



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

**Μελέτη Τεχνικών Προστασίας από Βραχυκυκλώματα
σε Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ)
με Υψηλή Διείσδυση ΑΠΕ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Γκιώκας

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



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

**Μελέτη Τεχνικών Προστασίας από Βραχυκυκλώματα
σε Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ)
με Υψηλή Διείσδυση ΑΠΕ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Γκιώκας

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Οκτωβρίου 2021

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

.....
Γεώργιος Π. Γκιώκας

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

Copyright © Γεώργιος Π. Γκιώκας, 2021.

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 διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη σύγχρονων μεθόδων προστασίας απομονωμένων ηλεκτρικών δικτύων με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, το αντικείμενο της εργασίας απαρτίζεται από τρεις κύριους άξονες.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές που διέπουν την προστασία ηλεκτρικών συστημάτων, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται και διάφορες τεχνικές προστασίας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν σε Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Στην συνέχεια, αναλύονται τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζονται από την διείσδυση υψηλού ποσοστού μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κατά κύριο λόγο ΑΠΕ. Έχοντας εξετάσει όλα τα παραπάνω, γίνεται αναφορά σε τρόπους αντιμετώπισης των εν λόγω προβλημάτων και προκλήσεων και παρουσιάζεται η λογική της προσαρμοστικής προστασίας των δικτύων.

Εν συνεχεία, αναλύονται οι απαιτήσεις των διαχειριστών των δικτύων τόσο για τις ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής, όσο και για τις μη ελεγχόμενες (ΑΠΕ). Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε διάφορες τεχνικές και μεθόδους υποστήριξης της τάσης, τις οποίες ενδεχομένως θα μπορούσαν να συμπεριλάβουν οι μελλοντικοί κώδικες δικτύων. Τέλος, αναπτύσσονται μοντέλα ελέγχου των μετατροπέων για έγχυση ρεύματος μονάδων ΑΠΕ και μονάδων αποθήκευσης μπαταριών σε βραχυκυκλώματα, για μελέτες και προσομοιώσεις προστασίας.

Ο τελευταίος άξονας της εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος προσαρμοστικής προστασίας και η δοκιμή του σε πρότυπη εργαστηριακή διάταξη αποτελούμενη από έναν εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS), πραγματικές συσκευές προστασίας (ηλεκτρονόμοι) και μία μονάδα ελέγχου πραγματικού χρόνου που υποστηρίζει διάφορα επικοινωνιακά πρωτόκολλα όπως το IEC 61850 και το DNP 3. Αρχικά, σχεδιάζεται ένα πρόγραμμα στον ψηφιακό προσομοιωτή για την εκτέλεση μιας αυτοματοποιημένης μεθόδου μελέτης βραχυκυκλωμάτων προσομοιώνοντας και την συμβολή των ΑΠΕ σε αυτά. Στην συνέχεια, αναπτύσσεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για το πρόβλημα εύρεσης των βέλτιστων ρυθμίσεων των στοιχείων υπερτάσης των ηλεκτρονόμων στο λογισμικό MATLAB. Βάσει όλων αυτών των μεθόδων, πραγματοποιείται μελέτη προσαρμοστικής προστασίας για το ηλεκτρικό δίκτυο ενός πραγματικού Μη Διασυνδεδεμένου Νησιού με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης και των πειραμάτων, εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και προτάσσονται κατευθύνσεις για μελλοντική επέκταση της μελέτης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αυτόνομο δίκτυο, βέλτιστη επιλογική συνεργασία στοιχείων υπερτάσης, βραχυκύκλωμα, διεσπαρμένη παραγωγή, δοκιμή κλειστού βρόχου, έλεγχος ρεύματος, ηλεκτρονόμος προστασίας, ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας, κώδικας δικτύου, μη διασυνδεδεμένο νησί, ΜΔΝ, μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, ομάδες ρυθμίσεων, προσαρμοστική προστασία, προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, υποστήριξη της τάσης.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to study modern methods of protection, suitable for non-interconnected microgrids with high penetration of renewable energy sources. The object of this thesis is generally divided into three parts.

At the beginning, fundamentals of the protection systems and equipment is presented with advantages and disadvantages in case of adoption in an islanded system. Furthermore, the high penetration of renewable energy sources introduces new challenges for the protection schemes. All in all, considering all the available technology, the introduction of adaptive protection is presented.

The second part of this thesis is to study the grid codes regulations for both the Distributed Energy Resources independently the technology (controlled or not). Various strategies of supporting the voltage in faults proposed in the literature is discussed. Considering the topology of the islanded systems and the suitable strategy for control current algorithm, a converted model suitable for protection studies is developed with current limitation control considering the nominal characteristics of the electronics elements.

The last part of this thesis is the development of a modern adaptive protection scheme and the test in CHIL simulation with a real time digital simulator and real devices, relays and a controller which supports many communications protocols based on IEC 61850 standard or DNP 3. First of all, it is designed an automated method performing the short circuit study in the digital simulator which simulates the behavior of Renewable energy sources. Subsequently, the optimization problem is defined and a model of finding the optimum collaboration of relays overcurrent elements is developed in MATLAB. Furthermore, based on this progress, an adaptive protection study for a real Non-Interconnected Greek island with high penetration of Renewable energy sources is designed. Finally, results from simulation are discussed and new proposals extending the study is presented.

KEY WORDS

Adaptive protection, current control limitation, control hardware in the loop, CHIL, distributed energy resources, DER, fault ride through, FRT, grid code, non-interconnected system, islanded microgrid, optimization problem, power system protection, protection relay, renewable energy sources, setting group.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω ένα επίκαιρο και πραγματικά ενδιαφέρον θέμα και να έρθω σε επαφή με τον υπερσύγχρονο εξοπλισμό του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής.

Επίσης ευχαριστώ, τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Δημήτριο Λαγό όχι μόνο για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και για τον ουσιαστικό χρόνο που αφιέρωσε για να με βοηθήσει στα διάφορα ζητήματα της εργασίας.

Ευχαριστώ τους φίλους μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Πάνω από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με την στήριξή της με βοηθάει να πετυχαίνω τους στόχους μου.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στους γονείς μου, Παναγιώτη και Βασιλική, τους οποίους γεμίζει περηφάνια.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
1.1 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).....	21
1.2 Μικροδίκτυα και απομονωμένα συστήματα.....	21
1.3 Μη διασυνδεδεμένα νησιά.....	21
1.4 Μονάδες διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ).....	23
1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).....	24
1.5.1 Εθνικός στόχος ΑΠΕ.....	24
1.6 Εμπόδια υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ σε ΜΔΝ.....	24
1.7 Η αποθήκευση ενέργειας.....	26
1.8 Υβριδικοί σταθμοί παραγωγής (ΥΒΣ).....	26
1.9 Ζητήματα προστασίας στα ΜΔΝ.....	27
1.10 Σκοπός της εργασίας.....	27
1.11 Δομή της εργασίας.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΔΝ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ.....	31
2.1 Γενικά.....	31
2.2 Ζώνες προστασίας.....	31
2.3 Ασφάλειες (fuses).....	32
2.4 Διακόπτες ισχύος.....	32
2.5 Μετασχηματιστής έντασης και τάσης (Μ/Σ μέτρησης).....	32
2.6 Ηλεκτρονόμοι προστασίας.....	33
2.7 Σχηματική αναπαράσταση συστήματος προστασίας.....	33
2.8 Κατηγορίες βραχυκυκλωμάτων.....	34
2.9 Χαρακτηριστικά αξιόπιστου συστήματος προστασίας.....	35
2.10 Είδη προστασίας.....	36
2.10.1 Προστασία υπερέντασης (Overcurrent protection).....	36
2.10.2 Προστασία κατεύθυνσης (Direction protection).....	39
2.10.3 Προστασία απόστασης (Distance protection).....	39
2.10.4 Διαφορική προστασία (Differential protection).....	40
2.11 Προκλήσεις προστασίας σε ΜΔΝ.....	42
2.11.1 Μεταβολή στάθμης ρεύματος βραχυκύκλωσης.....	42
2.11.2 Συμβολή μονάδων ΑΠΕ σε βραχυκύκλωμα.....	43
2.11.3 Τύφλωση προστασίας (Protection Blinding).....	43
2.11.4 Συμπαθητική λειτουργία (sympathetic tripping).....	44
2.12 Εισαγωγή στην προσαρμοστική προστασία (adaptive protection).....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	47
3.1 Κώδικες διαχείρισης δικτύου (Grid Code Regulations).....	47

3.1.1	Απαιτήσεις Κώδικα ΜΔΝ για τις πλήρως ή μερικώς ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής	47
3.1.2	Απαιτήσεις Διαχειριστών δικτύων ως προς τις βοηθητικές υπηρεσίες των ΑΠΕ	47
3.2	Πιθανές στρατηγικές υποστήριξης της τάσης του δικτύου	50
3.3	Πρόσθετες πληροφορίες	52
3.3.1	Συμμετρικές συνιστώσες (symmetrical components)	52
3.3.2	Συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα	52
3.3.3	Μετασχηματισμός dq0 (Park)	53
3.3.4	Μετασχηματισμός α – β (Clarke)	54
3.4	Προτεινόμενα μοντέλα μετατροπέα για μελέτες προστασίας	54
3.4.1	Μαθηματικό μοντέλο μονάδων ΑΠΕ για μελέτες προστασίας	55
3.5	Μοντέλο μονάδας αποθήκευσης μπαταριών για μελέτες προστασίας	59
3.6	Συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας στα σφάλματα	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ		63
4.1	Εισαγωγή	63
4.2	Έλεγχος ψηφιακών H/N με δοκιμές κλειστού βρόγχου	63
4.3	Εργαστηριακό σύστημα προσαρμοστικής προστασίας	64
4.3.1	Ψηφιακός Προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)	64
4.3.2	Ψηφιακός H/N προστασίας	66
4.3.3	Κεντρικός ελεγκτής επικοινωνίας	67
4.4	Λειτουργικότητα εργαστηριακής διάταξης	68
4.5	Διαδικασία δοκιμής προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας	70
4.5.1	Βήμα 1: Μοντελοποίηση του υπό μελέτη δικτύου	71
4.5.2	Βήμα 2: Εκτέλεση μελέτης βραχυκυκλωμάτων στο RTDS	71
4.5.3	Βήμα 3: Βέλτιστη επιλογική συνεργασία στοιχείων υπερέντασης	75
4.5.4	Ρύθμιση των συσκευών προστασίας και ελέγχου	77
4.5.5	Έλεγχος ορθής λειτουργίας της διάταξης και εκτέλεση της προσομοίωσης	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΔΝ ΤΗΣ ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑΣ		79
5.1	Γενικά στοιχεία	79
5.1.1	Προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό RSCAD	80
5.2	Ανάπτυξη μελέτης προσαρμοστικού συστήματος προστασίας για το δίκτυο της Αστυπάλαιας	83
5.2.1	Μελέτη βραχυκυκλωμάτων	85
5.2.2	Μελέτη βέλτιστου καθορισμού ομάδων ρυθμίσεων των H/N	88
5.2.3	Ρύθμιση ελεγκτή και των ηλεκτρονόμων	94
5.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμών	97
5.3.1	Αποτελέσματα δοκιμής σφάλματος μεταξύ φάσεων	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ		103

6.1	Συμπεράσματα	103
6.2	Προτάσεις για επέκταση της μελέτης	104
Βιβλιογραφία		105

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1.1	Συμβολή μονάδων ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή των ΜΔΝ στην Ελλάδα [14].	25
Σχήμα 1.2:	Πιθανό σχήμα ανάπτυξης της αποθήκευσης σε ένα ηλεκτρικό σύστημα ΜΔΝ.	26
Σχήμα 2.1:	Ζώνες προστασίας τυπικού ΜΔΝ.....	31
Σχήμα 2.2:	Παράδειγμα τύπων χαρακτηριστικών καμπυλών (χρόνου–ρεύματος), (α) ασφάλειες εκτονώσεως ταχείας τήξης Κ (β) ασφάλειες εκτόνωσης βραδείας τήξης Τ, εγκατεστημένων σε ΜΔΝ.	32
Σχήμα 2.3:	Παράδειγμα εφαρμογής προστασίας γραμμής διανομής [20].	34
Σχήμα 2.4:	Χαρακτηριστικές καμπύλες των διαφορών τύπων Η/Ν.	37
Σχήμα 2.5:	Παράδειγμα τυπικών χαρακτηριστικών καμπυλών υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου σύμφωνα με το IEC [18].	38
Σχήμα 2.6:	Παράδειγμα τρόπου λειτουργίας Η/Ν κατεύθυνσης	39
Σχήμα 2.7:	Παράδειγμα δυσλειτουργίας προστασίας απόστασης.	40
Σχήμα 2.8:	Παράδειγμα λογικής διαφορικής προστασίας.	41
Σχήμα 2.9:	Ρεύμα σφάλματος σε περίπτωση τύφλωσης προστασίας.	43
Σχήμα 2.10:	Ρεύμα σφάλματος σε περίπτωση συμπαθητικής λειτουργίας.	44
Σχήμα 2.11:	Παράδειγμα κεντρικού προσαρμοστικού συστήματος προστασίας σε ένα μικροδίκτυο [25].	45
Σχήμα 2.12:	Παράδειγμα καταναμημένου προσαρμοστικού συστήματος προστασίας [25].	46
Σχήμα 3.1:	Καμπύλη Fault Ride Through στα ΜΔΝ της Ελλάδας [13].	48
Σχήμα 3.2:	Χαρακτηριστικές FRT Γερμανικού και Ελληνικού Κώδικα.	49
Σχήμα 3.3:	Χαρακτηριστική έγχυση – απορρόφηση άεργου ισχύος για μονάδες Α/Γ [26].	49
Σχήμα 3.4:	Διάφοροι τύποι και αντιστάσεις σφάλματος	53
Σχήμα 3.5:	Ισοδύναμο μοντέλο μετατροπέα μονάδων ΑΠΕ για μελέτες βραχυκυκλωμάτων.	55
Σχήμα 3.6:	Διάγραμμα έλεγχου τριφασικού μετατροπέα σε κατάσταση σφάλματος.	55
Σχήμα 3.7:	Σχηματικό διάγραμμα της δομής SOGI [31].	56
Σχήμα 3.8:	Σχηματική αναπαράσταση της δομής DSOGI – PLL [31].	57
Σχήμα 3.9:	Σχηματικό διάγραμμα τυπικού συστήματος αντιστροφέα ελεγχόμενης συχνότητας.	59
Σχήμα 3.10:	Λογική ελέγχου αντιστροφέα σε σύστημα ελεγχόμενης συχνότητας.	60
Σχήμα 3.11:	Λογική περιορισμού ρεύματος.	61
Σχήμα 3.13:	Ρεύμα σύγχρονης γεννήτριας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της.	62
Σχήμα 4.1:	Απλοποιημένη δομή δοκιμών κλειστού βρόγχου.	64
Σχήμα 4.2:	Διάταξη εργαστηριακού συστήματος προσαρμοστικής προστασίας.	69
Σχήμα 4.3:	Τυπική σύνδεση GTNET-DNP.	70
Σχήμα 4.4:	Διάγραμμα ροής δοκιμής CHIL συστημάτων προσαρμοστικής προστασίας.	70
Σχήμα 4.5:	Διάγραμμα ροής προγράμματος script αυτόματης εκτέλεσης σφαλμάτων στον προσομοιωτή.	73
Σχήμα 4.6:	Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας ομαδοποίησης ρευμάτων φάσης ή ουδετέρου.	74
Σχήμα 5.1:	Αποτύπωση απλοποιημένου δικτύου διανομής του ΜΔΝ της Αστυπάλαιας.	79
Σχήμα 5.2:	Μοντέλα μονάδων φωτοβολταϊκού και αιολικού πάρκου.	83
Σχήμα 5.3:	Σχήμα προστασίας της μελετώμενης γραμμής R23.	84
Σχήμα 5.4:	Ενεργός τιμή τάσης θετικής ακολουθίας κατά την διάρκεια τριφασικού σφάλματος στις περιπτώσεις (α) όταν είναι ενταγμένη η μονάδα αποθήκευσης και (β) όταν είναι ενταγμένη η μονάδα Diesel.	84
Σχήμα 5.5:	Παράδειγμα καμπυλών των στοιχείων 51P των Η/Ν για την ομάδα ρυθμίσεων SG4.	90
Σχήμα 5.6:	Καμπύλη Η/Ν 1 για τις τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων.	91
Σχήμα 5.7:	Παράδειγμα καμπυλών των στοιχείων 51N των Η/Ν για την ομάδα ρυθμίσεων 4.	93
Σχήμα 5.8:	Καμπύλη στοιχείου 51N Η/Ν 1 για τις τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων.	94
Σχήμα 5.9:	Συνιστώσες RSCAD για επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές, (α) αναλογική κάρτα εξόδου, (β) ψηφιακή κάρτα εισόδου GTFPI, (γ) GTNET κάρτα επικοινωνίας βάσει του DNP 3.0.	96
Σχήμα 5.10:	Καταγραφή αλλαγής ομάδας ρυθμίσεων στον ελεγκτή (log file).	97

Σχήμα 5.11: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων χρόνων λειτουργίας των τριών H/N προστασίας για κάθε ομάδα ρυθμίσεων.....	98
Σχήμα 5.12: Ρεύμα σφάλματος και χρόνος λειτουργίας του H/N, όταν η μονάδα diesel είναι εκτός λειτουργίας.....	99
Σχήμα 5.13: Ρεύμα σφάλματος και χρόνος λειτουργίας του H/N όταν η μονάδα diesel είναι ενταγμένη.....	100
Σχήμα 5.14: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών πρωτεύουσας – δευτερεύουσας προστασίας για κάθε ομάδα ρυθμίσεων στις ζώνες προστασίας 2 και 3 στις περιπτώσεις ελαχίστου ρεύματος βραχυκύκλωσης.	100

Εικόνα 1.1: Γεωγραφική αποτύπωση ΜΔΝ στην Ελλάδα [4].	22
Εικόνα 4.1: Ψηφιακός προσομοιωτής RTDS του εργαστηρίου ΣΗΕ.	65
Εικόνα 4.2: Αναλογική κάρτα εισόδου–εξόδου RTDS.	65
Εικόνα 4.3: Ψηφιακοί H/N SEL-751.	66
Εικόνα 4.4: Λειτουργίες προστασίας και ελέγχου H/N SEL-751 Feeder Protection Relay [36]......	67
Εικόνα 4.5: Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής πραγματικού χρόνου SEL-2240 Axion.	68
Εικόνα 5.1: Μοντέλο μονάδας ΤΣΠ (Diesel) του νησιού στο RSCAD.....	81
Εικόνα 5.2: Ρυθμίσεις χρονικών σταθερών και κερδών μονάδας ΤΣΠ.	81
Εικόνα 5.3: Μοντελοποίηση γραμμής διανομής R23 του νησιού.	82
Εικόνα 5.4: Προσαρμογή των ομάδων ρυθμίσεων του H/N SEL-751 στο λογισμικό AcSELeRator QuickSet®.....	95
Εικόνα 5.5: Προσαρμογή ρυθμίσεων των στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου φάσης των τεσσάρων ομάδων ρυθμίσεων.....	95
Εικόνα 5.6: Προσαρμογή λογικής ενεργοποίησης του H/N σύμφωνα με τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου.	96

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Λίστα ηλεκτρικών συστημάτων ΜΔΝ της Ελλάδας.....	23
Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες χαρακτηριστικές εξισώσεις στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου.	38
Πίνακας 3.1: Πιθανές στρατηγικές ελέγχου στήριξης της τάσης σε βραχυκυκλώματα.	51
Πίνακας 5.1: Περιπτώσεις καταστάσεων σύνδεσης μονάδων του νησιού.	86
Πίνακας 5.2: Μεγέθη που περιλαμβάνει το αρχείο δεδομένων εισόδου.	86
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων φάσης πρωτεύουσας προστασίας.....	87
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ανάλυσης μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων φάσης επικουρικής προστασίας.....	87
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων ουδετέρου πρωτεύουσας προστασίας. 87	
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων ουδετέρου επικουρικής προστασίας.....	88
Πίνακας 5.7: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης φάσης 51P γραμμής διανομής R220.	89
Πίνακας 5.8: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας κύριων προστασιών, στοιχείων 51P.....	89
Πίνακας 5.9: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας επικουρικών προστασιών, στοιχείων 51P.89	
Πίνακας 5.10: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης φάσης 51N γραμμής διανομής R230.	92
Πίνακας 5.11: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας κύριων προστασιών, στοιχείων 51N.	92
Πίνακας 5.12: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας επικουρικών προστασιών, στοιχείων 51N.	93
Πίνακας 5.13: Κανόνες ρύθμισης ενεργών ομάδων ρυθμίσεων.....	95
Πίνακας 5.14: Χρόνοι λειτουργίας Η/Ν όπως προέκυψαν από το μοντέλο βελτιστοποίησης και από την εκτέλεση της προσομοίωσης αντίστοιχα.	97

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

Α/Γ	Ανεμογεννήτρια
Α/Π	Αιολικό Πάρκο
ΑΠΕ	Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας
Δ/Ι	Διακόπτης Ισχύος
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΔΔ	Δίκτυο Διανομής
ΗΕΔ	Ηλεκτρεγερτική Δύναμη
Η/Υ	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
Η/Ν	Ηλεκτρονόμος
ΜΤ	Μέση Τάση
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
Μ/Ε	Μετασχηματιστής Έντασης
Μ/Τ	Μετασχηματιστής Τάσης
ΜΔΝ	Μη Διασυνδεδεμένο Νησί
ΜΔΠ	Μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής
ΣΚΣ	Σημείο Κοινής Σύνδεσης
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΤΣΠ	Τοπικός Σταθμός Παραγωγής
ΥΒΣ	Υβριδικός Σταθμός
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)

Σύστημα ηλεκτρική ενέργειας είναι το σύνολο των μέσων και εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης [1]. Τέτοια μέσα είναι οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το δίκτυο μεταφοράς και διανομής.

Πιο αναλυτικά, οι σταθμοί παραγωγής αποτελούνται από τις μονάδες παραγωγής, όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα και τους σταθμούς ανύψωσης τάσης για την σύνδεση τους στο σύστημα μεταφοράς. Μέσω των γραμμών μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης γίνεται η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς το δίκτυο διανομής. Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης και τους υποσταθμούς διανομής μέσω των οποίων υποβιβάζεται η μέση τάση σε χαμηλή τάση.

1.2 Μικροδίκτυα και απομονωμένα συστήματα

Μικροδίκτυο (Microgrid) είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, πιο συγκεκριμένα, ένα απομονωμένο δίκτυο διανομής (μέσης τάσης) το οποίο αποτελείται από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΝ) και καταναλώσεις [2]. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να λειτουργεί ως ένα απομονωμένο σύστημα (νησιδοποιημένο σύστημα) ή να είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο μεταφοράς. Συνεπώς, όταν ένα μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σύστημα μεταφοράς, η κατανάλωση καλύπτεται από τις ΜΔΠ και το δίκτυο μεταφοράς, το οποίο βλέπει το μικροδίκτυο ως ένα συγκεντρωμένο ελεγχόμενο φορτίο. Ωστόσο, ένα μικροδίκτυο έχει την ικανότητα να λειτουργεί ως νησιδοποιημένο δίκτυο, δηλαδή να λειτουργεί αδιάληπτα, να ικανοποιεί τα φορτία και να αυτοελέγχεται.

1.3 Μη διασυνδεδεμένα νησιά

Μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΔΝ) χαρακτηρίζονται τα νησιά της Ελληνικής επικράτειας των οποίων το Δίκτυο Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν συνδέεται με το σύστημα Μεταφοράς ή το Δίκτυο Διανομής της ηπειρωτικής χώρας [3]. Είναι δηλαδή ένα μικροδίκτυο το οποίο λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία. Αυτά τα νησιά ηλεκτροδοτούνται από τοπικούς σταθμούς παραγωγής της ΔΕΗ Α.Ε., οι οποίοι αποκαλούνται και Τοπικοί Σταθμοί Παραγωγής (ΤΣΠ). Αυτοί οι σταθμοί λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα όπως πετρέλαιο, βαρύ (μαζούτ), ή ελαφρύ (ντίζελ). Ωστόσο, σημαντική είναι και η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), και ιδίως των Αιολικών και Φωτοβολταϊκών σταθμών, οι οποίοι λειτουργούν σε αυτά τα νησιά και προβλέπεται ότι τα προσεχή χρόνια θα αυξηθεί κατά πολύ το ποσοστό διείσδυση τους.



Εικόνα 1.1: Γεωγραφική αποτύπωση ΜΔΝ στην Ελλάδα [4].

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας των (ΜΔΝ) αποτελείται από 29 αυτόνομα συστήματα όπως μεταβλήθηκε το Μάρτιο 2018. Ορισμένα εξ αυτών αποτελούνται από περισσότερα νησιά (σύμπλεγμα νησιών). Το μέγεθος των 29 αυτόνομων νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων της χώρας ποικίλει και ταξινομείται ως:

- Δεκαεννέα (19) «μικρά» αυτόνομα συστήματα που έχουν αιχμή ζήτησης έως 10 MW.
- Οκτώ (8) «μεσαίου μεγέθους» αυτόνομα συστήματα που έχουν αιχμή ζήτησης από 10 MW έως 100 MW.
- Δύο (2) «μεγάλα» αυτόνομα συστήματα έχουν αιχμή ζήτησης άνω των 100 MW (η Κρήτη και η Ρόδος).

Η ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στα ΜΔΝ ποικίλει σε μέγεθος, από ορισμένες εκατοντάδες MWh στα μικρότερα νησιά (π.χ. Αντικύθηρα, Αγαθονήσι, κ.λπ.), έως και ορισμένες TWh στο μεγαλύτερο ΜΔΝ (Κρήτη). Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται τα μη διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά δίκτυα των νησιών της Ελλάδας και τα συμπλέγματα αυτών [3].

Πίνακας 1.1: Λίστα ηλεκτρικών συστημάτων ΜΔΝ της Ελλάδας.

Λίστα Ηλεκτρικών Συστημάτων Στα ΜΔΝ		
α/α	Ηλεκτρικό σύστημα ΜΔΝ	Νησιά
1	ΑΓ. Ευστράτιος	ΑΓ. Ευστράτιος
2	Αγαθονήσι	Αγαθονήσι
3	Αμοργός	Αμοργός
4	Ανάφη	Ανάφη
5	Αντικύθηρα	Αντικύθηρα
6	Αρκιοί	Αρκιοί , Μαράθι
7	Αστυπάλαια	Αστυπάλαια
8	Γαύδος	Γαύδος
9	Δονούσα	Δονούσα
10	Ερεϊκούσσα	Ερεϊκούσσα
11	Θήρα	Θήρα , Θηρασιά
12	Ικαρία	Ικαρία
13	Κάρπαθος	Κάρπαθος , Κάσος
14	Κρήτη	Κρήτη
15	Κύθνος	Κύθνος
16	Κως – Κάλυμνος	Κως, Ψέριμος, Γυαλί, Κάλυμνος, Λέρος, Λειψοί, Τέλενδος, Νίσυρος, Τήλος
17	Λέσβος	Λέσβος , Μεγαλονήσι
18	Λήμνος	Λήμνος
19	Μεγίστη	Μεγίστη
20	Μήλος	Μήλος, Κίμωλος
21	Οθωνοί	Οθωνοί
22	Πάτμος	Πάτμος
23	Ρόδος	Ρόδος, Χάλκη
24	Σάμος	Σάμος, Φούρνοι, Θύμαινα
25	Σέριφος	Σέριφος
26	Σίφνος	Σίφνος
27	Σκύρος	Σκύρος
28	Σύμη	Σύμη
29	Χίος	Χίος, Οινούσες, Ψαρά

1.4 Μονάδες διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ)

Μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) είναι μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ή από την πλευρά του μετρητή

του καταναλωτή. Οι ΜΔΠ ή (Distributed Energy Resources – DER) έχουν ονομαστική ισχύ από λίγα kW έως 50 MW [5], είναι μικρότερες μονάδες παραγωγής και με ευρεία γεωγραφική εξάπλωση σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς. Το πλεονέκτημα αυτών των μονάδων είναι ότι προσφέρουν παραγωγή κοντά στα σημεία κατανάλωσης, επομένως υπάρχουν μικρότερες απώλειες στο δίκτυο για την μεταφορά της ενέργειας [6].

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες ΜΔΠ, τις οποίες θα μπορούσαμε να τις διαχωρίσουμε σε μονάδες με συμβατικά ή μη συμβατικά καύσιμα. Μονάδες με συμβατικά καύσιμα μπορούν να θεωρηθούν οι μικροί αεριοστρόβιλοι ή οι μηχανές εσωτερικής καύσης με καύσιμο το πετρέλαιο. Μονάδες από ανανεώσιμες πηγές είναι οι ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά κ.α. Τέλος, ΜΔΠ θεωρούνται και οι μονάδες αποθήκευσης όπως μπαταρίες διαφόρων τεχνολογιών ή μονάδες αντλησιοταμίευσης.

1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η ανάγκη αποδοτικότερης χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας γενικά, και ειδικότερα η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτό επιβάλλεται όχι μόνο από το πεπερασμένο των συμβατικών πηγών ενέργειας, αλλά και από την ανάγκη περιορισμού των δυσμενών επιπτώσεων από τη χρήση τους στο περιβάλλον [7].

Ο όρος ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναφέρεται κυρίως στις ακόλουθες:

1. Την αιολική ενέργεια.
2. Την ηλιακή ενέργεια.
3. Τις κυψέλες καυσίμου.
4. Την γεωθερμία.
5. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έως και 10 MW, καθώς δεν αποτελούν μεγάλη επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον [8].

1.5.1 Εθνικός στόχος ΑΠΕ

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) [9] αποτελεί για την Ελλάδα ένα Στρατηγικό Σχέδιο για τα θέματα του Κλίματος και της Ενέργειας και παρουσιάζονται σε αυτό ένας αναλυτικός οδικός χάρτης για την επίτευξη συγκεκριμένων ενεργειακών και κλιματικών στόχων τόσο για το 2030 όσο και μακροπρόθεσμα για το έτος 2050 [10].

Σύμφωνα με το (ΕΣΕΚ), στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής οι ΑΠΕ θα αποτελούν τη βασική πηγή εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής ήδη από τα μέσα της επόμενης δεκαετίας, ξεπερνώντας ως μερίδιο το 65% της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το έτος 2030 και το 60% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, σύμφωνα με την μακροχρόνια στρατηγική, έχει τεθεί και ο Ευρωπαϊκός στόχος της βιώσιμης μετάβασης σε μια οικονομία κλιματικής ουδετερότητας έως το έτος 2050, σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης.

1.6 Εμπόδια υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ σε ΜΔΝ

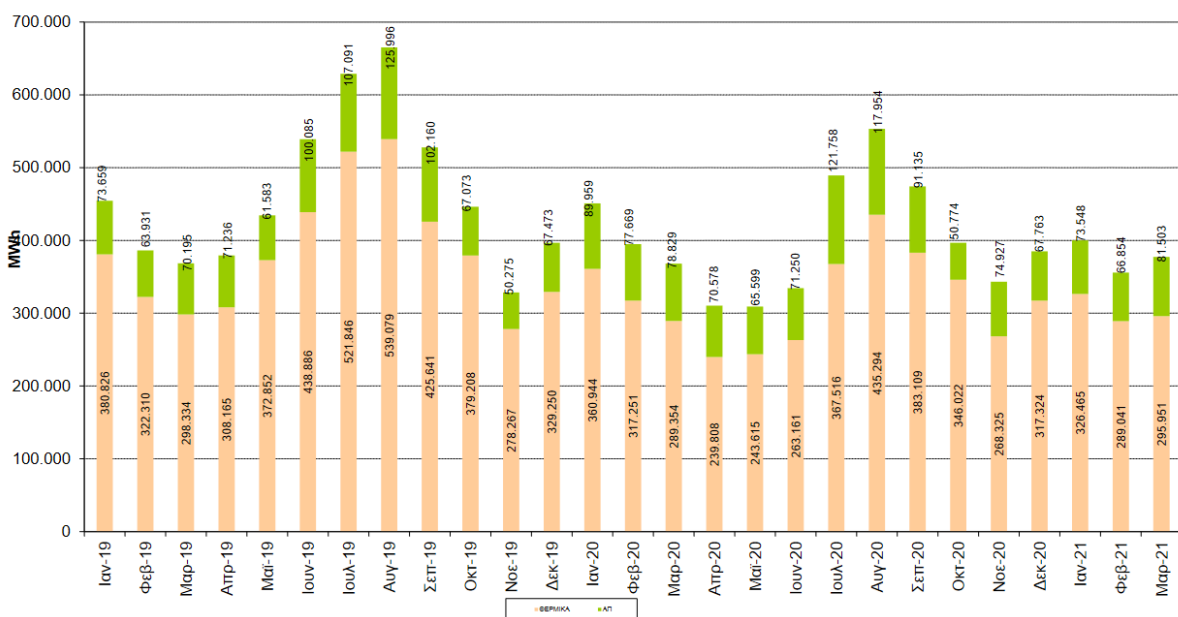
Τα απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όπως τα ΜΔΝ έχουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και η λειτουργία τους με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ αποτελεί ένα σημαντικό τεχνικό πρόβλημα. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός ΜΔΝ, σε αντίθεση με ένα διασυνδεδεμένο

σύστημα, είναι η μειωμένη αδράνεια, καθώς τροφοδοτείται από ένα μικρό αριθμό συνδεδεμένων γεννητριών. Όταν εντάσσονται ΜΔΠ, αλλάζει η σύνθεση του δικτύου και δημιουργούνται αμφίδρομες ροές ισχύος, τα ρεύματα σφάλματος είναι εξαρτημένα από την εκάστοτε τοπολογία του δικτύου, μπορούν να πλήξουν τις παθητικές συσκευές προστασίας λόγω των μικρών ρευμάτων και να προκαλέσουν κίνδυνο, όχι μόνο στην ευστάθεια του συστήματος, αλλά και στο προσωπικό. Επίσης, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να είναι ακτινική ή δικτυωτή ή και ανάμεικτη. Αυτό οδηγεί σε πιο περίπλοκα μονοπάτια ρεύματος βραχυκυκλώσεως [11]. Το γεγονός αυτό προκαλεί αρκετά ζητήματα κυρίως τεχνικής και λειτουργικής φύσεως, που περιορίζουν δραστικά τη διείσδυση ΑΠΕ, καθιστώντας το σύστημα ιδιαίτερης μελέτης και διαχείρισης. [12].

Σήμερα, για την κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας, τα ΜΔΝ της Ελλάδας τροφοδοτούνται όχι μόνο από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής συμβατικών καυσίμων, αλλά και από σταθμούς ΑΠΕ διαφόρων τεχνολογιών [13] με κυρίαρχους τα αιολικά πάρκα (Α/Π) και τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς (Φ/Β). Οι ΤΣΠ είναι μονάδες πλήρως ελέγξιμες όσον αφορά στην παραγωγή ισχύος, καθιστώντας τους αξιόπιστους για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Αντίθετα, η παραγωγή ισχύος από μη ελεγχόμενες μονάδες ΑΠΕ (π.χ. Α/Π ή Φ/Β) εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου ή την ηλιοφάνεια, οι οποίες δεν είναι σε καμία περίπτωση σταθερές και υπολογίζονται βάσει προβλέψεων. Αυτό συνεπάγεται ότι, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από ΑΠΕ διακρίνεται από στοχαστικότητα και δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη.

Ως εκ τούτου, η παραγωγή των ΑΠΕ ενδέχεται να περικόπτεται, κυρίως λόγω περιορισμών που σχετίζονται με την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, ώστε αυτό να μπορεί να ανταπεξέλθει σε διάφορες διαταραχές ή λόγω άλλων λειτουργικών περιορισμών που έχει θέσει ο διαχειριστής του ΜΔΝ για την ομαλή λειτουργία του συστήματος [13], μειώνοντας την ετήσια συμμετοχής τους στο ενεργειακό ισοζύγιο.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1 η συμβολή των μονάδων ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή των ΜΔΝ της Ελλάδος, από τον Ιανουάριο 2019 έως Μάρτιο 2021, είναι περίπου στο 20% της συνολικής παραγωγής [14].

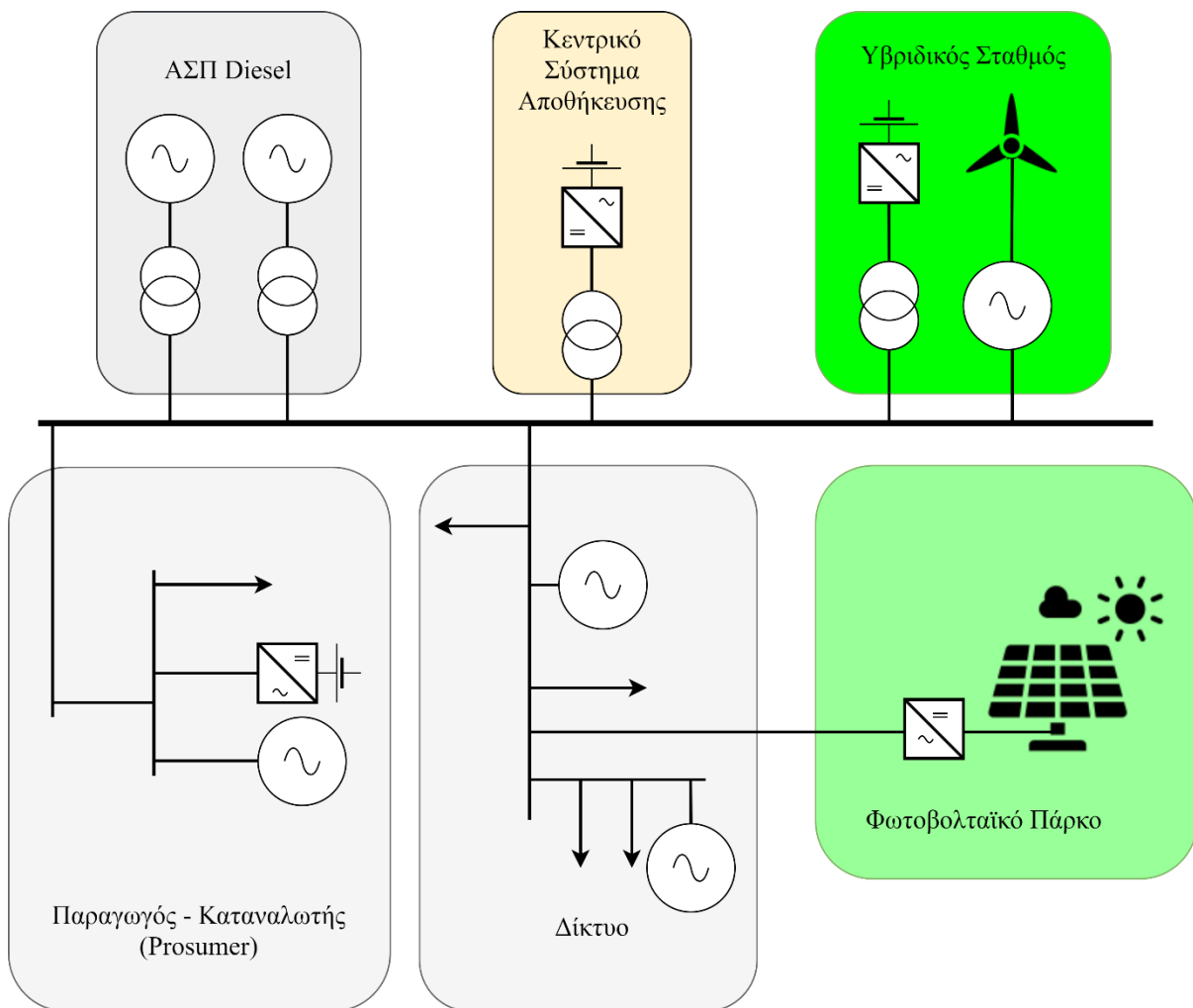


Σχήμα 1.1 Συμβολή μονάδων ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή των ΜΔΝ στην Ελλάδα [14].

1.7 Η αποθήκευση ενέργειας

Ο στόχος για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, από την τρέχων διείσδυση 20% σε 50% και υψηλότερη, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την ενσωμάτωση μονάδων αποθήκευσης [15]. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης που εφαρμόζονται στα ΣΗΕ, με πιο διαδεδομένες την αντλησιοταμίευση, μπαταρίες διαφόρων τεχνολογιών, αποθήκευσης θερμότητας κ.α.

Όπως έχει αναφερθεί, τα ΜΔΝ είναι αρκετά ευάλωτα συστήματα και έχουν αυξημένες ανάγκες υπηρεσιών ελέγχου και ρύθμισης. Σε ένα τέτοιο σύστημα, η αποθήκευση ενέργειας είναι αρκετά χρήσιμη και μπορεί να συμβάλει στην αξιοπιστία και την ομαλή λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου. Στα ΜΔΝ, οι μονάδες αποθήκευσης συμβάλουν στην αντιστάθμιση της στοχαστικότητας της παραγωγής από ΑΠΕ, στην εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου, στην στήριξη του δικτύου και γενικότερα στην αναβάθμιση της ποιότητας ισχύος [16].



Σχήμα 1.2: Πιθανό σχήμα ανάπτυξης της αποθήκευσης σε ένα ηλεκτρικό σύστημα ΜΔΝ.

