



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Δ. Αναστασίου

Επιβλέπων: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Δ. Αναστασίου

Επιβλέπων: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Οκτωβρίου 2017.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....

Αθανάσιος Δ. Αναστασίου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Αθανάσιος Δ. Αναστασίου, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξάρτηση της σύγχρονης κοινωνίας από την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη ζήτηση και κατανάλωσή της καθώς και στην αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του συστήματος διανομής. Έτσι, η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος αλλά και η περιοχή που θα επηρεαστεί από αυτό έχουν αυξηθεί αναδεικνύοντας τη σπουδαιότητα της γρήγορης αποκατάστασης της λειτουργίας τους έτσι ώστε να διασφαλιστεί η άμεση εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Επιπρόσθετα, η αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) σε πρώτη φάση δυσχεραίνει αυτήν την κατάσταση, ωστόσο χρησιμοποιώντας καινοτόμες τεχνολογίες έξυπνων δικτύων μπορεί να βοηθήσει σε προβλήματα αποκατάστασης των ΔΔ.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος της επαναδιαμόρφωσης ακτινικών ΔΔ για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους.

Αρχικά, παρουσιάζεται μία μέθοδος αποκατάστασης, η οποία είναι βασισμένη σε έναν απλοϊκό (μη βέλτιστο) αλγόριθμο και κάνει χρήση των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί από την επίλυση της ροής ισχύος πριν από την εμφάνιση σφάλματος και την ικανότητα των γραμμών. Το εν λόγω μοντέλο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB και εφαρμόστηκε σε πρότυπα δίκτυα διανομής της IEEE των 33 και 69 ζυγών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την εμφάνιση σφάλματος σε μία γραμμή του δικτύου και η κάθε περίπτωση εφαρμόστηκε σε δίκτυα χωρίς διείσδυση ΔΠ αλλά και σε δίκτυα με διείσδυση ΔΠ.

Στη συνέχεια, διατυπώνεται και επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών ΔΔ. Αρχικά, αναλύεται το μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος και οι εξισώσεις τροποποιούνται κατάλληλα έτσι ώστε να βασιστεί η διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης. Με την γραμμικοποίηση των όρων των εξισώσεων της ροής ισχύος και την εισαγωγή των δυαδικών μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν τους διακόπτες του εκάστοτε δικτύου, τελικά το πρόβλημα μοντελοποιείται ως πρόβλημα 0/1 μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού. Στόχος του προβλήματος είναι 1) η μεγιστοποίηση της εξυπηρετούμενης περιοχής με προτεραιότητα στα κρίσιμα φορτία του

συστήματος, 2) η ελαχιστοποίηση των χειρισμών των διακοπών δίνοντας προτεραιότητα στον χειρισμό των τηλεχειριζόμενων διακοπών και 3) η ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των ΜΔΠ στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ.

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε κώδικας με χρήση της πλατφόρμας YALMIP στο περιβάλλον MATLAB και εφαρμόστηκε σε πρότυπα δίκτυα διανομής της IEEE των 33 και 69 ζυγών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν διακοπή λειτουργίας μίας αλλά και παραπάνω γραμμών σε δίκτυα με διείσδυση ΔΠ και χωρίς διείσδυση ΔΠ αλλά και ολική διακοπή στον υποσταθμό σε δίκτυα με διείσδυση ΔΠ.

Τέλος, διενεργούνται συγκρίσεις μεταξύ της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης και της απλοϊκής μεθόδου αποκατάστασης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ακτινικά δίκτυα διανομής, διεσπαρμένη παραγωγή, αποκατάσταση λειτουργίας, απλοϊκός αλγόριθμος, βέλτιστη επαναδιαμόρφωση, μη εξυπηρετούμενη ισχύς

ABSTRACT

The dependence of modern society on electric power has led to its increasing demand and consumption, as well as to the increase of the size and complexity of the distribution system. As a result, the likelihood of occurrence of fault, as well as the area affected by the fault have been increased designating the importance of fast restoration so as to ensure immediate service restoration to the customers. In addition, the increased penetration of distributed generation units (DG units) in distribution networks in the first instance aggravates this situation, but on the other hand, innovative smart grid technologies can support the restoration of distribution networks.

The scope of this dissertation is the formulation and solution of the distribution network reconfiguration problem for service restoration.

First, a restoration method is presented based on a simplified (not optimal) algorithm and utilizes the information collected by the pre outage power flow and the capacity of the lines. This model has been developed using the MATLAB environment and was applied to the IEEE 33 and 69 bus distribution systems. The method is tested for a single line outages. Each scenario was tested to networks without DG penetration but also to networks with DG penetration.

Then, the problem of the optimal reconfiguration of radial distribution network is formulated and solved. First, the model of the optimal power flow (OPF) is used as a basis for the formulation of the optimal network reconfiguration problem. By linearizing the terms of the power flow equations and introducing binary variables representing the switches of each line, the problem is finally modeled as a 0/1 mixed integer quadratic programming problem (0/1 MIQPP). The aim of the problem is to 1) maximize the served area prioritizing the critical loads of the system, 2) minimize the number of the switching operations prioritizing the operation of remotely controlled switches and 3) minimize the curtailment of active power of DG units in networks with DG penetration.

The optimization problem has been developed using the YALMIP toolbox in the MATLAB environment. The proposed model was applied to the IEEE 33 and 69 bus distribution systems. The results presented study single or multiple lines outages in

networks with and without DG penetration but also outages of the substation of networks equipped with DG penetration.

Finally, comparisons are performed between the optimal distribution network reconfiguration and the simplified restorative method.

KEY WORDS

Radial distribution networks, distributed generation, service restoration, simplified algorithm, optimal distribution network reconfiguration, non-served power

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ιάσονα Κουβελιώτη - Λυσίκατο, υπό την επίβλεψη του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Η βοήθεια και η καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας ήταν καθοριστική για την επιτυχή υλοποίησή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου Δημήτρη, Γεωργία, Ματίνα και Μαρία για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και την αγάπη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τους φίλους μου Χρήστο, Γιώργο, Χάντζ και Όμηρο που εξαιτίας τους έβαλα στόχο αυτήν τη Σχολή και θα ήθελα να τους ευχηθώ κουράγιο, δύναμη και επιτυχία στην καινούρια τους ζωή.

Επιπλέον, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πολύ καλό μου φίλο Βασίλη για την στήριξή του όλα αυτά τα χρόνια και για τις όμορφες και δύσκολες στιγμές που ήταν και συνεχίζει να είναι δίπλα μου.

Σίγουρα, θέλω να ευχαριστήσω όλα αυτά τα παιδιά που γνώρισα κατά την διάρκεια των σπουδών μου και η παρέα τους μου πρόσφερε αρκετές όμορφες στιγμές. Σε αυτό το σημείο, όμως, θα ήθελα να ευχαριστήσω κάπως παραπάνω κάποιους ανθρώπους (Θανάσης m., Θανάσης, Νικόλας, Γεράσιμος, Φίλιππος, Κωνσταντίνος) για τις ωραίες μέρες που περάσαμε παρέα.

Τέλος, ένα ξεχωριστό ευχαριστώ, μέσα από την καρδιά μου, στην Γεωργία Κωστούλάκη, η οποία με υπομένει κάθε μέρα και με βοηθάει να καταλάβω ποια πράγματα έχουν αξία στην ζωή με την ανιδιοτελή αγάπη που μου δείχνει όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	3
1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ).....	4
1.4 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	7
1.4.1 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	7
1.4.2 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	8
1.4.3 ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (ΕΔΔ).....	9
1.4.4 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ (MICROGRIDS)	9
1.5 ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ (SMART GRIDS)	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°	15
ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	15
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	16
2.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	21
2.3.1 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	21
2.3.2 ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	23
2.3.3 ΔΙΚΤΥΩΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ PRIMARY NETWORK)	25
2.4 ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	26
2.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ BLACK START.....	29
2.4.1.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	30
2.4.2 ΤΥΠΟΙ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°	35
ΑΠΛΟΪΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	35
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
3.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	36
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	37
3.3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	37
3.3.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΟΥ ΔΔ.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	43
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	43
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43

4.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ.....	43
4.2.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29).....	43
4.2.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (6, 7).....	46
4.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 33 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ.....	48
4.3.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29).....	49
4.3.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (6, 7).....	51
4.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΚΟΜΒΩΝ.....	54
4.4.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44).....	55
4.4.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9).....	55
4.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 69 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ.....	57
4.5.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44).....	59
4.5.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9).....	62
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°	65
	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	65
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	65
5.2	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	66
5.2.1	ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	67
5.2.2	ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	71
5.3	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ	74
5.3.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ	75
5.3.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	76
5.3.3	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	77
5.3.4	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ.....	81
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°	85
	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	85
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	85
6.2	ΥΑΛΜΙΡ	87
6.2.1	ΣΥΝΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΥΑΛΜΙΡ.....	88
6.3	Ο ΕΠΙΛΥΤΗΣ GUROBI.....	90
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°	93
	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	93
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	93
7.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 33 ΚΟΜΒΩΝ.....	93
7.2.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29).....	95

7.2.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (2, 19) ΚΑΙ (13, 14).....	98
7.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 33 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ.....	102
7.3.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (7, 8) ΚΑΙ (23, 24).....	102
7.3.2	ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟΝ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ 1	106
7.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΚΟΜΒΩΝ.....	109
7.4.1	ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟΝ ΚΟΜΒΟ 12.....	110
7.4.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (3, 28) ΚΑΙ (20, 21).....	113
7.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 69 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ.....	115
7.5.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9).....	117
7.5.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44).....	120
7.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (ΜΑΤPOWER – ΥΑΛΜΙΡ).....	123
7.7	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	125
7.7.1	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29).....	125
7.7.2	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9).....	126
7.7.3	ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44).....	127
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο	129
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	129
8.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129
8.2	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	132
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο	133
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	137

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

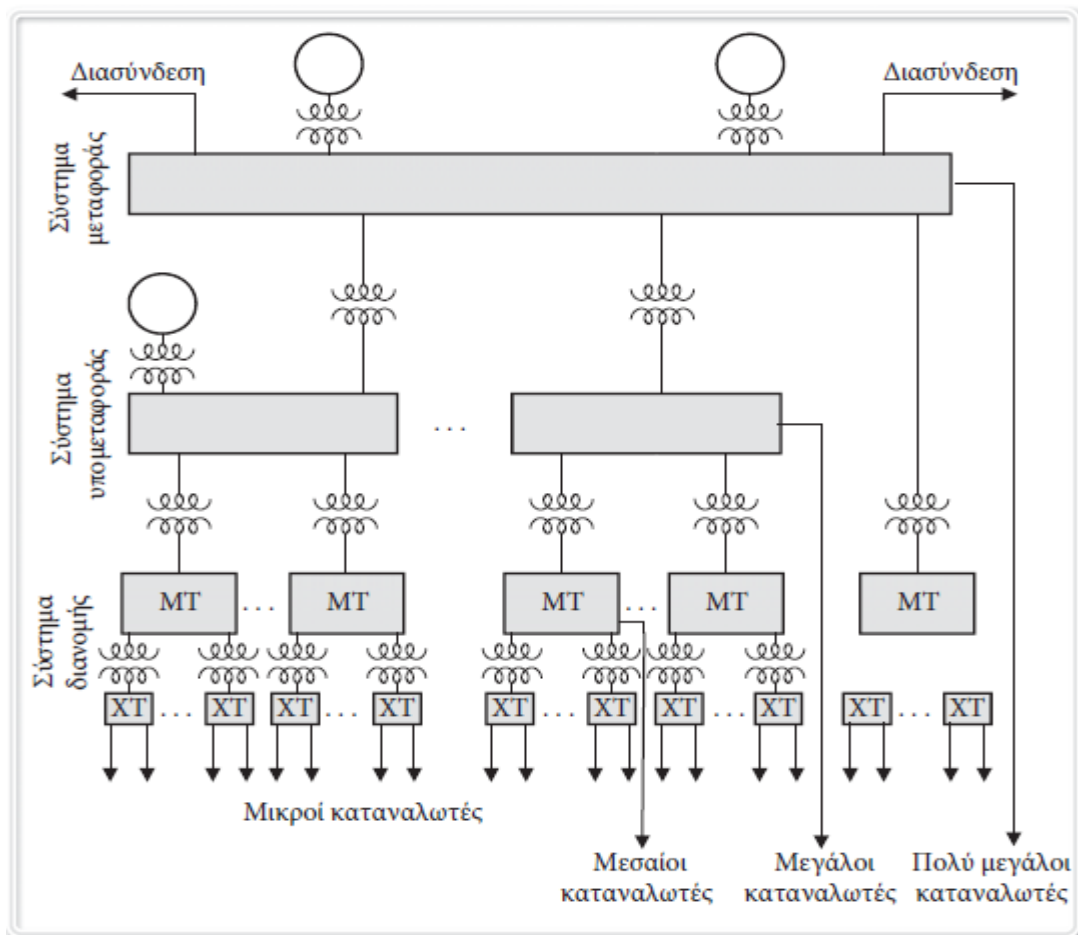
1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Για την καλή λειτουργία ενός ΣΗΕ, βασική προϋπόθεση είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όπου υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας τιμές συχνότητας και τάσεως που ικανοποιούν τα αποδεκτά όρια αλλά και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο δομείται ένα τυπικό ΣΗΕ.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις διακριτές λειτουργίες του ΣΗΕ: την παραγωγή, τη μεταφορά, και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και πρέπει να καταναλώνεται τη χρονική στιγμή της ζήτησης λόγω της αδυναμίας αποθήκευσης (υψηλό κόστος) και της απαίτησης για αξιοπιστία και ασφάλεια τροφοδοσίας [1].

Το Σύστημα Παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα μαζί με τους υποσταθμούς ανυψώσεως της τάσεως για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση [2]. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με την ροή ή την πτώση των υδάτων, από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση (ουράνιο, θόριο, πλουτώνιο) και τα τελευταία χρόνια με μεγαλύτερη ένταση από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως με την εκμετάλλευση του ανέμου (αιολική ενέργεια) και του ήλιου (ηλιακή ενέργεια) [1].

Το Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσεως, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής [2]. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής τάσης (ΥΤ) (150 kV) και υπερ-υψηλής τάσης (ΥΥΤ) (400 kV), για να μειωθούν οι απώλειες, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση (ΜΤ), δηλαδή στα 20 kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί είναι η αφετηρία των δικτύων διανομής ΜΤ που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές διαμέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (ΧΤ) 230/400 V (Ευρώπη) [1], [3].



Σχήμα 1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Σημειώνεται ότι η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή.

