



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ
ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Α. Καραφώτης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ
ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Α. Καραφώτης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Οκτωβρίου 2016

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Παναγιώτης Α. Καραφώτης

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

Copyright © Παναγιώτης Καραφώτης, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους, έπειτα από μόνιμο σφάλμα σε κάποια γραμμή ή ζυγό του δικτύου. Στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι 1) η ελαχιστοποίηση των χειρισμών των διακοπών που διαθέτει το εκάστοτε δίκτυο, με προτίμηση στους τηλεχειριζόμενους διακόπτες έναντι των χειροκίνητων και 2) η ελαχιστοποίηση του πλήθους των μη εξυπηρετούμενων καταναλωτών του δικτύου.

Αρχικά αναλύεται το πρόβλημα της AC ροής ισχύος για ακτινικά δίκτυα διανομής, πάνω στο οποίο βασίστηκε το μαθηματικό μοντέλο της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εξισώσεις της ροής ισχύος τροποποιούνται κατάλληλα έτσι ώστε να περιλαμβάνουν την διακριτή συμπεριφορά των διακοπών ως ακέραιες μεταβλητές. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού.

Στην παρούσα εργασία το προτεινόμενο μοντέλο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GAMS και εφαρμόστηκε σε τρία δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 33, 44 και 69 ζυγών. Υλοποιούνται και παρουσιάζονται δύο ειδών δοκιμών για κάθε δίκτυο (σφάλμα σε γραμμή ή σφάλμα σε ζυγό του δικτύου) και αναλύονται τα αποτελέσματά τους, ενώ παράλληλα προτείνονται και ορισμένες επεκτάσεις της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση, ακτινικά δίκτυα διανομής, αποκατάσταση λειτουργίας, τηλεχειριζόμενοι διακόπτες, μη εξυπηρετούμενα φορτία

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is the formulation and solution of the optimal distribution network reconfiguration (DNR) problem for service restoration due to a permanent distribution line or busbar fault. The proposed optimization model seeks to 1) minimize the number of the switching actions prioritizing the operation of remote controlled switches instead of the manual ones and 2) minimize the number of the non supplied customers.

First, the steady state operation of the network is analyzed using the AC power flow equations for radial distribution networks. Disjunctive formulations of the AC power flow equations are developed in order to efficiently model the binary nature of the switching actions to the optimal DNR problem. The proposed optimization model is formulated as a mixed integer non linear programming (MINLP) model.

The proposed model has been developed using GAMS and it was applied to a 33-bus, 44-bus and 69-bus distribution test system. For each network, two types of faults (line and busbar fault) are analyzed and the obtained results are presented and discussed. Future research on the topic is also proposed.

KEY WORDS

Optimal distribution network reconfiguration, radial power distribution networks, service restoration, remote controlled switches, non supplied customers

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015–2016 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, επίκουρου καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κουτσούκη για την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τη μητέρα μου Κωνσταντίνα, η οποία αποτελεί πηγή έμπνευσης και δύναμης σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου, τον παιδικό μου φίλο και συνάδελφο Γιώργο για την αμέριστη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας, και την Αθηνά, στην συμπαράσταση και την αγάπη της οποίας οφείλω το μέλλον μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2 Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	4
1.3 Αντικείμενο της εργασίας	6
1.4 Δομή της εργασίας	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Εξοπλισμός και τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	12
2.2.1 Βασικά στοιχεία δικτύων διανομής	12
2.2.2 Τοπολογίες δικτύων διανομής	17
2.3 Σχεδίαση προστασίας και αξιοπιστία δικτύων διανομής	20
2.3.1 Σχεδίαση προστασίας	23
2.3.2 Αξιοπιστία	27
2.4 Επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας	29
2.4.1 Βασικοί τύποι σφαλμάτων	31
2.4.2 Στόχοι επαναδιαμόρφωσης για αποκατάσταση λειτουργίας	31
2.5 Μέθοδοι επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	39
3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Ανάλυση ροής ισχύος δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	39
3.3 Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας	41
3.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση	42
3.3.2 Περιορισμοί προβλήματος	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΗΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	47
4.1	Εισαγωγή	47
4.2	Το λογισμικό GAMS	48
4.2.1	Γενικά χαρακτηριστικά του λογισμικού GAMS	48
4.2.2	Σύνταξη κώδικα στο λογισμικό GAMS	49
4.2.3	Ο επιλυτής Bonmin	50
4.2.4	Διαδικασία επίλυσης προβλήματος	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	55
5.1	Εισαγωγή	55
5.2	Εφαρμογή στο δίκτυο 33 ζυγών	55
5.2.1	Σφάλμα στη γραμμή 2-19	56
5.2.2	Σφάλμα στη γραμμή 6-26	58
5.2.3	Σφάλμα στο ζυγό 11	60
5.3	Εφαρμογή στο δίκτυο 44 ζυγών	62
5.3.1	Σφάλμα στη γραμμή 6-8	63
5.3.2	Σφάλμα στη γραμμή 37-38	65
5.3.3	Σφάλμα στον υποσταθμό του ζυγού 15	67
5.4	Εφαρμογή στο δίκτυο 69 ζυγών	69
5.4.1	Σφάλμα στη γραμμή 5-6	70
5.4.2	Σφάλμα στη γραμμή 33-34	72
5.4.3	Σφάλμα στο ζυγό 11	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
6.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	77
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι ένα σύστημα εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια:

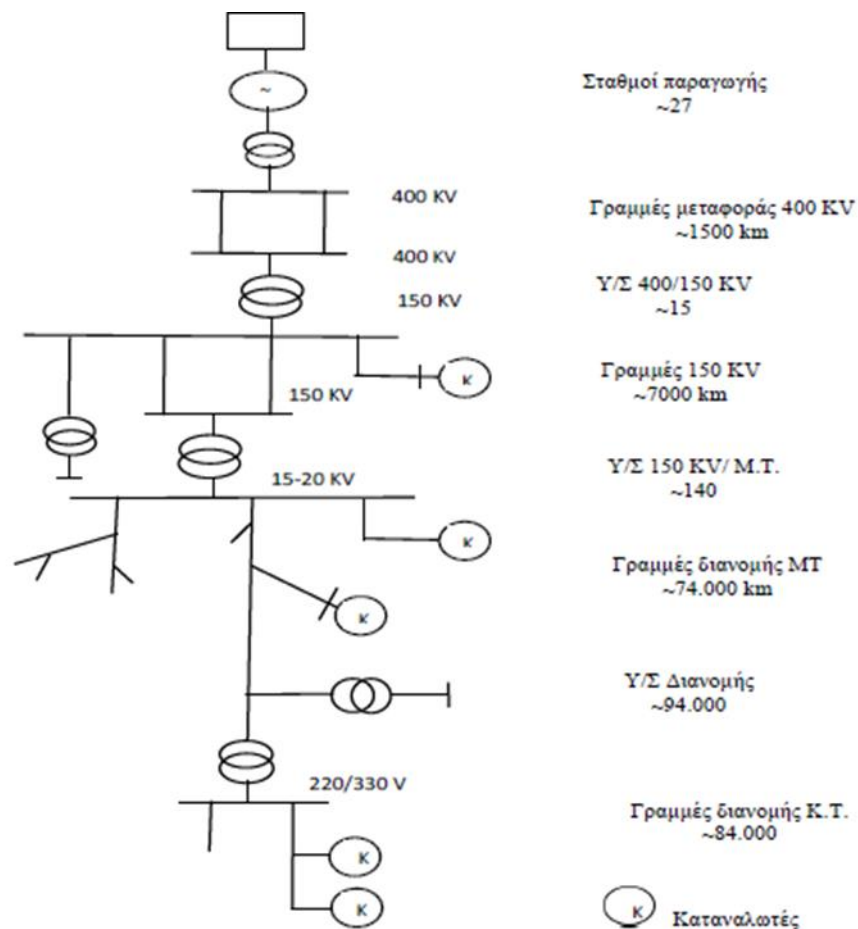
- οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση
- με το ελάχιστο δυνατό κόστος
- με τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις
- εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [1].

Η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής:

- το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά. Η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων, σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια καταγράφεται μια ραγδαία είσοδος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο τμήμα της παραγωγής, κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας.
- το σύστημα μεταφοράς διασυνδέει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρει τις μεγάλες ποσότητες ισχύος προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αποτελεί το βασικό κορμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υπερυψηλής και υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεων των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται.
- το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης και χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγονται και υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική

ενέργεια διανέμεται σε μικρότερες περιοχές φορτίου και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και για αυτό ακριβώς το λόγο ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, των κύριων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών είναι επιτακτικό να είναι ενιαίος, με στόχο πάντα την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη μεγαλύτερη εφικτή αξιοπιστία τροφοδότησης. Από την άλλη, το τμήμα της διανομής αποτελεί τις περισσότερες φορές μια διαφορετική λειτουργία, η οποία σχεδιάζεται και αναπτύσσεται ξεχωριστά, εξαρτώμενη σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τόσο της περιοχής όσο και των καταναλωτών που εξυπηρετεί. Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων και προσφέρει ορισμένα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του κάθε συστήματος. Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητα τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 : Σχηματική αναπαράσταση ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η δομή και η σύνθεση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το μέγεθός του, αλλά και από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό. Στα τριφασικά συστήματα η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους πολύ πιο ομαλή και αποδοτική [2].

Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί ως το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της. Βέβαια, η απαίτηση για αδιάλειπτη και υψηλής ποιότητας παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται επιτακτική και για τους ίδιους τους καταναλωτές. Άλλωστε, η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία μετατρέπεται εύκολα σε άλλες μορφές και είναι διαθέσιμη τη χρονική στιγμή την οποία ζητείται.

Η διαχείριση της ενέργειας ενός μεγάλου διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με κεντρικά συστήματα εποπτείας και αυτομάτου ελέγχου, με τα οποία εξασφαλίζεται οικονομική λειτουργία, υψηλός δείκτης ασφάλειας και μεγάλη αξιοπιστία λειτουργίας. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές υπό ορισμένη τάση και συχνότητα, οι τιμές των οποίων πρέπει να διατηρούνται σταθερές μέσα σε προκαθορισμένα συμβατικά όρια και η τήρηση αυτών των συνθηκών καθορίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης του καταναλωτή. Η σχεδίαση του συστήματος και η λειτουργία του πρέπει να εξισορροπούν καλή ποιότητα εξυπηρέτησης και καλό δείκτη αξιοπιστίας με ικανοποιητικό κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης αποτελούν τις δύο βασικές διαδικασίες λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η συχνότητα συνδέεται με το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος. Η συνεχής εξισορρόπηση του ισοζυγίου αυτού έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθερή τιμή της συχνότητας. Σε κάθε μεταβολή του φορτίου η παραγωγή πρέπει να προσαρμόζεται άμεσα. Η ρύθμιση αυτή γίνεται από τους ρυθμιστές στροφών των στροβίλων, οι οποίοι αποτελούν συστήματα κλειστού βρόχου και ανταποκρίνονται αυτόματα στις αλλαγές του φορτίου. Στα σύγχρονα διασυνδεδεμένα συστήματα το πρόβλημα του ελέγχου συχνότητας είναι σύνθετο και περιλαμβάνει την κατανομή των μεταβολών ζήτησης μεταξύ των διαφόρων μονάδων.

Το πρόβλημα της διατήρησης της τάσης μεταξύ των επιτρεπόμενων ορίων περιπλέκεται από το γεγονός ότι η τάση δεν είναι ενιαία σε όλο το σύστημα, όπως η συχνότητα, αλλά ποικίλει από θέση σε θέση και σχετίζεται με την άεργο ισχύ, η οποία διακινείται από το σύστημα. Επομένως η ρύθμιση της τάσης δεν μπορεί να γίνεται μόνο από τις γεννήτριες, που είναι φυσιολογικά οι πηγές άεργου ισχύος, αλλά γίνεται και με άλλα μέσα σε περισσότερες θέσεις του δικτύου και συγκεκριμένα με τη ρύθμιση της σχέσης μεταφοράς των μετασχηματιστών, με τη σύνδεση - αποσύνδεση πυκνωτών, πηνίων και εξειδικευμένων διατάξεων.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να προστατεύεται από τις ανωμαλίες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του και κυρίως από τα κάθε είδους βραχυκυκλώματα, από ειδικό σύστημα προστασίας, το οποίο είναι το κυριότερο από τα βοηθητικά συστήματα με τα οποία είναι εφοδιασμένες οι εγκαταστάσεις του. Το σύστημα προστασίας διεγείρεται αυτόματα κατά την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος και προκαλεί άνοιγμα των πλησιέστερων προς αυτό διακοπών ισχύος, οι οποίοι απομονώνουν το στοιχείο που υπέστη τη βλάβη (γραμμή,

μετασηματιστής, κ.α.) εξουδετερώνοντας το βραχυκύκλωμα με διακοπή της τροφοδότησής του.

Προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων έχουν όλες οι σημαντικές μονάδες του συστήματος, δηλαδή οι μονάδες παραγωγής, οι μετασηματιστές, οι εναέριες και υπόγειες γραμμές και οι ζυγοί υψηλής τάσεως. Κυριότεροι τύποι προστασίας είναι η προστασία υπερεντάσεως, η προστασία αποστάσεως για τις γραμμές μεταφοράς και η διαφορική προστασία για τις γεννήτριες, τους μετασηματιστές και τα καλώδια. Το σύστημα προστασίας περιλαμβάνει ηλεκτρονόμους (relay), οι οποίοι ανιχνεύουν το σφάλμα και ενεργοποιούν εξ αποστάσεως τους διακόπτες ισχύος.

1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά, έχουν ως αφετηρία της υποσταθμού υποβιβασμού Υ.Τ/Μ.Τ, όπου σταματά το δίκτυο μεταφοράς, και φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και της συσκευές κατανάλωσης.

Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής, η διανομή μέσης τάσης ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή, και η διανομή χαμηλής τάσης ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτούνται από της υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, από υψηλή σε μέση και τροφοδοτούν της υποσταθμούς διανομής και τους καταναλωτές μέσης τάσης. Οι καταναλωτές μέσης τάσης είναι κατά κύριο λόγο βιομηχανικοί καταναλωτές με τριφασικές παροχές και οι γραμμές διανομής που τους τροφοδοτούν αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων. Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης έχουν σαν αφετηρία τους υποσταθμούς διανομής, όπου η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή μέσω μετασηματιστών διανομής, που αποτελούν το βασικό εξοπλισμό των υποσταθμών. Στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής και εμπορικής χρήσης, που ενίοτε έχουν μονοφασικές παροχές, που δημιουργούν ασύμμετρες φορτίσεις. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων και διαθέτουν, επιπλέον, και ουδέτερο αγωγό.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής σχετίζεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των περιοχών, και γενικότερα, του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Κατηγοριοποιούνται σε εναέρια και υπόγεια, με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής τους. Τα εναέρια δίκτυα είναι φθηνότερα στην κατασκευή τους και έχουν καλύτερη αποκατάσταση βλαβών σε σχέση με τα υπόγεια. Καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο, η διάθεση του οποίου είναι συχνά αδύνατη σε σχετικά πυκνοκατοικημένες περιοχές. Οι αγωγοί των γραμμών εναέριων δικτύων την προηγούμενη δεκαετία ήταν πάντοτε γυμνοί. Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη της τεχνικής των καλωδίων τείνει να εξαλείψει το φαινόμενο αυτό. Τα υπόγεια δίκτυα έχουν ελάχιστη αισθητική επίπτωση στην αισθητική του περιβάλλοντος χώρου, σε αντίθεση με τα εναέρια. Η κατασκευή εναέριων δικτύων προσφέρεται ιδιαίτερα της αγροτικές περιοχές που γενικά χαρακτηρίζονται από μικρή πυκνότητα φορτίου. Υπόγεια κατασκευάζονται τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης στα κέντρα των πόλεων, όπου η πυκνότητα του φορτίου καθιστά συχνά πρακτικά επιβεβλημένη την κατασκευή υποσταθμών

Μ.Τ/Χ.Τ, οι οποίοι είναι με τη σειρά τους εγκαταστημένοι στο έδαφος σε κατάλληλα διαμορφωμένους οικίσκους.

Τα δίκτυα διανομής έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν παθητικά, μεταφέροντας ενέργεια από τον υποσταθμό στους καταναλωτές. Όμως, η αύξηση της διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής επέφερε νέες λειτουργίες και προβλήματα στη λειτουργία των δικτύων. Ο τοπικός και συντονισμένος έλεγχος τάσης, ρευμάτων και σφαλμάτων, που πλέον είναι αναγκαίος, μετατρέπει τα σημερινά δίκτυα διανομής από παθητικά σε ενεργά. Η επέκταση της δυναμικότητας των μονάδων διανεμημένης παραγωγής εισάγει νέες προκλήσεις αναφορικά με την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας. Η εξέλιξη αυτή έχει σοβαρές επιπτώσεις για της διαχειριστές του δικτύου διανομής. Μέχρι πρόσφατα, ο σχεδιασμός και η λειτουργία των δικτύων διανομής γινόταν μέσω μιας top-down προσέγγισης. Οι ροές ισχύος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν απαιτούσαν εκτενή εργαλεία διαχείρισης και παρακολούθησης, καθώς ήταν προβλέψιμες. Στα σημερινά ενεργά δίκτυα, το μοντέλο αυτό αλλάζει. Η ολοένα αυξανόμενη σύνδεση μονάδων παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες ροές του δικτύου, σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις της τάσης, και σε διαφορετικά χαρακτηριστικά στη ροή άεργου ισχύος στο δίκτυο. Η ενεργή διαχείριση του συστήματος διανομής καθίσταται αναγκαία για να εξασφαλίσει την ομαλή σύνδεση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής. Το γεγονός αυτό απαιτεί αλλαγές στον τρόπο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς οι ανάστροφες ροές ισχύος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, να παρακολουθούνται και να προσομοιώνονται, προκειμένου να επιτυγχάνεται η καλύτερη πρόβλεψη και εποπτεία του δικτύου.

Η βελτίωση της αποδοτικότητας της λειτουργίας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν αποτελούσε κύρια κατεύθυνση των διαχειριστών των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό το λόγο, μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας χάνονται ως θερμικές και άλλες απώλειες. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, οι ετήσιες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε 6%, με το 2% να αναφέρεται σε απώλειες στα δίκτυα μεταφοράς και το ποσοστό 4% να καταναλώνεται σε απώλειες στα δίκτυα διανομής. Τα παραπάνω ποσοστά αναφέρονται σε απώλειες ισχύος και ενέργειας σε γραμμές μεταφοράς υψηλής και μέσης τάσης και πρωτεύοντες και δευτερεύοντες υποσταθμούς υψηλής και μέσης τάσης αντίστοιχα.

Αποτέλεσμα των τελευταίων εξελίξεων στο τομέα της ενέργειας εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι διαχειριστές των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Distribution System Operators) είναι αναγκαίο να βελτιώσουν την αποδοτικότητα τους, με ενέργειες όπως τον περιορισμό των απωλειών των ηλεκτρικών δικτύων διανομής. Τα τελευταία χρόνια καθίσταται δυνατό και είναι σημαντικό να παρακολουθείται, να μετριέται και να βελτιώνεται η αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βελτιώσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των λειτουργικών εξόδων με την υιοθέτηση συνδυασμού hardware και software εξοπλισμού ο οποίος θα έχει τη δυνατότητα να ενσωματωθεί στις υπάρχουσες υποδομές των ηλεκτρικών δικτύων.

Διαχειριστής του ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι η ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., η οποία δημιουργήθηκε με την απόσχιση του κλάδου διανομής της ΔΕΗ Α.Ε., σύμφωνα με το Ν.4001/2011 και σε συμμόρφωση με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σχετικά με την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να υλοποιήσει τα καθήκοντα του Διαχειριστή του ελληνικού Δικτύου Διανομής. Είναι κατά 100% θυγατρική εταιρία της ΔΕΗ Α.Ε., παρόλα αυτά παρουσιάζει ανεξάρτητη διοικητική λειτουργία, εκπληρώνοντας όλες τις απαιτήσεις ανεξαρτησίας που ενσωματώνονται στο παραπάνω νομικό πλαίσιο. Σκοπός της

εταιρίας είναι η λειτουργία, η συντήρηση και η ανάπτυξη του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και η διασφάλιση της διαφανούς και αμερόληπτης πρόσβασης των καταναλωτών και γενικότερα όλων των χρηστών του δικτύου. Ως εκ τούτου στοχεύει στην αξιόπιστη τροφοδοσία των καταναλωτών, στην ποιότητα τάσης του ρεύματος και στη διαρκή βελτίωση της παρεχόμενης εξυπηρέτησης. Αποστολή του ΔΕΔΔΗΕ είναι η ανάπτυξη και λειτουργία του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και των συστημάτων ηλεκτρισμού των μη διασυνδεδεμένων νησιών και η διασφάλιση ισότιμης πρόσβασης σε αυτά, όλων των καταναλωτών, παραγωγών και προμηθευτών, με διαφάνεια και σεβασμό στο περιβάλλον.

Οι τομείς δραστηριότητας του ΔΕΔΔΗΕ συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Η ικανοποίηση αιτημάτων των χρηστών (νέες συνδέσεις καταναλωτών και παραγωγών, τροποποίηση παλαιών παροχών, μετατοπίσεις δικτύων).
- Ανάπτυξη του δικτύου (ενισχύσεις, βελτιώσεις και εκσυγχρονισμός του δικτύου, κατασκευή κέντρων διανομής και γραμμών 150 kV).
- Εργασίες εκμετάλλευσης του δικτύου (λειτουργία του δικτύου διανομής, επιθεώρηση και συντήρηση του δικτύου, αποκατάσταση βλαβών, εξυπηρέτηση των χρηστών δικτύου στα γραφεία, καταμέτρηση των καταναλώσεων).
- Η ομαλή και αποδοτική λειτουργία της αγοράς ηλεκτρισμού στο επίπεδο των δικτύων.
- Η αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία των αυτόνομων νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους, έπειτα από σφάλμα σε κάποια γραμμή ή ζυγό του. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού αφενός των χειρισμών των διακοπτικών μέσων του δικτύου με προτίμηση στους τηλεχειριζόμενους διακόπτες έναντι των χειροκίνητων και αφετέρου των απορριπτόμενων φορτίων, δηλαδή των καταναλωτών του δικτύου που δεν ικανοποιούνται, σε όσο το δυνατότερο σύντομο χρονικό διάστημα.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και η διαδικασία της επαναδιαμόρφωσής του για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος.

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** κατασκευάζεται το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 3 και περιγράφεται το λογισμικό GAMS που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του σχετικού κώδικα επίλυσης του μοντέλου.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου σε δίκτυα 33, 44 και 69 ζυγών.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την έκταση της εργασίας.

ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μέσα στην επόμενη εικοσαετία αναμένεται ότι θα πραγματοποιηθούν σημαντικές αλλαγές στον τομέα των δικτύων διανομής. Οι σύγχρονοι αισθητήρες και το υλικό ελέγχου που έχει αναπτυχθεί αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία των συστημάτων διαχείρισης των δικτύων διανομής και λογισμικών κέντρων ελέγχου ενέργειας, τα οποία με τη σειρά τους βρίσκουν εφαρμογή σε αυτόματα συστήματα ανίχνευσης και απομόνωσης σφαλμάτων, αυτόματα συστήματα αποκατάστασης βλαβών και αυτόματα συστήματα ελέγχου της τάσης και της άεργου ισχύος. Όλα τα παραπάνω συνεισφέρουν στην οικονομική λειτουργία των δικτύων διανομής και γι' αυτό πολλές εταιρείες παροχής ηλεκτρισμού έχουν ήδη εγκαταστήσει τέτοια συστήματα.

Τα συστήματα διανομής αποτελούν την κύρια πηγή απωλειών των ΣΗΕ, ενώ οι περισσότερες διακοπές παροχής οφείλονται σε σφάλματα που συμβαίνουν σε δίκτυα διανομής. Έτσι, ένα πολύ σημαντικό θέμα σχετικά με τα δίκτυα διανομής είναι με ποιόν τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή λειτουργία τους. Το παραπάνω αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως Distribution System Optimization problem και ορίζεται ως η κάλυψη της ζήτησης του δικτύου με τον πιο οικονομικό, αξιόπιστο και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, ενώ παράλληλα τηρούνται όλοι οι λειτουργικοί περιορισμοί. Ακόμη, με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός και ο προγραμματισμός της μελλοντικής επέκτασης ενός δικτύου διανομής.

Θεωρείται πως ένα δίκτυο διανομής λειτουργεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο εάν τροφοδοτεί το φορτίο του, έτσι ώστε οι απώλειες να είναι οι ελάχιστες δυνατές και η ποιότητα εξυπηρέτησης των καταναλωτών βέλτιστη. Η ποιότητα εξυπηρέτησης όμως συνίσταται στην αξιοπιστία του δικτύου, δηλαδή τη συνέχεια παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και τη σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών. Συμπερασματικά, η βέλτιστη λειτουργία καθορίζεται από τις απώλειες, την αξιοπιστία και τη σταθερότητα της τάσης.

Οι δυνατότητες βελτιστοποίησης της λειτουργίας εξαρτώνται άμεσα από τη διαμόρφωση του δικτύου. Για παράδειγμα, σε ένα εναέριο ακτινικό αγροτικό δίκτυο μέσης τάσης με μικρό αριθμό διακλαδώσεων, το πρόβλημα επιλογής της βέλτιστης συνδεσμολογίας είναι περιορισμένο, ενώ ο βαθμός εξυπηρέτησης που επιτυγχάνεται εξαρτάται κυρίως από την καλή επιλογή των προστασιών και των μέσων ρύθμισης της τάσης. Αντίθετα, σε ένα αστικό δίκτυο με πολλές δυνατότητες διασυνδέσεων υπάρχει ένα πλήθος πιθανών σχημάτων και η επιλογή της βέλτιστης συνδεσμολογίας αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, ενώ είναι περιορισμένες οι δυνατότητες επιλογής των προστασιών και των μέσων ρύθμισης της τάσης. Αν ληφθεί υπόψη η πολυπλοκότητα των δικτύων διανομής και η συνεχώς μεταβαλλόμενη φόρτισή τους, είναι προφανές ότι ο καθορισμός της βέλτιστης λειτουργίας αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Η ανάπτυξη των δικτύων διανομής, δηλαδή η κατασκευή νέων έργων και η αντικατάσταση των

υφιστάμενων, πραγματοποιείται σταδιακά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ικανοποιητική εξυπηρέτηση των καταναλωτών, των οποίων το πλήθος και το φορτίο συνεχώς μεταβάλλονται. Ο ορθός σχεδιασμός της ανάπτυξης ενός δικτύου διανομής επηρεάζει άμεσα τόσο τον βαθμό εξυπηρέτησης των καταναλωτών όσο και τις δαπάνες υλοποίησης των έργων ανάπτυξης του για την εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Βέβαια, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός δικτύου διανομής, καθώς και η κατασκευή επεκτάσεων οφείλουν να ακολουθούν βασικούς περιορισμούς όπως οι εξής:

- Όλοι οι καταναλωτές θα πρέπει να συνεχίσουν να τροφοδοτούνται κανονικά.
- Η ακτινική διάταξη του δικτύου θα πρέπει να διατηρείται.
- Οι τάσεις των κόμβων θα πρέπει να βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια.
- Οι νέοι κλάδοι που τυχόν προστίθενται στο δίκτυο δεν θα πρέπει να ξεφεύγουν από υπάρχοντες περιορισμούς.

Επιπλέον, η λήψη των αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό της ανάπτυξης των δικτύων διανομής πρέπει να βασίζεται στο συνολικό κόστος, που προκύπτει από την εξέταση του θέματος κατά μία περίοδο αρκετών ετών (π.χ. δέκα έτη), κατά την οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο οι δαπάνες κατασκευής νέων έργων, αλλά και οι δαπάνες εκμετάλλευσης (λειτουργία και συντήρηση), το κόστος των απωλειών, καθώς και ο διαφορετικός βαθμός ποιότητας εξυπηρέτησης που επιτυγχάνεται ανάλογα με το έργο που υλοποιείται κάθε φορά.

Οι μέθοδοι βελτίωσης της αποδοτικότητας που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι οι ακόλουθες:

- Αναδιαμόρφωση της τοπολογίας του δικτύου μέσω διακοπών: Στην μέθοδο αυτή επικεντρώνεται η παρούσα εργασία και γίνεται αναλυτικότερη επεξήγησή της.
- Βέλτιστη τοποθέτηση πυκνωτή: Η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη σε δίκτυα διανομής υψηλής τάσης. Ο πυκνωτής, ως γνωστόν, αποτελεί μια πηγή άεργου ισχύος και αφού μειώνει την επαγωγική αντίδραση, τελικά μειώνει και τις απώλειες άεργου ισχύος της γραμμής. Οι πυκνωτές σε ένα δίκτυο διανομής, χρησιμοποιούνται για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος καθώς και την ρύθμιση των τάσεων με την προσφορά άεργου ισχύος για αντιστάθμιση. Οι κύριες προκλήσεις της μεθόδου αυτής είναι η επιλογή του σωστού αριθμού πυκνωτών που πρέπει να τοποθετηθούν και η επιλογή του μεγέθους των πυκνωτών αυτών. Πολλοί ερευνητές έχουν αξιοποιήσει αλγορίθμους προκειμένου να καταστήσουν την μείωση απωλειών περισσότερο αποτελεσματική, όπως αλγορίθμους γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού, αναζήτηση tabu, γενετικό αλγόριθμο, αλγορίθμους ασαφούς λογικής (fuzzy logic), αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικιών των μυρμηγκιών (ant colony optimization) και άλλους.
- Αξιοποίηση διανεμημένης παραγωγής (ΔΠ): Η διανεμημένη παραγωγή αποτελεί την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις που είναι αρκετά μικρότερες από

την κύρια παραγωγή ενέργειας και μπορούν να συνδεθούν σχεδόν σε οποιοδήποτε σημείο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, η διείσδυση της διανεμημένης παραγωγής έχει γίνει εντονότερη και προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως η προστασία του περιβάλλοντος μέσω της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), καλύτερη διαχείριση της συμφόρησης στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής, διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά όρια και τελικά ελαχιστοποίηση των απωλειών. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής και διακρίνονται στις ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, συστήματα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, μικρά υδροηλεκτρικά και συστήματα ηλιοθερμίας), μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (μηχανές εσωτερικής καύσης, γεωθερμία, βιομάζα, κυψέλες καυσίμου) και συνδυασμός των παραπάνω κατηγοριών παραγωγής. Το ζήτημα της διανεμημένης παραγωγής έχει απασχολήσει τους ερευνητές καθώς η προσπάθεια εστιάζεται στην μέγιστη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της διανεμημένης παραγωγής, χωρίς την παραβίαση των περιορισμών που επιτάσσουν η υποδομή και η λειτουργία των υπάρχοντων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών μέσω της διανεμημένης παραγωγής αξιοποιούνται πάλι αλγοριθμικές τεχνικές όπως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους μελισσών (bee colony algorithm), αλγόριθμοι ασαφούς λογική, γενετικοί αλγόριθμοι, ο αλγόριθμος particle swarm optimization και άλλοι.

Κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, τα κίνητρα που παρέχουν κυβερνήσεις ανεπτυγμένων χωρών για την ενίσχυση της οικονομίας τους, οδηγούν σε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την πρόοδο και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων διανομής, κάτι το οποίο ενισχύουν και οι νέες τεχνολογίες στους τομείς των τηλεπικοινωνιών, της πληροφορικής, των ηλεκτρονικών ισχύος και του αυτομάτου ελέγχου. Έτσι, ενθαρρύνεται η έρευνα και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υπηρεσιών σχετικών με τα δίκτυα διανομής. Οι καινοτομίες αυτές μετασχηματίζουν πλέον τα δίκτυα διανομής σε έξυπνα δίκτυα διανομής. Τα χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων διανομής συνοψίζονται παρακάτω:

- Αυξημένη συμμετοχή των καταναλωτών και δυνατότητα σύνδεσης όλων των μονάδων διανεμημένης παραγωγής και διανεμημένης αποθήκευσης.
- Δυνατότητα εισαγωγής νέων προϊόντων, υπηρεσιών και αγορών.
- Αυξημένη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος.
- Βέλτιστη χρήση του εξοπλισμού του δικτύου διανομής.
- Δυνατότητα αυτοθεραπείας (self-healing) για την αντιμετώπιση των διαταραχών του συστήματος διανομής.
- Ανθεκτικότητα ενάντια σε φυσικές καταστροφές, επιθέσεις και κυβερνοεπιθέσεις.

Συμπερασματικά η επαναδιαμόρφωση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στη χρησιμότητα της επαναδιαμόρφωσης ενός δικτύου διανομής και τα οφέλη που απορρέουν από αυτή. Τα αίτια που μπορούν να οδηγήσουν στην επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι προϋποθέσεις και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται, καθώς και οι στόχοι που εξυπηρετεί, ποικίλλουν ανάλογα την περίπτωση. Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν στην ανάγκη επαναδιαμόρφωσης ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πρώτος σχετίζεται με τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και τον ισομερισμό των εξυπηρετούμενων φορτίων μεταξύ των κύριων γραμμών διανομής. Ο δεύτερος λόγος που μπορεί να οδηγήσει σε επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου διανομής είναι η αποκατάσταση της λειτουργίας του σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος κάποιου στοιχείου του. Ο στόχος στην περίπτωση αυτή είναι αφενός η εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων φορτίων, ειδικά αυτών που χαρακτηρίζονται ως κρίσιμα, και αφετέρου η γρήγορη και αποτελεσματική επαναφορά του δικτύου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας με κατάλληλο χειρισμό των διαθέσιμων διακοπτικών μέσων. Η διακύμανση των τάσεων των ζυγών εντός επιτρεπτών ορίων καθώς και η διατήρηση της ακτινικής μορφής του δικτύου αποτελούν τα απαραίτητα ζητούμενα στις περισσότερες περιπτώσεις επαναδιαμόρφωσης του δικτύου [3].

2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια πολυσύνθετη κατασκευή, αποτελούμενη από χιλιάδες στοιχεία που λειτουργούν όλα μαζί με κοινό στόχο τη μεταφορά της ενέργειας από τα σημεία παραγωγής στους καταναλωτές. Κάθε μονάδα εξοπλισμού παίζει ένα μικρό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος, όμως είναι αναγκαία έτσι ώστε να προσφέρει ικανοποιητικές υπηρεσίες σε έναν ή περισσότερους καταναλωτές. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος είναι περίπλοκος γιατί κάθε μονάδα εξοπλισμού επηρεάζει τη συμπεριφορά των γειτονικών της μονάδων και πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά σε συνεργασία με το υπόλοιπο σύστημα κάτω από μια πληθώρα διαφορετικών συνθηκών. Ενώ η μοντελοποίηση και η ανάλυση ενός συστήματος διανομής μπορεί να προκύψει ιδιαίτερα πολύπλοκη, αν ασχοληθούμε ατομικά με τα στοιχεία που το αποτελούν, είναι εύκολο να τα καταλάβουμε και να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό.

2.2.1 Βασικά στοιχεία δικτύων διανομής

Παρά τις κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις που μπορεί να εμφανίζονται μεταξύ των δικτύων διανομής ανά περιοχές, όλα τους φέρουν κοινά βασικά χαρακτηριστικά και συντίθενται από τα ίδια στοιχεία, τα οποία περιγράφονται παρακάτω (Σχήμα 2.1).

- **Γραμμές διανομής**

Το πιο σημαντικό κομμάτι του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αυτό που είναι αφοσιωμένο στο να μεταφέρει τη ροή ενέργειας από μια τοποθεσία σε μια άλλη. Οι γραμμές διανομής αποτελούνται από ηλεκτρικούς αγωγούς κατάλληλα προστατευόμενους με μόνωση από τις διαρροές τάσης και τις ανεπιθύμητες γειώσεις. Στη μέση τάση είναι πάντοτε τριφασικές, ενώ οι γραμμές χαμηλής τάσης είναι συνήθως τριφασικές, αλλά υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές. Ανεξάρτητα από τον τύπο του ή την χωρητικότητά του, κάθε ηλεκτρικός αγωγός έχει μια σύνθετη αντίσταση που προκαλεί πτώση τάσης στα άκρα του και ηλεκτρικές απώλειες όποτε μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια [4],[5].

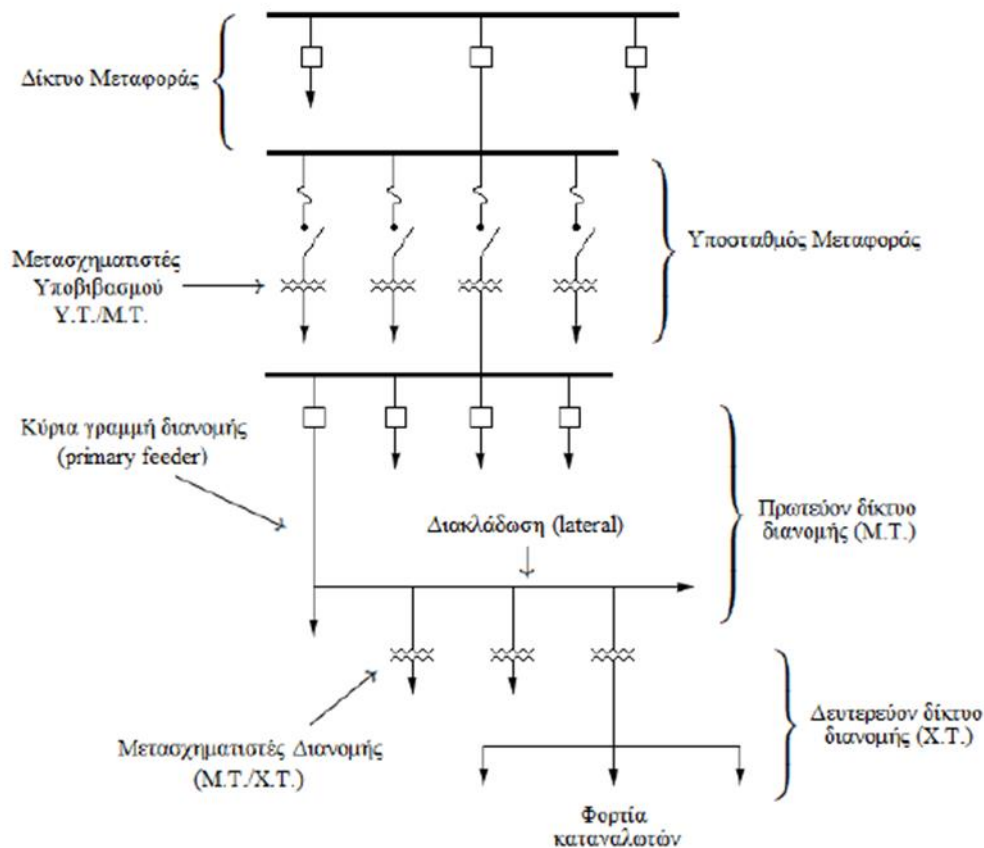
- **Υποσταθμοί διανομής**

Τα δίκτυα διανομής ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς Υ.Τ./Μ.Τ., και συγκεκριμένα από ζυγούς συνδεδεμένους με τα δευτερεύοντα τυλίγματα μετασχηματιστών υποβιβασμού. Στους υποσταθμούς βρίσκεται επίσης εγκατεστημένος εξοπλισμός προστασίας και χειρισμού του δικτύου, όπως αποζεύκτες, αυτόματοι διακόπτες, εν σειρά ή/και εν παραλλήλω χωρητικότητες, γειώσεις, μετρητικές και άλλες συσκευές. Στις απολήξεις του δικτύου διανομής Μ.Τ. βρίσκονται εγκατεστημένοι οι υποσταθμοί διανομής όπου γίνεται ο υποβιβασμός από μέση σε χαμηλή τάση και ξεκινά η τροφοδοσία του δευτερεύοντος δικτύου. Κύρια στοιχεία τους είναι οι μετασχηματιστές διανομής, ενώ περιέχουν και εξοπλισμό ρύθμισης τάσης αλλά και μέσα προστασίας, όπως διακοπτικούς μηχανισμούς [4].

- **Μετασχηματιστές**

Στον πυρήνα κάθε εναλλασσόμενου συστήματος ενέργειας βρίσκονται οι μετασχηματιστές (Μ/Σ). Αυτοί αλλάζουν τα επίπεδα τάσης και ρεύματος της ενεργειακής ροής, διατηρώντας (εκτός από ένα μικρό μέρος από ηλεκτρικές απώλειες) την ίδια συνολική ενεργειακή ροή. Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται βάσει προκαθορισμένων προδιαγραφών και αγοράζονται σε μεγάλες ποσότητες. Οι μετασχηματιστές αντιμετωπίζουν δύο τύπους ηλεκτρικών απωλειών: τις απώλειες εν κενώ φορτίο (απώλειες πυρήνα ή σιδήρου) και τις απώλειες πλήρους φορτίου. Οι μετασχηματιστές είναι διαθέσιμοι σε ποικίλα μεγέθη, τύπους και χωρητικότητες [5]. Χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε τρεις κύριες περιοχές:

- για την ανύψωση της τάσης σε Υ.Τ. στα εργοστάσια παραγωγής (20kV/150kV ή 20kV/400kV)
- για την μεταφορά της ενέργειας (150kV/20kV ή 400kV/20kV)
- για τη διανομή της ενέργειας στους καταναλωτές (20kV/400V)



Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα δομής τυπικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

- **Διακοπτικά στοιχεία**

Στα δίκτυα συμπεριλαμβάνεται πλήθος συσκευών που χρησιμοποιούνται για σύνδεση και αποσύνδεση τμημάτων τους. Διακρίνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τη χρήση τους σε:

- Αποξεύκτες (A/Z - Isolators or Disconnectors): Χρησιμοποιούνται για απομόνωση τμημάτων κυκλώματος, αλλά μόνο όταν το κύκλωμα έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης. Διακρίνονται σε:
 1. ταχείας τήξεως (τύπου K): χρησιμοποιούνται για την προστασία των Υ/Σ διανομής.
 2. βραδείας τήξεως (τύπου T): χρησιμοποιούνται για την προστασία όλων των διακλαδώσεων από τον κορμό της γραμμής.
- Διακόπτες Ισχύος (Βραχυκυκλώσεως, Δ/Ι - Circuit Breakers): Πρόκειται για μέσα προστασίας που προκαλούν τη διακοπή λειτουργίας του κυκλώματος, όταν το ρεύμα σε αυτό υπερβεί τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Η λειτουργία τους ελέγχεται από τους εξής ηλεκτρονόμους (H/N):

- H/N Στιγμιαίας Λειτουργίας για σφάλματα Φάσεων (ΣΛΦ)
- H/N Στιγμιαίας Λειτουργίας για σφάλματα Γης (ΣΛΓ)
- H/N Χρονικής Καθυστέρησης Φάσεων (ΧΚΦ)
- H/N Χρονικής Καθυστέρησης Γης (ΧΚΓ).

Οι ηλεκτρονόμοι φάσεων εγκαθίστανται στις τρεις φάσεις, ενώ οι H/N γης στον ουδέτερο κόμβο των Μ/Σ εντάσεως.

- Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ - Switches): Χρησιμοποιούνται για αποσύνδεση μερών του κυκλώματος, ακόμα και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.
- Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/Α - Sectionalizing Switches): Οι διακόπτες απομόνωσης λειτουργούν σε σφάλματα που συμβαίνουν σε διακλαδώσεις δικτύων. Διεγείρονται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής. Μετράνε με εσωτερικό μηχανισμό, αμέσως μόλις περάσει από αυτούς το ρεύμα βραχυκυκλώματος, τους κύκλους λειτουργίας. Στον τελευταίο κύκλο ανοίγουν, αφού ανοίξει ο διακόπτης ισχύος. Στην συνέχεια ο διακόπτης ισχύος κλείνει και μένει κλειστός, ενώ ο Δ/Α μένει ανοικτός. Η τροφοδότηση των λοιπών καταναλωτών Μ.Τ. υφίσταται μόνο τις διακοπές που προέρχονται από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής. Πλεονέκτημα των διακοπών απομόνωσης έναντι των ασφαλειών είναι ότι δεν χρειάζονται αλλαγή και έχουν πλήρη συνεργασία με τον διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση. Η επανάρξευσή τους γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα αφού πρώτα βέβαια αποκατασταθεί το σφάλμα από συνεργείο της ΔΕΗ [6].

Έτσι υπάρχουν διακόπτες κανονικά κλειστοί υπό τάση, οι οποίοι συνδέουν τις γραμμές μεταξύ τους κατά την κανονική λειτουργία του δικτύου και άλλοι που είναι κανονικά ανοικτοί και κλείνουν μόνον όταν κριθεί απαραίτητο. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται επαναδιαμόρφωση του δικτύου ανακατευθύνοντας τη ροή ισχύος σε διαφορετικά τμήματά του [6].

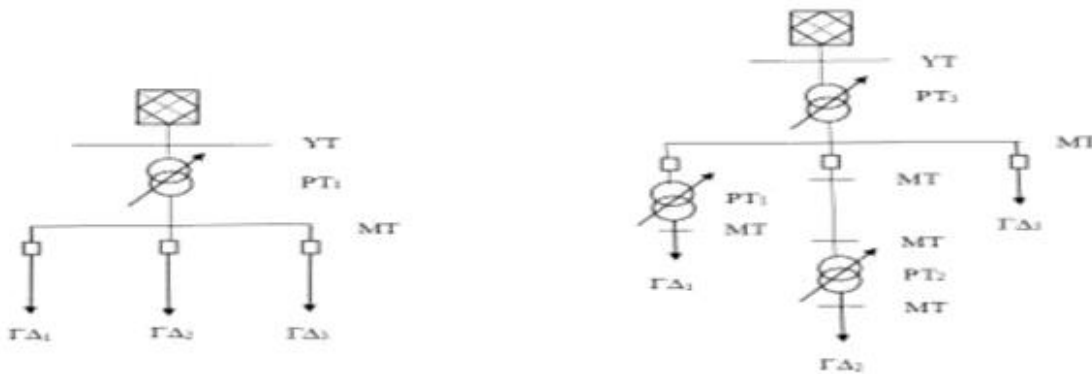
- **Χωρητικές αντισταθμίσεις**

Οι υποσταθμοί αλλά και οι μετασχηματιστές διανομής συνήθως διαθέτουν εγκατεστημένες συστοιχίες πυκνωτών με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης αλλά και τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος των γραμμών του δικτύου. Η σύνδεση των πυκνωτών είναι δυνατόν να γίνει σε σειρά ή παράλληλα με τις γραμμές. Η εγκατάσταση εν σειρά χωρητικών αντισταθμίσεων έχει πολύ περιορισμένες εφαρμογές και για το λόγο αυτό επιλέγεται σε ελάχιστες περιπτώσεις. Αντίθετα, ευρεία χρήση συναντούν οι πυκνωτές που συνδέονται παράλληλα με τις γραμμές και ονομάζονται εγκάρσιοι πυκνωτές ή εγκάρσιες αντισταθμίσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο, αντισταθμίζοντας έτσι μέρος της άεργου κατανάλωσης από τις αντιδράσεις των γραμμών. Με

την τοποθέτησή τους σε ζυγούς του δικτύου συμβάλλουν επίσης στη μείωση της πτώσης τάσης μεταξύ των γραμμών του, αλλά και στη μεταβολή του συντελεστή ισχύος προς τη μονάδα. Οι πυκνωτές συμπεριλαμβάνουν μεγάλο κόστος για το δίκτυο, ανάλογα με τον τύπο τους και τη θέση τους σε αυτό. Έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα εάν τοποθετηθούν κοντά στους καταναλωτές, αλλά το κόστος αυτό είναι υπερβολικά μεγαλύτερο σε σχέση με την τοποθέτηση τους κοντά στους υποσταθμούς [4].

- **Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ**

Οι μετασχηματιστές υποβιβασμού Υ.Τ. σε Μ.Τ. είναι συνήθως εξοπλισμένοι με συστήματα που δίνουν τη δυνατότητα μεταβολής της τάσης εξόδου τους υπό φορτίο (Σχήμα 2.2). Με τη χρήση πολλαπλών λήψεων στο πρωτεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή και κινητών επαφών στο δευτερεύον καθίσταται εφικτή η αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού των τυλιγμάτων τους χωρίς διακοπή της ροής ισχύος. Η μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού δεν είναι συνεχής αλλά με βήματα, κατά ένα ποσοστό του αρχικού λόγου ανά βήμα [1],[7].

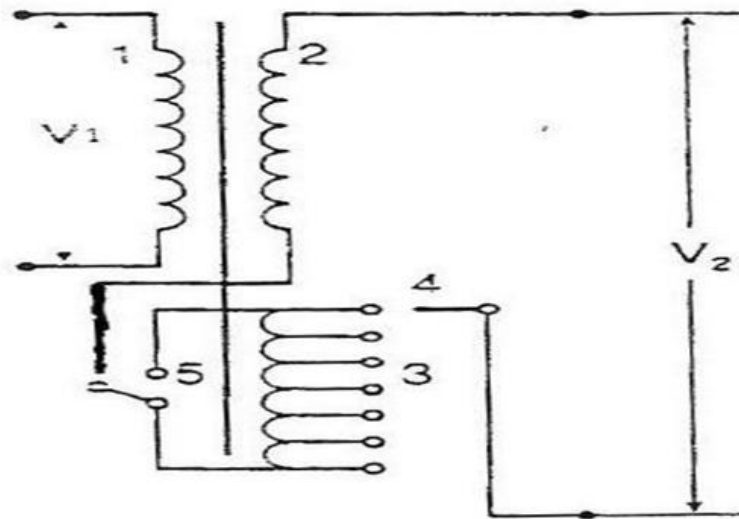


Σχήμα 2.2 : Θέση εγκατάστασης μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ

- **Ρυθμιστής Τάσης**

Οι ρυθμιστές τάσης είναι αυτομετασχηματιστές που τοποθετούνται κατά μήκος του δικτύου διανομής, για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πτώσης τάσης (Σχήμα 2.3). Με τον τρόπο αυτό οι καταναλωτές στο τέλος μιας γραμμής διανομής έχουν παρόμοιο επίπεδο τάσης με εκείνους στην εκκίνηση.

Σε γραμμές μεγάλου μήκους που χαρακτηρίζονται από υψηλή φόρτιση τοποθετούνται περισσότεροι από ένας ρυθμιστές τάσης. Στις περιπτώσεις αυτές το ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να κρατήσει τις τάσεις εντός ορίων λόγω του μήκους των γραμμών και της υψηλής τους φόρτισης και μόνο η τοποθέτηση ρυθμιστών τάσης σε σειρά διορθώνουν το πρόβλημα ανυψώνοντας σταδιακά την τάση.



Σχήμα 2.3 : Σύνδεση ρυθμιστή τάσης υπό φορτίο σε Μ/Σ (ανά φάση)

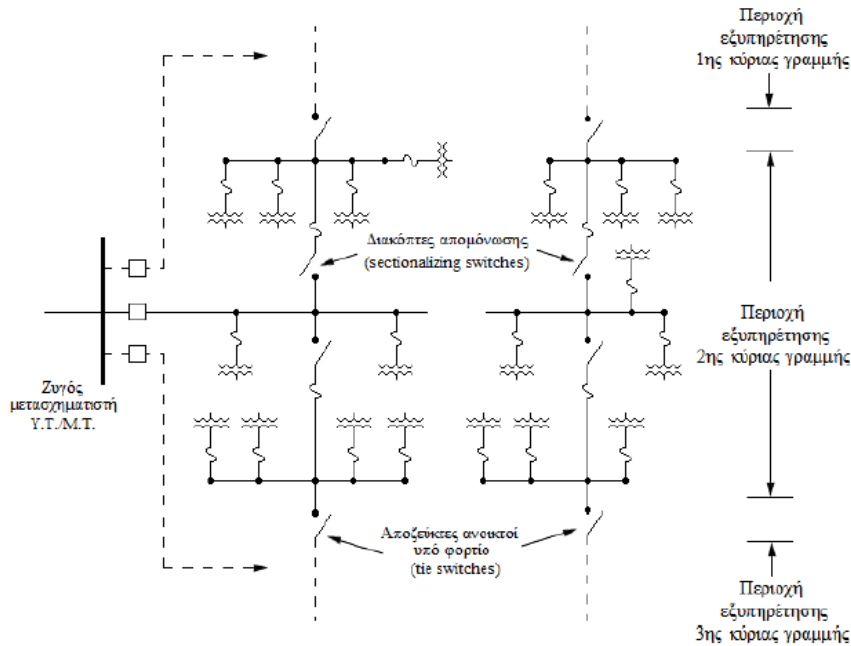
2.2.2 Τοπολογίες δικτύων διανομής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μορφή των δικτύων διανομής ποικίλλει ανάλογα με τα ιδιάζοντα χωροταξικά και δομικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Έτσι, ανάλογα με τη θέση και το είδος των φορτίων τροφοδότησης τα δίκτυα μπορεί να εμφανίζουν από διαφορετικές τιμές λειτουργίας έως και διαφορετική συνδεσμολογία μεταξύ των γραμμών. Συγκεκριμένα διακρίνουμε τις εξής βασικές τοπολογίες δικτύων:

- Ακτινικά δίκτυα
- Βροχοειδή δίκτυα
- Δικτυωτά δίκτυα

- **Ακτινικά συστήματα (Radial)**

Τα περισσότερα συστήματα διανομής σχεδιάζονται ακτινικά (Σχήμα 2.4), κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι ότι υπάρχει μόνο ένα μονοπάτι ανάμεσα σε έναν καταναλωτή και τον υποσταθμό. Η ηλεκτρική ροή ρέει αποκλειστικά μακριά από τον υποσταθμό και προς τους καταναλωτές μέσω μιας και μοναδικής διαδρομής, η οποία εάν διακοπεί έχει ως αποτέλεσμα την ολική απώλεια ενέργειας προς τον καταναλωτή. Η υπεροχή της τοπολογίας αυτής βασίζεται σε δύο συντριπτικά πλεονεκτήματα: είναι πολύ οικονομικότερη λύση σε σχέση με τις άλλες δύο εναλλακτικές και είναι απλούστερη στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και στη λειτουργικότητά της. Στην αντίπερα όχθη, τα ακτινικά συστήματα τροφοδοσίας είναι λιγότερο αξιόπιστα απ' ό,τι τα κυκλικά ή τα δικτυωτά συστήματα καθότι υπάρχει μόλις μια διαδρομή ανάμεσα στον υποσταθμό και τον κάθε καταναλωτή. Έτσι εάν κάποιο στοιχείο κατά μήκος της διαδρομής αποτύχει, έχουμε ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας [5].



Σχήμα 2.4 : Ακτινικό δίκτυο διανομής

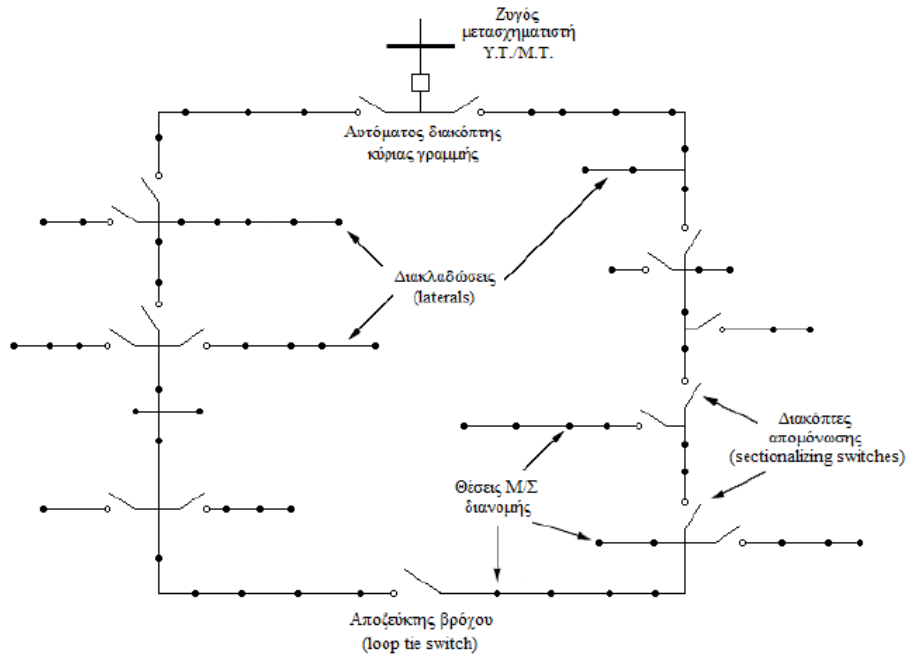
- **Βροχοειδή συστήματα (Loop)**

Μια εναλλακτική λύση για το ακτινικό σχεδιασμό είναι το κυκλικό σύστημα που αποτελείται από ένα σχέδιο διανομής με δυο μονοπάτια ανάμεσα στην πηγή ενέργειας (υποσταθμός) και κάθε πελάτη (Σχήμα 2.5). Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε η παροχή να διατηρείται ανεξάρτητα απ' το που βρίσκεται ένα «ανοιχτό» σημείο πάνω στο βρόχο. Ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοσίας είναι ελάχιστα πιο περίπλοκο από ένα ακτινικό, καθώς η ενέργεια συνήθως ρέει από δυο πλευρές προς την μέση και σε όλες τις περιπτώσεις μπορεί να πάρει μόνο μια από τις δύο οδούς. Αλλά εάν σχεδιαστεί βάσει σωστών προδιαγραφών, το βροχοειδές σύστημα είναι πιο αξιόπιστο από τα ακτινικά δίκτυα. Η παροχή υπηρεσιών δεν θα διακοπεί στην πλειοψηφία των πελατών οποτεδήποτε ένα τμήμα βγει εκτός, επειδή δεν υπάρχει μονόπλευρη κατεύθυνση σε κανένα βρόχο. Το κύριο μειονέκτημα των βροχοειδών συστημάτων είναι η χωρητικότητα και το κόστος [5].

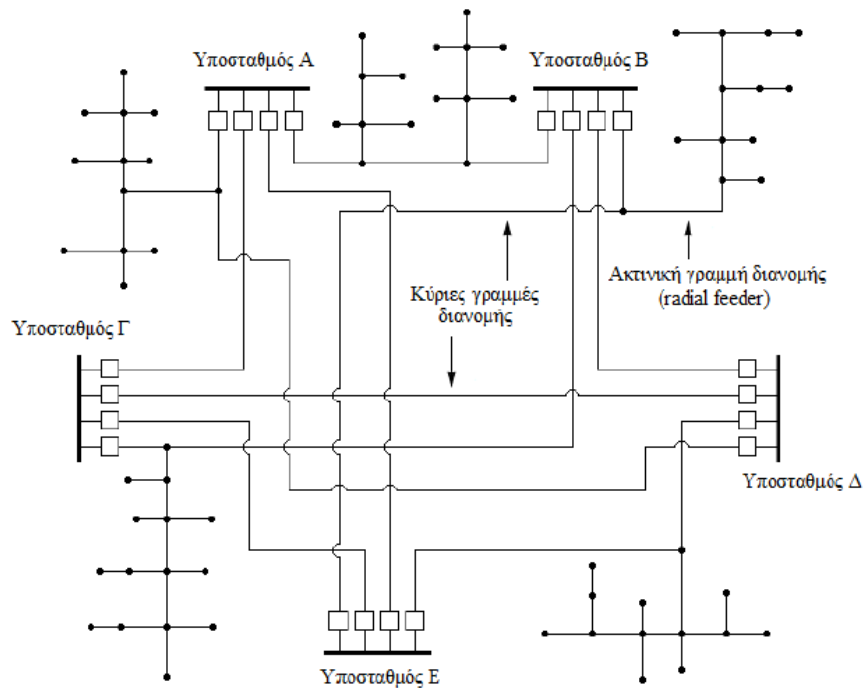
- **Δικτυωτά συστήματα (Networks)**

Τα δικτυωτά συστήματα διανομής είναι τα πιο περίπλοκα, τα πιο αξιόπιστα και σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις και το πιο οικονομικό σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 2.6). Ένα δίκτυο περιλαμβάνει πολλά μονοπάτια ανάμεσα σε όλα τα σημεία του. Η ροή ενέργειας ανάμεσα σε οποιαδήποτε δυο σημεία συνήθως χωρίζεται σε διαφορετικά μονοπάτια και αν εμφανιστεί βλάβη, το σύστημα άμεσα και αυτόματα αλλάζει την κατεύθυνση ροής. Ένα δίκτυο διανομής σχεδόν πάντα περιλαμβάνει συμπλέγματα ακτινικών τροφοδοσιών και ένα δευτερεύον δικτυωτό σύστημα (ένα δικτυωτό πλέγμα από ηλεκτρικά ισχυρούς αγωγούς που συνδέουν όλους μαζί τους πελάτες σε βασική τάση χρησιμοποίησης). Τα δικτυωτά συστήματα είναι πολύ πιο ακριβά από τα ακτινικά συστήματα διανομής, αλλά όχι πάντα και απαιτούν μόλις

μα μικρή ποσότητα χωρητικής αγωγιμότητας μεγαλύτερη από ένα κυκλικό σύστημα. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι είναι πολύ πιο περίπλοκα από όλες τις υπόλοιπες μορφές διανομής και έτσι είναι πολύ δύσκολα στην ανάλυση και τη σχεδίαση [5].



Σχήμα 2.5 : Βροχοειδές δίκτυο διανομής



Σχήμα 2.6 : Δικτυωτό δίκτυο διανομής

2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 1.1, σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή και διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Η ποιότητα της προσφερόμενης ισχύος εξαρτάται από το σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου μεταφοράς, καθώς και από την αξιοπιστία του πρωτεύοντος (Μ/Σ, διακόπτες κτλ.) και δευτερεύοντος υλικού (συσκευές προστασίας). Η εξασφάλιση ικανοποιητικής αξιοπιστίας είναι ιδιαίτερα σημαντική και απαραίτητη. Περιορίζεται, ωστόσο, από το κόστος που απαιτεί η διασφάλισή της. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να πραγματοποιείται εκείνη η επιλογή στοιχείων στο δίκτυο, η οποία να ικανοποιεί ταυτόχρονα όσο γίνεται περισσότερο και τους δύο περιορισμούς.

Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών εταιρειών εκτός από την αύξηση της αξιοπιστίας είναι η μείωση του κόστους λειτουργίας. Για αυτό επιδιώκεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί κοντά στο όριο μέγιστης φόρτισης, γεγονός που εξασφαλίζει αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Η λειτουργία, όμως, ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από αυτές τις συνθήκες το κάνει επιρρεπές σε βλάβες, καθώς όταν τα στοιχεία του δικτύου λειτουργούν στα όριά τους, η παραμικρή υπέρβαση των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους θα οδηγήσει σε σοβαρές διαταραχές.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη κανονική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η διάθεση ενέργειας στους καταναλωτές υπό κανονικές συνθήκες αλλά και υπό συνθήκες διαταραχών, απαιτείται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας που θα αντιμετωπίζει όποιες διαταραχές και σφάλματα εμφανίζονται στο δίκτυο του συστήματος.

Ως προστασία μπορούμε να ορίσουμε την απομόνωση του ελάχιστου δυνατού τμήματος του δικτύου στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Ο ρόλος της προστασίας συνίσταται στο να επενεργήσει με τέτοιο τρόπο προκειμένου να περιορίσει όσο γίνεται το σφάλμα στο στοιχείο στο οποίο εκδηλώθηκε, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στο υπόλοιπο σύστημα. Κύρια επιδίωξή της είναι να μην τεθεί εκτός λειτουργίας και άλλο στοιχείο πέραν αυτού στο οποίο εντοπίστηκε η βλάβη. Έτσι, είναι δυνατόν να αποφευχθεί η δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν το ανθρώπινο δυναμικό (π.χ. ηλεκτροπληξία) ή κάποια εγκατάσταση (π.χ. πυρκαγιά).