1.8 Υβριδικοί σταθμοί παραγωγής (ΥΒΣ)

Ως ΥΒΣ ορίζονται οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν τουλάχιστον μία μορφή ΑΠΕ σε συνδυασμό με ένα σύστημα αποθήκευσης [17]. Βασικό πλεονέκτημα ενός ΥΒΣ είναι η βέλτιστη αξιοποίηση της παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του

σταθμού και η αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα. Επομένως, με την κατάλληλη ρύθμιση και αξιοποίηση των τεχνολογιών του, ο ΥΒΣ αποτελεί ουσιαστικά έναν πλήρως ελεγχόμενο σταθμό ως προς την ισχύ εξόδου του, εξαλείφοντας σε μεγάλο βαθμό τη στοχαστική μεταβλητότητα της παραγωγής από ΑΠΕ (π.χ. μονάδες Α/Γ).

1.9 Ζητήματα προστασίας στα ΜΔΝ

Ένα συμβατικό σύστημα προστασίας ΜΔΝ βασίζεται σε τοπολογία ακτινικού δικτύου στο οποίο η παραγωγή βρίσκεται στο ένα άκρο. Πιο αναλυτικά, οι συσκευές προστασίας είναι σχεδιασμένες για καταστάσεις δικτύου στις οποίες η ισχύς έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση, από τις γραμμές προς τα φορτία. Το ρεύμα σφάλματος προέρχεται από το σημείο σύνδεσης των γεννητριών (Τοπικός Σταθμός Παραγωγής - ΤΣΠ) με την τιμή του ρεύματος να μειώνεται όσο η θέση του βραχυκυκλώματος απομακρύνεται από τον ΤΣΠ. Τα συστήματα προστασίας σε ένα ΜΔΝ περιέχουν Η/Ν και ασφάλειες (οι οποίες είναι παθητικές συσκευές προστασίας) με τις ρυθμίσεις των Η/Ν και τα χαρακτηριστικά των ασφαλειών να έχουν επιλεγεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των γεννητριών του ΤΣΠ. [11].

Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά μονόδρομης ροής ισχύος δεν υφίστανται στα ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Οι ΜΔΠ μπορούν να μεταβάλουν το ρεύμα σφάλματος, να αλλάξουν την ροή του ρεύματος στις γραμμές, να καταλήξουν σε αμφίδρομη ροή ισχύος και να επηρεάσουν την ορθή λειτουργία των συσκευών προστασίας.

Το σημαντικότερο ζήτημα όμως είναι, πως μια μονάδα ΑΠΕ με ηλεκτρονικά ισχύος περιορίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης σύμφωνα με τα ονομαστικά της χαρακτηριστικά, προκειμένου να προστατευτούν οι ηλεκτρονικοί διακόπτες. Έτσι, αν αντικαταστήσουμε μια συμβατική μονάδα με μονάδες ηλεκτρονικών ισχύος, περιορίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ΜΔΝ, κάνοντας τις συσκευές προστασίας λιγότερο ευαίσθητες ή δημιουργώντας ακόμα και κίνδυνο μη ανίχνευσης του σφάλματος.

Για όλους αυτούς τους λόγους, μία από τις επικρατέστερες προκλήσεις στην λειτουργία ενός ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ είναι ο σχεδιασμός του κατάλληλου μοντέλου προστασίας.

1.10 Σκοπός της εργασίας

Η ταχεία εξάπλωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής θέτει τα θεμέλια για την λειτουργία ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Η εξάπλωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής παρόλο που παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, θέτει νέες προκλήσεις όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας των επιμέρους συνιστωσών των ΜΔΝ. Μια τέτοια πρόκληση είναι ο επανασχεδιασμός του συστήματος προστασίας, καθώς το συμβατικό σύστημα προστασίας δεν παρέχει αξιοπιστία στα ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής χωρίζεται σε τρεις κύριους άξονες. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη και περιεκτική περιγραφή των κινδύνων και προκλήσεων που παρουσιάζονται στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά με υψηλή διείσδυση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής. Έπειτα, γίνεται αναφορά στους κανονισμούς των διαχειριστών ως προς τις βοηθητικές λειτουργίες που πρέπει να υιοθετούν οι μονάδες ΑΠΕ σε συνθήκες βραχυκυκλωμάτων. Επίσης, περιγράφονται διάφοροι μέθοδοι και τεχνικές υποστήριξης της τάσης από τις ΑΠΕ και υλοποιούνται τεχνικές ελέγχου έγχυσης ρεύματος, κατάλληλες για μελέτες προστασίας και βραχυκυκλωμάτων. Τέλος, αναπτύσσεται η μελέτη ενός

προσαρμοστικού συστήματος προστασίας για ένα υπάρχων μη διασυνδεδεμένο νησί και δοκιμάζεται σε εργαστηριακή διάταξη με χρήση ενός προσομοιωτή πραγματικού χρόνου, πραγματικούς ψηφιακούς Η/Ν και συσκευές ελέγχου.

1.11 Δομή της εργασίας

Σε συνέχεια της παρουσίασης του σκοπού και αντικειμένου της εργασίας, στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στην δομή της, όπως οργανώνεται σε έξι κεφάλαια συμπεριλαμβάνοντας του παρόντος.

Στο Κεφάλαιο 2, αρχικά γίνεται μια εισαγωγή σχετικά με την δομή των συστημάτων προστασιών και παρουσιάζονται διάφορες συνιστώσες από τις οποίες απαρτίζονται. Ύστερα, παρατίθεται η λογική διαφόρων κατηγοριών προστασιών και αναλύεται η καταλληλότητά τους με τα διάφορα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που τυχόν παρουσιάζουν. Επιπλέον, παρουσιάζονται διάφορα προβλήματα προστασιών που αναδύονται στα ΜΔΝ, λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη διείσδυση ΜΔΠ αλλά και τις διαφορετικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια εισαγωγή στην λογική της προσαρμοστικής προστασίας και το πώς εφαρμόζεται με σύγχρονους μεθόδους και εξοπλισμό.

Το Κεφάλαιο 3 αρχικά αναλύει τις απαιτήσεις του Κώδικα ΜΔΝ της Ελλάδος σχετικά με την συμπεριφορά των ελεγχόμενων και μη ελεγχόμενων μονάδων, όπως μονάδες αποθήκευσης και ΑΠΕ αντίστοιχα, σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων και τις συγκρίνει με απαιτήσεις που περιλαμβάνουν άλλοι διεθνής Κώδικες. Συγκεκριμένα, για την απαίτηση των διαχειριστών για υποστήριξη της τάσης σε διαταραχές, αναφέρονται διάφορες πιθανές στρατηγικές, οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στους επόμενης γενιάς κώδικες δικτύων. Επίσης, προτείνονται διάφορες τεχνικές ελέγχου για την μοντελοποίηση της συνεισφοράς των ΜΔΠ είτε ελεγχόμενων (Αποθήκευσης) ή μη ελεγχόμενων (ΑΠΕ) στα βραχυκυκλώματα. Τέλος, αναλύεται η συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών σε βραχυκυκλώματα.

Στο Κεφάλαιο 4, εξετάζεται η λύση των προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας και το πώς αυτά μπορούν να ανταποκριθούν στα προβλήματα που παρουσιάζονται στα σύγχρονα ΣΗΕ. Με γνώμονα αυτό, παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη δοκιμής προσαρμοστικής προστασίας, με χρήση πραγματικών συσκευών προστασίας και ελέγχου, η οποία προσομοιώνει το εξεταζόμενο δίκτυο, επιτηρεί την τοπολογία του δικτύου και προσαρμόζει αυτόματα τις κατάλληλες ρυθμίσεις στους ηλεκτρονόμους. Βάσει αυτής της διάταξης, αναπτύσσεται μια αυτοματοποιημένη μέθοδος μελέτης βραχυκυκλωμάτων στον ψηφιακό προσομοιωτή που προσομοιώνει και την συμβολή των μονάδων με ηλεκτρονικά ισχύος. Στην συνέχεια, καθορίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εύρεσης βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης των ηλεκτρονόμων στο λογισμικό Matlab. Τέλος, παρουσιάζεται αναλυτικά η ροή της διαδικασίας δοκιμής τέτοιων συστημάτων.

Στο Κεφάλαιο 5, εξετάζεται η εφαρμογή ενός συστήματος προσαρμοστικής προστασίας σε μια γραμμή διανομής του ΜΔΝ της Αστυπάλαιας, με υψηλή διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ΑΠΕ. Αρχικά, μοντελοποιείται το ηλεκτρικό σύστημα του νησιού στον προσομοιωτή πραγματικού χρόνου και οι μονάδες ΑΠΕ και αποθήκευσης σύμφωνα με τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Ύστερα, εφαρμόζεται η μελέτη βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων με αλγορίθμους και τεχνικές βελτιστοποίησης και ρυθμίζονται οι συνιστώσες της εργαστηριακής διάταξης για την δοκιμή του συστήματος

προστασίας. Με την ολοκλήρωση του κεφαλαίου αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και διατυπώνονται διάφορες παρατηρήσεις και σχόλια.

Το Κεφάλαιο 6 ανακεφαλαιώνει τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αναλύονται τα γενικά συμπεράσματα και περιγράφονται προτεινόμενες κατευθύνσεις προοπτικές για την επέκταση της μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΔΝ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ

2.1 Γενικά

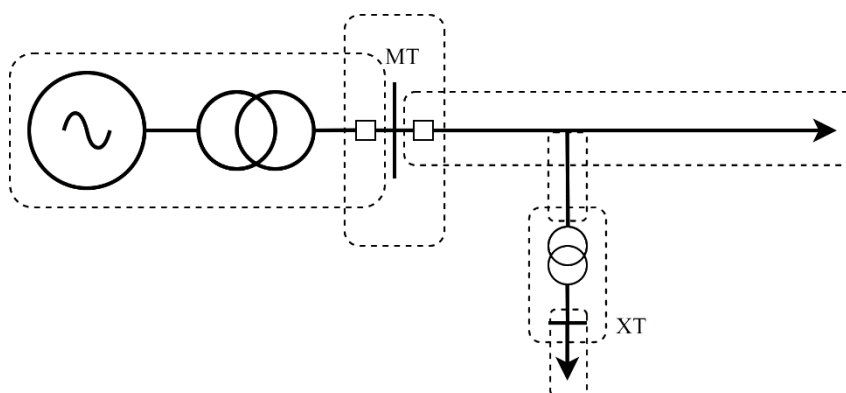
Το σύστημα προστασίας ενός ΣΗΕ, είναι όλος ο εξοπλισμός που εγκαθίστανται ο οποίος προστατεύει επαρκώς όλες τις συνιστώσες του ΣΗΕ από ενδεχόμενα ηλεκτρικά σφάλματα. Με τον όρο σφάλμα εννοούμε κάθε περίπτωση ανώμαλης λειτουργίας (π.χ. υπερτάσεις, βραχυκυκλώματα), η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό ισχύος [18].

2.2 Ζώνες προστασίας

Ο ρόλος του συστήματος προστασίας στα ΔΔ είναι να απομονώνει όσο το δυνατόν μικρότερο μέρος του δικτύου στο οποίο εμφανίζεται το σφάλμα, για να προστατέψει τις συσκευές και γραμμές του δικτύου και να συμβάλει στην ευστάθεια του συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό, το σύστημα προστασίας οργανώνεται σε ζώνες προστασίας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 [18]. Ζώνη προστασίας είναι ένα τμήμα του δικτύου το οποίο προστατεύεται από ξεχωριστό σύστημα προστασίας. Ο σχεδιασμός των ζωνών γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η μία να επικαλύπτει τυχόν γειτονικές και αντίστροφα, ώστε να προστατεύονται όλες οι συνιστώσες του ΣΗΕ. Για τα τμήματα του δικτύου που καλύπτονται από δύο ζώνες, διακρίνεται η πρωτεύουσα προστασία (primary protection) και η δευτερεύουσα (backup protection). Επομένως, το σύστημα σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε, σε περίπτωση σφάλματος, να ενεργοποιηθεί πρώτα η κύρια προστασία της ζώνης που συμβαίνει το σφάλμα και η δευτερεύουσα (π.χ. προστασία γειτονικής ζώνης) να ενεργοποιηθεί, μόνο και μόνο όταν αποτύχει να λειτουργήσει η κύρια.

Κάποιες τυπικές ζώνες προστασίας είναι:

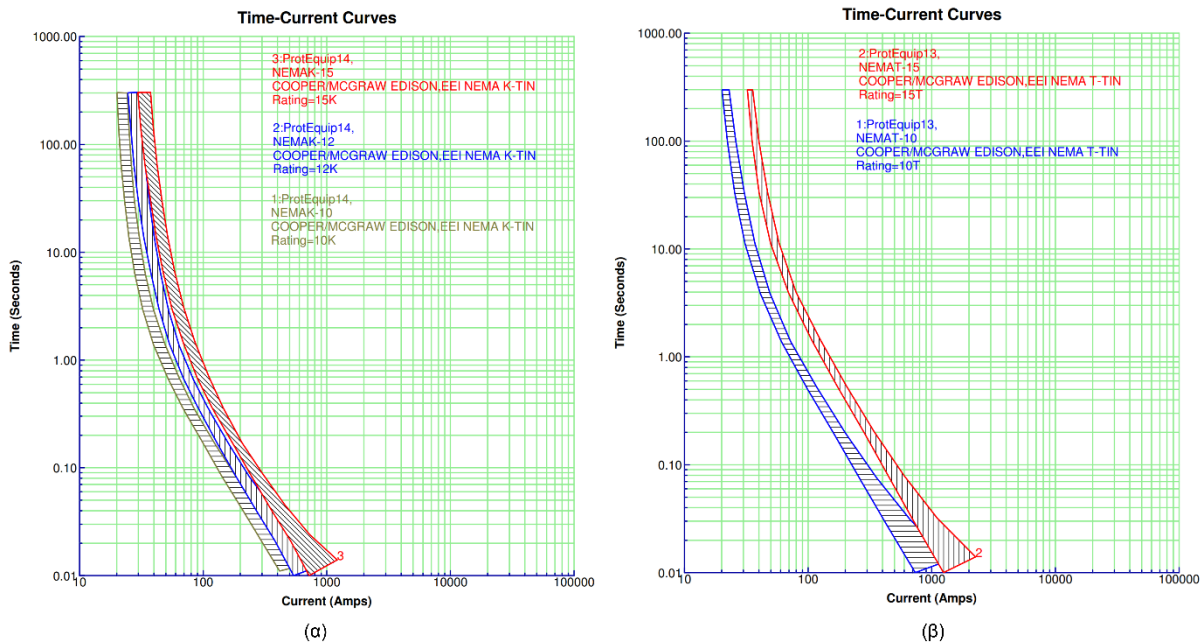
- Προστασία γραμμής,
- Προστασία γεννήτριας,
- Προστασία ζυγού,
- Προστασία κινητήρα.



Σχήμα 2.1: Ζώνες προστασίας τυπικού ΜΔΝ.

2.3 Ασφάλειες (fuses)

Οι ασφάλειες, χρησιμοποιούνται ως συσκευές προστασίας σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων ή υπερφόρτωσης για διάφορες συνιστώσες των δικτύων διανομής. Οι κύριες κατηγορίες ασφαλειών είναι οι ασφάλειες σκόνης και εκτόνωσης. Αμφότερες έχουν διάφορες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας (ρεύματος – χρόνου). Οι ασφάλειες εκτονώσεως διαιρούνται κυρίως σε δύο κατηγορίες, σε ταχείας τήξης (K) και βραδείας τήξης (T). Στο Σχήμα 2.2 αποτυπώνονται ένα παράδειγμα καμπυλών ταχείας και βραδείας τήξης που έχουν εγκατασταθεί σε δίκτυο ΜΔΝ.



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα τύπων χαρακτηριστικών καμπυλών (χρόνου–ρεύματος), (α) ασφάλειες εκτονώσεως ταχείας τήξης K (β) ασφάλειες εκτόνωσης βραδείας τήξης T, εγκατεστημένων σε ΜΔΝ.

2.4 Διακόπτες ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος (Δ/Ι) είναι συσκευές που κάνουν εκκαθάριση των σφαλμάτων. Σε περίπτωση σφάλματος, ο αντίστοιχος ηλεκτρονόμος (Η/Ν) αποστέλλει εντολή στον Δ/Ι να ανοίξει το κύκλωμα, ο Δ/Ι με την σειρά του, αφού λάβει την εντολή, απομονώνει το πληττόμενο τμήμα του δικτύου στον πρώτο μηδενισμό του ρεύματος [19]. Υπάρχουν διάφορα είδη διακοπών ισχύος τα οποία είναι:

- Διακόπτης πτωχού ελαίου,
- Διακόπτης αερίου SF6,
- Διακόπτης κενού.

2.5 Μετασηματιστής έντασης και τάσης (Μ/Σ μέτρησης)

Όταν η τάση και το ρεύμα σε ένα κύκλωμα ισχύος είναι εξαιρετικά υψηλά για την απευθείας σύνδεση οργάνων μέτρησης ή ηλεκτρονόμων, χρησιμοποιούνται μετασηματιστές τάσης και έντασης. Τέτοιοι μετασηματιστές παράγουν το μέγεθος του πρωτεύοντος (τάση ή ρεύμα) υποβιβασμένο στο δευτερεύον με την απαιτούμενη ακρίβεια για την μέτρηση [18]. Το επίπεδο

στο δευτερεύον είναι συνήθως 1A ή 5A για μετασχηματιστές ρεύματος και 100V, 110V ή 120V για μετασχηματιστές τάσης.

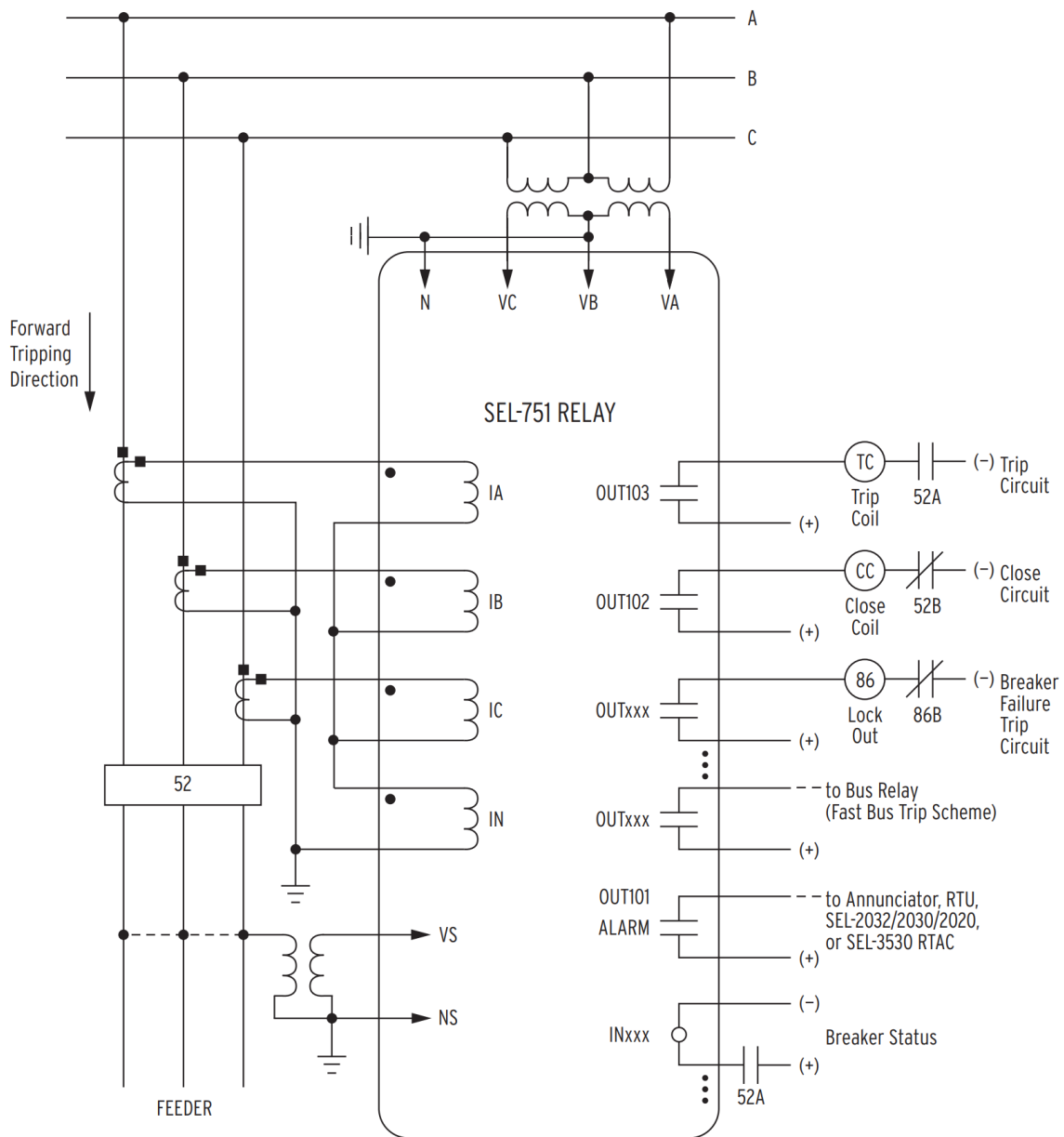
2.6 Ηλεκτρονόμοι προστασίας

Οι ηλεκτρονόμοι (H/N) είναι οι συσκευές που επιτηρούν ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά μεγέθη. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ηλεκτρονόμων. Αυτοί που θα μας απασχολήσουν σε αυτή την εργασία είναι οι σύγχρονοι ψηφιακοί H/N προστασίας. Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας είναι συσκευές που δέχονται ως είσοδο σήματα ελέγχου (π.χ. από μετασχηματιστές μέτρησης ή άλλα όργανα μέτρησης), εκτελούν υπολογισμούς και αποστέλλουν εντολές μέσω των εξόδων σε άλλες συσκευές (π.χ. διακόπτες ισχύος) όταν πληρούνται τα προγραμματισμένα κριτήρια [19]. Οι H/N κατηγοριοποιούνται ως προς την τεχνολογία τους ως ηλεκτρομηχανικοί, στατικοί, ψηφιακοί και αριθμητικοί.

- **Ηλεκτρομηχανικοί:** Πρόκειται για τους παλαιότερους ηλεκτρονόμους (1^η γενιά). Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου αποτελείται από κινούμενα μέρη. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ότι εφαρμόζεται μηχανική δύναμη σε μία επαφή ως απόκριση της διέγερσης [18].
- **Στατικοί:** Ο όρος ‘στατικοί’ υποδεικνύει ότι αυτός ο τύπος δεν έχει κινούμενα μέρη. Η βάση της λειτουργίας τους είναι η χρησιμοποίηση αναλογικών ηλεκτρονικών συσκευών [18].
- **Ψηφιακοί:** Οι ψηφιακοί H/N προστασίας αποτελούν ένα μεγάλο τεχνολογικό βήμα συγκρίνοντας τους με τις προηγούμενες κατηγορίες. Οι μικροεπεξεργαστές και οι μικροελεγκτές έχουν αντικαταστήσει διατάξεις από τα αναλογικά κυκλώματα των στατικών. Οι πρώτοι ψηφιακοί H/N παρουσιάστηκαν το 1980, ενώ αυτή η τεχνολογία είναι ακόμη χρήσιμη για πολλές εφαρμογές [18].
- **Αριθμητικοί:** Πρόκειται για εξελιγμένους ψηφιακούς H/N με αρκετά τεχνολογικά πλεονεκτήματα. Αυτοί χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος (Digital Signal Processors), οι οποίοι επεξεργάζονται τα σήματα σε πραγματικό χρόνο, εκτελώντας κατάλληλους μαθηματικούς αλγορίθμους για κάθε εφαρμογή προστασίας [18].

2.7 Σχηματική αναπαράσταση συστήματος προστασίας

Στο Σχήμα 2.3 αποτυπώνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής όλων των παραπάνω συνιστωσών για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας σε δίκτυο ΜΤ.



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα εφαρμογής προστασίας γραμμής διανομής [20].

2.8 Κατηγορίες βραχυκυκλωμάτων

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει διαφορετικών κριτηρίων, όπως για παράδειγμα τη διάρκεια τους, τον τύπο, την αντίσταση σφάλματος κ.α. Λαμβάνοντας ως κριτήριο την διάρκεια σβέσης τους, διακρίνονται σε παροδικά ή μόνιμα.

Τα παροδικά σφάλματα παρατηρούνται κυρίως στα εναέρια δίκτυα όπου ο αέρας αποτελεί και μόνωση των αγωγών. Σε περίπτωση σφάλματος, το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται διασπά την μονωτική ικανότητα του αέρα και το σφάλμα αποκαθίσταται με την σβέση του τόξου. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση τους στο ηλεκτρικό σύστημα, προκύπτουν τρεις υποκατηγορίες των παροδικών σφαλμάτων. Η πρώτη κατηγορία είναι τα αυτοαποσβενούμενα που εκκαθαρίζονται πριν λειτουργήσουν τα συστήματα προστασίας και δεν προκαλούν κάποια

διακοπή στην τάση του κυκλώματος. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα κυρίως παροδικά στα οποία αρκεί η στιγμιαία διακοπή της τάσης για την σβέση τους. Τέλος, τα ημιμόνιμα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από τα προηγούμενα και για να απαλειφθούν απαιτείται ένα χρονικό διάστημα λίγων δευτερολέπτων.

Από την άλλη, η παρουσία των μόνιμων σφαλμάτων, προκαλεί μόνιμη βλάβη στον εξοπλισμό ισχύος και απαιτείται η διακοπή της τάσης του πληγέντος κυκλώματος. Ο χρόνος αποκατάστασής τους είναι της τάξεως των μερικών ωρών έως λίγων ημερών, διότι είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση για την απολοιοφή τους (αντικατάσταση ή επισκευή εξοπλισμού). Τέτοια σφάλματα παρατηρούνται στα υπόγεια δίκτυα, όπου τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την μόνωση των αγωγών διασπώνται και καταστρέφονται [21].

Επιπλέον, τα σφάλματα διακρίνονται ως προς τον αριθμό των εμπλεκόμενων φάσεων, ως εξής:

- Φασικά σφάλματα: Εκδηλώνονται μεταξύ φάσεων και διακρίνονται σε διφασικά και τριφασικά.
- Σφάλματα γης: Εκδηλώνονται μεταξύ φάσεων και γης. Τέτοια σφάλματα αποτελούν τα μονοφασικά προς γη και τα διφασικά προς γη.
- Εξελισσόμενα σφάλματα: Αυτού του είδους σφαλμάτων, ξεκινούν ως μονοφασικά προς γη και στην συνέχεια εμπλέκονται περισσότερες φάσεις.

Τέλος, βάσει της αντίστασης σφάλματος προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες:

- Πλήρη σφάλματα, όπου η αντίσταση σφάλματος είναι μηδενική.
- Σφάλματα ηλεκτρικού τόξου, με αντίσταση σφάλματος μη μηδενικής τιμής.
- Σφάλματα διαρροής, όπου η αντίσταση σφάλματος παρουσιάζει υψηλές τιμές.

2.9 Χαρακτηριστικά αξιόπιστου συστήματος προστασίας

Η αξιοπιστία αποτελεί το ζητούμενο του συστήματος προστασίας. Ένα αξιόπιστο σύστημα προστασίας σχεδιάζεται με γνώμονα τα παρακάτω χαρακτηριστικά [19].

- **Πλεονασμό (redundancy):** Ο πλεονασμός της προστασίας 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.
- **Συντηρησιμότητα (maintainability):** Το σύστημα προστασίας να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η συντήρηση του.
- **Διαθεσιμότητα (availability):** Σε περίπτωση αστοχίας κάποιας συνιστώσας, θα πρέπει να εντοπίζεται και να αποκαθίσταται άμεσα.
- **Ευαισθησία (sensitivity):** Η προστασία πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητη ώστε να εντοπίζει σφάλματα μικρής έντασης.
- **Επιλογικότητα (selectivity):** Η προστασία πρέπει να αποφασίζει ορθά ώστε να απομονωθεί η μικρότερη δυνατή περιοχή του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος και όχι υγιής τμήματα.
- **Ταχύτητα (speed):** Η ικανότητα να απομονώνεται το σφάλμα όσο το δυνατόν πιο γρήγορα ώστε να αποφεύγονται περαιτέρω βλάβες στον εξοπλισμό.

2.10 Είδη προστασίας

Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα κυριότερα είδη προστασίας, τα οποία εφαρμόζονται για την προστασία των συμβατικών συνιστωσών των ΣΗΕ. Τα κυριότερα είδη είναι:

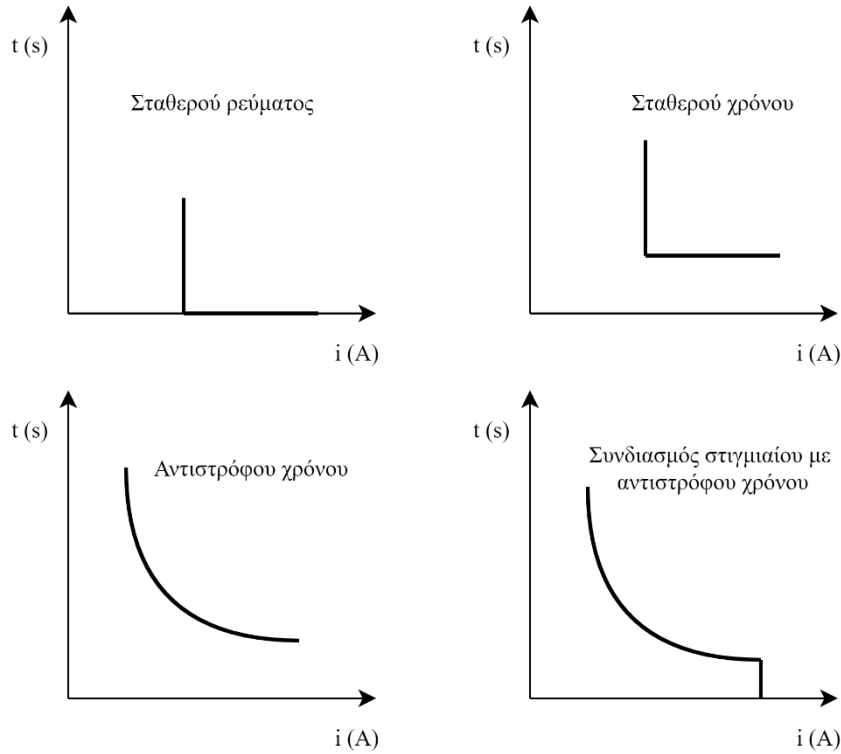
- Προστασία υπερέντασης με ή χωρίς στοιχεία κατεύθυνσης (Overcurrent protection),
- Προστασία κατεύθυνσης (Directional protection),
- Διαφορική προστασία (Differential protection),
- Προστασία απόστασης (Distance protection).

2.10.1 Προστασία υπερέντασης (Overcurrent protection)

Πρόκειται για την απλούστερη και οικονομικότερη διάταξη προστασίας η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια ή δευτερεύουσα. Οι συσκευές που παρέχουν προστασία υπερέντασης είναι οι ασφάλειες τήξεως (fuses), οι διακόπτες ισχύος (circuit breaker) και διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (reclosers). Εκτός τις ασφάλειες, οι υπόλοιποι διακόπτες ελέγχονται από Η/Ν υπερέντασης. Οι μετρήσεις που απαιτούνται για αυτόν τον τύπο προστασίας είναι το ρεύμα των τριών φάσεων. Το μειονέκτημα όμως αυτού του τύπου προστασίας είναι ότι δεν μπορεί να ανιχνεύσει την κατεύθυνση του ρεύματος. Οι Η/Ν υπερέντασης μπορούν να ρυθμιστούν ως προς την τιμή του ρεύματος, ως προς τον χρόνο λειτουργίας αλλά και ως προς τα δύο ταυτόχρονα. Συνεπώς, σύμφωνα με την χαρακτηριστική λειτουργίας των στοιχείων υπερέντασης των Η/Ν, διακρίνονται τρεις κατηγορίες [22]:

- **Σταθερού ρεύματος ή στιγμιαίοι:** Αυτός ο τύπος Η/Ν λειτουργεί στιγμιαία όταν το ρεύμα ξεπεράσει μία προκαθορισμένη τιμή. Η τιμή επιλέγεται έτσι ώστε να προστατεύει και τον τελευταίο ζυγό της γραμμής (πιο χαμηλή τιμή ρεύματος), επειδή όσο το σφάλμα γίνεται πιο κοντά στον Η/Ν τόσο μεγαλύτερη τιμή έχει. Έτσι ο Η/Ν με την χαμηλότερη ρύθμιση ρεύματος θα λειτουργήσει πρώτος, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα λόγω της μικρής επιλογικότητας σε υψηλές τιμές ρεύματος.
- **Σταθερού χρόνου:** Αυτός ο τύπος έχει την δυνατότητα ρύθμισης χρόνου λειτουργίας σε διαφορετικά επίπεδα ρεύματος, παρέχοντας έτσι ένα πιο επιλογικό σύστημα προστασίας. Οι ρυθμίσεις επιλέγονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο διακόπτης που βρίσκεται πιο κοντά στο σφάλμα να λειτουργεί πρώτος και οι υπόλοιποι διαδοχικά με μεγαλύτερες καθυστερήσεις. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτού του Η/Ν είναι ότι σε σφάλματα κοντά στην αφετηρία μιας γραμμής όπου το ρεύμα είναι πολύ υψηλό, αυτός ο Η/Ν θα εκκαθαρίσει το σφάλμα σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.
- **Αντιστρόφου χρόνου:** Είναι γνωστοί και ως (IDMT) Inverse Definite Minimum Time. Πρόκειται για τον τύπο Η/Ν ο οποίος ξεπερνάει τα μειονεκτήματα των προηγούμενων δύο. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι μπορεί να λειτουργεί σε χρόνο που είναι αντιστρόφως ανάλογος του ρεύματος σφάλματος, όπως ρυθμίζεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες. Επομένως όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές ρευμάτων σφάλματος τόσο πιο γρήγορα γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος, διατηρώντας την επιλογικότητα τους.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των παραπάνω τύπων Η/Ν υπερέντασης φαίνονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες των διαφόρων τύπων H/N.

Η λειτουργία των στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου είναι πιο πολύπλοκη και ταξινομείται σύμφωνα με την χαρακτηριστική τους καμπύλη ως: Αντιστρόφου, πολύ αντιστρόφου και εξαιρετικά αντιστρόφου (inverse, very inverse, extremely inverse). Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η μορφή αυτών των καμπυλών. Σύμφωνα με τα πρότυπα IEC/IEEE [23] [24], οι χαρακτηριστικές καμπύλες ορίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$t = TD \left(\frac{A}{\left(\frac{I_f}{I_{pu}} \right)^B - 1} + C \right) \quad (2.1)$$

Όπου,

A, B, C : Σταθερές τιμές που καθορίζουν το είδος της χαρακτηριστικής.

TD : Ο χρονικός πολλαπλασιαστής (Time Dial).

I_{pu} : Το ρεύμα διέγερσης που έχει ρυθμιστεί (pickup current).

I_f : Το ρεύμα σφάλματος υποβιβασμένο στο δευτερεύον του Μ/Ε.

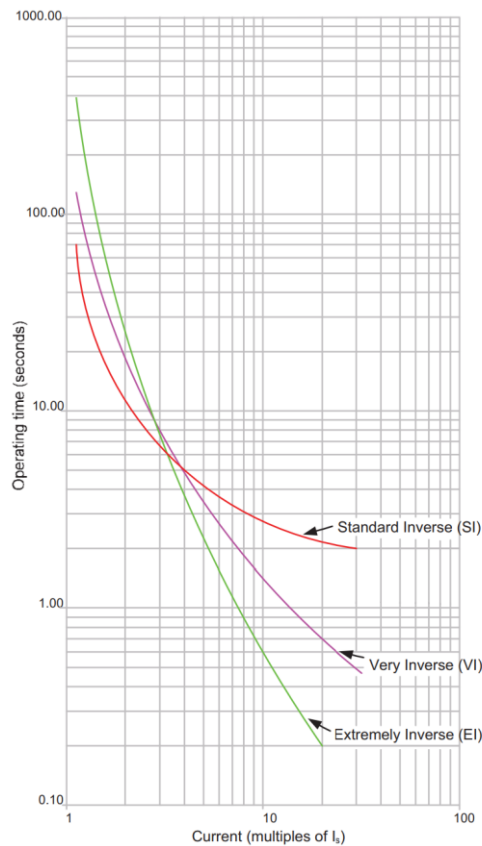
Οι σταθερές A, B, C καθορίζουν το είδος της καμπύλης όπως έχουν κατηγοριοποιηθεί και τυποποιηθεί σύμφωνα με τα πρότυπα IEC/IEEE. Το ρεύμα διέγερσης καθορίζει τη θέση της χαρακτηριστικής καμπύλης ως προς τον άξονα του ρεύματος (οριζόντια μετατόπιση), ενώ ο χρονικός πολλαπλασιαστής καθορίζει τη θέση της καμπύλης στον άξονα του χρόνου (κάθετη μετατόπιση).

Ένα χαρακτηριστικό επίσης που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη του συστήματος προστασίας είναι ο χρόνος λειτουργίας της δευτερεύουσας προστασίας (backup). Ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν που ρυθμίζονται ως δευτερεύουσα προστασία πρέπει να είναι μεγαλύτερος από οποιαδήποτε πρωτεύουσα προστασία πλησίον του σφάλματος, για να μην υπάρχει τυχόν επικάλυψη και ενεργοποιείται πριν την πρωτεύουσα.

Επιπλέον, οι τυποποιημένες χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου, οι οποίες ορίζονται από τις τιμές A , B και C , συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες χαρακτηριστικές εξισώσεις στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου.

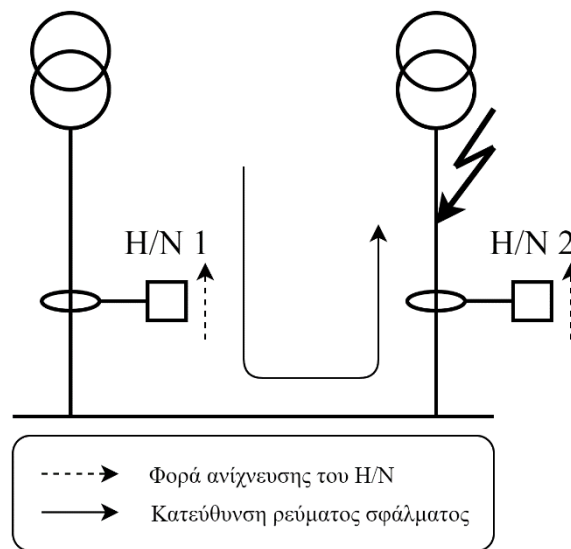
Χαρακτηριστική	Πρότυπο	A	B	C
IEC Standard inverse (Type A)	European (IEC)	0.14	0.02	0
IEC Very Inverse (Type B)		13.5	1	0
IEC Extremely Inverse (Type C)		80	2	0
UK Long Time Inverse		120	1	0
FR short Time Inverse		0.05	0.04	0
IEEE Moderately Inverse	IEEE	0.0515	0.02	0.114
IEEE Very Inverse		19.61	2	0.491
IEEE Extremely Inverse		28.2	2	0.18



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα τυπικών χαρακτηριστικών καμπυλών υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου σύμφωνα με το IEC [18].

2.10.2 Προστασία κατεύθυνσης (Direction protection)

Οι σύγχρονοι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης μπορούν να αναγνωρίσουν την κατεύθυνση του ρεύματος σφάλματος, χρησιμοποιώντας στοιχεία υπερεντάσεως κατεύθυνσης. Αυτά τα στοιχεία αντιλαμβάνονται την φάση της τάσης και του ρεύματος σφάλματος, συγκρίνουν τις γωνίες και αποφασίζουν αν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει εμπρός ή όπισθεν της γραμμής που είναι εντός της ζώνης επιτήρησης του Η/Ν. Αυτό το είδος προστασίας λειτουργεί μαζί με τα στοιχεία υπερέντασης και οι μετρήσεις που απαιτούνται είναι το ρεύμα και η τάση των τριών φάσεων. Συνάμα, οι Η/Ν κατεύθυνσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύουν την κατεύθυνση των ρευμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, όπως αναλύονται με την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών.



Σχήμα 2.6: Παράδειγμα τρόπου λειτουργίας Η/Ν κατεύθυνσης

Το μόνο μειονέκτημα είναι η εξάρτησή τους στο μέγεθος του ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Δηλαδή, παρουσιάζονται θέματα ευαισθησίας από την μεγάλη διακύμανση της έντασης βραχυκυκλώσεως, εξαιτίας των αλλαγών της τοπολογίας ή της λειτουργίας του δικτύου. Επίσης, λόγω της μη συμβατικής συμπεριφοράς και του συντελεστή ισχύος των ρευμάτων σφάλματος των ΜΔΠ με μετατροπείς ισχύος που συμβάλουν στα σφάλματα ενδέχεται να προκληθεί δυσλειτουργία στους Η/Ν κατεύθυνσης [25].