Αν και το μέγεθος των ΣΗΕ διαφέρει, υπάρχουν μεταξύ τους κοινά χαρακτηριστικά. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τριφασικά εναλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας σήμερα 50 ή 60 Hz, χρησιμοποιούνται όμως, σε ειδικές περιπτώσεις και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ΜΤ έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής ΧΤ έχουν επιπλέον και ουδέτερο αγωγό. Γραμμές διανομής ΧΤ υπάρχουν και μονοφασικές, δύο αγωγών [1].

1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μεταφέρεται στις περιοχές καταναλώσεως μέσω του δικτύου μεταφοράς, διανέμεται στους καταναλωτές με τα δίκτυα διανομής (ΔΔ). Μία σαφής προσέγγιση είναι ότι με τον όρο διανομή ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές [1].

Στο σύστημα διανομής χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα τάσης διανομής:

- Η πρωτεύουσα τάση ή τάση τροφοδοσίας που χαρακτηρίζεται και μέση τάση (ΜΤ)
- Η δευτερεύουσα τάση ή τάση κατανάλωσης που χαρακτηρίζεται και χαμηλή τάση (ΧΤ)

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα ΔΔ ΜΤ και ΧΤ και τους μετασχηματιστές διανομής με τους οποίους η ΜΤ υποβιβάζεται σε ΧΤ. Η αφητηρία των δικτύων διανομής (ΔΔ) είναι οι υποσταθμοί υποβιβασμού της τάσης από ΥΤ σε ΜΤ, όπου αποτελούν κυρίως τους κόμβους του δικτύου και παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε

μικρούς οικιακούς καταναλωτές (υπό τη ΧΤ διανομής) και σε μεσαίου μεγέθους καταναλωτές (υπό τη ΜΤ διανομής).

Όσον αφορά την κατασκευαστική διαμόρφωση των ΔΔ, σημαντικό ρόλο έχουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και η χωροταξική διαμόρφωση. Τα ΔΔ ΜΤ και ΧΤ στις αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι κατά κανόνα υπόγεια αφού ένας λόγος είναι η έλλειψη του απαιτούμενου χώρου για την τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας και ένας άλλος λόγος είναι η αισθητική, ενώ στις αγροτικές περιοχές είναι εναέρια. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα εναέρια δίκτυα σε σχέση με τα υπόγεια είναι ότι είναι λιγότερα δαπανηρά και επίσης έχουν ευκολότερη αποκατάσταση των βλαβών [1].

Το έργο για την λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναλάβει οι Διαχειριστές των Δικτύων Διανομής. Στην Ελλάδα, από τον Οκτώβριο του 2010, οι δραστηριότητες της Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας έχουν ανατεθεί στην ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) και είναι κατά 100% θυγατρική εταιρεία της ΔΕΗ Α.Ε [4].

1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)

Σήμερα ένα από τα μεγάλα θέματα για το μέλλον της ανθρωπότητας είναι και το θέμα του περιβάλλοντος. Οι παρεμβάσεις του ανθρώπου, ιδιαίτερα τους τελευταίους 1-2 αιώνες, δημιούργησαν προβλήματα και καταστροφικές προοπτικές για την ανθρωπότητα. Μια από τις παρεμβάσεις του ανθρώπου, που δημιουργούν τεράστια προβλήματα για το φυσικό περιβάλλον, είναι οι αναγκαίες σήμερα μεγάλες ποσότητες ενέργειας, που απαιτούνται στη σύγχρονη κοινωνία, όπως είναι η θέρμανση, ο ηλεκτρισμός, οι μεταφορές, αλλά και η παραγωγή αγαθών που βασίζονται σήμερα στην ηλεκτρική ενέργεια (βιομηχανία, βιοτεχνία, γεωργία, ορυκτός πλούτος) [5].

Για να περιοριστεί η ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται πολλές προτάσεις, μια από τις οποίες είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες,

όπως είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Δύο βασικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ είναι ότι για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας (συμβατικές μορφές ενέργειας), αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, λόγω της <<φιλικότητάς>> τους προς το περιβάλλον, αποτελούν μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σε σχέση με την χρονική κλίμακα της ανθρώπινης ζωής και παρουσίας στη Γη είναι ανεξάντλητες καθώς η εξάντλησή τους εξαρτάται από τη ζωή του ήλιου. Ανεξάρτητα από το ρυθμό εκμετάλλευσής τους συνεχίζουν να είναι άμεσα διαθέσιμες (όπως η αιολική ενέργεια) ή αναπληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα (όπως η βιομάζα). Υπάρχουν όμως μόνο τρεις κύριες πηγές ενέργειας που είναι ανανεώσιμες: η ηλιακή, η γεωθερμία και η παλιρροϊκή. Όλες οι άλλες ανανεώσιμες πηγές προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη. Για το λόγο αυτό η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα, η κυματική και η θερμοκρασιακή διαφορά των ωκεανών θεωρούνται δευτερογενείς, ή έμμεσες μορφές ηλιακής ενέργειας [6].

Με την διεύρυνση των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο επιτυγχάνεται μείωση της ρύπανσης του ήδη αρκετά βεβαρημένου φυσικού περιβάλλοντος. Οι ΑΠΕ θεωρούνται η λύση στο επερχόμενο ενεργειακό “αδιέξοδο” που πρόκειται να βρεθεί αντιμέτωπος ο ενεργοβόρος ανθρώπινος πολιτισμός από την αναμενόμενη σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων μέσα στον επόμενο αιώνα [7]. Για αυτούς τους λόγους τα τελευταία χρόνια διεξάγεται ολοένα και περισσότερη έρευνα για την καλύτερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευσή των ΑΠΕ.

Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει είναι ότι οι ΑΠΕ δεν έχουν τη δυνατότητα ακόμα να αντικαταστήσουν πλήρως τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Σημαντικό ρόλο στην παραπάνω διαπίστωση είναι τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι η εξάρτηση από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται, γεγονός που καθιστά κάποιες μορφές ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική) ανίκανες στην παραγωγή ενέργειας τη στιγμή όπου υπάρχει ζήτηση

για κατανάλωση. Επίσης, έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας [8].

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω [9]:

- **Η ηλιακή ενέργεια**, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή,
- **Η αιολική ενέργεια**, η οποία χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια του ανέμου,
- **Η υδραυλική ενέργεια**, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW,
- **Η γεωθερμική ενέργεια**, η ενέργεια από το θερμικό δυναμικό της γης,
- **Η βιομάζα**, θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- **Η θάλασσα**, ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

Οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης των ΑΠΕ βρίσκονται σήμερα σε διάφορα επίπεδα ανάπτυξης. Άλλες βρίσκονται σε υψηλό επίπεδο ανάπτυξης, όπως π.χ. οι ανεμογεννήτριες, ενώ άλλες σε αρχικό, όπως π.χ. οι μηχανισμοί αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να κατανεμηθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες [10]:

- τεχνολογίες που παράγουν μηχανικό έργο, όπως στην περίπτωση της υδροηλεκτρικής ή της ενέργειας των κυμάτων,
- τεχνολογίες που παράγουν άμεσα ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση θερμοδυναμικών κύκλων, όπως στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου,

- τεχνολογίες που παράγουν θερμότητα, όπως π.χ. τα ηλιακά θερμικά συστήματα,
- και τεχνολογίες παραγωγής καυσίμων, όπως στην περίπτωση των βιοκαυσίμων.

Η αγορά ενέργειας είναι ένας από τους σημαντικότερους τομείς της παγκόσμιας οικονομίας και ο ρόλος που έχει τόσο σε οικονομικό, πολιτικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο είναι κυρίαρχος. Επομένως, αποτελεί ισχυρή εξουσία ο έλεγχος της παραγωγής ενέργειας.

Το 2012, το 41% της διάθεσης πρωτογενούς ενέργειας στον κόσμο, και το 54% της ενέργειας τελικής χρήσης καλύπτεται από το πετρέλαιο (τα ποσοστά αυτά το 1990 ήταν 45% και 50% και το 1960 ήταν 35% και 34% αντίστοιχα), το 25,5% καλύπτεται από τα στερεά καύσιμα, το 20% από φυσικό αέριο, το 9,5% από ΑΠΕ και το 3,5% από πυρηνική ενέργεια.

1.4 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

1.4.1 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η φυσική σύνδεση μιας γεννήτριας με το δίκτυο ορίζεται ως διασυνδεδεμένη. Αλλά είναι απαραίτητο ότι πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή στην ασφάλεια και στην ασφαλή λειτουργία του συστήματος και του ελέγχου της γεννήτριας έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη χρήση της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί.

Γενικά, η διείσδυση των γεννητριών που τροφοδοτούνται από τις ΑΠΕ είναι ουσιαστικά η ίδια με τις γεννήτριες με ορυκτά καύσιμα και βασίζεται στην ίδια μεθοδολογία. Ωστόσο, οι ΑΠΕ είναι πολύ συχνά μεταβλητές και γεωγραφικά διασκορπισμένες.

Μια γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να οριστεί ως αυτόνομη ή διασυνδεδεμένη με το δίκτυο. Μία αυτόνομη γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης με ή χωρίς άλλες γεννήτριες ή συσκευές αποθήκευσης. Από την άλλη πλευρά, σε ένα συνδεδεμένο με το δίκτυο

σύστημα, η γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας παρέχει ενέργεια σε ένα μεγάλο μέρος του δικτύου, το οποίο τροφοδοτείται επίσης από άλλες γεννήτριες. Εδώ, η ισχύς που παρέχεται από τη γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας είναι μόνο ένα μικρό μέρος της ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο σε σχέση με την ισχύ που παρέχεται από άλλες συνδεδεμένες γεννήτριες. Το σημείο σύνδεσης ονομάζεται σημείο κοινής σύζευξης (ΣΚΣ) [11].

1.4.2 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Οι μικρές γεννήτριες δεν μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα μεταφοράς λόγω του υψηλού κόστους των μετασχηματιστών ΥΤ και του εξοπλισμού των διακοπών.

Για αυτό το λόγο, οι μικρές γεννήτριες πρέπει να είναι συνδεδεμένες στο ΔΔ. Αυτός ο τύπος γεννητριών είναι γνωστός ως διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ) ή διανεμημένη παραγωγή.

Η ισχύς σε τέτοια συστήματα ισχύος μπορεί να ρέει από σημείο σε σημείο εντός του ΔΔ. Σαν αποτέλεσμα, μία τέτοια ασυνήθιστη ροή ισχύος μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετες προκλήσεις στην αποτελεσματική λειτουργία και προστασία του ΔΔ.

Λόγω της μείωσης των πόρων ορυκτών καυσίμων, της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης και της ρύπανσης του περιβάλλοντος, η νέα προσέγγιση για την παραγωγή τοπικής ισχύος σε επίπεδο τάσης διανομής είναι με τη χρήση μη συμβατικών/ΑΠΕ όπως το φυσικό αέριο, η αιολική ενέργεια, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά κύτταρα, το βιοαέριο, τα συστήματα συμπαραγωγής (τα οποία είναι συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ), οι κινητήρες Stirling, και οι Μικροτουρμπίνες).

Αυτές οι νέες πηγές ενέργειας συνδέονται (ή ενσωματώνονται) στο ΔΔ. Όπως προαναφέρθηκε, μια τέτοια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται ΔΠ και οι ενεργειακοί πόροι της είναι γνωστοί ως διεσπαρμένοι ενεργειακοί πόροι (ΔΕΠ). Επιπλέον, το δίκτυο διανομής γίνεται «ενεργό» με την διείσδυση της ΔΠ και επομένως αναφέρεται ως ενεργό δίκτυο διανομής (ΕΔΔ). Οι ιδιότητες της ΔΠ περιλαμβάνουν τα ακόλουθα [11]:

- Είναι μονάδες τάξης μεγέθους μέχρι 50 MW.

- Οι μονάδες ΔΠ ή πηγές ισχύος που είναι συνδεδεμένες στο ΔΔ έχουν τυπικά τάσεις από 240 V μέχρι και 34.5 kV.

1.4.3 ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (ΕΔΔ)

Στο παρελθόν, τα ΔΔ είχαν μονοκατευθυντική ροή της ισχύος, δηλαδή από το σταθμό παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές. Για αυτό το λόγο τα ΔΔ είχαν ρόλο παθητικό.

Σήμερα, τα δίκτυα διανομής καθίστανται ενεργά με την προσθήκη της ΔΠ, η οποία προκαλεί αμφίδρομη ροή ισχύος στα δίκτυα. Τα σημερινά ΔΔ άρχισαν να εμπλέκονται όχι μόνο με τη διαχείριση της ζήτησης, αλλά και με την διασύνδεση της ΔΠ.

Προκειμένου τα ενεργά δίκτυα διανομής (ΕΔΔ) να αποκτήσουν ευέλικτη και ευφυή λειτουργία και έλεγχο, πρέπει να μελετηθούν τα ακόλουθα ζητήματα [11]:

- Προστασία και έλεγχος που θα προσαρμόζονται ανάλογα με τις συνθήκες
- Προηγμένοι αισθητήρες και μετρήσεις
- Συσκευές διαχείρισης δικτύου
- Προσομοίωση δικτύου σε πραγματικό χρόνο
- Εξαγωγή δεδομένων με χρήση ευφυών μεθόδων
- Νέος και σύγχρονος σχεδιασμός συστημάτων μεταφοράς και διανομής

1.4.4 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ (MICROGRIDS)

Ένα μικροδίκτυο (ΜΔ) είναι ουσιαστικά ένα ΕΔΔ, το οποίο αποτελείται από ένα συνδυασμό μονάδων ΔΠ, φορτίων και μονάδων αποθήκευσης (όπως συσσωρευτές, αντλιοσταμειευτήρες κ.ά.) σε επίπεδο τάσεως διανομής [12].

Οι γεννήτριες ή πηγές ισχύος που χρησιμοποιούνται σε ένα ΜΔ είναι κατά κύριο λόγο ανανεώσιμες/μη συμβατικές πηγές ενέργειας (κυψέλες καυσίμου, μικροτουρμπίνες, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά). Οι περισσότερες πηγές ισχύος δεν έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν άμεσα με το δίκτυο ΧΤ λόγω των χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε αυτές τις μονάδες.

