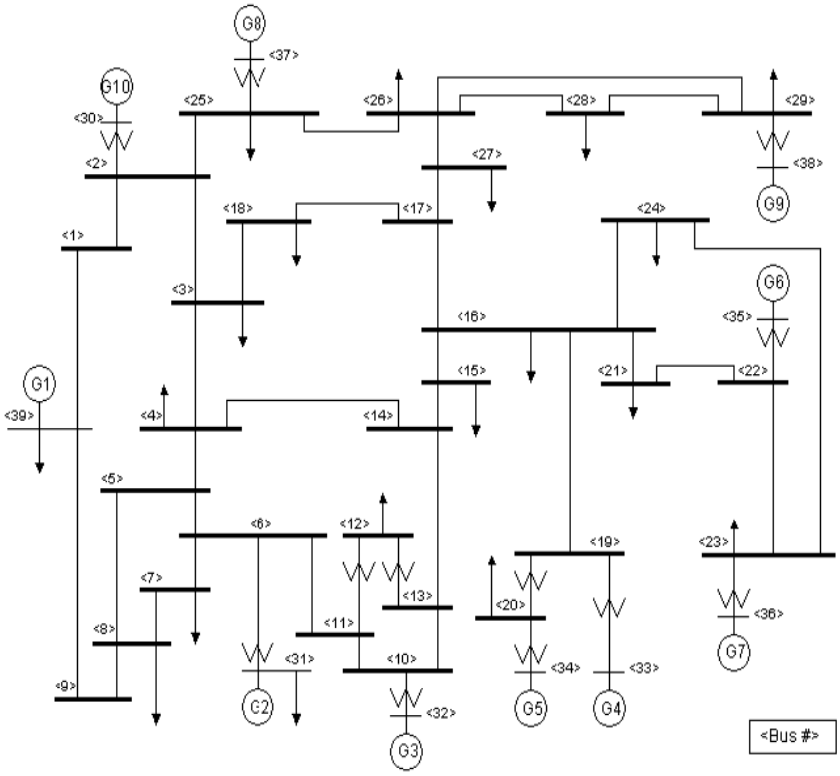
Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και ο χρόνος εκτέλεσης κάθε μεθόδου δίνονται στον Πίνακα 5.18. Όπως παρατηρείται, το προτεινόμενο πακέτο λογισμικού συγκλίνει ταχύτατα σε λύση, επιτυγχάνοντας περαιτέρω μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης συγκριτικά με τις μεθόδους [213], [216], χάρη στα προηγμένα εργαλεία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί. Επίσης, όσον αφορά τα μοντέλα NLP και QCQP, οι αλγόριθμοι επίλυσης συγκλίνουν στο ίδιο σημείο ελαχίστου, επιβεβαιώνοντας τη μαθηματική ισοδυναμία των προβλημάτων.

Πίνακας 5.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων με δημοσιευμένες εργασίες για το σύστημα 8 ζυγών

ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	MINLP [213]	MINLP [216]	NLP, QCQP
ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	Hybrid GA-LP	Seeker	BARON
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ (s)	10,9499	8,4270	8,2652
ΧΡΟΝΟΣ CPU (s)	τάξης δεκάδων	50,45	0,03

5.4.3.4 Σύστημα Μεταφοράς IEEE 39 Ζυγών

Το μονογραμμικό διάγραμμα του πρότυπου συστήματος IEEE 39 ζυγών απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10, ενώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού ισχύος παρέχονται στον σύνδεσμο [252]. Το σύστημα διαθέτει 158 στοιχεία υπερέντασης φάσης και 296 ζεύγη πρωτεύουσας–δευτερεύουσας προστασίας. Συγκεκριμένα, κάθε Δ/Ι του συστήματος επιτηρείται από έναν Η/Ν, στον οποίο εφαρμόζονται δύο στοιχεία υπερέντασης, βάσει της περιγραφής του Εδαφίου 5.4.2.



Σχήμα 5.10: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος IEEE 39 ζυγών "New England". [253]

Το συγκεκριμένο πρότυπο σύστημα επιλέχθηκε για να αναδειχθεί η αποδοτικότητα του προτεινόμενου λογισμικού σε προβλήματα πολύ μεγάλης κλίμακας. Στις δοκιμές που ακολουθούν, χρησιμοποιούνται οι ίδιες τιμές εισόδου και οι ίδιοι αλγόριθμοι επίλυσης με τις προηγούμενες δοκιμές στο σύστημα 8 ζυγών. Η εύρεση συγκεκριμένου αριθμού εφικτών λύσεων χρησιμοποιείται ως κριτήριο τερματισμού και στις παρακάτω δοκιμές.

Για τα στοιχεία πρωτεύουσας προστασίας των Μ/Σ υποβιβασμού «11–12» και «13–12» λαμβάνονται επιπλέον υπόψη οι εξής τεχνικοί περιορισμοί:

- Ο χρόνος λειτουργίας των στοιχείων, για ρεύμα ίσης έντασης με το αναμενόμενο ρεύμα ζεύξης του αντίστοιχου Μ/Σ, θα πρέπει να υπερβαίνει τον εκτιμώμενο χρόνο εκδήλωσης του μεταβατικού φαινομένου. Ο συγκεκριμένος περιορισμός εξασφαλίζει την ασφάλεια της προστασίας κατά την ηλέκτριση του Μ/Σ. Στις δοκιμές, θεωρείται ρεύμα ζεύξης Μ/Σ ίσο με $12I_n$, όπου I_n το ονομαστικό ρεύμα του Μ/Σ, και ελάχιστος επιτρεπτός χρόνος λειτουργίας των στοιχείων ίσος με 0,15 s.
- Εκτός από πρωτεύουσα προστασία, τα εν λόγω στοιχεία παρέχουν και δευτερεύουσα προστασία έναντι σφαλμάτων στο δίκτυο που τροφοδοτείται από το δευτερεύον τύλιγμα του αντίστοιχου Μ/Σ. Επομένως, απαιτείται επιλογική συνεργασία με τα στοιχεία προστασίας των γραμμών που αναχωρούν από τον Υ/Σ. Στις δοκιμές, θεωρείται ελάχιστος επιτρεπτός χρόνος λειτουργίας των στοιχείων ίσος με 0,5 s, για μέγιστο σφάλμα στο δευτερεύον του αντίστοιχου Μ/Σ.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, όπως προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου MINLP, δίνονται στον Πίνακα 5.19, καλύπτοντας τέσσερα σενάρια σφάλματος (Σφάλμα 1–4). Όπως παρατηρείται, το πρόβλημα είναι εφικτό μόνο στην περίπτωση χρήσης των Ευρωπαϊκών χαρακτηριστικών (EUR). Επιβεβαιώνεται εκ νέου ότι η αξιοποίηση του συντελεστή χρονικής προσαύξησης οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων, συγκριτικά με την απλή περίπτωση της χαρακτηριστικής εξίσωσης (5.1), επιτυγχάνοντας συγχρόνως αξιοσημείωτη μείωση στον χρόνο εκτέλεσης. Η επίλυση των μοντέλων NLP, QCQP και LP δεν είναι εφικτή, εξαιτίας της χρήσης κοινής χαρακτηριστικής εξίσωσης σε όλα τα στοιχεία υπερέντασης.

Πίνακας 5.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προβλήματος MINLP για το σύστημα IEEE 39 ζυγών

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	**MINLP (EUR)**		**MINLP (US)**	
	$CTA = 0$	$CTA \geq 0$	$CTA = 0$	$CTA \geq 0$
Αριθμός μεταβλητών	1106	1264	1106	1264
Αριθμός γραμμικών περιορισμών	158	158	158	158
Αριθμός μη γραμμικών περιορισμών	1186	1561	1186	1561
Αριθμός εφικτών λύσεων	1	1	Μη εφικτή λύση	
Αντικειμενική συνάρτηση (s)	224,733	186,971		
Χρόνος CPU (s)	3415,02	19,55		

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύνολο του ερευνητικού έργου που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύσσεται λεπτομερώς στα Κεφάλαια 2 έως 5. Στο παρόν κεφάλαιο, με το οποίο ολοκληρώνεται η διατριβή, ανακεφαλαιώνονται τα βασικά σημεία της έρευνας και συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματά της. Στη συνέχεια, παρατίθεται η συμβολή της διατριβής και τεκμηριώνεται η πρωτοτυπία των προτεινόμενων μεθόδων. Τέλος, καταγράφονται οι προτεινόμενες κατευθύνσεις επέκτασης του παρόντος ερευνητικού έργου.

6.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη πρωτότυπων μεθόδων, όσον αφορά την εφαρμογή προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας σε σύγχρονα δίκτυα διανομής και τον αυτοματοποιημένο υπολογισμό βέλτιστων τιμών ρύθμισης για τα στοιχεία υπερέντασης προσαρμοστικών ή μη συστημάτων προστασίας σε δίκτυα διανομής και συστήματα μεταφοράς. Στη συνέχεια της ενότητας, συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα κάθε κεφαλαίου.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται περιεκτικά το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύονται σε βάθος οι περιπτώσεις σφάλματος πλησίον και μακριά από σύγχρονη γεννήτρια και παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία συμμετρικών συνιστωσών. Επιπλέον, περιγράφεται η φύση της αντίστασης σφάλματος και παρουσιάζονται τα βασικά μοντέλα υπολογισμού της, όπως έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Στο τέλος του κεφαλαίου, αναλύεται σε βάθος η ειδική περίπτωση των διφασικών σφαλμάτων προς γη με αντίσταση.