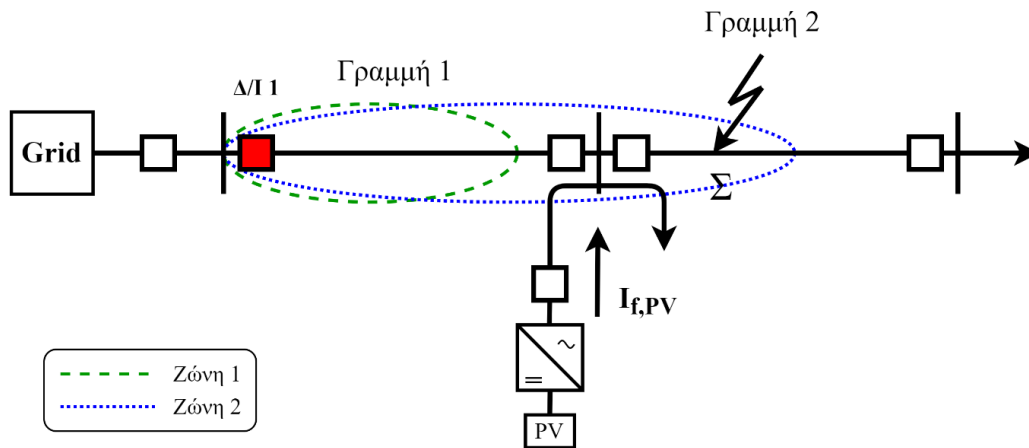
2.10.3 Προστασία απόστασης (Distance protection)

Οι Η/Ν απόστασης είναι μια συνήθης εναλλακτική των προστασιών κατεύθυνσης. Αυτοί οι Η/Ν εφαρμόζονται κατά κόρον για την προστασία των γραμμών μεταφοράς και στηρίζονται στην παρακάτω βασική αρχή λειτουργίας. Ο Η/Ν μετρά την τάση και το ρεύμα στο σημείο που εγκαθίσταται, υπολογίζει τον λόγο ($Z = V/I$) και αν η τιμή είναι μικρότερη από την τιμή αναφοράς που έχει τεθεί, το σφάλμα διενεργείται εντός της ζώνης προστασίας και δίνεται εντολή στον Δ/Ι να απομονώσει το πληττόμενο τμήμα. Οι Η/Ν απόστασης λειτουργούν στιγμιαία στην πρωτεύουσα ζώνη προστασίας και με χρονική καθυστέρηση ως δευτερεύουσα προστασία σε ζώνες γειτονικές ζώνες της πρωτεύουσας.

Οι ρυθμίσεις αυτού του είδους προστασίας εξαρτώνται από τις ζώνες τις οποίες σχεδιάζονται να προστατευτούν. Οι τυπικές τιμές για την πρώτη ζώνη είναι 80% - 85% της απόστασης της γραμμής που τοποθετείται ο Η/Ν. Το περιθώριο ασφαλείας 15% - 20% λαμβάνεται υπόψη για

την αξιόπιστη λειτουργία του Η/Ν ενάντια σε τυχόν σφάλματα μέτρησης τάσης και ρεύματος. Οι δεύτερη ζώνη προστατεύει 100% της απόστασης της γραμμής και επιπλέον το 50% της επόμενης. Η τρίτη ζώνη προστατεύει 100% τις δυο πρώτες γραμμές και την τρίτη το 25% της έκτασης της.

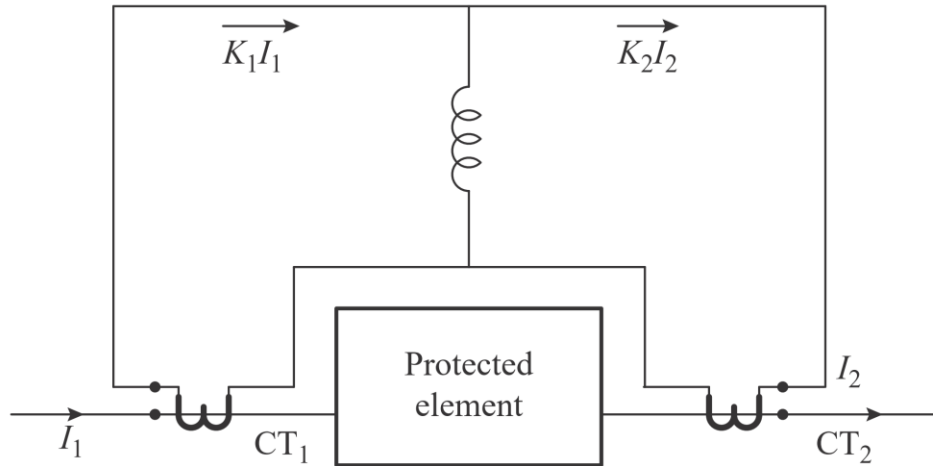
Ωστόσο, το ρεύμα από μια ΜΔΠ σε ένα ΜΔΝ μπορεί να οδηγήσει σε υποτίμηση ή υπερτίμηση της θέσης του σφάλματος. Στην γραμμή ενός ΜΔΝ που αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.7 συμβαίνει σφάλμα στο 30% της απόστασης της γραμμής 2. Ο Η/Ν του Δ/Ι 1 λειτουργεί ως ζώνη 1 καλύπτοντας το 80% της Γραμμής 1 και ως ζώνη 2 την Γραμμή 1 συν το 50% της απόστασης της γραμμής 2. Το ρεύμα που μετρείται από τον Η/Ν μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία της μονάδα φωτοβολταϊκού PV, αλλά και από τον συντελεστή ισχύος του ρεύματος που συμβάλει αυτή στο σφάλμα, αλλάζοντας ουσιαστικά την σύνθετη αντίσταση που υπολογίζει ο Η/Ν. Τέλος, το γεγονός ότι οι γραμμές διανομής ενός νησιού είναι συνήθως μικρές σε μήκος, μειώνει την ακρίβεια μέτρησης του υπολογισμού του λόγου $Z = V/I$ και προκύπτει αβεβαιότητα για το αν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει εντός ή εκτός ζώνης προστασίας. Συνεπώς, η προστασία απόστασης αποτελεί μια δύσκολα εφαρμόσιμη λύση για την προστασία ενός ΜΔΝ [25].



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα δυσλειτουργίας προστασίας απόστασης.

2.10.4 Διαφορική προστασία (Differential protection)

Η διαφορική προστασία είναι επίσης μια προτεινόμενη μέθοδος για την προστασία ενός μικροδικτύου. Σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας, οι Η/Ν διαφορικής προστασίας μετρούν τις εντάσεις των ρευμάτων στην είσοδο και την έξοδο του εξοπλισμού που προστατεύουν και λειτουργούν, όταν το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων είναι διάφορο του μηδενός. Η σύγκριση των ρευμάτων γίνεται από τις δύο συσκευές που τοποθετούνται στα άκρα του εξοπλισμού. Κάθε μία συσκευή συγκρίνει το ρεύμα που μετρά με το μετρούμενο ρεύμα που αποστέλλει ή άλλη από το άλλο άκρο. Οι μετρήσεις μεταδίδονται μέσω ενός επικοινωνιακού δικτύου βασισμένο σε Ethernet, οπτικές ίνες, προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (program logic controllers PLC) ή τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας.



Σχήμα 2.8: Παράδειγμα λογικής διαφορικής προστασίας.

Αυτή η μέθοδος προστασίας όταν εφαρμόζεται για προστασία γραμμών, οι διαφορικοί Η/Ν μπορεί να βρίσκονται σε απομακρυσμένη γεωγραφική θέση. Έτσι, το επικοινωνιακό δίκτυο μπορεί να παρουσιάζει καθυστερήσεις ή σφάλματα στην μετάδοση των σημάτων, προκαλώντας αποσυγχρονισμό των δεδομένων που συλλέγονται από τις συσκευές, επηρεάζοντας την ορθή λειτουργία του συστήματος προστασίας. Για προστασία γραμμών, τεχνολογίες όπως οπτικές ίνες πρέπει να εξασφαλίζουν υψηλό εύρος ζώνης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών που είναι εγκατεστημένες. Ένα τέτοιο σύστημα, όπως εφαρμόζεται στα συστήματα μεταφοράς, μπορούν να εφαρμοστούν σε γραμμές διανομής που δεν έχουν συνδεδεμένα φορτία κατά μήκος τους [25].

Άλλη μια καινοτόμα προσέγγιση της διαφορικής προστασίας βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ συμβατικών συσκευών (π.χ. Η/Ν κατεύθυνσης), αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος προστασίας, χρησιμοποιώντας σωστά τις επικοινωνιακές υποδομές. Επίσης, απαιτούνται ψηφιακές συσκευές που να μπορούν να εκτελούν βασικές τεχνικές προστασίας, να υποστηρίζουν επικοινωνιακό πρωτόκολλο και να παρέχουν ευελιξία στις ρυθμίσεις λειτουργίας τους. Βιομηχανικά επικοινωνιακά πρωτόκολλα όπως το IEC 61850 και ειδικότερα το χαρακτηριστικό generic object-oriented substation event (GOOSE), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τέτοιες διατάξεις. Αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να αναπτυχθεί για peer-to-peer επικοινωνία που απαιτείται από τους διαφορικούς Η/Ν. Το πρωτόκολλο δέχεται όλους τους τύπους δεδομένων (δυναμικά και αναλογικά σήματα) και εγγυάται την μεταφορά τους σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου [25].

Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της διάταξης προστασίας είναι το υψηλό κόστος, διότι απαιτείται επικοινωνιακό σύστημα. Χρησιμοποιώντας διαφορική προστασία σε διάφορες γραμμές ενός ΜΔΝ, μπορεί να κάνει το επικοινωνιακό δίκτυο αρκετά πολύπλοκο δεδομένης της μικρής απόστασης των κόμβων. Επιπλέον, η προστασία του ΜΔΠ δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στην διαφορική προστασία καθώς το επικοινωνιακό δίκτυο μπορεί να αποτύχει ή να παραβιαστεί από κυβερνοεπιθέσεις. Για τον λόγο αυτό, είναι επιτακτική η ανάγκη για ένα δευτερεύων σύστημα βασισμένο σε συμβατικούς Η/Ν που μπορούν να λειτουργήσουν τοπικά [25].

2.11 Προκλήσεις προστασίας σε ΜΔΝ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, τα τελευταία χρόνια οι κυβερνήσεις έχουν θεσπίσει φιλόδοξους στόχους για την αύξηση της χρήσης ΑΠΕ και την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πρωταρχικό σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Τα ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΜΔΠ αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις σχετικά με τον έλεγχο, την λειτουργία και την προστασία τους.

Η ενσωμάτωση πολλών ΜΔΠ 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, τα σύγχρονα δίκτυα διανομής όπως τα ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΜΔΠ διαφέρουν κυρίως στα εξής σημεία:

1. Εγκαθίστανται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίες αυξάνουν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης.
2. Επικρατεί βροχοειδής τοπολογία, με συνέπεια την αμφίδρομη ροή των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως.

Οι παραπάνω αλλαγές στη λειτουργία των σύγχρονων δικτύων διανομής και των ΜΔΝ καθιστούν τις υφιστάμενες τεχνικές προστασίας ανεπαρκής. Επομένως, απαιτείται σαφής προσδιορισμός όλων των ενδεχόμενων προβλημάτων προστασίας και ανάπτυξη πρωτοποριακών λύσεων για την αποτελεσματική αντιμετώπιση τους, με γνώμονα τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των ΜΔΝ και γενικότερα των σύγχρονων δικτύων διανομής. Τα κύρια προβλήματα που προκαλούν δυσλειτουργία των συσκευών προστασίας είναι η μεταβλητή στάθμη βραχυκυκλώσεως, η τύφλωση προστασίας (protection blinding), η συμπαθητική λειτουργία (sympathetic tripping), το μικρό ρεύμα βραχυκύκλωσης, η αβέβαιη συμπεριφορά των μονάδων με ηλεκτρονικά ισχύος και η έλλειψη γείωσης [25].

2.11.1 Μεταβολή στάθμης ρεύματος βραχυκύκλωσης

Η μικρή ισχύς βραχυκύκλωσης αποτελεί ένα πρόβλημα που παρατηρείται κυρίως σε μικρά ΜΔΝ τα οποία διαθέτουν μόνο δίκτυο διανομής.

Η αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ στα ΜΔΝ οδηγεί σε μεταβαλλόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης που εξαρτώνται από τον αριθμό και τον τύπο των μονάδων που είναι συνδεδεμένες. Για παράδειγμα μία συμβατική μονάδα ΤΣΠ (Diesel) συμβάλει με μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκύκλωσης από μονάδες Φ/Β, Α/Γ και σταθμούς αποθήκευσης μπαταριών. Έτσι, σε ένα νησί που υπάρχει σχέδιο να λειτουργεί κάποιες ώρες μόνο με μονάδες ΑΠΕ σε συνδυασμό με σύστημα αποθήκευσης, ο σχεδιασμός του συστήματος προστασίας αποτελεί πρόκληση, λόγω των διαφορετικών στάθμων βραχυκύκλωσης που προκύπτουν στα διάφορα σενάρια λειτουργίας του συστήματος. Αυτό το πρόβλημα εντείνεται όταν η τοπολογία ενός ΜΔΝ είναι βροχοειδής, διότι προκύπτουν πολλοί διαιρέτες ρεύματος στους κόμβους διασυνδέσεων των γραμμών. Δύο πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης των εν λόγω προκλήσεων είναι οι ακόλουθοι [25]:

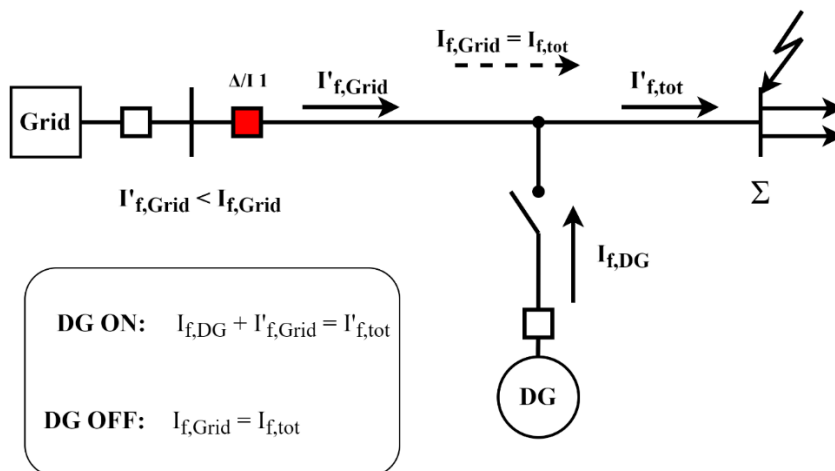
- Μια πιθανή λύση είναι η υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων ισχύος των μονάδων ΑΠΕ, καθώς έτσι περιορίζονται οι επεμβάσεις που χρειάζεται το σύστημα προστασίας. Ωστόσο, αυτή η λύση παρουσιάζει αυξημένο κόστος επένδυσης και μειώνεται η ευελιξία για μελλοντικές αναβαθμίσεις του δικτύου στο μέλλον.
- Μια εναλλακτική λύση αποτελεί η εγκατάσταση ενός σύγχρονου προσαρμοστικού συστήματος προστασίας το οποίο διαθέτει σύγχρονους ψηφιακούς Η/Ν που υποστηρίζουν πολλές ομάδες ρυθμίσεων, ώστε οι καμπύλες ρεύματος – χρόνου να προσαρμόζονται στην εκάστοτε τοπολογία του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει μικρότερο κόστος επένδυσης και παρέχει αυξημένη ευελιξία, ωστόσο παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και προκύπτουν ζητήματα αξιοπιστίας καθώς για την εφαρμογή του απαιτείται ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο για την επικοινωνία των έξυπνων συσκευών.

2.11.2 Συμβολή μονάδων ΑΠΕ σε βραχυκύκλωμα

Τα ΜΔΝ παραδοσιακά τροφοδοτούνται κυρίως από σύγχρονες γεννήτριες. Ωστόσο, οι μονάδες ΑΠΕ που συνδέονται στο δίκτυο με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος έχουν διαφορετική συμπεριφορά σε τυχόν βραχυκύκλωμα. Έτσι, οι μετατροπείς ισχύος λόγω των τεχνικών μεγίστων μπορούν να συμβάλουν στο βραχυκύκλωμα μόνο κατά 1 – 1,5 φορές του ονομαστικού τους ρεύματος. Συνεπώς, το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγάλες αλλαγές στο αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος. Επίσης, στους μετατροπείς ισχύος με ηλεκτρονικά ισχύος επικρατεί αβεβαιότητα στο ρεύμα σφάλματος που συμβάλουν, διότι η συμπεριφορά αυτών εξαρτάται από τον αλγόριθμο ελέγχου, ο οποίος περιορίζει την ισχύ για να προστατέψει τα διακοπτικά στοιχεία του. Αυτό διαφέρει από μία σύγχρονη γεννήτρια, της οποίας το ρεύμα σφάλματος εξαρτάται άμεσα από την μαγνητική ροή των τυλιγμάτων της [25].

2.11.3 Τύφλωση προστασίας (Protection Blinding)

Το πρόβλημα της τύφλωσης προστασίας προκαλείται από την ενσωμάτωση ΜΔΠ σε διάφορα σημεία του ΔΔ. Πιο συγκεκριμένα, όταν μία ΜΔΠ είναι ανάμεσα από το σημείο του σφάλματος και την αφετηρία μιας γραμμής, τότε το ρεύμα σφάλματος που ανιχνεύει η συσκευή προστασίας στην αφετηρία της γραμμής είναι μειωμένο, καθώς η ΜΔΠ που βρίσκεται ανάμεσα συμβάλει σε αυτό.

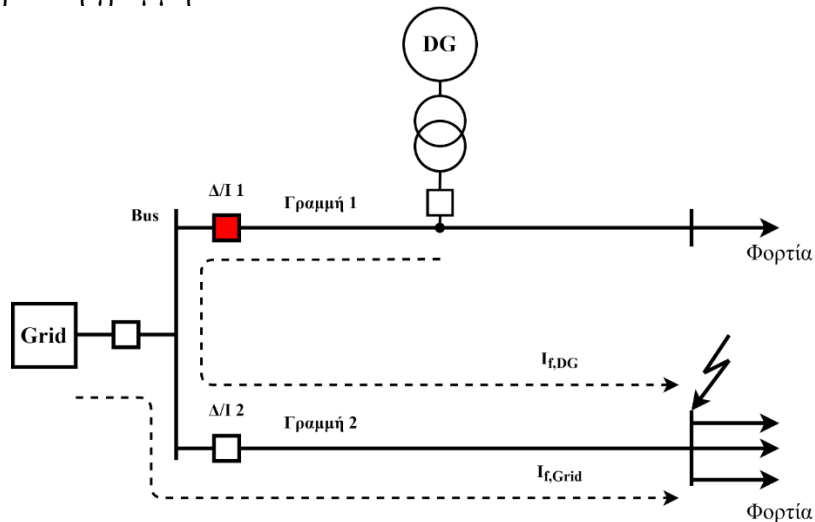


Σχήμα 2.9: Ρεύμα σφάλματος σε περίπτωση τύφλωσης προστασίας.

Ποιοτικά, με την βοήθεια του Σχήμα 2.9, εξηγείται το φαινόμενο της τύφλωση προστασίας. Θεωρούμε ότι το σφάλμα συμβαίνει στο άκρο της γραμμής στην θέση (Σ). Το εισερχόμενο ρεύμα στην γραμμή από το δίκτυο όταν η μονάδα DG είναι συνδεδεμένη μειώνεται σε σχέση με το αν η DG είναι αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο, ενώ το ρεύμα σφάλματος αυξάνεται λόγω της συνεισφοράς της. Σε συνέχεια αυτού, ο Η/Ν του Δ/Ι 1 ενδέχεται να μην εντοπίσει το σφάλμα και να επηρεαστεί η ταχύτητα εκκαθάρισης [19].

2.11.4 Συμπαθητική λειτουργία (sympathetic tripping)

Άλλη μία πρόκληση είναι η συμπαθητική λειτουργία (sympathetic tripping). Αυτή επηρεάζει την επιλογικότητα των Η/Ν του συστήματος προστασίας. Η συμπαθητική λειτουργία μιας συσκευής προστασίας εμφανίζεται όταν το σφάλμα συμβαίνει σχετικά κοντά σε μια ΜΔΠ, αλλά σε διαφορετική γραμμή.



Σχήμα 2.10: Ρεύμα σφάλματος σε περίπτωση συμπαθητικής λειτουργίας.

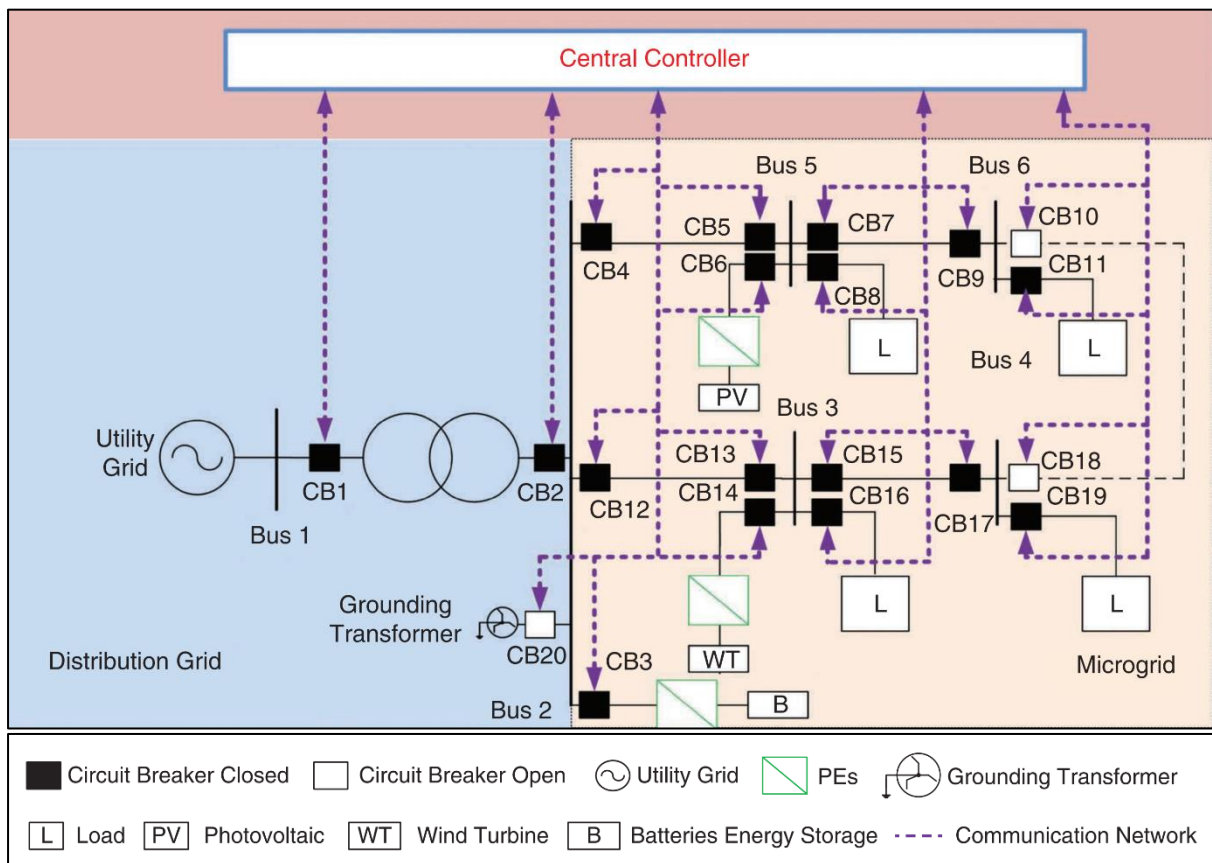
Αυτό το πρόβλημα ανεπιθύμητης λειτουργίας γίνεται κατανοητό με την βοήθεια του Σχήματος 2.10, όπου η γεννήτρια DG συμβάλει στο σφάλμα που συμβαίνει στην γειτονική γραμμή 2. Έστω ο Η/Ν του Δ/Ι 2 είναι ρυθμισμένος με μικρότερη ευαισθησία επειδή π.χ. η γραμμή 2 έχει υψηλότερο φορτίο και η DG είναι μια μεγάλη μονάδα. Ο Η/Ν του Δ/Ι 1 ενδέχεται να λειτουργήσει πριν προλάβει ο Η/Ν του Δ/Ι 2. Αυτό συμβαίνει συχνά στα ΔΔ με υψηλή διείσδυση ΜΔΠ, επειδή οι Η/Ν προστασίας γραμμών δεν χρησιμοποιούσαν στοιχείο κατεύθυνσης [19].

2.12 Εισαγωγή στην προσαρμοστική προστασία (adaptive protection)

Μια από τις αποδοτικές λύσεις προστασίας για ένα μικρό ΜΔΝ είναι η προσαρμοστική προστασία (adaptive protection). Αυτή απαιτεί κυρίως Η/Ν κατεύθυνσης υπερεντάσεως, οι οποίοι υποστηρίζουν αρκετές ομάδες ρυθμίσεων και μπορούν να παραμετροποιηθούν τοπικά ή μέσω απομακρυσμένων σημάτων ελέγχου σύμφωνα με την εκάστοτε τοπολογία του δικτύου. Το προσαρμοστικό σύστημα προστασίας εφαρμόζεται μέσω του επικοινωνιακού δικτύου και δεν απαιτείται η αλληλεπίδραση των συνιστωσών κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Επομένως, η προστασία βασίζεται στις τοπικές λειτουργίες των Η/Ν και η επικοινωνία είναι απαραίτητη μόνο για την ενημέρωση των συσκευών, δηλαδή των ομάδων ρυθμίσεων (setting groups) όταν οι παράμετροι του δικτύου αλλάξουν. Εφόσον μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης, το κόστος και η

πολυπλοκότητα του επικοινωνιακού δικτύου είναι μικρότερη συγκρίνοντας την με την διαφορική προστασία.

Οι διατάξεις προσαρμοστικής προστασίας μπορούν να εφαρμοστούν με κεντρικές ή κατακεντρωμένες αρχιτεκτονικές. Στην περίπτωση κεντρικής αρχιτεκτονικής, οι ομάδες ρυθμίσεων μπορούν να ενημερώνονται βάσει των υπολογισμών που εκτελούνται συνδεδεμένα (online) ή αποσυνδεδεμένα (offline). Στους online υπολογισμούς, ένας κεντρικός ελεγκτής λαμβάνει τα απαιτούμενα σήματα (π.χ. καταστάσεις των Δ/Ι, ρεύματα δικτύου), έπειτα ένας τοπικός υπολογιστής εκτελεί σφάλματα σε περιβάλλον προσομοίωσης σε διάφορα τμήματα του δικτύου και σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου λύσης προβλήματος βελτιστοποίησης ενεργοποιείται η κατάλληλη ομάδα ρυθμίσεων στους Η/Ν. Τέλος, τα ψηφιακά σήματα στέλνονται στους Η/Ν μέσω του χαμηλού εύρους ζώνης επικοινωνιακού συστήματος. Το μόνο μειονέκτημα σε αυτή τη λύση προστασίας είναι η ανάγκη για έναν προσομοιωτή στον κεντρικό ελεγκτή προκειμένου να εκτελεί προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος και μειώνει την αξιοπιστία της προστασίας. Επίσης, απαιτούνται νέοι υπολογισμοί όταν συμβεί μια αλλαγή στο δίκτυο, καθυστερώντας την ενημέρωση των ομάδων ρύθμισης [25].



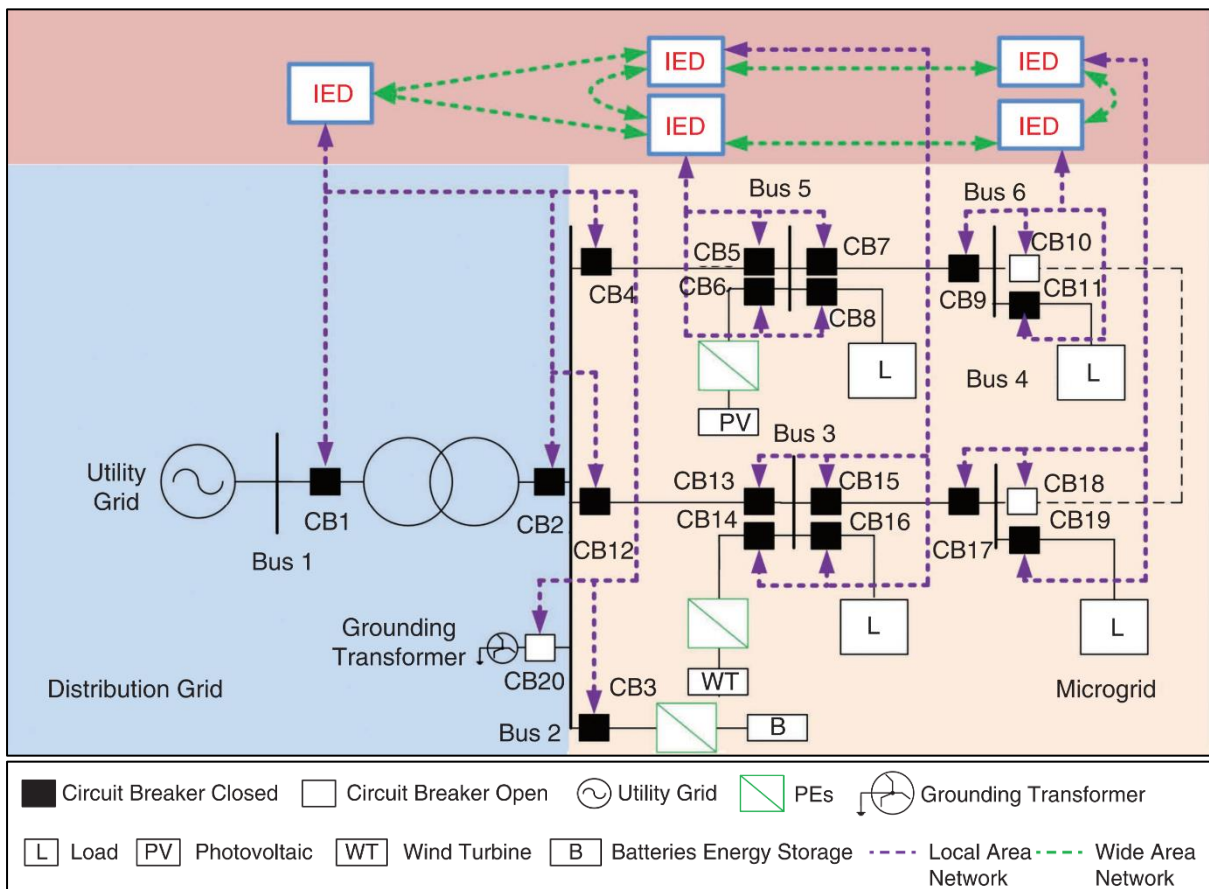
Σχήμα 2.11: Παράδειγμα κεντρικού προσαρμοστικού συστήματος προστασίας σε ένα μικροδίκτυο [25].

Σχετικά με την αποσυνδεδεμένη (offline) λύση ενός κεντρικού προσαρμοστικού συστήματος προστασίας, οι υπολογισμοί σφάλματος για όλες τις πιθανές περιπτώσεις καταστάσεων λειτουργίας και τοπολογίας ενός ΜΔΝ εκτελούνται κατά τον σχεδιασμό του συστήματος προστασίας. Έτσι, βάσει των αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης καθορίζονται οι κατάλληλες ομάδες ρυθμίσεων για τις συσκευές προστασίας για κάθε κατάσταση δικτύου. Κατά την online λειτουργία, ο κεντρικός ελεγκτής λαμβάνει τα

απαιτούμενα δεδομένα, αναγνωρίζει την τρέχουσα τοπολογία του δικτύου και αν είναι απαραίτητο αλλάζει ομάδα ρύθμισης στους Η/Ν μέσω του επικοινωνιακού καναλιού. Ένα παράδειγμα κεντρικού συστήματος προσαρμοστικής προστασίας αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.11.

Το κύριο πλεονέκτημα της κεντρικής προσαρμοστικής προστασίας είναι ότι όλες οι πληροφορίες είναι διαθέσιμες στον κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος επιλέγει τις βέλτιστες ομάδες ρυθμίσεων. Ωστόσο, αποτελεί μειονέκτημα το γεγονός ότι αυτή η λύση παρέχει μειωμένη αξιοπιστία επειδή ένα εσωτερικό σφάλμα στον κεντρικό ελεγκτή είναι ικανό να πλήξει την ορθή λειτουργία της προστασίας. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί η ανάγκη ενός πολύπλοκου γεωγραφικά εκτεταμένου δικτύου για την επικοινωνία του κεντρικού ελεγκτή με κάθε μια συσκευή του ηλεκτρικού δικτύου.

Επιπλέον, άλλη μια προτεινόμενη λύση είναι η κατακεντρωμένη συνδεδεμένη λειτουργία της προσαρμοστικής προστασίας. Σε αυτή τη διάταξη, τοπικοί ελεγκτές που εγκαθίστανται σε διαφορετικά γεωγραφικά σημεία του δικτύου, ενημερώνουν τις ρυθμίσεις των αντίστοιχων Η/Ν σύμφωνα με πληροφορίες που λαμβάνουν από άλλες γειτονικές συσκευές. Το πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι η αυξημένη αξιοπιστία που παρέχουν, αφού αποτελούν ένα αποκεντρωμένο σύστημα. Επίσης, το επικοινωνιακό σύστημα είναι απλούστερο αφενός γιατί το επικοινωνιακό δίκτυο είναι μικρότερο σε έκταση και αφετέρου οι πληροφορίες συλλέγονται από γειτονικούς Η/Ν. Παρά τα πλεονεκτήματα, χαρακτηριστικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι Η/Ν ενδέχεται να μην επιλέγουν τις βέλτιστες ομάδες ρυθμίσεων, εξαιτίας του γεγονότος ότι λαμβάνεται υπόψη ένα μέρος του δικτύου [25]. Ένα παράδειγμα κατακεντρωμένου συστήματος προσαρμοστικής προστασίας αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Παράδειγμα κατακεντρωμένου προσαρμοστικού συστήματος προστασίας [25].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

3.1 Κώδικες διαχείρισης δικτύου (Grid Code Regulations)

Οι κώδικες διαχείρισης δικτύων διαμορφώνονται από τους διαχειριστές των δικτύων και περιγράφουν τα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις των παραγωγών και των καταναλωτών οι οποίοι συνδέονται είτε στο δίκτυο μεταφοράς ή στο δίκτυο διανομής. Ειδικότερα, με τον Κώδικα Διαχείρισης Ηλεκτρικών Συστημάτων ΜΔΝ [26] καθορίζεται το πλαίσιο λειτουργίας και διαχείρισης των αυτόνομων Ηλεκτρικών Συστημάτων των ΜΔΝ και της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στα ΜΔΝ της Ελλάδας.

3.1.1 Απαιτήσεις Κώδικα ΜΔΝ για τις πλήρως ή μερικώς ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής

Στο άρθρο του Κώδικα ΜΔΝ [26] που διατυπώνονται οι βασικές λειτουργικές απαιτήσεις των πλήρως ή μερικώς ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής, όπως οι θερμικές μονάδες και οι μονάδες αποθήκευσης, αναφέρονται και οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν σε συνθήκες σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιες μονάδες θα πρέπει να παραμείνουν συγχρονισμένες, σε σφάλματα κοντά στην γεννήτρια, κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή μονάδας, κατά το 95% της ονομαστικής (διατηρούμενη τάση $V_{βρ} = 0.05 V_{ον}$) για διάρκεια 0.2 s και για βυθίσεων τάσης της τάξεως του 50% της ονομαστικής (διατηρούμενη τάση $V_{βρ} = 0.5 V_{ον}$) για διάρκεια 0.7 s. Όσον αφορά στην καμπύλη του ποσοστού της διατηρούμενης τάσης προς την ονομαστική συναρτήσει της διάρκειας συγχρονισμένης λειτουργίας, για τιμές ποσοστού συγκράτησης μεταξύ 100% και 50% είναι μια ευθεία γραμμή για τιμές διάρκειας συγχρονισμένης λειτουργίας μεταξύ 1.5 και 0.7 s.

3.1.2 Απαιτήσεις Διαχειριστών δικτύων ως προς τις βοηθητικές υπηρεσίες των ΑΠΕ

Στα παραδοσιακά ΣΗΕ, οι μονάδες παραγωγής ισχύος είναι κυρίως σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες έχουν συγκεκριμένη συμπεριφορά και έλεγχο σε διάφορες αστάθειες και μεταβατικές καταστάσεις του δικτύου. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, τις τελευταίες δεκαετίες συνδέονται στο δίκτυο όλο και περισσότερες πηγές ΑΠΕ διαφορετικών τεχνολογιών, οι οποίες διαφέρουν ριζικά από τις συμβατικές. Πιο συγκεκριμένα, η ειδοποιός διαφορά είναι ότι οι μονάδες ΑΠΕ είναι μη ελεγχόμενες και συνδέονται στο δίκτυο κυρίως μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος των οποίων η συμπεριφορά σε διαταραχές είναι διαφορετική από αυτή των σύγχρονων μηχανών.

Τα πρώτα χρόνια που ενσωματώνονταν Α/Π και Φ/Β σταθμοί, στους κώδικες δικτύων δεν συμπεριλαμβανόταν κανένας κανονισμός ως προς τις βοηθητικές λειτουργίες που θα πρέπει να παρέχουν, καθώς το ποσοστό διείσδυσης τους ήταν εξαιρετικά μικρό συγκριτικά με αυτό των συμβατικών. Με την αύξηση του ποσοστού διείσδυσης μη ελεγχόμενων μονάδων ΑΠΕ, προκύπτουν προβλήματα ευστάθειας στα ΣΗΕ. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, όπως περιγράφεται στην αναφορά [27], είναι η διαταραχή του δικτύου που συνέβη στις 4 Νοεμβρίου 2006 στην Ευρώπη, η οποία προκάλεσε την διακοπή ρεύματος σε 15 εκατομμύρια καταναλωτές και αποσυνδέθηκαν 4892 MW αιολικής παραγωγής μόνο στην δυτική Ευρώπη.

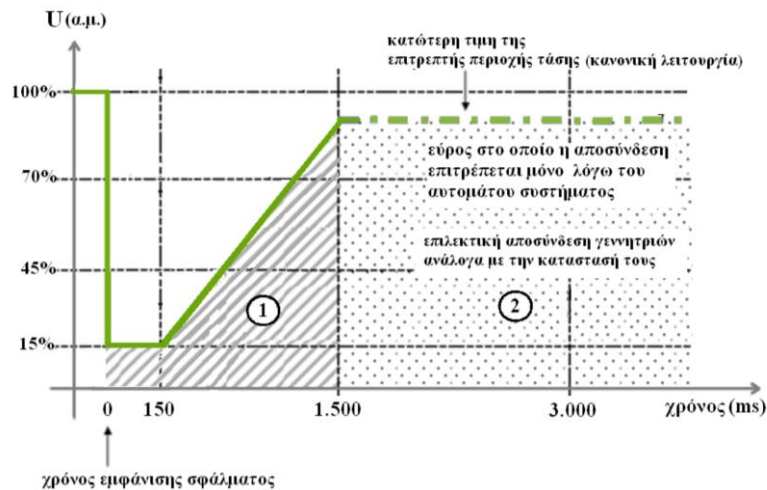
Η αποσύνδεση των Α/Π σε διαταραχές της τάσης του δικτύου είναι μη αποδεκτές, δεδομένου ότι αυτές οι μονάδες αποτελούν ένα σημαντικό μερίδιο της παραγωγής. Για το λόγο αυτό, οι σύγχρονοι κώδικες δικτύων απαιτούν από τους παραγωγούς ΑΠΕ όχι μόνο την αδιάλειπτη λειτουργία των μονάδων σε τυχόν διαταραχές, αλλά και την συνεισφορά τους στην ευστάθεια του ΣΗΕ με την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών, όπως συμβαίνει και με τις συμβατικές μονάδες.

Με μια ανασκόπηση στους διεθνείς κώδικες δικτύου, οι απαιτήσεις των διαχειριστών μπορούν καταχτούν σε 5 κατηγορίες [28]:

1. Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας (Fault Ride Through).
2. Έγχυση – απορρόφηση άεργου ρεύματος κατά την διάρκεια σφάλματος (Reactive power support).
3. Εκτεταμένο εύρος διακύμανσης τάσης και συχνότητας (extended variation range for voltage, frequency).
4. Ρύθμιση ενεργού, άεργου ισχύος και συχνότητας (active power control or frequency support).
5. Ρύθμιση άεργου ισχύος και τάσης (Reactive power control or voltage).

3.1.2.1 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας (Fault Ride Through)

Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μια συνιστώσα του ΣΗΕ, προκύπτει βύθιση τάσης, μέχρι οι μηχανισμοί προστασίας να ανιχνεύσουν το σφάλμα και να το απομονώσουν από το υγιές τμήμα. Κατά το διάστημα αυτό, παρουσιάζεται επίσης βύθιση τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) των ΑΠΕ με συνέπεια την πιθανή αποσύνδεση τους. Προκειμένου οι διαχειριστές των δικτύων να αποτρέψουν τέτοιες ανεπιθύμητες αποσυνδέσεις, έχουν υιοθετήσει χαρακτηριστικές τάσης – χρόνου, οι οποίες αναφέρονται συχνά και ως Low Voltage Ride Through (LVRT ή FRT).