Συνήθως απαιτείται μία ηλεκτρονική διασύνδεση DC/AC ή AC/DC/AC έτσι ώστε να γίνει δυνατή η διοχέτευση της ισχύος στο δίκτυο ΧΤ. Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός ΜΔ. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, το ΜΔ ελέγχεται από έναν κεντρικό ελεγκτή (MicroGrid Central Controller, MGCC), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στον υποσταθμό υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ. Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για πολλές λειτουργίες (όπως πρόβλεψη φορτίου, διαχείριση της ζήτησης, οικονομικός προγραμματισμός των πηγών ισχύος κ.ά.) και είναι ο επικεφαλής του συστήματος ελέγχου. Σε ένα δεύτερο επίπεδο ελέγχου, ελεγκτές που είναι τοποθετημένοι στα φορτία ή σε ομάδα φορτίων (LC) αλλά και ελεγκτές τοποθετημένοι στις πηγές ισχύος (MC) ανταλλάσσουν πληροφορίες με τον κεντρικό ελεγκτή και ελέγχουν τις τοπικές συσκευές [13].

Ένα ΜΔ παρουσιάζει πολλές διαφορές από μία συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας. Μία σημαντική διαφορά είναι ότι η ισχύς παράγεται σε επίπεδο τάσεως διανομής και έτσι μπορεί να διοχετευθεί απευθείας στο σύστημα διανομής. Επίσης, τα ΜΔ συνήθως εγκαθίστανται πιο κοντά στις τοποθεσίες των πελατών, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά/θερμικά φορτία να μπορούν να εξυπηρετηθούν αποτελεσματικά με το κατάλληλο επίπεδο τάσης και συχνότητας και χωρίς να επηρεάζονται από τις απώλειες των γραμμών. Το θεμελιώδες πλεονέκτημα των ΜΔ για τους πελάτες είναι ότι πληρούν τις τοπικές ηλεκτρικές/θερμικές απαιτήσεις. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο σημείο του δικτύου, οι καταναλωτές μπορούν να λάβουν αδιάλειπτη ισχύ, μειωμένες απώλειες τροφοδοσίας και βελτιωμένη τοπική αξιοπιστία. Το βασικό πλεονέκτημα για το περιβάλλον είναι ότι μειώνουν τη ρύπανση του περιβάλλοντος και την υπερθέρμανση του πλανήτη με τη χρήση τεχνολογίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα [11].

1.5 ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ (SMART GRIDS)

Ουσιαστικά, το έξυπνο δίκτυο είναι ο εκσυγχρονισμός του δικτύου με την εγκατάσταση ευφυών ηλεκτρονικών συσκευών όπως είναι οι έξυπνοι μετρητές και ένα προηγμένης επικοινωνίας και απόκτησης δεδομένων λογισμικό με έλεγχο σε πραγματικό χρόνο που βελτιστοποιεί τη λειτουργία ολόκληρου του ηλεκτρικού

συστήματος [11]. Είναι εύλογο να πούμε ότι το έξυπνο δίκτυο είναι εξοπλισμένο με σημαντικό αριθμό συσκευών υπολογιστικής ευφυΐας (computer intelligence). Οι αποφάσεις που παίρνει το έξυπνο δίκτυο στοχεύουν στη βελτίωση των λειτουργιών, της συντήρησης και του σχεδιασμού, διασφαλίζοντας ότι κάθε στοιχείο του ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να «μιλάει» και να «ακούει». Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο της τεχνολογίας των έξυπνων δικτύων είναι η αυτοματοποίηση [14].

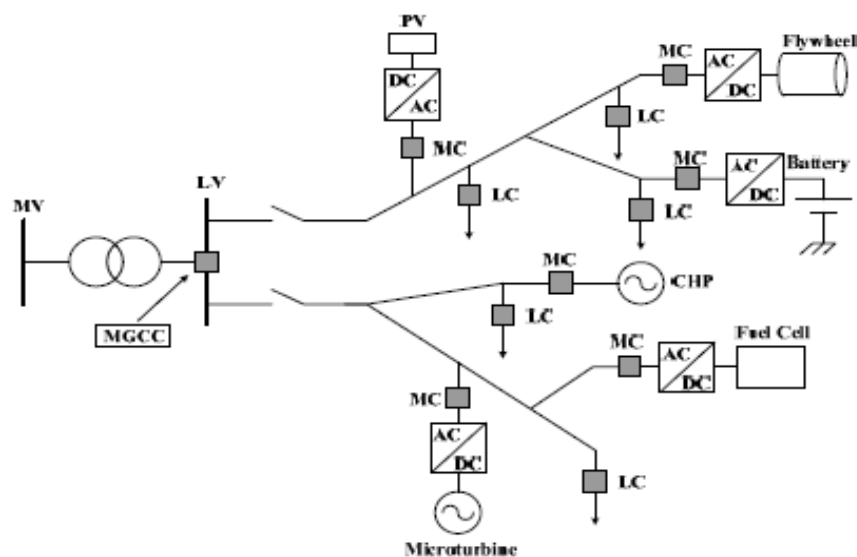
Το έξυπνο δίκτυο επιτρέπει τη δημιουργία νέων στρατηγικών διαχείρισης του δικτύου παρέχοντας την αποτελεσματική ενσωμάτωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής για την διαχείριση της ζήτησης και μονάδες αποθήκευσης της ενέργειας για εξισορρόπηση του φορτίου. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ, η μείωση των απωλειών του συστήματος και η αύξηση της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας και της ασφάλειας του εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι κάποια από τα πλεονεκτήματα αυτού του δικτύου. Το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο παρουσιάζει έλλειψη στην ικανότητα επικοινωνίας, ενώ μία έξυπνη υποδομή ηλεκτρικού δικτύου παρέχει αυξημένες δυνατότητες επικοινωνίας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3.

Σε ένα έξυπνο δίκτυο, οι πληροφορίες που ανακτώνται σε πραγματικό χρόνο αποτελούν το βασικό παράγοντα για την μεταφορά και διανομή της ενέργειας στους καταναλωτές. Ο αντίκτυπος των βλαβών του εξοπλισμού, των φυσικών καταστροφών αλλά και άλλων βλαβών που προκαλούν διαταραχές και διακοπές λειτουργίας στο δίκτυο είναι δυνατόν να αποφευχθούν σε αρκετά μεγάλο βαθμό μέσω της παρακολούθησης, σε πραγματικό χρόνο, της κατάστασης του συστήματος ισχύος, της διάγνωσης και της προστασίας [15].

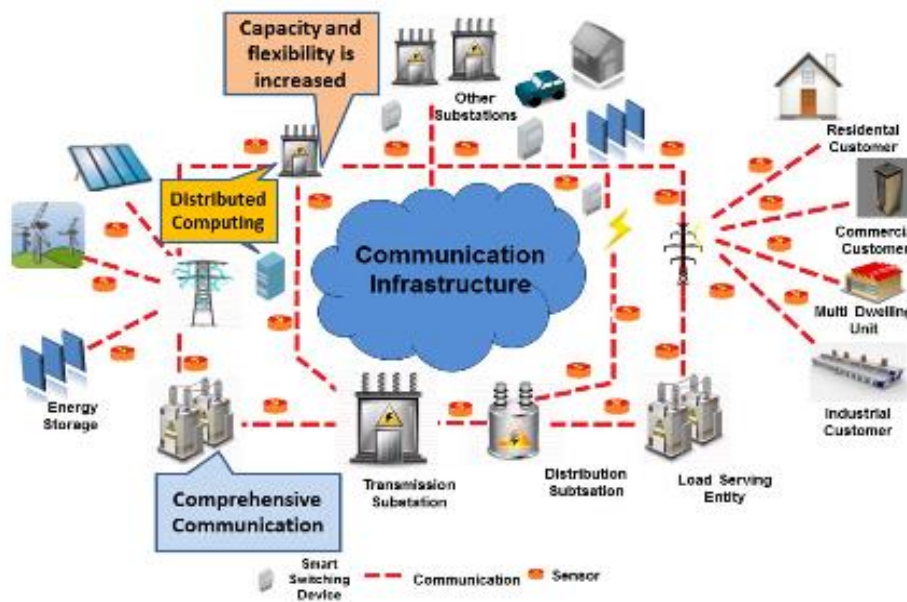
Ένα σύγχρονο έξυπνο δίκτυο έχει τις εξής δυνατότητες [16]:

- Βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας ισχύος
- Βελτίωση της ανθεκτικότητας στις διαταραχές του συστήματος διανομής
- Συγκέντρωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας
- Αυτοματοποίηση συντήρησης και λειτουργίας
- Παρουσίαση ευκαιριών για τη βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου

- Ενθάρρυνση της συμμετοχής των καταναλωτών στις διάφορες λειτουργίες του δικτύου και δυνατότητα σύνδεσης όλων των μονάδων διανεμημένης παραγωγής και διανεμημένης αποθήκευσης [17]
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του εξοπλισμού και της λειτουργίας του συστήματος
- Δυνατότητα εισαγωγής νέων προϊόντων , υπηρεσιών και αγαθών



Σχήμα 1.2 ΜΔ με πηγές ισχύος, φορτία και εξοπλισμό διαχείρισης και ελέγχου



Σχήμα 1.3 Η αρχιτεκτονική έξυπνου δικτύου αυξάνει την ικανότητα και την ευελιξία του δικτύου και παρέχει προηγμένη αίσθηση και έλεγχο μέσω σύγχρονων τεχνολογιών επικοινωνιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^οΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογίες και οι μη συμβατικές/ανανεώσιμες πηγές ισχύος που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1 δείχνουν την τάση των Διαχειριστών Δικτύων Διανομής για αλλαγή των υφιστάμενων τεχνολογιών του συστήματος διανομής. Τα νέα μέσα που έχουν αναπτυχθεί (αισθητήρες και υλικό ελέγχου) έχουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα διαχείρισης του ΔΔ, αφού καθίσταται ευκολότερη η αυτοματοποιημένη ανίχνευση και απομόνωση σφαλμάτων, η αυτοματοποιημένη αποκατάσταση βλαβών, ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της τάσης και της άεργου ισχύος κ.ά. Όλα τα παραπάνω συντελούν στην οικονομικότερη και πιο ευέλικτη λειτουργία των ΔΔ και για αυτό το λόγο αποτελούν ένα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης.

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του συστήματος διανομής έχει αυξηθεί σημαντικά. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του έχει ενισχύσει την πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος αλλά και το μέγεθος της περιοχής, του συστήματος διανομής, που επηρεάζεται από αυτό [18]. Επίσης, άλλο ένα σημαντικό θέμα που παρουσιάζεται στα ΔΔ είναι η μείωση των απωλειών ισχύος. Όλα τα παραπάνω συντελούν στην προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των ΔΔ χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου, κάτι που στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως Optimal Distribution Network Reconfiguration (ODNR) και είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αυτοματοποίηση και το προγραμματισμό του δικτύου [19].

Μπορούμε να ορίσουμε τη λειτουργία ενός δικτύου διανομής ως βέλτιστη όταν είναι σε θέση να εξυπηρετεί βέλτιστα τους καταναλωτές και να τροφοδοτεί το φορτίο με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία, οι

παράγοντες που την καθορίζουν είναι οι απώλειες, η συνέχεια (αξιοπιστία) τροφοδότησης και η σταθερότητα της τάσης.

Η διαμόρφωση του δικτύου έχει ουσιαστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, τα δίκτυα διανομής ΜΤ που βρίσκονται σε περιοχές αγροτικές είναι συνήθως εναέρια. Σε αυτά τα δίκτυα 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. Αντιθέτως, όταν αναφερόμαστε σε ένα αστικό δίκτυο με πληθώρα διασυνδέσεων, τότε υπάρχει ένα πλήθος πιθανών σχημάτων επαναδιαμόρφωσης και η επιλογή της βέλτιστης συνδεσμολογίας αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, ενώ είναι περιορισμένες οι δυνατότητες επιλογής των προστασιών και των μέσων ρύθμισης της τάσης. Καταλαβαίνουμε λοιπόν, ότι ο καθορισμός της βέλτιστης λειτουργίας ενός ΔΔ αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητάς του και της μεταβαλλόμενης φόρτισής του [17].

2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από βασικά δομικά στοιχεία, καθένα από αυτά έχει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος έτσι ώστε να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές με αποδοτικό τρόπο. Κάθε μονάδα εξοπλισμού, είναι αναγκαίο να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά σε συνεργασία με το υπόλοιπο σύστημα ανεξάρτητα με τις συνθήκες που επικρατούν.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας:

- **Υποσταθμοί Μεταφοράς:**

Τα ΔΔ ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς ΥΤ/ΜΤ. Οι υποσταθμοί αυτοί έχουν εγκαταστημένο εξοπλισμό προστασίας και χειρισμού του δικτύου.

Συγκεκριμένα περιλαμβάνουν αποζεύκτες, αυτόματους διακόπτες, εν σειρά ή/και εν παραλλήλω χωρητικότητες, γειώσεις και λοιπές συσκευές [11].

- **Γραμμές Μεταφοράς και Διανομής:**

Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής αποτελούνται από ηλεκτρικούς αγωγούς κατάλληλα προστατευόμενους με μόνωση (πύργοι μεταφοράς, αλυσίδες μονωτήρων, μονωτικά τυλίγματα) από τις διαρροές τάσης και τις ανεπιθύμητες γειώσεις. Αυτοί οι αγωγοί είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά της ενέργειας από ένα σημείο σε άλλο. Οι γραμμές μεταφοράς είναι πάντα τριφασικές (τρεις ξεχωριστοί αγωγοί για το εναλλασσόμενο ρεύμα) και σπανίως έχουν και τέταρτο ουδέτερο (αφόρτιστο) αγωγό. Τα κύρια μέρη ενός συστήματος διανομής κατασκευάζονται εξ ορισμού ως τριφασικές γραμμές. Οι γραμμές διανομής στην ΜΤ είναι πάντοτε τριφασικές, ενώ οι γραμμές ΧΤ είναι συνήθως τριφασικές, αλλά υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές. Ανεξάρτητα από τον τύπο του ή την χωρητικότητά του, κάθε ηλεκτρικός αγωγός έχει μια αντίδραση (αντίσταση στη ροή ρεύματος διαμέσου αυτού) που προκαλεί πτώση τάσης και ηλεκτρικές απώλειες όποτε μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια. Πτώση τάσης είναι η μείωση της τάσης ανάμεσα στα σημεία αναχώρησης και άφιξης της ενεργειακής ροής. Οι απώλειες συνιστούν μείωση της καθαρής ενέργειας και είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος [20].