Τα εναέρια δίκτυα διανομής υπόκεινται σε σφάλματα δύο τύπων, τα παροδικά και τα μόνιμα σφάλματα. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος, περίπου το 75 έως 90% του συνολικού αριθμού σφαλμάτων είναι παροδικά. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να απαλείφονται με μικρές διακοπές της τροφοδότησης της γραμμής από αυτόματους διακόπτες ισχύος που πραγματοποιούν κύκλο αποζεύξεων και επαναζεύξεων, για χρονικό διάστημα αρκετό ώστε να αποσβεστεί το τόξο. Η ταχύτητα του διακόπτη ισχύος, οι ρυθμίσεις των H/N του, και τα άλλα χαρακτηριστικά του, επιλέγονται ώστε να διακόπτουν το ρεύμα σφάλματος πριν την τήξη κάποιας ασφάλειας, η οποία θα μετέτρεπε το παροδικό σφάλμα σε μόνιμο. Μόνιμα σφάλματα είναι αυτά για την αποκατάσταση των οποίων απαιτούνται ειδικές μη-αυτόματες ενέργειες. Το πλήθος των καταναλωτών που επηρεάζονται από το σφάλμα ελαχιστοποιείται μέσω της κατάλληλης επιλογής και τοποθέτησης του εξοπλισμού προστασίας.

Στα υπόγεια δίκτυα σχεδόν όλα τα σφάλματα είναι μόνιμα και αρκεί απλή διαβάθμιση των προστασιών υπερεντάσεως. Παρ' ότι ο αριθμός των σφαλμάτων που εμφανίζονται στα

υπόγεια δίκτυα είναι μικρότερες απ' ό τι στα εναέρια, συχνά επηρεάζουν μεγαλύτερο αριθμό καταναλωτών.

Στη δημιουργία ξεχωριστού τομέα για την προστασία του δικτύου στις ηλεκτρικές εταιρείες συνέβαλε από τη μία η αύξηση του μεγέθους των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, και από την άλλη η ανάπτυξη της τεχνολογίας. Συγκεκριμένα, ο κίνδυνος σφάλματος ενυπάρχει σε κάθε στοιχείο ενός συστήματος και μπορεί να προέλθει είτε από εξωτερικό αίτιο (π.χ. κεραυνός), είτε από εσωτερικό (π.χ. γήρανση της μόνωσης). Ειδικά όταν πρόκειται για συστήματα μεγάλων διαστάσεων, όπου υπάρχουν πολλά συσχετιζόμενα στοιχεία, το ποσοστό κινδύνου πολλαπλασιάζεται.

Στις συσκευές προστασίας η τεχνολογική ανάπτυξη συντέλεσε στη δημιουργία τριών γενιών ηλεκτρονόμων, οι οποίες δίνονται στη συνέχεια με χρονολογική σειρά: τους ηλεκτρομηχανικούς, τους στατικούς και τους ψηφιακούς. Οι ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι λειτουργούν με βάση την αρχή του επαγωγικού κινητήρα, ενώ οι στατικοί περιλαμβάνουν στοιχεία ηλεκτρονικής και διατάξεις λογικών κυκλωμάτων. Τέλος, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι λαμβάνουν ως είσοδο αναλογικά και ψηφιακά σήματα και δίνουν στην έξοδο ψηφιακά σήματα. Οι ψηφιακοί μπορούν να επιτελέσουν πολύ περισσότερες λειτουργίες από αυτούς των προηγούμενων γενιών με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα.

Σε μεγάλα συστήματα η εμφάνιση ενός σφάλματος μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα, αφού πιθανόν να έχει αντίκτυπο σε πολλά τμήματα του συστήματος. Χωρίς την κατάλληλη προστασία επομένως το σύστημα δεν μπορεί να εκπληρώσει το στόχο του.

Γενικά είναι δυνατό να γίνει διαχωρισμός της προστασίας σε δύο κυρίως είδη, καθένα από τα οποία έχει διαφοροποιημένη λειτουργία και στόχο:

- προστασία εξοπλισμού, η οποία έχει ως σκοπό την ταχύτατη εκκαθάριση των σφαλμάτων που εμφανίζονται στο δίκτυο, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μηχανική καταστροφή του εξοπλισμού και οι πιθανές συνέπειες που θα προκληθούν από το σφάλμα. Για να επιτευχθεί αυτό η προστασία εξοπλισμού δίνει σήμα σε κάποιον διακόπτη να ανοίξει για να απομονωθεί το στοιχείο στο οποίο εμφανίστηκε βλάβη, ή κάποια περιοχή που περιλαμβάνει το σημείο βλάβης.
- προστασία συστήματος από αστάθεια. Πρόκειται για προστασία του συστήματος, όταν έχει συμβεί κάποια σοβαρή διαταραχή, όπως για παράδειγμα απώλεια μονάδας παραγωγής ή μεγάλη και συντονισμένη αύξηση της ζήτησης φορτίου, οπότε και χάνεται το σημείο ισορροπίας.

Ένα σύστημα προστασίας το χαρακτηρίζουμε ως προς την ποιότητα και την απόδοση του χρησιμοποιώντας τις παρακάτω έννοιες:

- Εξαρτησιμότητα: Εκφράζει την πιθανότητα μη αποτυχημένης λειτουργίας υπό δεδομένες συνθήκες. Ως αποτυχημένη λειτουργία είναι η μη λειτουργία ή η λανθασμένη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες σφάλματος, όπου θα έπρεπε να λειτουργήσει με συγκεκριμένο τρόπο. Αν κάποια προστασία έχει υψηλό βαθμό εξαρτησιμότητας, τότε εξασφαλίζει ότι κάποιο εμφανιζόμενο σφάλμα ή μια διαταραχή θα αντιμετωπιστεί με βεβαιότητα και μάλιστα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

- **Ασφάλεια:** Η ασφάλεια εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να αποφεύγει την ανεπιθύμητη λειτουργία υπό συνθήκες σφάλματος ή όχι. Ανεπιθύμητη είναι η λειτουργία του συστήματος όταν δεν υπάρχει σφάλμα ή όταν υπάρχει σφάλμα εκτός της ορισμένης ζώνης λειτουργίας του. Αν κάποιο σύστημα προστασίας χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό ασφάλειας, σημαίνει ότι δεν θα απομονωθεί κάποιο τμήμα του δικτύου χωρίς να υπάρχει ανάγκη και ότι το τμήμα του δικτύου που θα απομονωθεί σε περίπτωση σφάλματος θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.
- **Αξιοπιστία:** Εκφράζει την πιθανότητα ότι το σύστημα προστασίας θα εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία για δεδομένες συνθήκες σφάλματος και εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Αποτελεί δηλαδή, την συνδυασμένη ικανότητα του συστήματος προστασίας να αποφύγει την αποτυχία λειτουργίας, αλλά και την ανεπιθύμητη λειτουργία.
- **Επιλεκτικότητα:** Η επιλεκτικότητα εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να επιλέγει τις συνθήκες για τις οποίες πρέπει ή δεν πρέπει να λειτουργήσει, ώστε όταν χρειαστεί να ανοίγει ο κοντινότερος στο σφάλμα διακόπτης και να ελαχιστοποιείται η περιοχή απομόνωσης.
- **Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος:** Ο χρόνος που μεσολαβεί από την εμφάνιση ενός σφάλματος έως τη λειτουργία του σχήματος προστασίας για την απομόνωσή του πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Η απομόνωση του σφάλματος πρέπει να είναι ταχύτατη, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανές συνέπειες του σφάλματος. Ο χρόνος εκκαθάρισης εξαρτάται από την κρισιμότητα του συγκεκριμένου τμήματος του δικτύου που προστατεύεται. Για αυτό τον λόγο σε μονάδες παραγωγής και γραμμές υπερυψηλής τάσης απαιτείται μέγιστη δυνατή ταχύτητα εκκαθάρισης σφάλματος, ενώ στις γραμμές διανομής δεν δημιουργεί πρόβλημα η λίγο πιο αργή λειτουργία της προστασίας.

Κατά τον σχεδιασμό του σχήματος προστασίας ενός συστήματος μεγάλη βαρύτητα δίνεται στην αξιοπιστία, η οποία ουσιαστικά αποτελεί συνδυασμό της εξαρτησιμότητας και της ασφάλειας. Γενικά, όμως, αύξηση της εξαρτησιμότητας οδηγεί σε μείωση της ασφάλειας και αντιστρόφως. Γι' αυτό, πολιτική της προστασίας είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των δύο παραμέτρων, προς όφελος πάντα της αξιοπιστίας. Βέβαια, η αύξηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος προστασίας περιορίζεται από το απαιτούμενο για αυτήν την αύξηση κόστος.

Γενικά, ένα σύστημα προστασίας αποτελείται από μετασχηματιστές έντασης (ΜΕ), μετασχηματιστές τάσης (ΜΤ) και ηλεκτρονόμους προστασίας (Η/Ν). Η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία, καθώς επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι:

- Οικονομικοί (κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διατάξεων προστασίας).
- Η συμβατότητα με τις τυποποιημένες διατάξεις των κατασκευαστών, ώστε να εξασφαλίζεται αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος και ευελιξία για το μέλλον.

- Η εμπειρία, που σημαίνει ότι λαμβάνονται υπόψη προηγούμενα προβλήματα σχετικά με το σύστημα.
- Οι διαθέσιμες μετρήσεις και καταγραφές σφαλμάτων και βλαβών.

2.3.1 Σχεδίαση προστασίας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της σχεδίασης της προστασίας εναέριων και υπόγειων δικτύων διανομής.

- **Βασικές Αρχές**

Η βασική αρχή της σχεδίασης της προστασίας ενός εναέριου δικτύου διανομής είναι η επιλογική συνεργασία ή διαβάθμιση των μέσων προστασίας. Με τον όρο διαβάθμιση των μέσων προστασίας, εννοούμε τη διαδικασία επιλογής των μέσων προστασίας από υπερεντάσεις με καθορισμένα χαρακτηριστικά χρόνου - έντασης, και των θέσεων εγκατάστασής του (σε σειρά κατά μήκος του δικτύου), ώστε να αποκαθιστούν τα πιθανά σφάλματα με μία συγκεκριμένη σειρά λειτουργίας. Όταν δυο μέσα προστασίας που είναι εγκατεστημένα σε σειρά, έχουν χαρακτηριστικά που παρέχουν λειτουργία σύμφωνα με μία καθορισμένη σειρά, ονομάζονται συνεργαζόμενα ή διαβαθμισμένα. Κατάλληλα διαβαθμισμένα μέσα προστασίας βοηθούν:

1. στη μείωση των διακοπών τροφοδότησης λόγω παροδικών σφαλμάτων.
2. στη μείωση της έκτασης επίδρασης των σφαλμάτων, ώστε να μειώνεται ο αριθμός των επηρεαζόμενων καταναλωτών.
3. στον εντοπισμό του σφάλματος, μειώνοντας αντίστοιχα τη διάρκεια των αποκοπών φορτίων.

Η διαβάθμιση έγκειται συνεπώς στην επιλογή των μέσων προστασίας και τη ρύθμισή τους ώστε να αναπτυχθούν ζώνες που παρέχουν προστασία από παροδικά σφάλματα και μειώνουν κατά το δυνατό το μέγεθος της επηρεαζόμενης περιοχής εάν ένα σφάλμα είναι μόνιμο. Για τις μελέτες διαβάθμισης, είναι απαραίτητη η επεξεργασία των εξής δεδομένων:

1. Τοπολογίας του δικτύου.
2. Θέσεως των υπαρχόντων μέσων προστασίας.
3. Καμπύλων χρόνου - έντασης των μέσων προστασίας.
4. Ρευμάτων φορτίου (υπό μόνιμες και μεταβατικές καταστάσεις).
5. Ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε κάθε σημείο του δικτύου.

Μία γενική μέθοδος διαβάθμισης των μέσων προστασίας, εφαρμοζόμενη είτε με χρήση ΗΥ είτε χωρίς, μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα:

1. Συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων.
2. Αρχική επιλογή του τύπου και των θέσεων εγκατάστασης μέσων προστασίας.
3. Καθορισμός της περιοχής των ρευμάτων σφάλματος που γίνονται αντιληπτά από κάθε μέσο προστασίας, δηλαδή των ακραίων τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης που αναμένεται να αντιληφθεί το μέσο αυτό. Π.χ. για τα μέσα που εγκαθίστανται στην αρχή των διακλαδώσεων, η περιοχή σφαλμάτων μεταξύ φάσεων καθορίζεται από τα ρεύματα: τριφασικού χωρίς γη βραχυκυκλώματος στην αρχή της διακλάδωσης (μέγιστη τιμή) και το ελάχιστο από τα ρεύματα βραχυκύκλωσης για σφάλματα στους τελικούς κόμβους της διακλάδωσης (για διφασικό χωρίς γη βραχυκύκλωμα).
4. Επιλογή των απαραίτητων μέσων του υποσταθμού για την προστασία του μετασχηματιστή από κάθε σφάλμα που μπορεί να προκύψει στο δίκτυο.
5. Διαβάθμιση των μέσων προστασίας από τον υποσταθμό και προς το τέλος των γραμμών, ή αντίστροφα.
6. Αναθεώρηση και αλλαγές, εάν είναι απαραίτητο, των αρχικών θέσεων των μέσων προστασίας.
7. Επανεξέταση των επιλεγέντων μέσων για ικανότητα διακοπής και ελάχιστη ένταση διέγερσης.

• Γενικό Σχήμα - Μέσα Προστασίας

Το γενικό σχήμα προστασίας των εναέριων δικτύων είναι αντικείμενο γενικότερων αποφάσεων που συνδέονται με χαρακτηριστικά της λειτουργίας των γραμμών (π.χ. γείωση των γραμμών και των Μ/Σ, συνδεσμολογία των τυλιγμάτων των Μ/Σ, κ.α.). Η ΔΕΗ εφαρμόζει ένα σχήμα προστασίας, παρόμοιο με αυτό που εφαρμόζεται στις Η.Π.Α., στην Αγγλία, και σε άλλες χώρες.

Η λειτουργία των διαφόρων μέσων χαρακτηρίζεται από τους εξής παράγοντες:

1. Οι A/Z χαρακτηρίζονται από δύο καμπύλες χρόνου - εντάσεως: την καμπύλη έναρξης τήξης και την καμπύλη σβέσεως τόξου. Οι καμπύλες αυτές είναι ορισμένες, ανάλογα με τον τύπο και την ονομαστική ένταση του A/Z.
2. Η λειτουργία των Δ/A χαρακτηρίζεται από:
 - την ένταση διέγερσής τους.

- τον αριθμό των διακοπών τροφοδότησης (που προκαλούνται από τη λειτουργία του Δ/Ι) που πρέπει να καταμετρήσουν ώστε να ανοίξουν.
3. Η λειτουργία κάθε Η/Ν του Δ/Ι χαρακτηρίζεται από:
- τον τύπο του (αντιστρόφου χρόνου, πολύ αντιστρόφου χρόνου, ή εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου) για τους Η/Ν χρονικής καθυστέρησης.
 - την πολλαπλασιαστική ρύθμιση χρόνου (1-10) για τους Η/Ν ΧΚ.
 - το λόγο μετασχηματισμού του Μ/Σ εντάσεως που προηγείται.
 - την ένταση διέγερσής του.

Μπορούμε να πούμε για τους Η/Ν χρονικής καθυστέρησης ότι:

- ο τύπος του Η/Ν καθορίζει τη μορφή της καμπύλης χρόνου-έντασης σε αντίστοιχα διαγράμματα.
- η πολλαπλασιαστική ρύθμιση χρόνου μετατοπίζει την καμπύλη αυτή κατακόρυφα.
- η ένταση διέγερσης (και ο λόγος μετασχηματισμού) μετατοπίζουν την καμπύλη οριζοντίως.

Οι Η/Ν στιγμιαίας λειτουργίας έχουν σχεδόν σταθερό χρόνο λειτουργίας.

Η προστασία των υπόγειων δικτύων είναι σημαντικά απλούστερη, καθώς σχεδόν όλα τα σφάλματα είναι μόνιμα. Για την προστασία τους επαρκεί η εγκατάσταση ασφαλειών στους Υ/Σ διανομής (ανάλογα με την ισχύ των Μ/Σ) και Δ/Ι ελεγχόμενων από Η/Ν ΣΛ στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ.

- **Διαβάθμιση μέσω προστασίας εναέριων δικτύων**

Η διαβάθμιση των μέσων προστασίας εναέριων δικτύων βασίζεται στον κύκλο ζεύξεων - αποζεύξεων του Δ/Ι του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, οι Η/Ν στιγμιαίας λειτουργίας προκαλούν την ταχεία διακοπή τροφοδότησης, πριν την έναρξη τήξης κάποιου Α/Ζ για τα σφάλματα της αντίστοιχης διακλάδωσης, σε χρόνο T_1 μετά την εμφάνιση ενός σφάλματος. Η τροφοδότηση του δικτύου επανέρχεται σε χρόνο T_2 . Εάν το σφάλμα είναι παροδικό έχει επέλθει σβέση του τόξου και το δίκτυο επανέρχεται στην κανονική λειτουργία. Εάν το σφάλμα δεν είναι παροδικό στο διάστημα $T_2 - T_3$ θα πρέπει να τακεί ο Α/Ζ που προηγείται. Εάν το σφάλμα συνεχίζεται να υφίσταται έως το χρόνο T_3 (δηλαδή είναι σφάλμα στον κορμό ή στον Υ/Σ) πρέπει να αποκοπεί ολόκληρη η γραμμή. Κατά κανόνα πραγματοποιείται ένας πρόσθετος κύκλος αυτόματης επαναφοράς, $T_4 - T_5$, με σκοπό την απομάκρυνση ημιμόνιμων σφαλμάτων. Εάν το σφάλμα είναι μόνιμο στον κορμό της γραμμής η τροφοδότηση όλης της γραμμής θα διακοπεί στον χρόνο T_5 . Ο κύκλος του Σχήματος 2.7

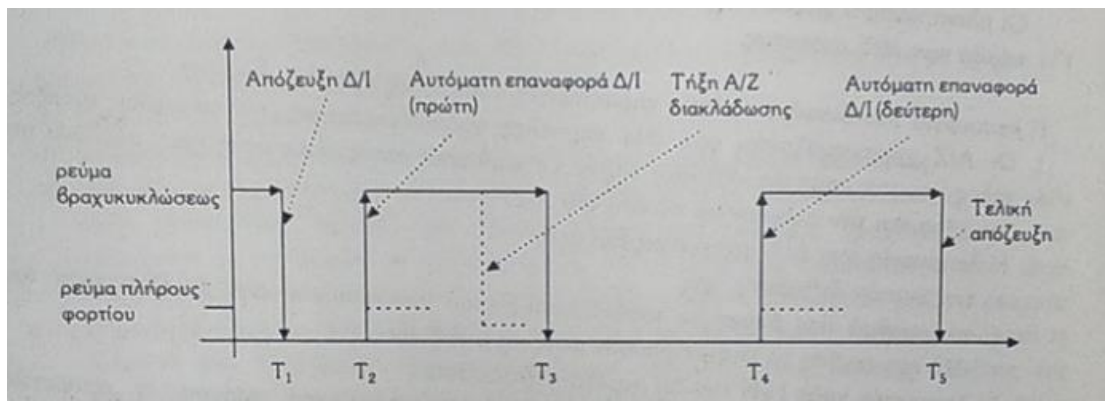
περιλαμβάνει τρεις αποζεύξεις και δύο αυτόματες επαναζεύξεις. Συχνά προβλέπεται και μία ακόμη επαναφορά προ του τελικού ανοίγματος, όταν εγκαθίστανται Δ/Α.

Η σχεδίαση της προστασίας μιας συγκεκριμένης γραμμής, δεδομένου του γενικότερου σχήματος και των χρησιμοποιούμενων μέσων, υπόκειται σε κανόνες που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μέσων που χρησιμοποιούνται και από την ακολουθούμενη πρακτική της Ηλεκτρικής Επιχείρησης που βασίζεται στην εμπειρία. Μία κωδικοποίηση των κανόνων που εφαρμόζονται από τη ΔΕΗ, και ενσωματώνονται στα προγράμματα ΗΥ που έχουν αναπτυχθεί, είναι η εξής:

1. Οι Α/Ζ τύπου Κ εγκαθίστανται στους υποσταθμούς διανομής. Ο τύπος τους εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ του Μ/Σ και καθορίζεται από πίνακες.
2. Οι Α/Ζ τύπου Τ εγκαθίστανται στη συνέχεια ώστε να συνεργάζονται με τους Α/Ζ τύπου Κ: για τα σφάλματα που βλέπουν κοινά (δηλαδή τα σφάλματα στους υποσταθμούς διανομής) να τήκεται πλήρως ο Α/Ζ Κ πριν την έναρξη τήξης του Α/Ζ Τ. Αλλιώς, η καμπύλη σβέσεως τόξου του Α/Ζ Κ να βρίσκεται κάτω από την καμπύλη έναρξης τήξης του Α/Ζ Τ για όλη την κοινή περιοχή ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Η συνεργασία καθορίζεται και από πίνακες.
3. Δ/Α μπορούν να εγκατασταθούν στην αρχή των διακλαδώσεων από τον κορμό των γραμμών όταν δεν είναι δυνατή η συνεργασία μεταξύ Δ/Ι και Α/Ζ Τ. Προβλήματα συνεργασίας Α/Ζ με τον Δ/Ι (τήξη Α/Ζ για μεγάλο ποσοστό παροδικών σφαλμάτων) προκύπτουν συχνά για τις διακλαδώσεις που βρίσκονται κοντά στην αρχή των γραμμών (για μεγάλες τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης). Η ονομαστική ένταση των Δ/Α πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά 2 τουλάχιστον φορές από το μέγιστο ρεύμα φορτίου στο σημείο εγκατάστασης, και κατά 1.6 φορές μικρότερη από το ελάχιστο σφάλμα στο προστατευόμενο τμήμα. Η εγκατάσταση Δ/Α μπορεί να βελτιστοποιηθεί με οικονομικά κριτήρια.
4. Η λειτουργία των Η/Ν πρέπει να ικανοποιεί τους παρακάτω περιορισμούς:
 - Η ένταση διέγερσής τους να είναι μικρότερη από την ελάχιστη ένταση των αντίστοιχων σφαλμάτων (γης για τους Η/Ν γης και φάσεων για τους Η/Ν φάσεων) στη γραμμή. Οι Η/Ν ΧΚ θα πρέπει να λειτουργούν για όλα τα σφάλματα σε χρόνο κατά το δυνατόν μικρότερο των 6 sec, και οπωσδήποτε πριν τα 10 sec.
 - Να συνεργάζονται με τους Α/Ζ Τ που έπονται. Δηλαδή:
 - Οι Η/Ν ΧΚ θα πρέπει για όλη την περιοχή εντάσεων σφαλμάτων φάσεων που βλέπουν κοινά με κάθε Α/Ζ Τ να έχουν χρόνο λειτουργίας τουλάχιστον 0.3 sec μεγαλύτερο του χρόνου πλήρους διακοπής του Α/Ζ.
 - Οι Η/Ν ΣΛ θα πρέπει για την ίδια περιοχή να έχουν χρόνο πλήρους λειτουργίας (συμπεριλαμβανομένου του χρόνου λειτουργίας του Δ/Ι) μικρότερο του χρόνου έναρξης τήξεως του Α/Ζ.

- Η ένταση διέγερσης των Η/Ν φάσεων να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ένταση φορτίου της γραμμής τουλάχιστον κατά 1.5 φορές για τους ΧΚ και 2 φορές για τους ΣΛ.

Από τους Η/Ν ΧΚ που πληρούν τους περιορισμούς αυτούς επιλέγονται αυτοί, η καμπύλη λειτουργίας των οποίων βρίσκεται πιο κοντά σε αυτή των Α/Ζ Τ για κάθε κοινή περιοχή σφαλμάτων. Για τους Η/Ν ΧΚΦ εξετάζεται διαδοχικά η εγκατάσταση τύπου αντιστρόφου, πολύ αντιστρόφου και εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου. Για κάθε τύπο, σαρώνονται διαδοχικά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά λειτουργίας μέχρι να βρεθεί αυτός που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Για τους Η/Ν ΧΚΓ εξετάζεται η εγκατάστασή τους με την αντίστροφη σειρά τύπων. Για τους Η/Ν ΣΛ υπάρχει μόνο ένας τύπος σταθερού χρόνου, ενώ καθορίζονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 2.7 : Κύκλος ζεύξεων - αποζεύξεων Δ/Ι για την προστασία εναέριας γραμμής με αυτόματο Δ/Ι και Α/Ζ

2.3.2 Αξιοπιστία

- **Απαιτήσεις αξιοπιστίας δικτύων διανομής**

Οι ηλεκτρικές επιχειρήσεις οφείλουν να παρέχουν συνεχή καλής ποιότητας τροφοδότηση στους καταναλωτές τους, κάνοντας οικονομική χρήση του συστήματος και του εξοπλισμού τους. Με τον όρο συνεχή τροφοδότηση εννοείται η εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών, συνοδευόμενη από συνθήκες ασφάλειας για το προσωπικό και τον εξοπλισμό. Με τον όρο τροφοδότηση καλής ποιότητας εννοείται η εξυπηρέτηση μέσα σε προκαθορισμένα όρια τάσης και συχνότητας.

Η διατήρηση της συνέχειας τροφοδότησης ή αξιοπιστίας τροφοδότησης των καταναλωτών αποτελεί βασικό κριτήριο κατά τη σχεδίαση των δικτύων διανομής. Το κόστος των διακοπών τροφοδότησης προκύπτει κυρίως από τη ζημία που υφίστανται οι καταναλωτές και όχι από την μη πώληση ενέργειας από την ηλεκτρική επιχείρηση. Εξαρτάται δε, από το είδος των καταναλωτών (οικιακοί, βιομηχανικοί, κ.λ.π.) από την διάρκεια των διακοπών και τη συχνότητά τους.

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται τιμές τυπικού κόστους για διάφορες τιμές της διάρκειας διακοπής, όπως προκύπτουν από στατιστικές μελέτες. Σε αυτές, είναι σαφές ότι ενώ το κόστος των διακοπών διάρκειας της τάξης των λεπτών και άνω τείνει να προσεγγιστεί, το

κόστος των διακοπών λόγω παροδικών σφαλμάτων (διάρκειας κάτω του 1 sec) προσδιορίζεται πιο δύσκολα.

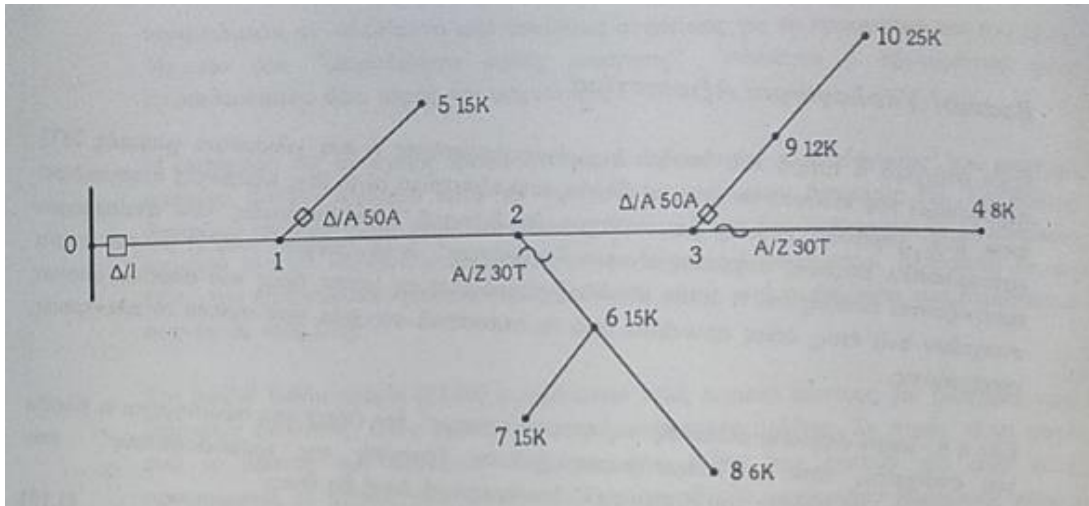
- **Δείκτες Αξιοπιστίας**

Προς το παρόν δεν υπάρχουν ευρέως αποδεκτές από τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις διαδικασίες για την καταγραφή των διακοπών τροφοδότησης. Κάθε επιχείρηση έχει περισσότερο ή λιγότερο, τους δικούς της κανονισμούς για την καταγραφή των αστοχειών της λειτουργίας, και εφαρμόζει αντίστοιχες στατιστικές μεθόδους για την επεξεργασία των στοιχείων. Ένα γενικό σχήμα για την καταγραφή και τους υπολογισμούς θα ήταν χρήσιμο αλλά μη πρακτικό, λόγω των διαφορών στις τροφοδοτούμενες περιοχές, των χαρακτηριστικών των φορτίων, τον αριθμό των καταναλωτών, και την αναμενόμενη ποιότητα εξυπηρέτησεως. Με πιθανές διαφορές στην ορολογία, οι παρακάτω δείκτες είναι οι γενικά χρησιμοποιούμενοι:

- Συχνότητα διακοπών συστήματος - ΣΔΣ: Ο μέσος αριθμός των διακοπών στη μονάδα του χρόνου (συνήθως 1 έτος).
- Μέση συχνότητα διακοπών καταναλωτών - ΣΔΚ: Ο μέσος αριθμός των διακοπών ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή, στη μονάδα του χρόνου.
- Μέσο διακοπτόμενο φορτίο - ΔΦ: Η μέση ισχύς (kVA) διακοπτόμενου φορτίου ανά μονάδα συνδεδεμένου φορτίου, στη μονάδα του χρόνου.
- Μη Διανεμούμενη Ενέργεια συστήματος - ΜΔΕΣ: Η ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται ετησίως λόγω διακοπών τροφοδότησης. Υπολογίζεται ως το άθροισμα της ΜΔΕ όλων των καταναλωτών. Η ΜΔΕ κάθε καταναλωτή υπολογίζεται από τον συνολικό αναμενόμενο χρόνο αποκοπής του και τη μέση ζήτηση ισχύος του.
- Μέση Μη Διανεμούμενη Ενέργεια Καταναλωτών - ΜΔΕΚ. Η μέση ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται ετησίως λόγω διακοπών τροφοδότησης, ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή.
- Μέση διάρκεια Διακοπής Καταναλωτή - ΔΔΚ: Η μέση διάρκεια διακοπής τροφοδότησης ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή στη μονάδα του χρόνου.

- **Αξιοπιστία και Μέσα Προστασίας**

Στην αρχή της γραμμής του Σχήματος 2.8 εγκαθίσταται Δ/Ι ελεγχόμενος από Η/Ν ΧΚ και ΣΛ, για σφάλματα γης και φάσεων. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα μέσα προστασίας που εγκαθίστανται.



Σχήμα 2.8 : Παράδειγμα εγκατάστασης διαβαθμισμένων μέσων προστασίας σε ενέργεια γραμμή διανομής MT

Εάν η συνεργασία των μέσων προστασίας είναι πλήρης η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια σφαλμάτων είναι η αναμενόμενη, δηλαδή:

1. Για σφάλματα στον κορμό της γραμμής: Όλοι οι καταναλωτές υπόκεινται για τα παροδικά ή μόνιμα σφάλματα σε αντίστοιχες διακοπές (παροδικές της τάξης των 0.4 sec ή μόνιμες).
2. Για σφάλματα στις γραμμές των διακλαδώσεων:
 - Παροδικά: Όλοι οι καταναλωτές της γραμμής υφίστανται διακοπή τροφοδότησης της τάξης των 0.4 sec (ταχύς κύκλος απόζευξης - ζεύξης του Δ/Ι).
 - Μόνιμα: Οι καταναλωτές που συνδέονται στη διακλάδωση θα υποστούν διακοπή τροφοδότησης για χρόνο ίσο με τη μέση διάρκεια διακοπής που προκαλείται από το βλαβέν στοιχείο. Οι καταναλωτές του υπόλοιπου δικτύου θα υποστούν παροδική διακοπή.
3. Για σφάλματα μετά τους A/Z K (στους Υ/Σ διανομής) δεν επηρεάζονται άλλοι καταναλωτές πλην αυτών του Υ/Σ.