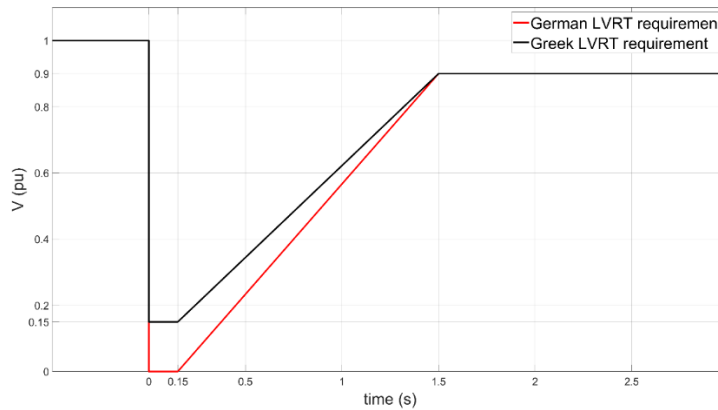


Σχήμα 3.1: Καμπύλη Fault Ride Through στα ΜΔΝ της Ελλάδας [13].

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το παρακάτω, όπου ο διαχειριστής του δικτύου των ΜΔΝ της Ελλάδος [13] όρισε την καμπύλη του Σχήματος 3.1 για τις Α/Γ που συνδέονται σε τέτοια συστήματα. Σύμφωνα με αυτή, οι συμμετρικές και ασύμμετρες βυθίσεις τάσης λόγω σφαλμάτων ή διαταραχών του συστήματος, δεν πρέπει να οδηγούν σε αστάθεια η αποσύνδεση του Α/Π από το σύστημα, όταν η τάση θετικής ακολουθίας στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ)

παίρνει τιμές στην περιοχή πάνω από τη πράσινη (συνεχής) γραμμή του διαγράμματος. Ωστόσο, επιτρέπεται η σύντομη αποσύνδεση τους σε κάθε περίπτωση για τάση που αντιστοιχεί σε σημεία της περιοχής 1 και 2 του Σχήματος 3.1.

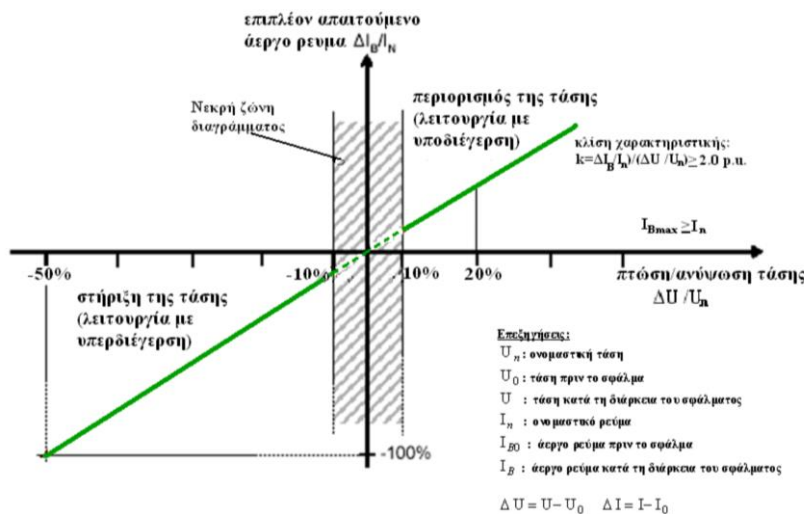
Πλέον, διάφοροι διαχειριστές δικτύων διεθνώς έχουν επιβάλει περιορισμούς για τον χρόνο λειτουργίας των Α/Π ή άλλων ΜΔΠ σε συνθήκες υπό χαμηλή τάση (FRT). Αν και η γενική μορφή των καμπυλών είναι σχετικά παρόμοια, οι χαρακτηριστικές τιμές τους αλλάζουν από διαχειριστή σε διαχειριστή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι διαφορές που παρουσιάζουν οι απαιτήσεις του Ελληνικού με του Γερμανικού Κώδικα. Ο μεν Ελληνικός Κώδικας, σε σφάλμα με διατηρούμενη τιμή τάσης 0.15 αμ, απαιτεί την παραμονή των Α/Π στο σύστημα για 0.15 s. Ο δε Γερμανικός, σε διατηρούμενη τάση μηδενικής τιμής απαιτεί την παραμονή τους για 0.15 s [28]. Οι καμπύλες παρουσιάζονται αμφότερες στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικές FRT Γερμανικού και Ελληνικού Κώδικα.

3.1.2.2 Έγχυση – Απορρόφηση ενεργού και άεργου ισχύος σε διαταραχές

Σε συνέχεια του προηγούμενου, τα Α/Π που δεν αποσυνδέονται από το σύστημα, πρέπει να υποστηρίζουν την τάση του συστήματος κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών της τάσης με έγχυση ή απορρόφηση άεργου ρεύματος. Πιο αναλυτικά, ο κώδικας ΜΔΝ της Ελλάδας [26] απαιτεί την έγχυση ή την απορρόφηση άεργου ρεύματος σύμφωνα με την χαρακτηριστική που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστική έγχυση – απορρόφηση άεργου ισχύος για μονάδες Α/Γ [26].

Ο έλεγχος του άεργου ρεύματος πρέπει να ενεργοποιηθεί σε περίπτωση βύθισης ή ανύψωσης της τάσης άνω του 10% της ονομαστικής τάσης της γεννήτριας. Μετά την αναγνώριση του σφάλματος (πτώση τάσης), η πηγή πρέπει να παρέχει άεργο ρεύμα στην πλευρά χαμηλής του Μ/Σ της πηγής που ανέρχεται τουλάχιστον σε 2% της ονομαστικής έντασης ρεύματος για κάθε 1% μεταβολή της τάσης στους ακροδέκτες της μονάδας.

3.2 Πιθανές στρατηγικές υποστήριξης της τάσης του δικτύου

Η αύξηση του ποσοστού ένταξης μονάδων ΑΠΕ, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, επέφερε την θέσπιση νέων κανονισμών από τους διαχειριστές των δικτύων. Δύο τέτοιες απαιτήσεις, οι οποίες αναφέρονται στις περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων, είναι η Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας (FRT) και η υποστήριξη του δικτύου σε σφάλματα με έγχυση/απορρόφηση άεργου ισχύος. Ωστόσο, στους περισσότερους κώδικες δικτύου, αυτές οι απαιτήσεις αναφέρονται σε συμμετρικά σφάλματα, και στην έγχυση άεργου ισχύος στις τρεις φάσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις σφαλμάτων δικτύου όμως, τα σφάλματα που κυριαρχούν είναι κυρίως ασύμμετρα, και έχουν ως συνέπεια την ασύμμετρη βύθιση της τάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν ρεύματα και τάσεις αρνητικής ακολουθίας στο δίκτυο.

Συνεπώς, οι επόμενης γενιάς κώδικες δικτύου πρέπει να εφαρμόσουν ελέγχους έγχυσης ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, για να μειωθεί η τάση αρνητικής ακολουθίας και να διατηρηθεί η τάση των φάσεων σε ικανοποιητικά επίπεδα. Διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, όπως προκύπτουν από την ανασκόπηση στην εργασία [29]. Σε αυτές τις στρατηγικές, η αναφορά ενεργού και άεργου ρεύματος έγχυσης στο δίκτυο σε συνθήκες σφάλματος υπολογίζεται σύμφωνα με:

- Την τάση του δικτύου στο ΣΚΣ,
- Το είδος του σφάλματος,
- Τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου,
- Την ενεργό ισχύ που παράγει η μονάδα την στιγμή πριν το σφάλμα.

Πίνακας 3.1: Πιθανές στρατηγικές ελέγχου στήριξης της τάσης σε βραχυκυκλώματα.

Στρατηγική ελέγχου	Χαρακτηριστικά
<p>Αποσύνδεση Α/Π</p> <p>$P = 0, Q = 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Αποτρέπει την λειτουργία νησιδοποίησης • Δεν παρέχει υποστήριξη της τάσης του δικτύου
<p>Έγχυση θετικής ακολουθίας ενεργού ισχύος</p> <p>$Q = 0, P^+ = 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για συστήματα στα οποία τα φορτία και οι γραμμές έχουν περισσότερο ωμικό χαρακτήρα
<p>Έγχυση θετικής ακολουθίας άεργου ισχύος</p> <p>$P = 0, Q^- = 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για συστήματα στα οποία τα φορτία και οι γραμμές έχουν περισσότερο επαγωγικό χαρακτήρα
<p>Έγχυση θετικής/αρνητικής ακολουθίας ενεργού ισχύος</p> <p>$Q = 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Η έγχυση θετικής/αρνητικής ακολουθίας ενεργού ισχύος υπολογίζεται σύμφωνα με την ασυμμετρία της τάσης του δικτύου
<p>Έγχυση θετικής/αρνητικής ακολουθίας άεργου ισχύος</p> <p>$P = 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Η έγχυση θετικής/αρνητικής ακολουθίας άεργου ισχύος υπολογίζεται σύμφωνα με την ασυμμετρία της τάσης του δικτύου • Μπορεί να μειώσει την τάση αρνητικής ακολουθίας στο δίκτυο
<p>Έγχυση θετικής/αρνητικής ακολουθίας ενεργού/άεργου ισχύος</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Πρέπει να καθοριστεί ο έλεγχος για την στήριξη της τάσης • Μπορεί να προσαρμοστεί στα χαρακτηριστικά του δικτύου σύμφωνα με την σύνθετη αντίσταση των γραμμών

3.3 Πρόσθετες πληροφορίες

3.3.1 Συμμετρικές συνιστώσες (symmetrical components)

Τα τριφασικά δίκτυα, καθώς και οι συμμετρικές καταστάσεις αυτών, με συμμετρικές πηγές τάσεων, μπορούν να παρασταθούν και να αναλυθούν με ισοδύναμα μονοφασικά κυκλώματα. Για να είναι δυνατή η εφαρμογή αυτής της απλοποίησης είναι απαραίτητη η συμμετρία του τριφασικού συστήματος. Συμμετρικό θεωρείται ένα σύστημα όταν πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Διαγώνια συμμετρία (ίσες σύνθετες αντιστάσεις φάσεων),
- Κυκλική συμμετρία (απουσία ή ίση τιμή ζεύξεων μεταξύ φάσεων),
- Συμμετρικό σύστημα τάσεων (συμμετρική πηγή).

Στην πράξη, τα πραγματικά ΣΗΕ δεν είναι απολύτως συμμετρικά. Κάποιοι από τους λόγους που συμβαίνει αυτό είναι τα ασύμμετρα σφάλματα, οι ζεύξεις στις γραμμές μεταφοράς ή διανομής και τα ασύμμετρα φορτία (μονοφασικοί καταναλωτές).

Για το λόγο αυτό, το τριφασικό σύστημα μετασχηματίζεται σε μια ισοδύναμη ομάδα τριών μονοφασικών συστημάτων με την βοήθεια του μετασχηματισμού των συμμετρικών συνιστωσών. Αυτό αποτελείται από τρία κυκλώματα:

- Το ευθύ ή κύκλωμα θετικής ακολουθίας (1 ή +)
- Το αντίστροφο ή κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας (2 ή -),
- Το ομοπολικό ή κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας (0).

Για να εφαρμοστεί ωστόσο αυτός ο μετασχηματισμός, προϋποθέτει το τριφασικό σύστημα να είναι συμμετρικό, δηλαδή να παρουσιάζει τουλάχιστον διαγώνια συμμετρία για να είναι τα τρία μονοφασικά κυκλώματα ακολουθίας ανεξάρτητα και με συζευγμένα. Αυτός ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται σύμφωνα με την σχέση (3.1), ο αντίστροφος με την σχέση (3.2) και παρουσιάζεται αναλυτικά στην αναφορά [30].

$$\begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

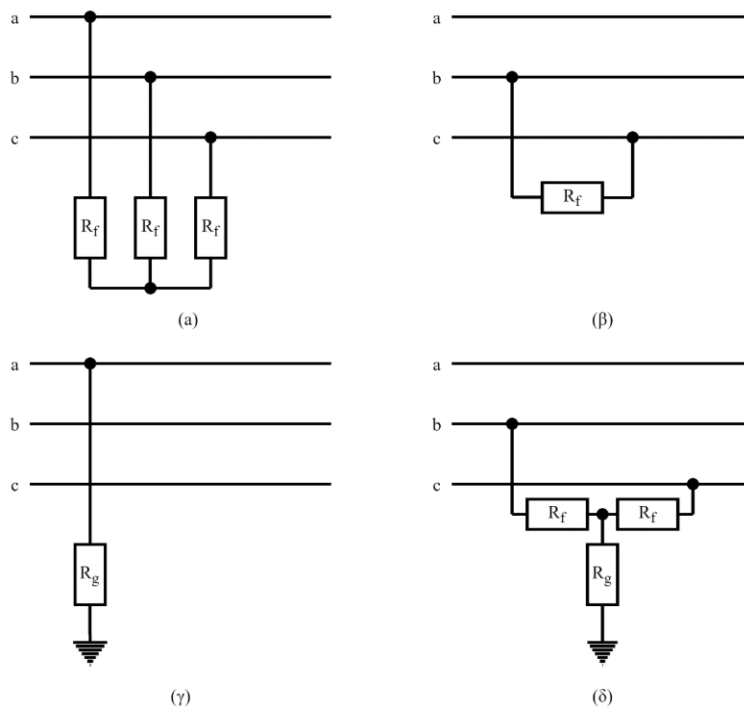
$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Όπου, $\alpha = 1 \angle 120^\circ$

3.3.2 Συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα

Ασύμμετρα χαρακτηρίζονται τα σφάλματα, κατά τη διάρκεια των οποίων δεν υφίσταται συμμετρία φασικών τάσεων και ρευμάτων. Όλα τα σφάλματα πλην του τριφασικού θεωρούνται ασύμμετρα. Στο Σχήμα 3.4, φαίνεται το τριφασικό κύκλωμα στα συνηθέστερα βραχυκυκλώματα, λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσεων (R_f) ή την αντίσταση σφάλματος μεταξύ φάσης και γης (R_g). Με την εφαρμογή της μεθόδου συμμετρικών συνιστωσών, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν τα ισοδύναμα κυκλώματα

ακολουθίας, η κατάλληλη σύνδεση των τριών αυτών κυκλωμάτων ανάλογα των χαρακτηριστικών του σφάλματος, ο υπολογισμός των ρευμάτων και τάσεων ακολουθίας και τέλος με την εφαρμογή του αντιστρόφου μετασχηματισμού να προσδιοριστούν τα φασικά ρεύματα.



Σχήμα 3.4: Διάφοροι τύποι και αντιστάσεις σφάλματος

3.3.3 Μετασχηματισμός dq0 (Park)

Ο μετασχηματισμός dq0, γνωστός και ως μετασχηματισμός park, αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των ΜΕΔ και των μαγνητικών ροών στάτη και δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον μετασχηματισμό των μεγθών του στάτη, από το σύστημα των τριών φάσεων abc, σε ένα σύστημα που περιστρέφεται με τη ταχύτητα του δρομέα. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τους δύο άξονες, τον ευθύ (direct-axis), ο οποίος βρίσκεται στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα, τον κάθετο σε αυτόν εγκάρσιο άξονα (quadrature-axis) και το θ , το οποίο αποτελεί την ομοπολική συνιστώσα. Με αυτόν τον τρόπο, στη μόνιμη κατάσταση οι τιμές του στάτη αποκτούν πλέον σταθερή τιμή.

Σχεδόν όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη που συναντώνται στα ΣΗΕ είναι τριφασικά και χρονικά μεταβαλλόμενα. Το γεγονός αυτό κάνει δύσκολη τη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου, μιας και μεγάλο μέρος της θεωρίας ελέγχου αναφέρεται σε χρονικά αμετάβλητα συστήματα. Έτσι, ο μετασχηματισμός Park είναι ιδιαίτερα χρήσιμος μιας και αφενός μεν μετασχηματίζει το τριφασικό σύστημα σε ‘διφασικό’ και αφετέρου δε, επιλέγοντας κατάλληλο σύστημα αξόνων αναφοράς, είναι δυνατόν να μετασχηματιστούν όλα τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη σε χρονικά αμετάβλητα (DC). Συνήθως, ο έλεγχος των ηλεκτρονικών ισχύος γίνεται σε αυτό το επίπεδο αναφοράς [30].

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας σύμφωνα με τον οποίο γίνεται ο μετασχηματισμός abc – dq0 και ο αντίστροφος.

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_{me} & \cos(\theta_{me} - 120) & \cos(\theta_{me} + 120) \\ -\sin \theta_{me} & -\sin(\theta_{me} - 120) & -\sin(\theta_{me} + 120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{me} & -\sin \theta_{me} & 1 \\ \cos(\theta_{me} - 120) & -\sin(\theta_{me} - 120) & 1 \\ \cos(\theta_{me} + 120) & -\sin(\theta_{me} + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.3.4 Μετασχηματισμός $\alpha - \beta$ (Clarke)

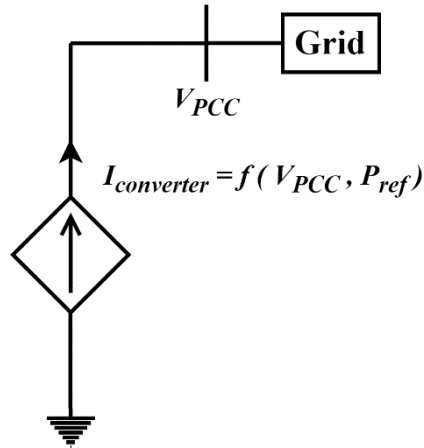
Ο μετασχηματισμός $\alpha - \beta$, γνωστός και ως μετασχηματισμός Clarke, είναι μια αντίστοιχη μορφή μετασχηματισμού με τον dq0, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση τριφασικών κυκλωμάτων. Ο αρχικός μετασχηματισμός περιλαμβάνει και μια τρίτη συνιστώσα (γ), η οποία, όπως και η συνιστώσα (0) του μετασχηματισμού dq0, είναι μηδέν σε συμμετρικά συστήματα και για λόγους ευκολίας παραλείπεται. Ο μετασχηματισμός αυτός, όπως και ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών, μετατρέπουν μεταβλητές από ένα στάσιμο πλαίσιο αναφοράς σε ένα άλλο στάσιμο επίσης πλαίσιο αναφοράς. Ο μετασχηματισμός Clarke ορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις [30]:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.4 Προτεινόμενα μοντέλα μετατροπέα για μελέτες προστασίας

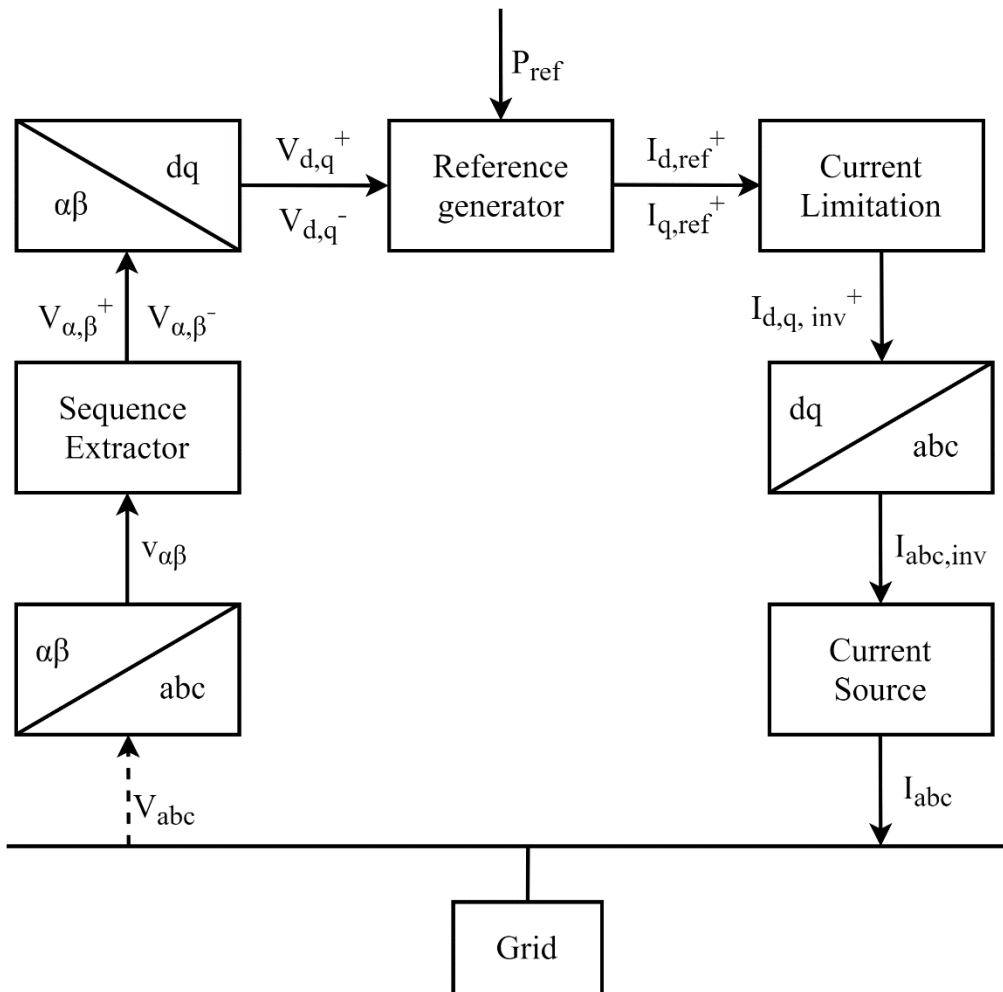
Αν το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα DC – AC μιας μονάδας ΑΠΕ, ακολουθεί το σήμα αναφοράς του, είναι ισοδύναμο με ένα μοντέλο πηγής ρεύματος το οποίο περιλαμβάνει τον έλεγχο για στρατηγική FRT και υποστήριξη της τάσης του δικτύου με έγχυση ή απορρόφηση ρεύματος. Δηλαδή, ένας μετατροπέας ισχύος προς την πλευρά του δικτύου μιας μονάδας ΑΠΕ είναι ισοδύναμος με μία πηγή ρεύματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Πιο αναλυτικά, η αναφορά του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα σε συνθήκες σφάλματος είναι συνάρτηση της τάσης του δικτύου στο ΣΚΣ, του είδους του σφάλματος, της σύνθετης αντίδρασης του δικτύου και της παραγόμενης ισχύος της συνδεδεμένης μονάδας την στιγμή πριν το σφάλμα.



Σχήμα 3.5: Ισοδύναμο μοντέλο μετατροπέα μονάδων ΑΠΕ για μελέτες βραχυκυκλωμάτων.

3.4.1 Μαθηματικό μοντέλο μονάδων ΑΠΕ για μελέτες προστασίας

Το προτεινόμενο μοντέλο για τον έλεγχο του μετατροπέα ισχύος (converter) μιας μονάδας ΑΠΕ που παρέχει ρεύμα θετικής ακολουθίας, όπως σχεδιάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ελέγχου τριφασικού μετατροπέα σε κατάσταση σφάλματος.

Κάνοντας χρήση του θεωρήματος συμμετρικών συνιστωσών, οι ασύμμετρες βυθίσεις της τάσης μπορούν να αποτυπωθούν σε τρεις συμμετρικές συνιστώσες: Θετικής, αρνητικής και μηδενικής, σύμφωνα με τα ακόλουθα.

$$i = i^+ + i^- + i^0 \quad (3.7)$$

$$v = v^+ + v^- + v^0 \quad (3.8)$$

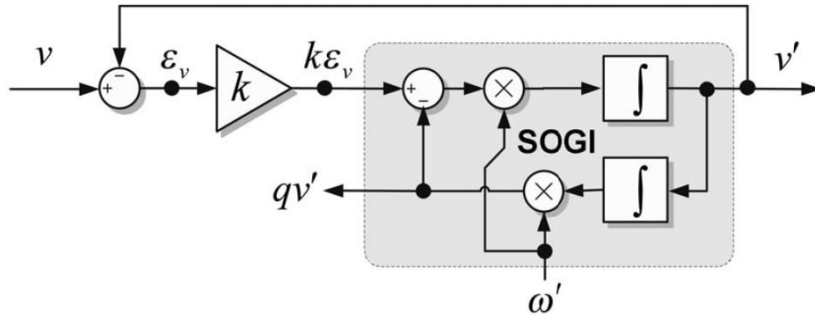
Αρχικά η τάση στο ΣΚΣ είναι η είσοδος του συστήματος. Στο πρώτο στάδιο μετατρέπεται η τάση των τριών φάσεων στο σύστημα αβ (Clarke).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Για τον εντοπισμό της θετικής και αρνητικής ακολουθίας των τάσεων του δικτύου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη (DSOGI – PLL) που περιγράφεται στην εργασία [31]. Η δομή αυτής της διάταξης φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 3.7, ενώ οι συναρτήσεις μεταφοράς δίνονται από τους ακόλουθους τύπους.

$$D(s) = \frac{u'}{u}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.10)$$

$$Q(s) = \frac{qu'}{u}(s) = \frac{k\omega'}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.11)$$



Σχήμα 3.7: Σχηματικό διάγραμμα της δομής SOGI [31].

$$SOGI(s) = \frac{u'}{k\epsilon_u}(s) = \frac{\omega's}{s^2 + \omega'^2} \quad (3.12)$$

Όπου,

k: ο συντελεστής απόσβεσης του φίλτρου,

ω': η συχνότητα συντονισμού,

Μια βέλτιστη εφαρμογή της δομής SOGI – PLL στο πεδίο αβ, για τον συγχρονισμό σε τριφασικό δίκτυο, είναι η διάταξη που είναι γνωστή και ως DSOGI – PLL που αποτυπώνεται

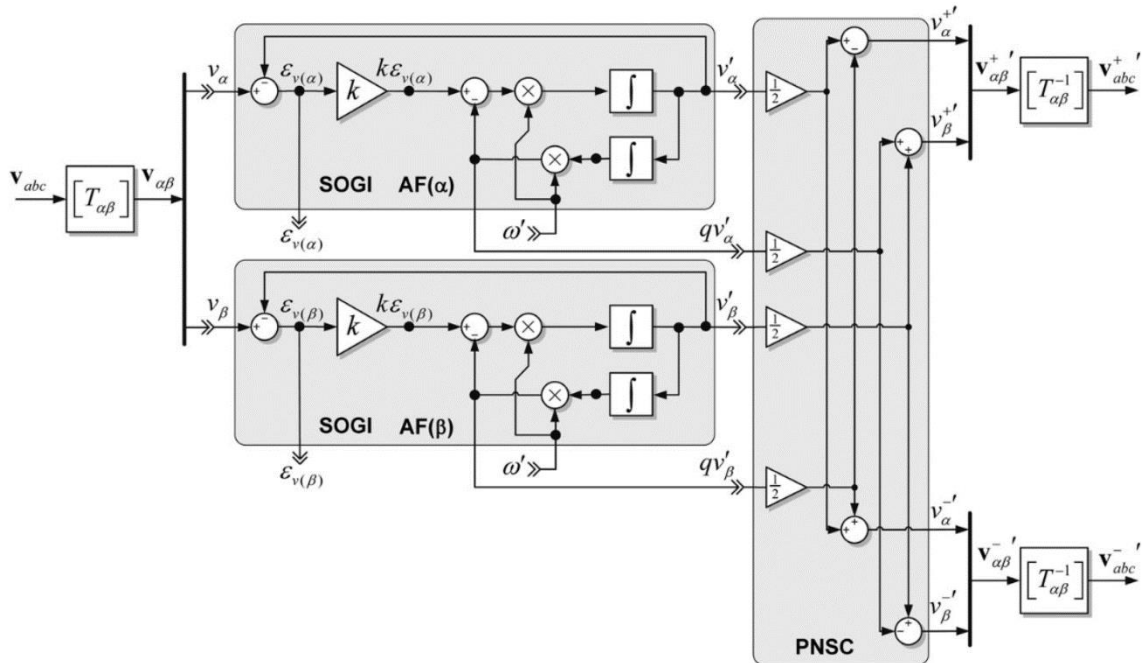
στο Σχήμα 3.8. Σε αυτή τη δομή, μόνο δύο διατάξεις SOGI είναι απαραίτητες για να υπολογιστούν οι συμμετρικές συνιστώσες των α και β και μάλιστα, είναι τοποθετημένες παράλληλα για να παρέχουν το σήμα εισόδου στην δομή ελέγχου θετικής αρνητικής ακολουθίας (Positive Negative Sequence Control – PNSC) η οποία εφαρμόζει τον μετασχηματισμό της σχέσης (3.13).

$$V_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta}$$

$$V_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta}$$
(3.13)

Όπου,

$q = e^{-j(\pi/2)}$, είναι μια καθυστέρηση φάσης 90° .



Σχήμα 3.8: σχηματική αναπαράσταση της δομής DSOGI – PLL [31].

Επομένως οι τάσεις $\alpha\beta$ μπορούν να γραφούν ως:

$$v_{\alpha} = V_{\alpha}^+ + V_{\alpha}^- \quad (3.14)$$

$$v_{\beta} = V_{\beta}^+ + V_{\beta}^- \quad (3.15)$$

Όπου V_{α}^+ και V_{β}^+ είναι η θετική ακολουθία των τάσεων $\alpha\beta$ συστήματος και V_{α}^- και V_{β}^- οι αρνητική ακολουθία αντίστοιχα. Αυτές οι τάσεις μπορούν να γραφούν και ως συνάρτηση του χρόνου ως εξής:

$$V_{\alpha}^{+} = V^{+} \cos(\omega t + \varphi^{+}) \quad (3.16)$$

$$V_{\beta}^{+} = V^{+} \sin(\omega t + \varphi^{+}) \quad (3.17)$$

$$V_{\alpha}^{-} = V^{-} \cos(\omega t - \varphi^{-}) \quad (3.18)$$

$$V_{\beta}^{-} = V^{-} \sin(\omega t - \varphi^{-}) \quad (3.19)$$

Όπου V^{+} και V^{-} είναι τα πλάτη της θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα, ω είναι η γωνιακή συχνότητα του δικτύου και φ^{+} και φ^{-} οι φάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Τα πλάτη V^{+} και V^{-} εξάγονται από το διαθέσιμο ημιτόνιο σήμα, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V^{+} = \sqrt{(v_{\alpha}^{+})^2 + (v_{\beta}^{+})^2} \alpha\mu \quad (3.20)$$

$$V^{-} = \sqrt{(v_{\alpha}^{-})^2 + (v_{\beta}^{-})^2} \alpha\mu \quad (3.21)$$

Η στρατηγική υποστήριξης της τάσης που θα αναπτυχθεί στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, είναι η έγχυση ενεργού και άεργου ρεύματος θετικής ακολουθίας με υψηλότερη προτεραιότητα στο ρεύμα ενεργού ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, το ρεύμα του μετατροπέα (inverter) θα έχει τέτοια τιμή, ώστε να προσπαθήσει να διατηρήσει τα επίπεδα ενεργού ισχύος στην προ σφάλματος κατάσταση και άεργο ρεύμα σύμφωνα με την καμπύλη ρεύματος – πτώσης τάσης που απαιτούν οι κώδικες δικτύων στο Σχήμα 3.3. Σύμφωνα με αυτά, κατά τη διάρκεια σφάλματος το ρεύμα αναφοράς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_{d,ref}^{+} = \frac{P_{ref}}{V_{\Sigma K \Sigma}^{+}} \quad (3.22)$$

$$I_{q,ref}^{+} = k_q \frac{\Delta V_{\Sigma K \Sigma}^{+}}{V_{nom}} \quad (3.23)$$

$$\Delta V_{\Sigma K \Sigma}^{+} = V_{\Sigma K \Sigma}^{+} - V_{\Sigma K \Sigma, \pi ρ ι ν}^{+} \quad (3.24)$$

Όπου, P_{ref} είναι η ισχύς του μετατροπέα πριν το σφάλμα την οποία προσπαθεί να διατηρήσει και κατά τη διάρκεια του σφάλματος, $V_{\Sigma K \Sigma, \pi ρ ι ν}^{+}$ και $V_{\Sigma K \Sigma}^{+}$ η τάση του δικτύου στο ΣΚΣ πριν και κατά τη διάρκεια του σφάλματος αντίστοιχα και k_q ο συντελεστής άεργου ρεύματος, ο οποίος ως εΐθιστα στους περισσότερους κώδικες δικτύων διεθνώς, ΐτσι και σε αυτή την περίπτωση ΐναι $k_q = 2$.

Οι μετατροπΐς με ηλεκτρονικά ισχύος ΐναι διατάξεις, οι οποίες για λόγους ασφαλείας δεν μπορούν να υπερβούν τα τεχνικά τους ΐγιστα. Για το λόγο αυτό, πΐρπει να ΐπάρχει ΐλεγχος που να περιορίζει το ρεύμα αναφοράς τόσο ΐστε να μην ξεπεράσουν οι ηλεκτρονικοί διακόπτες τα ονομαστικά τους ΐρια, αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την καταστροφή του μετατροπέα. Επομένως, ο περιορισμός του ρεύματος (Current Limitation) του μετατροπέα βασΐζονται στις παρακάτω σχέσεις.

$$I_{d,inv}^+ = \min \left(\frac{P_{ref}}{\Delta V_{\Sigma K \Sigma}^+}, I_{max} \right) \quad (3.25)$$

$$I_{q,inv}^+ = \max \left(2\Delta V_{\Sigma K \Sigma}^+, -\sqrt{I_{max}^2 - i_{dref}^2} \right) \quad (3.26)$$

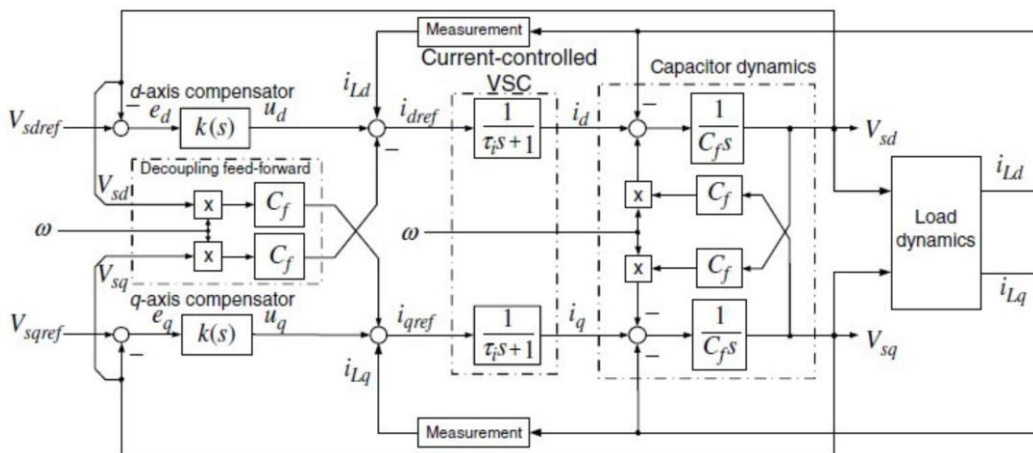
Όπου I_{max} το όριο μέγιστου ρεύματος εξόδου του μετατροπέα. Στην συγκεκριμένη σχέση, δίνεται προτεραιότητα στην συνιστώσα της ενεργού ισχύος μιας και οι γραμμές διανομής του υπό εξέταση ΜΔΝ (στο Κεφάλαιο 5) είναι Μ.Τ και έχουν μεγαλύτερο ωμικό από επαγωγικό μέρος.

3.5 Μοντέλο μονάδας αποθήκευσης μπαταριών για μελέτες προστασίας

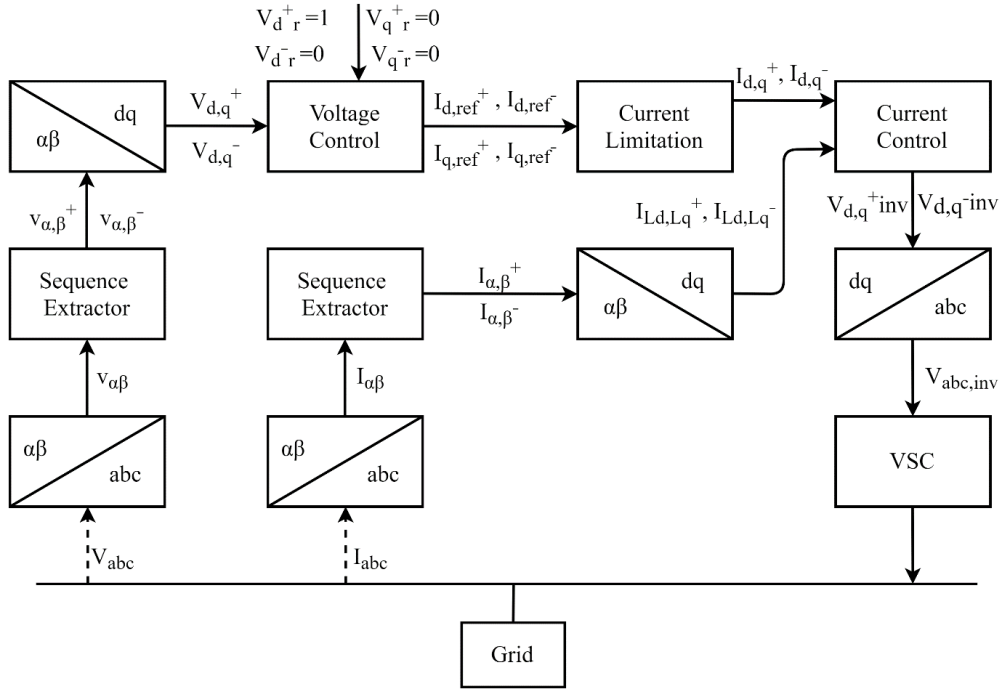
Οι μονάδες αποθήκευσης, αποτελούν λύση στο πρόβλημα της αύξησης του ποσοστού διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς μπορούν να αντισταθμίζουν την στοχαστικότητα των τους (π.χ. του ανέμου στα Α/Π) και να συμβάλουν στην ποιότητα ισχύος. Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα σύστημα προστασίας για ένα ΜΔΝ που η κύρια παραγωγή μπορεί να καλυφθεί χωρίς την συμμετοχή θερμικών μονάδων, πρέπει να μελετηθεί η συμβολή των μονάδων αποθήκευσης στο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι θερμικοί σταθμοί είναι οι ελεγχόμενες πηγές σε ένα ΣΗΕ καθώς αυτοί συμβάλουν στην ευστάθεια των δικτύων, ρυθμίζοντας κατά κύριο λόγο την συχνότητα του δικτύου. Ως εκ τούτου, εφόσον η μονάδα αποθήκευσης ενδέχεται να λειτουργεί σε δίκτυα που απουσιάζουν οι θερμικοί σταθμοί, πρέπει να συμβάλει στην ευστάθεια του συστήματος, δηλαδή στον έλεγχο τάσης και συχνότητας.

Σε σύστημα ελεγχόμενης συχνότητας, υλοποιείται ο αλγόριθμος ελέγχου σχηματισμού τάσης (Voltage Grid Forming Control) σε αντιστροφέα ελεγχόμενης τάσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το σύστημα του Σχήματος 3.9. Συγκεκριμένα, το σχηματικό διάγραμμα του ελέγχου που σχεδιάστηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.9: Σχηματικό διάγραμμα τυπικού συστήματος αντιστροφέα ελεγχόμενης συχνότητας.



Σχήμα 3.10: Λογική ελέγχου αντιστροφέα σε σύστημα ελεγχόμενης συχνότητας.

Αρχικά, ο μετασχηματισμός αβ και ο υπολογισμός των συμμετρικών συνιστωσών της τάσης πραγματοποιείται με την διάταξη DSOGI – PLL και PNSC που εξετάστηκε ενδελεχώς στο προηγούμενο εδάφιο 3.4.1.

Σύμφωνα με το απλοποιημένο Σχήμα 3.9 που απουσιάζουν οι συμμετρικές συνιστώσες, κατά τον έλεγχο τάσης, συγκρίνοντας τα V_{sd}, V_{sq} με τα V_{dref}, V_{qref} , προκύπτουν τα σφάλματα e_d, e_q τα οποία τροφοδοτούν τον ελεγκτή $k(s)$ ώστε να παραχθούν τα u_d, u_q . Ύστερα, προσθέτοντας τα απαραίτητα σήματα, προκύπτουν τα I_{dref}, I_{qref} τα οποία τροφοδοτούνται με τις κατάλληλες μετρήσεις στον έλεγχο. Όμως, σε αυτήν την εργασία όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10 ο έλεγχος της τάσης θα πραγματοποιηθεί για τις συμμετρικές συνιστώσες της. Συγκρίνοντας τα $V_d^+, V_d^-, V_q^+, V_q^-$ με τις τάσεις αναφοράς που είναι $V_d^+ = 1, V_d^- = 0, V_q^+ = 0, V_q^- = 0$, προκύπτουν τα αντίστοιχα σφάλματα που τροφοδοτούν τον ελεγκτή $k(s)$ ώστε να παραχθούν τα $u_d^+, u_q^+, u_d^-, u_q^-$. Ύστερα, προσθέτοντας τα απαραίτητα σήματα προκύπτουν οι αναφορές ρεύματος, όπως φαίνεται στην σχέση (3.27). Λεπτομέρειες για τον σχεδιασμό του ελεγκτή αποτυπώνονται στην εργασία [32].