Επιβεβαιώνεται για επαρκώς γειωμένα ηλεκτρικά δίκτυα, ότι η παρουσία αντίστασης σφάλματος σε διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη προκαλεί την αύξηση των φασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης, όταν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις ως προς τις ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις Thevenin θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος. Οι εν λόγω ικανές συνθήκες προσδιορίζονται αναλυτικά. Ως γενικό συμπέρασμα συνάγεται ότι η παρουσία αντίστασης σφάλματος δεν οδηγεί οπωσδήποτε σε περιορισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, στην περίπτωση διφασικού σφάλματος προς γη. Ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά σε επαρκώς γειωμένα δίκτυα, διότι σχετίζεται άμεσα με την επάρκεια του εξοπλισμού ισχύος των Υ/Σ και την επίδοση των μέσων προστασίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι παραδοσιακές τεχνικές προστασίας παθητικών δικτύων διανομής, τα οποία λειτουργούν σε ακτινική τοπολογία με μοναδική πηγή ρευμάτων βραχυκύκλωσης τον κύριο Υ/Σ. Στη συνέχεια, καταγράφονται και παράλληλα διερευνώνται οι νέες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι υπάρχουσες διατάξεις προστασίας στα σύγχρονα δίκτυα διανομής, τα οποία χαρακτηρίζονται από παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής διαφορετικών τεχνολογιών και μεταβαλλόμενη τοπολογία. Το σύνολο των εν δυνάμει προβλημάτων προστασίας επιβεβαιώνεται σε αντιπροσωπευτικό τμήμα του Ελληνικού δικτύου διανομής ΜΤ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Συμπεραίνεται ότι η αντιμετώπιση των εν λόγω προκλήσεων και η εξασφάλιση πλήρους προστασίας των σύγχρονων δικτύων διανομής μπορούν να επιτευχθούν, συνδυάζοντας την αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων προστασίας με την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών, οι οποίες καταγράφονται στο τέλος του κεφαλαίου.

Το Κεφάλαιο 4 επικεντρώνεται στα προσαρμοστικά συστήματα προστασίας, τα οποία αποτελούν την πλέον δημοφιλή λύση προστασίας σύγχρονων δικτύων διανομής, όπως προκύπτει από ενδελεχή βιβλιογραφική έρευνα. Στο πλαίσιο αξιολόγησης της συγκεκριμένης μεθόδου, αναπτύσσεται πρότυπη εργαστηριακή διάταξη, η οποία προσομοιώνει το δίκτυο διανομής με χρήση ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου, επιτηρεί αδιάλειπτα την τοπολογία του δικτύου με χρήση κεντρικής μονάδας ελέγχου και προσαρμόζει αυτόματα τις ομάδες ρυθμίσεων των Η/Ν, σε περίπτωση μεταβολής της τοπολογίας του δικτύου. Η λειτουργικότητα της εν λόγω διάταξης επιδεικνύεται μέσω σειράς δοκιμών κλειστού βρόχου. Βάσει των αποτελεσμάτων, η προτεινόμενη λύση εξασφαλίζει την προσαρμογή της προστασίας στις τρέχουσες λειτουργικές συνθήκες, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τα προβλήματα της τύφλωσης και συμπαθητικής λειτουργίας της προστασίας.

Το Κεφάλαιο 5 πραγματεύεται την εφαρμογή των στοιχείων υπερέντασης στα δίκτυα διανομής και τα συστήματα μεταφοράς, ως πρωτεύουσα ή δευτερεύουσα προστασία, καθώς και τον συστηματικό υπολογισμό κατάλληλων τιμών ρύθμισής τους, με στόχο τη μέγιστη δυνατή αξιοπιστία της προστασίας. Παρουσιάζονται εκτενώς οι μέθοδοι που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης. Εν συνεχεία, προτείνεται πρωτότυπη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, καλύπτοντας πλήρως το τεχνικό πρόβλημα.

Τα μοντέλα βελτιστοποίησης που αναπτύσσονται και οι προηγμένοι αλγόριθμοι επίλυσης που χρησιμοποιούνται ενσωματώνονται σε πακέτο λογισμικού, το οποίο χρησιμοποιείται για τον αυτοματοποιημένο υπολογισμό βέλτιστων τιμών ρύθμισης των στοιχείων υπερέντασης, ανεξαρτήτως κλίμακας του μελετώμενου ηλεκτρικού δικτύου. Η ευελιξία και η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου επιδεικνύονται μέσω δοκιμών σε πρότυπα συστήματα της σχετικής βιβλιογραφίας, καθώς επίσης και στο δίκτυο διανομής που προσομοιώνεται στο Κεφάλαιο 4. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, συμπεραίνεται ότι η χρήση του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού αποτελεί λύση υψηλής ποιότητας και επίδοσης για τον υπολογισμό βέλτιστων τιμών ρύθμισης, όσον αφορά τα στοιχεία υπερέντασης που εφαρμόζονται σε προσαρμοστικά ή μη συστήματα προστασίας.

6.2 ΣΥΜΒΟΛΗ – ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ

Βάσει των ανωτέρω συμπερασμάτων, η συμβολή και η πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής στο επιστημονικό αντικείμενο των σύγχρονων τεχνικών προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας συνοψίζονται στα ακόλουθα κύρια σημεία:

i. Προσδιορίζονται αναλυτικά οι προϋποθέσεις, οι οποίες καθιστούν το διφασικό σφάλμα προς γη με αντίσταση τη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος σε επαρκώς γειωμένα δίκτυα, επεκτείνοντας τη θεωρία ανάλυσης βραχυκυκλωμάτων.

ii. Καταγράφονται αναλυτικά και διερευνώνται σε βάθος τα προβλήματα προστασίας των σύγχρονων δικτύων διανομής, τα οποία ανακύπτουν κυρίως από την έντονη παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής.

iii. Προτείνεται ολοκληρωμένη λύση προστασίας για σύγχρονα δίκτυα διανομής, η οποία αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τα προηγούμενα προβλήματα.

iv. Αναπτύσσεται πρότυπη εργαστηριακή διάταξη για την αξιολόγηση και τον έλεγχο των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας δικτύων διανομής, με χρήση πραγματικού εξοπλισμού ελέγχου και προστασίας. Η εν λόγω εργαστηριακή διάταξη ανήκει στο Εργαστήριο ΣΗΕ της Σχολής ΗΜΜΥ ΕΜΠ και ενδείκνυται για την εκπαίδευση νέων μηχανικών και την εξοικείωσή τους με τα ψηφιακά συστήματα προστασίας.

v. Παρουσιάζεται πρωτότυπη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης, καλύπτοντας πλήρως το τεχνικό πρόβλημα. Ταυτόχρονα, βελτιώνονται τα μοντέλα γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού, τα οποία έχουν ήδη προταθεί στη βιβλιογραφία, χωρίς να υιοθετούνται οι απλουστευτικές παραδοχές των δημοσιευμένων εργασιών.

vi. Εισάγεται ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης, ως επιπλέον παράμετρος προς ρύθμιση των στοιχείων υπερέντασης, με αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης και της επίδοσης των αλγορίθμων επίλυσης.

vii. Διατυπώνεται με μαθηματικά ισοδύναμο τρόπο το πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού ως πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς, απλουστεύοντας τις

παραστάσεις της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Το προτεινόμενο μοντέλο υπολογίζει βέλτιστες τιμές ρύθμισης για την ένταση διέγερσης, τον χρονικό πολλαπλασιαστή και τον συντελεστή χρονικής προσαύξησης κάθε εξεταζόμενου στοιχείου υπερέντασης. Η δημοσίευση της συγκεκριμένης μεθόδου [229] αποτέλεσε εφαλτήριο περαιτέρω έρευνας διεθνώς, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την εργασία [226].

viii. Προτείνεται το νέο μοντέλο μεικτού ακέραιου–μη γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο παρέχει την πρόσθετη δυνατότητα προσδιορισμού βέλτιστης χαρακτηριστικής εξίσωσης για κάθε στοιχείο υπερέντασης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιμετωπίζει αποτελεσματικά την ανικανότητα εύρεσης εφικτής λύσης σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας, όταν χρησιμοποιείται κοινή χαρακτηριστική εξίσωση σε όλα τα εξεταζόμενα στοιχεία υπερέντασης.

ix. Αναπτύσσεται πακέτο λογισμικού για τον αυτοματοποιημένο προσδιορισμό ρυθμίσεων των στοιχείων υπερέντασης στο μελετώμενο δίκτυο, το οποίο ενσωματώνει πολλαπλά μοντέλα βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί προηγμένους αλγορίθμους για την επίλυσή τους. Παρέχεται στον χρήστη ευελιξία καθορισμού των μεταβλητών και των τεχνικών περιορισμών του προβλήματος, καθώς επίσης και δυνατότητα επιλογής του μοντέλου βελτιστοποίησης και του αλγορίθμου επίλυσης. Η χρήση του προτεινόμενου πακέτου λογισμικού συστηματοποιεί την απαιτητική εκπόνηση μελετών ρύθμισης και επιλογικής συνεργασίας των στοιχείων υπερέντασης, επιτυγχάνοντας συγχρόνως αποτελέσματα υψηλής ποιότητας.