2.4 ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η βασική αρχή με την οποία λαμβάνει χώρα η επαναδιαμόρφωση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση κάποιου σφάλματος είναι η εξής: αρχικά γίνεται η διάγνωση του σφάλματος με τη βοήθεια κατάλληλων εποπτικών μέσων, στη συνέχεια εντοπίζεται το στοιχείο που έχει υποστεί τη βλάβη, μετά απομονώνεται το στοιχείο αυτό καθώς και μέρος του γειτονικού του δικτύου με το άνοιγμα διακοπών απομόνωσης, και τέλος γίνεται η αναζήτηση της βέλτιστης τοπολογίας με το κλείσιμο των κατάλληλων

διακοπών ανοικτών υπό φορτίο, με στόχο τη μέγιστη δυνατή κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών.

Κατά τη λειτουργία των δικτύων διανομής μπορούν να εμφανιστούν εξαναγκασμένες ή προγραμματισμένες θέσεις εκτός λειτουργίας κάποιων στοιχείων τους, και συχνά αντίστοιχες διακοπές τροφοδοτήσεως ορισμένων καταναλωτών. Η προκύπτουσα έκτακτη κατάσταση πρέπει να αντιμετωπιστεί με ενέργειες ελέγχου για την απομόνωση τμήματος του συστήματος που περιλαμβάνει τα βλαβέντα στοιχεία, και την ταχύτερη δυνατή ανατροφοδότηση των καταναλωτών. Πρακτικά, στα ακτινικά δίκτυα διανομής η λειτουργία των μέσων προστασίας οδηγεί στην αποκοπή αντίστοιχου τμήματος του δικτύου. Εάν η συνεργασία των μέσων προστασίας είναι πλήρης, αποκόπτεται το τμήμα που έπεται του πρώτου μέσου προστασίας από τη θέση του σφάλματος προς του ζυγούς του Υ/Σ Υ.Τ./Μ.Τ.. Πριν τη μετάβαση του δικτύου σε κανονική κατάσταση λειτουργίας (πλήρης επαναφορά), μπορεί να αποκατασταθεί η τροφοδότηση ενός μεγάλου μέρους των καταναλωτών που υπέστησαν διακοπή (μερική επαναφορά). Γενικά, η διαδικασία μερικής επαναφοράς περιλαμβάνει δύο στάδια:

1. τον περιορισμό της απομονωμένης περιοχής γύρω από τη θέση του σφάλματος (ζώνη του σφάλματος). Είναι συνήθως δυνατή η επανασύνδεση μέρους του τμήματος του δικτύου που αποσυνδέθηκε από τα μέσα προστασίας, σε άλλες γραμμές και η μεταφορά φορτίων από τη ζώνη του σφάλματος.
2. την επίτευξη κατάλληλης λειτουργίας του υγιούς δικτύου (του υπολοίπου δικτύου εκτός της ζώνης του σφάλματος), ώστε κατά το δυνατόν περισσότεροι καταναλωτές να επανατροφοδοτηθούν. Κατά την προσπάθεια μεταφοράς φορτίων σε άλλες γραμμές είναι όμως πιθανό να προκύψουν υπερφορτίσεις στοιχείων του υγιούς τμήματος του δικτύου. Η τροφοδότηση των καταναλωτών εκτός της ζώνης του σφάλματος μπορεί να επιτευχθεί συνήθως με επαναδιαμόρφωση του δικτύου ώστε να ανακαταμεμηθεί το φορτίο των στοιχείων του δικτύου. Εάν όμως, η βλάβη είναι σοβαρή (π.χ. σε κλάδο του κορμού) είναι πολλές φορές απαραίτητη, εκτός από την επαναδιαμόρφωση, και η αποκοπή κάποιων επιπρόσθετων φορτίων.

Εφόσον το σφάλμα έχει απομακρυνθεί και οι αναγκαίες επισκευές έχουν γίνει, η τροφοδότηση μπορεί να αποκατασταθεί πλήρως, επαναφέροντας ίσως το δίκτυο στην αρχική κανονική κατάσταση λειτουργίας.

Το πλήρες πρόβλημα της μερικής επαναφοράς κατά την έκτακτη κατάσταση του δικτύου μπορεί συνεπώς να διακριθεί στα εξής υποπροβλήματα:

1. επαναδιαμόρφωσης του δικτύου για τον περιορισμό της ζώνης σφάλματος.
2. επαναδιαμόρφωσης του δικτύου εκτός της ζώνης σφάλματος, για ισοκατανομή του φορτίου και μείωση των πιθανών υπερφορτίσεων.
3. αποκοπής φορτίων, εάν η επαναδιαμόρφωση του δικτύου δεν μπορεί να οδηγήσει στην τροφοδότηση όλων των καταναλωτών εκτός της ζώνης σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή μελετάται εκ νέου η επαναδιαμόρφωση του υγιούς δικτύου μετά την αποκοπή των φορτίων.

Στην πράξη, οι χειριστές των κέντρων διανομής καλούνται να αποκαταστήσουν την τροφοδότηση των καταναλωτών του δικτύου όσο το δυνατόν συντομότερα. Αυτό προϋποθέτει τον ταχύτατο καθορισμό όλων των αναγκαίων χειρισμών διακοπών ώστε να αποκοπεί η κατάλληλη ζώνη γύρω από το σφάλμα και να αποκατασταθεί η τροφοδότηση σε όσο το δυνατόν περισσότερους από τους υπόλοιπους καταναλωτές. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο καθορισμός του ελάχιστου απαραίτητου αριθμού χειρισμών από μεθόδους βέλτιστης επίλυσης των υποπροβλημάτων. Είναι απαραίτητο δε, στα σύγχρονα κέντρα διανομής, οι μέθοδοι αυτές να είναι εφαρμόσιμες άμεσα - σε πραγματικό χρόνο.

Το υποπρόβλημα της επαναδιαμόρφωσης για περιορισμό της απομονωμένης περιοχής έχει μοναδική λύση, η οποία προκύπτει από την επισκόπηση της διάταξης του δικτύου, για δεδομένη θέση σφάλματος (προϋποθέτει η ύπαρξη αντίστοιχης διαδικασίας διάγνωσης) και δεδομένες θέσεις διακοπών. Αντίθετα, η επιλογή των αποκοπόμενων φορτίων, ενώ μπορεί να εκφραστεί ποιοτικά, είναι δύσκολα καθορίσιμη ποσοτικά, καθώς λαμβάνει υπόψη έννοιες όπως: ευκολία χειρισμών για την αποκοπή και επανασύνδεση των φορτίων, προτεραιότητες τροφοδότησης καταναλωτών, έκτακτα γεγονότα και αντίστοιχα σημαντικά φορτία, κ.λπ.. Η βαρύτητα των παραγόντων αυτών μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την εποχή, κ.λπ., και η καταγραφή τους δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως.

Στην περίπτωση που στο δίκτυο διανομής υπάρχουν διασυνδεδεμένες μονάδες διανεμημένης παραγωγής, τότε αυτές τίθενται εκτός δικτύου για όση ώρα διαρκεί η διαδικασία της επαναδιαμόρφωσης μέχρι το δίκτυο να επανέλθει στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, με στόχο την αποφυγή του φαινομένου της νησιδοποίησης.

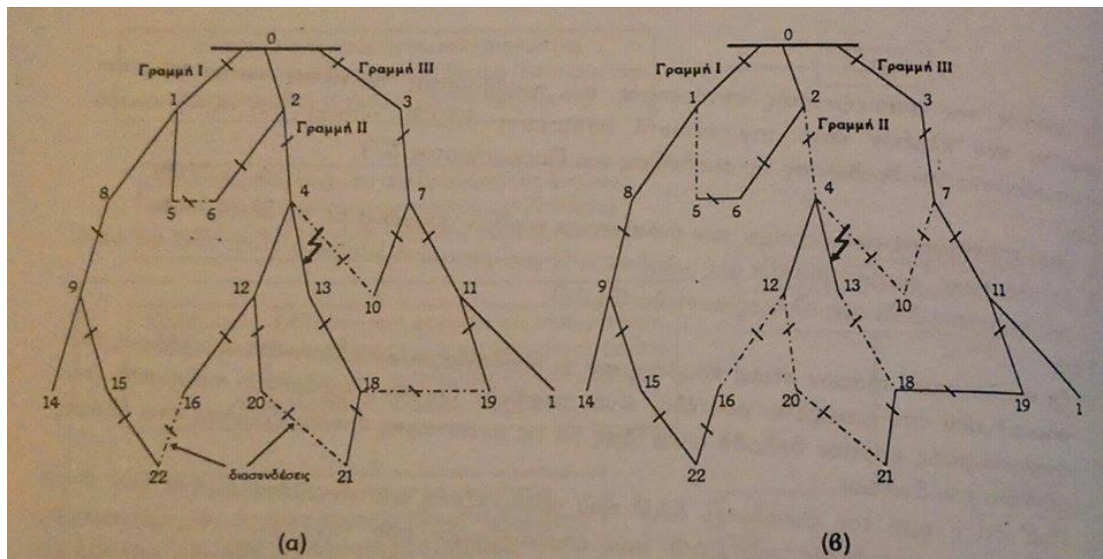
2.4.1 Βασικοί τύποι σφαλμάτων

Στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας συναντάμε τρεις τύπους σφαλμάτων: το σφάλμα γραμμής, το σφάλμα ζυγού και το σφάλμα μετασηματιστή. Υπάρχουν βέβαια και άλλα στοιχεία σε ένα δίκτυο διανομής των οποίων το σφάλμα μπορεί να οδηγήσει στην διακοπή της λειτουργίας του, ωστόσο αυτά μπορούν να συσχετιστούν με κάποιον από τους τρεις παραπάνω τύπους. Για παράδειγμα ένα σφάλμα σε ένα διακόπτη ισχύος που προστατεύει ένα μετασηματιστή, συνήθως θα έχει τις ίδιες λειτουργικές επιπτώσεις με ένα σφάλμα μετασηματιστή. Το είδος του στοιχείου στο οποίο γίνεται το σφάλμα καθορίζει το πλήθος τόσο των φορτίων που εξυπηρετούνται, όσο και των στοιχείων του δικτύου που τίθενται εκτός λειτουργίας. Έτσι ένα σφάλμα σε μετασηματιστή Υ.Τ./Χ.Τ. θα επηρεάσει μεγαλύτερο αριθμό φορτίων από ότι ένα σφάλμα σε ζυγό. Ακόμα πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι, το είδος του σφάλματος επηρεάζει τα χαρακτηριστικά και την πολυπλοκότητα του αλγόριθμου επαναδιαμόρφωσης, καθώς όπως είναι αντιληπτό, ένας αλγόριθμος επαναδιαμόρφωσης για την αποκατάσταση για παράδειγμα ενός σφάλματος μετασηματιστή, δεν είναι απαραίτητα ικανός να αποκαταστήσει τη λειτουργία σε περίπτωση σφάλματος γραμμής [3].

2.4.2 Στόχοι επαναδιαμόρφωσης για αποκατάσταση λειτουργίας

Βασικός στόχος της επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους σε περίπτωση σφάλματος, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, είναι η ικανοποίηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου αριθμού καταναλωτών στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα. Επιπλέον, οι τιμές των τάσεων των ζυγών πρέπει να

κυμαίνονται εντός κάποιων επιτρεπτών ορίων και το δίκτυο να διατηρεί την ακτινική του μορφή. Το απλό δίκτυο του Σχήματος 2.9(α) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα παρουσίασης της διαδικασίας μερικής επαναφοράς δικτύων διανομής μετά από την εμφάνιση σφάλματος. Έστω ότι εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στον κλάδο 4 - 13 της γραμμής II. Η λειτουργία του Δ/Ι της γραμμής προκαλεί αρχικά την πλήρη απενεργοποίηση της γραμμής. Είναι όμως προφανές από η διάταξη του δικτύου ότι η απομονωμένη περιοχή μπορεί να περιοριστεί εάν τεθούν σε ανοιχτή θέση οι διακόπτες των κλάδων: 2 - 4, 4 - 10 (ήδη ανοιχτός), 13 - 18, 12 - 16 και 12 - 20 (ή, αντί των δύο τελευταίων, ο Δ/Α της διακλάδωσης 4 - 12 εάν υπάρχει), οι οποίοι ορίζουν και τη ζώνη του σφάλματος, η γραμμή II μπορεί να επανασυνδεθεί τροφοδοτώντας τους καταναλωτές των κόμβων 2 και 6, ενώ άλλοι καταναλωτές της μπορούν να τροφοδοτηθούν, αφού πρώτα μεταφερθούν στις γραμμές I και III. Άλλες μεταφορές φορτίων (όπως αυτή του φορτίου του κόμβου 5) ισοκατανέμουν τη φόρτιση των γραμμών, ενώ κάποια φορτία (όπως τα απομακρυσμένα των κόμβων 10 και 20) αποκόπτονται λόγω υπερφόρτισης των υγιών γραμμών. Η τελική διάταξη του δικτύου μετά τη μερική επαναφορά, φαίνεται στο Σχήμα 2.9(β).



Σχήμα 2.9 : (α) Δίκτυο διανομής με δυνατότητα αλλαγής διάταξης, το οποίο υφίσταται βραχυκύκλωμα

(β) Αναδιάταξη του δικτύου για μερική επαναφορά της τροφοδότησης

- **Αναδιάταξη για περιορισμό της ζώνης του σφάλματος**

Δεδομένης της θέσεως του σφάλματος σε ένα δίκτυο διανομής, μπορεί εύκολα να ορισθεί εποπτικά η ζώνη, δηλαδή η περιοχή του δικτύου η οποία περιλαμβάνει τη θέση του σφάλματος και συνδέεται με το υπόλοιπο δίκτυο με κλάδους οι οποίοι έχουν διακόπτες που μπορούν να τεθούν σε ανοιχτή θέση.

Στο δίκτυο του Σχήματος 2.9(α), η λειτουργία των μέσων προστασίας με την εμφάνιση του σφάλματος έχει θέσει εκτός λειτουργίας αρχικά όλη τη Γραμμή II. Η απομόνωση της ελάχιστης δυνατής περιοχής γύρω από το σφάλμα γίνεται μέσω χειρισμών διακοπών για τη μεταφορά φορτίων:

1. Μεταφορά των φορτίων των κόμβων που προηγούνται της θέσεως του σφάλματος. Αυτό επιτυγχάνεται με το άνοιγμα του διακόπτη του κλάδου που είναι ο πρώτος που διαθέτει διακόπτη πάνω στο μονοπάτι από τη θέση του σφάλματος προς την αρχή της γραμμής (π.χ. του διακόπτη του κλάδου 2 - 4 στο δίκτυο του Σχήμα 2.9(α)). Μετά το χειρισμό αυτό μπορεί να κλείσει ο Δ/Ι στην αρχή της γραμμής, ή ο Δ/Α στην αρχή της διακλάδωσης. Εάν η απομόνωση της περιοχής έχει γίνει με την τήξη Α/Ζ διακλάδωσης δεν είναι απαραίτητο το βήμα αυτό, καθώς το τμήμα μετά τον Α/Ζ θα παραμείνει απομονωμένο.
2. Μεταφορά των φορτίων των κόμβων που έπονται της θέσεως του σφάλματος, σε άλλες γραμμές. Ξεκινώντας από τη θέση του σφάλματος αναγνωρίζουμε το ακτινικό δέντρο που έχει ρίζα το σημείο αυτό. Όταν φθάνουμε σε κλάδο με διακόπτη:
 - εάν ο διακόπτης είναι ανοικτός, σταματά η ανάπτυξη του αντίστοιχου μονοπατιού. Η περιοχή του σφάλματος απομονώνεται με τη διατήρηση του διακόπτη αυτού σε ανοικτή θέση.
 - εάν ο διακόπτης είναι κλειστός, η περιοχή του σφάλματος απομονώνεται ανοίγοντας το διακόπτη αυτό (π.χ. το διακόπτη του κλάδου 13 - 18 στο δίκτυο του Σχήμα 2.9(α)). Η ανάπτυξη του μονοπατιού αυτού συνεχίζεται μέχρι την ανεύρεση κλάδου με ανοικτό διακόπτη (π.χ. του κλάδου 18 - 19). Το κλείσιμο του διακόπτη αυτού οδηγεί στη μεταφορά φορτίων μετά την απομονωμένη περιοχή της γραμμής σε άλλες γραμμές του δικτύου.

Ο γενικός αυτός αλγόριθμος βασίζεται στην αναγνώριση της τοπολογίας του δικτύου και στην ανάπτυξη του δέντρου με ρίζα τη θέση του σφάλματος. Η χειροκίνητη εφαρμογή του μπορεί να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη σε πραγματικά δίκτυα διανομής, ακόμα και για έμπειρους χειριστές των κέντρων διανομής. Η αυτοματοποίηση της εφαρμογής με τη βοήθεια ΗΥ είναι ιδιαίτερα ταχεία και περισσότερο αξιόπιστη.

• Βελτιστοποίηση διαδικασίας αποκοπής φορτίων

Κατά τη μελέτη ανάπτυξης των δικτύων διανομής λαμβάνονται υπόψη οι δυνατότητες μεταφοράς φορτίων σε έκτακτες καταστάσεις. Ο παράγοντας αυτός βέβαια δε μπορεί, και δεν πρέπει, να οδηγεί σε σημαντική υπερδιαστασιολόγηση των στοιχείων του δικτύου, κυρίως εάν υπάρχουν δυνατότητες ταχέων χειρισμών μεταφοράς φορτίων μεταξύ πολλών γραμμών. Σε κάθε περίπτωση, είναι πιθανόν κατά την έκτακτη κατάσταση, η ισοκατανομή του φορτίου των κλάδων να μην μπορεί να εξαλείψει όλες τις υπερφορτίσεις του δικτύου, κυρίως όταν το σφάλμα είναι σε σημαντικό στοιχείο του δικτύου και ο αριθμός των δυνατών χειρισμών διακοπών είναι περιορισμένος. Στην περίπτωση αυτή, ο χειριστής του κέντρου διανομής αποφασίζει, βασιζόμενος στην εμπειρία του, την αποκοπή κάποιων ομάδων ή μεμονωμένων φορτίων, ώστε να μπορέσει το δίκτυο να λειτουργήσει τροφοδοτώντας τους σημαντικότερους καταναλωτές.

Η σειρά αποκοπής των φορτίων είναι αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού προτεραιότητας εξυπηρέτησης κάθε καταναλωτή. Ένα αντίστοιχο πρόγραμμα ΗΥ για την

αυτόματη υπόδειξη αποφάσεων, που θα λαμβάνει υπόψη ένα πίνακα προτεραιοτήτων καθώς και τους υπερφορτιζόμενους κλάδους, είναι εύκολο να κατασκευαστεί. Η χρησιμοποίηση όμως ενός τέτοιου προγράμματος θα ήταν ιδιαίτερα δυσχερής, καθώς απαιτείται η συνεχής ενημέρωση των δεδομένων του πίνακα προτεραιοτήτων, τα οποία είναι δυναμικά:

- έκτακτα σημαντικά φορτία μπορούν να εμφανίζονται (π.χ. αθλητικά γεγονότα, συνεδριάσεις σημαντικών οργάνων, κ.λ.π.), ενώ
- το κόστος από τη διακοπή τροφοδότησης κάποιων καταναλωτών να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας ή του χρόνου (π.χ. εργοστάσια, εμπορικά κέντρα, κ.λ.π.).

Επίσης, οι δυνατότητες χειροκίνητου χειρισμού διακοπών μεταβάλλονται (π.χ. λόγω διαθέσιμου προσωπικού) οπότε και η τακτική απομόνωσης μπορεί να βασίζεται σε περισσότερο ή λιγότερο κεντρικούς χειρισμούς.

Γενικότερα, η διαδικασία σχηματισμού αποφάσεων αποκοπής φορτίων ενσωματώνει ποιοτικά κριτήρια τα οποία τόσο λόγω πλήθους, όσο και λόγω δυναμικής συμπεριφοράς είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και αυτοματοποιηθούν, από τις κλασσικές μεθόδους προγραμματισμού ΗΥ. Το πεδίο αυτό είναι ιδιαίτερα προνομιακό για εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης.

- **Απαιτούμενο χρονικό διάστημα επαναδιαμόρφωσης**

Ο χρόνος που απαιτείται για να υλοποιηθεί η επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στην περίπτωση που αυτή λαμβάνει χώρα για την αποκατάσταση της λειτουργίας λόγω κάποιου σφάλματος, κατέχει σημαντικό ρόλο όσον αφορά στην αποτελεσματικότητα του εγχειρήματος. Στον τομέα αυτό, καθοριστικό ρόλο παίζουν τα διακοπικά στοιχεία με τα οποία είναι εξοπλισμένο το δίκτυο διανομής. Η ελαχιστοποίηση της χρονικής διάρκειας υλοποίησης της επαναδιαμόρφωσης ενός δικτύου διανομής μεταφράζεται, σε πρώτο στάδιο, ως ελαχιστοποίηση της διάρκειας που απαιτείται για την αλλαγή κατάστασης των διακοπών. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας του παράγοντα αυτού, η συντριπτική πλειοψηφία των ερευνητών έχει ασχοληθεί με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των διακοπών που αλλάζουν κατάσταση κατά τη διαδικασία της επαναδιαμόρφωσης. Στην περίπτωση δε, που το εξεταζόμενο δίκτυο διανομής διαθέτει τόσο χειροκίνητους όσο και τηλεχειριζόμενους διακόπτες, τότε η ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου δεν σχετίζεται πλέον άμεσα με το πλήθος των διακοπικών αλλαγών, αλλά με την προτίμηση στη χρησιμοποίηση των τηλεχειριζόμενων διακοπών έναντι των χειροκίνητων [3].

2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας σε περίπτωση σφάλματος αποτελεί ένα σημαντικό αντικείμενο μελέτης. Στην [3], κατά την επαναδιαμόρφωση του δικτύου για την αποκατάσταση λειτουργίας του λαμβάνεται υπόψη τα είδη των σφαλμάτων, τα κρίσιμα φορτία, η λειτουργία των διακοπών και τα

επιτρεπτά όρια των τάσεων. Στην [8], ο συγγραφέας λαμβάνει υπόψη του τους περιορισμούς της [3], δίνοντας ωστόσο ιδιαίτερη σημασία στην ελαχιστοποίηση των απωλειών, τη διατήρηση της ακτινικής μορφής του δικτύου καθώς και στο ότι τα όρια των τάσεων πρέπει να είναι αυστηρά. Στην [9], η ιεράρχηση των στόχων της επαναδιαμόρφωσης είναι: i) η μέγιστη κάλυψη των αναγκών των κρίσιμων καταναλωτών, ii) η μέγιστη κάλυψη όλων γενικά των πελατών και iii) η ελαχιστοποίηση χειρισμού των διακοπών. Στην [10], προτείνεται μια μέθοδος χειρισμού πολλαπλών ανοικτών διακοπών υπό φορτίο (tie switches), με στόχο την εύρεση καλύτερης ποιοτικά λύσης σε σχέση με την [9]. Στην [11], εξετάζεται η πιθανότητα κάποιος καταναλωτής με μικρή απαίτηση σε φορτίο, που δεν έχει απομονωθεί από το σφάλμα, να μην ικανοποιηθεί, προκειμένου κάποιος άλλος με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε φορτίο που βρίσκεται εκτός δικτύου να ικανοποιηθεί. Στην [12], χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιεί μόνο το ισοζύγιο ενεργού ισχύος για αποκατάσταση μέρους του δικτύου. Στην [13], δίνεται προτεραιότητα στη μέγιστη δυνατή κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών, στη διατήρηση της ακτινικής μορφής του δικτύου καθώς και προτίμηση στον χειρισμό των τηλεχειριζόμενων διακοπών έναντι των χειροκίνητων. Στην [14], το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απομονωμένων φορτίων και ζωνών. Ακόμα λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα να ικανοποιείται μερικώς το φορτίο κάποιου καταναλωτή προκειμένου να ικανοποιηθεί το μέρος κάποιου άλλου. Στην [15], γίνεται χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μπαταριών, για την αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου έπειτα από σφάλμα και την ελαχιστοποίηση του κόστους των απωλειών, θεωρώντας τρία διαφορετικά αιολικού δυναμικού.

Οι αλγόριθμοι επίλυσης ενός προβλήματος επαναδιαμόρφωσης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- Τυπικοί μαθηματικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, όπως ο λεγόμενος «άπληστος» αλγόριθμος αναζήτησης (greedy search algorithm), που όμως δύσκολα εφαρμόζεται σε δίκτυα μεγάλης έκτασης
- Ευριστικοί αλγόριθμοι (heuristic algorithms), που περιλαμβάνουν την μέθοδο εναλλαγής κλάδου (branch exchange method) και την μέθοδο ιδανικής ροής φορτίου (optimal flow pattern method).
- Αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), που περιλαμβάνουν αλγορίθμους όπως τον γενετικό αλγόριθμο, τον αλγόριθμο tabu search, τον αλγόριθμο particle swarm optimization και τον αλγόριθμο simulated annealing. Οι παραπάνω μέθοδοι οδηγούν σε βελτιστοποίηση με πολύ καλά αποτελέσματα, αλλά είναι δυνατόν να επηρεαστούν από το μέγεθος του δικτύου, τις αρχικές συνθήκες και άλλους παράγοντες οδηγώντας τελικά σε μεγάλο χρόνο υπολογισμού.

Ωστόσο υπάρχουν ορισμένες παρατηρήσεις όσον αφορά τις μεθόδους επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής, που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Αρχικά, το μεγαλύτερο κομμάτι της έρευνας πάνω στην επαναδιαμόρφωση των δικτύων δε λαμβάνει υπόψη του την αβεβαιότητα παραμέτρων, όπως η παραγωγή από μονάδες διανεμημένης παραγωγής, η ζήτηση των φορτίων και τα κόστη ισχύος και ενέργειας που μεταβάλλονται.

Ακόμη, τα δίκτυα στην πραγματικότητα έχουν συνήθως αρκετά μεγάλη έκταση, ενώ οι περισσότερες υπάρχουσες μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν δοκιμασθεί σε μικρού μεγέθους δίκτυα διανομής. Επίσης, ορισμένες βιβλιογραφικές αναφορές δεν λαμβάνουν υπόψη περιορισμούς στα επίπεδα της τάσης ή στην τελική διάταξη του δικτύου μετά την επαναδιαμόρφωσή του, περιορισμοί όμως που ενδέχεται να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, είναι σημαντικό μαζί με το τεχνικό αποτέλεσμα να δίνεται σημασία στο οικονομικό και περιβαλλοντικό. Πολλές μελέτες για την βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου δίνουν βάρος σε μια μόνο πλευρά του σύνθετου αυτού προβλήματος. Έτσι, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν και άλλοι αλγόριθμοι, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν στην εξεύρεση καθολικών λύσεων, δηλαδή τεχνικές που δεν επιλύουν μόνο συγκεκριμένα προβλήματα. Τέτοιοι αλγόριθμοι ονομάζονται μετά-ευριστικοί (metaheuristic optimization techniques). Οι παράμετροι ελέγχου των μετά-ευριστικών τεχνικών βελτιστοποίησης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την υπολογιστική τους απόδοση και ικανότητα.

Από την άλλη, τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν ένα νέο είδος φορτίων για τα δίκτυα διανομής και επειδή είναι μεγάλα φορτία μπορούν να μεταβάλλουν δραστικά την απόδοσή τους. Παρά το γεγονός ότι έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες μελέτες για την διερεύνηση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα, υπάρχουν ακόμα περιθώρια για περαιτέρω έρευνα της βελτιστοποίησης της απόδοσης ενός δικτύου, στο οποίο συνδέονται και ηλεκτρικά οχήματα.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεκριμένα μερικοί αλγόριθμοι που λύνουν το πρόβλημα βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής.

- Αλγόριθμος Εσωτερικού Σημείου: Ο Karmarkar δημιούργησε ένα αλγόριθμο για την λύση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος δεν υπολόγιζε τη βέλτιστη λύση ακολουθώντας μια σειρά σημείων κοντά στους περιορισμούς, αλλά ακολουθώντας μια διαδρομή διαμέσου του εσωτερικού των περιορισμών απευθείας για τη βέλτιστη λύση του περιοριστικού ορίου [16]. Αυτή η λύση ήταν πιο γρήγορη από τους συμβατικούς γραμμικούς αλγόριθμους. Αργότερα ο Gill απέδειξε τη σχέση μεταξύ του αλγόριθμου του Karmarkar και του αλγόριθμου λογαριθμικού φραγμού και έγινε η βάση για την λύση προβλημάτων βέλτιστης ροής φορτίου.
- Γενετικοί Αλγόριθμοι: Πρόκειται για μια μη αριθμητική ακέραια μέθοδο, η οποία λειτουργεί χρησιμοποιώντας μεγάλες δυαδικές σειρές για την αναπαράσταση διαδοχικών εναλλακτικών λύσεων, με σκοπό την παραγωγή της βέλτιστης. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα δυαδικά 0 και 1 για να αναπαραστήσει ανοικτούς και κλειστούς διακόπτες αντίστοιχα. Από τις αποδεκτές λύσεις, συνδυάζει ευνοϊκά χαρακτηριστικά προσπαθώντας να δημιουργήσει καλύτερα χαρακτηριστικά [5].
- Αλγόριθμος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των κλάδων του συστήματος σε δίκτυα διανομής: Ο αλγόριθμος του Qiuyu Peng και Steven H. Low λύνει ένα συνδυασμένο πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού. Έτσι, αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση και την επαναδιαμόρφωση των κλάδων του δικτύου. Σε κάθε βήμα μεταφέρονται μερικά φορτία από έναν τροφοδότη σε έναν άλλο, με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού στόχου της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να μην μπορεί να μεταφερθεί κανένα φορτίο μεταξύ των δύο τροφοδοτών [17].

- Τροποποιημένος αλγόριθμος βέλτιστης αναζήτησης βακτηριακής τροφής: Ο παραπάνω αλγόριθμος λύνει το μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και η κατάσταση των διακοπών (ανοικτοί ή κλειστοί) αποφασίζεται σύμφωνα με την συμπεριφορά των βακτηρίων αναζητώντας την τροφή τους. Συγκεκριμένα τα βακτήρια στην διαδικασία αυτή αποφασίζουν αν θα κινηθούν προς μια προκαθορισμένη ή διαφορετική κατεύθυνση με κριτήριο την αναζήτηση θρεπτικών συστατικών. Ο αλγόριθμος συγκλίνει γρήγορα λόγω του ότι τα υγιή βακτήρια αναπαράγονται και τα μη υγιή καταστρέφονται. Αυτό γίνεται και στα δίκτυα διανομής [18].