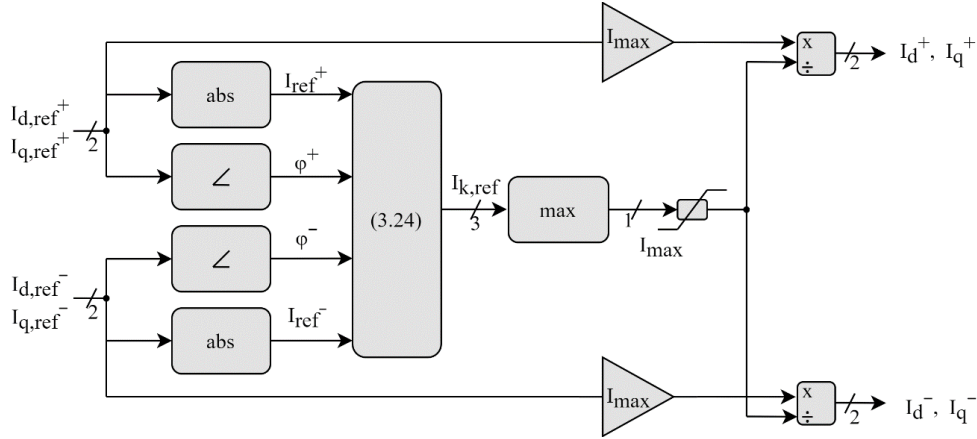
$$\begin{aligned}
 I_{d,ref}^+(t) &= u_d^+ - C_f(\omega V_q^+) + I_{Ld}^+ \\
 I_{q,ref}^+(t) &= u_q^+ - C_f(\omega V_d^+) + I_{Lq}^+ \\
 I_{d,ref}^-(t) &= u_d^- - C_f(\omega V_q^+) + I_{Ld}^- \\
 I_{q,ref}^-(t) &= u_q^- - C_f(\omega V_d^-) + I_{Lq}^-
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

Όπου,

$V_d^+, V_q^+, V_d^-, V_q^-$: Οι έξοδοι του συστήματος.

$I_{Ld}^+, I_{Lq}^+, I_{Ld}^-, I_{Lq}^-$: Οι διαταραχές του συστήματος.

Η στήριξη της τάσης του δικτύου σε βραχυκυκλώματα απαιτεί έγχυση άεργου ρεύματος. Συνεπώς, το ρεύμα αναφοράς της σχέσης (3.27) μπορεί να υπερβεί το ονομαστικό ρεύμα του μετατροπέα ισχύος με αποτέλεσμα την μη ασφαλή λειτουργία του. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο, εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου μέγιστου ρεύματος (Current Limitation) όπως παρουσιάζεται στην εργασία [33]. Στο Σχήμα 3.11, φαίνεται η λογική του περιορισμού. Οι συνιστώσες ακολουθίας που αποτελούν τις αναφορές του ρεύματος είναι οι $I_{d,ref}^+, I_{q,ref}^+, I_{d,ref}^-$ και $I_{q,ref}^-$ και περιορίζονται από τον παράγοντα $\max I_{k,ref}$ όταν αυτό είναι μεγαλύτερο του I_{max} . Το μέγεθος $I_{k,ref}$ υπολογίζεται απευθείας από τις τιμές των συμμετρικών συνιστωσών (μέτρο και γωνία) όπως αποτυπώνεται στην σχέση (3.28).



Σχήμα 3.11: Λογική περιορισμού ρεύματος.

$$\begin{cases} I_a^{ref} = \sqrt{I_{ref}^{+2} + I_{ref}^{-2} + 2I_{ref}^+ I_{ref}^- \cos \varepsilon} \\ I_b^{ref} = \sqrt{I_{ref}^{+2} + I_{ref}^{-2} + 2I_{ref}^+ I_{ref}^- \cos \left(\varepsilon + \frac{4\pi}{3} \right)} \\ I_c^{ref} = \sqrt{I_{ref}^{+2} + I_{ref}^{-2} + 2I_{ref}^+ I_{ref}^- \cos \left(\varepsilon - \frac{4\pi}{3} \right)} \end{cases} \quad (3.28)$$

Όπου,

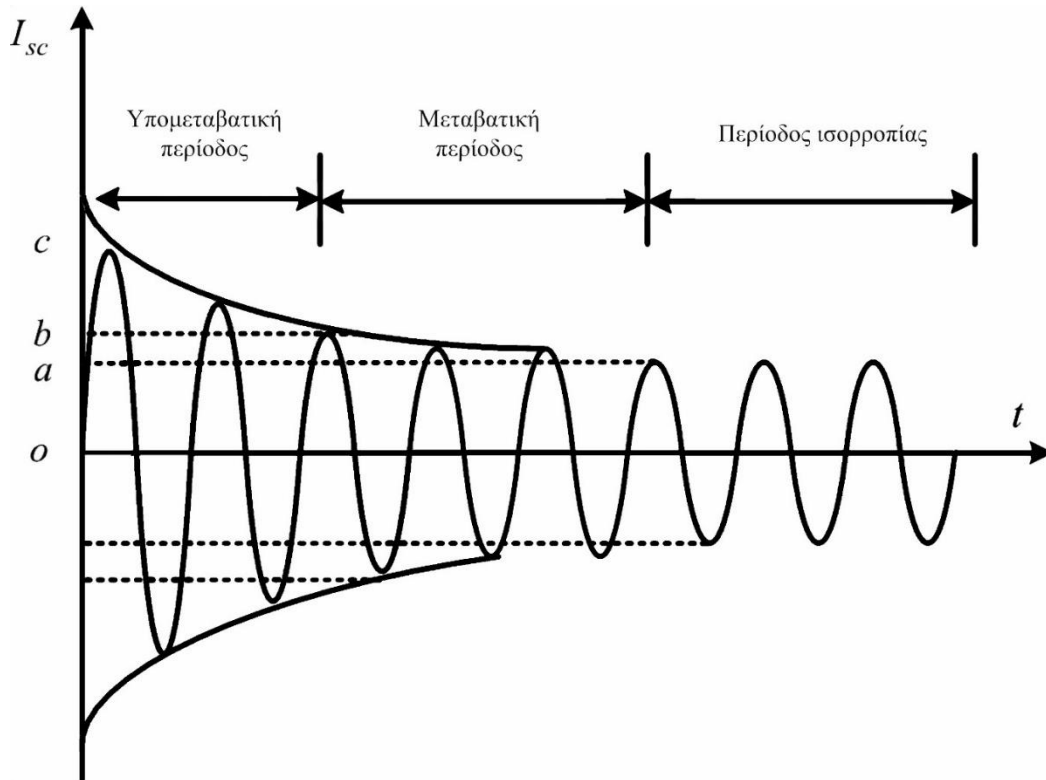
$$\varepsilon = \varphi_{ref}^- - \varphi_{ref}^+ \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} I_{ref}^+ &= \sqrt{I_{d,ref}^{+2} + I_{q,ref}^{+2}} \\ I_{ref}^- &= \sqrt{I_{d,ref}^{-2} + I_{q,ref}^{-2}} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Έτσι προκύπτουν οι τελικές τιμές I_d^+, I_q^+, I_d^- και I_q^- οι οποίες τροφοδοτούν τον έλεγχο ρεύματος και προκύπτουν οι τιμές $V_{d,inv}^+, V_{d,inv}^-, V_{q,inv}^+$ και $V_{q,inv}^-$ στις οποίες εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός dq της σχέσης (3.4), δημιουργώντας την τάση στο τριφασικό πεδίο.

3.6 Συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας στα σφάλματα

Τα πιο σημαντικά μεταβατικά φαινόμενα κατά την λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας παρουσιάζονται όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της. Σε κανονική λειτουργία, οι τάσεις και τα ρεύματα της γεννήτριας διαθέτουν μόνο εναλλασσόμενες συνιστώσες, ενώ όταν βραχυκυκλωθούν οι τρεις φάσεις της, τα φασικά ρεύματα αποτελούνται από μια συνεχή συνιστώσα (dc) που προστίθεται στην εναλλασσόμενη συμμετρική συνιστώσα. Το γενικό μοντέλο μιας σύγχρονης γεννήτριας αποτελείται από την τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της (ηλεκτρεγερτική δύναμη ΗΕΔ) σε σειρά με την σύγχρονη αντίδρασης της (κυρίως επαγωγική). Όμως, η μεταβολή του ρεύματος μιας αυτεπαγωγής δεν είναι δυνατόν να μεταβληθεί ακαριαία. Κατά την ανάπτυξη του σφάλματος, η τιμή της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος της γεννήτριας είναι τέτοια, ώστε το άθροισμα συνεχούς και εναλλασσόμενης συνιστώσας μετά το σφάλμα να είναι ίσο με το εναλλασσόμενο ρεύμα της γεννήτριας πριν το σφάλμα. Συνεπώς, το αρχικό αυξημένο ρεύμα αμέσως μετά την εκδήλωση του σφάλματος ισοδυναμεί με την μειωμένη μεταβατική επαγωγική αντίδραση της μηχανής [30].



Σχήμα 3.12: Ρεύμα σύγχρονης γεννήτριας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η εργαστηριακή διάταξη για τον έλεγχο και την λειτουργία ενός προσαρμοστικού συστήματος προστασίας σε προσομοίωση CHIL. Η πειραματική διάταξη διαμορφώθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που διαθέτει το εργαστήριο. Επιπλέον, βάσει της εν λόγω διάταξης, αναλύεται η διαδικασία μελέτης και εφαρμογής του συστήματος προστασίας από βραχυκυκλώματα ενός ΜΔΝ.

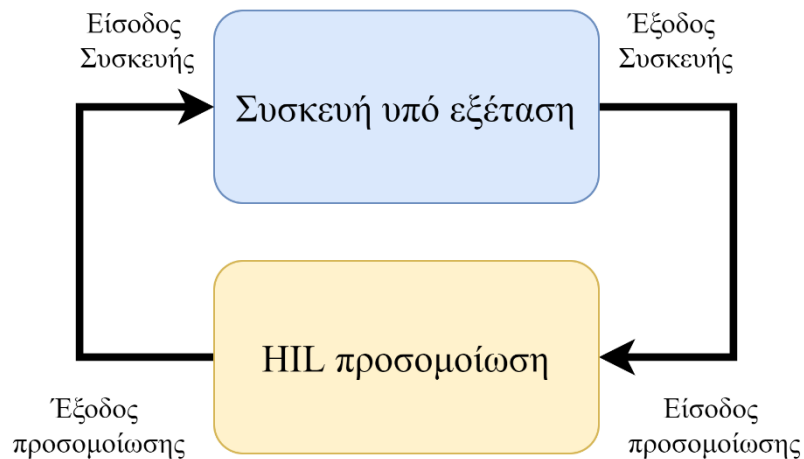
4.2 Έλεγχος ψηφιακών H/N με δοκιμές κλειστού βρόγχου

Ο έλεγχος της απόκρισης των σύγχρονων ψηφιακών H/N πραγματοποιείται στην πράξη μέσω μιας παραπλήσιας διαδικασίας της πραγματικής λειτουργίας. Αναλυτικότερα, κατά την διάρκεια αυτών των δοκιμών, οι H/N τροφοδοτούνται με σήματα τάσης χαμηλού εύρους, τα οποία στέλνονται απευθείας στον επεξεργαστή του H/N παρακάμπτοντας τους M/E και M/T.

Η μέθοδος δοκιμών (Hardware In the Loop HIL) αποτελεί σύγχρονη και διαδεδομένη τεχνική προσομοίωσης, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών πραγματικών συσκευών. Για παράδειγμα, πραγματικές συσκευές που δύσκολα μπορούν να μοντελοποιηθούν σε ψηφιακή προσομοίωση (μετατροπείς ισχύος, H/N προστασίας), μπορούν να συνδεθούν και να αλληλοεπιδρούν σε ένα προσομοιούμενο ΣΗΕ και να δοκιμαστούν σε συνθήκες σχεδόν πανομοιότυπες με αυτές της πραγματικής λειτουργίας. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να δοκιμαστούν ακραίες συνθήκες σφάλματος, χωρίς κίνδυνο καταστροφής της υπό εξέταση συσκευής και γενικότερα του εξοπλισμού.

Θεμελιώδης συνιστώσα μιας τέτοιας διάταξης, αποτελεί ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (Real Time Digital Simulator), ο οποίος έχει την ικανότητα να αλληλοεπιδρά με τις εξωτερικές συσκευές υπό δοκιμή. Η ραχοκοκαλιά αυτού του προσομοιωτή είναι ο επεξεργαστής υψηλής ταχύτητας, ο οποίος διαθέτει επίσης αναλογικές και ψηφιακές κάρτες εισόδου και εξόδου. Ουσιαστικά, η προσομοίωση γίνεται σε διακριτό χρόνο και το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμών ονομάζεται βήμα (time-step). Το βήμα είναι εξαιρετικά μικρό, έχει τιμή της τάξεως των 50 μs ή μπορεί ακόμα να φτάσει και 1-4 μs για την μελέτη πολύ γρήγορων φαινομένων (προσομοίωση ηλεκτρονικών ισχύος με υψηλές διακοπτικές συχνότητες, αντιστροφείς).

Οι δοκιμές κλειστού βρόγχου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις δοκιμές εξοπλισμού ισχύος (Power hardware in the loop – PHIL), και στις δοκιμές ελεγκτών π.χ. H/N (Control hardware in the loop – CHIL).



Σχήμα 4.1: Απλοποιημένη δομή δοκιμών κλειστού βρόγχου.

4.3 Εργαστηριακό σύστημα προσαρμοστικής προστασίας

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συσκευών που συνθέτουν την εργαστηριακή διάταξη. Βασικές συνιστώσες της εργαστηριακής διάταξης αποτελεί ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου, ο προγραμματιζόμενος ελεγκτής πραγματικού χρόνου και οι Η/Ν προστασίας.

4.3.1 Ψηφιακός Προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)

Το εργαστήριο ΣΗΕ διαθέτει έναν ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου, της εταιρίας RTDS Technologies Inc [34]. Αυτός ο προσομοιωτής είναι ειδικά διαμορφωμένος ώστε να έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει το ηλεκτρικό δίκτυο και να αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες εξωτερικές συσκευές. Αποτελείται από ειδικά κατασκευασμένο υλικό προσαρμοσμένων χαρακτηριστικών και αντίστοιχο λογισμικό, σχεδιασμένα για την μοντελοποίηση προσομοιώσεων ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής συμπεριφοράς (ElectroMagnetic Transient - EMT) πραγματικού χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι, μέσω του συγκεκριμένου εξομοιωτή ο χρήστης μπορεί να μελετήσει μεταβατικά φαινόμενα και να παρατηρήσει την επίπτωση τους στον εξοπλισμό και το δίκτυο [35].

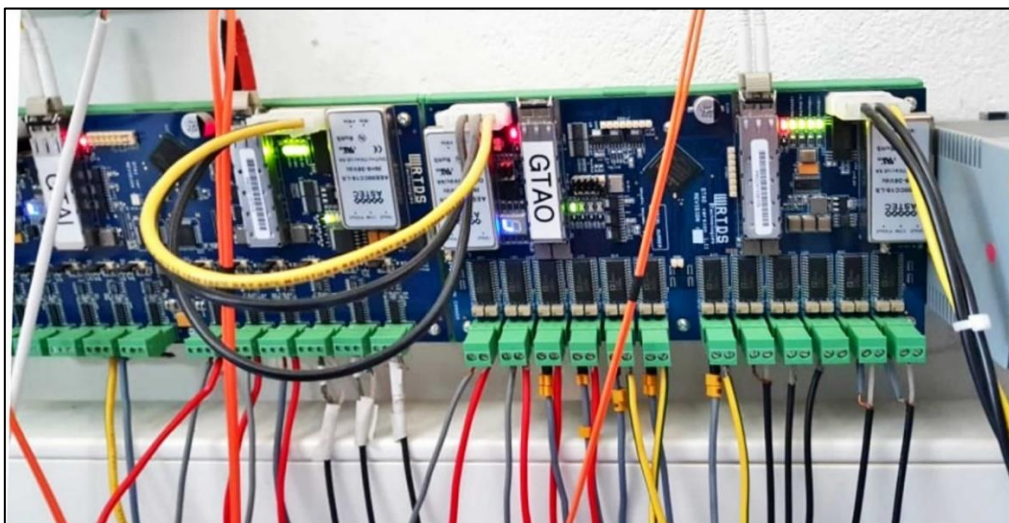
Συγκεκριμένα, ο προσομοιωτής αποτελείται από:

- Μία μονάδα ‘NovaCore chassis’, η οποία περιέχει έναν επεξεργαστή IBM Power8 με 10 πυρήνες, χρονοισμένους στα 3.5 GHz. Οι δέκα επεξεργαστές μπορούν να συνεργάζονται και χρησιμοποιούνται για την επίλυση των μοντέλων και την εκτέλεση υπολογισμών.
- Μία κάρτα WIF (Workstation Interface Card), η οποία είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία μεταξύ των καρτών επεξεργασίας και την επικοινωνία του προσομοιωτή με τον Η/Υ. Για την αλληλεπίδραση του χρήστη με τον εξοπλισμό χρησιμοποιείται το λογισμικό RSCAD.
- Περιφερειακές κάρτες οι οποίες παρέχουν ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους για την σύνδεση εξωτερικών συσκευών, (GTAO – Giga Transceiver Front

Panel Interface, GTAI – Giga Transceiver Analogue Input Card, GTFPI – Gigabit Transceiver Front Panel Interface, GTDI – Giga Transceiver Digital Input Card).



Εικόνα 4.1: Ψηφιακός προσομοιωτής RTDS του εργαστηρίου ΣΗΕ.



Εικόνα 4.2: Αναλογική κάρτα εισόδου-εξόδου RTDS.

4.3.2 Ψηφιακός Η/Ν προστασίας

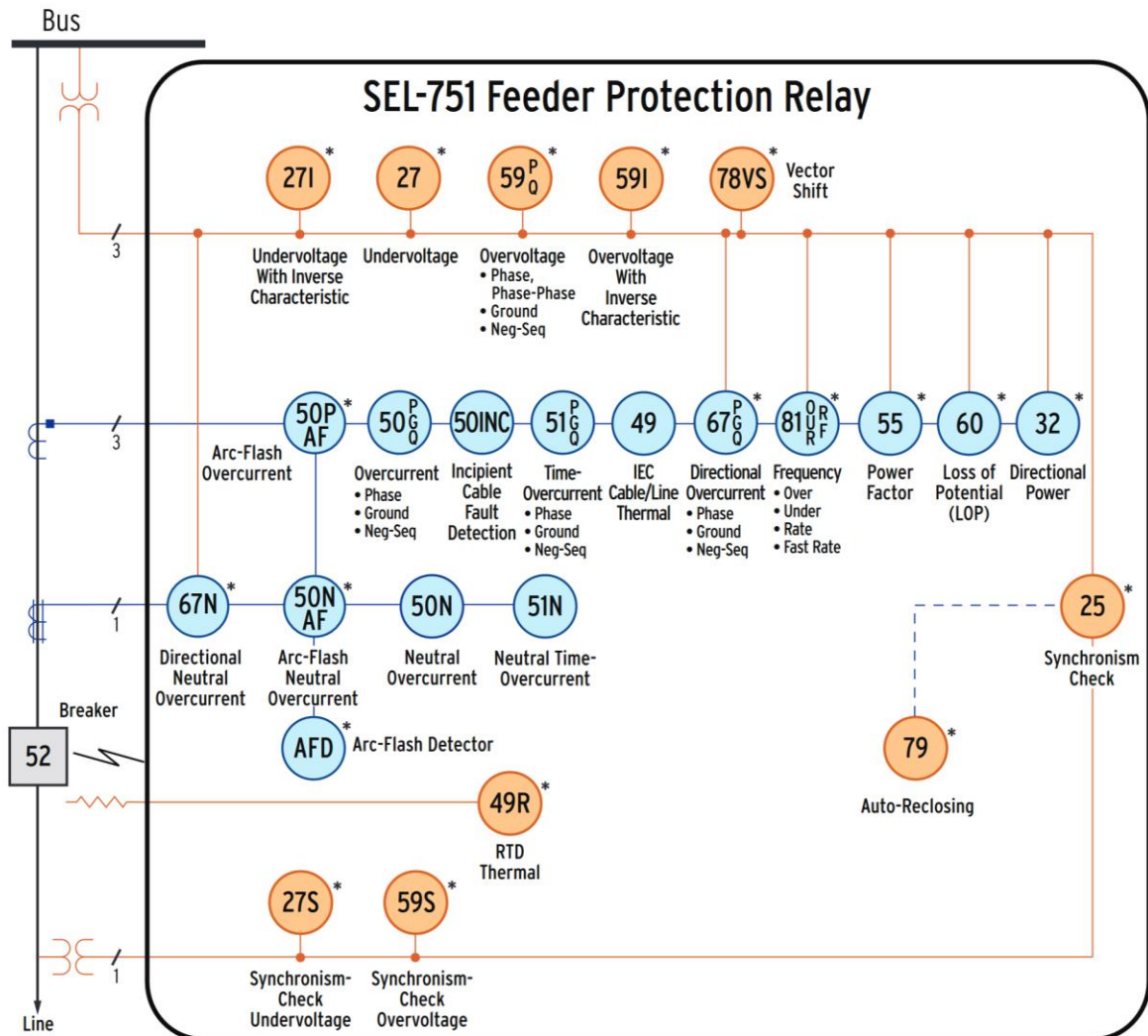
Η συσκευή προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν, είναι οι ηλεκτρονόμοι SEL-751 (Feeder Protection Relay) τους οποίους διαθέτει το εργαστήριο και αποτελούν λύση για την προστασία γραμμών διανομής.



Εικόνα 4.3: Ψηφιακοί Η/Ν SEL-751.

Αυτός ο Η/Ν προσφέρει πληθώρα λειτουργιών προστασίας και ελέγχου. Μεταξύ άλλων, διαθέτει στοιχεία υπερέντασης φάσης 51P, ουδετέρου 51N, αρνητικής ακολουθίας 51Q, με δυνατότητα χρήσης στοιχείων κατεύθυνσης. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι υποστηρίζει τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων (SG1 SG2 SG3 SG4), κάθε μια από αυτές προσαρμόζονται βάσει της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου. Όσον αφορά στα πρωτόκολλα επικοινωνίας, υποστηρίζει το IEC 61850, Modbus TCP/IP, EtherNet/IP, DNP 3 LAN/WAN, DNP 3 Serial κ.α. [20].

Στην Εικόνα 4.4 αποτυπώνονται όλα τα στοιχεία που διαθέτει ο Η/Ν, σύμφωνα με τους λειτουργικούς αριθμούς (ακρωνύμια) που έχουν τεθεί από το πρότυπο ANSI/IEEE C37.2.



Εικόνα 4.4: Λειτουργίες προστασίας και ελέγχου Η/Ν SEL-751 Feeder Protection Relay [36].

4.3.3 Κεντρικός ελεγκτής επικοινωνίας

Για τον έλεγχο και την επικοινωνία των συσκευών προστασίας, χρησιμοποιείται ο ελεγκτής πραγματικού χρόνου (Real Time Automation Controller) SEL-2240 Axion. Είναι ειδικά κατασκευασμένος ώστε να λειτουργεί σε επώδυνα περιβάλλοντα, όπως είναι οι υποσταθμοί ή οι βιομηχανίες. Σχετικά με τον σχεδιασμό του, αποτελεί μια ευέλικτη και προσαρμόσιμη λύση καθώς είναι μία πλήρης αρθρωτή συσκευή που μπορεί να ενσωματώνει ψηφιακές εισόδους/εξόδους, αναλογικές εισόδους, μετρήσεις ρευμάτων και τάσεων και έλεγχο για αναρίθμητες βιομηχανικές εφαρμογές. Επιπλέον, συνδυάζει χαρακτηριστικά όπως, επικοινωνία, ασφάλεια και το πρότυπο IEC 61131 για λογικούς προγραμματιζόμενους ελεγκτές της οικογένειας SEL Real-Time Automation Controller (RTAC), το οποίο παρέχει υψηλή ταχύτητα και έλεγχο μέσω ενός EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) δικτύου [37].



Εικόνα 4.5: Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής πραγματικού χρόνου SEL-2240 Axion.

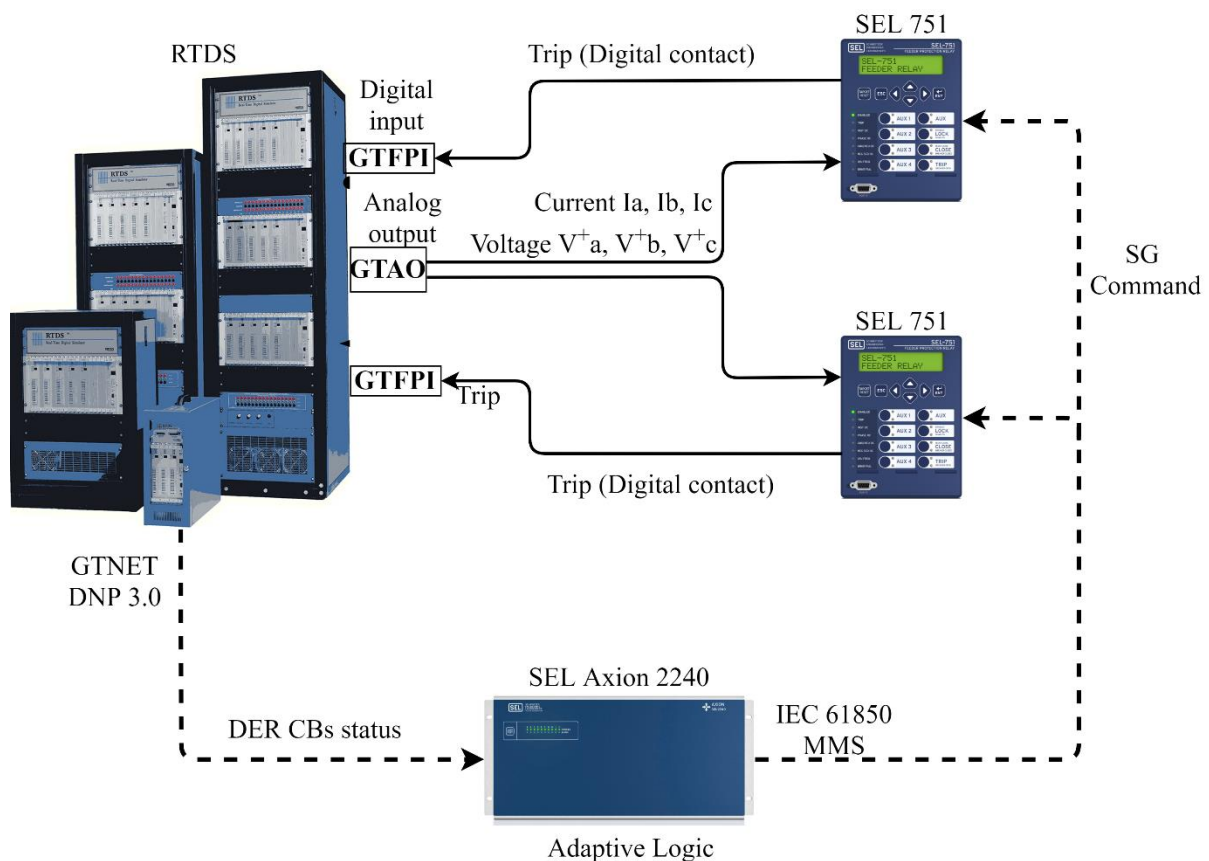
4.4 Λειτουργικότητα εργαστηριακής διάταξης

Για την σύνθεση του εργαστηριακού συστήματος προστασίας, χρησιμοποιήθηκαν οι συσκευές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο. Πιο αναλυτικά, το ηλεκτρικό δίκτυο μοντελοποιείται στο λογισμικό RSCAD και η κατάσταση του κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται στον ψηφιακό προσομοιωτή RTDS. Επιπλέον, οι ψηφιακοί H/N SEL-751 παρέχουν προστασία υπερέντασης στις μελετώμενες γραμμές του δικτύου, ενώ ο ελεγκτής SEL-2240 Axion επιτηρεί αδιάλειπτα την τοπολογία του δικτύου και προσαρμόζει την ενεργή ομάδα ρυθμίσεων (Setting Group) στους ηλεκτρονόμους. Συνοπτικά, ο βρόχος λειτουργίας του εν λόγω συστήματος απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.2 και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

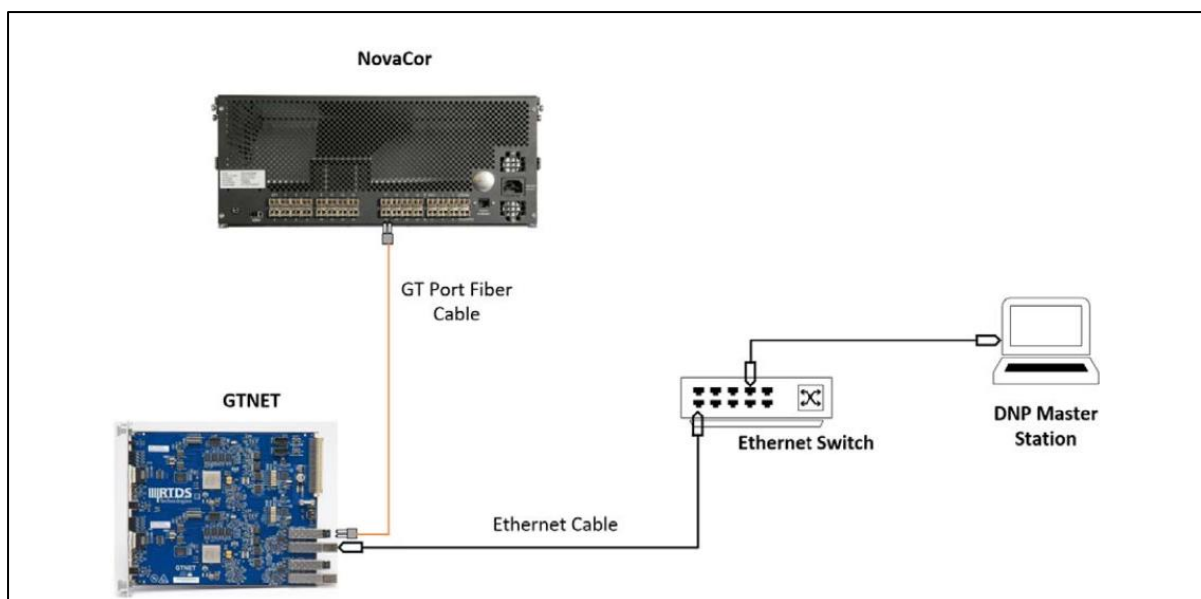
1. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, ο προσομοιωτής RTDS υπολογίζει το ρεύμα των γραμμών και την τάση θετικής ακολουθίας στα σημεία κοινής σύνδεσης ΣΚΣ των ΜΔΠ, τα οποία μετατρέπονται σε σήματα τάσης στην έξοδο της αναλογικής κάρτας και ύστερα οδηγούνται στην αναλογική κάρτα εισόδου του H/N.
2. Επιπλέον, ο προσομοιωτής RTDS, βάσει του πρωτοκόλλου DNP 3.0 (Distributed Network Protocol 3), επικοινωνεί με τον ελεγκτή και ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο

τις καταστάσεις των διακοπών των ΜΔΠ, οι οποίες είναι δυαδικές τιμές (ανοιχτός ή κλειστός Δ/Ι). Το DNP είναι ένα πακέτο με επικοινωνιακά πρωτόκολλα το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στα ΣΗΕ ως μηχανισμός επικοινωνίας μεταξύ του κέντρου ελέγχου και διαφόρους υποσταθμούς. Ο προσομοιωτής διαθέτει την κατάλληλη κάρτα GTNET και το αντίστοιχο υλικολογισμικό (firmware). Μία τυπική σύνδεση εργαστηρίου, βασισμένη σε αυτό το πρωτόκολλο φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

3. Βάσει των σημάτων εισόδου, ο ελεγκτής επιτηρεί συνεχώς την τοπολογία του δικτύου και επιλέγει την κατάλληλη ομάδα ρυθμίσεων, στέλνοντας σήμα (SG command) στους ηλεκτρονόμους προκειμένου να ενημερώσουν την ομάδα ρυθμίσεων. Για την επικοινωνία του ελεγκτή με τους Η/Ν, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MMS (Manufacturing Message Specification), όπως αυτό ορίζεται από το διεθνές πρότυπο IEC 61850.
4. Ο Η/Ν προσαρμόζει την ενεργή ομάδα ρυθμίσεων του, σύμφωνα με τα σήματα εισόδου που δέχεται από τον ελεγκτή.
5. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, ο ηλεκτρονόμος, βάσει της ενεργής ομάδας ρυθμίσεων, στέλνει στην ψηφιακή κάρτα εισόδου του προσομοιωτή RTDS εντολή να ανοίξει ο Δ/Ι που αποσυνδέει το αντίστοιχο τμήμα του προσομοιούμενου δικτύου διανομής.



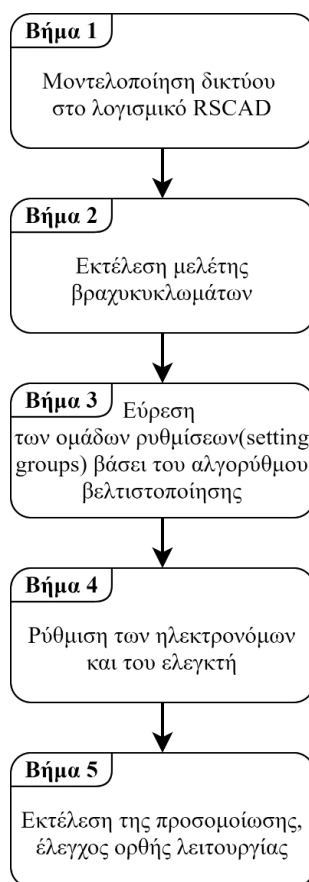
Σχήμα 4.2: Διάταξη εργαστηριακού συστήματος προσαρμοστικής προστασίας.



Σχήμα 4.3: Τυπική σύνδεση GTNET-DNP.

4.5 Διαδικασία δοκιμής προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας

Η λειτουργικότητα και η επίδοση ενός συστήματος προσαρμοστικής προστασίας επιβεβαιώνεται στην πράξη μέσω της δοκιμής κλειστού βρόχου. Η διαδικασία μελέτης και εφαρμογής ενός τέτοιου συστήματος χωρίζεται σε βήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής δοκιμής CHIL συστημάτων προσαρμοστικής προστασίας.

4.5.1 Βήμα 1: Μοντελοποίηση του υπό μελέτη δικτύου

Στο λογισμικό RSCAD μοντελοποιείται το ΣΗΕ του οποίου το σύστημα προστασίας πρόκειται να εξεταστεί. Το σύστημα συνήθως περιλαμβάνει τις μονάδες παραγωγής, τους υποσταθμούς ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης, τους ζυγούς του συστήματος, τις γραμμές διανομής και τους Δ/Ι στις αναχωρήσεις των γραμμών κ.α.

4.5.2 Βήμα 2: Εκτέλεση μελέτης βραχυκυκλωμάτων στο RTDS

Εφόσον το ΣΗΕ έχει μοντελοποιηθεί στο RSCAD, η κεντρική μονάδα ελέγχου που εκτελεί τον αλγόριθμο προσαρμοστικής προστασίας και οι ψηφιακοί Η/Ν μένουν ανενεργοί, προκειμένου να εκτελεστούν τα σφάλματα στις μελετώμενες γραμμές για διάφορες καταστάσεις του δικτύου, να προσδιοριστούν ρεύματα, οι στάθμες βραχυκύκλωσης και η τάση θετικής ακολουθίας στα ΣΚΣ των ΜΔΠ. Ο κύριος λόγος που επιλέγεται αυτή η μέθοδος έναντι μια άλλης (π.χ. λογισμικό που υπολογίζει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης) είναι γιατί στον ψηφιακό προσομοιωτή μπορούμε να εκτελέσουμε δυναμικές προσομοιώσεις και να μοντελοποιήσουμε τον έλεγχο ενός αντιστροφέα με ακρίβεια.

Για κάθε ζώνη προστασίας επιλέγονται τα επικρατέστερα σενάρια σφάλματος, ούτως ώστε να επιτευχθεί επαρκής προστασία του εξοπλισμού σε κάθε ενδεχόμενη περίπτωση σφάλματος. Για τον καθορισμό των εν λόγω σεναρίων, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες λειτουργίας του δικτύου πριν το σφάλμα, όπως:

1. Διάφορες καταστάσεις παραγωγής και ένταξης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.
2. Διάφορα σενάρια τοπολογίας.
3. Τύπος σφάλματος (τριφασικό, διφασικό, διφασικό με γη και μονοφασικό).
4. Αντίσταση σφάλματος και γης.

Όσον αφορά στον τύπο του σφάλματος, αυτό εξαρτάται από το είδους του στοιχείου υπερέντασης προς ρύθμιση. Πιο αναλυτικά, για τα στοιχεία υπερέντασης φάσης, γης και αρνητικής ακολουθίας εξετάζονται τριφασικά, μονοφασικά και μονοφασικά, διφασικά προς γη σφάλματα.

Το επόμενο στάδιο είναι η ανάλυση των δεδομένων διαδικασίας εκτέλεσης βραχυκυκλωμάτων και η επιλογή των τιμών εισόδου του μοντέλου προβλήματος εύρεσης βέλτιστων ρυθμίσεων επιλογικής συνεργασίας προστασιών. Βάσει αυτών των τιμών, υπολογίζεται οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους των στοιχείων υπερέντασης της γραμμής διανομής.

4.5.2.1 Προτεινόμενη μέθοδος μελέτης βραχυκυκλωμάτων

Το γεγονός ότι το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει πολλές καταστάσεις παραγωγής σε συνδυασμό με το ότι ενδέχεται να μελετηθούν όλες οι περιπτώσεις σφαλμάτων, σε όλους τους ζυγούς της γραμμής, κάνει αδύνατη την εκτέλεση όλων αυτών των περιπτώσεων με μη αυτόματο τρόπο. Συνεπώς, η προτεινόμενη μέθοδος είναι να αξιοποιηθεί η δυνατότητα που έχει ο προσομοιωτής πραγματικού χρόνου RTDS του εργαστηρίου, αυτή της δημιουργίας και εκτέλεσης προγράμματος 'script' στην καρτέλα προσομοίωσης RunTime.

Το 'script' είναι ένα προγραμματιζόμενο αρχείο που αυτοματοποιεί τις διαδικασίες εκτέλεσης ενός εκτελούμενου συστήματος ή εφαρμογής (runtime system), οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση θα εκτελούνταν μέσω αλληλεπίδρασης τους χρήστη. Όπως λέγεται και στην επιστήμη των υπολογιστών, μία γλώσσα script είναι συνήθως ένα πρόγραμμα διερμηνέας

(Interpreter) το οποίο εκτελεί απευθείας τις εντολές χωρίς να απαιτείται προηγουμένως να έχει μεταγλωττιστεί σε γλώσσα μηχανής [38].

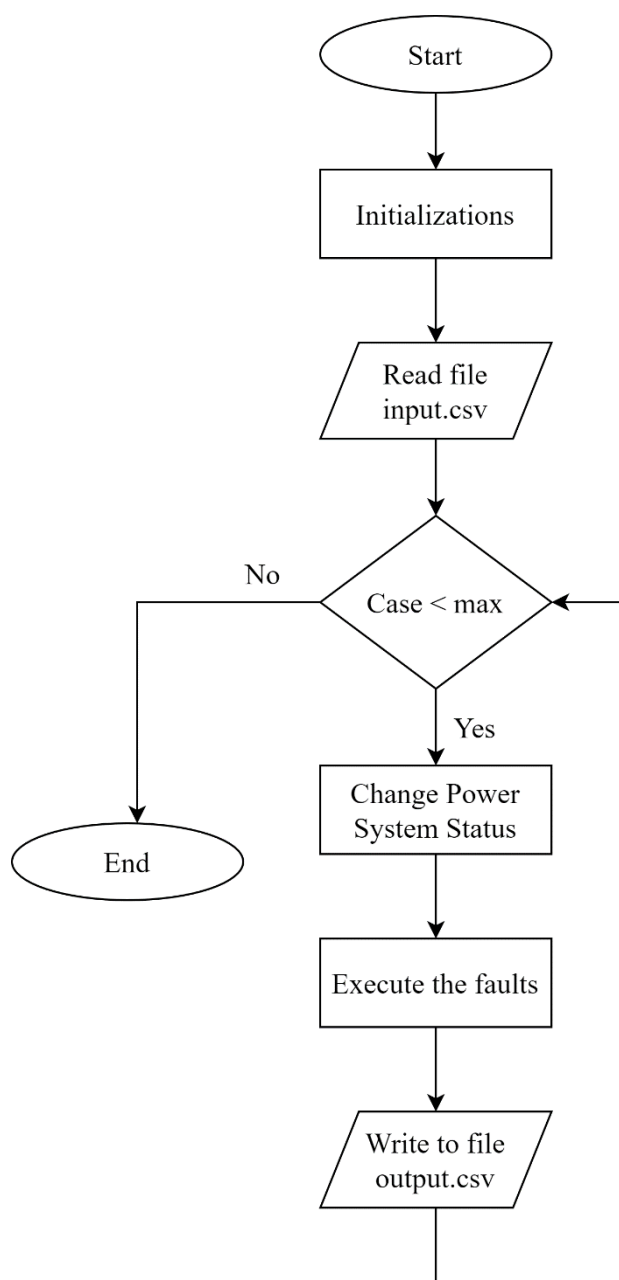
Στο RTDS, ένα αρχείο script σχεδιάζεται για να εκτελεί λειτουργίες στην καρτέλα RunTime του λογισμικού RSCAD, οι οποίες κανονικά εκτελούνται μέσω αλληλεπίδρασης του χρήστη. Για παράδειγμα, μια μεγάλη προσομοίωση που απαιτεί ως είσοδο διάφορα στοιχεία (ρύθμιση περιστροφικών διακοπών, διακοπών επαναφοράς, μπάρες κ.α.), ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει το πρόγραμμα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και ύστερα να μην είναι απαραίτητη η αλληλεπίδραση του με την προσομοίωση. Ένα τέτοιο αρχείο μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να περιέχει κώδικα γλώσσας προγραμματισμού 'C', συντάσσοντας έτσι την γλώσσα script. Η γλώσσα script εμπεριέχει συναρτήσεις όπως, επαναληπτικούς βρόγχους (for loop), έλεγχο συνθήκης (if else), και διάφορες συναρτήσεις εισόδου εξόδου (I/O functions). Συνεπώς, αυτή η λειτουργία αναβαθμίζει τις δυνατότητες της προσομοίωσης, καθώς όχι μόνο θα μπορούσαν να εκτελεστούν προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου για ώρες, αλλά θα ήταν δυνατόν να καταγραφεί ένας μεγάλος όγκος δεδομένων αποτελεσμάτων [35].