- **Υποσταθμοί Διανομής:**

Το ΔΔ καταλήγει στους υποσταθμούς διανομής, οι οποίοι υποβιβάζουν το επίπεδο τάσης έτσι ώστε να γίνει τροφοδότηση των καταναλωτών ΧΤ με ηλεκτρική ενέργεια. Εξοπλίζονται από μετασχηματιστές διαφόρων τυποποιημένων μεγεθών, από εξοπλισμό ρύθμισης τάσης, αλλά και με μέσα προστασίας όπως είναι οι διακοπτικοί μηχανισμοί [11].

- **Μετασχηματιστές:**

Οι μετασχηματιστές (Μ/Σ) αποτελούν βασικό κομμάτι του εναλλασσόμενου συστήματος ενέργειας. Πραγματοποιούν αλλαγές στα επίπεδα της τάσης και του ρεύματος έτσι ώστε να διατηρείται (εκτός από ένα μικρό μέρος των ηλεκτρικών απωλειών) η ίδια συνολική ροή ισχύος. Οι Μ/Σ είναι διαθέσιμοι σε ποικίλα μεγέθη, τύπους και χωρητικότητες. Η χρήση τους στα ΣΗΕ αποτελείται από τρεις κύριες περιοχές: στα εργοστάσια παραγωγής όπου πραγματοποιούν ανύψωση της τάσης σε Υ.Τ (20 kV/150 kV ή 20 kV/ 400 kV), στη μεταφορά της ενέργειας (150 kV/20 kV ή 400 kV/ 20 kV) και για τη διανομή της ενέργειας (20 kV/400V). [20]

- **Διακόπτες:**

Η ανάγκη για απομόνωση κάποιων τμημάτων του ΔΔ για λόγους ασφαλείας, συντήρησης ή επισκευής οδήγησε στην ανάπτυξη ορισμένων ειδών διακοπών. Περιστασιακά, είναι επιθυμητό να είναι δυνατή η μεταβολή της σύνδεσης των τμημάτων μίας γραμμής εντός ενός συστήματος παροχής ισχύος, ιδιαίτερα στα συστήματα διανομής για τη διατήρηση της παροχής ισχύος στο δίκτυο. Οι διακόπτες τοποθετούνται σε στρατηγικές θέσεις έτσι ώστε η σύνδεση μεταξύ δύο τμημάτων να μπορεί να ανοίξει ή να κλείσει. Οι διακόπτες σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι ανοιχτοί ή κλειστοί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας [20]. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τη χρήση τους διακρίνονται σε:

1. **Αποζεύκτες (A/Z – isolators or disconnectors):**

ονομάζονται οι συσκευές που απομονώνουν από την παροχή ένα κύκλωμα που έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης λειτουργίας ή διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό οφείλεται κυρίως στα χωρικά ρεύματα των μονωτήρων, των κόμβων και των μετασχηματιστών [21].

2. **Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ – Switches):**

ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος καθώς και να αποκαθιστούν αλλά όχι και να διακόπτουν περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων [21]. Στα δίκτυα διανομής διακρίνονται

σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι οι διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches), που συνδέουν δύο τμήματα γραμμών της ίδιας γραμμής τροφοδοσίας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους διακόπτες (αποζεύκτες ανοικτοί υπό φορτίο, tie switches), που είναι ανοικτοί κατά την κανονική λειτουργία του δικτύου. Κλείνοντας τους δημιουργείται ένας βρόχος, με τη σύνδεση δύο διαφορετικών γραμμών τροφοδοσίας. Οι παραπάνω κατηγορίες διακοπών συμβάλουν στην επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής και στα σύγχρονα δίκτυα δίνεται η δυνατότητα τηλεχειριζόμενων διακοπών για τη μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η ανάγκη για μεταβολή της τοπολογίας μπορεί να υπάρξει αν παρουσιαστεί κάποιο σφάλμα σε κάποια γραμμή αλλά και αν παραβιαστούν οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου (όπως επίπεδα τάσης ή ρεύματος των γραμμών).

3. Διακόπτες Ισχύος (βραχυκυκλώσεως, Δ/Ι – Circuit Breakers):

είναι οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες του κυκλώματος αλλά κυρίως υπό ορισμένες μη κανονικές συνθήκες, όπως είναι η περίπτωση βραχυκυκλώματος [21].

- **Μετασηματιστές με ΣΑΤΥΦ:**

Οι μετασηματιστές υποβιβασμού ΥΤ σε ΜΤ είναι συνήθως εξοπλισμένοι με συστήματα που δίνουν τη δυνατότητα μεταβολής της τάσης εξόδου τους υπό φορτίο (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο – ΣΑΤΥΦ). Με τη χρήση πολλαπλών λήψεων στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασηματιστή και κινητών επαφών στο δευτερεύον καθίσταται εφικτή η αλλαγή του λόγου μετασηματισμού των τυλιγμάτων τους χωρίς διακοπή της ροής ισχύος [2]. Η μεταβολή του λόγου μετασηματισμού δεν είναι συνεχής αλλά με βήματα, κατά ένα ποσοστό του αρχικού λόγου ανά βήμα [17]. Συνήθως, η μέγιστη δυνατή ποσοστιαία αύξηση του λόγου μετασηματισμού είναι ίση με τη μέγιστη δυνατή ποσοστιαία μείωσή του. Με τη χρήση των μετασηματιστών

με ΣΑΤΥΦ δύναται να προκληθεί αύξηση ή μείωση του επιπέδου της τάσης στους ζυγούς του δικτύου διανομής που βρίσκονται στους υποσταθμούς υποβιβασμού, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τις τιμές τάσεων σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του. Επομένως, σε περιπτώσεις παραβίασης των περιορισμών τάσης σε τμήμα του πρωτεύοντος δικτύου, με μια ή περισσότερες αλλαγές λήψεων στον μετασχηματιστή της κατάλληλης κύριας γραμμής τροφοδοσίας είναι δυνατή η αποκατάσταση της λειτουργίας του εντός των επιθυμητών ορίων.

- **Χωρητικές αντισταθμίσεις:**

Οι εγκατεστημένες συστοιχίες πυκνωτών που διαθέτουν οι υποσταθμοί μεταφοράς και οι Μ/Σ διανομής είναι σε θέση να ρυθμίζουν την τάση αλλά και να διορθώνουν το συντελεστή ισχύος των γραμμών του δικτύου. Οι τρόποι σύνδεσης των συστοιχιών είναι σε σειρά ή παράλληλα με τις γραμμές. Οι πυκνωτές σειράς (series capacitors), δηλαδή οι πυκνωτές που συνδέονται σε σειρά με γραμμές, έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολύ περιορισμένο βαθμό σε κυκλώματα διανομής εξαιτίας ενός πιο εξειδικευμένου τύπου συσκευής με περιορισμένο εύρος εφαρμογής [11]. Αντίθετα, ευρεία χρήση συναντούν οι πυκνωτές που συνδέονται παράλληλα με τις γραμμές και ονομάζονται εγκάρσιοι πυκνωτές (shunt capacitors) 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. Ιδιαίτερα χρήσιμες είναι οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις με πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της χωρητικότητάς τους όσο το σύστημα βρίσκεται υπό φορτίο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ρύθμιση της επίδρασής τους στο δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες κάλυψης άεργου ισχύος ή προσαρμογής επιπέδων τάσεως που παρουσιάζονται κάθε στιγμή. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής για τη βελτίωση της τάσεως έχει γενικότερα σαν αποτέλεσμα και τη βελτίωση της οικονομίας του συστήματος. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές αντισταθμίσεως είναι σύγχρονοι και στατοί [2].

2.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι τρόποι σχεδιασμού ενός συστήματος διανομής που έχουν επικρατήσει είναι το ακτινικό, το βροχοειδές και το δικτυωτό ΔΔ (τοπολογία primary network). Οι διαφορές μεταξύ αυτών των τοπολογιών είναι στο πως τα συστήματα τροφοδοσίας διασυνδέονται γύρω από έναν υποσταθμό.

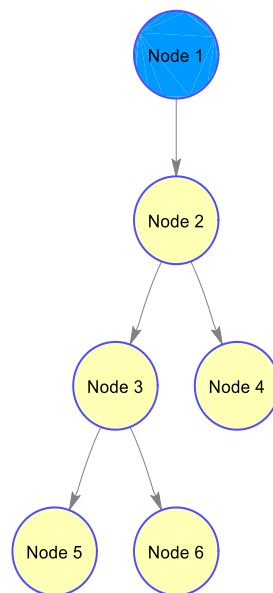
2.3.1 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Πάνω από το 80% των ΔΔ παγκοσμίως κατασκευάζονται με ακτινική δομή, στην οποία υπάρχει μόνο μία διαδρομή ανάμεσα σε κάθε καταναλωτή και στον υποσταθμό. Τα ακτινικά ΔΔ αποτελούν την οικονομικότερη λύση από τους άλλους τύπους ΔΔ και επίσης είναι απλούστερα στην ανάλυση και στην λειτουργία τους [20]. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η ύπαρξη ενός μοναδικού μονοπατιού ανάμεσα σε κάθε καταναλωτή και στον υποσταθμό, δημιουργώντας έτσι ένα δενδροειδές δίκτυο με απολήξεις τους Μ/Σ διανομής. Η δενδροειδής δομή του ΔΔ περιλαμβάνει τον κορμό του δικτύου, που κατασκευάζεται από αγωγούς μεγάλης διατομής και τις διακλαδώσεις, που έχουν αγωγούς μικρότερης διατομής από ότι ο κορμός. Στις διακλαδώσεις συνδέονται συνήθως οι μετασχηματιστές μέσης τάσης / χαμηλής τάσης (ΜΤ/ΧΤ). Σε αυτή τη δομή συχνά υπάρχουν και βρόχοι (loops, meshes) αλλά τα δίκτυα λειτουργούν σε ακτινική διαμόρφωση με κάποιους ανοικτούς διακόπτες, για να επιτρέπεται η ανίχνευση βλάβης και η απομόνωση τμημάτων σε περίπτωση σφάλματος. Η κάθε γραμμή ενός τέτοιου δικτύου τροφοδοτείται μόνο από το ένα άκρο. Η κύρια γραμμής διανομής, δηλαδή ο κορμός, τροφοδοτείται στην αρχή της από το μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ.

Στην παρούσα εργασία το ακτινικό ΔΔ θα απεικονίζεται με την χρήση κατευθυνόμενου γράφου, όπου οι κόμβοι είναι τα σημεία σύνδεσης των φορτίων (ζυγοί) και οι ακμές είναι τα τμήματα των γραμμών μεταξύ δύο κόμβων. Ουσιαστικά το ακτινικό δίκτυο είναι ισοδύναμο με ένα δέντρο (αν δεν ήταν κατευθυνόμενος ο γράφος). Η ροή ισχύος εκφράζεται από την κατεύθυνση των βελών (Σχήμα 2.1).

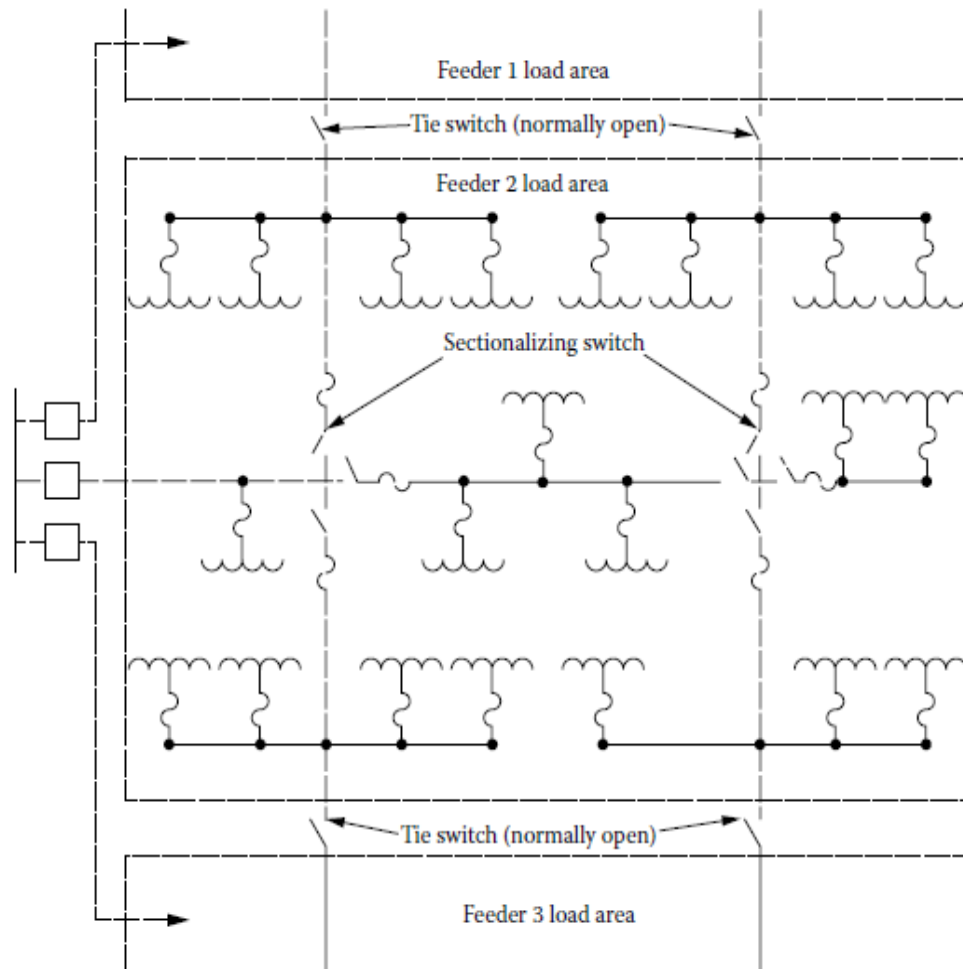
Η αξιοπιστία τους για συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα χαμηλή και ο λόγος είναι ότι η εμφάνιση σφάλματος σε οποιαδήποτε τοποθεσία

προκαλεί διακοπή της παροχής ενέργειας στους καταναλωτές που βρίσκονται κατάντι της περιοχής του σφάλματος [11]. Βέβαια, το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ολικά ή εν μέρει με την ύπαρξη των αποζευκτών που είναι ανοικτοί υπό φορτίο (tie switches), οι οποίοι συνδέουν μεταξύ τους διάφορα σημεία κατά μήκος των κύριων γραμμών διανομής. Αφού λοιπόν απομονωθεί η περιοχή του σφάλματος με την βοήθεια των κατάλληλων διακοπών απομόνωσης (sectionalizing switches), το υπόλοιπο μέρος του δικτύου θα συνδεθεί κλείνοντας τους κατάλληλους αποζεύκτες σε κάποια γραμμή διανομής. Το Σχήμα 2.2 απεικονίζει ένα ακτινικό ΔΔ με διακόπτη που είναι ανοικτός κατά την αρχική τοπολογία του δικτύου.