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία μεταβολής της τοπολογίας του δικτύου, με στόχο την ικανοποίηση στο μέγιστο δυνατό βαθμό των επιθυμητών αντικειμένων. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής για αποκατάσταση λειτουργίας, σε περίπτωση σφάλματος σε κάποια γραμμή ή σε κάποιο ζυγό του δικτύου. Η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης και απόζευξης γραμμών του δικτύου με τη βοήθεια των διακοπτικών μέσων που διαθέτει το εκάστοτε δίκτυο. Στόχος της επαναδιαμόρφωσης είναι οι μεταβλητές ελέγχου να λάβουν τιμές τέτοιες ώστε να επιτευχθεί η ασφαλής λειτουργία βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου. Αρχικά προσδιορίζονται οι εξισώσεις που συνδέουν τα ηλεκτρικά μεγέθη του συστήματος, καθώς και το σύνολο των τεχνικών περιορισμών του δικτύου. Σε ένα κλασικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με δεδομένα τα στοιχεία των γραμμών του και τις καταναλώσεις των φορτίων του, οι μεταβλητές ελέγχου είναι η κατάσταση των διακοπτικών μέσων του δικτύου, η ικανοποίηση ή μη κάποιου καταναλωτή του δικτύου και τα μέτρα των τάσεων των ζυγών. Ο υπολογισμός των μεταβλητών ελέγχου που οδηγεί το δίκτυο σε κατάσταση λειτουργίας, στην οποία οι περιορισμοί τηρούνται, ονομάζεται εφικτή λύση. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε λοιπόν αναζητά την πιο κατάλληλη από ένα σύνολο εφικτών λύσεων που προκύπτουν από διαφορετικές αποτιμήσεις των μεταβλητών ελέγχου. Η καταλληλότητα μιας λύσης αξιολογείται με κριτήριο την τιμή που λαμβάνει μια συνάρτηση των μεγεθών του δικτύου που ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση. Ο στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η ελαχιστοποίηση των διακοπτικών χειρισμών δίνοντας έμφαση στους τηλεχειριζόμενους διακόπτες έναντι των χειροκίνητων και η ελαχιστοποίηση του αριθμού των μη εξυπηρετούμενων καταναλωτών.

3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Βασικά στοιχεία ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ζυγοί και οι γραμμές του. Η ισχύς διακινείται από τους υποσταθμούς του δικτύου στους διάφορους ζυγούς, ανάλογα με τις διαθέσιμες γραμμές. Οι διαδρομές των γραμμών, με τις οποίες γίνεται η

διακίνηση της ισχύος, διαμορφώνονται ανάλογα με τα μεγέθη και τις θέσεις των φορτίων, τη σχετική σημασία των φορτίων και τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Πριν ξεκινήσουμε τη μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της ροής ισχύος, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός των παρακάτω συνόλων:

- N : σύνολο των ζυγών του δικτύου
- L : σύνολο των γραμμών του δικτύου

Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον κάθε ζυγό $i \in N$ είναι τα εξής:

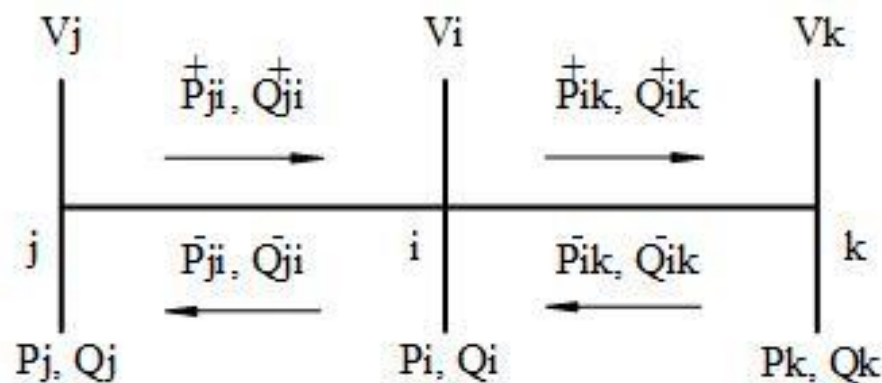
- Τάση του ζυγού i : $\hat{V}_i = V_i \angle \theta_i$, $i \in N$ (3.1)
όπου V_i και θ_i το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού i .

- Κατανάλωση ισχύος στο ζυγό i : $\hat{S}_{d_i} = P_{d_i} + j \cdot Q_{d_i}$, $i \in N$ (3.2)
όπου P_{d_i} και Q_{d_i} η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα στο ζυγό i .

Έστω η γραμμή του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j , η οποία αναφέρεται ως γραμμή $i - j \in L$. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κάθε γραμμή $i - j \in L$ είναι τα εξής:

- R_{ij} , X_{ij} : η αντίσταση και η αντίδραση αντίστοιχα της γραμμής $i-j$
- I_{ij} : το μέτρο του ρεύματος που διαρρέει την γραμμή $i-j$
- P_{ij}^+ , P_{ij}^- : η ροή ενεργού ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j και από το ζυγό j στο ζυγό i , αντίστοιχα
- Q_{ij}^+ , Q_{ij}^- : η ροή άεργου ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j και από το ζυγό j στο ζυγό i , αντίστοιχα

Έστω το δίκτυο 3 ζυγών του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 : Δίκτυο 3 ζυγών

Οι εξισώσεις ροής ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα, σύμφωνα και με την [15], παίρνουν τη μορφή:

$$\bullet \quad \sum_j (P_{ji}^+ - P_{ji}^-) - P_{d_i} - R_{ij} \cdot I_{ij}^2 = \sum_k (P_{ik}^+ - P_{ik}^-), \quad i, j, k \in N \quad (3.3)$$

$$\bullet \quad \sum_j (Q_{ji}^+ - Q_{ji}^-) - Q_{d_i} - X_{ij} \cdot I_{ij}^2 = \sum_k (Q_{ik}^+ - Q_{ik}^-), \quad i, j, k \in N \quad (3.4)$$

Η εξίσωση της πτώσης τάσης ανάμεσα στους ζυγούς i και j είναι:

$$\bullet \quad V_i^2 - 2 \cdot (R_{ij} \cdot (P_{ij}^+ - P_{ij}^-) + X_{ij} \cdot (Q_{ij}^+ - Q_{ij}^-)) - V_j^2 = 0, \quad i - j \in L \quad (3.5)$$

Ακόμα ισχύει η παρακάτω βασική σχέση, η οποία συνδέει το μέτρο της τάσης του κάθε ζυγού με το ρεύμα και τη ροή ισχύος, ενεργού και άεργου, στη γραμμή $i-j$:

$$\bullet \quad V_j^2 \cdot I_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2, \quad i - j \in L \quad (3.6)$$

Τέλος, απαραίτητοι είναι οι περιορισμοί (3.7) - (3.9), που αφορούν το μέτρο της τάσης του κάθε ζυγού, καθώς την παροχή ενεργού και άεργου ισχύος από τον υποσταθμό:

$$\bullet \quad V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad i \in N \quad (3.7)$$

$$\bullet \quad P_{\text{slack}}^{\min} \leq P_{\text{slack}} \leq P_{\text{slack}}^{\max} \quad (3.8)$$

$$\bullet \quad Q_{\text{slack}}^{\min} \leq Q_{\text{slack}} \leq Q_{\text{slack}}^{\max} \quad (3.9)$$

3.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, στόχος σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η βέλτιστη ροή ενεργού και άεργου ισχύος, δηλαδή η εξυπηρέτηση των αναγκών του δικτύου σε φορτία και ταυτόχρονα η ικανοποίηση όλων των παραπάνω περιορισμών. Όμως, σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος, είτε σε κάποια γραμμή είτε σε κάποιο ζυγό του δικτύου διανομής, είναι απαραίτητη η επαναδιαμόρφωση του δικτύου με τη βοήθεια βοηθητικών γραμμών, με στόχο την εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων καταναλωτών, στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Στην κατεύθυνση αυτή σημαντικό ρόλο κατέχουν τα διακοπτικά στοιχεία (ηλεκτρομαγνήτες ή χειροκίνητα), με τα οποία είναι εξοπλισμένο το εκάστοτε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να ορίσουμε επιπλέον τα εξής σύνολα:

- S_r : το σύνολο των γραμμών που διαθέτουν τηλεχειριζόμενο διακόπτη
- S_m : το σύνολο των γραμμών που διαθέτουν χειροκίνητο διακόπτη

Επιπλέον ορίζουμε τις παρακάτω δυαδικές μεταβλητές:

- $INSRE_{ij}$: εκφράζει την αρχική κατάσταση των τηλεχειριζόμενων διακοπών, καθώς δηλαδή το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Ισχύει ότι:
 - $INSRE_{ij} = 1$, $i-j \in S_r$, αν ο διακόπτης της γραμμής $i-j$ ήταν αρχικά κλειστός.
 - $INSRE_{ij} = 0$, $i-j \in S_r$, αν ο διακόπτης της γραμμής $i-j$ ήταν αρχικά ανοιχτός.
- $INSM A_{ij}$: εκφράζει την αρχική κατάσταση των χειροκίνητων διακοπών, καθώς δηλαδή το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Ισχύει ότι:
 - $INSM A_{ij} = 1$, $i-j \in S_m$, αν ο διακόπτης της γραμμής $i-j$ ήταν αρχικά κλειστός.
 - $INSM A_{ij} = 0$, $i-j \in S_m$, αν ο διακόπτης της γραμμής $i-j$ ήταν αρχικά ανοιχτός.
- S_{ij} : εκφράζει το αν η γραμμή $i-j$ διαρρέεται από ρεύμα μετά την επαναδιαμόρφωση του δικτύου. Δηλαδή ισχύει ότι:
 - $S_{ij} = 1$, $i-j \in L$, αν η γραμμή $i-j$ δεν έχει διακόπτη ή αν έχει διακόπτη και είναι κλειστός μετά την επαναδιαμόρφωση του δικτύου.
 - $S_{ij} = 0$, $i-j \in S_r, S_m$, αν η γραμμή $i-j$ έχει διακόπτη και είναι ανοιχτός μετά την επαναδιαμόρφωση του δικτύου.
- Y_i : εκφράζει το αν το φορτίο του ζυγού i τροφοδοτείται ή όχι. Ισχύει ότι:
 - $Y_i = 1$, $i \in N$, αν το φορτίο στο ζυγό i τροφοδοτείται.
 - $Y_i = 0$, $i \in N$, αν το φορτίο στο ζυγό i δεν τροφοδοτείται.

3.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Στο μοντέλο βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, έχει γίνει χρήση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$z = \min \left\{ a_1 \cdot \sum_{ij \in S_r} (S_{ij} - INSRE_{ij})^2 + a_2 \cdot \sum_{ij \in S_m} (S_{ij} - INSM A_{ij})^2 + a_3 \cdot \sum_{i \in N} (1 - Y_i) \right\} \quad (3.10)$$

όπου a_1, a_2, a_3 οι συντελεστές βαρών των διαφορετικών στόχων της επαναδιαμόρφωσης.

Ο πρώτος όρος έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του αριθμού χειρισμών των τηλεχειριζόμενων διακοπτικών στοιχείων με το οποίο είναι εξοπλισμένο το εκάστοτε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Εν αντιθέσει, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αριθμού χειρισμών των χειροκίνητων διακοπών. Συνεπώς, οι δύο αυτοί όροι αποσκοπούν στις ελάχιστες δυνατές μεταβολές κατάστασης όλων των διακοπτικών μέσων του δικτύου. Έτσι επιτυγχάνεται ως ένα βαθμό η ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής. Τον καταλυτικό ρόλο όμως προς αυτή την κατεύθυνση διαδραματίζει η χρήση των διαφορετικών συντελεστών βαρών a_1 και a_2 . Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2, η προτίμηση στην εκμετάλλευση των τηλεχειριζόμενων διακοπών του δικτύου έναντι των χειροκίνητων, εξασφαλίζει με σιγουριά την τάχιση δυνατή επαναδιαμόρφωση του δικτύου. Για το λόγο αυτό, οι τιμές των συντελεστών βαρών επιλέγονται έτσι ώστε να ισχύει: $a_1 < a_2$. Ο τρίτος όρος έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση του αριθμού των ζυγών του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας των οποίων το φορτίο τροφοδοτείται μετά από τη διαδικασία της επαναδιαμόρφωσής του. Επειδή ο στόχος αυτός αποτελεί και το κύριο ζητούμενο στην παρούσα εργασία και μοντέλο ο συντελεστής a_3 έχει τέτοια τιμή ώστε να ισχύει: $a_1 < a_2 \ll a_3$ [14]. Στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε ότι: $a_1=1, a_2=5$ και $a_3=100$.

3.3.2 Περιορισμοί προβλήματος

Σημαντικοί περιορισμοί του προβλήματος της επαναδιαμόρφωσης αποτελούν οι σχέσεις (3.11) - (3.18):

$$\bullet \quad 0 \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \cdot S_{ij}, \quad i-j \in L \quad (3.11)$$

$$\bullet \quad P_{ij}^+ \leq V_{\text{nom}} \cdot I_{ij}^{\max} \cdot u_{ij}^{P^+}, \quad i-j \in L \quad (3.12)$$

$$\bullet \quad P_{ij}^- \leq V_{\text{nom}} \cdot I_{ij}^{\max} \cdot u_{ij}^{P^-}, \quad i-j \in L \quad (3.13)$$

$$\bullet \quad Q_{ij}^+ \leq V_{\text{nom}} \cdot I_{ij}^{\max} \cdot u_{ij}^{Q^+}, \quad i-j \in L \quad (3.14)$$

$$\bullet \quad Q_{ij}^- \leq V_{\text{nom}} \cdot I_{ij}^{\max} \cdot u_{ij}^{Q^-}, \quad i-j \in L \quad (3.15)$$

$$\bullet \quad u_{ij}^{P^+} + u_{ij}^{P^-} \leq S_{ij}, \quad i-j \in L \quad (3.16)$$

$$\bullet \quad u_{ij}^{Q^+} + u_{ij}^{Q^-} \leq S_{ij}, \quad i-j \in L \quad (3.17)$$

$$\bullet \quad |Y_i - Y_j| \leq 1 - S_{ij}, \quad i - j \in L \quad (3.18)$$

Οι μεταβλητές I_{ij}^{\max} και V_{nom} υποδηλώνουν τη μέγιστη τιμή ρεύματος για κάθε γραμμή του δικτύου καθώς και την ονομαστική τάση του δικτύου αντίστοιχα. Οι μεταβλητές $u_{ij}^{P^+}, u_{ij}^{P^-}, u_{ij}^{Q^+}, u_{ij}^{Q^-}$ είναι δυαδικές και όπως συμπεραίνεται από τις σχέσεις (3.12) - (3.17), εφόσον $S_{ij} = 1$, επιτρέπεται η ροή ενεργού και άεργου ισχύος προς τη μία μόνο ή την άλλη κατεύθυνση [15]. Η εξίσωση (3.18) εξασφαλίζει ότι αν η γραμμή $i-j$ διαρρέεται από ρεύμα, τότε οι μεταβλητές Y_i και Y_j έχουν την ίδια τιμή.

Καταλυτικό ρόλο για την επιτυχή επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και για την αποκατάσταση της λειτουργίας του, κατέχει η χρήση της συνεχούς μεταβλητής $W_{ij}^2, i-j \in L$ [15]. Η μεταβλητή αυτή υπεισέρχεται στη σχέση (3.8), η οποία παίρνει την εξής μορφή:

$$\bullet \quad V_i^2 - 2 \cdot (R_{ij} \cdot (P_{ij}^+ - P_{ij}^-) + X_{ij} \cdot (Q_{ij}^+ - Q_{ij}^-)) - V_j^2 + W_{ij}^2 = 0, \quad i - j \in L \quad (3.19)$$

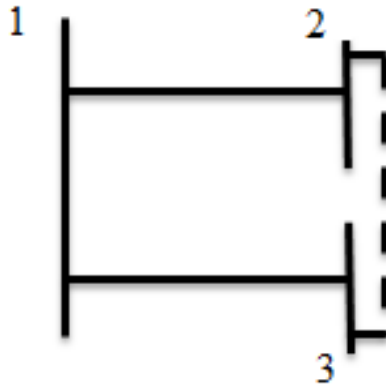
Απαραίτητες συνθήκες για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση της μεταβλητής αυτής είναι οι εξής:

$$\bullet \quad W_{ij}^2 \geq -M \cdot (1 - S_{ij}), \quad i - j \in L \quad (3.20)$$

$$\bullet \quad W_{ij}^2 \leq M \cdot (1 - S_{ij}), \quad i - j \in L \quad (3.21)$$

όπου M ένας σημαντικά μεγάλος αριθμός. Στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε ότι $M=10$.

Η χρησιμότητα της μεταβλητής αυτής καταδεικνύεται με ένα απλό μαθηματικό παράδειγμα. Έστω το δίκτυο τριών ζυγών του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 3.2), όπου θεωρούμε ότι σε κάθε γραμμή υπάρχει διακόπτης.



Σχήμα 3.2 : Δίκτυο 3 ζυγών

Σύμφωνα με τα παραπάνω ισχύει ότι: $S_{12} = S_{13} = 1$. Έτσι από τις σχέσεις (3.12) - (3.17) τα $P_{12}, P_{13}, Q_{12}, Q_{13}$ αποκτούν μη μηδενικές τιμές, ενώ από τις σχέσεις (3.20), (3.21) προκύπτει ότι W_{12}

$= W_{13} = 0$. Έτσι η εξίσωση (3.19) παίρνει τη γνωστή μορφή (3.5). Όμως $S_{23} = 0$. Έτσι από τις σχέσεις (3.12) - (3.17) ισχύει ότι: $P_{12} = P_{13} = Q_{12} = Q_{13} = 0$, ενώ από τις σχέσεις (3.20), (3.21) προκύπτει ότι το W_{23} παίρνει μια τιμή στο διάστημα $[-M, M]$. Έτσι αποφεύγεται να προκύψει από τη σχέση (3.5) ότι $V_j = V_i$, κάτι το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα το πρόγραμμα να μην δώσει αποδεκτή λύση στο πρόβλημα. Για παράδειγμα, αν $V_1=1$, $V_2=0,985$ και $V_3=0,97$, τότε: $W_{23}=0,985^2-0,97^2=0,029$.

Κατά τη διαδικασία της επαναδιαμόρφωσης καταλυτικό ρόλο κατέχει η απαίτηση το δίκτυο να έχει κάθε στιγμή τη μορφή συνδετικού δέντρου (spanning tree) με ρίζα το ζυγό του υποσταθμού. Με αυτό τον τρόπο η ακτινικότητα του δικτύου διατηρείται ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης των ροών ισχύος στις γραμμές του. Για την υλοποίηση του δένδρου θα γίνει εισαγωγή δύο δυαδικών μεταβλητών για κάθε γραμμή $i-j$ (C_{ij} , C_{ji}). Οι συνθήκες που ακολουθούν εισάγουν τον περιορισμό ότι κάθε κόμβος, εκτός του υποσταθμού, θα πρέπει να έχει ακριβώς ένα γονέα στο τελικό δέντρο:

$$\bullet \quad C_{ij} + C_{ji} = S_{ij}, \quad i - j \in L \quad (3.22)$$

$$\bullet \quad \sum_{j \in N_i} C_{ij} = 1, \quad i \in N \quad (3.23)$$

$$\bullet \quad C_{1j} = 0, \quad j \in N_1 \quad (3.24)$$

Η εξίσωση (3.22) υποδεικνύει ότι μια γραμμή του δικτύου αποτελεί μέρος του συνδετικού δένδρου εάν ο ζυγός i είναι γονέας του ζυγού j ($C_{ij} = 1$) ή το αντίστροφο ($C_{ji} = 1$). Η (3.23) δηλώνει ότι κάθε ζυγός πρέπει να έχει ακριβώς ένα γονέα, ενώ η (3.24) θέτει τον αριθμό των γονέων του ζυγού 1 του υποσταθμού ίσο με το μηδέν. Με τη βοήθεια των περιορισμών αυτών εξασφαλίζεται σίγουρα η ακτινικότητα του δικτύου [19]. Τέλος σημαντικό ρόλο για την ακτινικότητα του δικτύου κατέχει και η συνθήκη:

$$\bullet \quad \sum_{ij \in N} S_{ij} \leq N_{bus} - N_{sub}, \quad (3.25)$$

όπου N_{bus} το πλήθος των ζυγών και N_{sub} το πλήθος των υποσταθμών του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας λόγω σφάλματος σε γραμμή ή ζυγό του δικτύου, συνοψίζεται στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (3.10) υπό τους περιορισμούς (3.3) - (3.9) και (3.11) - (3.25).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΗΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές γνωρίζουν τεράστια ανάπτυξη και βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλά καθημερινά και επιστημονικά ζητήματα. Ειδικότερα, όσον αφορά τα μαθηματικά, πολλά προγράμματα έχουν δημιουργηθεί για να αντιμετωπίζουν με ευκολία και σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα προβλήματα, που θα απαιτούσαν πολλαπλάσιο κόπο και χρόνο, αν έπρεπε να λυθούν με το χέρι. Η βελτιστοποίηση, με την οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, είναι σχεδόν αδύνατη να επιτευχθεί χωρίς τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, κυρίως όταν εμπλέκονται δεκάδες ή και εκατοντάδες μεταβλητές και συναρτήσεις. Έτσι, είναι φανερό ότι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να πάρει την εξής γενική μορφή:

Ελαχιστοποίηση της: $f(x, y)$

Υπό τους περιορισμούς: $g_i(x, y) \leq 0, i = 1, \dots, k$

$h_i(x, y) = 0, i = 1, \dots, l$

$x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$

$y \in Y \subseteq \mathbb{Z}^m$

Τα μαθηματικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου προβλήματος εξαρτώνται από τα σύνολα x, y των μεταβλητών που περιέχει και από τη μορφή των συναρτήσεων f, g_i, h_i που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις και τους περιορισμούς του. Με αυτά τα κριτήρια, γίνεται διάκριση των διαφόρων προβλημάτων σε κατηγορίες:

- Προβλήματα Γραμμικού (Linear) και Μη Γραμμικού (Non Linear) Προγραμματισμού (Programming). Στα πρώτα (LP), οι συναρτήσεις f, g_i, h_i είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών, ενώ στα δεύτερα (NLP) εμφανίζονται σε αυτές και μη γραμμικές εκφράσεις.
- Προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών. Στα πρώτα όλες οι μεταβλητές που περιέχονται είναι πραγματικοί αριθμοί. Τα δεύτερα, που ονομάζονται αλλιώς και προβλήματα μικτών ακεραίων αριθμών (Mixed Integer Programming - MIP), συμπεριλαμβάνουν και μεταβλητές που είναι δυνατό να λάβουν μόνο ακέραιες τιμές. Σε

συνδυασμό με τον προηγούμενο χαρακτηρισμό βάσει γραμμικότητας, τα MIP διακρίνονται σε MILP και MINLP.

Είναι προφανές ότι η δυσκολία και ο χρόνος επίλυσης εξαρτώνται άμεσα τόσο από τη μορφολογία της αποδεκτής περιοχής κάθε προβλήματος όσο και από τις μεθόδους που επιλέγονται για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Η λύση αυτή μπορεί να είναι η καλύτερη δυνατή από το σύνολο της αποδεκτής περιοχής, οπότε ονομάζεται ολικό βέλτιστο, ή να είναι απλά καλύτερη από όλες τις άλλες λύσεις σε κάποια περιοχή κοντά σε αυτή, οπότε ονομάζεται τοπικό βέλτιστο. Σε ένα πρόβλημα υπάρχουν πολλά τοπικά βέλτιστα αλλά μόνο ένα ολικό. Είναι επίσης δύσκολο να αποδειχθεί αν ένα τοπικό βέλτιστο είναι και ολικό [20].

Από τις κατηγορίες προβλημάτων που προαναφέρθηκαν μεγαλύτερη ευκολία στην επίλυση παρουσιάζουν τα LP προβλήματα, στα οποία είναι δυνατή η εύρεση του ολικού βέλτιστου εντός πολυωνυμικού χρόνου. Αντίθετα, στα NLP προβλήματα, οι σχετικοί αλγόριθμοι χρειάζονται περισσότερο χρόνο για την επίλυσή τους, ενώ η λύση στην οποία καταλήγουν δεν είναι συνήθως το ολικό αλλά ένα τοπικό βέλτιστο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα QCP προβλήματα (Quadratically Constrained Problems), αφού μολονότι αποτελούν υποσύνολο των NLP, εμφανίζουν τους απλούστερους δυνατούς μη γραμμικούς περιορισμούς, με αποτέλεσμα να μπορούν να επιλυθούν σχετικά ευκολότερα σε σχέση με τα περισσότερα NLP, προσφέροντας έτσι λύσεις σε καλύτερο χρόνο. Η διαδικασία επίλυσης γίνεται πιο σύνθετη στην περίπτωση ένταξης ακέραιων μεταβλητών. Όλα τα MIP προβλήματα είναι σχετικά δυσκολότερα από τα ομόλογά τους με συνεχείς μεταβλητές.

4.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

4.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά του λογισμικού GAMS

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε αρχείο κώδικα στο λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System), ένα υπολογιστικό περιβάλλον για τον προσδιορισμό, την ανάλυση και την επίλυση ποικίλων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι μια πολύ ισχυρή γλώσσα και έχει τη δυνατότητα να λύσει όλα τα προβλήματα που μπορεί και ο μαθηματικός προγραμματισμός. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του προγράμματος είναι:

- Η ικανότητά του να επιλύει μικρά (δεκάδων μεταβλητών και περιορισμών) αλλά και μεγάλα προβλήματα (χιλιάδων μεταβλητών και περιορισμών) με τη χρήση της ίδιας έκτασης κώδικα. Μπορεί κάποιος να καθορίσει ένα πλήθος παρόμοιων περιορισμών, γράφοντας ουσιαστικά μόνο έναν που να ισχύει για όλες τις τιμές μιας παραμέτρου, εκτός των εξαιρέσεων που θα καθορίσει ρητά.
- Διαχωρίζει τη διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος από τη μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιείται. Ο χρήστης φροντίζει να ορίσει με συνέπεια το πρόβλημα και, αφού το διατυπώσει στη γλώσσα του GAMS, ένας από τους πολλούς διαθέσιμους επιλυτές αναλαμβάνει την επίλυσή του. Ως αποτέλεσμα, ο χρήστης επικεντρώνεται αποκλειστικά στη μοντελοποίηση του προβλήματος χωρίς να ασχολείται με τις λεπτομέρειες των αλγοριθμικών τεχνικών επίλυσης.

- Μιμείται σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος, αποτελώντας έτσι οικείο περιβάλλον για τους γνώστες του μαθηματικού προγραμματισμού.
- Παρέχει μηχανισμούς για την επίλυση συλλογών από δομημένα προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά που προκύπτουν από τεχνικές αποδόμησης.
- Διευκολύνει την ανάλυση ευαισθησίας ενός προβλήματος. Ο χρήστης εύκολα μπορεί να προγραμματίσει την επίλυση ενός μοντέλου για διαφορετικές τιμές σταθερών και να δημιουργήσει μια αναφορά με τα χαρακτηριστικά λύσης της κάθε περίπτωσης [20].

4.2.2 Σύνταξη κώδικα στο λογισμικό GAMS

Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του Κεφαλαίου 3 μοντελοποιήθηκε σε ένα αρχείο το οποίο περιέχει στη γλώσσα GAMS το σύνολο των απαραίτητων μεταβλητών και εξισώσεων. Οι κυριότερες από τις εντολές του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη σύνταξή του είναι:

- **Sets:** Εισάγονται τα σύνολα δεικτών του προβλήματος και παρατίθενται οι τιμές που μπορούν να πάρουν.
- **Scalars:** Εισάγονται οι σταθερές του προβλήματος.
- **Parameters/Tables:** Χρησιμοποιούνται για τον ορισμό μονοδιάστατων παραμέτρων ή πινάκων με τουλάχιστον δύο διαστάσεις.
- **Variables:** Εισάγονται οι μεταβλητές ελέγχου, κατά τη δήλωση των οποίων θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται οι διαστάσεις των μεταβλητών. Υπάρχουν επιπλέον προθέματα που μπορούν να τοποθετηθούν στην εντολή για προσδιορισμό συγκεκριμένων τύπων μεταβλητών όπως Positive, Binary ή Integer που εισάγουν θετικές, δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές αντίστοιχα.
- **Equations:** Εισάγονται οι εξισώσεις και οι περιορισμούς του προβλήματος. Αρχικά δηλώνονται ονομαστικά όλες οι συνθήκες που ορίζουν το πρόβλημα και στη συνέχεια αντιστοιχείται από μία σχέση ισότητας ή ανισότητας σε κάθε όνομα.
- **Model:** Προσδιορίζονται οι εξισώσεις που θα συμπεριληφθούν στο προς επίλυση μοντέλο. Είναι δυνατόν ένα μοντέλο να μην περιέχει όλες τις δηλωμένες εξισώσεις της εντολής Equations.
- **Option:** Έχει τη δυνατότητα να αλλάζει προκαθορισμένες από το λογισμικό τιμές παραμέτρων επίλυσης των επιλυτών για τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε προβλήματος ή και να αναθέσει σε συγκεκριμένο επιλυτή την εκτέλεση διαφόρων ειδών προγραμματισμού.

- **Solve:** Εντολή επίλυσης του προβλήματος που έχει διατυπωθεί. Ακολουθείται από το είδος του προγραμματισμού που ο χρήστης επιθυμεί να εφαρμόσει και από τον προσδιορισμό του στόχου της επίλυσης, δηλαδή την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μιας μεταβλητής. Για τη μεταβλητή αυτή θα πρέπει να έχει συμπεριληφθεί στο μέρος Equations η σχέση που να την εξισώνει με την επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση.
- **Display:** Εμφανίζονται οι τελικές τιμές των επιθυμητών μεταβλητών στο περιβάλλον του λογισμικού, παρά τη δυνατότητα εξαγωγής τους και σε αρχείο διαφορετικής μορφής (Microsoft Excel) [20].

4.2.3 Ο επιλυτής BONMIN

Υπάρχουν αρκετά και διαφορετικά είδη αλγορίθμων για την επίλυση των μη γραμμικών μοντέλων προγραμματισμού. Κάθε ένας από αυτούς έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα που τον καθιστούν τον καταλληλότερο, τόσο από πλευράς ακρίβειας αποτελεσμάτων όσο και χρόνου εκτέλεσης, για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος.

Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης, όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 3 ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων MINLP. Για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε ο επιλυτής BONMIN (Basic Open-source Nonlinear Mixed INteger programming), ο οποίος διαθέτει έξι διαφορετικούς αλγορίθμους για MINLP:

- B – BB : Branch and Bound
- B – OA : Outer Approximation
- B – QG : branch and cut of Quesqada and Grossmann's
- B – Hyb : Hybrid OA
- B – Ecp : branch and cut variant with Ecp cuts
- B – iFP : iterated Feasibility Pump

Ο αλγόριθμος που συνίσταται στην περίπτωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3 είναι ο Branch and Bound (BB), διότι διαθέτει πολλές επιλογές με τις οποίες μπορεί να βελτιωθεί η ποιότητα λύσεων που παρέχει [21].

4.2.4 Διαδικασία επίλυσης προβλήματος

Τα βήματα που ακολουθεί ο χρήστης για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα:

- Καθορίζει το πλήρες μαθηματικό μοντέλο (δεδομένα, μεταβλητές, αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμοί) και στη συνέχεια ανοίγει το πρόγραμμα gamside.exe.
- Εισάγει τα αριθμητικά δεδομένα σε μορφή παραμέτρων ή πινάκων (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1). Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο GAMS είναι δυνατόν να περιέχονται σε μέρος του κώδικα ή να εισάγονται από εξωτερικές πηγές. Το GAMS έχει

τη δυνατότητα να διαβάζει και να γράφει σε ένα συγκεκριμένο τύπο αρχείων, τα οποία ονομάζονται GDX (Gams Data eXchange files). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση εντολών που διαβάζουν τα περιεχόμενα των κελιών αρχείων του Microsoft Excel και δημιουργούν GDX αρχεία για χρήση από τα μοντέλα του GAMS (Σχήμα 4.1).