6.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η διαρκής ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, σε συνδυασμό με την πλήρη απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλάζει ριζικά τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς και των δικτύων διανομής. Ως εκ τούτου, εντείνεται η ανάγκη επανεξέτασης των παραδοσιακών τεχνικών προστασίας που εφαρμόζονται έως σήμερα, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες προκλήσεις, με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων που θα εξασφαλίζουν την πλήρη προστασία των μελλοντικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εξυπηρετεί σε μεγάλο βαθμό τον προηγούμενο στόχο και μπορεί να αποτελέσει βάση περαιτέρω έρευνας σε θέματα προστασίας συστημάτων μεταφοράς και δικτύων διανομής. Ενδεικτικά, διαφαίνονται οι εξής προοπτικές επέκτασης του παρόντος ερευνητικού έργου:

- Διερεύνηση των ιδιοτήτων του διφασικού σφάλματος προς γη, όταν η συνολική αντίσταση σφάλματος έχει εκτός από ωμικό και επαγωγικό χαρακτήρα (π.χ. συμμετοχή αγωγών γης και μεταλλικών πυλώνων στη διαδρομή κυκλοφορίας των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας).
- Ολοκλήρωση του σχεδιασμού γενικού σχήματος προσαρμοστικής προστασίας, άμεσα εφαρμόσιμου σε σύγχρονα δίκτυα διανομής, το οποίο θα ικανοποιεί όλα τα κριτήρια αξιοπιστίας της προστασίας, και ιδιαίτερα το χαρακτηριστικό της διαθεσιμότητας. Πλήρης προστασία δικτύου θα πρέπει να εξασφαλίζεται διαρκώς, ακόμη και κατά τη διάρκεια προσαρμογής των ρυθμίσεων Η/Ν, από εναλλακτικά μέσα.
- Βελτίωση της επίδοσης των προτεινόμενων μοντέλων βελτιστοποίησης με την ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων χαλάρωσης των επί μέρους προβλημάτων.
- Διερεύνηση των ικανών και αναγκαίων συνθηκών για τη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης, όταν χρησιμοποιείται ο συντελεστής χρονικής προσαύξησης ως επιπλέον παράμετρος προς ρύθμιση των στοιχείων υπερέντασης.
- Επέκταση της βιβλιοθήκης χαρακτηριστικών εξισώσεων του πακέτου λογισμικού και ενσωμάτωσή του σε γενικό πρόγραμμα προσομοίωσης λειτουργίας ηλεκτρικών δικτύων, για τη συνολική αυτοματοποίηση των μελετών ροών φορτίου, βραχυκυκλωμάτων και επιλογικής συνεργασίας των προστασιών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Η τυποποιημένη χαρακτηριστική εξίσωση (5.1), βάσει της οποίας λειτουργούν τα στοιχεία υπερέντασης των σύγχρονων ψηφιακών Η/Ν, αναπαριστά τη δυναμική συμπεριφορά των Η/Ν πρώτης γενιάς. Η λειτουργία των επαγωγικών ηλεκτρομηχανικών Η/Ν βασίζεται στη γενική αρχή του επαγωγικού κινητήρα, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται δίσκος αντί δρομέα. Η περιστροφή του δίσκου επιτυγχάνεται με την παρουσία δύο μαγνητικών ροών σε φασική διαφορά, οι οποίες δημιουργούν την κινούσα ροπή [5], [253]. Η κινούσα ροπή που ασκείται στον δίσκο του Η/Ν είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος εισόδου και ισούται με το άθροισμα της γωνιακής επιτάχυνσης πολλαπλασιασμένης με τη ροπή αδράνειας του δίσκου, της ροπής απόσβεσης λόγω των δινορρευμάτων που επάγονται στον δίσκο και της ροπής που ασκεί το επανατακτικό ελατήριο στον δίσκο [254]:

$$K_I I^2 = m\frac{d^2\theta}{dt^2} + K_d\frac{d\theta}{dt} + \frac{\tau_F - \tau_s}{\theta_{max}}\theta + \tau_s \tag{A.1}$$

όπου,

θ, η γωνιακή θέση του δίσκου,

θ_{max}, η τελική γωνιακή θέση του δίσκου, για να κλείσει η επαφή εξόδου,

K_I, σταθερά του μαγνητικού κυκλώματος,

m, η ροπή αδράνειας του δίσκου,

I, το ρεύμα εισόδου,

K_d, συντελεστής απόσβεσης λόγω δινορρευμάτων,

τ_s, η αρχική ροπή του επανατακτικού ελατηρίου,

τ_F, η ροπή του επανατακτικού ελατηρίου στην τελική γωνιακή θέση του δίσκου.

Η μεταβολή της ροπής του επανατακτικού ελατηρίου είναι σχετικά μικρή μεταξύ της αρχικής και τελικής γωνιακής θέσης. Επιπλέον, ο δίσκος κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται αυξανόμενη ροπή όσο κινείται, για να εξισορροπήσει τη μικρή αύξηση της ροπής του επανατακτικού ελατηρίου. Η ροπή αδράνειας του δίσκου είναι επίσης μικρή, επομένως οι δύο σχετικοί όροι της εξίσωσης (Α.1) μπορούν να αμεληθούν. Τελικά, η χαρακτηριστική εξίσωση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$K_I I^2 - \tau_s = K_d\frac{d\theta}{dt} \tag{A.2}$$

Έστω M ο λόγος του ρεύματος εισόδου I προς την ένταση διέγερσης I_{pu}. Η σχέση (Α.2) γίνεται:

$$K_I\left(M I_{pu}\right)^2 - \tau_s = K_d\frac{d\theta}{dt} \tag{A.3}$$

Όταν $I = I_{pu}$, τότε $M = 1$ και η κινούσα ροπή είναι μηδενική. Επομένως:

$$K_I I_{pu}^2 - \tau_s = 0 \Rightarrow K_I I_{pu}^2 = \tau_s \tag{A.4}$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (Α.4) στην (Α.2), προκύπτει:

$$\tau_s\left(M^2 - 1\right) = K_d\frac{d\theta}{dt} \tag{A.5}$$

Με την ολοκλήρωση της σχέσης (Α.5) προκύπτει:

$$\theta_{max} = \int_0^{T_0}\frac{\tau_s}{K_d}\left(M^2 - 1\right)dt \tag{A.6}$$

όπου,

T_0, ο χρόνος περιστροφής του δίσκου, έως ότου φτάσει στην τελική γωνιακή θέση θ_{max}.

Διαιρώντας και τις δύο πλευρές της σχέσης (Α.6) με θ_{max}, προκύπτει:

$$\int_0^{T_0} \frac{\tau_s}{K_d \theta_{max}} \left(M^2 - 1\right) dt = 1 \tag{A.7}$$

Εάν εισαχθεί η σταθερά $A = K_d \theta_{max} / \tau_s$, η χαρακτηριστική εξίσωση λειτουργίας $t_{op}(I)$ δίνεται από τη σχέση (Α.8):

$$t_{op}(I) = \frac{A}{M^2 - 1} = T_0 \tag{A.8}$$

Στην προηγούμενη ανάλυση, δεν λήφθηκε υπόψη ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος. Στην πραγματικότητα, η διέλευση πολύ υψηλού ρεύματος εισόδου, πολλαπλάσιου της έντασης διέγερσης, οδηγεί σε κορεσμό του ηλεκτρομαγνήτη, με αποτέλεσμα ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν να μην μειώνεται περαιτέρω. Παρουσιάζει δηλαδή σταθερό χρόνο λειτουργίας, σε περίπτωση ρεύματος εισόδου πολύ υψηλής έντασης. Αυτός είναι και ο λόγος που οι συγκεκριμένοι Η/Ν καλούνται αντιστρόφου χρόνου σταθερής ελάχιστης τιμής (inverse definite minimum time, IDMT). Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του κορεσμού στον χρόνο λειτουργίας του Η/Ν υπερέντασης, εισάγεται η σταθερά C ως προσθετέος της σχέσης (Α.8). Ο εκθέτης του όρου M καθορίζει σε συνδυασμό με τις σταθερές A, C το σχήμα της καμπύλης αντιστρόφου χρόνου και μπορεί να λάβει τιμή διαφορετική του 2, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2. Συνεπώς, η σχέση (Α.8) λαμβάνει τελικά τη μορφή της (5.1).

Η σχέση (Α.8) αναπαριστά τη χαρακτηριστική λειτουργίας του Η/Ν υπερέντασης, τόσο για $M > 1$, όσο και για $0 < M < 1$. Εάν ο δίσκος έχει αρχική γωνιακή θέση θ_1 και η ένταση του ρεύματος εισόδου υποχωρήσει κάτω από την ένταση διέγερσης του Η/Ν ($I < I_{pu}$), τότε αρχίζει να στρέφεται προς την αντίθετη φορά (εξού και ο αρνητικός χρόνος που προκύπτει), έως ότου επανέλθει στην αρχική του θέση (reset). Εάν $M = 0$, ο χρόνος επαναφοράς είναι:

$$|t_r| = \frac{K_d \theta_1}{\tau_s} \tag{A.9}$$

και για $0 < M < 1$, η χαρακτηριστική εξίσωση επαναφοράς γίνεται βάσει της (Α.8):

$$t_{res}(I) = \frac{t_r}{M^2 - 1} \tag{A.10}$$

Σημειώνεται ότι κατά την επαναφορά δεν υπάρχει ενδεχόμενο κορεσμού, λόγω χαμηλού ρεύματος εισόδου, και ως εκ τούτου δεν εισάγεται επιπλέον προσθετέος στη σχέση (Α.10).