Σχήμα 2.1: Ακτινικό ΔΔ

(Ο κόμβος 1 είναι το σύστημα τροφοδοσίας του συστήματος)



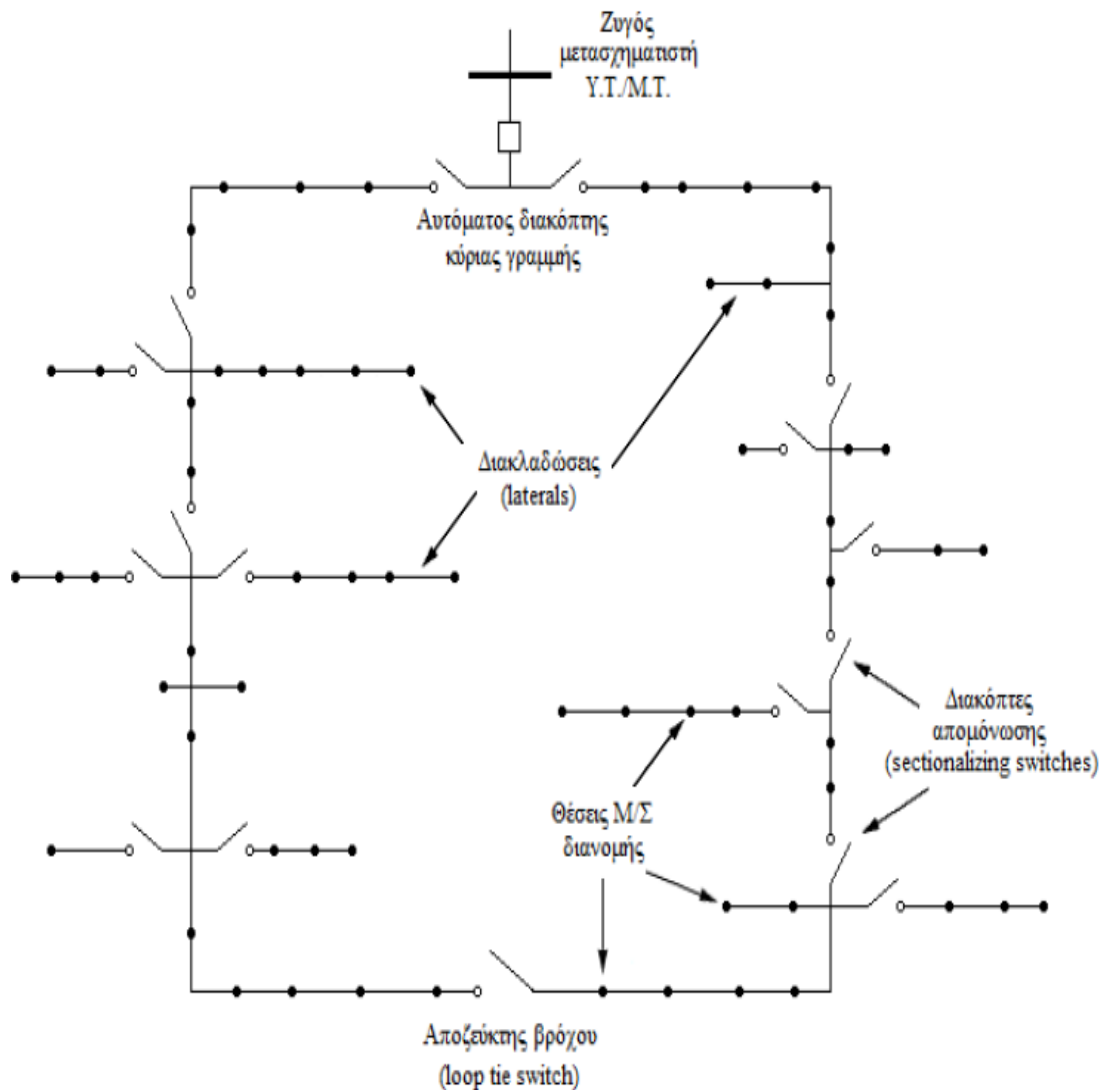
Σχήμα 2.2: Ακτινικό ΔΔ με διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches) και αποζεύκτες ανοικτούς υπό φορτίο (tie switches)

2.3.2 ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει αυτή η τοπολογία του δικτύου έναντι της ακτινικής είναι η ύπαρξη δύο μονοπατιών, με την ύπαρξη ενός αποζεύκτη βρόχου (loop tie switch) ο οποίος μένει ανοικτός σε κανονική λειτουργία, ανάμεσα στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και σε κάθε καταναλωτή. Με την σωστή κατασκευή αλλά και προστασία, τα βροχοειδή δίκτυα μπορούν να προσφέρουν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας στους καταναλωτές. Στο Σχήμα 2.3 εμφανίζεται ένα βροχοειδές σύστημα διανομής.

Το μέγεθος του αγωγού τροφοδοσίας, συνήθως, είναι ίδιο σε όλο τον βρόχο και επιλέγεται έτσι ώστε να είναι ικανό να εξυπηρετήσει τα δικά του φορτία συν τα φορτία του άλλου μισού του βρόχου. Με αυτόν τον τρόπο, σε περίπτωση σφάλματος ενός τμήματος της κύριας γραμμής, είναι δυνατή η εξυπηρέτηση μεγάλου μέρους των φορτίων που επηρεάστηκαν από το σφάλμα [11].

Γενικά, τα βροχοειδή ΔΔ έχουν μεγαλύτερο κόστος και είναι πιο περίπλοκα στην ανάλυση και στην λειτουργία τους από τα ακτινικά [20].

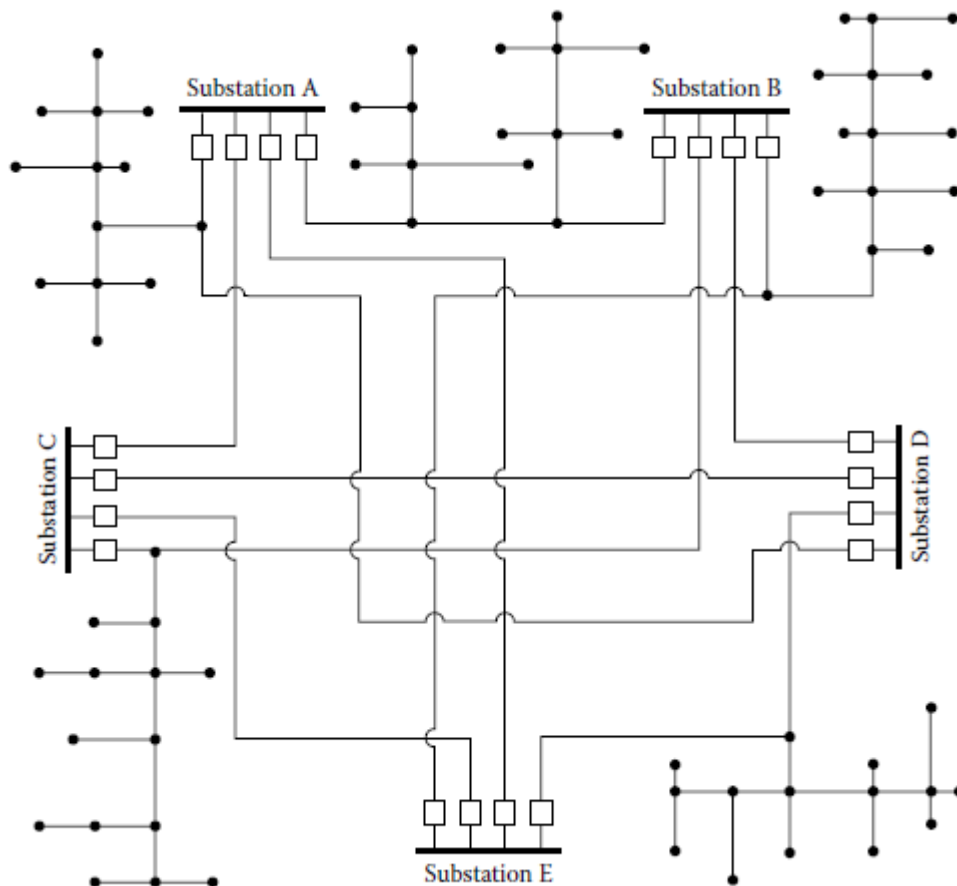


Σχήμα 2.3: Βροχοειδές ΔΔ

2.3.3 ΔΙΚΤΥΩΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ PRIMARY NETWORK)

Σε αυτήν την τοπολογία, το δίκτυο είναι ένα σύστημα στο οποίο παρέχεται ενέργεια από ένα αριθμό υποσταθμών. Εδώ οι κύριες γραμμές διανομής τροφοδοτούνται από δύο υποσταθμούς, ένα σε κάθε άκρο τους, και από αυτές ξεκινούν οι ακτινικές γραμμές διανομής (radial feeders), οι οποίες εξυπηρετούν τα φορτία του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

Τα δίκτυα αυτής της μορφής μπορούν να εξυπηρετήσουν φορτία από πολλές κατευθύνσεις. Σε γενικές γραμμές, οι απώλειές τους είναι χαμηλότερες από αυτές σε αντίστοιχου μεγέθους ακτινικά ή βροχοειδή δίκτυα και παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στο σχεδιασμό και το χειρισμό.



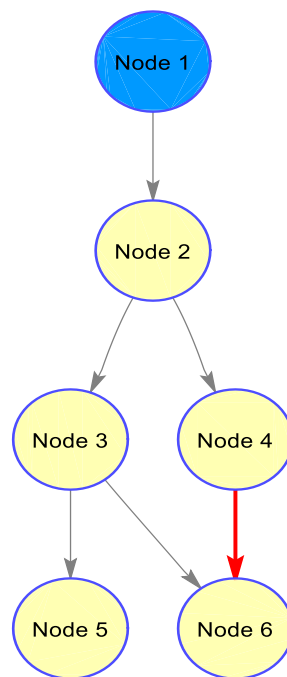
Σχήμα 2.4: Τοπολογία Primary Network

2.4 ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος διανομής είναι η συνέχεια τροφοδότησης και η αξιοπιστία. Επομένως, εάν αυτά τα δύο στοιχεία εμφανίσουν διαταραχές από την κανονική τους λειτουργία (ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου) τότε το σύστημα είναι πιθανόν να οδηγηθεί σε οριακές συνθήκες, όπου μπορεί να είναι είτε κατάσταση προειδοποίησης είτε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Οι συνέπειες των παραπάνω είναι ικανές να οδηγήσουν σε μεγάλες απώλειες όσον αφορά τον οικονομικό αντίκτυπο που θα έχουν στον διαχειριστή αλλά και την ικανοποίηση των πελατών. Αυτός λοιπόν είναι ο τομέας στον οποίο διεξάγονται αρκετές έρευνες σε πραγματικό χρόνο και οι μελλοντικές καταστάσεις δεν μπορούν ακόμα να προβλεφθούν. Επομένως, η εμφάνιση σφαλμάτων στα ΔΔ είναι ο λόγος για τον οποίο επηρεάζεται η αποδοτικότητα του συστήματος διανομής και για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι επιτακτική ανάγκη η διαδικασία της αποκατάστασης, η οποία συμβάλει στη διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος μετά από την εμφάνιση σφάλματος. Ο κύριος στόχος της αποκατάστασης του συστήματος είναι να αποκατασταθούν όσο είναι δυνατόν περισσότερα από τα φορτία που επηρεάζονται από το σφάλμα, εξετάζοντας τη διαθέσιμη ισχύ χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί του συστήματος.

Η αποκατάσταση λειτουργίας των δικτύων διανομής πραγματοποιείται αλλάζοντας κατάσταση στους διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches) και τους ανοικτούς υπό φορτίο αποζεύκτες (tie switches). Η εμφάνιση ενός σφάλματος σε κάποιο στοιχείο του συστήματος ανιχνεύεται από τα διάφορα εποπτικά μέσα του συστήματος και στη συνέχεια μέσω των διακοπών απομόνωσης, απομονώνεται το στοιχείο αυτό αλλά και κομμάτι του γειτονικού του δικτύου λόγω της ακτινικής δομής. Στη συνέχεια, γίνεται αναζήτηση της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης με το κλείσιμο των αποζευκτών που είναι ανοικτοί υπό φορτίο προκειμένου να δημιουργηθεί μία νέα διαδρομή ισχύος που θα μπορέσει να ικανοποιήσει τα φορτία τα οποία επηρεάστηκαν από το σφάλμα με την προϋπόθεση η ακτινική τοπολογία, όπως και άλλοι λειτουργικοί περιορισμοί να μην παραβιαστούν. Όπως φαίνεται, η λύση η οποία αναζητείται σε αυτή την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ δίνεται από μία

σειρά εναλλαγών καταστάσεων των διακοπών. Στο Σχήμα 2.5(α) φαίνεται η αρχική τοπολογία ενός ΔΔ 6 κόμβων με μία γραμμή να διαθέτει αποζεύκτη ανοικτό υπό φορτίο (κόκκινο χρώμα), ο οποίος είναι ανοικτός κατά την κανονική λειτουργία (λειτουργία πριν την εμφάνιση σφάλματος) και στο Σχήμα 2.5(β) απεικονίζεται η τοπολογία του δικτύου μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή που ενώνει τους κόμβους 3 και 6. Ο ανοικτός υπο φορτίο αποζεύκτης έκλεισε (γραμμή με πράσινο χρώμα) έτσι ώστε να μπορέσει να ικανοποιηθεί η ακτινική δομή του ΔΔ και να εξυπηρετηθεί το φορτίο που απομονώθηκε λόγω του σφάλματος.