- Καθορίζει τις μεταβλητές και ορισμένες σταθερές τιμές αυτών (Σχήμα 4.2).

```

SETS
I index of buses /N1*N33/
Slack(I) slack bus /N1/
CA /R,X/
CB /Vmin,Vmax,PL,QL,PDG/;

ALIAS (I,J);
ALIAS (I,K);

TABLE GDATA(I,*) generator input data
      PMIN   PMAX   QMIN   QMAX
*      (pu)   (pu)   (pu)   (pu)
N1      -100   100   -100   100;

SCALAR
PI /3.1416/
M /10/;

PARAMETER LINE (I,J,CA)
          BUS (I,CB);

$call GDXXRW check_final_33.xls par=line rng=sheet1!A1 Rdim=2 Cdim=1
$GDXIN check_final_33.gdx
$LOAD line
$GDXIN

$call GDXXRW check_final_33.xls par=bus rng=sheet2!A1
$GDXIN check_final_33.gdx
$LOAD bus
$GDXIN
    
```

Σχήμα 4.1 : Μορφή δεδομένων εισόδου

```

VARIABLES
z
v(I)
Pslack(I)
Qslack(I)
Plosses (I,J)
Qlosses (I,J)
W(I,J);

POSITIVE VARIABLES ac(I,J),re(I,J),inac(I,J),inre(I,J),Amp(I,J);
BINARY VARIABLES Y(I),X(I,J),B1(I,J),B2(I,J),B3(I,J),B4(I,J),C(I,J);

Pslack.lo(I)=GDATA(I,'PMIN');
Pslack.up(I)=GDATA(I,'PMAX');
Qslack.lo(I)=GDATA(I,'QMIN');
Qslack.up(I)=GDATA(I,'QMAX');
v.lo(I)=SQR(BUS(I,'VMIN'));
v.up(I)=SQR(BUS(I,'VMAX'));
Pslack.fx(I)$(NOT Slack(I))=0;
Qslack.fx(I)$(NOT Slack(I))=0;
ac.fx(I,J)$(LINE(I,J,'R'))=0;
re.fx(I,J)$(LINE(I,J,'R'))=0;
inac.fx(I,J)$(LINE(I,J,'R'))=0;
inre.fx(I,J)$(LINE(I,J,'R'))=0;
plosses.fx(I,J)$(LINE(I,J,'R'))=0;
qlosses.fx(I,J)$(LINE(I,J,'R'))=0;
v.fx('N1')=1.04;
X.fx('N17','N18')=0;
    
```

Σχήμα 4.2 : Μεταβλητές και σταθερές τιμές αυτών

- Γράφει τις εξισώσεις του προβλήματος (Σχήμα 4.3).

```

COST ..          z=e=SUM ( I, J , SQR ( X ( J, I ) -INSRE ( J, I ) ) +
                  SUM ( I, J , SQR ( X ( J, I ) -INSMa ( J, I ) ) +
                  SUM ( I, 1-Y ( I ) ) ;
PBAL ( I ) ..    SUM ( J, ac ( J, I ) -inac ( J, I ) -Plosses ( J, I ) ) -SUM ( K, ac ( I, K ) -inac ( I, K ) ) -
                  BUS ( I, 'PL' ) * Y ( I ) +Pslack ( I ) +BUS ( I, 'PDG' ) * Y ( I ) =e=0 ;
QBAL ( I ) ..    SUM ( J, re ( J, I ) -inre ( J, I ) -Qlosses ( J, I ) ) -SUM ( K, re ( I, K ) -inre ( I, K ) ) -
                  BUS ( I, 'QL' ) * Y ( I ) +Qslack ( I ) =e=0 ;
VOLTDROP ( J, I ) .. V ( J ) -V ( I ) -2* ( LINE ( I, J, 'R' ) * ( ac ( J, I ) -inac ( J, I ) ) +
                    LINE ( I, J, 'X' ) * ( re ( J, I ) -inre ( J, I ) ) ) +W ( J, I ) =e=0 ;
AMPERE ( J, I ) .. AMP ( J, I ) =e= ( SQR ( ac ( J, I ) -inac ( J, I ) ) +SQR ( re ( J, I ) -inre ( J, I ) ) ) / v ( J ) ;
PLOSS ( J, I ) .. Plosses ( J, I ) =e=LINE ( I, J, 'R' ) *AMP ( J, I ) ;
QLOSS ( J, I ) .. Qlosses ( J, I ) =e=LINE ( I, J, 'X' ) *AMP ( J, I ) ;
LOBOUND ( J, I ) .. W ( J, I ) =G=-M* ( 1-X ( J, I ) ) ;
UPBOUND ( J, I ) .. W ( J, I ) =L=M* ( 1-X ( J, I ) ) ;
RADIAL ..       SUM ( ( I, J ), X ( J, I ) ) =E=32 ;
EXTRA1 ( J, I ) .. ac ( J, I ) =L=0.5*B1 ( J, I ) ;
EXTRA2 ( J, I ) .. inac ( J, I ) =L=0.5*B2 ( J, I ) ;
EXTRA3 ( J, I ) .. re ( J, I ) =L=0.5*B3 ( J, I ) ;
EXTRA4 ( J, I ) .. inre ( J, I ) =L=0.5*B4 ( J, I ) ;
EXTRA5 ( J, I ) .. B1 ( J, I ) +B2 ( J, I ) =L=X ( J, I ) ;
EXTRA6 ( J, I ) .. B3 ( J, I ) +B4 ( J, I ) =L=X ( J, I ) ;
EXTRA7 ( J, I ) .. AMP ( J, I ) =L=X ( J, I ) ;
ST1 ( J, I ) .. C ( I, J ) +C ( J, I ) =e=X ( J, I ) ;
ST2 ( I ) ..     SUM ( J $ ( LINE ( I, J, 'R' ) NE 0 ) , C ( I, J ) ) =e=1 ;
ST3 ( I ) ..     C ( 'N1' , I ) =e=0 ;

```

Σχήμα 4.3 : Εξισώσεις προβλήματος

- Καθορίζει τον ή τους επιλυτές που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος. Στο συγκεκριμένο αρχείο κώδικα χρησιμοποιήθηκε ο επιλυτής bonmin (Σχήμα 4.4). Δίνει ενδεχομένως εντολή να διαβαστεί ένα option file, δηλαδή ένα ξεχωριστό αρχείο που περιέχει κάποιες ειδικές ρυθμίσεις (Σχήμα 4.4). Καθορίζει ποια είναι η αντικειμενική συνάρτηση και αν πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί (Σχήμα 4.4).

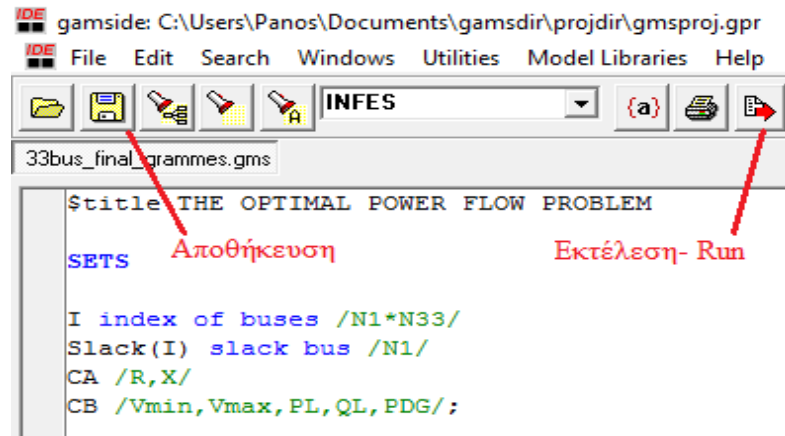
```

MODEL opf /COST, PBAL, QBAL, VOLTDROP, AMPERE, PLOSS, QLOSS, LOBOUND, UPBOUND, RADIAL,
          EXTRA1, EXTRA2, EXTRA3, EXTRA4, EXTRA5, EXTRA6, EXTRA7, ST1, ST2, ST3/;
OPTION minlp = bonmin; ————— Επιλογή επιλυτή
SOLVE opf USING minlp MINIMIZING z; ————— Αντικειμενική συνάρτηση

```

Σχήμα 4.4 : Επιλογή επιλυτή και αντικειμενικής συνάρτησης

- Αποθηκεύει το αρχείο κώδικα ως filename.gms και πατάει το κουμπί εκτέλεσης Run GAMS, επιλέγοντας τα αντίστοιχα εικονίδια όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.
- Διαβάζει τα παράθυρα που προκύπτουν, τα οποία περιέχουν την αναφορά εκτέλεσης του κώδικα και τα αποτελέσματα (τις τιμές όλων των μεταβλητών) στο αρχείο filename.lst. Οι τελείες υποδηλώνουν την τιμή μηδέν, ενώ το INF το άπειρο. Για κάθε μεταβλητή παρατηρούνται τέσσερις τιμές. Τα LOWER και UPPER δίνουν τα άνω και κάτω όρια της, το LEVEL τη βέλτιστη τιμή της και το MARGINAL δείχνει πόσο μια χαλάρωση των ορίων της μεταβλητής επηρεάζει την αντικειμενική συνάρτηση (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.5 : Αποθήκευση και εκτέλεση του αρχείου GAMS

		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Compilation					
Include File Summa					
Equation Listing St					
Equation					
Column Listing S	---- VAR z	-INF	2.000	+INF	.
Column					
Model Statistics SC	z objective function variable				
Solution Report S(
SoIEQU					
SoIVAR	---- VAR v voltage magnitude at bus I				
z					
v		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Pslack					
Qslack					
Plosses	N1	0.865	1.044	1.145	-1.92E-10
Qlosses	N2	0.865	1.040	1.145	-1.69E-10
W	N3	0.865	1.022	1.145	-7.82E-11
ac	N4	0.865	1.015	1.145	-4.38E-11
re	N5	0.865	1.008	1.145	-1.24E-11
inac	N6	0.865	0.988	1.145	7.672E-11
inre	N7	0.865	0.982	1.145	1.057E-10
Amp	N8	0.865	0.974	1.145	1.469E-10
Y	N9	0.865	0.964	1.145	2.031E-10
X	N10	0.865	0.954	1.145	2.611E-10
B1	N11	0.865	0.953	1.145	2.701E-10
B2	N12	0.865	0.951	1.145	2.862E-10
B3	N13	0.865	0.942	1.145	3.567E-10
B4	N14	0.865	0.939	1.145	3.849E-10
C	N15	0.865	0.937	1.145	4.004E-10
INSRE	N16	0.865	0.936	1.145	4.139E-10
INSMA	N17	0.865	0.934	1.145	4.279E-10
Execution	N18	0.865	0.958	1.145	2.364E-10
Display	N19	0.865	1.039	1.145	-1.64E-10
v	N20	0.865	1.032	1.145	-1.26E-10
Pslack					
ac					
inac					
X					
Y					

Σχήμα 4.6 : Αρχείο εξόδου

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών του μοντέλου βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση λειτουργίας σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος που περιέχονται σε σχετική βιβλιογραφία. Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν είναι 33, 44 και 69 ζυγών. Σε κάθε ένα από αυτά πραγματοποιήθηκαν οι εξής δοκιμές:

- επαναδιαμόρφωση του δικτύου για την αποκατάσταση λειτουργίας του λόγω σφάλματος σε γραμμή.
- επαναδιαμόρφωση του δικτύου για την αποκατάσταση λειτουργίας του λόγω σφάλματος σε ζυγό.

Σε κάθε σενάριο επιλύεται το μοντέλο βελτιστοποίησης που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Τα αποτελέσματα της επίλυσης σε κάθε περίπτωση είναι οι απαραίτητοι χειρισμοί των διακοπών του δικτύου (τηλεχειριζόμενοι ή χειροκίνητοι) για την αποκατάσταση της λειτουργίας του, καθώς και το ποια και πόσα φορτία του δικτύου δεν ικανοποιούνται μετά την επαναδιαμόρφωσή του.

Όλες οι εφαρμογές του μοντέλου που ακολουθούν έγιναν σε Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

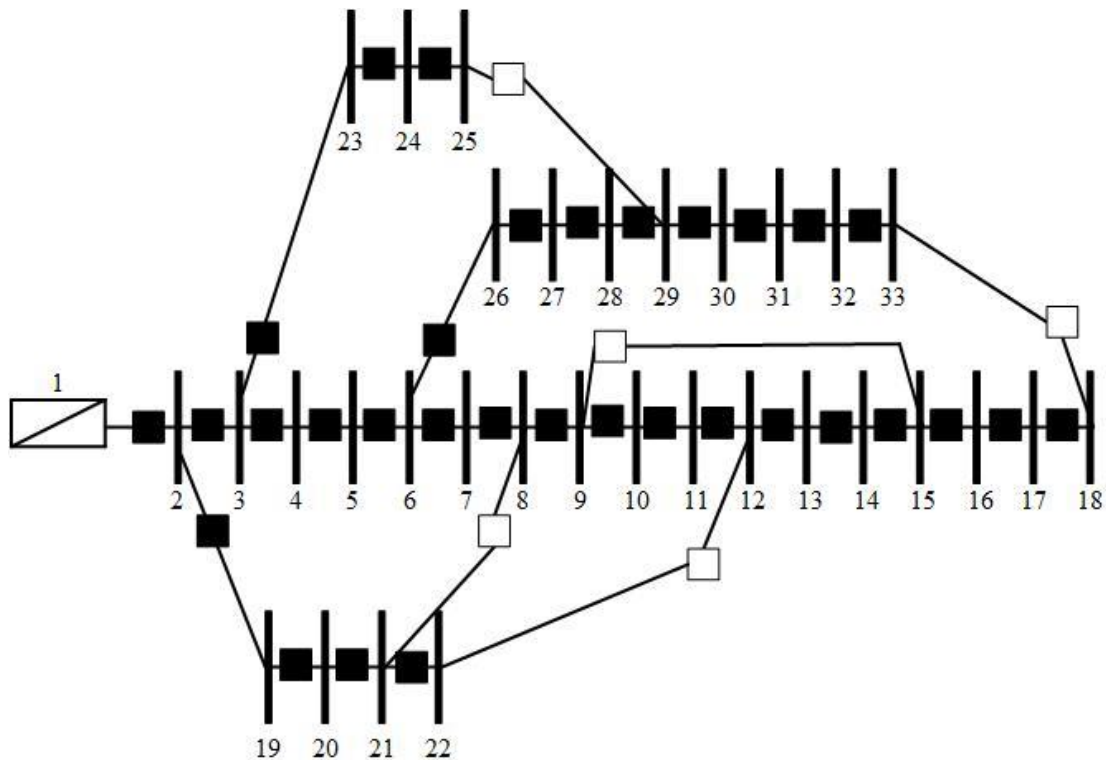
- Επεξεργαστής Intel Core i5 – 3210M @ 2.50GHz
- Μνήμη RAM 4 GB
- Λειτουργικό σύστημα Windows 10.1

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο 33 ζυγών που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.1 είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με 1 υποσταθμό, 33 ζυγούς και 37 κλάδους, κάθε ένας από τους οποίους είναι εξοπλισμένος με διακόπτη. Οι ανοιχτοί διακόπτες συμβολίζονται με λευκό κουτί, ενώ οι κλειστοί με μαύρο. Είναι ονομαστικής τάσης 12,66 kV, ενώ τα όρια των τάσεων στους ζυγούς είναι $\pm 6\%$ της ονομαστικής. Τα δεδομένα των φορτίων και των γραμμών του δικτύου φαίνονται στην [22]. Στον Πίνακα 5.1 φαίνεται ποιοι διακόπτες θεωρήθηκαν χειροκίνητοι και ποιοι τηλεχειριζόμενοι.

Πίνακας 5.1 : Αρχική κατάσταση διακοπών δικτύου διανομής 33 ζυγών

Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 3-4, 4-5 6-7, 7-8, 9-10 10-11, 12-13, 13-14 16-17, 2-19, 19-20 21-22, 3-23, 24-25 27-28, 28-29, 30-31 31-32	
Τηλεχειριζόμενοι	2-3, 5-6, 8-9 11-12, 14-15, 15-16 17-18, 20-21, 23-24 6-26, 26-27, 29-30 32-33	8-21, 9-15, 12-22 25-29, 18-33



Σχήμα 5.1 : Αρχική τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών

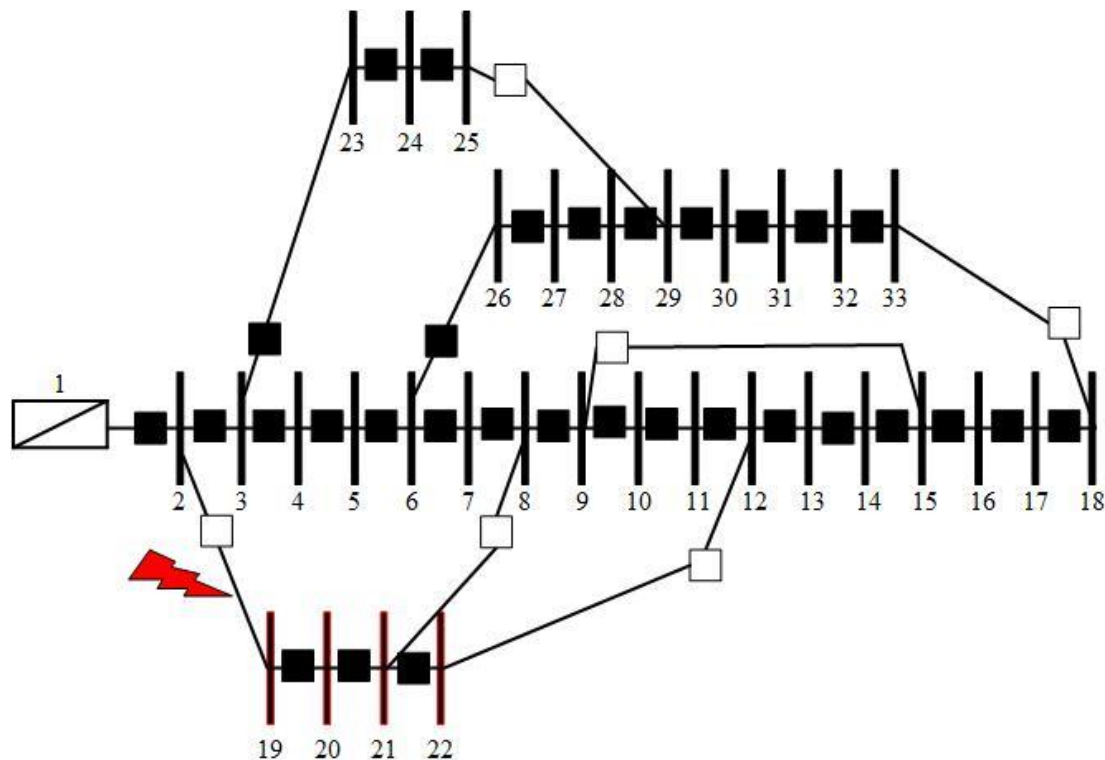
5.2.1 Σφάλμα στη γραμμή 2-19

Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 2 και 19, ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής 2-19, για να απομονωθεί το σφάλμα. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 19, 20, 21 και 22 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής 12-22, και έτσι τα όλα τα παραπάνω φορτία τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των

τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.2 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.2 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 2-19

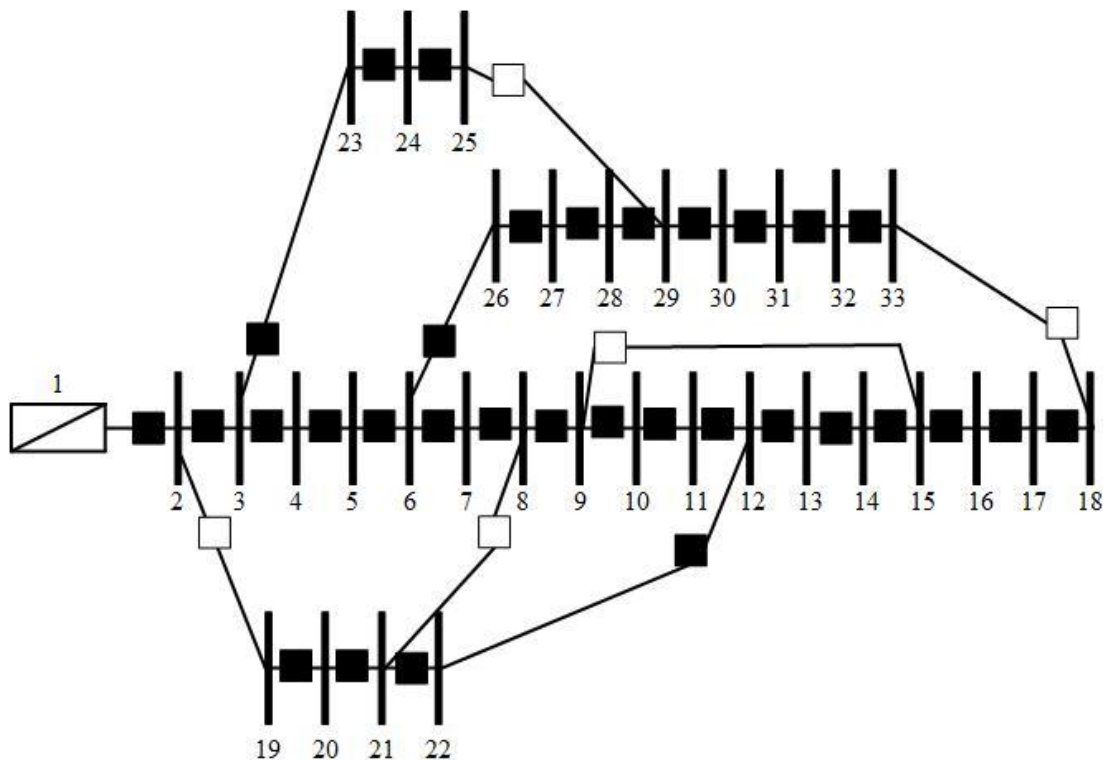
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 3-4, 4-5 6-7, 7-8, 9-10 10-11, 12-13, 13-14 16-17, 19-20 21-22, 3-23, 24-25 27-28, 28-29, 30-31 31-32	2-19
Τηλεχειριζόμενοι	2-3, 5-6, 8-9 11-12, 14-15, 15-16 17-18, 20-21, 12-22 23-24, 6-26, 26-27 29-30, 32-33	8-21, 9-15 25-29, 18-33



Σχήμα 5.2 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 2-19

Πίνακας 5.3 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 2-19 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{18} = 0,956$ α.μ.	Απόκλιση = - 0,1 %
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{18} = 0,957$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	1 min 20 sec	



Σχήμα 5.3 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 2-19

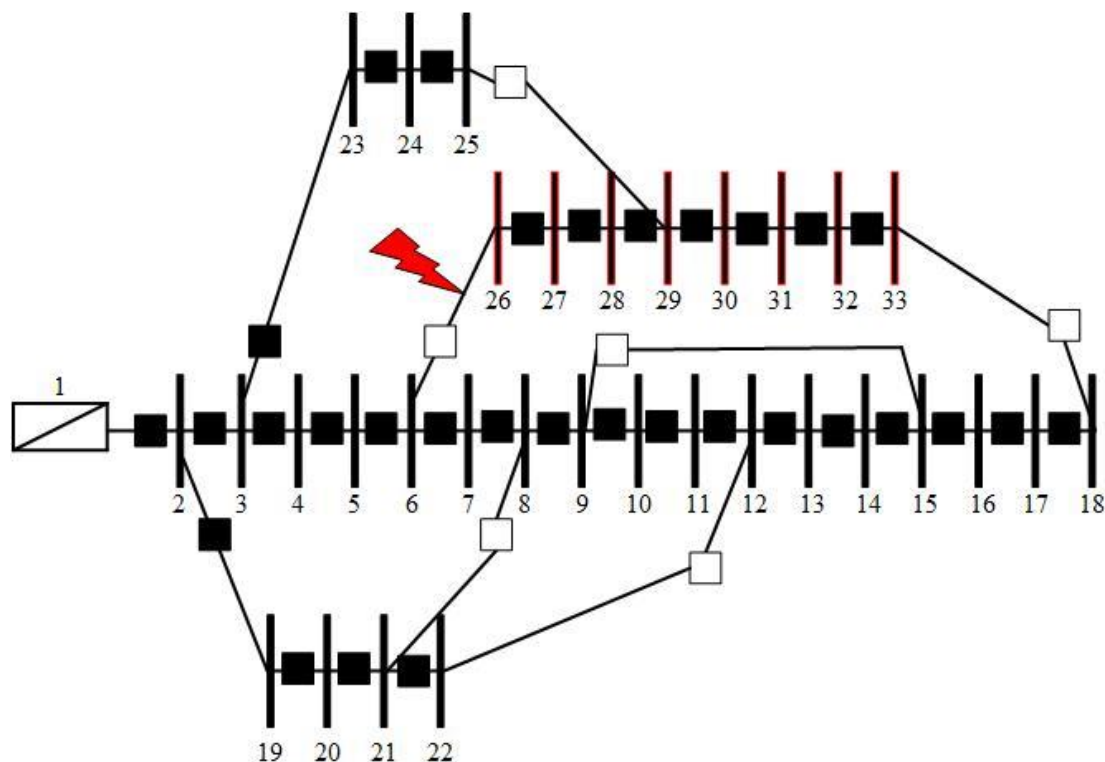
5.2.2 Σφάλμα στη γραμμή 6-26

Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 6 και 26, ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής 6-26, για να απομονωθεί το σφάλμα. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 και 33 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής 25-29, και έτσι όλα τα παραπάνω φορτία τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.4 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι

υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.4 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 6-26

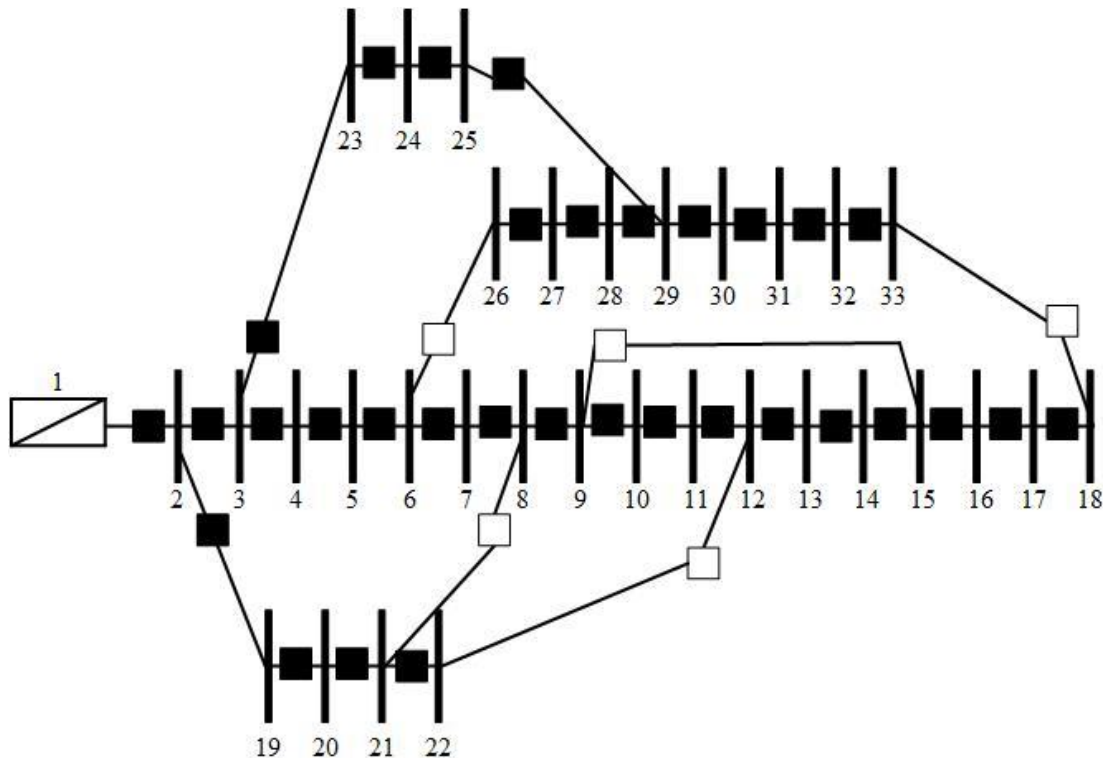
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 3-4, 4-5 6-7, 7-8, 9-10 10-11, 12-13, 13-14 16-17, 2-19, 19-20 21-22, 3-23, 24-25 27-28, 28-29, 30-31 31-32	
Τηλεχειριζόμενοι	2-3, 5-6, 8-9 11-12, 14-15, 15-16 17-18, 20-21, 23-24 26-27, 25-29, 29-30 32-33	6-26, 8-21, 9-15 12-22, 18-33



Σχήμα 5.4 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 6-26

Πίνακας 5.5 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 6-26 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{33} = 0,972$ α.μ.	Απόκλιση = 0 %
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{33} = 0,972$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	2 min 37 sec	



Σχήμα 5.5 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 6-26

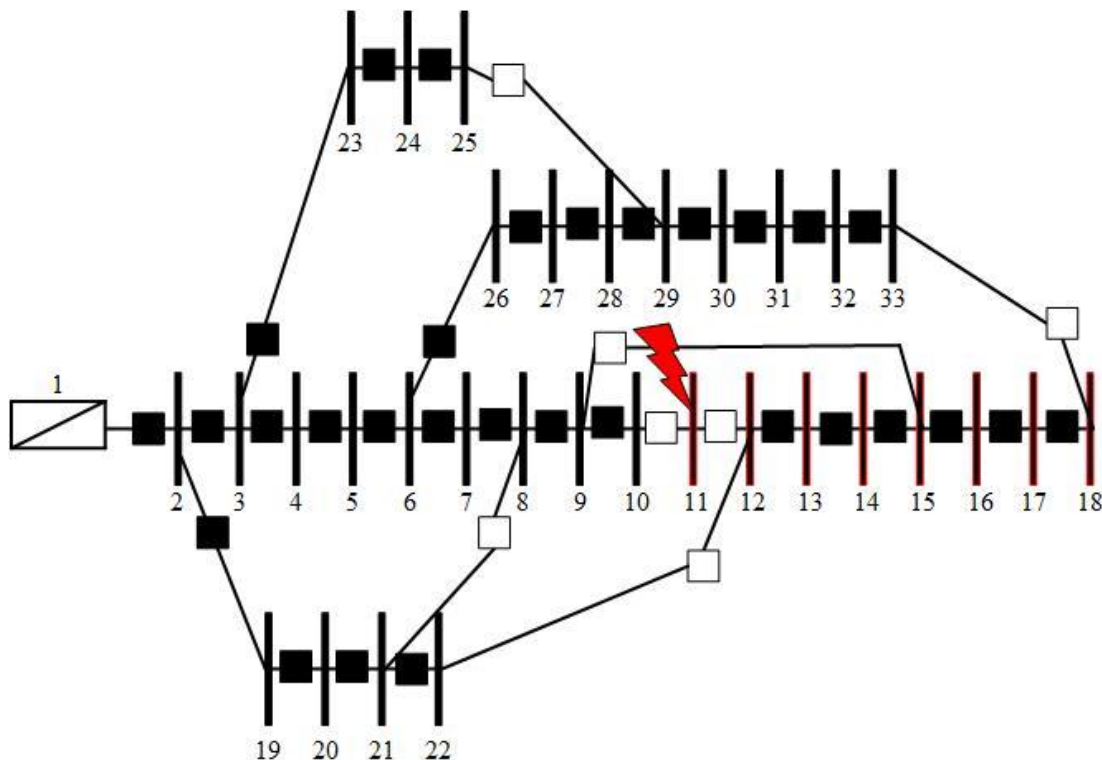
5.2.3 Σφάλμα στο ζυγό 11

Σε περίπτωση σφάλματος στο ζυγό 11, ανοίγουν αυτόματα οι διακόπτες των γραμμών 10-11 και 11-12, με αποτέλεσμα να βγαίνει εκτός λειτουργίας το φορτίο του ζυγού 11. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 12, 13, 14, 15, 16, 17 και 18 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνουν οι τηλεχειριζόμενοι διακόπτες των γραμμών 9-15 και 8-21, ενώ ανοίγει ο χειροκίνητος διακόπτης 19-20. Έτσι τα φορτία των ζυγών 12, 13, 14, 15, 16, 17 και 18 τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.6 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι

διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάσταση τους. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.6 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 11