Η προηγούμενη ανάλυση αποτυπώνει τη δυναμική συμπεριφορά των επαγωγικών ηλεκτρομηχανικών Η/Ν. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου των σύγχρονων ψηφιακών Η/Ν λειτουργούν βάσει της ίδιας χαρακτηριστικής λειτουργίας και επαναφοράς. Η απαιτούμενη μεταβατική απόκριση των εν λόγω στοιχείων, ως προς τον χρόνο υστέρησης και τον χρόνο λειτουργίας σε σφάλμα μεταβαλλόμενης έντασης, προδιαγράφεται λεπτομερώς στο πρότυπο [255].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 5 ΖΥΓΩΝ

Στους Πίνακες Β.1 έως Β.6 παρατίθενται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δικτύου διανομής 5 ζυγών, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4 και την Παράγραφο 5.4.3.2. Το προσομοιούμενο δίκτυο λειτουργεί στα 50 Hz.

Πίνακας Β.1: Ισοδύναμο σύστημα 150 kV

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Στάθμη Βραχυκύκλωσης, MVA_{SC}	3000
Λόγος R/X	0,1

Πίνακας Β.2: Μ/Σ κύριου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Λόγος Μ/Σ (kV/kV)	150/20
Ονομαστική Ισχύς, S_{rT} (MVA)	40/50
Τάση Βραχυκύκλωσης, u_{kr} (%)	12,8
Απώλειες Χαλκού, P_{krT} (kW)	148
Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων	Dyn1
Γείωση Ουδετέρου	R = 12 Ω

Πίνακας Β.3: Γραμμές διανομής 20 kV

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ	
Ονομασία	Γραμμές 1.1, 2.1	Γραμμές 1.2, 2.2
Τύπος Αγωγού	ACSR	ACSR
Διατομή (mm^2)	95	35
Ωμική Αντίσταση, R_L (Ω/km)	0,215	0,576
Επαγωγική Αντίδραση, X_L (Ω/km)	0,334	0,397
Χωρητικότητα, C_L (μF/km)	0,01	0,01 μF/km
Μέγιστη Φόρτιση, I_{max} (A)	448	224
Μήκος, l (km)	5	4

Πίνακας Β.4: Συγκεντρωτικά φορτία

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ			
Ονομασία	Φορτίο 1.1	Φορτίο 1.2	Φορτίο 2.1	Φορτίο 2.2
Ονομαστικό Φορτίο, S_L (MVA)	6	3	5	4
Συντελεστής Ισχύος, $cos\varphi$	0,9 επαγ.			

Πίνακας Β.5: Μ/Σ διασύνδεσης γεννήτριας ΜΔΠ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Λόγος Μ/Σ (kV/kV)	20/0,4
Ονομαστική Ισχύς, S_{rT} (MVA)	2,5
Τάση Βραχυκύκλωσης, u_{kr} (%)	6
Απώλειες Χαλκού, P_{krT} (kW)	17
Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων	Dyn1
Γείωση Ουδετέρου	Στερεά

Πίνακας Β.6: Σύγχρονη γεννήτρια ΜΔΠ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Ονομαστική Τάση, V_r (kV)	0,4
Ονομαστική Ισχύς, S_r (MVA)	2,1
Συντελεστής Ισχύος, $cos\varphi$	0,85
Σύγχρονη Αντίδραση Ευθέος Άξονα (κορεσμένη), $X_{d,sat}$ (%)	271,3
Μεταβατική Αντίδραση Ευθέος Άξονα (κορεσμένη), $X'_{d,sat}$ (%)	18,6
Υπομεταβατική Αντίδραση Ευθέος Άξονα (κορεσμένη), $X''_{d,sat}$ (%)	11,7
Αντίδραση Αρνητικής Ακολουθίας, X_2 (%)	13
Αντίδραση Μηδενικής Ακολουθίας, X_0 (%)	10

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] W.A. Elmore, *Protective relaying theory and applications, 2nd ed*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA, 2004.

[2] J.L. Blackburn and T.J. Domin, *Protective relaying, principles and applications, 4th ed*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2014.

[3] CIGRE Working Group B5.19, "Protection relay coordination," Technical Brochure 432, CIGRE, Paris, 2010.

[4] *Network protection & automation guide*. Alstom Grid, 2011.

[5] Μ.Π. Παπαδόπουλος, *Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας*. ΕΜΠ, Αθήνα, 1997.

[6] *High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*, IEC 62271–100, 2012.

[7] *IEEE standard for ratings and requirements for AC high-voltage circuit breakers with rated maximum voltage above 1000 V*, IEEE C37.04, 2018.

[8] *Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers*, IEC 61869–2, 2012.

[9] *IEEE standard requirements for instrument transformers*, IEEE C57.13, 2016.

[10] *Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers*, IEC 61869–2, 2011.

[11] *Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements*, IEC 60255–1, 2009.

[12] S. Ward *et al.*, "Cyber security issues for protective relays," *Proc. 2007 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, June 2007.

[13] H.J.A. Ferrer and E.O. Schweitzer III, *Modern solutions for protection, control and monitoring of electric power systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA, USA, 2010.

[14] IEEE PES Power System Relaying Committee – Working Group I19, "Redundancy considerations for protective relaying systems," IEEE, 2007.

[15] *IEEE guide for protective relay applications to transmission lines*, IEEE C37.113, 2015.

[16] *IEEE standard for electrical power system device function numbers, acronyms, and contact designations*, IEEE C37.2, 2008.

[17] *Graphical symbols for diagrams*, IEC 60617, 2012.

[18] European Commission, "Energy roadmap 2050," Brussels, 2011.

[19] S.H. Horowitz, A.G. Phadke, and J.S. Thorp, "Adaptive transmission system relaying," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp. 1436–1445, October 1988.

[20] G.D. Rockefeller, C.L. Wagner, and J.R. Linders, "Adaptive transmission relaying concepts for improved performance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp. 1446–1458, October 1988.

[21] CIGRE Task Force 38.02.19, "System protection schemes in power networks," Technical Brochure 187, CIGRE, Paris, 2001.

[22] *Communication networks and systems for power utility automation – Part 90–5: Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118*, IEC TR 61850–90–5, 2012.

[23] K. Hinkley and C. Mistry, "First digital substation in TransGrid – Australia: A journey, business case, lessons," *Proc. 12th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Belfast, UK, March 2018.

[24] P. Mohapatra *et al.*, "FITNESS – GB's pilot multi-vendor digital substation: Testing and Validation Considerations," *Proc. 12th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Belfast, UK, March 2018.

[25] R. Thomas *et al.*, "Non-conventional instrument transformers enabling digital substations for future grid," *Proc. 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Dallas, TX, USA, May 2016.

[26] CIGRE Working Group B5.31, "Life-time management of relay settings," Technical Brochure 539, CIGRE, Paris, 2013.

[27] N. Tleis, *Power systems modelling and fault analysis*. Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2008.

[28] P.M. Anderson, *Analysis of fault power systems*. IEEE Press, New York, NY, USA, 1995.

[29] V.A. Papaspiliotopoulos and G.N. Korres, "A peculiar property of double-phase-to-ground faults in the presence of fault resistance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 33, No. 4, pp. 2044–2046, February 2018.

[30] Οδηγία Διανομής Νο. 21, "Προστασία εναέριων δικτύων Μ.Τ. έναντι βραχυκυκλωμάτων," ΔΕΗ, Αθήνα, Απρίλιος 1973.

[31] J. Esztergalyos *et al.*, "Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 182–192, January 1992.

[32] G. Bertagnolli, S*hort-circuit duty of power transformers, 3rd ed*. ABB, 2006.

[33] P. Kundur, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1994.

[34] J.E. Brittain, "Thevenin's theorem," *IEEE Spectrum*, Vol. 27, No. 3, pp. 42, March 1990.

[35] Ι.Δ. Κανελλόπουλος, *Ηλεκτρικά κυκλώματα*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1995.

[36] J. Machowski, J.W. Bialek, and J.R. Bumby, *Power system dynamics, stability and control, 2nd ed.* John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2008.

[37] Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, και Κ. Ντελκής, *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έλεγχος και ευστάθεια συστήματος.* Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2011.

[38] Β.Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι: Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*. ΕΜΠ, Αθήνα, 1985.

[39] J.J. Grainger and W.D. Stevenson, Jr., *Power system analysis*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1994.

[40] R.H. Park, "Two reaction theory of synchronous machines, generalized method of analysis – Part I," *AIEE Transactions*, Vol. 48, No. 3, pp. 716–727, July 1929.

[41] A. Blondel, "The two-reaction method for study of oscillatory phenomena in coupled alternators," *Revue Generale de L 'Electricite*, Vol. 13, pp. 235–251, February 1923.

[42] R.E. Doherty and C.A. Nickle, "Synchronous machines I – An extension of Blondel's two-reaction theory," *AIEE Transactions*, Vol. 45, pp. 912–947, June 1926.

[43] C. Concordia, *Synchronous machines, theory and performance*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1951.

[44] *IEEE guide for test procedures for synchronous machines, Part I – Acceptance and performance testing, Part II – Test procedures and parameter determination for dynamic analysis*, IEEE 115, 2009.

[45] *Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*, IEC 60034–4, 2008.

[46] *IEEE recommended practice for calculating ac short-circuit currents in industrial and commercial power systems*, IEEE 551, 2006.

[47] M. Kostenko and I. Piotrovsky, *Electrical machines, Vol. 2 Alternating current machines, 3rd ed.* Mir Publishers, Moscow, Soviet Union, 1974.