Το σχήμα σύμφωνα με το οποίο αναπτύσσεται η μελέτη βραχυκυκλωμάτων, είναι να εξασφαλισθούν οι σημαντικότερες καταστάσεις σφαλμάτων ώστε να παραχθούν όσο το δυνατόν αξιόπιστα και ολοκληρωμένα αποτελέσματα. Ακόμα, μπορούν εξεταστούν όλοι οι τύποι σφαλμάτων, διφασικό και τριφασικό σύμφωνα με των οποίων τα αποτελέσματα ρυθμίζονται τα στοιχεία υπερέντασης φάσης και διφασικό με γη και μονοφασικό, ρυθμίζονται τα στοιχεία υπερέντασης γης. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται οι ακόλουθες περιπτώσεις.

- **Καταστάσεις παραγωγής:** Αποτελούν τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας των ΜΔΠ.
- **Καταστάσεις διακοπών:** Οι συνιστώσες και το σχέδιο προστασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπολογία του δικτύου. Συνεπώς, μπορούν να δημιουργηθούν πολλές και διαφορετικές τοπολογίες ανάλογα με τις καταστάσεις των διακοπών σύνδεσης μεταξύ των γραμμών διανομής.
- **Ζώνες προστασίας:** Στην υπό μελέτη γραμμή, καθορίζονται οι ζυγοί και οι ζώνες προστασίας για την κάθε μία από τις οποίες θα καθοριστούν τα χαρακτηριστικά τους.
- **Σφάλματα:** Για να εξεταστεί ένα μεγάλο φάσμα ηλεκτρικών σφαλμάτων, είναι δυνατόν να εκτελεστούν διάφορα σφάλματα, όπως μονοφασικό, διφασικό, διφασικό προς γη και τριφασικό.
- **Αντίσταση σφάλματος:** Εκτός από τον τύπο σφάλματος, εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η αντίσταση σφάλματος ή γης. Για το λόγο αυτό, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι επικρατέστερες τιμές των αντιστάσεων σφάλματος.

Επίσης, ο κώδικας αναπτύχθηκε ως ένα πρόγραμμα εκτέλεσης της μελέτης βραχυκυκλωμάτων, αλληλοεπιδρώντας με άλλα 2 αρχεία δεδομένων τύπου 'file.csv'. Το πρώτο αρχείο δεδομένων (input.csv) περιέχει διάφορα δεδομένα εισόδου, όπως τα σημεία που θα πραγματοποιηθούν σφάλματα και τα δεδομένα που επιθυμεί ο μελετητής να καταγραφούν. Το δεύτερο αρχείο (output.csv) αποτελεί την έξοδο της εκτέλεσης της προσομοίωσης, δηλαδή εμπεριέχει όλα τα παραγόμενα δεδομένα, συνήθως ηλεκτρικά μεγέθη (π.χ. ρεύμα, τάση, κ.α.) που απαιτεί η διαδικασία μελέτης βραχυκυκλωμάτων.

Το διάγραμμα ροής του προγράμματος script που αναπτύχθηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

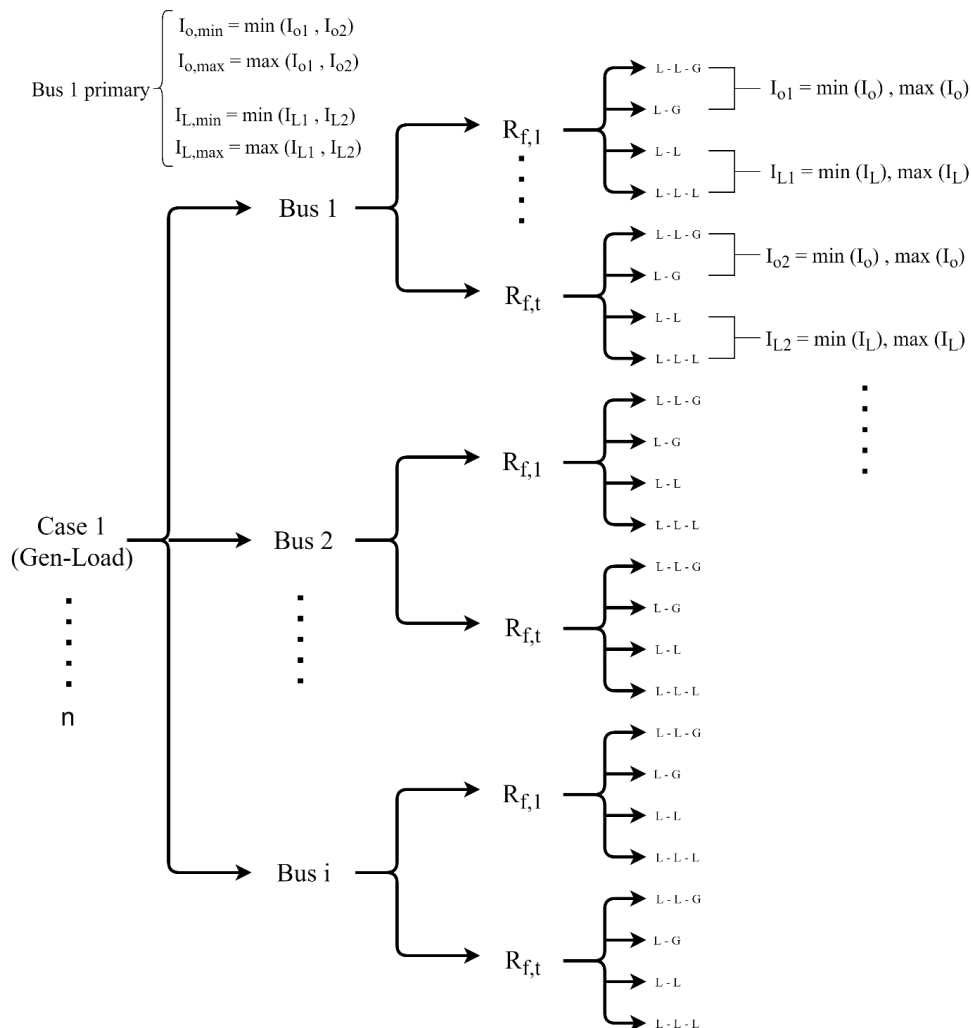


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής προγράμματος script αυτόματης εκτέλεσης σφαλμάτων στον προσομοιωτή.

4.5.2.2 Ανάλυση και ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων

Εκτός από το ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο είναι και το θεμελιώδες μέγεθος για τον καθορισμό των ρυθμίσεων των στοιχείων των Η/Ν, εξίσου σημαντικό μέγεθος είναι η τάση των ΜΔΠ στα σημεία σύνδεσης στο δίκτυο. Οι μονάδες που συνδέονται με μετατροπείς ισχύος προσαρμόζουν την συμπεριφορά τους στα σφάλματα σύμφωνα με τους κανονισμούς (FRT) των διαχειριστών των δικτύων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την τάση θετικής ακολουθίας στα σημεία σύνδεσης των μονάδων, υπολογίζεται ο χρόνος που πρέπει να παραμείνει συνδεδεμένη η πηγή και να συμβάλει με ρεύμα βραχυκύκλωσης. Επίσης, εκτός από τα σήματα ρεύματος, οι Η/Ν δέχονται ως είσοδο και τις τάσεις στα σημεία των Δ/Ι προκειμένου να λειτουργούν και να ρυθμίζονται τα στοιχεία κατεύθυνσης τους.

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης βραχυκυκλωμάτων αξιοποιούνται για τον υπολογισμό του ρεύματος διέγερσης $I_{pu,i}^k$ και του χρονικού πολλαπλασιαστή TD_i^k των Η/Ν. Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο εδάφιο τα αποτελέσματα της μελέτης βραχυκύκλωσης αποτελούν έναν μεγάλο όγκο δεδομένων και για την αξιοποίησή τους απαιτείται η κατάλληλη ομαδοποίηση. Τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για την ρύθμιση των στοιχείων υπερέντασης των Η/Ν είναι το μέγιστο ρεύμα σφάλματος, το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος και το ρεύμα κανονικής λειτουργίας. Άρα, για κάθε περίπτωση κατάστασης σύνδεσης των ΜΔΠ υπολογίζεται το ελάχιστο και μέγιστο ρεύμα του κάθε Η/Ν της μελετώμενης γραμμής που παρέχει είτε κύρια ή δευτερεύουσα προστασία. Για κάθε Η/Ν που παρέχει κύρια προστασία, ερευνάται το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα μεταξύ των δύο βραχυκυκλωμάτων (τριφασικού, διφασικού) και των αντιστάσεων σφάλματος που προβλέφθηκαν για την ρύθμιση των στοιχείων υπερέντασης φάσης. Για την ρύθμιση των στοιχείων υπερέντασης ουδετέρου εκτελείται ομοίως με την διαφορά ότι διερευνώνται τα βραχυκυκλώματα γης (μονοφασικό και διφασικό προς γη). Τέλος, αν ο Η/Ν παρέχει και δευτερεύουσα προστασία, τότε εκτελείται ομοίως η παραπάνω διαδικασία και ερευνώνται τα αντίστοιχα ζεύγη μέγιστου/ελάχιστου ρεύματος για τα σφάλματα φάσης και γης. Σχετικά με τις τιμές των ρευμάτων, για τα στοιχεία υπερέντασης φάσης 51P υπολογίζεται το ρεύμα φάσης των γραμμών, ενώ για τα στοιχεία υπερέντασης ουδετέρου υπολογίζεται βάσει του ρεύματος ουδετέρου. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας ομαδοποίησης ρευμάτων φάσης ή ουδετέρου.

4.5.3 Βήμα 3: Βέλτιστη επιλογική συνεργασία στοιχείων υπερέντασης

4.5.3.1 Βέλτιστος καθορισμός ομάδων ρυθμίσεων (Setting Groups)

Ένα προσαρμοστικό σύστημα προστασίας που ενσωματώνει τεχνικές βελτιστοποίησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία γραμμών διανομής. Αυτή η τεχνική απαιτεί να καθοριστούν οι βέλτιστες ρυθμίσεις των setting group των H/N, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο αντίδρασης και εκκαθάρισης σφάλματος των συσκευών και αυξάνοντας την απόκριση τους. Γνωρίζοντας τις διάφορες καταστάσεις και σενάρια λειτουργίας του δικτύου, μπορούν να καθοριστούν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για κάθε σενάριο λειτουργίας. Ο βέλτιστος καθορισμός των ομάδων ρυθμίσεων για τις καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου, αποτελεί ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μη κυρτών συνόλων. Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου λειτουργίας για την κύρια και δευτερεύουσα προστασία, υπό τους τεχνικούς περιορισμούς που θέτει ο εκάστοτε διαχειριστής [39].

4.5.3.2 Μοντελοποίηση προβλήματος

Η αντικειμενική συνάρτηση (4.1) προς ελαχιστοποίηση, είναι το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας των κύριων και των επικουρικών προστασιών, για κάθε ομάδα ρυθμίσεων.

$$\min Obj_k = \sum_{f=1}^{N_f} \sum_{i,j}^{N_R} (t_{i,f}^k + t_{j,f}^k), k = 1, \dots, N_{SG} \quad (4.1)$$

Όπου,

f : Περίπτωση σφάλματος.

i, j : Πρωτεύων ή δευτερεύων στοιχείο αντίστοιχα.

$t_{i,f}^k, t_{j,f}^k$: Ο χρόνος απόκρισης πρωτεύουσας – δευτερεύουσας για κάθε k ομάδα ρυθμίσεων.

N_f : Συνολικός αριθμός σφαλμάτων.

N_R : Συνολικός αριθμός συσκευών προστασίας.

N_{SG} : Συνολικός αριθμός ομάδων ρυθμίσεων.

Η χαρακτηριστική καμπύλη αντιστρόφου χρόνου του H/N επιλέγεται σύμφωνα με τα πρότυπα IEC/IEEE [24] [23], όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1, και ορίζεται από την σχέση (4.2).

$$t_{i,f}^k = TD_i^k \left(\frac{A_k}{\left(\frac{I_{f,i}}{I_{pu,i}^k} \right)^{B_k} - 1} + C_k \right) \quad (4.2)$$

Όπου,

A_k, B_k, C_k : Οι σταθερές τιμές που ορίζουν την χαρακτηριστική καμπύλη.

TD_i^k : Ο χρονικός πολλαπλασιαστής (Time dial).

$I_{pu,i}^k$: Το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου (pick up current).

$I_{f,i}$: Το ρεύμα γραμμής υποβιβασμένο από τον Μ/Σ μέτρησης.

Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι το ρεύμα διέγερσης και ο χρονικός πολλαπλασιαστής $I_{pu,i}^k$ και TD_i^k αντίστοιχα. Το $I_{pu,i}^k$ οριοθετείτε λαμβάνοντας υπόψη το ρεύμα βραχυκύκλωσης και το μέγιστο ρεύμα γραμμής υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, προκειμένου να αποφευχθεί η περίπτωση λανθασμένης λειτουργίας. Σχετικά με το TD_i^k , η αποδεκτή περιοχή καθορίζεται από τον κατασκευαστή του Η/Ν.

$$I_{pu,i}^{max} \leq I_{pu,i}^k \leq I_{pu,i}^{min} \quad (4.3)$$

$$TD_i^{min} \leq TD_i^k \leq TD_i^{max} \quad (4.4)$$

Ο επόμενος περιορισμός επίσης που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι τα όρια των χρόνων λειτουργίας για πρωτεύων και δευτερεύων. Ανάλογα με το πλάνο προστασίας και τις ιδιαιτερότητες του δικτύου, επιλέγεται το κατάλληλο εύρος χρόνου στο οποίο θα διεγείρονται οι συσκευές προστασίας. Οι μέγιστοι χρόνοι $t_{i,f}^{max}$ προέρχονται από τις χαρακτηριστικές FRT και τις μετρήσεις της τάσης θετικής ακολουθίας στα σημεία σύνδεσης των μονάδων. Στα ΜΔΝ που υπάρχει υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, το σύστημα προστασίας πρέπει να λειτουργήσει πριν το όριο αποσύνδεσης που επιβάλλει η καμπύλη FRT για τις ΑΠΕ.

$$t_{i,f}^{min} \leq t_{i,f}^k \leq t_{i,f}^{max} \quad (4.5)$$

Ο τελευταίος περιορισμός είναι ο απαιτούμενος συντονισμός του ζεύγους κύριας και δευτερεύουσας προστασίας. Η δευτερεύουσα προστασία, πρέπει να λειτουργεί μόνο και μόνο όταν αποτύχει η κύρια, επομένως, ο χρόνος λειτουργίας της πρέπει να είναι αυξημένος σε σχέση με τον χρόνο λειτουργίας της κύριας. Αυτό το περιθώριο χρόνου είναι γνωστό και ως (coordination time interval CTI).

$$t_{i,f}^k - t_{j,f}^k \geq CTI \quad (4.6)$$

4.5.3.3 Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης επιλογής ομάδας ρυθμίσεων

Οι μεταβλητές $I_{pu,i}^k$, TD_i^k και CTI θεωρούνται συνεχείς, λόγω την μεγάλης ακρίβειας των τιμών ρύθμισης των ηλεκτρονόμων. Σημειώνεται ότι το μαθηματικό πρόβλημα της βέλτιστης επιλογικής συνεργασίας στοιχείων υπερέντασης ανήκει στην γενική κατηγορία των μη κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης (non convex optimization) και ως προς την πολυπλοκότητα του στην κλάση NP-hard [19].

Η γενική μορφή του προβλήματος είναι:

$$\min f(x) \text{ , υπό τους περιορισμούς } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ seq(x) = 0 \\ A \cdot x = b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (4.7)$$

Όπου,

b και beq είναι διανύσματα, A και Aeq πίνακες, $c(x)$ και $seq(x)$, συναρτήσεις που επιστρέφουν διανύσματα και $f(x)$ επιστρέφει τιμές. Οι $f(x)$, $c(x)$, $seq(x)$ μπορούν να είναι μη γραμμικές συναρτήσεις.

Υπάρχουν πολλά εργαλεία λογισμικού επίλυσης τέτοιων προβλημάτων (solvers) είτε εμπορικά ή ανοιχτού κώδικα (Open Source). Αυτά βασίζονται κυρίως σε επαναληπτικές μεθόδους, οι οποίες συγκλίνουν σε ένα τοπικό βέλτιστο στην περιοχή που έχει οριοθετηθεί από τον χρήστη. Το μοντέλο γι' αυτήν την εργασία αναπτύχθηκε στο περιβάλλον MATLAB [40] με εργαλείο μοντελοποίησης το YALMIP [41]. Το YALMIP είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης για προηγμένα μοντέλα και επίλυση κυρτών και μη κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Διατίθεται δωρεάν ως εργαλείο του MATLAB, χωρίς ωστόσο να ανήκει στην ίδια εταιρία παραγωγής. Ως εργαλείο επίλυσης (solver), επιλέχθηκε το 'fmincon' το οποίο είναι ενσωματωμένο στο MATLAB Optimization Toolbox. Το εν λόγω εργαλείο είναι σχεδιασμένο να ελαχιστοποιεί συναρτήσεις που συνοδεύονται από περιορισμούς όπως περιγράφεται η γενική μορφή του προβλήματος στη σχέση (4.7).

Συνοπτικά, για την εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εύρεσης βέλτιστων ρυθμίσεων των στοιχείων υπερέντασης απαιτείται να καθοριστούν οι παρακάτω τιμές.

1. Οι σταθερές A , B και C των τυποποιημένων καμπυλών όπως ορίζονται από τα πρότυπα IEC/IEEE.
2. Ο λόγος των M/E και M/T που θα χρησιμοποιηθεί.
3. Ο χρονικός πολλαπλασιαστής TD_i^k σύμφωνα με τις επιτρεπτές τιμές του H/N .
4. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος διέγερσής $I_{pu,i}^k$.
5. Το επιθυμητό εύρος του χρόνου λειτουργίας $t_{i,f}^k$ των H/N .
6. Την ελάχιστη χρονική καθυστέρηση της επικουρικής προστασίας έναντι της κύριας.
7. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

4.5.4 Ρύθμιση των συσκευών προστασίας και ελέγχου

Σε αυτό το στάδιο ενεργοποιείται η κεντρική μονάδα ελέγχου – επιτήρησης και οι H/N προστασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην μονάδα ελέγχου αρχικά ρυθμίζεται το πρωτόκολλο επικοινωνίας με τον προσομοιωτή και τους ηλεκτρονόμους. Ο ελεγκτής δέχεται ως είσοδο τις καταστάσεις των διακοπών ισχύος των μονάδων του δικτύου και αντιλαμβάνεται ποιες είναι ενταγμένες κάθε στιγμή. Υστερα, προγραμματίζονται οι κανόνες που καθορίζουν ποια ομάδα ρυθμίσεων των H/N αντιστοιχεί σε κάθε κατάσταση. Αυτοί οι κανόνες αντιστοιχούν σε if – then – else συνθήκες.

Σχετικά με τους H/N , αρχικά καθορίζονται οι ρυθμίσεις επικοινωνίας με τον ελεγκτή και τον ψηφιακό προσομοιωτή. Ο H/N λαμβάνει τα σήματα από την αναλογική κάρτα εξόδου του προσομοιωτή, το ρεύμα γραμμών και την τάσης θετικής ακολουθίας στα σημεία σύνδεσης των ΜΔΠ. Υστερα, ρυθμίζονται όλες οι ομάδες ρυθμίσεων (SG) των στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου σύμφωνα με τις τιμές που έχει εξάγει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Επιπλέον, καθορίζονται οι μεταβλητές οι οποίες σύμφωνα με τα απομακρυσμένα σήματα του ελεγκτή θα ενεργοποιούν την κατάλληλη ομάδα ρυθμίσεων ανάλογα με την τοπολογία του ΣΗΕ.

Η επικοινωνία των συσκευών πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61850 (Communication Network and System in Substation) που ορίζει το πρωτόκολλο MMS (Manufacturing Message Specification) ως ένα τύπο επικοινωνίας διακομιστή/πελάτη

(server/client). Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ έξυπνων συσκευών (IED – Intelligent Electronic Device) και υψηλότερου επιπέδου συσκευές μέσω Ethernet. Το πρωτόκολλο MMS είναι χαρτογραφημένο βάσει του πρωτοκόλλου TCP/IP και ενεργοποιεί την πρόσβαση στον διακομιστή σύμφωνα με την διεύθυνση IP όπου η συσκευή πελάτης (client) μπορεί να κάνει εγγραφή και διαβάσει δεδομένα ή αρχεία [20].

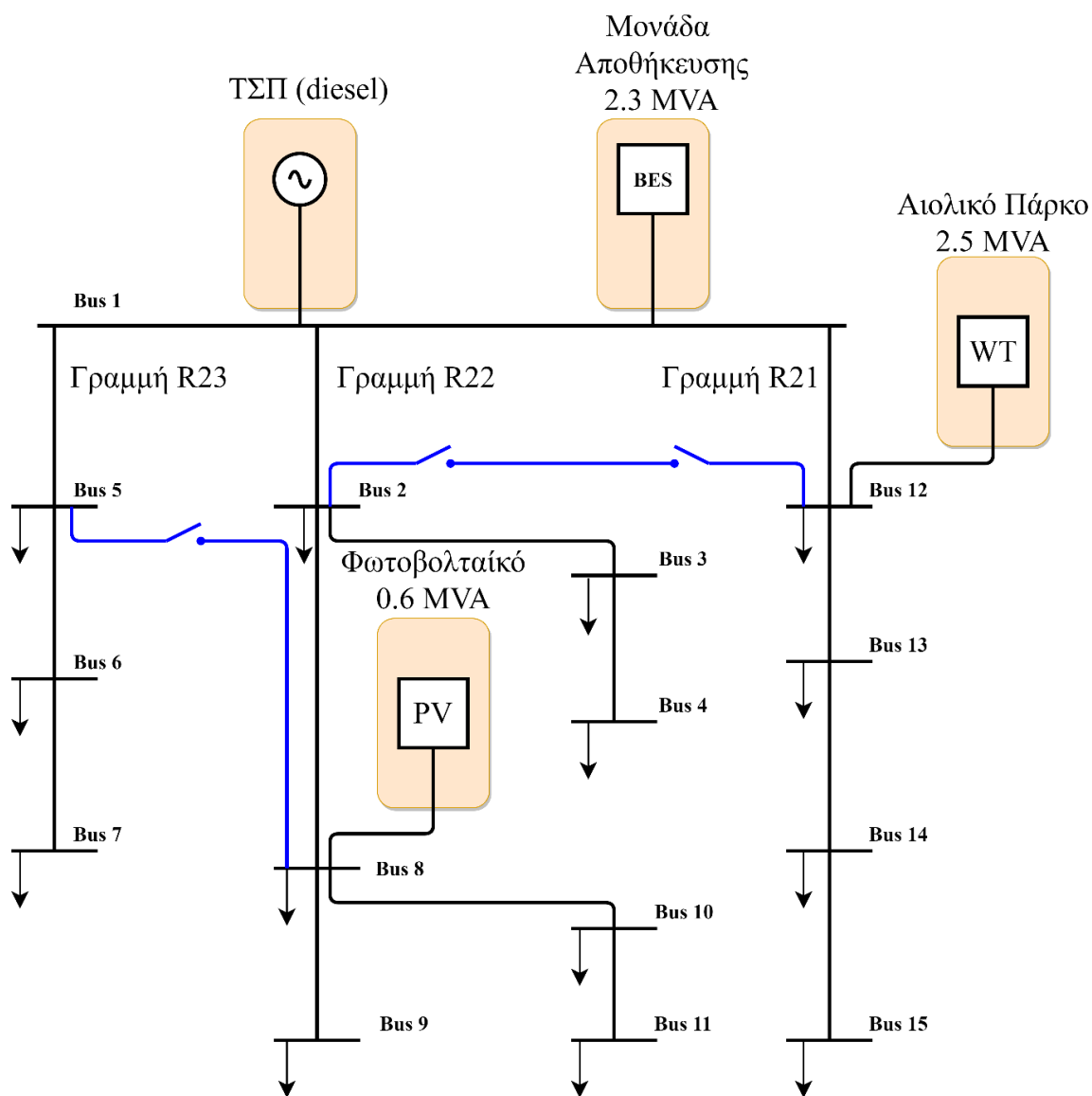
4.5.5 Έλεγχος ορθής λειτουργίας της διάταξης και εκτέλεση της προσομοίωσης

Σε αυτό το στάδιο δοκιμών, επανεκτελούνται οι προσομοιώσεις βραχυκυκλώματος, αυτή τη φορά με ενεργές τις συσκευές προσαρμοστικής προστασίας, επιδεικνύοντας την ορθότητα και αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος προστασίας και την καταλληλότητά του για σύγχρονα ΣΗΕ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΔΝ ΤΗΣ ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑΣ

5.1 Γενικά στοιχεία

Η Αστυπάλαια είναι ένα νησί του Αιγαίου και ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων. Ως προς το ηλεκτρικό σύστημα, σύμφωνα με τον κώδικα ΜΔΝ [26] κατατάσσεται στα μικρά ΜΔΝ, καθώς η αιχμή ζήτησης για το έτος 2016 ήταν 2.73 MW, μικρότερη των 5 MW. Σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την υφιστάμενη κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου του νησιού, η ζήτηση καλύπτεται από θερμικές μονάδες ΤΣΠ (diesel) των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς είναι 5.10 MW, η τάση λειτουργίας του δικτύου διανομής ανέρχεται στα 15 kV και το δίκτυο αποτελείται από τρεις κύριες γραμμές διανομής. Όσον αφορά στο υφιστάμενο σύστημα προστασίας, η κάθε κύρια γραμμή διανομής καλύπτεται στην αρχή αναχώρησής της από Η/Ν προστασίας και διακόπτες ισχύος. Οι διακλαδώσεις προστατεύονται από ασφάλειες εκτόνωσης, είτε βραδείας ή ταχείας τήξης.



Σχήμα 5.1: Αποτύπωση απλοποιημένου δικτύου διανομής του ΜΔΝ της Αστυπάλαιας.

Ένας από τους στόχους της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός προσαρμοστικού συστήματος προστασίας για ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Ως εκ τούτου, επιπλέον του υπάρχοντος συμβατικού σταθμού παραγωγής, προστέθηκε σε διάφορα σημεία του δικτύου, ένα Φ/Β πάρκο με αντιστροφέα ισχύος 0.6 MVA, ένα Α/Π με αντιστροφέα ισχύος 2.5 MVA και μία μονάδα αποθήκευσης τεχνολογίας μπαταριών με αντιστροφέα ισχύος 2.3 MVA. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός τέτοιου νησιού είναι η ευελιξία που το διακατέχει ως προς τις συνθήκες παραγωγής. Για παράδειγμα, η ζήτηση μπορεί να καλύπτεται είτε από την γεννήτρια πετρελαίου σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες τρεις μονάδες ή από την μονάδα αποθήκευσης και ενδεχομένως το Φ/Β και Α/Π. Η υπολογιστική ισχύς του προσομοιωτή RTDS, αν και είναι εξαιρετικά ισχυρή, δεν παύει να είναι πεπερασμένη. Συνεπώς, το δίκτυο διανομής μοντελοποιήθηκε ομαδοποιώντας γειτονικά φορτία, προκειμένου να απλοποιηθεί η σχεδίασή του χωρίς να αλλάξει ουσιαστικά η τοπολογία του ή να ξεπεραστούν οι υπολογιστικές δυνατότητες του RTDS. Στο Σχήμα 5.1 αποτυπώνεται το ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού, όπως διαμορφώθηκε για την διαδικασία της δοκιμής.

5.1.1 Προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό RSCAD

Στην καρτέλα DRAFT του λογισμικού RSCAD μοντελοποιήθηκε το ηλεκτρικό σύστημα του μη διασυνδεδεμένου νησιού όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.1.

5.1.1.1 Γεννήτρια πετρελαίου

Η επόμενη συνιστώσα του δικτύου που σχεδιάζεται είναι το μοντέλο της γεννήτριας στο οποίο περιλαμβάνεται και ο Μ/Σ ανύψωσης. Οι συνιστώσες που συνθέτουν την προσομοιούμενη γεννήτρια φαίνονται στην Εικόνα 5.1. Συγκεκριμένα, τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά της διαμορφώθηκαν ως εξής:

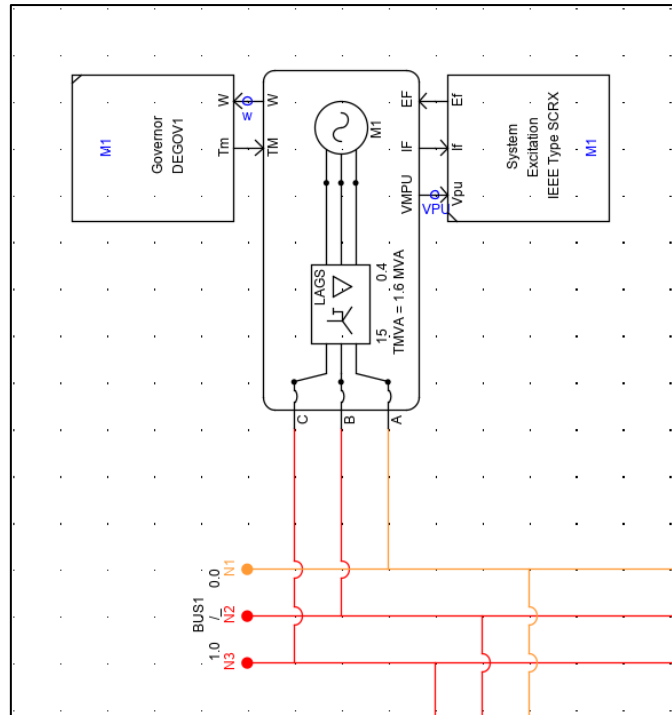
Ονομαστικά χαρακτηριστικά γεννήτριας: $S_{nom} = 1.6 \text{ MVA}$, $V_{nom} = 0.4 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Σταθερά αδράνειας: $H = 1,7 \text{ MWS/MVA}$.

Ονομαστικά χαρακτηριστικά Μ/Σ ανύψωσης: $S_{nom} = 2.5 \text{ MVA}$, $a = \frac{0.4}{15} \text{ kV}$.

Η συνιστώσα governor βασίζεται στο μοντέλο DEGOV1 και οι ρυθμίσεις του σχετικά με τις χρονικές σταθερές και το κέρδος παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.2. Επιπλέον, οι ρυθμίσεις του αυτόματου ρυθμιστή τάσης βασίζονται στο μοντέλο IEEE και είναι ο τύπος SCRX. Αναλυτικά, οι τιμές των σταθερών είναι:

$$\frac{T_a}{T_b} = 0.125 \text{ sec}, T_b = 24 \text{ sec}, G = 250, T_e = 0.001 \text{ sec}$$



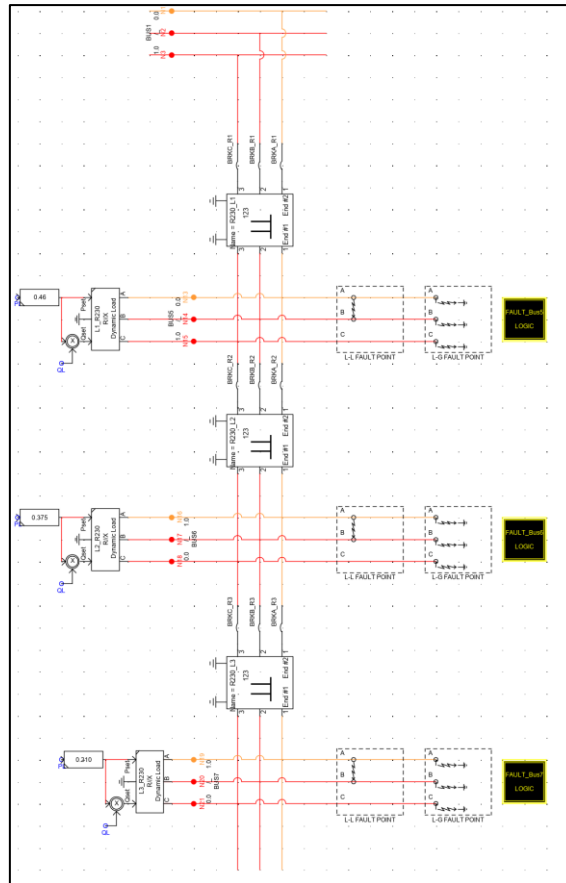
Εικόνα 5.1: Μοντέλο μονάδας ΤΣΠ (Diesel) του νησιού στο RSCAD.

_rtds_DEGOV1.def					
CONFIGURATION		GOVERNOR/TURBINE PARAMETERS			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Drin	Droop Input	Throttle Feedback		0	1
T1	Time Constant T1	0.1	sec		
T2	Time Constant T2	0.02	sec		
T3	Time Constant T3	0.2	sec		
K	Actuator Gain	27.7			
T4	Time Constant T4	0.25	sec		
T5	Time Constant T5	0.009	sec		
T6	Time Constant T6	0.0984	sec		
Td	Engine Delay	0.012	sec	0.0	
Tmax	Maximum Limit Tmax	1.1	pu		
Tmin	Minimum Limit Tmin	0	pu		
Drp	Droop	0.0347			
Te	Time Constant TE	0.0	sec		

Εικόνα 5.2: Ρυθμίσεις χρονικών σταθερών και κερδών μονάδας ΤΣΠ.

5.1.1.2 Γραμμές διανομής και φορτία δικτύου

Το επόμενο στάδιο είναι η ανάπτυξη των γραμμών και των φορτίων. Στο ηλεκτρικό δίκτυο υπάρχουν τρεις κύριες γραμμές διανομής, η R21, R22 και R23 και οι διασυνδέσεις αυτών όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.1.

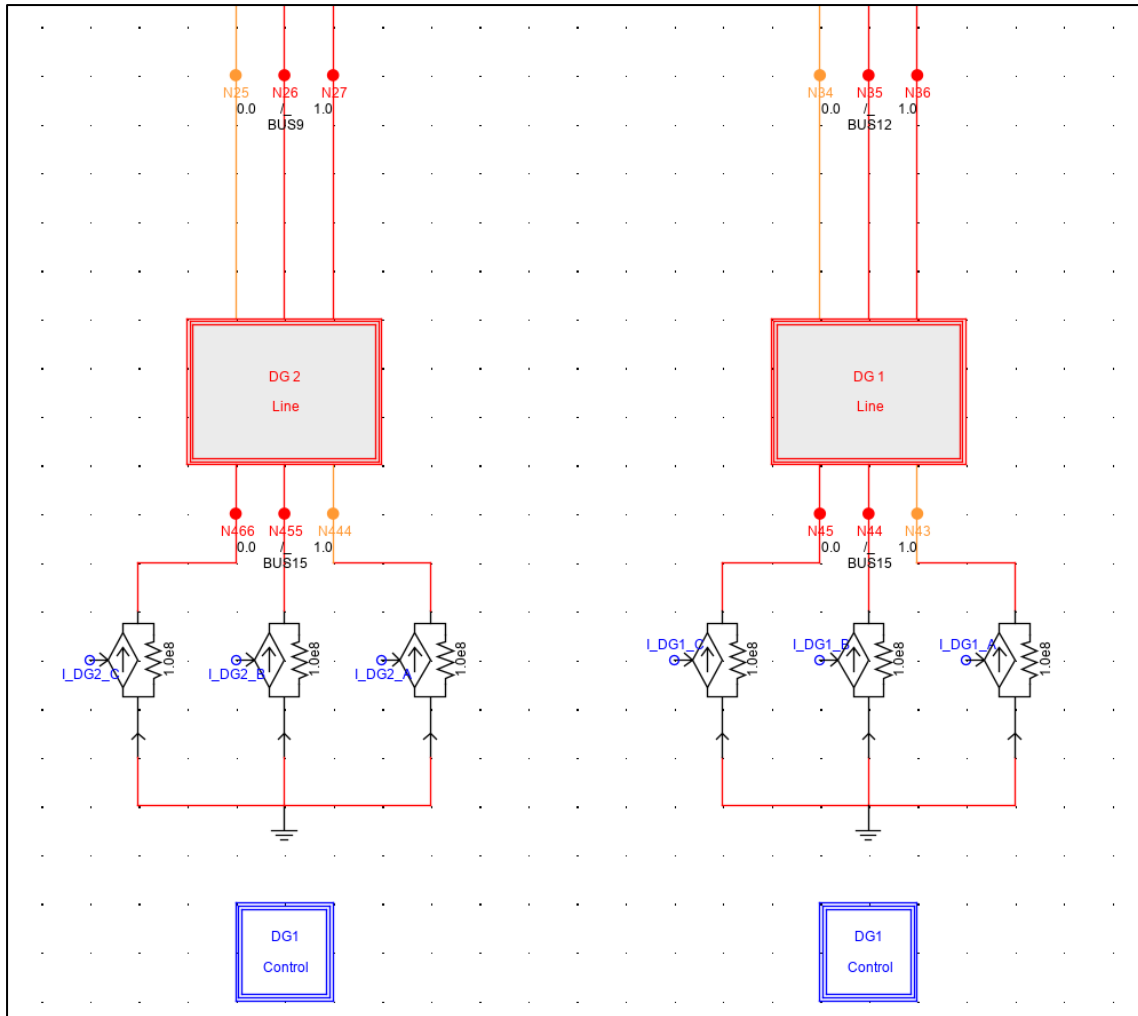


Εικόνα 5.3: Μοντελοποίηση γραμμής διανομής R23 του νησιού.

Σχετικά με τις γραμμές διανομής, επιλέχθηκε το αναλυτικό μοντέλο ώστε να προσομοιώνονται και τα χαρακτηριστικά μηδενικής ακολουθίας των καλωδίων. Η μελέτη προστασίας που πραγματοποιείται αναφέρεται στην γραμμή διανομής R23, που αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.3, επομένως στο τέλος κάθε Ζώνης προστασίας έχουν τοποθετηθεί οι συνιστώσες που προσομοιώνουν τα βραχυκυκλώματα. Η υπό μελέτη γραμμή διανομής, όπως σχεδιάστηκε στο RSCAD αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.3.

5.1.1.3 Μοντέλο μονάδων ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκού και αποθήκευσης

Ο πλέον διαδεδομένος τύπος ανεμογεννητριών ως προς τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους, είναι ο τύπος IV, δηλαδή η συνολική ισχύς της ανεμογεννήτριας εγχέεται στο δίκτυο μέσω διατάξεων μετατροπών ισχύος. Επομένως, το φωτοβολταϊκό και αιολικό πάρκο του νησιού υλοποιούνται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Το μοντέλο τέτοιων μονάδων για μελέτες βραχυκυκλωμάτων διατυπώθηκε στην ενότητα 3.4. Ως προς την συμβολή των μονάδων ΑΠΕ στα βραχυκυκλώματα και την στήριξη της τάσης, επειδή οι γραμμές έχουν έντονα ωμικό χαρακτήρα επιλέχθηκε να δίνεται προτεραιότητα στην ενεργό ισχύ και στην επιπλέον έγχυση άεργου ισχύος έως ότου οι αντιστραφείς αγγίξουν την ονομαστική τους ισχύ. Σχετικά με τον συγχρονισμό της τάσης της πηγής με αυτή του δικτύου, χρησιμοποιείται ένα PLL (Phase-Locked Loop).

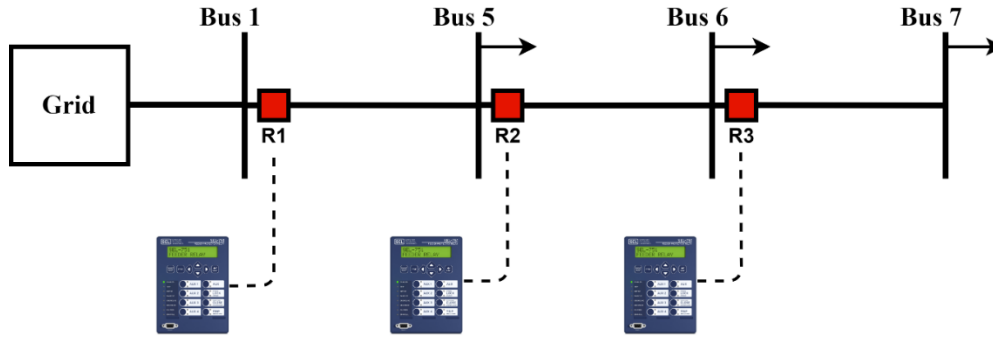


Σχήμα 5.2: Μοντέλα μονάδων φωτοβολταϊκού και αιολικού πάρκου.

Τέλος, η μονάδα αποθήκευσης τεχνολογίας μπαταριών σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει είτε αυτόνομα ως μοναδική πηγή ή σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες μονάδες (γεννήτρια, Α/Π, Φ/Β) έχοντας πλήρη έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος. Το μοντέλο σύμφωνα με το οποίο σχεδιάστηκε αυτή η μονάδα διατυπώθηκε στην ενότητα 3.5.