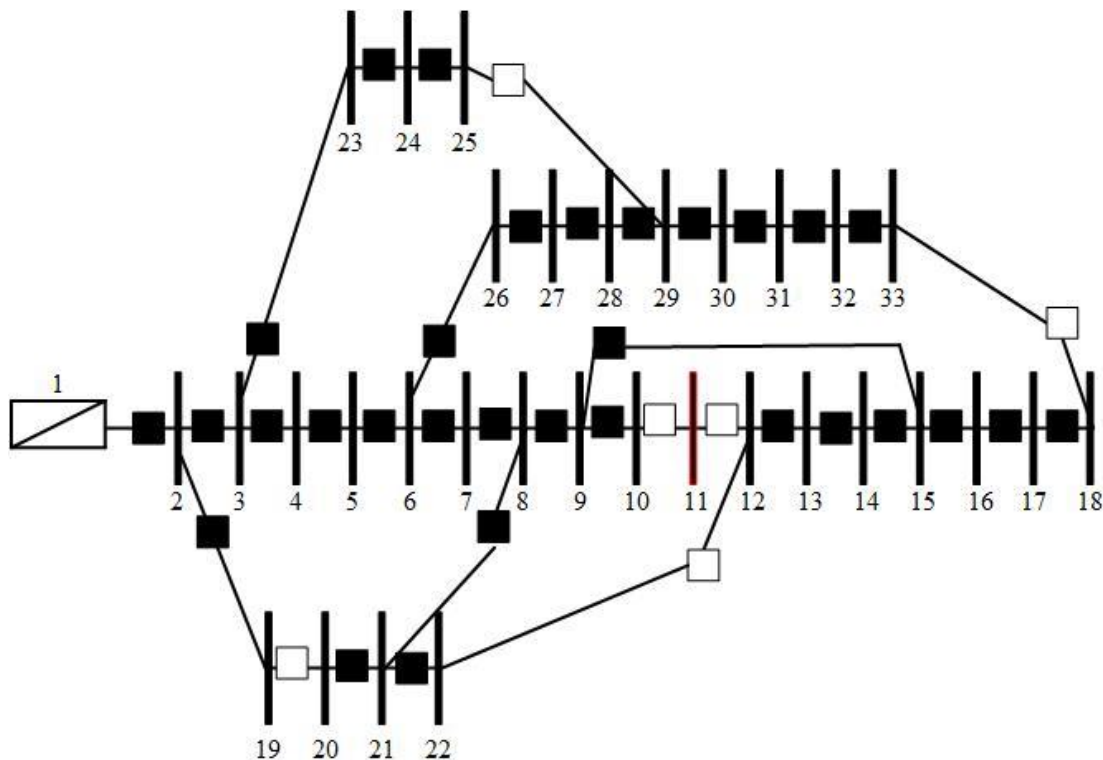
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 3-4, 4-5 6-7, 7-8, 9-10 12-13, 13-14 16-17, 2-19, 21-22 3-23, 24-25, 27-28 28-29, 30-31, 31-32	10-11, 19-20
Τηλεχειριζόμενοι	2-3, 5-6, 8-9 9-15, 14-15, 15-16 17-18, 8-21, 20-21 23-24, 6-26, 26-27 29-30, 32-33	11-12, 12-22, 25-29 18-33



Σχήμα 5.6 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στο ζυγό

Πίνακας 5.7 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 11 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{33} = 0,966$ α.μ.	Απόκλιση = - 0,1%
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{33} = 0,967$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	16 min 41 sec	



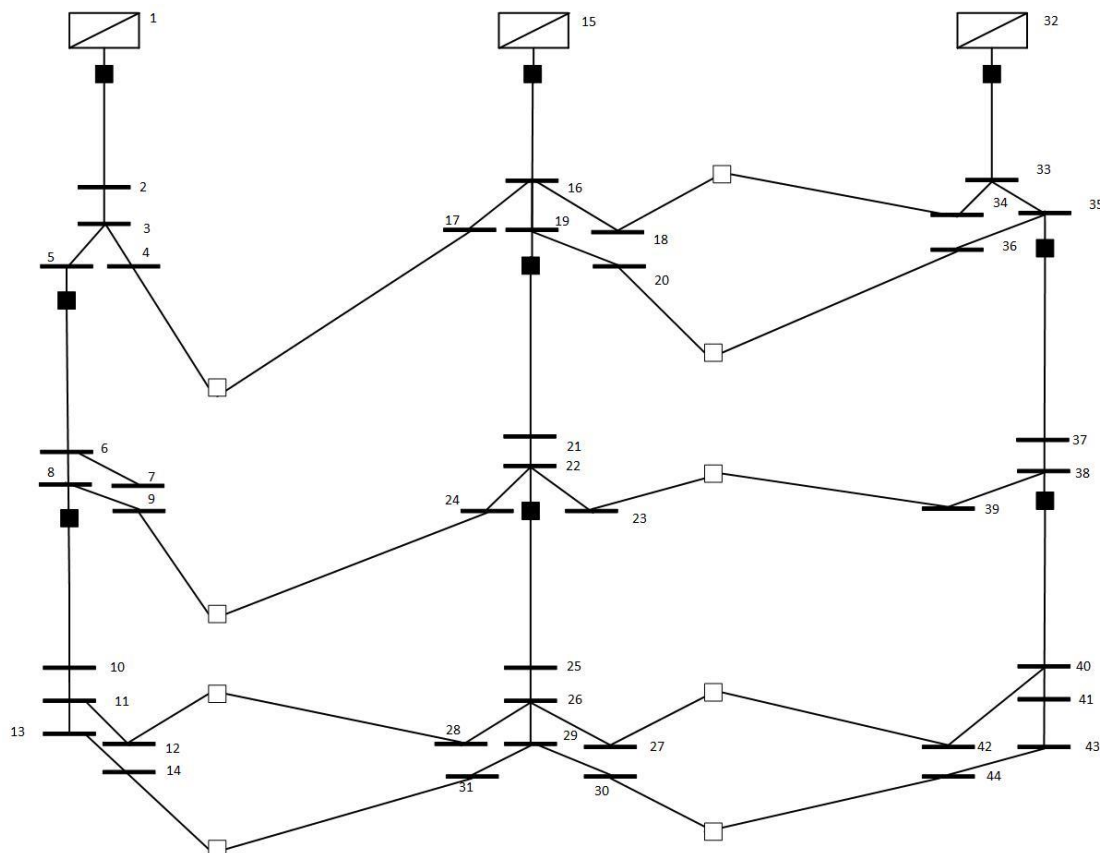
Σχήμα 5.7 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 11

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 44 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο 44 ζυγών που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.8 είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με 3 υποσταθμούς, 44 ζυγούς, 38 κλάδους και 18 διακόπτες. Οι ανοικτοί διακόπτες συμβολίζονται με λευκό κουτί, ενώ οι κλειστοί με μαύρο. Είναι ονομαστικής τάσης 7,967 kV, ενώ τα όρια των τάσεων στους ζυγούς είναι $\pm 6\%$ της ονομαστικής. Για λόγους απλούστευσης, θεωρήσαμε ότι $R_{ij} = 0,9 \Omega$, $X_{ij} = 0,9 \Omega$ και $I_{ij}^{\max} = 1000 \text{ A}$, για κάθε γραμμή i - j του δικτύου. Στον Πίνακα 5.8 φαίνεται ποιοι διακόπτες θεωρήθηκαν χειροκίνητοι και ποιοι τηλεχειριζόμενοι.

Πίνακας 5.8 : Αρχική κατάσταση διακοπών δικτύου διανομής 44 ζυγών

Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 8-10 15-16, 19-21 22-25, 32-33 35-37, 38-40	
Τηλεχειριζόμενοι	5-6	4-17, 9-24 12-28, 14-31 18-34, 20-36 23-39, 27-42 30-44



Σχήμα 5.8 : Αρχική τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών

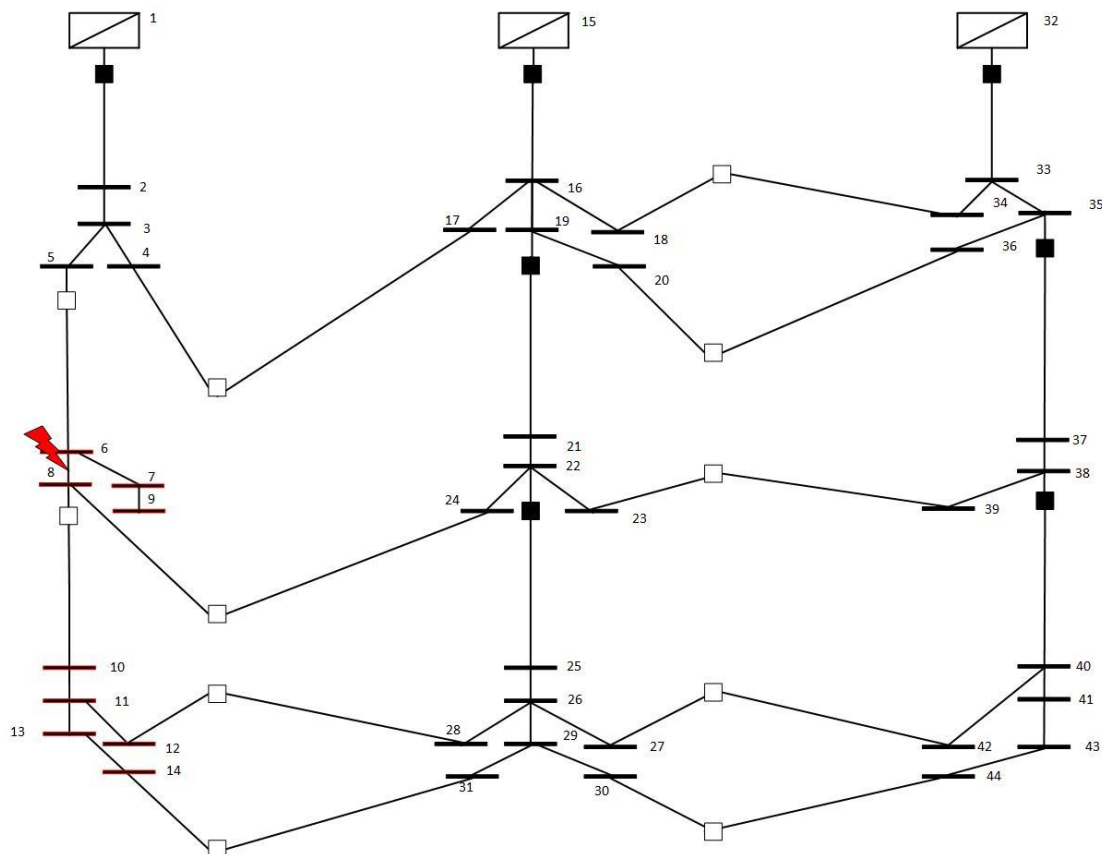
5.3.1 Σφάλμα στη γραμμή 6-8

Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 6 και 8, ανοίγουν αυτόματα οι διακόπτες των γραμμών 5-6 και 8-10, με αποτέλεσμα να βγαίνουν εκτός λειτουργίας τα φορτία των ζυγών 6, 7, 8 και 9. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 10, 11, 12, 13 και 14 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής 14-31, και έτσι τα φορτία των ζυγών 10, 11, 12, 13 και 14 τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων

βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.9 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.9 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 6-8

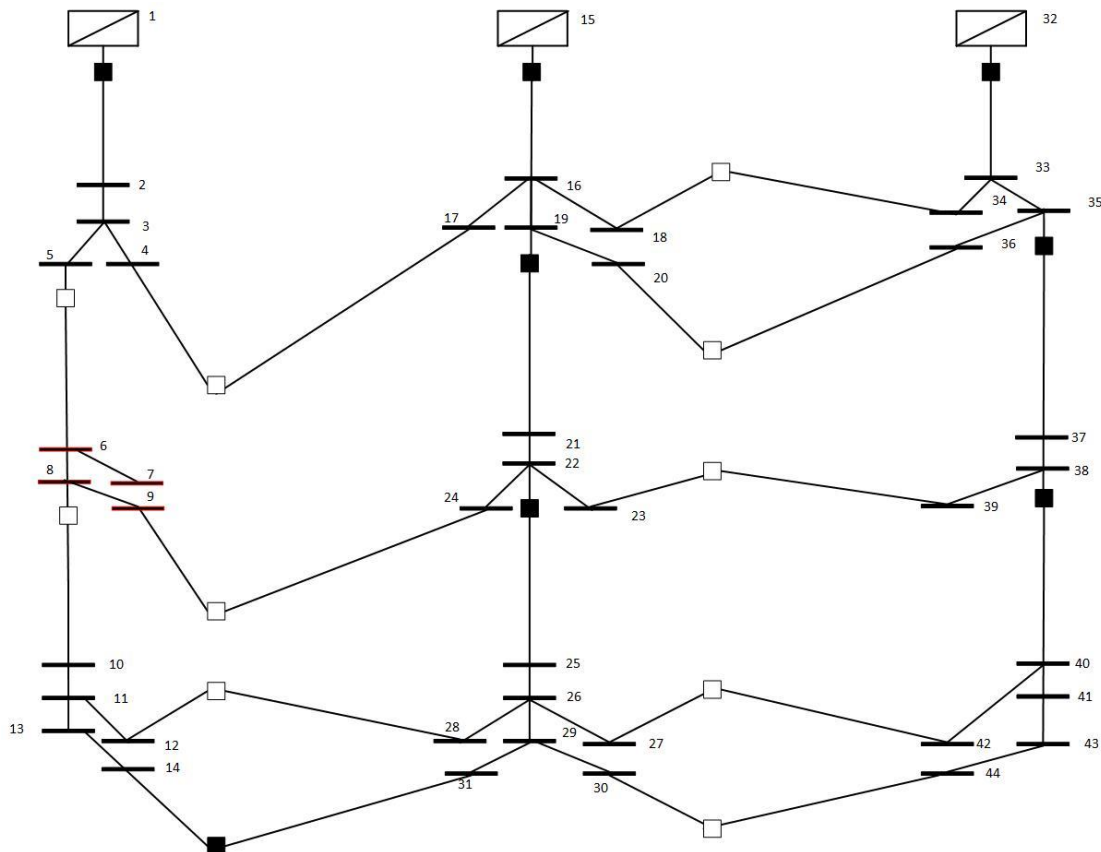
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 15-16 19-21, 22-25 32-33, 35-37 38-40	8-10
Τηλεχειριζόμενοι	14-31	5-6, 4-17 9-24, 12-28 18-34, 20-36 23-39, 27-42 30-44



Σχήμα 5.9 : Τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 6-8

Πίνακας 5.10 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 6-8 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{10} = V_{11} = V_{12} = 0,972$ α.μ.	Απόκλιση = 0 %
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{10} = V_{11} = V_{12} = 0,972$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	16 min 45 sec	



Σχήμα 5.10 : Τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 6-8

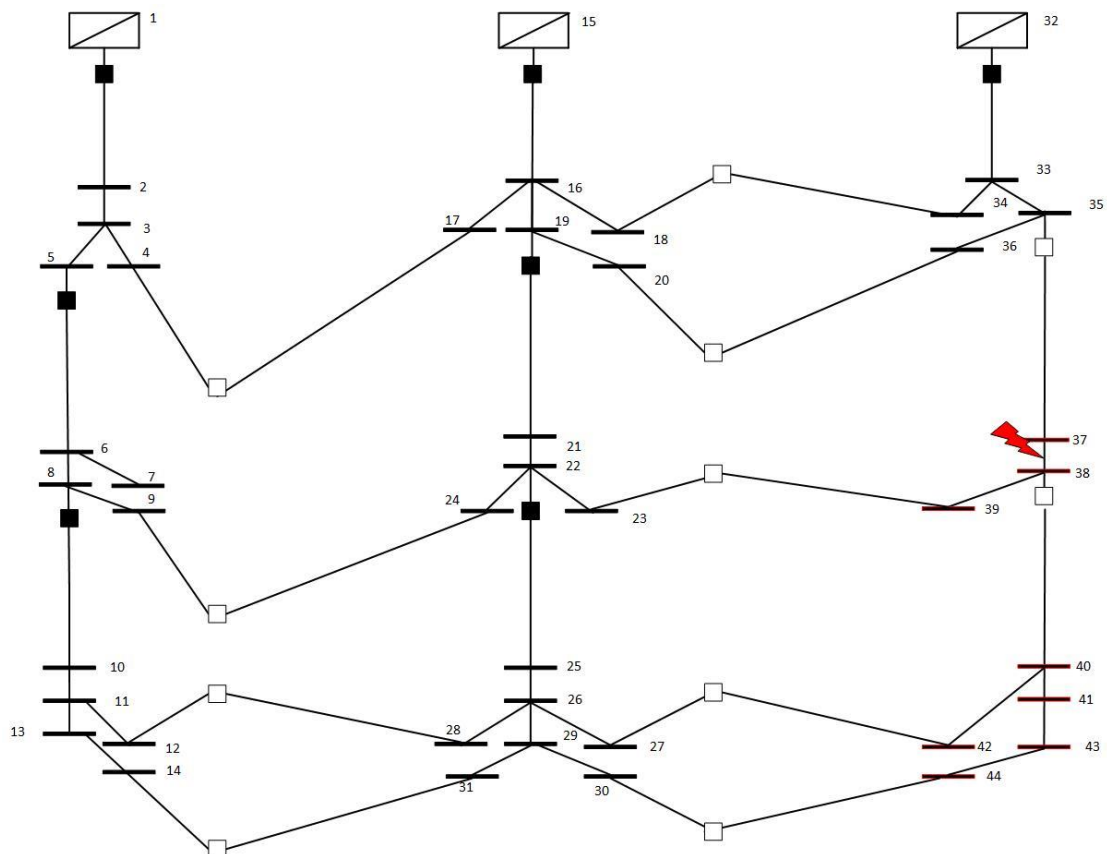
5.3.2 Σφάλμα στη γραμμή 37-38

Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 37 και 38, ανοίγουν αυτόματα οι διακόπτες των γραμμών 35-37 και 38-40, με αποτέλεσμα να βγαίνουν εκτός λειτουργίας τα φορτία των ζυγών 37, 38 και 39. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 40, 41, 42, 43 και 44 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής 27-42, και έτσι τα φορτία των ζυγών 40, 41, 42, 43 και 44 τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων

βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.11 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.11 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 37-38

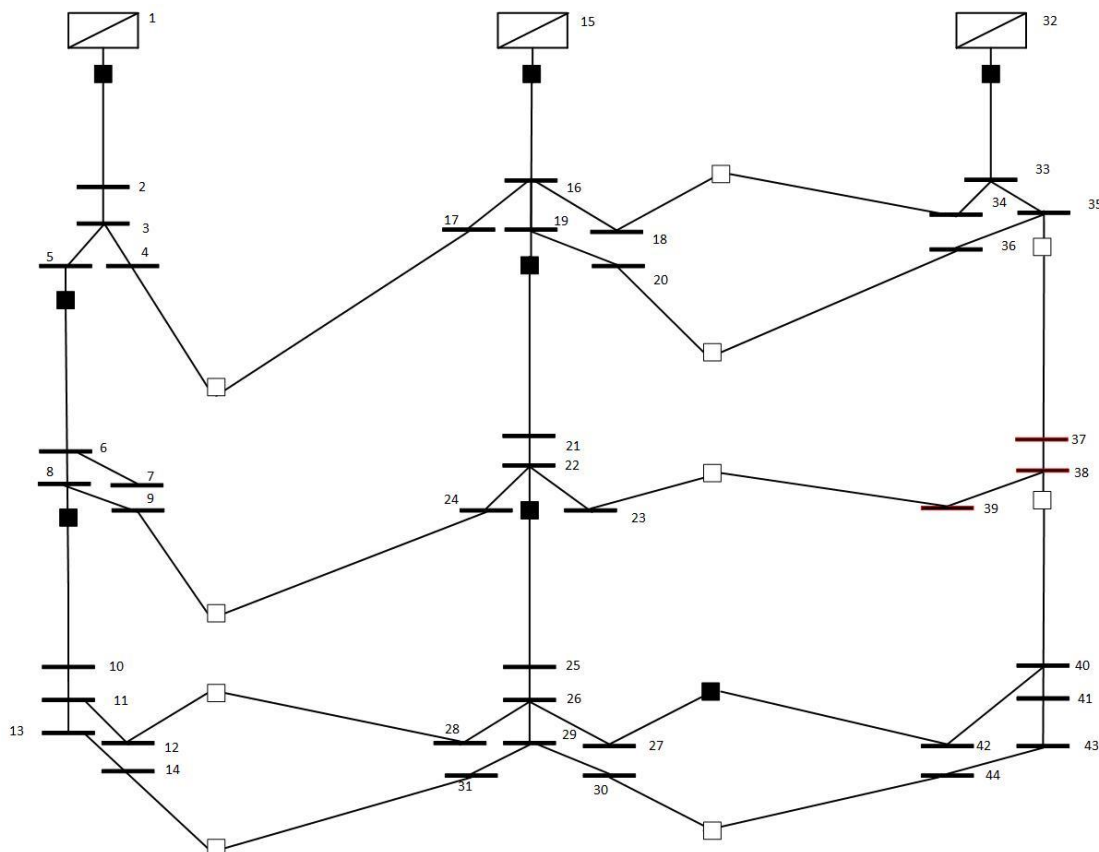
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 8-10 15-16, 19-21 22-25, 32-33	35-37, 38-40
Τηλεχειριζόμενοι	5-6 27-42	4-17, 9-24 12-28, 14-31 18-34, 20-36 23-39, 30-44



Σχήμα 5.11 : Τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 37-38

Πίνακας 5.12 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 37-38 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{43} = V_{44} = 0,96$ α.μ.	Απόκλιση = - 0,1 %
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{43} = V_{44} = 0,961$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	16 min 41 sec	



Σχήμα 5.12 : Τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 37-38

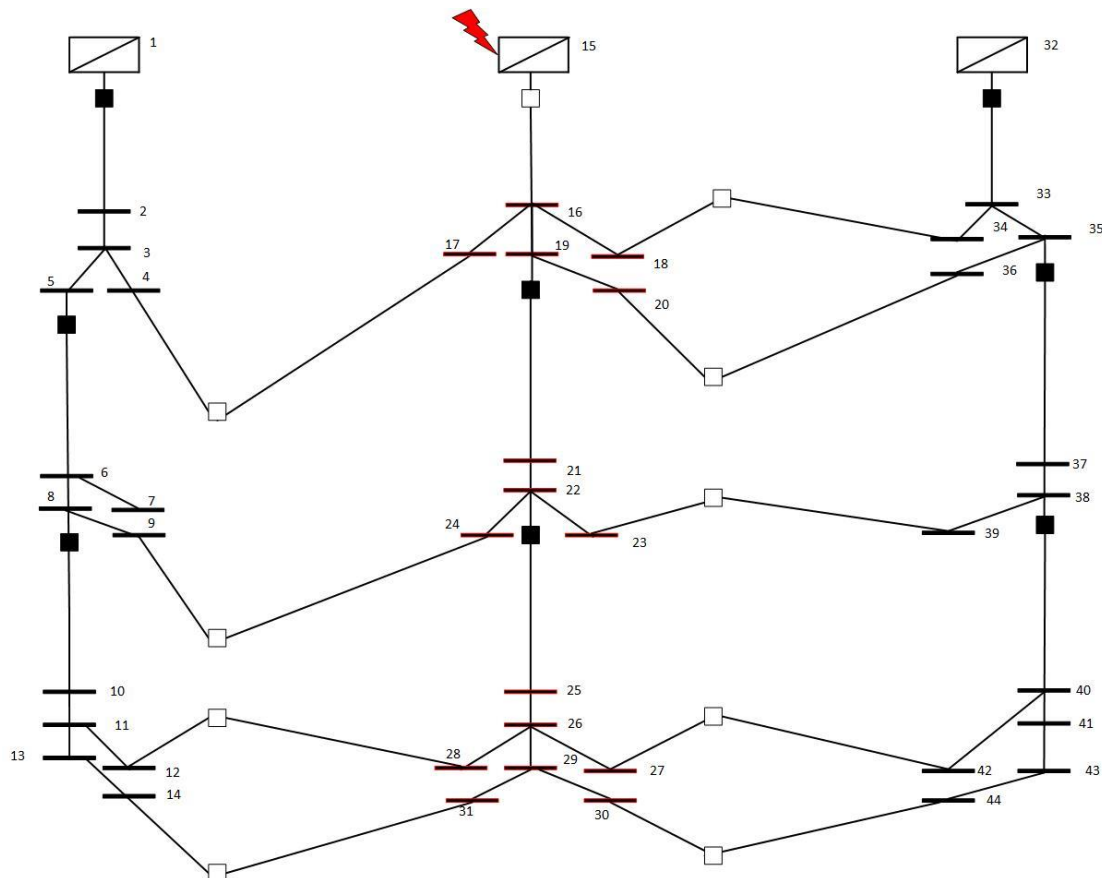
5.3.3 Σφάλμα στον υποσταθμό του ζυγού 15

Σε περίπτωση σφάλματος στον υποσταθμό του ζυγού 15, ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής 15-16. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 και 31 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής 9-24, και έτσι όλα τα παραπάνω φορτία τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.13 φαίνεται η κατάσταση των

διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάσταση τους. Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.13 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 15

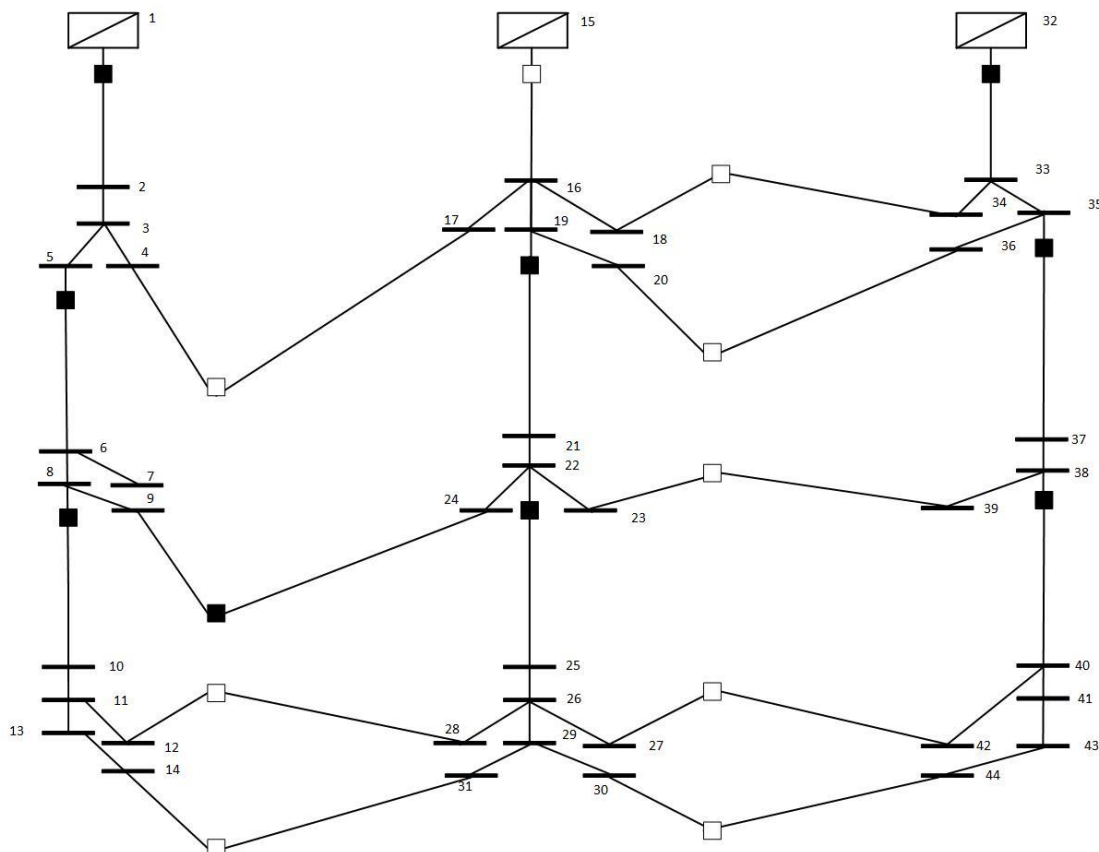
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	1-2, 8-10 19-21, 22-25 32-33, 35-37 38-40	15-16
Τηλεχειριζόμενοι	5-6 9-24	4-17, 12-28 14-31, 18-34 20-36, 23-39 27-42, 30-44



Σχήμα 5.13 : Τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στο ζυγό

Πίνακας 5.14 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 15 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{43} = V_{44} = 0,951$ α.μ.	Απόκλιση = 0 %
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{43} = V_{44} = 0,951$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	2 min 48 sec	



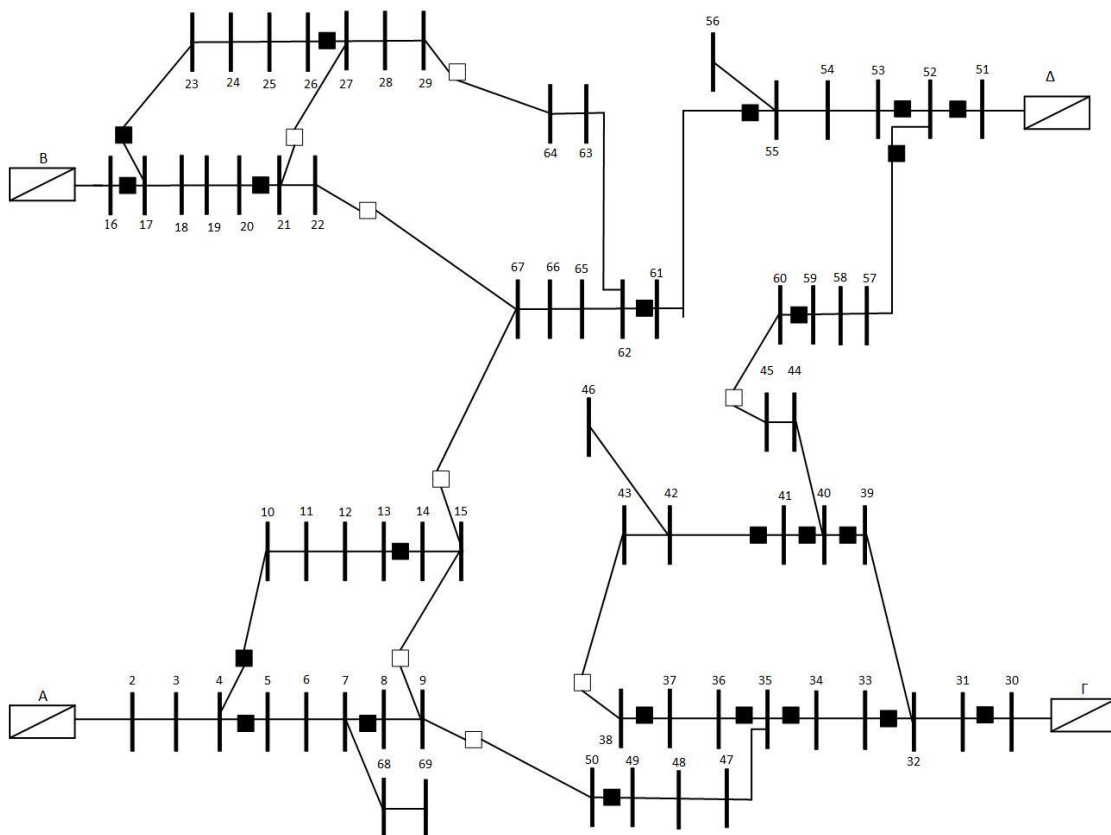
Σχήμα 5.14 : Τοπολογία δικτύου διανομής 44 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 15

5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο 69 ζυγών που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.15 είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με 4 υποσταθμούς, 69 ζυγούς, 76 διακλαδώσεις και 31 διακόπτες. Οι ανοιχτοί διακόπτες συμβολίζονται με λευκό κουτί, ενώ οι κλειστοί με μαύρο. Είναι ονομαστικής τάσης 11 kV, ενώ τα όρια των τάσεων στους ζυγούς είναι $\pm 6\%$ της ονομαστικής. Τα δεδομένα των φορτίων και των γραμμών του δικτύου φαίνονται στην [23]. Στον Πίνακα 5.15 φαίνεται ποιοι διακόπτες θεωρήθηκαν χειροκίνητοι και ποιοι τηλεχειριζόμενοι.