[48] E.W. Kimbark, *Power system stability: synchronous machines*. Dover Publications, Inc., New York, NY, USA, 1956.

[49] B.R. Prentice, "Fundamental concepts of synchronous machine reactances," *AIEE Transactions*, Vol. 56, No. 12, pp. 1–27, December 1937.

[50] Β.Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος ΙΙ: Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις*. ΕΜΠ, Αθήνα, 1993.

[51] W.A Thomas, "Negative-sequence reactance of synchronous machines," *AIEE Transactions*, Vol. 55, No. 12, pp. 1378–1385, December 1936.

[52] *IEEE guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses*, IEEE 1110, 2002.

[53] R.E. Doherty, "A simplified method of analyzing short-circuit problems," *AIEE Transactions*, Vol. 42, pp. 841–849, January 1923.

[54] J.B. Smith and C.N. Weygandt, "Double-line-to-neutral short circuit of an alternator," *AIEE Transactions*, Vol. 56, No. 9, pp. 1149–1155, September 1937.

[55] D.S. Baker, "Generator backup overcurrent protection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA–18, No. 6, pp. 632–640, November/December 1982.

[56] W.C. Huening, Jr., "Calculating short-circuit currents with contributions from induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA–18, No. 2, March/April 1982.

[57] D. Broussard, "Understanding short-circuit motor contribution," GE Industrial Solutions [Online] Available: http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/SC-Motor?TNR=White%20Papers|SC-Motor|generic.

[58] B. Adkins and R.G. Harley, *The General Theory of Alternating Current Machines: Application to Practical Problems*. Chapman and Hall, London, UK, 1975.

[59] C.B. Cooper, D.M. MacLean, and K.G. Williams, "Application of test results to the calculation of short-circuit levels in large industrial systems with concentrated induction-motor loads," *IEE Proceedings*, Vol. 116, No. 11, pp. 1900–1906, November 1969.

[60] S.S. Kalsi, D.D. Stephen, and B. Adkins, "Calculation of system-fault currents due to induction motors," *IEE Proceedings*, Vol. 118, No. 1, pp. 201–215, January 1971.

[61] C.F. Wagner and R.D. Evans, *Symmetrical components*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1933.

[62] C.L. Fortesque, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *AIEE Transactions*, Vol. 37, pp. 1027–1140, July 1918.

[63] J.L. Blackburn, *Symmetrical components for power systems engineering*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA, 1993.

[64] *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents*, IEC 60909–0, 2016.

[65] *IEEE guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems—part I: introduction*, IEEE C62.92.1, 2016.

[66] *Insulation co-ordination – Part 2: Application guidelines*, IEC 60071–2, 2018.

[67] *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*, IEC 60071–1, 2006.

[68] Δεκαετές πρόγραμμα ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς 2018–2027, ΑΔΜΗΕ, Μάρτιος 2018.

[69] H. Ayrton, "The mechanism of the electric arc," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 199, pp. 299–336, 1902.

[70] *IEEE guide for protective relay applications to transmission lines*, IEEE C37.113, 2015.

[71] F. Calero, A. Guzmán, and G. Benmouyal, "Adaptive phase and ground quadrilateral distance elements," *Proc. 36th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, USA, October 2009.

[72] G. Ziegler, *Numerical distance protection, 4th ed*. Publicis Publishing, Erlangen, Germany, 2011.

[73] *Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth*, IEC 60909–3, 2009.

[74] *IEEE guide for safety in ac substation grounding,* IEEE P80, 2013.

[75] E.B. Joffe and K.S. Lock*, Grounds for grounding, a circuit-to-system handbook*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2010.

[76] A.R.C. Warrington, "Reactance relays negligibly affected by arc impedance", *Electrical World*, Vol. 98, No. 12, pp. 502–505, September 1931.

[77] *Applied protective relaying*. Westinghouse Electric Corporation, 1976.

[78] V.V. Terzija and H.J. Koglin, "On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 1012–1017 July 2004.

[79] Μ.Π. Παπαδόπουλος*, Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.* ΕΜΠ., Αθήνα, 1994.

[80] *Electrical transmission and distribution reference book*. Westinghouse Electric Corporation, 1964.

[81] W.H. Kersting, *Distribution system modeling and analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2014.

[82] T.A. Short, *Electric power distribution handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2003.

[83] T. Gönen, *Electric power distribution engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2007.

[84] N. Jenkins, J.B. Ekanayake, and G. Strbac, *Distributed generation*. The Institution of Engineering and Technology (IET), London, UK, 2010.

[85] Π.Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας*. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.

[86] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, Vol. 57, No. 3, pp. 195−204, April 2001.

[87] S.A. Papathanassiou, "A technical evaluation framework for the connection of DG to the distribution network," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 1, pp. 24−34, January 2007.

[88] Σ.Α. Παπαθανασίου, *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων*. ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.

[89] G.T. Heydt, "The next generation of power distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 225–235, November 2010.

[90] CIGRE Working Group C6.11, "Development and operation of active distribution networks," Technical Brochure 457, CIGRE, Paris, 2011.

[91] N. Hatziargyriou, *Microgrids, Architectures and control*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK, 2014.

[92] CIGRE Working Group C6.22, "Microgrids 1 engineering, economics, & experience," Technical Brochure 635, CIGRE, Paris, 2015.

[93] R.A. Walling *et al.*, "Summary of distributed resources impact on power delivery systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 3, pp. 1636–1644, July 2008.

[94] V.A. Papaspiliotopoulos, G.N. Korres, and N.D. Hatziargyriou, "Adverse impact of distributed generation on protection of the Hellenic MV network – Recommendations for protection scheme upgrade," *CIRED Open Access Proceedings Journal*, Vol. 1, pp. 934–938, October 2017.

[95] J.M. Gers and E.J. Holmes, *Protection of electricity distribution networks*. The Institution of Engineering and Technology (IET), London, 2011.

[96] *IEEE guide for protective relay applications to distribution lines*, IEEE C37.230, 2007.

[97] *Electrical distribution-system protection 3rd ed.* Cooper Power Systems, Highland, CA, USA, 1990.

[98] *Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under current protection*, IEC 60255–151, 2009.

[99] *IEEE standard inverse–time characteristic equations for overcurrent relays*, IEEE C37.112, 1996.

[100] D.R. Joens and T. Weir, "Application of single Phase sectionalizers with three phase reclosers to increase reliability," *Proc. Rural Electric Power Conference*, Scottsdale, AZ, USA, June 2004.

[101] R.M. Cheney, J.T. Thorne, and G. Hataway, "Distribution single-phase tripping and reclosing: overcoming obstacles with programmable recloser controls," *Proc. 35th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, USA, October 2008.

[102] M. Nagpal *et al.*, "Dispersed generation interconnection – utility perspective," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 42, No. 3, pp. 864–872, May/June 2006.

[103] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of distributed generation in the power system*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2011.

[104] *Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks on or after 27 April 2019*, Energy Networks Association (ENA) G99, 2019.

[105] *Reference technical rules for the connection of active and passive consumers to the HV and MV electrical networks of distribution company*, CEI–0–16, 2019.

[106] *IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces*, IEEE 1547, 2018.

[107] N.K. Roy and H.R. Pota, "Current status and issues of concern for the integration of distributed generation into electricity networks," *IEEE Systems Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 933–944, September 2015.

[108] G. Antonova *et al.*, "Distributed generation and its impact on power grids and microgrids protection," *Proc. 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, April 2012.

[109] B. Hussain *et al.*, "Integration of distributed generation into the grid: Protection challenges and solutions," *Proc. 10th IET Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Manchester, UK, 2010.

[110] IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group, "Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants," *Proc. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, Canada, July 2009.

[111] T. Kauffmann *et al.*, "Phasor domain modeling of Type III wind turbine generator for protection studies," *Proc. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, USA, July 2015.

[112] U. Karaagac *et al.*, "Phasor domain modeling of Type IV wind turbine generator for protection studies," *Proc. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, USA, July 2015.

[113] M.E. Baran and I. El-Markaby, "Fault analysis on distribution feeders with distributed generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 1757–1764, November 2005.

[114] T.N Boutsika and S.A. Papathanassiou, "Short-circuit calculations in networks with distributed generation," *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 7, pp. 1181–1191, July 2008.

[115] R.A. Walling, E. Gursoy, and B. English, "Current contributions from Type 3 and Type 4 wind turbine generators during faults," *Proc. 2011 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, USA, July 2011.

[116] IEEE Power System Relaying Committee, "Fault current contributions from wind plants," IEEE, 2013.

[117] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid converters for photovoltaic and wind power system, 1st ed*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2011.

[118] E. Muljadi *et al*., "Different factors affecting short circuit behavior of a wind power plant," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 1, pp. 284–292, January/February 2013.

[119] R.C. Dugan, T.S. Key, and G.J. Ball, "Distributed resources standards," *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 12, No. 1, pp. 27–34, January/February 2006.

[120] North American Electric Reliability Corporation (NERC), "Coordination of protection systems for performance during faults," Report PRC-027-1, 2018.

[121] K. Maki, S. Repo, and P. Jarventausta, "General procedure of protection planning for installation of distributed generation in distribution network," *International Journal of Distributed Energy Resources*, Vol. 2, No. 1, pp. 47–64, 2006.

[122] K. Maki, S. Repo, and P. Jarventausta, "Methods for assessing the protection impacts of distributed generation in network planning activities," *Proc. 9th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Glasgow, UK, March 2008.