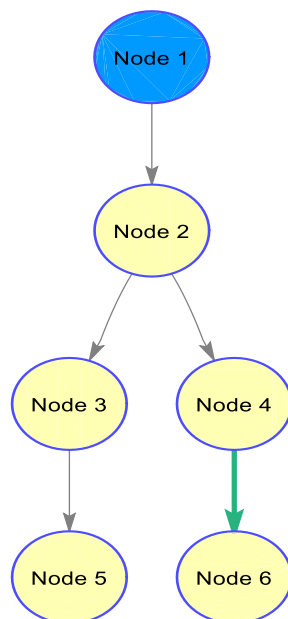


Σχήμα 2.5 (α): Αρχική τοπολογία δικτύου 6 κόμβων

(Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η γραμμή που διαθέτει το tie-switch και είναι ανοικτό)

Όσον αφορά τα ΕΔΔ, η ροή της ισχύος δεν είναι πλέον μονοκατευθυντική μετά από την σύνδεση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο. Αφού η λειτουργία, η ροή ισχύος αλλά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ΕΔΔ εμφανίζουν αλλαγές, είναι επίσης αναγκαία και η αλλαγή της διαδικασίας της

αποκατάστασης της λειτουργίας τους. Η παραδοσιακή μέθοδος αποκατάστασης θα είχε ως αποτέλεσμα την αποσύνδεση όλων των ΜΔΠ έτσι ώστε να γίνει εφικτή η προστασία της ασφάλειας του δικτύου, κάτι που παράλληλα επηρεάζει την τροφοδοσία ισχύος. Ωστόσο, η ικανότητα των ΕΔΔ για παροχή ελέγχου διαφόρων διεσπαρμένων πηγών ενέργειας (ΔΠ, ελεγχόμενα φορτία, μέσα αποθήκευσης, διαχείριση ζήτησης, κ.ά.) και η αποτελεσματική σύνδεση της παραγωγής με τις ανάγκες των καταναλωτών μέσω του ενεργού ελέγχου και της ενεργής διαχείρισης, δίνει τη δυνατότητα για άμεση και αποτελεσματική αποκατάσταση της λειτουργίας των ΕΔΔ μετά από την εμφάνιση ενός ή και περισσότερων σφαλμάτων. Έτσι, οι αλλαγές που πραγματοποιούνται στις καταστάσεις των διακοπών απομόνωσης και των ανοικτών υπό φορτίο αποζευκτών έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της τοπολογικής θέσης των ΜΔΠ στο ΔΔ, με αποτέλεσμα την αλλαγή του εύρους του δικτύου που χρειάζεται να τροφοδοτήσουν και την αποφυγή της νησιδοποίησης [22]. Σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρουν τα ΕΔΔ είναι η δυνατότητα της παραμονής των ΜΔΠ κατά την αποκατάσταση της λειτουργίας τους, κάτι που συντελεί στην βελτίωση της αξιοπιστίας λειτουργίας και της ποιότητας του ΔΔ.



Σχήμα 2.5 (β): Επαναδιαμόρφωση του δικτύου των 6 κόμβων μετά από σφάλμα στην γραμμή που ενώνει τους κόμβους 3 και 6 (Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η γραμμή με το κλειστό tie switch)

2.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ BLACK START

Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα σύγχρονα δίκτυα έχουν πλέον ενεργό ρόλο και διαθέτουν μία πληθώρα από σύγχρονα μέσα προστασίας και ελέγχου. Αυτά τα συστήματα έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να παρέχουν ένα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και να μην παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου. Παρ' όλα αυτά, οι διακοπές λειτουργίας σε κομμάτια του δικτύου ή και σε ολόκληρο το δίκτυο συνεχίζουν να εμφανίζονται. Οι περισσότερες διακοπές σημειώνονται σε μία μερίδα του συστήματος και έτσι, με τη βοήθεια των διακοπών που διαθέτουν τα δίκτυα, η περιοχή που απομονώθηκε λόγω του σφάλματος μπορεί να εξυπηρετηθεί από γειτονικό κομμάτι του δικτύου.

Όμως, η παραπάνω διαδικασία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περίπτωση ολικής διακοπής (blackout). Σε αυτές τις καταστάσεις, η αποκατάσταση του δικτύου πρέπει να ξεκινήσει από μονάδες παραγωγής, οι οποίες έχουν την δυνατότητα εκκίνησης χωρίς τη χρήση βοηθητικών μέσων (black-start units) και αποτελούν τον πυρήνα για την εκκίνηση της αποκατάστασης. Η διαδικασία της αποκατάστασης έχει ως αφετηρία τις μεμονωμένες μονάδες παραγωγής και συνεχίζει προς την εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων του συστήματος. Φυσικά, για να επιταχυνθεί η διαδικασία, είναι αναγκαία η ύπαρξη αρκετών τέτοιων μονάδων με ικανότητα αυτόματης εκκίνησης, οι οποίες στην συνέχεια θα μπορέσουν να συγχρονιστούν μεταξύ τους έτσι ώστε να αποκαταστήσουν όλο το δίκτυο.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις κατηγορίες των μονάδων με δυνατότητα αυτόματης εκκίνησης [23]:

- **Υδροηλεκτρικές μονάδες.**

Αυτές οι μονάδες μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να έχουν τη δυνατότητα αυτόματης εκκίνησης και να εμφανίζουν αρκετά γρήγορη απόκριση.

- **Γεννήτριες Ντίζελ.**

Οι γεννήτριες αυτές χρειάζονται μόνο την ισχύ μπαταρίας και είναι ικανές να πραγματοποιήσουν εκκίνηση αρκετά γρήγορα. Το μέγεθος τους είναι μικρό

και η χρήση τους περιορίζεται στη παροχή ισχύος για την εκκίνηση μεγαλύτερων μονάδων.

- **Αεριοστρόβιλοι αεροπορικού τύπου (Aeroderivative gas turbine).**

Αυτός ο τύπος μονάδας απαιτεί τυπικά μόνο την ισχύ μπαταρίας για να ξεκινήσει. Συχνά η εκκίνηση είναι μια τηλεχειριζόμενη λειτουργία. Αυτές οι μονάδες μπορούν να εξυπηρετήσουν γρήγορα ένα φορτίο.

- **Μεγάλες μονάδες αεριοστρόβιλων.**

Αυτές οι μονάδες δεν είναι από μόνες τους ικανές για εκκίνηση, αλλά σε συνδυασμό με μία γεννήτρια ντίζελ υλοποιούν αυτήν την δυνατότητα. Οι πετρελαιογεννήτριες ξεκινούν και χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση των βοηθητικών ζυγών της εγκατάστασης και για την εκκίνηση είτε του αεριοστρόβιλου είτε του ατμοστρόβιλου. Ένας αεριοστρόβιλος είναι γενικά ταχύτερος για να βρεθεί ξανά σε λειτουργία. Βέβαια, ο χρόνος επανεκκίνησης είναι πάντα συνάρτηση του χρόνου παραμονής της μονάδας εκτός λειτουργίας.

2.4.1.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η αρχιτεκτονική ενός ΜΔ, όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 1, αποτελείται από ένα δίκτυο ΧΤ, διάφορες ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες μικρές ΜΔΠ, φορτία, συσκευές αποθήκευσης και ένα σχήμα ιεραρχικής διαχείρισης και ελέγχου που υποστηρίζεται από ένα σύστημα επικοινωνίας.

Εάν συμβεί μία γενική ή τοπική διακοπή ενέργειας τότε οι τοπικές μονάδες παραγωγής που υπάρχουν στο δίκτυο ΧΤ μπορούν να αξιοποιηθούν έτσι ώστε να μειώσουν σημαντικά τον χρόνο μη τροφοδότησης των πελατών: α) παρέχοντας μία αρκετά γρήγορη αποκατάσταση του δικτύου ΧΤ χρησιμοποιώντας τις μονάδες με δυνατότητα black start και β) επιτρέποντας την νησιδοποιημένη λειτουργία των ΜΔ έτσι ώστε να τροφοδοτούν τους τοπικούς καταναλωτές μέχρι να αποκατασταθεί το δίκτυο ΜΤ.

Για την επιτυχή διαδικασία του black start σε ένα ΜΔ, είναι αναγκαία μία σειρά δράσεων ελέγχου, η οποία καθορίζει τους κανόνες και τις συνθήκες που πρέπει να

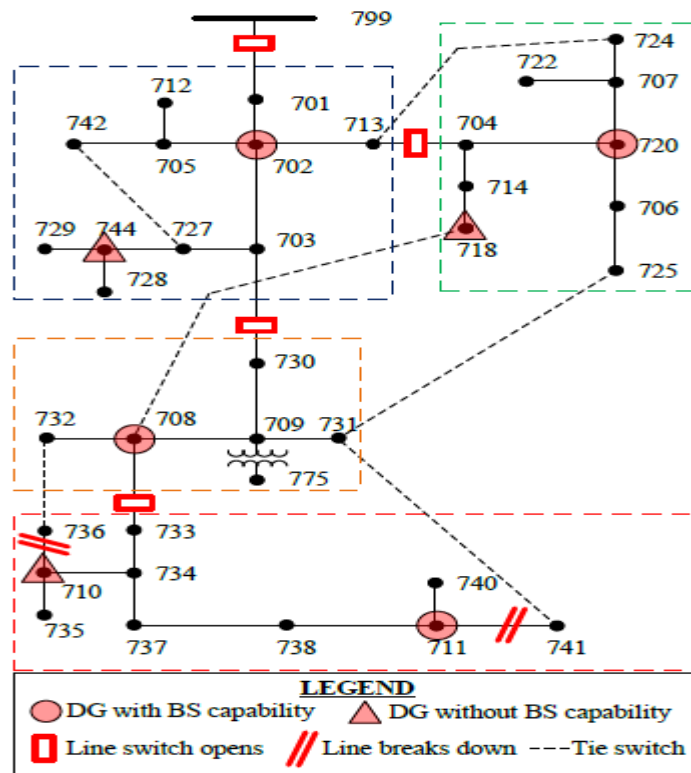
ελεγχθούν κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης. Αυτοί οι κανόνες είναι ενσωματωμένοι στο λογισμικό του κεντρικού ελεγκτή (MGCC).

Φυσικά, για να υλοποιηθεί η διαδικασία είναι απαραίτητη η παρουσία μονάδων παραγωγής με δυνατότητα αυτόματης εκκίνησης ώστε να τροφοδοτήσει τα βοηθητικά συστήματα ελέγχου και να ξεκινήσει η παραγωγή. Ωστόσο, για να υλοποιηθούν οι λειτουργίες του black start σε ένα ΜΔ πρέπει να είναι διαθέσιμες οι επόμενες δυνατότητες: 1) η αμφίδρομη επικοινωνία ανάμεσα στον κεντρικό ελεγκτή και στους ελεγκτές που διαθέτουν οι μονάδες παραγωγής και τα φορτία (MC, LC), 2) η συχνή ανανέωση πληροφοριών έτσι ώστε να γίνεται ενημέρωση για την κατάσταση των φορτίων και της παραγωγής πριν την εμφάνιση σφάλματος, 3) η αυτόματη αποσύνδεση φορτίων μετά την κατάρρευση του συστήματος για την αποφυγή φαινομένων μεγάλων αποκλίσεων συχνότητας και υπερφόρτωσης των ΜΠ κατά το αρχικό στάδιο της αποκατάστασης, 4) η δυνατότητα για αποσύνδεση του Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ πριν ξεκινήσει η διαδικασία και 5) η δυνατότητα για διαχωρισμό της περιοχής του δικτύου ΧΤ [13].

Ουσιαστικά, μετά από την εμφάνιση ολικής διακοπής του συστήματος ο κεντρικός ελεγκτής θα προσπαθήσει να επαναφέρει το ΜΔ στο τελευταίο σενάριο που έχει καταγραφεί. Η διαδικασία αλλά και οι κανόνες που πρέπει να τηρούνται κατά την αποκατάσταση είναι οι εξής:

- Αποσύνδεση όλων των φορτίων και διαχωρισμός του ΜΔ σε περιοχές που θα περιλαμβάνουν μικρές ΜΔΠ με δυνατότητα αυτόματης επανεκκίνησης και ικανότητα τροφοδότησης των τοπικών φορτίων. Η παραπάνω ενέργεια οδηγεί σε δημιουργία μικρών νησίδων μέσα στο ΜΔ. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται ο διαχωρισμός ενός ΜΔ σε τέσσερις νησίδες που μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα.
- «Κατασκευή» του δικτύου ΧΤ. Ο κεντρικός ελεγκτής αποφασίζει ποια ΜΔΠ θα τροφοδοτήσει τα καλώδια ΧΤ και ποια τον Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ.
- Συγχρονισμός των μικρών νησίδων. Οι μικρές ΜΔΠ οι οποίες τροφοδοτούν τις νησίδες που έχουν δημιουργηθεί θα πρέπει να συγχρονιστούν με το δίκτυο ΧΤ, κάτι το οποίο αναλαμβάνεται από τους ελεγκτές που βρίσκονται στις μονάδες.

- Σύνδεση ελεγχόμενων φορτίων. Αυτή η σύνδεση επιτυγχάνεται εάν οι μικρές ΜΔΠ δεν έχουν φορτιστεί πλήρως. Η ποσότητα των φορτίων που μπορούν να συνδεθούν εξαρτάται από τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης έτσι ώστε να αποφευχθούν αποκλίσεις στη συχνότητα και την τάση κατά την διάρκεια της σύνδεσης των φορτίων.
- Σύνδεση μη ελεγχόμενων ΜΔΠ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες. Σε αυτό το στάδιο οι ΜΔΠ και τα φορτία που έχουν συνδεθεί είναι ικανά να εξομαλύνουν τις μεταβολές τάσης και συχνότητας λόγω των διακυμάνσεων ισχύος που παρουσιάζονται από τις μη ελεγχόμενες ΜΔΠ και έτσι η σύνδεσή τους είναι εφικτή.
- Αύξηση φορτίου. Προκειμένου να εξυπηρετηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο, ανάλογα με την ικανότητα παραγωγής, είναι επιτρεπτό να συνδεθούν ακόμα περισσότερα φορτία.
- Συγχρονισμός ΜΔ με το δίκτυο ΜΤ.



Σχήμα 2.6: Διαχωρισμός του ΜΔ σε νησίδες που περιέχουν ΜΔΠ με ικανότητα αυτόματης επανεκκίνησης

2.4.2 ΤΥΠΟΙ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Η εμφάνιση διάφορων τύπων σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, σε διαφορετικές τοποθεσίες και με διαφορετική συχνότητα, είναι ένα καθημερινό φαινόμενο.

Ουσιαστικά, τρεις τύποι σφαλμάτων μπορούν να εμφανιστούν στα ΔΔ. Τα σφάλματα αυτά εμφανίζονται σε στοιχεία του δικτύου και κατηγοριοποιούνται σε α) σφάλματα γραμμής, β) σφάλματα ζυγών και γ) σφάλματα Μ/Σ. Βέβαια, ένα ΔΔ αποτελείται και από άλλα στοιχεία, τα οποία μπορούν να υποστούν σφάλματα, αλλά σίγουρα μπορούν να συσχετιστούν με έναν από τους τρεις παραπάνω τύπους. Παράδειγμα αποτελεί η εμφάνιση σφάλματος σε ένα διακόπτη ισχύος ενός Μ/Σ, το οποίο θα έχει τις ίδιες επιπτώσεις με ένα σφάλμα Μ/Σ.