Πίνακας 5.15 : Αρχική κατάσταση διακοπών δικτύου 69 ζυγών

Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	4-5, 7-8, 4-10	
	16-17, 20-21, 17-23	
	32-33, 34-35, 35-36	
	37-38, 39-40, 40-41	
	51-52, 52-53, 59-60	
	61-62	
Τηλεχειριζόμενοι	13-14, 26-27	9-15, 21-27
	30-31	38-43, 9-50
	41-42, 49-50	45-60, 29-64
	52-57, 55-61	22-67, 15-67



Σχήμα 5.15 : Αρχική τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών

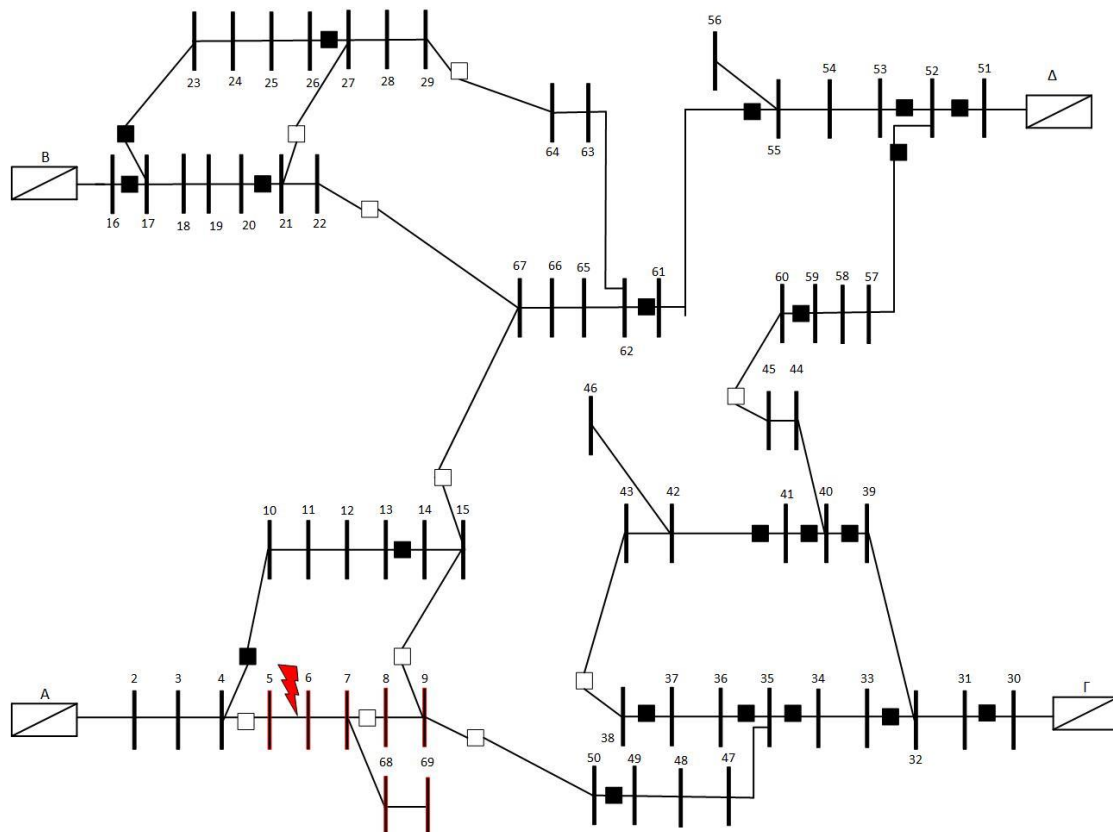
5.4.1 Σφάλμα στη γραμμή 5-6

Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 5 και 6, ανοίγουν αυτόματα οι διακόπτες των γραμμών 4-5 και 7-8, με αποτέλεσμα να βγαίνουν εκτός λειτουργίας τα φορτία των ζυγών 5, 6, 7, 68 και 69. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 8 και 9 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνουν οι τηλεχειριζόμενοι διακόπτες των γραμμών 21-27 και 9-50, ενώ ανοίγει ο χειροκίνητος της γραμμής 20-21. Έτσι τα φορτία των ζυγών 8 και 9 τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17. Έτσι δεν απορρίπτεται

κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.16 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.17 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.16 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 5-6

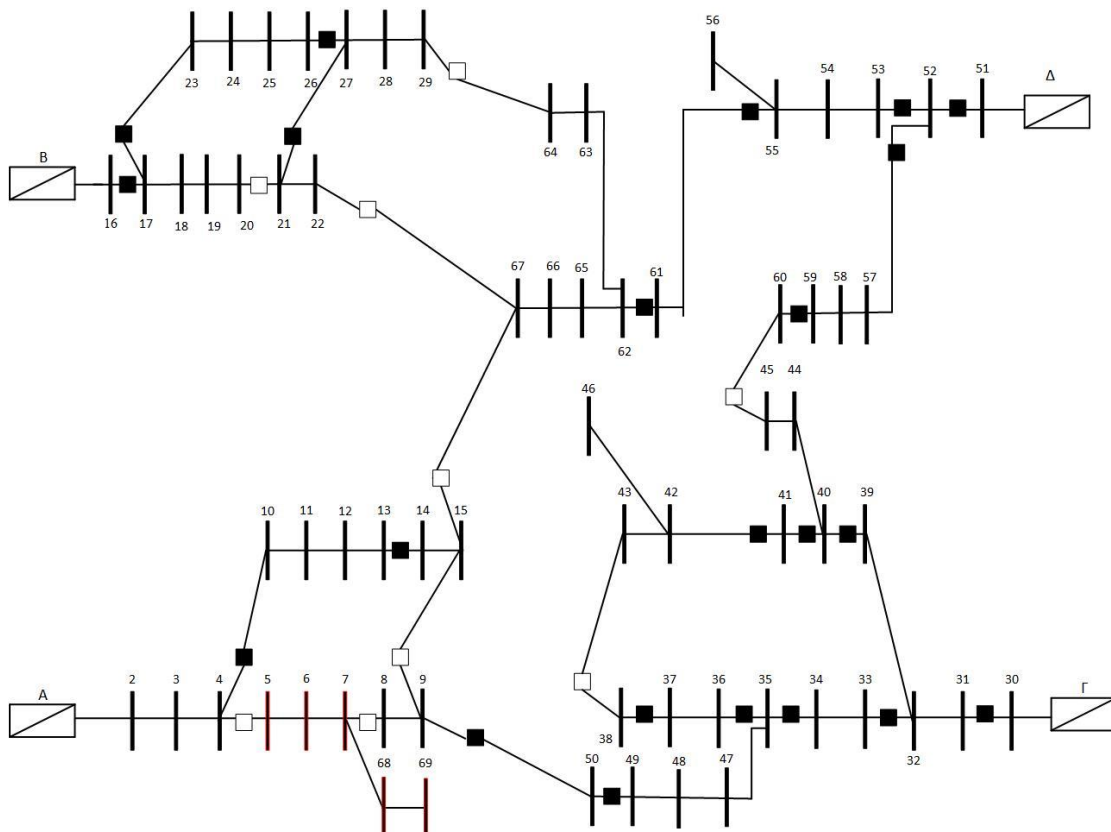
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	4-10, 16-17, 17-23 32-33, 34-35, 35-36 37-38, 39-40, 40-41 51-52, 52-53, 59-60 61-62	4-5, 7-8, 20-21
Τηλεχειριζόμενοι	13-14, 21-27, 26-27 30-31, 41-42, 9-50 49-50, 52-57, 55-61	9-15, 38-43, 45-60 29-64, 15-67, 22-67



Σχήμα 5.16 : Τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 5-6

Πίνακας 5.17 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 5-6 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{67} = 0,954$ α.μ.	Απόκλιση = 0%
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{67} = 0,954$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	18 min 39 sec	



Σχήμα 5.17 : Τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 5-6

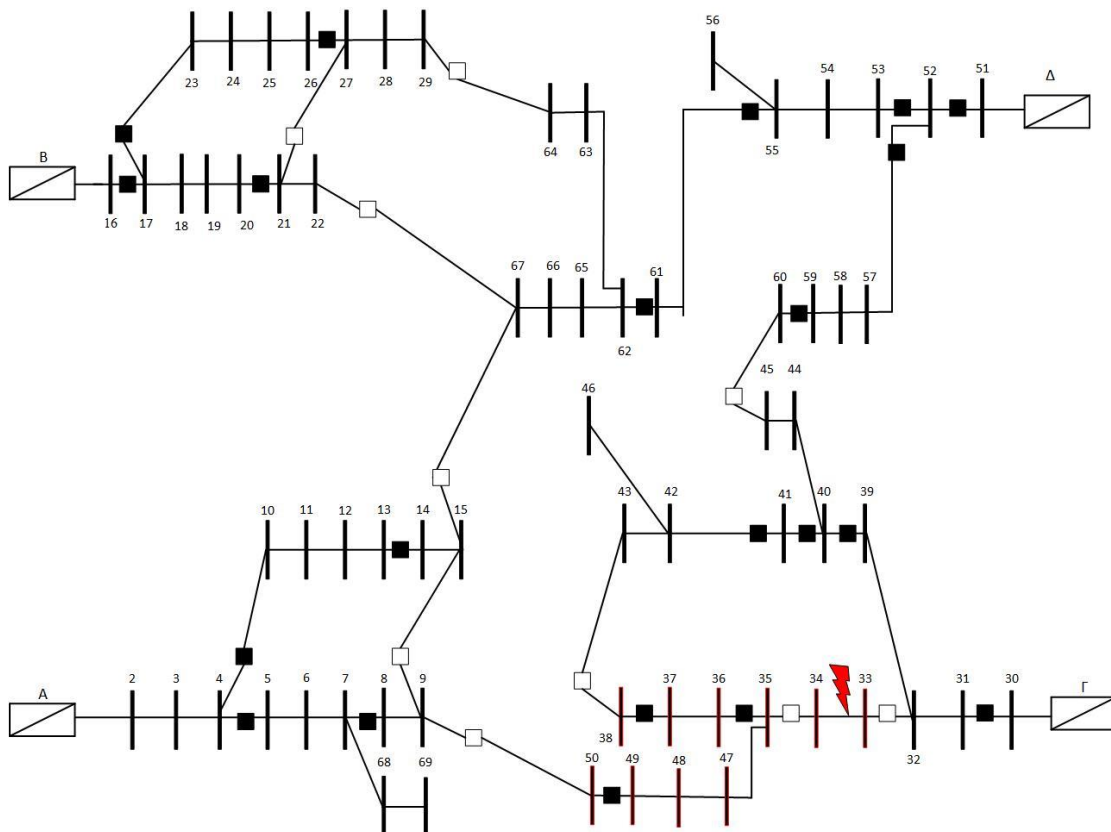
5.4.2 Σφάλμα στη γραμμή 33-34

Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 33 και 34, ανοίγουν αυτόματα οι διακόπτες των γραμμών 32-33 και 34-35, με αποτέλεσμα να βγαίνουν εκτός λειτουργίας τα φορτία των ζυγών 33 και 34. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 35, 36, 37, 38, 47, 48, 49 και 50 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνουν οι τηλεχειριζόμενοι διακόπτες των γραμμών 21-27, 38-43 και 9-50, ενώ ανοίγουν ο χειροκίνητος της γραμμής 20-21 και ο τηλεχειριζόμενος της γραμμής 49-50. Έτσι τα φορτία των ζυγών 35, 36, 37, 38, 47, 48, 49 και 50 τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19. Έτσι δεν απορρίπτεται

κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.18 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.19 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.18 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 33-34

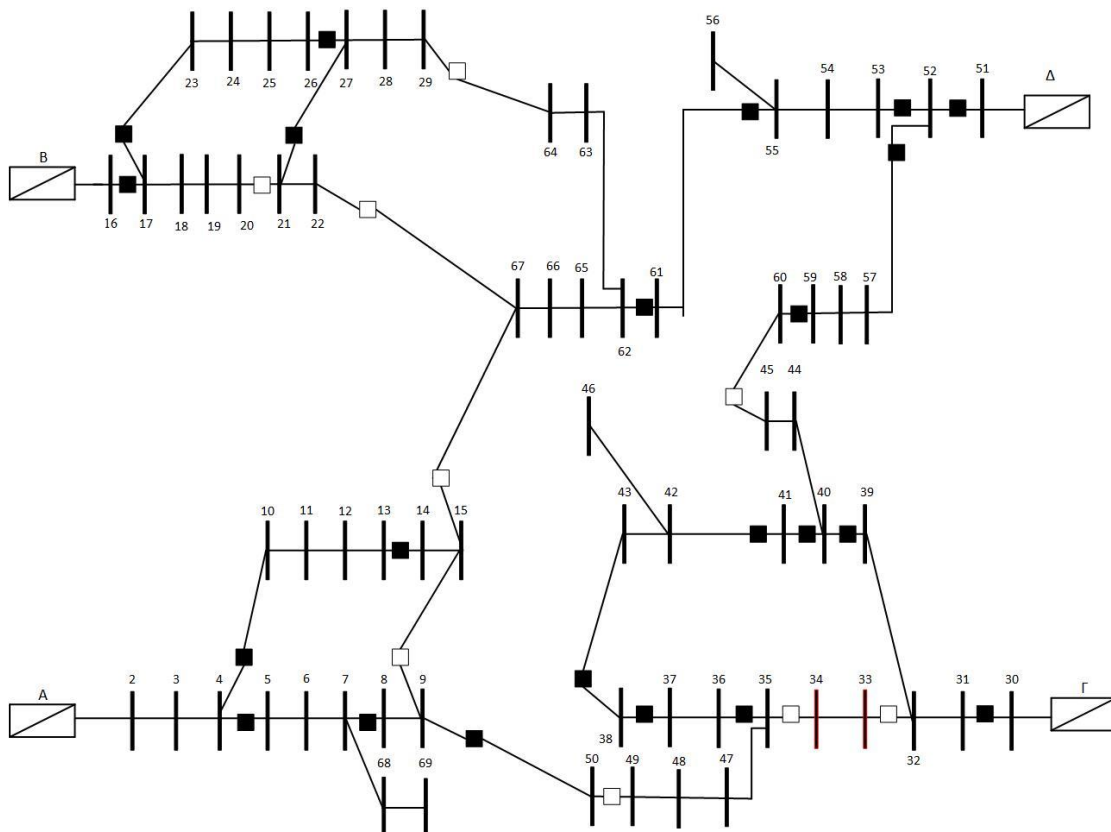
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	4-5, 7-8, 4-10 16-17, 17-23, 35-36 37-38, 39-40, 40-41 51-52, 52-53, 59-60 61-62	20-21, 32-33, 34-35
Τηλεχειριζόμενοι	13-14, 21-27, 26-27 30-31, 41-42, 38-43 9-50, 52-57, 55-61	9-15, 49-50, 45-60 29-64, 15-67, 22-67



Σχήμα 5.18 : Τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 33-34

Πίνακας 5.19 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 33-34 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{49} = 0,949$ α.μ.	Απόκλιση = 0%
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{49} = 0,949$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	18 min 8 sec	



Σχήμα 5.19 : Τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 33-34

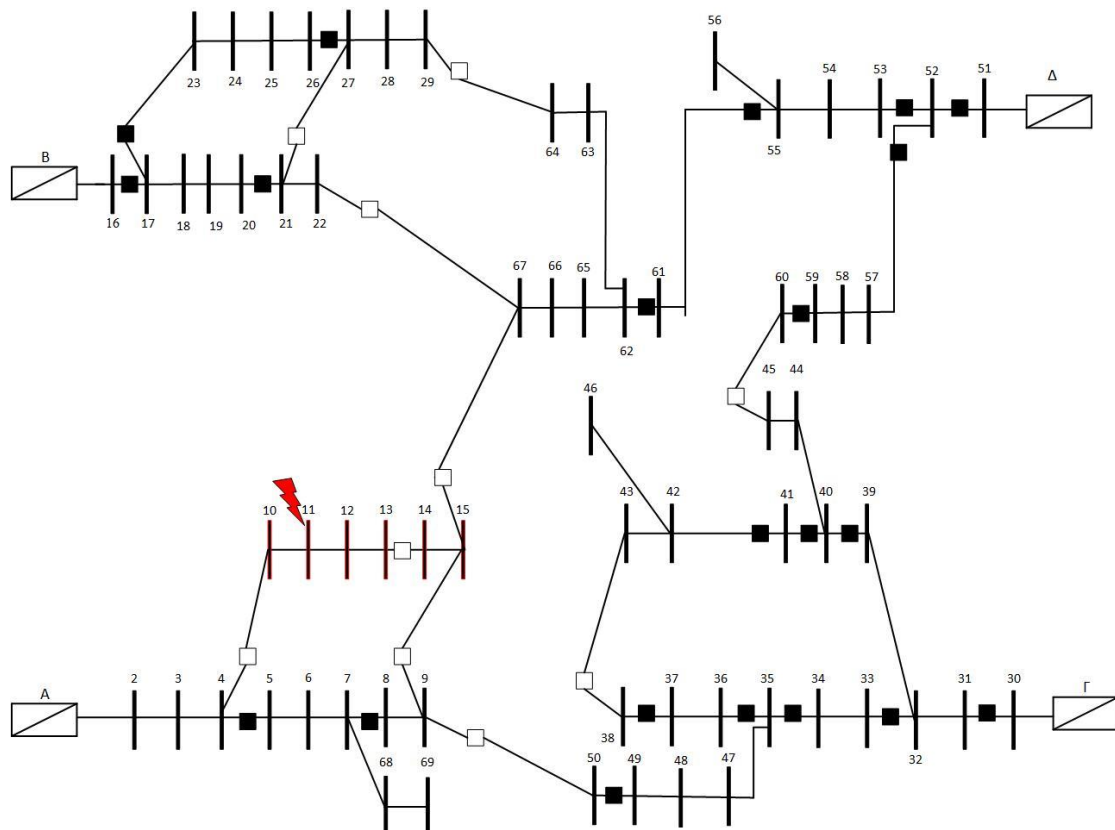
5.4.3 Σφάλμα στο ζυγό 11

Σε περίπτωση σφάλματος στο ζυγό 11, ανοίγουν αυτόματα οι διακόπτες των γραμμών 4-10 και 13-14, με αποτέλεσμα να βγαίνουν εκτός λειτουργίας τα φορτία των ζυγών 10, 11, 12 και 13. Λόγω του σφάλματος αυτού, οι καταναλωτές 14 και 15 δεν ικανοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ζυγοί, τα φορτία των οποίων δεν τροφοδοτούνται. Για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής, κλείνει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής 15-67. Έτσι τα φορτία των ζυγών 14 και 15 τροφοδοτούνται πλήρως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21. Έτσι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο, ενώ όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Στον Πίνακα 5.20 φαίνεται η κατάσταση των διακοπών μετά την αποκατάσταση της λειτουργίας. Με

κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι διακόπτες που ανοίγουν, ενώ με πράσινο εκείνοι που κλείνουν. Όλοι οι υπόλοιποι διατηρούν αμετάβλητη την κατάστασή τους. Στον Πίνακα 5.21 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε στο δίκτυο και σε ποιον ζυγό, καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα στην υπό μελέτη περίπτωση.

Πίνακας 5.20 : Κατάσταση διακοπών δικτύου 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 11

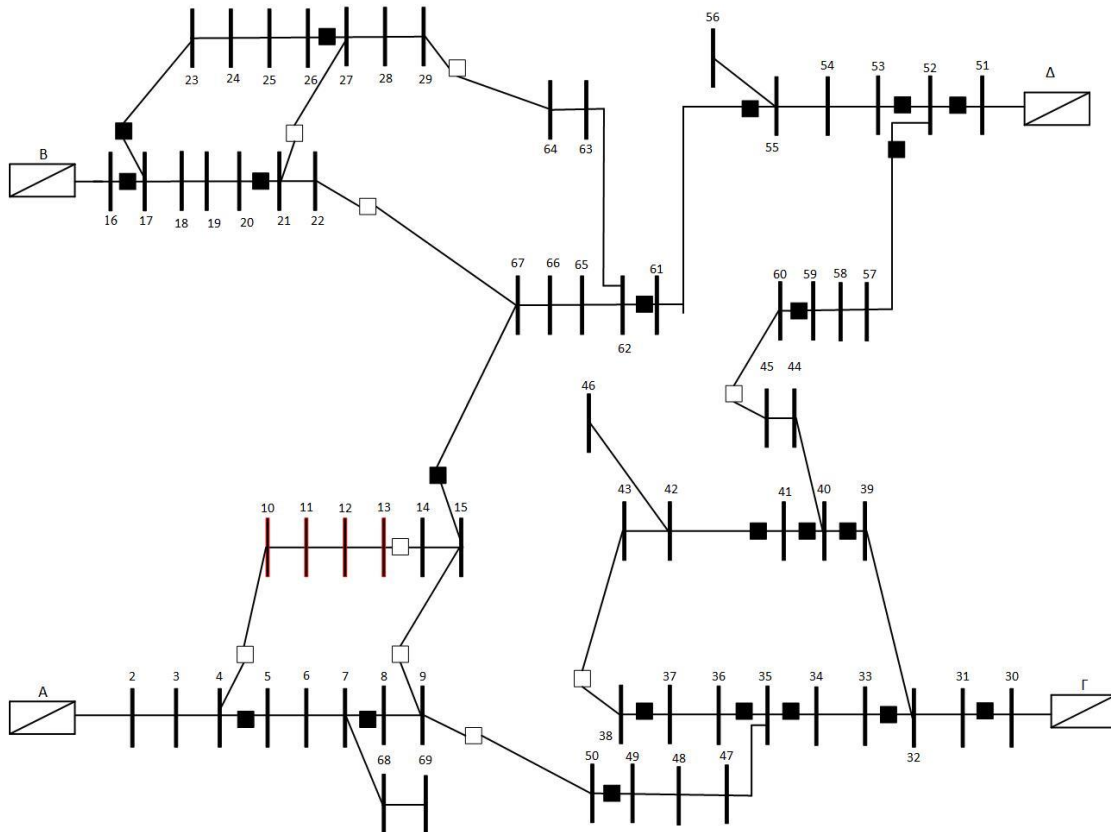
Διακόπτες	Κλειστοί	Ανοιχτοί
Χειροκίνητοι	4-5, 7-8	4-10
	16-17, 20-21	
	17-23, 32-33	
	34-35, 35-36	
	37-38, 39-40	
	40-41, 51-52	
	52-53, 59-60	
61-62		
Τηλεχειριζόμενοι	26-27, 30-31	13-14, 9-15
	41-42, 49-50	21-27, 38-43
	52-57, 55-61	9-50, 45-60
	15-67	29-64, 22-67



Σχήμα 5.20 : Τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στο ζυγό

Πίνακας 5.21 : Ελάχιστη τιμή τάσης δικτύου 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στο ζυγό 11 και χρόνος εκτέλεσης αντίστοιχου κώδικα

Ελάχιστη τιμή τάσης (GAMS)	$V_{14} = 0,951$ α.μ.	Απόκλιση = - 0,1 %
Ελάχιστη τιμή τάσης (Matpower)	$V_{14} = 0,952$ α.μ.	
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα	16 min 49 sec	



Σχήμα 5.21 : Τοπολογία δικτύου διανομής 69 ζυγών μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στη γραμμή 33-34

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας μετά από μόνιμο σφάλμα. Στο πρόβλημα αυτό αναζητείται το σύνολο των χειρισμών που πρέπει να γίνουν στα διακοπτικά μέσα που διαθέτει το εκάστοτε δίκτυο ώστε να το οδηγήσουν σε ασφαλή κατάσταση λειτουργίας. Η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδιάστηκε με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των απορριπτόμενων φορτίων και την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων χειρισμών των διακοπτικών στοιχείων του δικτύου.

Κατά την κανονική λειτουργία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανή η εμφάνιση κάποιου σφάλματος, είτε σε κάποια γραμμή, είτε σε κάποιο ζυγό του δικτύου. Το σφάλμα αυτό μπορεί να οδηγήσει άμεσα στη διακοπή της τροφοδότησης μεγάλου μέρους του δικτύου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ικανοποιηθεί η ζήτηση φορτίου για ένα μεγάλο πλήθος καταναλωτών. Αυτό αποτελεί ένα μείζονος σημασίας αντικείμενο μελέτης. Η ελαχιστοποίηση τόσο των καταναλωτών που δεν εξυπηρετούνται όσο και των διακοπτικών χειρισμών, καθώς και η σαφής προτίμηση στους τηλεχειριζόμενους διακόπτες έναντι των χειροκίνητων για τη γρηγορότερη αποκατάσταση λειτουργίας, κρίθηκαν στην παρούσα εργασία πολύ πιο σημαντικά από ότι η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου. Σε περίπτωση σφάλματος σε ένα δίκτυο διανομής, πρωταρχικό στόχο αποτελεί η εξυπηρέτηση των καταναλωτών στον συντομότερο δυνατό χρόνο παρά η οικονομική λειτουργία του δικτύου.

Με αυτό τον τρόπο προέκυψε το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η διατύπωσή του βασίστηκε στο μοντέλο της ροής ισχύος το οποίο υπέστη διάφορες τροποποιήσεις. Έγινε αντικατάσταση των μη γραμμικών περιορισμών του (π.χ. ημιτονοειδείς συναρτήσεις) με ένα συνδυασμό γραμμικών και τετραγωνικών περιορισμών και έγινε ενσωμάτωση εξισώσεων ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων του δικτύου. Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από διακριτή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα την εισαγωγή δυαδικών και ακέραιων μεταβλητών στο μοντέλο, καθιστώντας το πλέον ένα μη γραμμικό πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού.

Το διατυπωθέν πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιήθηκε στο λογισμικό GAMS και η επίλυσή του έγινε με χρήση του επίλυτή BONMIN. Για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό, αλλά και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από αυτό χρησιμοποιήθηκαν αρχεία Excel, τα οποία διευκόλυναν την επεξεργασία των πληροφοριών.

Στη συνέχεια, το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόστηκε σε δίκτυα 33, 44, και 69 ζυγών, δοκιμάζοντας δύο ειδών σφάλματα, τόσο σε κάποια γραμμή του δικτύου, όσο και σε κάποιο ζυγό του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, αυτό που παρατηρήθηκε σε όλες τις δοκιμές και σε

όλα τα δίκτυα είναι ότι δεν απορρίπτεται κανένα φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι μετά την επαναδιαμόρφωση, δεν υπάρχει καταναλωτής που να μην ικανοποιείται το φορτίο του. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς αποτελεί και τον κατεξοχήν πρωταρχικό στόχο της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης για την αποκατάσταση λειτουργίας. Η πλήρης κάλυψη των αναγκών του δικτύου σε φορτία, οφείλεται τόσο στον ιδιαίτερα αυξημένο συντελεστή βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκε στην αντικειμενική συνάρτηση στον αντίστοιχο όρο, όσο και στην τοπολογία των δικτύων που μελετήθηκαν. Όσον αφορά τους χειρισμούς των διακοπών, παρατηρήθηκε ότι έγινε σαφής προτίμηση των τηλεχειριζόμενων διακοπών και όχι των χειροκίνητων, κάτι το οποίο επίσης οφείλεται στον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκε.

6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί ως ακολούθως:

- Εξέταση και μελέτη δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτουν πιο εκτενή και περίπλοκη δομή, όπου ο κίνδυνος απόρριψης φορτίου θα ήταν πιο υψηλός. Έτσι θα δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα του εν λόγω κώδικα σε πιο απαιτητικές περιπτώσεις και η χρήση κατάλληλου συντελεστή βαρύτητας στον αντίστοιχο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να εξεταστεί και η χρησιμοποίηση βαρών για το κάθε καταναλωτή, με τιμές τέτοιες ώστε να δίνεται προτεραιότητα στα φορτία εκείνα που θεωρούνται πιο κρίσιμα (π.χ. νοσοκομεία, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, κτλ.). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα και την αλλαγή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, με στόχο την υλοποίηση της προτεραιότητας αυτής.
- Τοποθέτηση των διακοπτικών στοιχείων του δικτύου σε διαφορετικές θέσεις καθώς και εναλλακτική θεώρηση τηλεχειριζόμενων και χειροκίνητων διακοπών μέσα στο δίκτυο, με στόχο τη μελέτη διαφορετικών σεναρίων. Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αν μελετηθούν και σεναρία που να συνδυάζουν διαφορετικές τιμές για τους αντίστοιχους δύο συντελεστές βαρύτητας. Έτσι, ο εν λόγω κώδικας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της τοποθέτησης των κατάλληλων διακοπτικών μέσων στις πιο κατάλληλες θέσεις κατά την σχεδίαση και την ανάπτυξη πραγματικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ενσωμάτωση και συμμετοχή μονάδων διανεμημένης παραγωγής θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για την επέκταση της παρούσα εργασίας. Οι μονάδες αυτές θα μπορούσαν να συμβάλουν σημαντικά στη βέλτιστη δυνατή επαναδιαμόρφωση του δικτύου, επηρεάζοντας σημαντικά τις τιμές των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [2] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [3] S. S. Čurčić, C. S. Ozveren, L. Crowe, and P. K. L. Lo, “Electric power distribution network restoration: A survey of papers and a review of the restoration problem,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 35, pp. 73–86, 1996.
- [4] T. Gönen, *Electric power distribution system engineering*, 2nd ed, CRC Press, 2008.
- [5] H. Lee Willis, *Power Distribution Planning Reference Book*, New York 1997.
- [6] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1497, Apr. 1989.
- [7] Π. Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [8] Y. Kumar, B. Das, and J. Sharma, “Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 261–269, Jan. 2008.
- [9] K. Miu, H. D. Chiang, B. Yuan, and G. Darling, “Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 789–795, Aug. 1998.
- [10] K. Miu, H. D. Chiang, and R. J. McNulty, “Multitier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 1001–1007, Aug. 2000.
- [11] M. R. Kleinberg, K. Miu, and H. D. Chiang, “Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1110–1117, Aug. 2011.
- [12] T. Nagata, H. Sasaki, and R. Yokoyama, “Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1473–1479, Aug. 1995.
- [13] Rubén Romero, John F. Franco, Fábio B. Leão, Marcos J. Rider, and Eliane S. de Souza, “A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, to be published.
- [14] Patricia L. Cavalcante, Juan Camilo López, John F. Franco, Marcos J. Rider, Arioaldo V. Garcia, Marcos R. R. Malveira, Luana L. Martins, and Luiz Carlos M.

- Direito, "Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, to be published.
- [15] Pilar Meneses de Quevedo, Javier Contreras, Marcos J. Rider, and Javad Allahdadian, "Contingency Assessment and Network Reconfiguration in Distribution Grids Including Wind Power and Energy Storage," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, to be published.
- [16] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control," John Wiley & Sons, Inc. Editions.
- [17] Qiuyu Peng and Steven H. Low Engr. & App. Sci., Caltech, CA, "Optimal Branch Exchange for Feeder Reconfiguration in Distribution Networks," in Proc. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, December 2013.
- [18] S. Naveen, K. Sathish Kumar, K. Rajalakshmi, "Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, no. 11, pp. 90-97, July 2015.
- [19] R. A. Jabr, R. Singh and B. C. Pal, "Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1106–1115, May 2012.
- [20] E. Castillo, A. J. Gonejo, P. Pedegral, R. Garcíá, N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. Wiley-Interscience, 2001.
- [21] P. Bonami, J. Lee, *BONMIN User's Manual*, v. 1.5, May 2013, [Online].
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://projects.coin-or.org/Bonmin>.
- [22] M. E. Baran and F. F Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1497, Apr. 1989.
- [23] D. Das, "Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 5, pp. 331-338, June 2006.