[123] IEEE Power System Relaying Committee, "Impact of distributed resources on distribution relay protection," IEEE, 2004.

[124] C.J. Mozina, "Impact of green power inverter-based distributed generation on distribution systems," *Proc. 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, April 2014.

[125] R.F. Arritt and R.C. Dugan, "Distributed generation interconnection transformer and grounding selection," *Proc. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, PA, USA, July 2008.

[126] B. Hussain *et al.*, "Integration of distributed generation into the grid: Protection challenges and solutions," *Proc. 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Manchester, UK, 2010.

[127] R.C. Dugan and T.E. McDermott, "Distributed generation," *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 8, No. 2, pp. 19–25, March/April 2002.

[128] J.I. Marvik, A. Petterteig, and H.K. Hoidalen, "Analysis of fault detection and location in medium voltage radial networks with distributed generation," *Proc. 2007 IEEE Power Tech*, Lausanne, Switzerland, July 2007.

[129] E.O. Schweitzer, III, D. Finney, and M.V. Mynam, "Applying radio communication in distribution generation teleprotection schemes," *Proc. 38th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, USA, October 2011.

[130] D. Williston and D. Finney, "Consequences of out-of-phase reclosing on feeders with distributed generators," *Proc. 38th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, USA, October 2011.

[131] Ε. Λεκατσάς, *Θέματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. υπερτάσεις – διαβάθμιση μονώσεως – σχεδιασμός γραμμών μεταφοράς και υποσταθμών*. ΔΕΗ, Αθήνα, 1985.

[132] CIGRE Joint Working Group B5/C6.26/CIRED, "Protection of distribution systems with distributed energy resources," Technical Brochure 613, CIGRE Paris, 2015.

[133] Hydro One Networks Inc., "Distributed generation technical interconnection requirements," DT-10-015 R2, 2011.

[134] R.C. Dugan and D.T. Rizy, "Electric distribution protection problems associated with the interconnection of small dispersed generation devices," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1121–1127, June 1984.

[135] Fourth progress report on the promotion and use of energy from renewable sources in Greece, Ministry of Environment and Energy, 2018.

[136] ΕΠΙΣΕΥ/ΕΜΠ, «Τεχνικά χαρακτηριστικά δικτύου και συστήματος,» Αναφορά για το έργο: "Διερεύνηση λειτουργικών προβλημάτων και προβλημάτων επιλογικής συνεργασίας μέσων προστασίας στο Ελληνικό Δίκτυο Διανομής ΜΤ με διεσπαρμένη παραγωγή – Πρόβλεψη λειτουργικών προβλημάτων και προτάσεις βελτίωσης των σχημάτων προστασίας," Αθήνα, Νοέμβριος 2015.

[137] ΕΠΙΣΕΥ/ΕΜΠ, «Ανάλυση προβλημάτων επιλογικής συνεργασίας των προστασιών του δικτύου λόγω της υψηλής διείσδυσης μονάδων ΔΠ – Προτάσεις βελτίωσης της λειτουργίας των υφιστάμενων προστασιών, Αναθ. 1,» Αναφορά για το έργο: Διερεύνηση λειτουργικών προβλημάτων και προβλημάτων επιλογικής συνεργασίας μέσων προστασίας στο Ελληνικό Δίκτυο Διανομής ΜΤ με διεσπαρμένη παραγωγή – Πρόβλεψη λειτουργικών προβλημάτων και προτάσεις βελτίωσης των σχημάτων προστασίας, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016.

[138] A. Zamani, T. Sidhu, and A. Yazdani, "A strategy for protection coordination in radial distribution networks with distributed generators," *Proc. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Providence, RI, USA, July 2010.

[139] *IEEE application guide for IEEE Std 1547^{TM}, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems*, IEEE 1547.2, 2008.

[140] A. Morandi, "Fault Current Limiter: An Enabler for Increasing Safety and Power Quality of Distribution Networks," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 23, No. 6, December 2013.

[141] K. Wheeler, M. Elsamahy, and S. Faried, "Use of superconducting fault current limiters for mitigation of distributed generation influences in radial distribution network fuse–recloser protection systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 7, pp. 1605–1612, May 2017.

[142] W. Wang *et al.*, "Looping radial distribution systems using superconducting fault current limiters: feasibility and economic analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 3, pp. 2486–2495, May 2018.

[143] I. Chilvers, N. Jenkins, and P. Crossley, "Distance relaying of 11kV circuits to increase the installed capacity of distributed generation," *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, No. 1, pp. 40–46, January 2005.

[144] A. Sinclair *et al.*, "Distance protection in distribution systems: how it assists with integrating distributed resources," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 3, pp. 2186–2196, May/June 2014.

[145] K. Pandakov, H.Kr. Høidalen, and J.I. Marvik, "Implementation of distance relaying in distribution network with distributed generation," *Proc. 13th IET Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Edinburgh, UK, March 2016.

[146] A.M. Tsimtsios and V.C. Nikolaidis, "Setting zero-sequence compensation factor in distance relays protecting distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 33, No. 3, pp. 1236–1246, June 2018.

[147] A.M. Tsimtsios and V.C. Nikolaidis, "Application of distance protection in mixed overhead-underground distribution feeders with distributed generation," *The Journal of Engineering*, Vol. 2018, No. 15, pp. 950–955, October 2018.

[148] More Microgrids – DC2: Novel protection systems for microgrids, Final Report, EU Project, 2009.

[149] C.J. Mozina, "Interconnect protection of dispersed generators," *Proc. 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Atlanta, GA, USA, August 2002.

[150] Qualsys Engco. Inc., "Protection coordination planning with distributed generation," Natural Resources Canada, June 2007.

[151] H. Laaksonen, "Advanced islanding detection functionality for future electricity distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 4, pp. 2056–2064, October 2013.

[152] M. Guillot *et al.*, "Protection of embedded generation connected to a distribution network and loss of mains detection," *Proc. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Amsterdam, Netherlands, August 2002.

[153] W.G. Hartmann, "How not to nuisance-trip distributed generation," *Proc. Rural Electric Power Conference 2003*, Raleigh-Durham, NC, USA, May 2003.

[154] A.K. Jampala, S.S. Venkata, and M.J. Damborg, "Adaptive transmission protection: concepts and computational issues," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 177–185, January 1989.

[155] R. Das *et al.*, "Distribution automation strategies: evolution of technologies and the business case," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 2166–2175, July 2015.

[156] S.M. Brahma and A.A. Girgis, "Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, pp. 56–63, January 2004.

[157] H. Wan, K.K. Li, and K.P. Wong, "An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 5, pp. 2118–2124, September/October 2010.

[158] P. Mahat *et al.,* "A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 3, pp. 428–437, September 2011.

[159] M. Ojaghi, Z. Sudi, and J. Faiz, "Implementation of full adaptive technique to optimal coordination of overcurrent relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 1, pp. 235–244, January 2013.

[160] S. Shen *et al*., "An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized thevenin equivalent parameters estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 1, pp. 411–419, February 2017.

[161] A. Rahmati, *et. al.*, "An overcurrent protection relay based on local measurements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 3, pp. 2081–2085, May/June 2015.

[162] B. Hussain *et al*., "An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 2, pp. 669–677, April 2013.

[163] S.S. Venkata *et al*., "Advanced and adaptive protection for active distribution grid," *Proc. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Stockholm, Sweden, June 2013.

[164] P.H. Shah and B.R. Bhalja, "New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser-fuse miscoordination during distributed generation interconnections," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, No. 4, pp. 682–688, April 2014.

[165] M.A. Haj-ahmed and M.S. Illindala, "The influence of inverter-based DGs and their controllers on distribution network protection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 4, pp. 2928–2937, July/August 2014.

[166] F. Coffele, C. Booth, and A. Dyśko, "An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 2, pp. 561–568, April 2015.

[167] S-C Hsieh *et al.*, "Adaptive relay setting for distribution systems considering operation scenarios of wind generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 2, pp. 1356–1363, March/April 2014.

[168] H. Laaksonen, D. Ishchenko, and A. Oudalov, "Adaptive protection and microgrid control design for Hailuoto island," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 3, pp. 1486–1493, May 2014.

[169] L. Che, M.E. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Adaptive protection system for microgrids: protection practices of a functional microgrid system," *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 2, No. 1, pp. 66–80, March 2014.

[170] M. Ojaghi and V. Mohammadi, "Use of clustering to reduce the number of different setting groups for adaptive coordination of overcurrent relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 33, No. 3, pp. 1204–1212, June 2018.

[171] Z. Liu *et al.*, "A multiagent system-based protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 1, pp. 536–545, February 2017.

[172] E. Purwar, D.N. Vishwakarma, and S.P. Singh, "A novel constraints reduction-based optimal relay coordination method considering variable operational status of distribution system with DGs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 1, pp. 889–898, January 2019.

[173] M.Y. Shih *et al.*, "An adaptive overcurrent coordination scheme to improve relay sensitivity and overcome drawbacks due to distributed generation in smart grids," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, No. 6, pp. 5217–5228, November/December 2017.

[174] M.N. Alam, "Adaptive protection coordination scheme using numerical directional overcurrent relays," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 1, pp. 64–73, January 2019.

[175] R. Jain, D.L. Lubkeman, and S.M. Lukic, "Dynamic adaptive protection for distribution systems in grid-connected and islanded modes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 34, No. 1, pp. 281–289, February 2019.