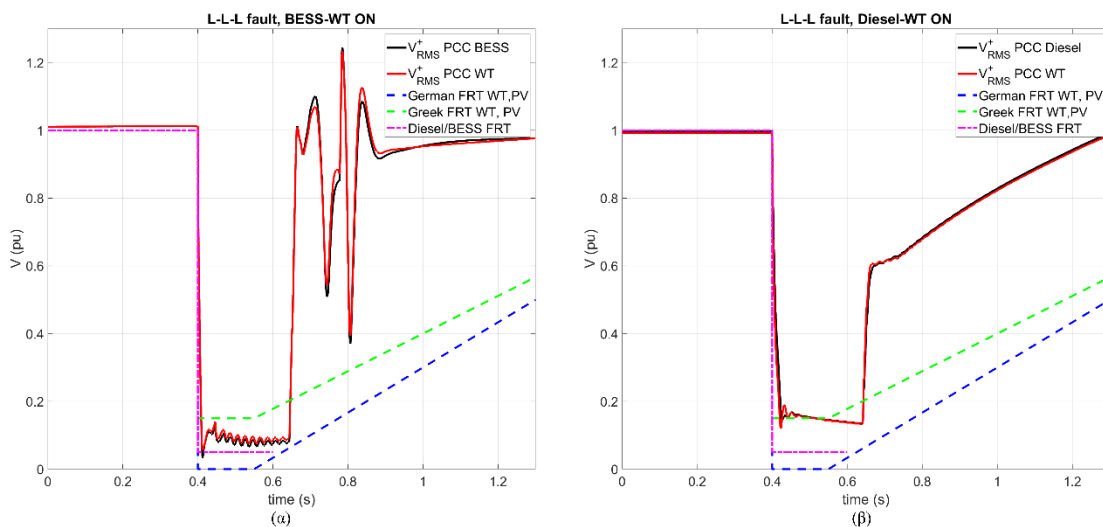
5.2 Ανάπτυξη μελέτης προσαρμοστικού συστήματος προστασίας για το δίκτυο της Αστυπάλεια

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα σχεδιαστεί ένα κεντρικό προσαρμοστικό σύστημα προστασίας για την γραμμή R23. Το απλοποιημένο μονογραμμικό σχέδιο αυτής της γραμμής φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού των ιδιοτήτων της μελετώμενης γραμμής προκειμένου να αναπτυχθεί το κατάλληλο σχέδιο προστασίας. Αρχικά, λόγω του γεγονότος ότι στην γραμμή δεν υπάρχει κάποια ΜΔΠ, δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο της τύφλωσης προστασίας και της συμπαθητικής λειτουργίας των Η/Ν. Άρα δεν χρειάζεται περεταίρω διερεύνηση ούτε στην περίπτωση που οι Η/Ν ενδέχεται να απωλέσουν την ευαισθησία τους, ούτε στον σχεδιασμό στοιχείων κατεύθυνσης των Η/Ν. Το κύριο πρόβλημα που παρουσιάζεται σε αυτή την γραμμή είναι οι διαφορετικές στάθμες βραχυκύκλωσης λόγω των πολλών σεναρίων παραγωγής – κατανάλωσης και τη διαφορετική τεχνολογία των ΜΔΠ.



Σχήμα 5.3: Σχήμα προστασίας της μελετώμενης γραμμής R23.

Επίσης, ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος προστασίας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση (FRT). Ειδικά η καμπύλη FRT, είναι εξόχως σημαντική για την σταθερότητα του δικτύου και πρέπει να επιλεχθεί η κατάλληλη, προκειμένου να αποφευχθεί η αποσύνδεση των ΑΠΕ ή της μονάδας μπαταρίας πριν το σύστημα προστασίας εκκαθαρίσει το σφάλμα. Για παράδειγμα, έστω την στιγμή πριν το σφάλμα η ζήτηση καλύπτεται από την γεννήτρια diesel κατά 20% και από το Φ/Β, Α/Π κατά 80%. Αν το σφάλμα διαρκέσει τόσο όσο να αποσυνδεθούν οι ΑΠΕ, μετά την εκκαθάριση του σφάλματος θα έχει παραμείνει η γεννήτρια diesel, η οποία δεν θα μπορεί να ανταπεξέλθει στην ζήτηση, με συνέπεια την μείωση της συχνότητας ή ακόμα και κίνδυνο ολικής διακοπής ρεύματος (blackout).



Σχήμα 5.4: Ενεργός τιμή τάσης θετικής ακολουθίας κατά την διάρκεια τριφασικού σφάλματος στις περιπτώσεις (α) όταν είναι ενταγμένη η μονάδα αποθήκευσης και (β) όταν είναι ενταγμένη η μονάδα Diesel.

Η καμπύλη του Ελληνικού Κώδικα ΜΔΝ απαιτεί την αποσύνδεση των ΑΠΕ μετά από χρονικό διάστημα 0.15 s, για βύθιση στα σημεία σύνδεσης των μονάδων διατηρούμενης τιμής τάσης 0.15 αμ. Από την άλλη, ο Γερμανικός Κώδικας απαιτεί την αποσύνδεση μετά από ίσο χρονικό διάστημα, αλλά για βύθιση με μηδενική διατηρούμενη τιμή τάσης. Στο ηλεκτρικό δίκτυο ενός ΜΔΝ, σε περίπτωση σφάλματος, είναι δυνατόν η τάση να πάρει τιμή μικρότερη της 0.15 αμ, δεδομένου του μικτού μήκους των γραμμών του. Στο Σχήμα 5.4 αποτυπώνονται τα γραφήματα της ενεργού τιμής της τάσης θετικής ακολουθίας των ΣΚΣ των μονάδων που είναι ενταγμένες,

η Ελληνική και Γερμανική καμπύλη FRT, και η απαίτηση παραμονής των ελεγχόμενων μονάδων (Diesel και Αποθήκευσης) σε τριφασικό βραχυκύκλωμα δώδεκα κύκλων. Το γράφημα (α) αναφέρεται όταν η μπαταρία και η Α/Γ είναι ενταγμένες, ενώ στο (β) η συμβατική μονάδα πετρελαίου (Diesel) και η Α/Γ.

Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με την Ελληνική καμπύλη, οι ΑΠΕ θα αποσυνδεθούν άμεσα είτε στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας που η τάση κατά την διάρκεια του σφάλματος είναι περίπου 0.15 αμ ή στην περίπτωση που η κύρια πηγή είναι η μπαταρία που η τάση ανέρχεται περίπου στο 0.10 αμ. Απεναντίας, με την εφαρμογή της Γερμανικής καμπύλης, αν το σφάλμα εκκαθαριστεί πριν το ασφαλές χρονικό διάστημα των 0.2 s, οι μονάδες ΑΠΕ δεν θα αποσυνδεθούν σε κανένα πλάνο λειτουργίας εκ των δύο. Συνεπώς, ο συνδυασμός ενός συστήματος προστασίας που μπορεί να εκκαθαρίζει τα σφάλματα το πολύ σε 0.2 s με την εφαρμογή μιας καμπύλης FRT αντίστοιχης της Γερμανικής αποτελεί μια αξιόπιστη λύση, σύμφωνα με την οποία θα αναπτυχθεί και η παρούσα μελέτη.

5.2.1 Μελέτη βραχυκυκλωμάτων

Για την μελέτη βραχυκυκλωμάτων παραμένουν ανενεργοί οι ψηφιακοί Η/Ν και η μονάδα ελέγχου προσαρμοστικής προστασίας. Αρχικά, εκτελώντας την προσομοίωση του δικτύου του ΜΔΝ στην καρτέλα RunTime του λογισμικού RSCAD εξετάζονται τα σενάρια κανονικής λειτουργίας του υπό συνθήκες μέγιστου φορτίου, προκειμένου να προσδιοριστεί η μέγιστη ένταση ρεύματος φόρτισης κάθε γραμμής διανομής.

Το επόμενο στάδιο είναι η μελέτη βραχυκυκλωμάτων, σύμφωνα με την οποία επηρεάζονται οι τιμές ρύθμισης των στοιχείων υπερέντασης. Συνεπώς, βάσει αυτής της διαδικασίας θα προσδιοριστεί το εύρος των αναμενομένων ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε κάθε ζώνη προστασίας για κάθε πιθανή κατάσταση λειτουργίας.

Το σχήμα σύμφωνα με το οποίο θα αναπτυχθεί η μελέτη βραχυκυκλωμάτων, είναι αυτό που περιεγράφηκε στο εδάφιο 4.5.2. Αρχικά, το ζητούμενο είναι να εξασφαλισθούν αρκετές καταστάσεις σφαλμάτων ώστε να παραχθούν όσο το δυνατόν αξιόπιστα και ολοκληρωμένα αποτελέσματα. Επιπλέον, με τους τύπους σφαλμάτων διφασικό και τριφασικό ρυθμίζονται τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου φάσης και με το διφασικό προς γη και μονοφασικό ρυθμίζονται τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου ουδετέρου. Για το λόγο αυτό καλύπτονται οι ακόλουθες περιπτώσεις.

- **Καταστάσεις παραγωγής:** Καθώς το δίκτυο σχεδιάζεται να έχει ευέλικτη λειτουργία, δημιουργήθηκαν 12 διαφορετικές καταστάσεις σύνδεσης των μονάδων. Οι εν λόγω περιπτώσεις ένταξης μονάδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.
- **Καταστάσεις διακοπών διασύνδεσης:** Δεδομένου ότι το ΜΔΝ δεν είναι τόσο ισχυρό όσο ένα τυπικό δίκτυο διανομής, τα ρεύματα σφάλματος σε αρκετές περιπτώσεις έχουν χαμηλή τιμή. Επιπλέον, έχοντας κλειστούς τους διακόπτες διασύνδεσης μεταξύ των κύριων γραμμών διανομής, προκύπτουν διαίρετες ρεύματος με αποτέλεσμα σε περιπτώσεις σφαλμάτων να ρέουν μειωμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης που μπορεί να είναι και στα όρια αυτών της κανονικής λειτουργίας. Συνεπώς, λόγω αυτών των συνθηκών στην κανονική λειτουργία του δικτύου οι διακόπτες αυτών των γραμμών θα παραμένουν ανοιχτοί.

- **Ζώνες προστασίας:** Στην υπό μελέτη γραμμή υπάρχουν 4 ζυγοί, άρα προκύπτουν 3 ζώνες προστασίας, στο τέλος της κάθε μίας εκτελούνται τα προγραμματισμένα σφάλματα.
- **Ηλεκτρικά σφάλματα:** Για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων, εκτελούνται στο τέλος των τριών ζωνών προστασίας, τέσσερα σφάλματα (Μονοφασικό, διφασικό, διφασικό προς γη, τριφασικό).
- **Αντίσταση σφάλματος:** Επιλέχθηκαν δύο τυπικές τιμές αντίστασης σφάλματος ή γης, $R_f = 0.5 \Omega$ και $R_f = 10 \Omega$.

Πίνακας 5.1: Περιπτώσεις καταστάσεων σύνδεσης μονάδων του νησιού.

Case G-L	Diesel	WT	PV	BESS
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	OFF	OFF
3	ON	ON	ON	OFF
4	ON	ON	ON	ON
5	ON	ON	OFF	ON
6	ON	OFF	OFF	ON
7	ON	OFF	ON	ON
8	ON	OFF	ON	OFF
9	OFF	OFF	OFF	ON
10	OFF	OFF	ON	ON
11	OFF	ON	OFF	ON
12	OFF	ON	ON	ON

Για την μελέτη βραχυκυκλωμάτων αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στην ενότητα 4.5.2. Αυτό το πρόγραμμα αλληλεπιδρά με δύο αρχεία δεδομένων (input.csv και output.csv). Το αρχείο input.csv αποτελεί είσοδο στο πρόγραμμα και αυτό περιέχει δεδομένα για τους ζυγούς που πρόκειται να γίνουν τα σφάλματα και τις διάφορες τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών προς καταγραφή (π.χ. Ρεύμα RMS και μηδενικής ακολουθίας της αντίστοιχης γραμμής, τάση θετικής ακολουθίας στο ΣΚΣ κάθε ΜΔΠ κ.α.). Οι τιμές εισόδου φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Μεγέθη που περιλαμβάνει το αρχείο δεδομένων εισόδου.

Σημείο σφάλματος	$I_{f,abc,prim}^{RMS} (A)$	$I_{f,prim}^{RMS 0} (A)$	$I_{f,abc,sec}^{RMS} (A)$	$I_{f,sec}^{RMS 0} (A)$	$V_{ΜΔΝ,ΣΚΣ}^+ (pu)$
Bus 5	$I_{L1,a}, I_{L1,b}, I_{L1,c}$	I_{L1}^0	–	–	$V_D^+, V_{BESS}^+, V_{WT}^+, V_{pv}^+$
Bus 6	$I_{L2,a}, I_{L2,b}, I_{L2,c}$	I_{L2}^0	$I_{L1,a}, I_{L1,b}, I_{L1,c}$	I_{L1}^0	$V_D^+, V_{BESS}^+, V_{WT}^+, V_{pv}^+$
Bus 7	$I_{L3,a}, I_{L3,b}, I_{L3,c}$	I_{L3}^0	$I_{L2,a}, I_{L2,b}, I_{L2,c}$	I_{L2}^0	$V_D^+, V_{BESS}^+, V_{WT}^+, V_{pv}^+$

Το δεύτερο αρχείο (output.csv) αποτελεί την έξοδο της εκτέλεσης της προσομοίωσης, δηλαδή εμπεριέχει όλα τα παραγόμενα δεδομένα της διαδικασίας εκτέλεσης βραχυκυκλωμάτων.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτός ο όγκος των εξαγόμενων δεδομένων, αναφέρεται ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σημειώθηκαν συνολικά 288 σφάλματα και συλλέχθηκαν στο αρχείο output.csv 3456 τιμές ηλεκτρικών μεγεθών. Επίσης, το γεγονός ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση ο χρόνος εκτέλεσης είναι περίπου 21 λεπτά, αποδεικνύει την καθοριστική σημασία του προγράμματος στην επιτάχυνση της μελέτης. Τέλος, δεδομένου ότι η προσομοίωση εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, πρέπει να λαμβάνεται μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των μεταβατικών καταστάσεων, ώστε το επόμενο σφάλμα να εκτελείται σε ευσταθές και ισορροπημένο σύστημα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαδικασίας εκτέλεσης βραχυκυκλωμάτων, ερευνώνται τα ελάχιστα και τα μέγιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης, βάσει των οποίων θα καθοριστούν οι τιμές του ρεύματος διέγερσης και χρονικού πολλαπλασιαστή $I_{pr,i}^k$, TD_i^k αντίστοιχα. Για την ρύθμιση στοιχείων φάσης, υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή ρεύματος της προστατευόμενης ζώνης προστασίας και αυτής που παρέχει επικουρική προστασία μεταξύ του διφασικού και τριφασικού σφάλματος για κάθε μία περίπτωση κατάστασης δικτύου. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται μεταξύ των τιμών του μονοφασικού και διφασικού προς γη σφάλματος, προκειμένου να οριστούν οι καμπύλες αντιστρόφου χρόνου ουδετέρου. Ύστερα, επειδή οι διαθέσιμοι H/N υποστηρίζουν τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων, οι δώδεκα καταστάσεις του Πίνακα 5.1 ομαδοποιούνται σε τέσσερις ανάλογα με την στάθμη και την ένταση βραχυκύκλωσης. Τα αποτελέσματα της μελέτης συγκεντρώνονται στους Πίνακα 5.3 – Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων φάσης πρωτεύουσας προστασίας.

Case G-L	SG	$I_{L1,pr}^{min}$ (A)	$I_{L2,pr}^{min}$ (A)	$I_{L3,pr}^{min}$ (A)	$I_{L1,pr}^{max}$ (A)	$I_{L2,pr}^{max}$ (A)	$I_{L3,pr}^{max}$ (A)
9,10,11,12	1	75.1	76.6	74.9	111.7	116.4	117.3
1,2,3	2	233.9	198.4	189.2	243.9	221.4	212.6
6,7,8	3	261.5	245.5	234.8	300.3	295.5	287.1
4,5	4	343.6	307.6	310.8	373.9	323.9	313.7

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ανάλυσης μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων φάσης επικουρικής προστασίας.

Case G-L	SG	$I_{L1,sec}^{min}$ (A)	$I_{L2,sec}^{min}$ (A)	$I_{L1,sec}^{max}$ (A)	$I_{L2,sec}^{max}$ (A)
9,10,11,12	1	74.0	75.9	109.9	115.6
1,2,3	2	199.4	189.4	222.9	213.7
6,7,8	3	248.2	236.8	292.8	285.9
4,5	4	307.7	309.2	331.9	312.0

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων ουδετέρου πρωτεύουσας προστασίας.

Case G-L	SG	$I_{N,L1,pr}^{min}$ (A)	$I_{N,L2,pr}^{min}$ (A)	$I_{N,L3,pr}^{min}$ (A)	$I_{N,L1,pr}^{max}$ (A)	$I_{N,L2,pr}^{max}$ (A)	$I_{N,L3,pr}^{max}$ (A)
9,10,11,12	1	136.1	126.1	121.2	196.1	186.1	181.2
1,2,3	2	240.0	197.4	163.5	310.0	267.4	233.5
6,7,8	3	310.0	213.7	177.3	410.0	313.7	277.3
4,5	4	422.3	300.1	243.1	552.3	430.1	373.1

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης μέγιστων/ελάχιστων ρευμάτων ουδετέρου επικουρικής προστασίας.

Case G-L	SG	$I_{N,L1,sec}^{min}$ (A)	$I_{N,L2,sec}^{min}$ (A)	$I_{N,L1,sec}^{max}$ (A)	$I_{N,L2,sec}^{max}$ (A)
9,10,11,12	1	127.7	121.1	187.7	181.1
1,2,3	2	200.3	164.1	270.3	234.1
6,7,8	3	215.0	176.3	315.0	276.3
4,5	4	301.1	244.5	421.1	364.5

5.2.2 Μελέτη βέλτιστου καθορισμού ομάδων ρυθμίσεων των Η/Ν

5.2.2.1 Ρύθμιση στοιχείων φάσης 51P (Phase time overcurrent)

Για τον βέλτιστο καθορισμό των ομάδων ρυθμίσεων των συσκευών προστασίας, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο προβλημάτων βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στο εδάφιο 4.5.3. Η τυποποιημένη χαρακτηριστική καμπύλη υπερέντασης – αντιστρόφου χρόνου των Η/Ν της εξεταζόμενης γραμμής διανομής επιλέχθηκε η ‘IEC FR short time inverse’ του Πίνακα 2.1 με χαρακτηριστικές τιμές A, B, C ως:

$$A_k = 0,05, B_k = 0,04, C_k = 0 \quad (5.1)$$

Το ρεύμα διέγερσης, ο χρονικός πολλαπλασιαστής, ο χρόνος λειτουργίας και ο χρόνος συντονισμού κύριας και επικουρικής προστασίας οριοθετήθηκαν σύμφωνα με τις ανισότητες (5.4) (5.5) (5.6) (5.7) αντίστοιχα. Επιπλέον, ο λόγος μετασχηματισμού του Μ/Ε που επιλέχθηκε σύμφωνα με την σχέση (5.3).

$$\begin{aligned} I_{pu,R1}^{min} &= 30 \text{ A} \\ I_{pu,R2}^{min} &= 25 \text{ A} \\ I_{pu,R3}^{min} &= 20 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$CTR = \frac{300}{1} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} 0,10 &\leq I_{pu,R1}^k \leq 1,5 \\ 0,08 &\leq I_{pu,R2}^k \leq 1,5 \\ 0,07 &\leq I_{pu,R3}^k \leq 1,5 \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$0,01 \leq TD_i^k \leq 1,5 \quad (5.5)$$

$$0,05 \leq t_{i,f}^k \leq 0,2 \quad (5.6)$$

$$t_{i,f}^k - t_{j,f}^k \geq 0,05 \quad (5.7)$$

Οι τιμές εισόδου στο πρόβλημα καταγράφονται στον Πίνακα 5.3 και Πίνακα 5.4. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων της μελέτης βραχυκυκλωμάτων ως δεδομένα εισόδου, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές ρύθμισης για τις παραμέτρους των στοιχείων υπερέντασης της μελετώμενης γραμμής εκτελώντας την επαναληπτική διαδικασία και συγκλίνοντας σε τοπικό ελάχιστο το οποίο αποτελεί και την

βέλτιστη λύση. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7 , Πίνακα 5.8 και Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.7: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης φάσης 51P γραμμής διανομής R220.

SG	TD			I_{pu}		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	0,15	0,13	0,08	0,10	0,09	0,07
2	0,26	0,19	0,11	0,10	0,08	0,07
3	0,28	0,20	0,11	0,10	0,08	0,07
4	0,31	0,22	0,12	0,10	0,08	0,07

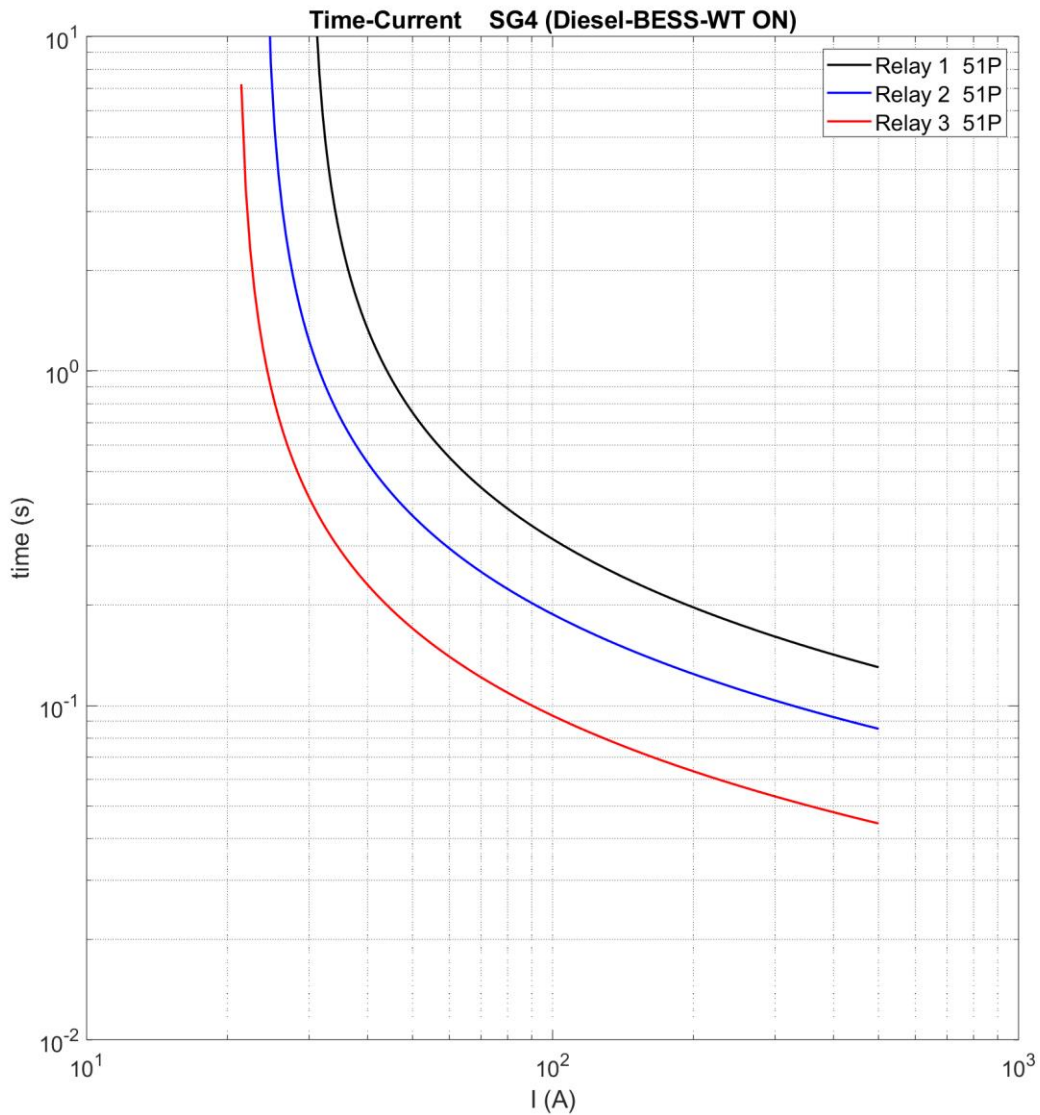
Πίνακας 5.8: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας κύριων προστασιών, στοιχείων 51P.

Κύρια Προστασία						
SG	Χρόνος λειτουργίας για $I_{βρ}^{min}$ (s)			Χρόνος λειτουργίας για $I_{βρ}^{max}$ (s)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	0,197	0,150	0,073	0,119	0,095	0,05
2	0,151	0,110	0,056	0,136	0,097	0,05
3	0,157	0,107	0,055	0,142	0,097	0,05
4	0,152	0,107	0,053	0,142	0,099	0,05

Πίνακας 5.9: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας επικουρικών προστασιών, στοιχείων 51P.

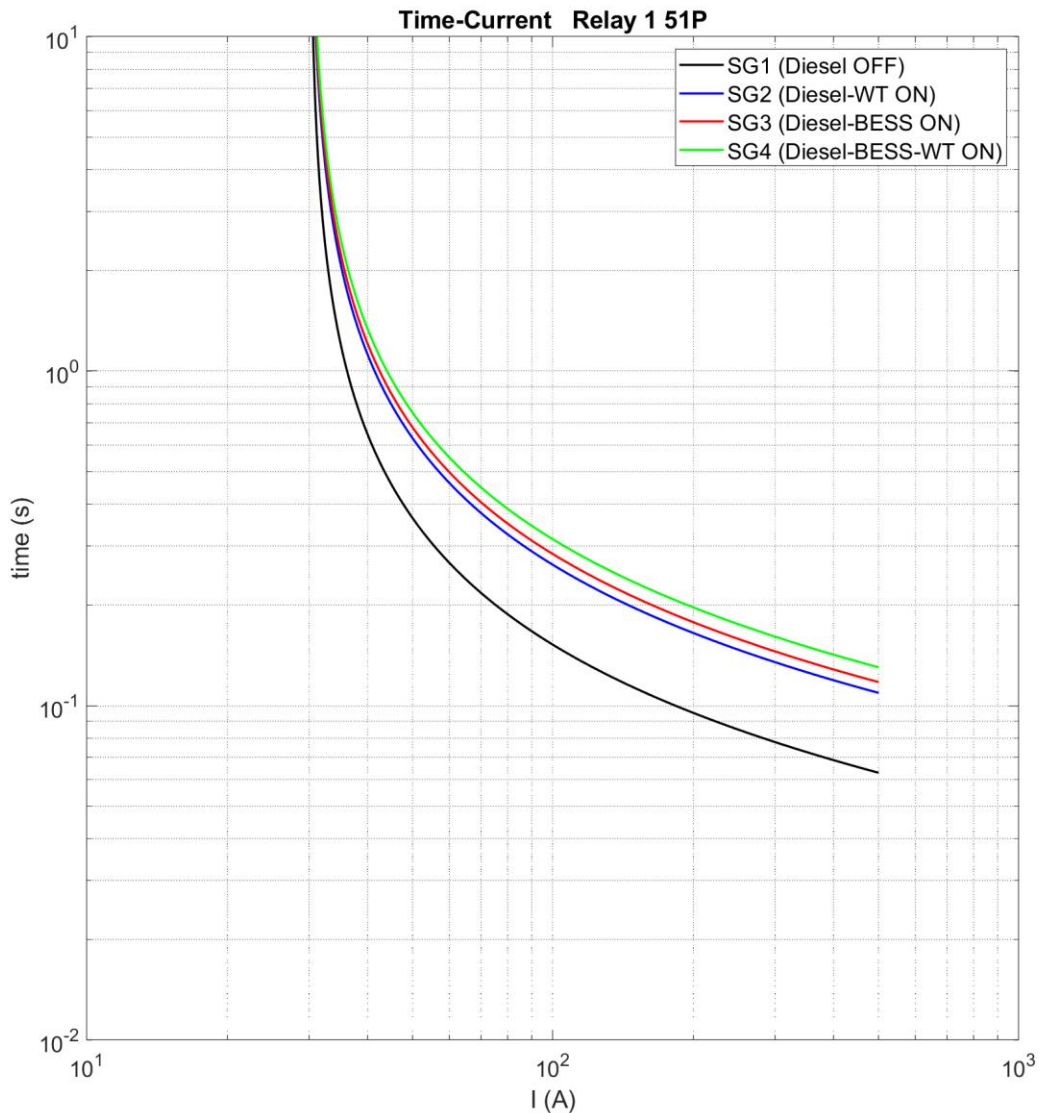
Επικουρική Προστασία				
SG	Χρόνος λειτουργίας για $I_{βρ}^{min}$ (s)		Χρόνος λειτουργίας για $I_{βρ}^{max}$ (s)	
	R1	R2	R1	R2
1	0,200	0,151	0.126	0.100
2	0,165	0,112	0.147	0.100
3	0,161	0,109	0.147	0.100
4	0,159	0,106	0.149	0.100

Συνεπώς, σύμφωνα με τα μεγέθη TD_i^k και I_{pu}^k , μπρούν να ρυθμιστούν τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου των ηλεκτρονόμων. Με την βοήθεια του Σχήματος 5.5 και 5.6 γίνεται ευκολότερη η κατανόηση των χαρακτηριστικών καμπυλών κάθε Η/Ν και της διαβάθμισης των ομάδων ρυθμίσεων. Στο Σχήμα 5.5 αποτυπώνονται οι καμπύλες των τριών Η/Ν για τα στοιχεία 51P της ομάδας ρυθμίσεων 4 (SG4). Αυτή η ομάδα ρυθμίσεων ενεργοποιείται όταν οι περισσότερες ΜΔΠ είναι ενταγμένες στο σύστημα (Diesel–BESS–WT ON) και συνεπώς σε περίπτωση σφάλματος παρατελούνται οι υψηλότερες τιμές ρεύματος βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 5.5: Παράδειγμα καμπυλών των στοιχείων 51P των H/N για την ομάδα ρυθμίσεων SG4.

Στο Σχήμα 5.6 αποτυπώνονται οι καμπύλες για τα στοιχεία 51P του H/N 1 και γίνονται αντιληπτές οι διαβαθμίσεις στις τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων, υποδηλώνοντας την καθοριστική σημασία της παρουσίας πολλών ομάδων ρυθμίσεων για ένα τέτοιο ηλεκτρικό δίκτυο. Συγκρίνοντας τις δύο ακραίες καμπύλες, προκύπτουν μεγάλες διαφορές στον χρόνο λειτουργίας των H/N. Για παράδειγμα, στην ομάδα ρυθμίσεων SG1, για ρεύμα σφάλματος $I_{\beta\rho} = 75 \text{ A}$, ο χρόνος λειτουργίας ανέρχεται στα $t_{H/N} = 0.2 \text{ s}$, ενώ στην ομάδα ρυθμίσεων SG4, ο H/N διεγείρεται στον ίδιο χρόνο σε ρεύμα σφάλματος τιμής $I_{\beta\rho} = 200 \text{ A}$.



Σχήμα 5.6: Καμπύλη H/N I για τις τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων.

5.2.2.2 Ρύθμιση στοιχείων υπερέντασης ουδέτερου 51N (neutral time overcurrent)

Το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων που τυγχάνουν στα ΔΔ είναι κυρίως μονοφασικά. Η ρύθμιση τέτοιων στοιχείων είναι εξίσου σημαντική με αυτή της φάσης, διότι αυτή η ομάδα στοιχείων επιδεικνύει μεγαλύτερη ευαισθησία από τις άλλες (φάσης και αρνητικής ακολουθίας) κατά την εκδήλωση τέτοιου είδους σφαλμάτων. Για τον βέλτιστο καθορισμό των ομάδων ρυθμίσεων, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τα στοιχεία φάσης. Η ρύθμιση των συγκεκριμένων στοιχείων υπερέντασης γίνεται βάσει των τιμών ρεύματος μηδενικής ακολουθίας που μετρήθηκαν στα σφάλματα γης.

Η τυποποιημένη χαρακτηριστική καμπύλη υπερέντασης – αντιστρόφου χρόνου των H/N για την ρύθμιση των στοιχείων ουδέτερου, επιλέχθηκε η 'IEC FR short time inverse' όπως και στα στοιχεία φάσης. Ο M/E , τα όρια για τον χρονικό πολλαπλασιαστή, ο χρόνος λειτουργίας και ο χρόνος συντονισμού κύριας και επικουρικής προστασίας, επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$CTR = \frac{300}{1} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} I_{pu,R1}^{min} &= 25 A \\ I_{pu,R2}^{min} &= 20 A \\ I_{pu,R3}^{min} &= 15 A \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} 0,08 &\leq I_{pu,R1}^k \leq 1,5 \\ 0,07 &\leq I_{pu,R2}^k \leq 1,5 \\ 0,05 &\leq I_{pu,R3}^k \leq 1,5 \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$0,01 \leq TD_i^k \leq 1,5 \quad (5.11)$$

$$0,05 \leq t_{i,f}^k \leq 0,2 \quad (5.12)$$

$$t_{i,f}^k - t_{j,f}^k \geq 0,05 \quad (5.13)$$

Οι τιμές εισόδου στο πρόβλημα καταγράφονται στον Πίνακα 5.5 και Πίνακα 5.6. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων των ροών φορτίου και μελέτης βραχυκυκλωμάτων ως δεδομένα εισόδου, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές ρύθμισης για τις παραμέτρους των στοιχείων υπερέντασης της μελετώμενης γραμμής, εκτελώντας την επαναληπτική διαδικασία και συγκλίνοντας σε τοπικό ελάχιστο. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10, Πίνακα 5.11, Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.10: Ρυθμίσεις στοιχείων υπερέντασης φάσης 51N γραμμής διανομής R230.

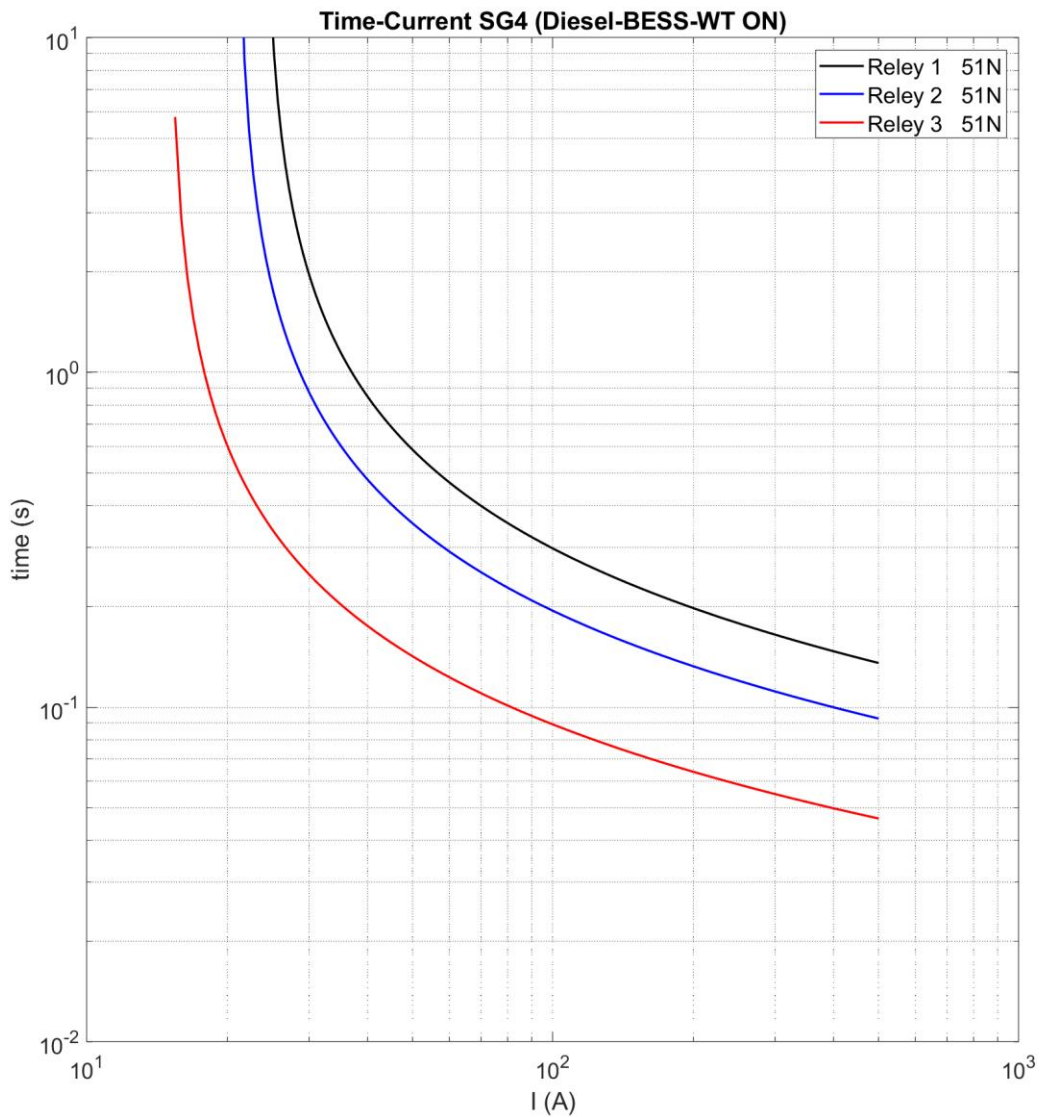
SG	TD			I_{pu}		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	0,25	0,18	0,10	0,08	0,07	0,05
2	0,29	0,21	0,12	0,08	0,07	0,05
3	0,31	0,22	0,12	0,08	0,07	0,05
4	0,35	0,25	0,14	0,08	0,07	0,05

Πίνακας 5.11: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας κύριων προστασιών, στοιχείων 51N.

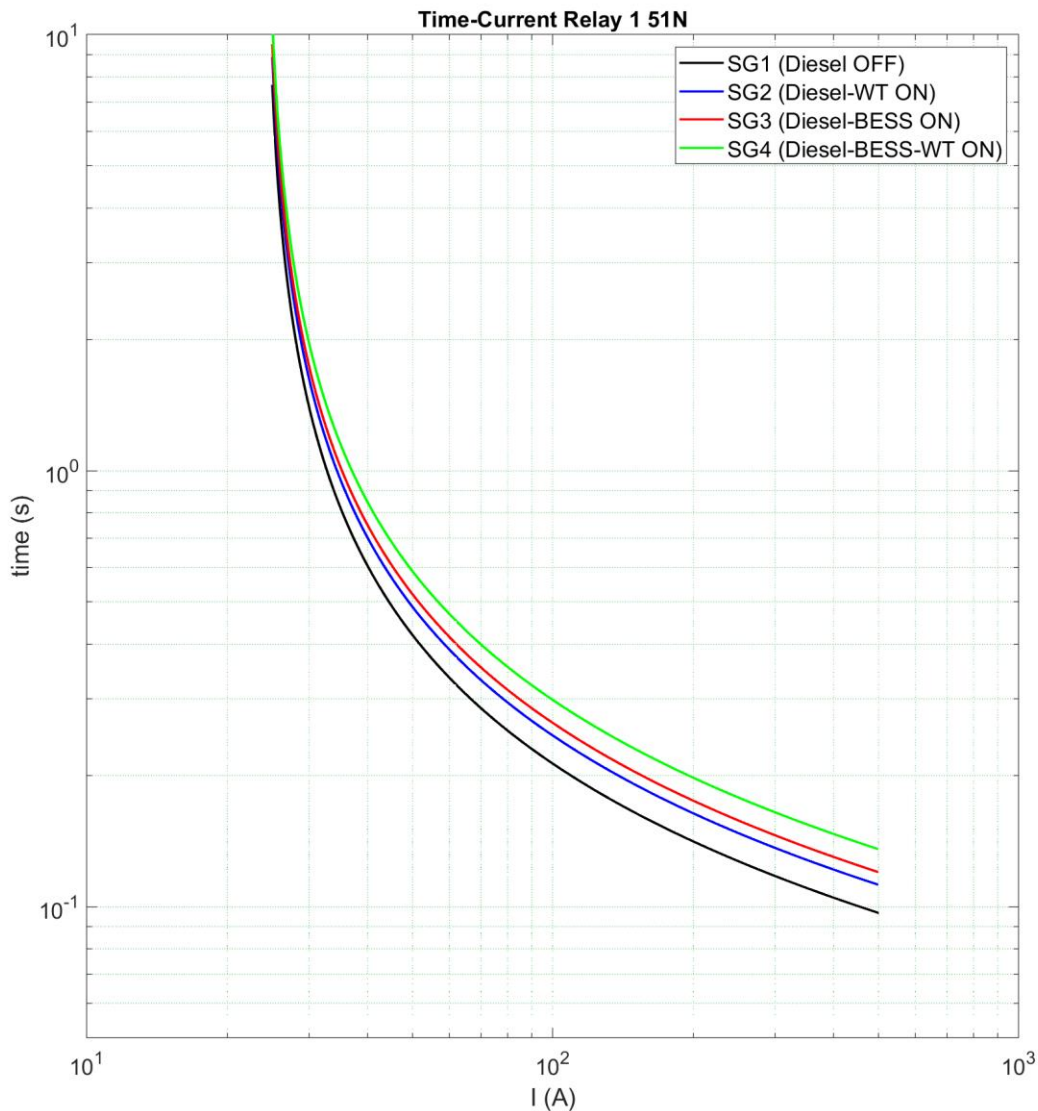
Κύρια Προστασία						
SG	Χρόνος λειτουργίας για $I_{\beta\rho}^{min}$ (s)			Χρόνος λειτουργίας για $I_{\beta\rho}^{max}$ (s)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	0,178	0,121	0,060	0,145	0,099	0,050
2	0,153	0,108	0,058	0,136	0,095	0,050
3	0,146	0,111	0,060	0,131	0,095	0,050
4	0,144	0,108	0,058	0,131	0,094	0,050

Πίνακας 5.12: Μέγιστοι και ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας επικουρικών προστασιών, στοιχείων 51N.