Ο τύπος και οι επιπτώσεις που θα υποστεί το ΔΔ καθορίζουν τον αριθμό των πελατών που θα σταματήσουν να τροφοδοτούνται, δηλαδή την περιοχή του δικτύου που θα απομονωθεί. Ο αριθμός των στοιχείων του δικτύου που θα τεθούν εκτός λειτουργίας έχει μεγάλη εξάρτηση από την πολυπλοκότητα και τα χαρακτηριστικά του ΔΔ. Η πολυπλοκότητα αναφέρεται στα χαρακτηριστικά τοπολογίας του δικτύου, στις λειτουργικές δυνατότητες (δυνατότητες επαναδιαμόρφωσης, ΜΔΠ με δυνατότητα αυτόματης εκκίνησης), αλλά και σε άλλες δυνατότητες του ΔΔ [24].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^οΑΠΛΟΪΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση που έχει ήδη γίνει, στο προηγούμενο Κεφάλαιο, έδειξε τη σημασία της αποκατάστασης των ΔΔ μετά από την εμφάνιση σφάλματος. Οι σύγχρονες υποδομές των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά ευάλωτες σε καταστροφές που μπορεί να προκληθούν από ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι σεισμοί, οι καταιγίδες κ.ά. και είναι αρκετά συνήθεις περιπτώσεις λόγω των κλιματικών αλλαγών που έχει υποστεί ο πλανήτης μας [25]. Είναι εύλογο, να πούμε ότι υπάρχουν αρκετές αιτίες που είναι ικανές να προξενήσουν βλάβη στα ΔΔ και οι περισσότερες από αυτές έχουν σημαντικές επιπτώσεις στον οικονομικό τομέα των διαχειριστών αλλά και στην εξυπηρέτηση των τελικών καταναλωτών. Ο κύριος στόχος των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μείωση της διάρκειας διακοπής τροφοδότησης στους τελικούς καταναλωτές και κατά συνέπεια η ενίσχυση της αξιοπιστίας των ΔΔ. Ουσιαστικά, τα παραπάνω συντελούν στην σχεδίαση και κατασκευή ανθεκτικών ΔΔ.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί ορισμοί που αντιπροσωπεύουν την ανθεκτικότητα ενός ΔΔ, των οποίων η πλειοψηφία επικεντρώνεται στην ικανότητα πρόβλεψης, αντιμετώπισης και στην ταχεία αποκατάσταση από ένα υψηλού αντίκτυπου σφάλμα. Η ουσία της κατασκευής ενός ανθεκτικού ΔΔ είναι η πραγματοποίηση της αποκατάστασης όσο το δυνατόν γρηγορότερα, έτσι ώστε η παροχή ενέργειας να αποκατασταθεί στους τελικούς καταναλωτές [26].

Σε αυτό το Κεφάλαιο, θα εξεταστεί ένα πρόβλημα αποκατάστασης για ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό χρησιμοποιεί την αλλαγή κατάστασης των γραμμών με τους ανοικτούς υπό φορτίο αποζεύκτες, έτσι ώστε να επιτύχει την ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης λόγω της διακοπής λειτουργίας κάποιων γραμμών. Το πρόβλημα της αποκατάστασης χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα μικτού ακέραίου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP) λόγω της φύσης των

μεταβλητών και των περιορισμών που διαθέτει, κάτι που είναι αρκετά δύσκολο να επιλυθεί και η ανάλυση του οποίου θα γίνει σε επόμενο Κεφάλαιο. Η μέθοδος που προτείνεται είναι ικανή να ανταπεξέλθει στην δυσκολία επίλυσής του, αφού κάνει χρήση των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί από την επίλυση της ροής ισχύος πριν από την εμφάνιση σφάλματος αλλά και των πληροφοριών για τα θερμικά όρια των γραμμών. Με την εκμετάλλευση αυτών των πληροφοριών, η μέθοδος που παρουσιάζεται είναι σε θέση να αναγνωρίζει τις διαθέσιμες κατάλληλες διαδρομές που συνδέουν την απομονωμένη περιοχή, λόγω σφάλματος, με τον ζυγό του υποσταθμού ώστε να εξυπηρετηθούν οι αποσυνδεδεμένοι ζυγοί. Η προτεινόμενη προσέγγιση του προβλήματος δεν απαιτεί τον υπολογισμό της νέας ροής ισχύος μετά από κάθε αλλαγή της κατάστασης των διακοπών [26].

3.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Όπως έχουμε αναφέρει, στην παρούσα εργασία, το ΔΔ θα αναπαρίσταται από έναν κατευθυνόμενο, συνεκτικό ακυκλικό γράφο $G = (V, E)$, όπου τα V, E αντιπροσωπεύουν το σύνολο των κόμβων (ζυγών) και των ακμών (γραμμών) του δικτύου αντίστοιχα. Ο λόγος που ο γράφος θεωρείται συνεκτικός και ακυκλικός, είναι διότι τα ΔΔ που θα μελετηθούν λειτουργούν με ακτινική τοπολογία. Επίσης, δύο γειτονικοί κόμβοι του δικτύου θα συμβολίζονται ως i και j , ενώ η γραμμή που ενώνει αυτούς τους δύο κόμβους θα συμβολίζεται ως (i, j) . Η ζήτηση κάθε κόμβου i σε ενεργό ισχύ χαρακτηρίζεται από το σύμβολο P_{Di} , η ροή ισχύος αλλά και η ικανότητα της γραμμής (i, j) σε MW συμβολίζονται ως P_{ij}^{pre-pf} και $P_{ij}^{max-cap}$ αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις τιμές που αντιπροσωπεύουν την ικανότητα της κάθε γραμμής σε MW, η ροή ισχύος πριν από την εμφάνιση σφάλματος μπορεί να εξυπηρετήσει όλα τα φορτία στο δίκτυο χωρίς να παραβιάζεται ο περιορισμός της ικανότητας σε καμία γραμμή του δικτύου. Επιπλέον, θα θεωρήσουμε ότι όταν μία γραμμή βγαίνει εκτός λειτουργίας τότε η συνολική ικανότητά της χάνεται, δηλαδή αν βγει εκτός λειτουργίας η γραμμή (i, j) (η σειρά που τοποθετούνται τα i και j έχει σημασία γιατί μας δείχνει την κατεύθυνση της ροής ισχύος), τότε $P_{ij}^{max-cap} = 0$ (είναι ισοδύναμο με

την αφαίρεση της γραμμής από το δίκτυο) [26]. Κατά τη διατύπωση του προβλήματος, θα εξετάσουμε μόνο τη ζήτηση ενεργού ισχύος και επίσης θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάμεσα σε δίκτυα με διείσδυση ΔΠ και σε δίκτυα χωρίς διείσδυση ΔΠ, έτσι ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα για την εξυπηρέτηση των φορτίων.

Τα ΔΔ που θα μελετήσουμε σε αυτήν την εργασία, αποτελούνται από γραμμές που διαθέτουν τους ανοικτούς υπό φορτίο αποζεύκτες (tie-lines). Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται στην επαναδιαμόρφωση του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο κόμβο ή διακοπής λειτουργίας των γραμμών. Επίσης, σε κάθε κόμβο υπάρχουν διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches) και η χρήση τους επικεντρώνεται στο άνοιγμα των γραμμών κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα που έχουμε διατυπώσει παραπάνω στηρίζεται στην ροή ισχύος κατά την κανονική λειτουργία του ΔΔ (λειτουργία πριν την εμφάνιση σφάλματος) αλλά και στην ικανότητα των γραμμών. Η στρατηγική αυτή είναι αρκετά χρήσιμη για την αποκατάσταση του δικτύου χωρίς της εξερεύνηση όλων των πιθανών αλλαγών καταστάσεων των διακοπών. Παρακάτω θα γίνει ανάλυση της μεθοδολογίας που υλοποιήθηκε για την αποκατάσταση του δικτύου μετά από διακοπή λειτουργίας μίας γραμμής και θα συζητηθούν τα αποτελέσματά της.

3.3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η ανάπτυξη του κώδικα για την υλοποίηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB (Matrix Laboratory) και η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η R2016b. Επιπλέον, το πρόβλημα της ροής ισχύος κατά την κανονική λειτουργία των δικτύων λύθηκε με τη χρήση του πακέτου MATPOWER [27].

Στην ενότητα 2.3.1 έγινε αναφορά και δόθηκε σχηματική αναπαράσταση για την απεικόνιση των ΔΔ που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία. Η σχεδίαση των

ΔΔ πραγματοποιήθηκε με την εργαλειοθήκη biograph [28] του προγράμματος MATLAB. Τα δίκτυα που θα μελετηθούν αναφέρονται στο πρωτεύον τμήμα του δικτύου, δηλαδή στη ΜΤ. Οπότε ο κόμβος τροφοδοσίας αντιπροσωπεύει τον υποσταθμό υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και οι υπόλοιποι κόμβοι αναφέρονται στους πελάτες ΜΤ και στους Μ/Σ διανομής (ΜΤ/ΧΤ). Υπενθυμίζουμε ότι οι γραμμές που διαθέτουν ανοικτό υπό φορτίο αποζεύκτη, ο οποίος είναι ανοικτός στην αρχική τοπολογία του δικτύου απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η κατάλληλη γραμμή που χρειάστηκε να κλείσει ο αποζεύκτης της μετά την επαναδιαμόρφωση του δικτύου. Ο κόμβος που αντιστοιχεί στον υποσταθμό του δικτύου απεικονίζεται με ανοικτό μπλε χρώμα, ενώ οι υπόλοιποι που αντιπροσωπεύουν τα φορτία με κίτρινο. Επίσης, η ροή της ενεργού ισχύος από ΜΔΠ, στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ που θα μελετηθούν, απεικονίζεται με μπλε χρώμα. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η τοπολογία του ΔΔ 33 κόμβων, χωρίς διείσδυση ΔΠ, κατά την κανονική λειτουργία (αρχική τοπολογία δικτύου πριν την εμφάνιση σφάλματος).

3.3.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΟΥ ΔΔ

Στα ΔΔ, η διακοπή λειτουργίας μίας γραμμής (i^* , j^*) έχει ως αποτέλεσμα την απομόνωση κάποιας περιοχής του δικτύου εξαιτίας της ακτινικής τοπολογίας. Έτσι, οι απομονωμένοι κόμβοι δεν τροφοδοτούνται από τον υποσταθμό. Η αποκατάσταση της παροχής ισχύος δύναται να πραγματοποιηθεί μέσω της αλλαγής κατάστασης των κατάλληλων ανοικτών υπό φορτίο αποζευκτών. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο στην εξυπηρέτηση της ζήτησης της απομονωμένης περιοχής διαδραματίζει η ικανότητα των γειτονικών γραμμών.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να ορίσουμε τα εξής σύνολα:

- T_l : το σύνολο των γραμμών (tie-lines) από το οποίο μπορεί να συνδεθεί μία κάθε φορά, έτσι ώστε η τοπολογία του δικτύου να παραμείνει ακτινική.
- τ_k : η γραμμή που συνδέεται ώστε να επιτευχθεί αλλαγή κατεύθυνσης της ισχύος.

Η διαδικασία της αποκατάστασης ξεκινάει με τον εντοπισμό των κόμβων που απομονώθηκαν λόγω της διακοπής λειτουργίας της γραμμής. Στη συνέχεια, εντοπίζεται η διαδρομή μέσα από την οποία θα μπορέσει να κατευθυνθεί η ροή ισχύος, μετά από τη σύνδεση της γραμμής $\tau_k \in T_l$, στην απομονωμένη περιοχή του δικτύου [26]. Η ισχύς που είναι διαθέσιμη, μέσα από αυτή τη διαδρομή για τροφοδότηση της γραμμής τ_k , βρίσκεται από την διαδρομή που ενώνει το κομμάτι που περιέχει τον υποσταθμό και έχει κατεύθυνση τον κόμβο-αφετηρία της γραμμής τ_k . Η διαθέσιμη ισχύς που μπορεί να κατευθυνθεί μέσα από αυτή τη διαδρομή στους απομονωμένους κόμβους του δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$DP_{S_k} = \min_{(i,j) \in S_k} (P_{ij}^{max_cap} - P_{ij}^{pre_pf}) \quad (3.1)$$

Τελικά, η ισχύς που είναι διαθέσιμη για την τροφοδότηση των απομονωμένων κόμβων μετά από τη σύνδεση της κατάλληλης γραμμής τ_k δίνεται από:

$$P_{S_k} = \min \{ DP_{S_k}, P_{i^*j^*}^{pre_pf} \} \quad (3.2)$$

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.1 όταν η γραμμή (28, 29) βγει εκτός λειτουργίας, τότε θα χρειαστεί να κλείσει η γραμμή (25, 29) και η τροφοδότηση των κόμβων 29 μέχρι 33, θα πραγματοποιηθεί από τη διαδρομή που συνδέει τους κόμβους 3 μέχρι 29. Η ισχύς που θα είναι διαθέσιμη εκείνη τη στιγμή θα καθοριστεί: 1) από την ικανότητα των γραμμών που βρίσκονται στη διαδρομή αυτή, 2) από την τιμή της ροής ισχύος που υπήρχε σε αυτές πριν από το σφάλμα και 3) από την ροή ισχύος, πριν από το σφάλμα, της εκτός λειτουργίας γραμμής.

Το επόμενο βήμα της αποκατάστασης είναι ο καθορισμός του συνόλου των κατάλληλων γραμμών τ_k ελέγχοντας την συνθήκη $P_{S_k} > P_{S_{k+1}}$. Είναι εύκολα κατανοητό ότι η ζήτηση της απομονωμένης περιοχής του δικτύου δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί πλήρως υπό τη συνθήκη $P_{S_k} < P_{i^*j^*}^{pre_pf}$. Η πλήρης εξυπηρέτηση των φορτίων μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν $P_{S_k} = P_{i^*j^*}^{pre}$, κάτι βέβαιο που δεν είναι πλήρως απαραίτητο, λόγω του ότι κάποιες γραμμές που τροφοδοτούνται από τη γραμμή τ_k μπορεί να έχουν χαμηλή τιμή ικανότητας.