[176] Π.Χ. Κοτσαμπόπουλος, *Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο επιδράσεων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής με χρήση ψηφιακών μοντέλων και πραγματικού εξοπλισμού.* Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2017.

[177] S. Lentijo, S. D'Arco, and A. Monti, "Comparing the dynamic performances of power hardware-in-the-loop interfaces," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 4 pp. 1195–1207, April 2010.

[178] I. Munteanu *et al.*, "Hardware-in-the-loop-based simulator for a class of variable-speed wind energy conversion systems: design and performance assessment," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 2, pp. 564–576, June 2010.

[179] V. Kleftakis *et al.*, "Power-hardware-in-the-loop simulation of a D-STATCOM equipped MV network interfaced to an actual PV inverter," *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe 2013*, Copenhagen, Denmark, October 2013.

[180] F. Huerta *et al.*, "Power-hardware-in-the-loop test beds: evaluation tools for grid integration of distributed energy resources," *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 22, No. 2, pp. 18–26, March/April 2016.

[181] S. Suryanarayanan *et al.*, "A real-time controller concept demonstration for distributed generation interconnection," *Proc. 2006 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Montreal, Canada, June 2006.

[182] C.A. Apostolopoulos and G.N. Korres, "Real-time implementation of digital relay models using MATLAB/SIMULINK and RTDS," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 20, No. 3, pp. 290–305, April 2010.

[183] M.S. Almas, R. Leelaruji, and L. Vanfretti, "Over-current relay model implementation for real time simulation & hardware-in-the-loop (HIL) validation," *Proc. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Montreal, Canada, October 2012.

[184] L.A. Montoya and D. Montenegro, "Adaptive protection testbed using real time and hardware-in-the-loop simulation," *Proc. 2013 IEEE Power Tech Conference*, Grenoble, France, June 2013.

[185] M.S. Almas and L. Vanfretti, "Methodologies for power protection relay testing: from conventional to real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulation," *Proc. 10th International Conference on Power System Transients*, Vancouver, Canada, July 2013.

[186] Z. Liu and H.K. Hoidalen, "An adaptive inverse time overcurrent relay model implementation for real time simulation and hardware-in-the-loop testing," *Proc. 13th IET Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Edinburgh, UK, March 2016.

[187] M.S. Almas and L. Vanfretti, "RT-HIL implementation of the hybrid synchrophasor and GOOSE-based passive islanding schemes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 31, No. 3, pp. 1299–1309, June 2016.

[188] E.C. Piesciorovsky and N.N. Schulz, "Comparison of non-real-time and real-time simulators with relays in-the-loop for adaptive overcurrent protection," *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 657–668, February 2017.

[189] E.C. Piesciorovsky and N.N. Schulz, "Comparison of programmable logic and setting group methods for adaptive overcurrent protection in microgrids," *Electric Power Systems Research*, Vol. 151, pp. 273–282, October 2017.

[190] M.M. Alam *et al.*, "Performance evaluation of distance protection of transmission lines connected with VSC-HVDC system using closed-loop test in RTDS," *Electric Power Systems Research*, Vol. 152, pp. 168–183, November 2017.

[191] G. Nimmersjo *et al.*, "A digitally-controlled, real-time, analog power-system simulator for closed-loop protective relaying testing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 1, pp. 138–152, January 1988.

[192] V.A. Papaspiliotopoulos *et al.*, "Hardware-in-the-loop design and optimal setting of adaptive protection schemes for distribution systems with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 1, pp. 393–400, February 2017.

[193] V.A. Papaspiliotopoulos, G.N. Korres, and N.D. Hatziargyriou, "An adaptive protection infrastructure for modern distribution grids with distributed generation," *Cigre Science & Engineering*, Vol. 7, pp. 125–132, February 2017.

[194] RTDS Technologies, https://www.rtds.com/.

[195] Β.Α. Παπασπηλιωτόπουλος, *Εργαστηριακό σύστημα προστασίας & εποπτείας μονάδας παραγωγής & μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας – Μελέτη και έλεγχος προστασίας του μετασχηματιστή ανύψωσης*. Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούνιος 2012.

[196] Δ.Ε. Καραλέξης, *Εργαστηριακό σύστημα προστασίας & εποπτείας μονάδας παραγωγής & μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας – Προστασία γραμμής μεταφοράς μέσω ψηφιακού ηλεκτρονόμου*. Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούνιος 2013.

[197] W.K. Sonnemann, "A study of directional element connections for phase relays," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 69, No. 2, pp. 1438–1451, January 1950.

[198] J. Roberts and A. Guzman, "Directional element design and evaluation," *Proc. 21st Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, USA, October 1994.

[199] B. Fleming, "Negative-Sequence Impedance Directional Element," *Proc. 10th Annual ProTest User Group Meeting*, Pasadena, CA, USA, February 1998.

[200] IEEE Power System Relaying Committee, “Loss of ac voltage considerations for line protection,” IEEE, 2006.

[201] C.H. Griffin, “Principles of ground relaying for high voltage and extra high voltage transmission lines,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 2, pp. 420–432, February 1983.

[202] IEEE Power System Relaying Committee, “Transmission Line Applications of Directional Ground Overcurrent Relays,” IEEE, 2014.

[203] *IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems*, IEEE 242, 2001.

[204] A.J. Urdaneta, R. Nadira, and L.G. Perez, “Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, pp. 903–911, July 1988.

[205] A.J. Urdaneta *et al.*, “Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 122–129, January 1996.

[206] B. Chattopadhyay, M.S. Sachdev, and T.S. Sidhu, “An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 165–173, January 1996.

[207] A.J. Urdaneta, L.G. Perez, and H. Restrepo, “Optimal coordination of directional overcurrent relays considering dynamic changes in the network topology,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, pp. 1458–1464, October 1997.

[208] L.G. Perez and A.J. Urdaneta, “Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 4, pp. 1276–1284, October 1999.

[209] H.H. Zeineldin, E.F. El-Saadany, and M.M.A. Salama, “Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization,” *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, No. 11, pp. 988–995, July 2006.

[210] D. Birla, R.P. Maheshwari, and 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.

[211] D. Birla, R.P. Maheshwari, and H.O. Gupta, “An approach to tackle the threat of sympathy trips in directional overcurrent relay coordination,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 2, pp. 851–858, April 2007.

[212] M.M. Mansour, S.F. Mekhamer, and N. El-Kharbawe, “A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, pp. 1400–1410, July 2007.

[213] A.S. Noghabi, J. Sadeh, and H.R. Mashhadi, “Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, pp. 1857–1863, October 2009.

[214] A.S. Noghabi, H.R. Mashhadi, and J. Sadeh, “Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, pp. 1348–1354, July 2010.

[215] P.P. Bedekar and 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, January 2011.

[216] T. Amraee, “Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 3, pp. 1415–1422, July 2012.

[217] H.H. Zeineldin *et al.*, "A Protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 3, pp. 1523–1532, September 2013.

[218] R. Corrêa *et al.*, "Online coordination of directional overcurrent relays using binary integer programming," *Electric Power Systems Research*, Vol. 127, pp. 118–125, October 2015.

[219] K.A. Saleh *et al.*, "Dual-setting characteristic for directional overcurrent relays considering multiple fault locations," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 12, pp. 1332–1340, September 2015.

[220] L. Huchel and H.H. Zeineldin, "Planning the coordination of directional overcurrent relays for distribution systems considering DG," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 3, pp. 1642–1649, May 2016.

[221] M.N. Alam, B. Das, and V. Pant, "An interior point method based protection coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 81, pp. 153–164, October 2016.

[222] H. Saberi and T. Amraee, "Coordination of directional over-current relays in active distribution networks using generalised benders decomposition," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 16, pp. 4078–4086, November 2017.

[223] A. Yazdaninejadi *et al.*, "Protection coordination of directional overcurrent relays: new time current characteristic and objective function," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 1, pp. 190–199, January 2018.

[224] R.M. Chabanloo, M. Safari, and R.G. Roshanagh, "Reducing the scenarios of network topology changes for adaptive coordination of overcurrent relays using hybrid GA–LP," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 21, pp. 5879–5890, November 2018.

[225] T.S. Aghdam *et al.*, "Optimal coordination of double-inverse overcurrent relays for stable operation of DGs," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 1, pp. 183–192, January 2019.

[226] Srinivas STP, P.P. Verma, and K.S. Swarup, "A novel convexified linear program for coordination of directional overcurrent relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 34, No. 2, pp. 769–772, April 2019.

[227] J.A. Bondy and U.S.R. Murty, *Graph theory*. Springer-Verlag, London, UK, 2008.

[228] D.P. Bertsekas, A. Nedic, and A.E. Ozdaglar, *Convex analysis and optimization*. Athena Scientific, Belmont, MA, USA, 2003.

[229] V.A. Papaspiliotopoulos, G.N. Korres, and 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, February 2017.

[230] R.E Albrecht *et al.*, "Digital computer protective device co-ordination program I–General program description," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, No. 4, pp. 402–410, April 1964.

[231] H.Y. Tsien, "An automatic digital computer program for setting transmission line directional overcurrent relays," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, No. 10, pp. 1048–1053, October 1964.

[232] R.A. Kennedy and L.E. Curtis, "Overcurrent protective device coordination by computer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-18, No. 5, pp. 445–456, September/October 1982.

[233] M.J. Damborg *et al.*, "Computer aided transmission protection system design – Part I: algorithms," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 1, pp. 51–59, January 1984.