Επικουρική Προστασία				
SG	Χρόνος λειτουργίας για $I_{\beta\rho}^{min}$ (s)		Χρόνος λειτουργίας για $I_{\beta\rho}^{max}$ (s)	
	R1	R2	R1	R2
1	0,185	0,123	0,149	0,100
2	0,166	0,118	0,145	0,100
3	0,172	0,112	0,145	0,100
4	0,165	0,117	0,144	0,100



Σχήμα 5.7: Παράδειγμα καμπλών των στοιχείων 51N των H/N για την ομάδα ρυθμίσεων 4.



Σχήμα 5.8: Καμπύλη στοιχείου 51N H/N I για τις τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων.

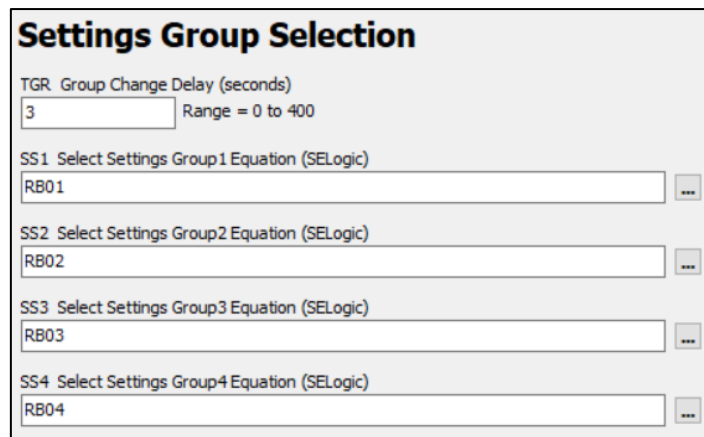
5.2.3 Ρύθμιση ελεγκτή και των ηλεκτρονόμων

Σε αυτό το στάδιο ενεργοποιείται η κεντρική μονάδα ελέγχου και οι H/N προστασίας. Πιο αναλυτικά, για την ρύθμιση της μονάδας ελέγχου χρησιμοποιείται το λογισμικό acSELErator Rtac® στο οποίο ρυθμίζεται το πρωτόκολλο επικοινωνίας με τον προσομοιωτή και τους ηλεκτρονόμους. Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής συλλέγει τις καταστάσεις των διακοπών ισχύος των μονάδων και αντιλαμβάνεται ποιες μονάδες είναι ενταγμένες κάθε στιγμή. Συνεπώς, προγραμματίζονται οι κανόνες που καθορίζουν ποια ομάδα ρυθμίσεων των H/N αντιστοιχεί σε κάθε κατάσταση. Αναλυτικά, οι κανόνες που προγραμματίστηκαν στον ελεγκτή αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.13 και ρυθμίστηκαν στο λογισμικό acSELErator Rtac®.

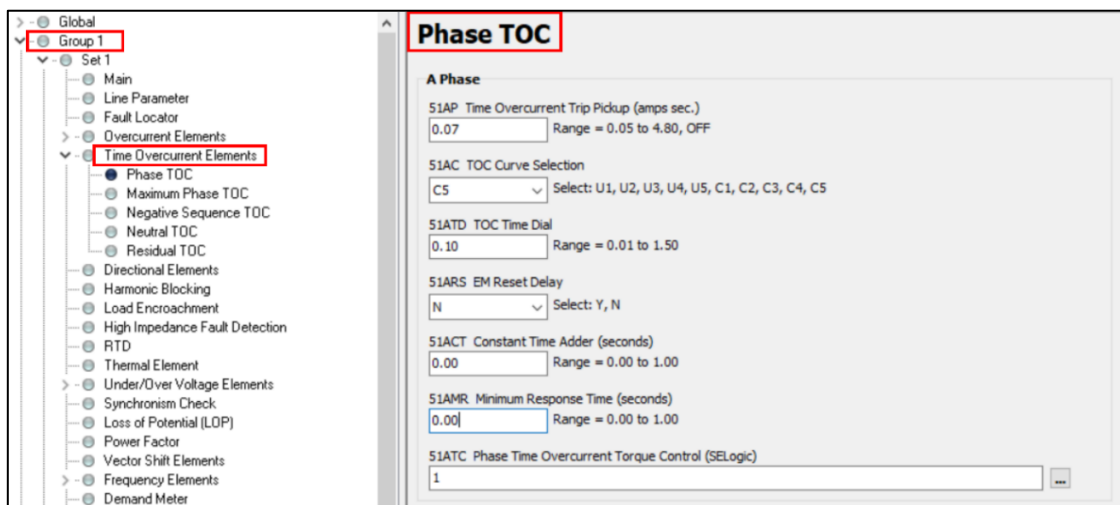
Πίνακας 5.13: Κανόνες ρύθμισης ενεργών ομάδων ρυθμίσεων.

SG	Rule
1	$D = OFF$
2	$D = ON \ \& \ BESS = OFF \ \& \ (PV = OFF \ \ WT = ON)$
3	$D = ON \ \& \ WT = OFF \ \& \ (BESS = ON \ \ PV = ON)$
4	$D = ON \ \& \ WT = ON \ \& \ BESS = ON$

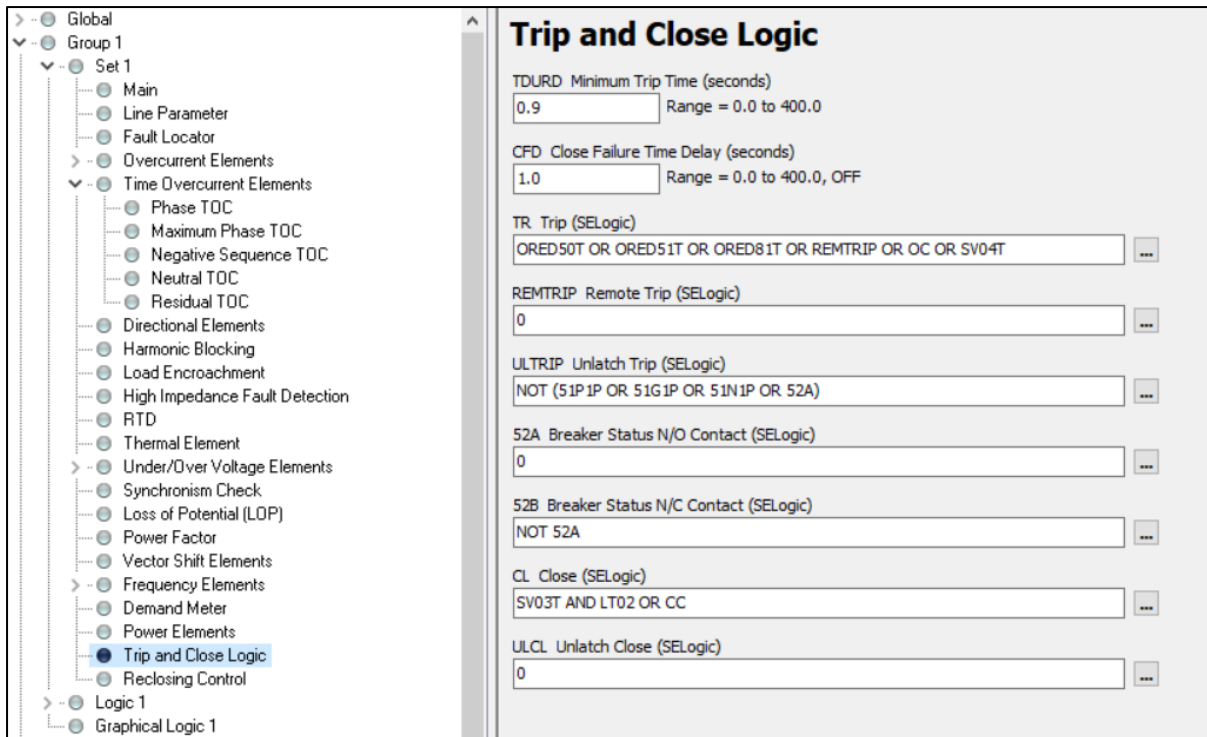
Οι ηλεκτρονόμοι ρυθμίζονται μέσω του λογισμικού AcSELerator QuickSet®. Αρχικά, προσαρμόζονται τα στοιχεία που καθορίζουν την ενεργή ομάδα ρυθμίσεων και χρησιμοποιούνται οι δυαδικές ψευδομεταβλητές RB01-RB04 όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.4. Σχετικά με την ρύθμιση των καμπυλών, ενεργοποιήθηκαν τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου φάσης στα οποία ορίστηκαν οι κατάλληλες τιμές $I_{pu,i}^k$ και TD_i^k . Τέλος, εφόσον είναι ενεργοποιημένα μόνο τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου, ρυθμίζονται οι κανόνες για την λειτουργία της προστασίας αντίστοιχα. Η Εικόνα 5.5 απεικονίζει μια ενδεικτική καρτέλα ρύθμισης κανόνα για τον H/N.



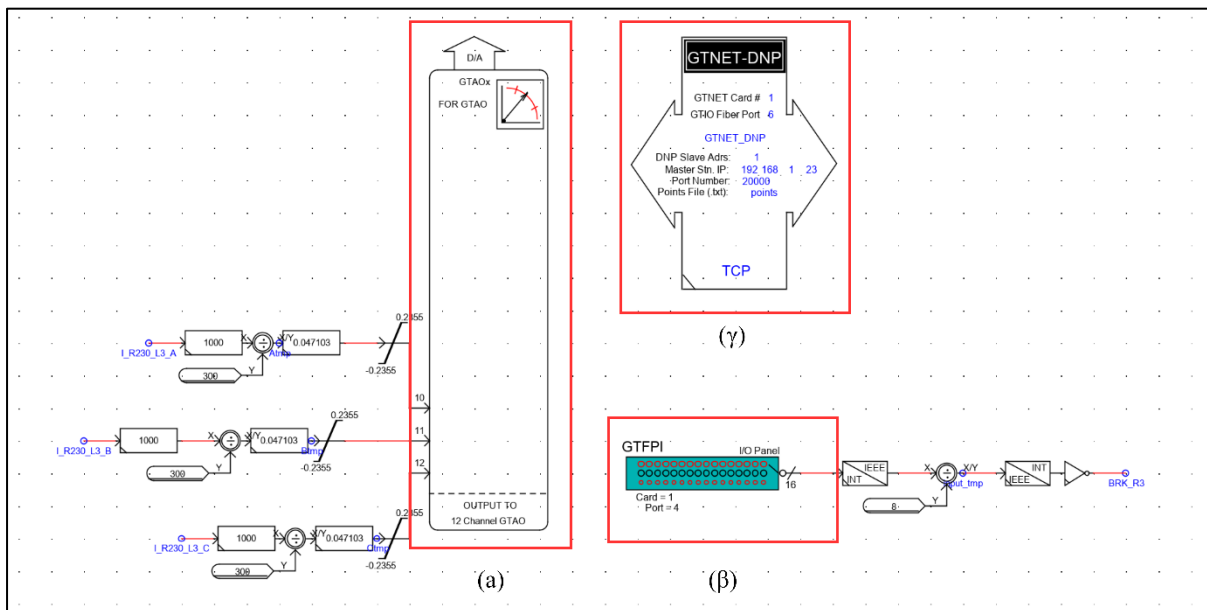
Εικόνα 5.4: Προσαρμογή των ομάδων ρυθμίσεων του H/N SEL-751 στο λογισμικό AcSELerator QuickSet®.



Εικόνα 5.5: Προσαρμογή ρυθμίσεων των στοιχείων υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου φάσης των τεσσάρων ομάδων ρυθμίσεων.



Εικόνα 5.6: Προσαρμογή λογικής ενεργοποίησης του Η/Ν σύμφωνα με τα στοιχεία υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου.



Σχήμα 5.9: Συνιστώσες RSCAD για επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές, (α) αναλογική κάρτα εξόδου, (β) ψηφιακή κάρτα εισόδου GTFPI, (γ) GTNET κάρτα επικοινωνίας βάσει του DNP 3.0.

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί στην πράξη η ορθή λειτουργία του επικοινωνιακού συστήματος και η ορθή προσαρμογή των ομάδων ρυθμίσεων στους Η/Ν, πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες δοκιμές. Όταν αλλάζει η κατάσταση των διακοπών ένταξης των μονάδων, ο ελεγκτής προσαρμόζει τις κατάλληλες ρυθμίσεις στους Η/Ν σύμφωνα με τους κανόνες που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.13. Στο Σχήμα 5.10, στο οποίο αποτυπώνεται το αρχείου καταγραφής (logging file) του ελεγκτή, διαπιστώνεται η ορθή μετάβαση της ομάδας

ρυθμίσεων έπειτα από αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Την χρονική στιγμή 11:12:41 αποσυνδέεται η μονάδα Diesel και την χρονική στιγμή 11:12:46 ενεργοποιείται σωστά η ομάδα ρυθμίσεων SG1 με ταυτόχρονη απενεργοποίηση της προηγούμενης ομάδας SG3.

Details	Time Stamp	Priority	Category	Tag Name	Message	Ack Time Stamp	Origin
[open]	2021-10-07 11:12:46.400			SEL_751_1_850.ANN.SGGGIO36.Ind03.stVal	SG3 deactivated		SEL_RTAC
[open]	2021-10-07 11:12:46.400			SEL_751_1_850.ANN.SGGGIO36.Ind01.stVal	SG1 activated		SEL_RTAC
[open]	2021-10-07 11:12:41.001			DIESEL.stVal	Diesel OFF		SEL_RTAC
[open]	2021-10-07 11:12:26.500			SEL_751_1_850.ANN.SGGGIO36.Ind03.stVal	SG3 activated		SEL_RTAC
[open]	2021-10-07 11:12:26.500			SEL_751_1_850.ANN.SGGGIO36.Ind01.stVal	SG1 deactivated		SEL_RTAC
[open]	2021-10-07 11:12:21.001			BES.stVal	BESS ON		SEL_RTAC

Σχήμα 5.10: Καταγραφή αλλαγής ομάδας ρυθμίσεων στον ελεγκτή (log file).

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών του μελετώμενου μη διασυνδεδεμένου συστήματος, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας.

5.3.1 Αποτελέσματα δοκιμής σφάλματος μεταξύ φάσεων

Έχοντας ενεργοποιήσει τις συνιστώσες της προσαρμοστικής προστασίας, εκτελείται η διαδικασία βραχυκυκλωμάτων. Οι χρόνοι λειτουργίας των τριών H/N παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Χρόνοι λειτουργίας H/N όπως προέκυψαν από το μοντέλο βελτιστοποίησης και από την εκτέλεση της προσομοίωσης αντίστοιχα.

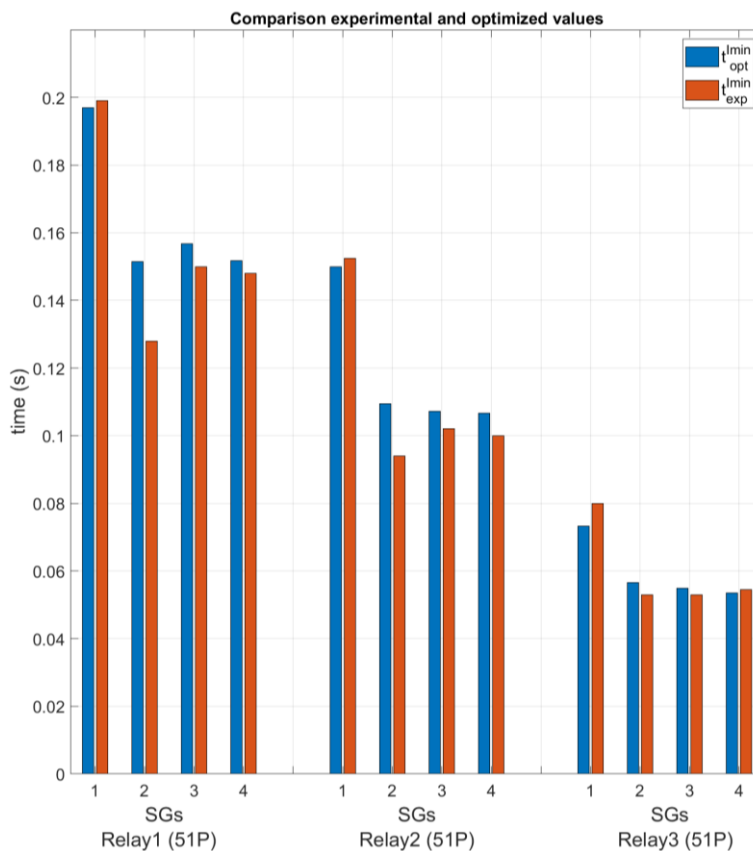
H/N	SG	Κύρια Προστασία				Επικουρική	
		$t_{opt}^{I_{min}}$ (s)	$t_{opt}^{I_{max}}$ (s)	$t_{lab}^{I_{min}}$ (s)	$t_{lab}^{I_{max}}$ (s)	$t_{opt}^{I_{min}}$ (s)	$t_{lab}^{I_{min}}$ (s)
1	1	0.197	0.119	0.199	0.125	0.200	0.206
	2	0.151	0.136	0.128	0.126	0.165	0.142
	3	0.157	0.143	0.150	0.140	0.161	0.159
	4	0.152	0.142	0.148	0.131	0.159	0.157
2	1	0.150	0.09	0.152	0.114	0.151	0.161
	2	0.110	0.097	0.094	0.090	0.112	0.098
	3	0.107	0.097	0.102	0.106	0.109	0.107
	4	0.107	0.099	0.100	0.077	0.106	0.104
3	1	0.073	0.050	0.080	0.055	—	—
	2	0.057	0.050	0.053	0.048	—	—
	3	0.055	0.050	0.053	0.050	—	—
	4	0.054	0.050	0.055	0.049	—	—

Πιο συγκεκριμένα, στις τέσσερις επιμέρους στήλες της γενικής στήλης ‘Κύρια προστασία’ παρουσιάζονται οι χρόνοι λειτουργίας για το ελάχιστο και μέγιστο ρεύμα σφάλματος κάθε ομάδας ρυθμίσεων όπως αυτά υπολογίστηκαν, (α) από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και (β) από τις πειραματικές τιμές εργαστήριο. Σχετικά με την δευτερεύουσα προστασία,

παρουσιάζονται οι χρόνοι λειτουργίας για τις περιπτώσεις ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης, όπως υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο και μετρήθηκαν από την εκτέλεση της προσομοίωσης. Τέλος, ο H/N 3 δεν παρέχει επικουρική προστασία σε κάποια συνιστώσα του συστήματος και συνεπώς δεν υπολογίζεται ο αντίστοιχος χρόνος.

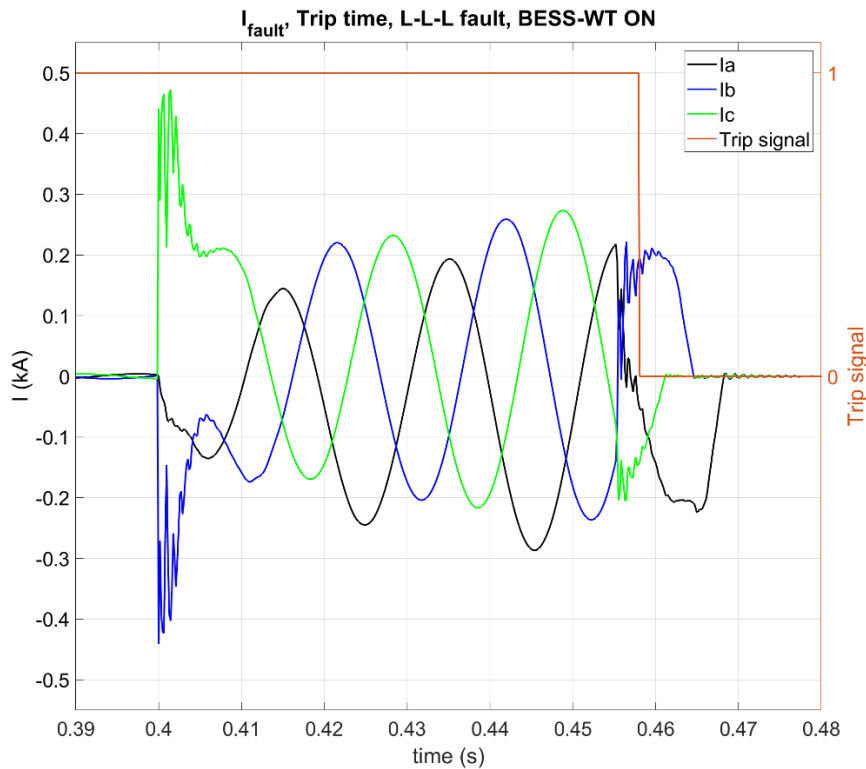
Η παρουσίαση των τιμών του Πίνακα 5.14 γίνονται περισσότερο εποπτική με την βοήθεια του Σχήματος 5.14 και 5.11.

Στο Σχήμα 5.11 γίνεται πιο κατανοητή η διαφορά των θεωρητικών με των πειραματικών αποτελεσμάτων. Όπως αποτυπώνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, ο χρόνος λειτουργίας για κάθε ομάδα ρυθμίσεων και H/N (μπλε ράβδοι) δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφορές με το χρόνο που προέκυψε κατά την διαδικασία της προσομοίωσης (κόκκινοι ράβδοι). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι και για τους τρεις ηλεκτρονόμους, στις ομάδες ρυθμίσεων 2,3 και 4 ο πειραματικός χρόνος είναι ελάχιστα μειωμένος από τον θεωρητικό, ενώ στην ομάδα 1 συμβαίνει το αντίθετο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ΜΔΠ. Πιο αναλυτικά, στις ομάδες ρυθμίσεων 2,3 και 4 στις οποίες λειτουργεί η μονάδα πετρελαίου (σύγχρονη γεννήτρια), ο χρόνος λειτουργίας των ηλεκτρονόμων συμφωνεί με τον χρόνο που η σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει υπομεταβατική και μεταβατική κατάσταση. Έτσι, ο H/N αντιλαμβάνεται λίγο υψηλότερο ρεύμα και λειτουργεί ελάχιστα πιο γρήγορα από το προβλεπόμενο. Στην ομάδα ρυθμίσεων 1 ωστόσο, δεν παρατηρείται μείωση του πειραματικού χρόνου, αφού σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει από την μονάδα μπαταρίας και τις ΑΠΕ, που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος και δεν παρουσιάζουν υπομεταβατική και μεταβατική περίοδο.



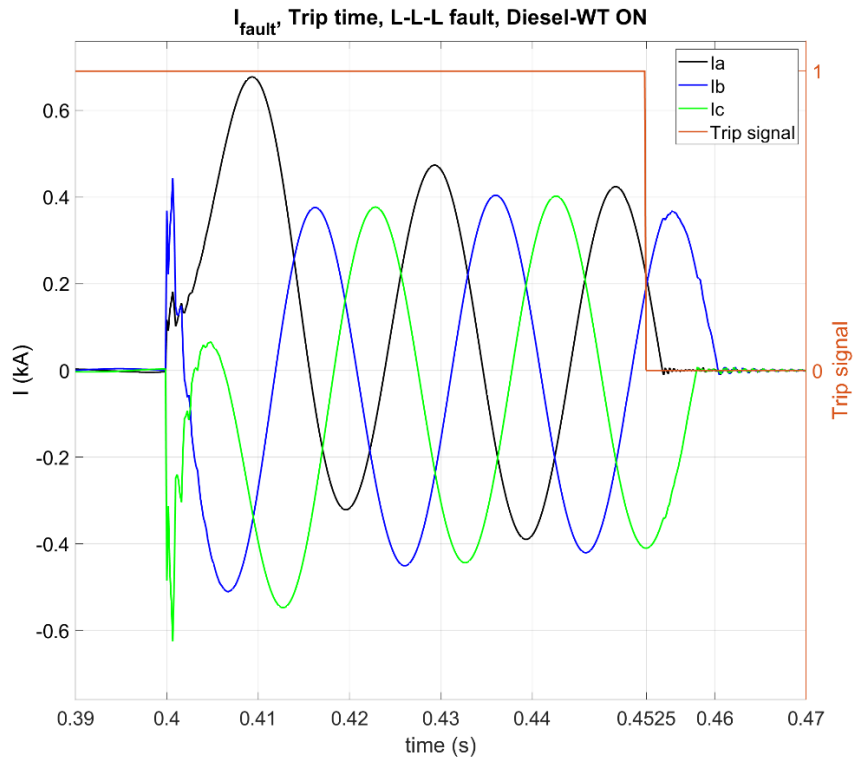
Σχήμα 5.11: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων χρόνων λειτουργίας των τριών H/N προστασίας για κάθε ομάδα ρυθμίσεων.

Η ιδιαιτερότητα αυτή επιβεβαιώνεται στα γραφήματα του Σχήματος 5.12 και 5.13. Στο Σχήμα 5.12, αποτυπώνεται το ρεύμα σφάλματος και ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν στην περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί με την μονάδα μπαταρίας και τις ΑΠΕ. Στην κυματομορφή του ρεύματος φαίνεται ότι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως έχει περίπου σταθερή τιμή, έως ότου ο Η/Ν στείλει την εντολή διακοπής στους Δ/Ι οι οποίοι αφού λάβουν το σήμα, ανοίγουν το κύκλωμα στον πρώτο μηδενισμό του ρεύματος κάθε φάσης και απομονώνουν το πληττόμενο τμήμα του δικτύου.



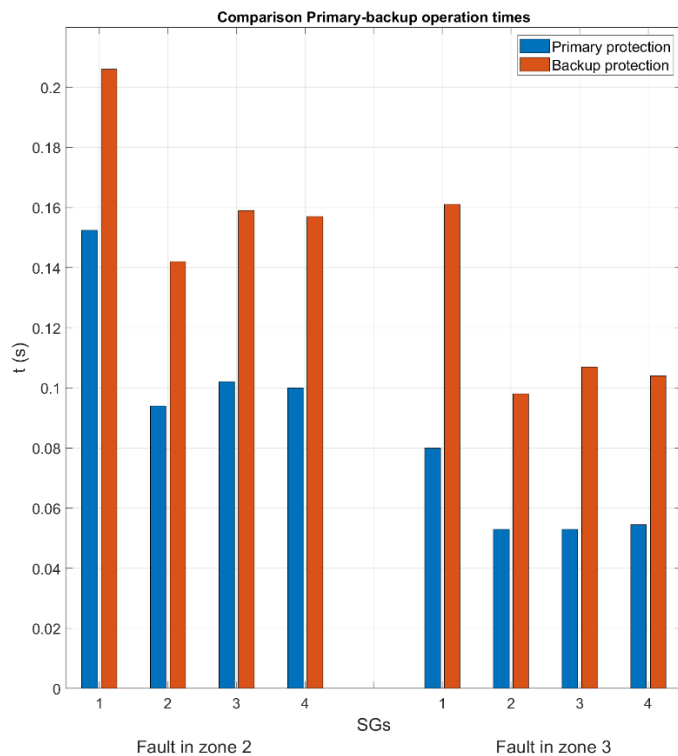
Σχήμα 5.12: Ρεύμα σφάλματος και χρόνος λειτουργίας του Η/Ν, όταν η μονάδα diesel είναι εκτός λειτουργίας.

Στο γράφημα του Σχήματος 5.13, απεικονίζεται αντίστοιχα το ρεύμα σφάλματος και ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν στην περίπτωση που η μονάδα πετρελαίου είναι συνδεδεμένη στο σύστημα και η μονάδα μπαταριών απενεργοποιημένη. Στην κυματομορφή του ρεύματος σφάλματος φαίνεται, αφενός μεν η υψηλότερη στάθμη ρεύματος, και αφετέρου δε η υπομεταβατική και μεταβατική απόκριση της σύγχρονης γεννήτριας και ο απομειούμενος χαρακτήρας της καμπύλης συνεισφοράς της. Και σε αυτήν την περίπτωση παρόλο που το ρεύμα σφάλματος παίρνει υψηλότερες τιμές, ο Η/Ν εντοπίζει το σφάλμα και δίνει εντολή στους διακόπτες ισχύος να απομονώσουν το πληττόμενο κύκλωμα. Το σήμα της κατάστασης του Δ/Ι αποτυπώνεται στον δεξί κάθετο άξονα ενώ το ρεύμα σφάλματος στον αριστερό.



Σχήμα 5.13: Ρεύμα σφάλματος και χρόνος λειτουργίας του Η/Ν όταν η μονάδα diesel είναι ενταγμένη.

Άλλος ένας στόχος της προσομοίωσης είναι να δοκιμαστεί η επιλογικότητα των Η/Ν. Αρχικά στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται οι χρόνοι λειτουργίας για σφάλματα στις ζώνες προστασίας 2 και 3 των ζευγών προστασίας (πρωτεύουσας – δευτερεύουσας), καθώς και η χρονική διαβάθμιση για τις περιπτώσεις που παρατηρείται το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 5.14: Χρόνοι λειτουργίας ζευγών πρωτεύουσας – δευτερεύουσας προστασίας για κάθε ομάδα ρυθμίσεων στις ζώνες προστασίας 2 και 3 στις περιπτώσεις ελαχίστου ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Όπως αποτυπώνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, ο χρόνος λειτουργίας των κύριων προστασιών δεν υπερβαίνει σε καμία ομάδα ρυθμίσεων τα 0,2 s, ενώ είναι τουλάχιστον 0,05 s όπως προκύπτει από την πολιτική προστασίας. Επιπλέον, η χρονική καθυστέρηση που παρουσιάζει η δευτερεύουσα προστασία έναντι της πρωτεύουσας είναι κατ' ελάχιστον 0,05 s.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο, με το οποίο ολοκληρώνεται η εργασία, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα και στην συνέχεια, καταγράφονται οι προτεινόμενες κατευθύνσεις επέκτασης της μελέτης.

6.1 Συμπεράσματα

Η υψηλή διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αλλάζει την φιλοσοφία των δικτύων ως προς τον έλεγχο και γενικά την λειτουργία τους. Η εργασία αυτή εστιάζει στα προβλήματα που παρουσιάζουν οι παραδοσιακοί τρόποι προστασίας κυρίως στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά και τις προκλήσεις που προκύπτουν. Για την αντιμετώπιση των εν λόγω προκλήσεων, συνδυάζονται λύσεις με άξονες την αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων προστασίας με την εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών και μεθόδων.

Οι ΜΔΠ, ανάλογα την τεχνολογία τους έχουν διαφορετική συμπεριφορά στα βραχυκυκλώματα. Πλέον, στα ΜΔΝ και στα δίκτυα διανομής γενικότερα, θα εντάσσονται όλο και περισσότερες ΜΔΠ, με κυρίαρχες τις ΑΠΕ. Άρα, είναι ανάγκη να λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά τους στα σφάλματα.

Οι κώδικες δικτύων γίνονται όλο και πιο απαιτητικοί ως προς τις βοηθητικές υπηρεσίες που πρέπει να προσφέρουν οι μονάδες που συνδέονται με ηλεκτρονικά ισχύος. Όσον αφορά στα βραχυκυκλώματα, οι μελλοντικοί κώδικες θα μπορούσαν να είναι πιο ευέλικτοι ως προς την απαίτηση λειτουργίας υπό χαμηλή τάση (καμπύλη FRT) και την έγχυση ενεργού ή άεργου ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας, σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά των τμημάτων των δικτύων που συνδέονται.

Τα μοντέλα ελέγχου των μετατροπέων στην πλευρά του δικτύου των ΑΠΕ είναι αναγκαία για μελέτες προστασίας που λαμβάνουν υπόψη τέτοιες μονάδες. Ο σχεδιασμός τους σε προσομοιώσεις Hardware In the Loop εξετάζουν στην πράξη την συμβολή τους αλλά και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζει κάθε στρατηγική ελέγχου σε δίκτυα διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Το σύστημα προσαρμοστικής προστασίας που εκπονήθηκε σε αυτή την εργασία, αφορά μία κύρια γραμμή διανομής του ΜΔΝ. Η μελέτη προστασίας αφορά την ρύθμιση των στοιχείων υπερέντασης με προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη επιλογική συνεργασία μεταξύ τους. Συμπεραίνεται ότι, όσον αφορά στα στοιχεία υπερέντασης, η αντιμετώπιση των προβλημάτων και η εξασφάλιση αξιόπιστης προστασίας των σύγχρονων δικτύων των ΜΔΝ είναι δυνατόν να επιτευχθεί.

Η προσαρμοστική προστασία για σύγχρονα ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ αποτελεί μια ευέλικτη και ικανή λύση η οποία ανταποκρίνεται σε όλες τις προκλήσεις και τα ζητήματα που αναδύονται.

Άλλη μια διάσταση αυτής της εργασίας εστιάζει στο εργαστηριακό σύστημα δοκιμών τέτοιων συστημάτων. Γίνεται αντιληπτό ότι η εφαρμογή νέων τεχνικών δοκιμών όπως η μέθοδος Hardware in the Loop, επιτρέπει την αξιολόγηση προηγμένων τεχνικών προστασίας με χρήση

εμπορικού εξοπλισμού που μπορεί να εγκατασταθεί στο πεδίο, σε ένα ασφαλές εργαστηριακό περιβάλλον.

6.2 Προτάσεις για επέκταση της μελέτης

Ακολούθως, παρατίθενται κάποιες ενδεικτικές προτάσεις για επέκταση της μελέτης:

- Μια πρώτη επέκταση της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να αφορά την συμπεριφορά των μονάδων παραγωγής που συνδέονται στο σύστημα με μετατροπείς ισχύος και κατά πόσο η αλλαγή του ελέγχου τους επηρεάζει τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως. Θα μπορούσαν να εξεταστούν τεχνικές για έγχυση – απορρόφηση άεργου ή ενεργού ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε συστήματος, ώστε να γίνει αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους σε ένα περιβάλλον ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.
- Βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου και των τεχνικών βελτιστοποίησης, ώστε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να εντοπίζει τις βέλτιστες λύσεις, γραμμικοποιώντας τις μη γραμμικές σχέσεις που εισάγουν οι καμπύλες για τον υπολογισμό των χρόνων ενεργοποίησης των Η/Ν, βρίσκοντας το ολικό ελάχιστο του προβλήματος.
- Τέλος, θα μπορούσε να επεκταθεί η μελέτη προστασίας που εκπονείται για το υπάρχον δίκτυο του νησιού, μελετώντας τις υπόλοιπες γραμμές διανομής, και ρυθμίζοντας περισσότερα στοιχεία των Η/Ν (π.χ. στοιχεία κατεύθυνσης, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, διακόπτες αυτόματης επαναφοράς reclosing) ώστε να ληφθούν και να αντιμετωπιστούν περισσότερες προκλήσεις ολοκληρώνοντας το σχέδιο προσαρμοστικής προστασίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κ. Κ. Βουρνάς., Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [2] Electropedia. International Electrotechnical Commission. 2017-12-15.
- [3] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, www.rae.gr/μη-διασυνδ-νησιά/, [Ηλεκτρονικό].
- [4] Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου 2021 – 2025, ΔΕΔΗΕ, www.deddie.gr, [Ηλεκτρονικό].
- [5] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3420-3428, Aug. 2013, doi: 10.1109/TPWRS.
- [6] Π. Γεωργιλάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών , 2015.
- [7] Μ. Π. Παπαδόπουλας, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας απο Ανανεώσιμες Πηγές, Αθήνα, 1997.
- [8] Β. Κ. Π. Κ. Ν. Κ.Βουρνάς, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2011.
- [9] Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), Αθήνα 2019, ΦΕΚ Β'4893, [Ηλεκτρονικό].
- [10] Μακροχρόνια Στρατηγική 2050 (ΜΣ50), Long Term Strategy 2050 - LTS , [Ηλεκτρονικό].
- [11] L. Che, M. E. Khodayar and M. Shahidehpour, "Adaptive Protection System for Microgrids: Protection practices of a functional microgrid system.," in IEEE Electrification Magazine, vol. 2, no. 1, pp. 66-80, March 2014, doi: 10.1109/MELE.2013.2297031.
- [12] I. Egidio, F. Fernandez-Bernal, P. Centeno and L. Rouco, "Maximum Frequency Deviation Calculation in Small Isolated Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 4, pp. 1731-1738, Nov. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2030399.
- [13] Κώδικας Διαχείρισης Ηλεκτρικών Συστημάτων ΜΔΝ, Έκδοση 3η, 7ος 2020.
- [14] Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για τον Μάρτιο 2021, www.deddie.gr.
- [15] N. Hatziargyriou, I. Margaritis, I. Stavropoulou, S. Papathanassiou and A. Dimeas, "Noninterconnected Island Systems: The Greek Case," in IEEE Electrification Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 17-27, June 2017, doi: 10.1109/MELE.2017.2685739.

- [16] Γ. Ψαρρός, Βέλτιστη Διαχείριση Αυτόνομων Ηλεκτρικών Συστημάτων με Σταθμούς Αποθήκευσης για Επίτευξη Υψηλής Διεύθυνσης ΑΠΕ, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Δεκέμβριος 2019.
- [17] Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις, Νόμος 3468/2006.
- [18] Alstom, Network protection & automation guide, 2011.
- [19] Β. Παπασπηλιωτόπουλος, Βελτιστοποίηση Ρυθμίσεων Στοιχείων Υπερέντασης σε Προσαρμοστικά ή μη Συστήματα Προστασίας Σύγχρονων Δικτύων Διανομής και Συστημάτων Μεταφοράς, Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα, 2020.
- [20] Schweitzer Engineering Laboratories inc, *SEL-751 Feeder Protection Relay, Instruction Manual*.
- [21] Μ.Π.Παπαδόπουλος, Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Αθήνα: ΕΜΠ, 1997.
- [22] J. M. G. a. E. J. Holmes, « Protection of Electricity Distribution Networks,» 3rd Edition, 2011.
- [23] Measuring relays and protection equipment – Part 151, «Functional requirements for over/under current protection,» IEC Standard 60255-151, 2009.
- [24] «IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays,» IEEE Standard C37.112, 1996.
- [25] «D. Lagos, V. Papaspiliotopoulos, G. Korres and N. Hatziargyriou, "Microgrid Protection Against Internal Faults: Challenges in Islanded and Interconnected Operation," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 19, no. 3, pp. 20-35, May-June 2021, doi: 10.1109».
- [26] Ρ. 39/28.01.2014, «Κώδικας διαχείρισης ηλεκτρικών συστημάτων μη διασυνδεδεμένων νησιών (Κώδικας ΜΔΝ),» 3η Έκδοση, Ιούλιος 2020.
- [27] Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity. Final report on the disturbances on 4 November 2006. Available at: <https://entsoe.eu>.
- [28] S. M. I. Mansour Mohseni, «Review of international grid codes for wind power integration: Diversity, technology and a case for global standard,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.
- [29] H. Dehghani Tafti, A. I. Maswood, Z. Lim, G. H. P. Ooi and P. H. Raj, «A review of active/reactive power control strategies for PV power plants under unbalanced grid faults,» IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387144, 2015.
- [30] Β. Παπαδιάς, Ανάλυση Συστημάτος Ηλεκτρικής Ενέργειας Τόμος II Ασύμμετρες Και Μεταβατικές Καταστάσεις, Αθήνα, 1993.
- [31] P. a. L. A. a. M.-A. R. S. a. E.-O. I. a. T. R. a. B. F. Rodríguez, «A Stationary Reference Frame Grid Synchronization System for Three-Phase Grid-Connected Power Converters Under Adverse Grid Conditions,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 27, αρ. 10.1109/TPEL.2011.2159242, pp. 99-112, 2012.

- [32] Δ. Μακρυκόστας, «Σύγκριση μεθόδων παροχής επικουρικών υπηρεσιών απο μονάδες αποθήκευσης σε ΜΔΝ με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ και συνεργασία με προστασίες αντι-νησιδοποίησης σε περιβάλλον control hardware in the loop,» Δηλωματική εργασία , Αθήνα, 2020.
- [33] K. a. P.-A. E. a. R.-P. S. a. G.-B. O. Schönleber, «Extended Current Limitation for Unbalanced Faults in MMC-HVDC-Connected Wind Power Plants,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, τόμ. 33, αρ. 10.1109/TPWRD.2017.2786087, pp. 1875-1884, 2018.
- [34] RTDS, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rtds.com/about-rtds-technologies/>.
- [35] RTDS Technologies inc, *NovaCore Hardware Manual*.
- [36] *SEL-751 Feeder Protection Relay Data Sheet*.
- [37] Schweitzer Engineering Laboratories inc, *SEL-2240 Axion and acSELeRator RTAC SEL-5033 Software*, Instruction Manual.
- [38] R. P. Loui, «In Praise of Scripting: Real Programming Pragmatism,» in *Computer*, vol. 41, no. 7, pp. 22-26, July 2008, doi: 10.1109/MC.2008.228..
- [39] G. K. V. K. a. N. H. V. Papaspiliotopoulos, «Hardware-In-the-Loop Design and Optimal Setting of Adaptive Protection Schemes for Distribution Systems With Distributed Generation,» in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 393-400, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2509784.
- [40] «Matlab,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mathworks.com>.
- [41] «Yalmip,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://yalmip.github.io/>.