[234] R. Ramaswami *et al.*, "Computer aided transmission protection system design – Part II: implementation and results," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 1, pp. 60–65, January 1984.

[235] D.E. Schultz and S.S. Waters, "Computer-aided protective device coordination – A case study," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 11, pp. 3296–3301, November 1984.

[236] Y. Oura *et al.*, "Interactive computation system for relay setting and simulation of relay operation in a large scale EHV power system," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 7, pp. 1767–1773, July 1985.

[237] J.A. Juves *et al.*, "The concept of figure of merit applied to protection system coordination," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, No. 4, pp. 31–40, October 1986.

[238] IEEE Power System Relaying Committee, "Computer aided coordination of line protection schemes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, pp. 575–583, April 1991.

[239] B. Chong *et al.*, "National grid back-up protection setting tool for grading coordination across distribution network operators/third party interfaces," *Proc. 13th IET Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Edinburgh, UK, March 2016.

[240] V.A. Papaspiliotopoulos and G.N. Korres, "Innovative solution for overcurrent relay coordination studies in power delivery networks using optimisation techniques," *The Journal of Engineering*, Vol. 2018, No. 15, pp. 1103–1108, October 2018.

[241] MATLAB, https://www.mathworks.com/.

[242] OPTI Toolbox, https://www.inverseproblem.co.nz/OPTI/.

[243] IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio.

[244] Ipopt Solver, https://github.com/coin-or/Ipopt.

[245] A. Wächter and L.T. Biegler, "On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming," *Mathematical Programming*, Vol. 106, No. 1, pp. 25–57, March 2006.

[246] Scip Solver, https://scip.zib.de/.

[247] T. Achterberg, "SCIP: solving constraint integer programs," *Mathematical Programming Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–41, July 2009.

[248] S. Vigerske and A. Gleixner, "SCIP: global optimization of mixed-integer nonlinear programs in a branch-and-cut framework," *Optimization Methods and Software*, Vol. 33, No. 3, pp. 563–593, 2018.

[249] Baron Solver, https://minlp.com/baron.

[250] N.V. Sahinidis, "BARON: a general purpose global optimization software package," *Journal of Global Optimization*, Vol. 8, No. 2, pp. 201–205, March 1996.

[251] M. Kilinc and N.V. Sahinidis, "Exploiting integrality in the global optimization of mixed-integer nonlinear programming problems in BARON," *Optimization Methods and Software*, Vol 33, No. 3, pp. 540–562, 2018.

[252] Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), https://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/.

[253] W.K. Sonnemann, "A new inverse time overcurrent relay with adjustable characteristics," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 72, No. 3, pp. 360–368, June 1953.

[254] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 868–872, July 1999.

[255] *Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under current protection*, IEC 60255–151, 2009.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά:

[Π.1] **V.A. Papaspiliotopoulos**, G.N. Korres, and 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, February 2017.

[Π.2] **V.A. Papaspiliotopoulos**, G.N. Korres, V.A. Kleftakis, and N.D. Hatziargyriou, "Hardware-in-the-loop design and optimal setting of adaptive protection schemes for distribution systems with distributed generation," ***IEEE Transactions on Power Delivery***, Vol. 32, No. 1, pp. 393–400, February 2017.

[Π.3] **V.A. Papaspiliotopoulos**, G.N. Korres, and N.D. Hatziargyriou, "An adaptive protection infrastructure for modern distribution grids with distributed generation," ***Cigre Science & Engineering***, Vol. 7, pp. 125–132, February 2017.

[Π.4] **V.A. Papaspiliotopoulos**, G.N. Korres, and N.D. Hatziargyriou, "Adverse impact of distributed generation on protection of the Hellenic MV network – Recommendations for protection scheme upgrade," ***CIRED Open Access Proceedings Journal***, Vol. 1, pp. 934–938, October 2017.

[Π.5] **V.A. Papaspiliotopoulos** and G.N. Korres, "A peculiar property of double-phase-to-ground faults in the presence of fault resistance," ***IEEE Transactions on Power Delivery***, Vol. 33, No. 4, pp. 2044–2046, February 2018.

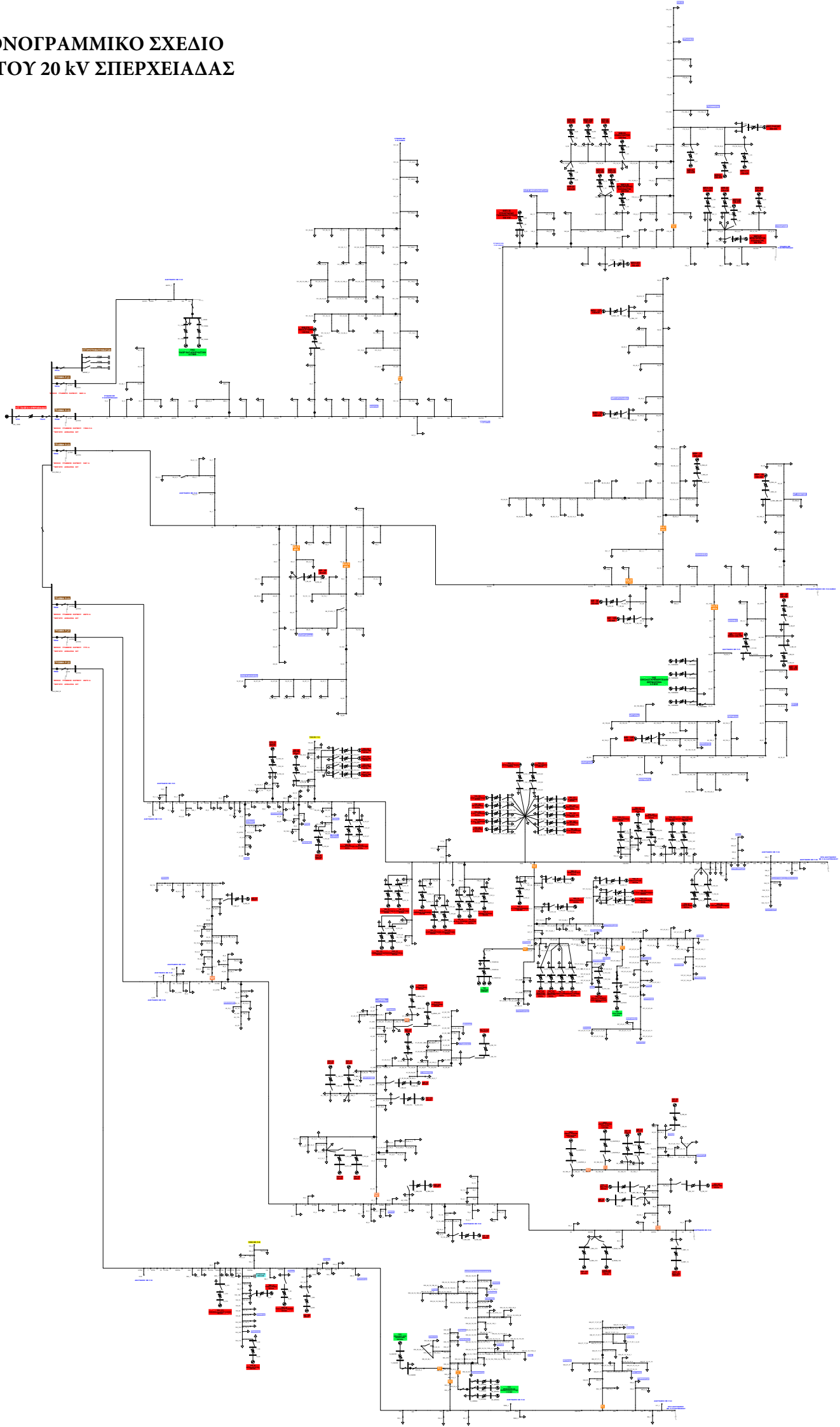
[Π.6] **V.A. Papaspiliotopoulos** and G.N. Korres, "Innovative solution for overcurrent relay coordination studies in power delivery networks using optimisation techniques," ***The Journal of Engineering***, Vol. 2018, No. 15, pp. 1103–1108, October 2018.

Στα πρακτικά διεθνών συνεδρίων (με κρίση):

[Σ.1] **V.A. Papaspiliotopoulos**, D.E. Karalexis, and G.N. Korres, "Description, setting and secondary testing of a digital protective relaying system," *Proc. 12th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*, Copenhagen, Denmark, March 2014.

[Σ.2] **V.A. Papaspiliotopoulos**, T.S. Kurashvili, and G.N. Korres, "Optimal coordination of directional overcurrent relays for distribution systems with distributed generation based on a hybrid PSO-LP algorithm," *Proc. 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2014)*, Athens, Greece, November 2014.

[Σ.3] **V.A. Papaspiliotopoulos**, V.A. Kleftakis, P.C. Kotsampopoulos, G.N. Korres, and N.D. Hatziargyriou, "Hardware-in-the-loop simulation of protection blinding and sympathetic tripping phenomena in modern distribution grids," *Proc. 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2014)*, Athens, Greece, November 2014.

[Σ.4] **V.A. Papaspiliotopoulos**, G.N. Korres, and N.D. Hatziargyriou, "Protection coordination in modern distribution grids integrating optimization techniques with adaptive relay setting," *Proc. IEEE Power Tech*, Eindhoven, Netherlands, June 2015.

ΜΟΝΟΓΡΑΜΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ
ΔΙΚΤΟΥ 20 kV ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