Η επιλογή της καταλληλότερης γραμμής που πρέπει να συνδεθεί εξαρτάται από την τοποθεσία της στο δίκτυο και ιδιαίτερα στο κομμάτι που απομονώθηκε λόγω σφάλματος. Ως παράδειγμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 3.1 (και από τις τιμές ικανότητας των γραμμών στο Παράτημα) ότι αν βγει εκτός λειτουργίας η γραμμή (14, 15) τότε η σύνδεση της γραμμής (33, 18) δεν θα παραβιάσει τον περιορισμό της ακτινικής τοπολογίας. Παρόλα αυτά, η ζήτηση σε ισχύ των κόμβων 15 έως 18 δεν θα εξυπηρετηθεί πλήρως διότι η ικανότητα κάποιων γραμμών που ενώνουν το κομμάτι που περιέχει τον υποσταθμό με τον κόμβο 18 είναι αρκετά μικρή. Ωστόσο, αν οι κόμβοι 15 έως 18 τροφοδοτηθούν από την γραμμή (9, 15), όλη η ζήτηση μπορεί να εξυπηρετηθεί.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των κόμβων που βρίσκονται στην απομονωμένη περιοχή είναι η αναζήτηση κατά βάθος (DFS – Depth-first search). Ο αλγόριθμος DFS πραγματοποιεί αναζήτηση που ξεκινά με την επέκταση του πρώτου κόμβου-παιδί (παιδί του κόμβου όπου θέλουμε να επισκεφθούμε όλους τους γειτονικούς κόμβους του) που εμφανίζεται και συνεχίζει σε βάθος του δέντρου μέχρι να βρεθεί ο ζητούμενος κόμβος ή μέχρι να φτάσει σε κόμβο που δεν έχει παιδιά. Στη συνέχεια, η αναζήτηση συνεχίζεται στον πιο πρόσφατο ανεξερεύνητο κόμβο [29].

Η μέθοδος αυτή δίνει την δυνατότητα για τον εντοπισμό των παιδιών του κόμβου-τερματικό της γραμμής τ_k , δηλαδή τον κόμβο που καταλήγει η γραμμή τ_k , με τοπολογική διάταξη. Για παράδειγμα αν στο Σχήμα 3.1 υποθέσουμε ότι συνδέεται η γραμμή (25, 29), δηλαδή με κατεύθυνση από τον κόμβο 25 στον κόμβο 29, τότε κόμβος-τερματικό της γραμμής θεωρείται ο 29. Στην περίπτωση ύπαρξης δύο κλάδων παιδιών, προτεραιότητα δίνεται στον κλάδο που απαιτεί μεγαλύτερη ζήτηση σε φορτίο. Αν συμβολίσουμε με V^{Br-pr} , τους κόμβους που βρίσκονται στον κλάδο που έχει προτεραιότητα στην παροχή ισχύος, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε αν η γραμμή τ_k που χρειάστηκε να συνδεθεί ικανοποίησε τη ζήτηση από την σχέση:

$$D_{\tau_k}^{Br-pr} = P_{S_k} - \sum_{b_n=1}^{|V^{Br-pr}|} P_{D_{b_n}} \quad (3.3)$$

όπου $P_{D_{b-n}}$ είναι η ζήτηση των κόμβων που βρίσκονται στον κλάδο που έχει προτεραιότητα στην παροχή ισχύος. Από την σχέση (3.3) μπορούμε να καταλάβουμε ότι αν $D_{\tau_k}^{Br-pr} > 0$, τότε η ζήτηση καλύφθηκε και επίσης μπορεί να εξυπηρετηθεί μερικώς ή πλήρως η ζήτηση του επόμενου κλάδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της απλοϊκής μεθόδου για την αποκατάσταση της λειτουργίας ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, η εφαρμογή της μεθόδου θα πραγματοποιηθεί για διακοπή λειτουργίας μίας γραμμής σε δίκτυα που δεν διαθέτουν ΜΔΠ και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθόδου στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ, έτσι ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την καλύτερη εξυπηρέτηση της απομονωμένης περιοχής. Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν είναι πρότυπα ΔΔ της IEEE 33 και 69 ζυγών (κόμβων) και τα δεδομένα των οποίων μπορούν να ανακτηθούν από την [30].

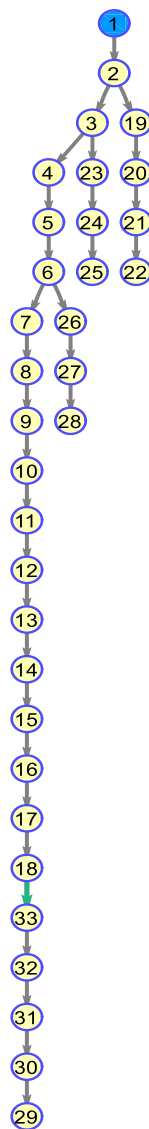
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ

Το δίκτυο 33 κόμβων που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 είναι ένα ακτινικό ΔΔ με έναν υποσταθμό, 33 κόμβους και 37 γραμμές, 5 από τις οποίες είναι εξοπλισμένες με αποζεύκτη ανοικτό υπό φορτίο. Το συνολικό του φορτίο έχει ζήτηση 3.715 MW. Η ικανότητα των γραμμών σε MW φαίνεται στο Παράρτημα που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας.

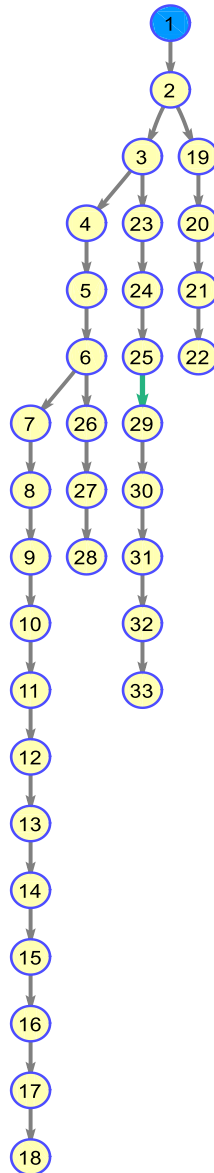
4.2.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29)

Σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29), οι κόμβοι 29 μέχρι 33 αποσυνδέονται από το υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και συνεπώς τα φορτία τους δεν τροφοδοτούνται. Οι δύο πιθανές γραμμές που μπορούν να συνδεθούν (μία κάθε φορά) χωρίς να παραβιάζεται ο περιορισμός της ακτινικής τοπολογίας είναι οι

γραμμές (18, 33) και (25, 29) όπως φαίνονται στα Σχήματα 4.1 και 4.2, αντίστοιχα. Τα δεδομένα που εξήχθησαν από το MATLAB μετά την επίλυση του προβλήματος βάσει των εξισώσεων (3.1) – (3.3) συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.1. Παρατηρούμε ότι η γραμμή που πρέπει να συνδεθεί για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου είναι η (25, 29) αφού ικανοποιεί μεγαλύτερο μέρος του φορτίου.



Σχήμα 4.1: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (28, 29) και σύνδεση της γραμμής (18,33)



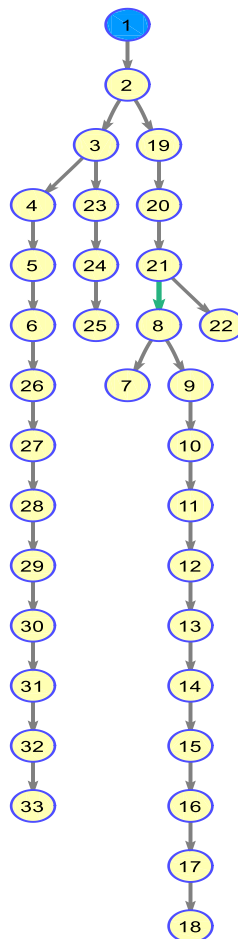
Σχήμα 4.2: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (28, 29) και σύνδεση της γραμμής (25, 29)

Ζήτηση κόμβων 29 - 33 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)	
	0.74	$\tau_k = (18, 33)$
	0.7103	0.5823

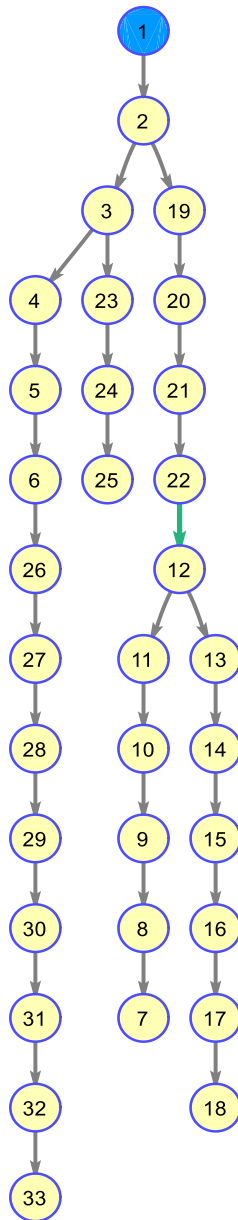
Πίνακας 4.1: Κατάσταση ΔΔ 33 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)

4.2.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (6, 7)

Σε περίπτωση σφάλματος στην γραμμή (6, 7) οι κόμβοι 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 και 18 απομονώνονται από το υπόλοιπο δίκτυο με αποτέλεσμα τα φορτία τους να μην τροφοδοτούνται. Οι διαθέσιμες γραμμές που μπορούν να συνδεθούν (μία κάθε φορά) χωρίς να παραβιαστεί η ακτινική τοπολογία του δικτύου δίνονται από το σύνολο $T_l = \{(21, 8), (22, 12), (33, 18)\}$. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το MATLAB μετά την επίλυση του προβλήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Παρατηρούμε ότι οι γραμμές που κατάφεραν, μετά την σύνδεσή τους, να επιτύχουν την πλήρη εξυπηρέτηση των φορτίων είναι η (21, 8) και η (22, 12). Η τοπολογία του δικτύου μετά από τη σύνδεση της γραμμής (21, 8) φαίνεται στο Σχήμα 4.3 και στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η τοπολογία του μετά από τη σύνδεση της γραμμής (22, 12).



Σχήμα 4.3: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (6, 7) και σύνδεση της γραμμής (21, 8)



Σχήμα 4.4: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (6, 7) και σύνδεση της γραμμής (22, 12)

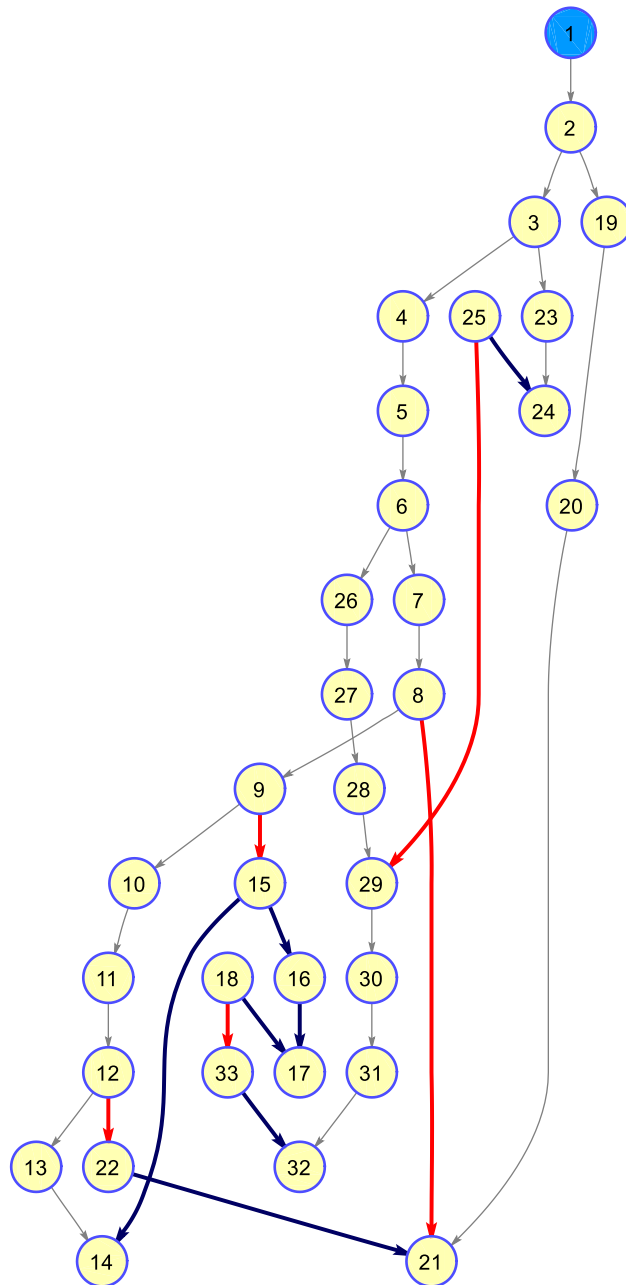
Ζήτηση κόμβων 7 – 18: (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)		
	1.075	$\tau_k = (21, 8)$ 0	$\tau_k = (22, 12)$ 0

Πίνακας 4.2: Κατάσταση ΔΔ 33 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (6, 7)

4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 33 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την εξέταση ΔΔ, με διείσδυση ΔΠ, στα οποία όλες οι ΜΔΠ βρίσκονται στο πρωτεύον τμήμα του δικτύου, δηλαδή στη ΜΤ. Η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ θεωρείται ότι είναι το 40% του μέγιστου φορτίου του δικτύου. Η εισαγωγή της παραγωγικής ικανότητας των ΜΔΠ πραγματοποιήθηκε με αφαίρεση από τα φορτία των κόμβων στους οποίους εγκαταστάθηκαν. Η κατεύθυνση της διαθέσιμης ισχύος από τις ΜΔΠ καθορίζεται από την επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος. Επίσης, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι σε μερικά αποτελέσματα εξυπηρετήθηκε πλήρως το φορτίο και υπήρχε επιπλέον διαθέσιμη ισχύς από τις ΜΔΠ. Σε αυτές τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ότι οι ΜΔΠ είχαν την δυνατότητα περικοπής της ισχύος τους. Για την κατασκευή του ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, έχουν εγκατασταθεί κάποιες ΜΔΠ στο δίκτυο 33 κόμβων που μελετήσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Το πλήθος των εγκατεστημένων ΜΔΠ θα αποτελείται από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες για τα οποία θα θεωρήσουμε ότι παράγουν την μέγιστη ισχύ τους κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης. Η ισχύς της κάθε ΜΔΠ σε MW (P_{DG}) αλλά και οι κόμβοι στους οποίους είναι τοποθετημένες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 και η τοπολογία του ΔΔ απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.

ΜΔΠ	ΖΥΓΟΣ	ΕΙΔΟΣ	P_{DG} (MW)
DG_1	25	Α/Γ	0.5
$DG_2 - DG_{10}$	10 – 12, 15, 16, 18, 19, 22, 33	Φ/Β	0.1
Πίνακας 4.3: Δεδομένα ΜΔΠ του ΔΔ 33 κόμβων			

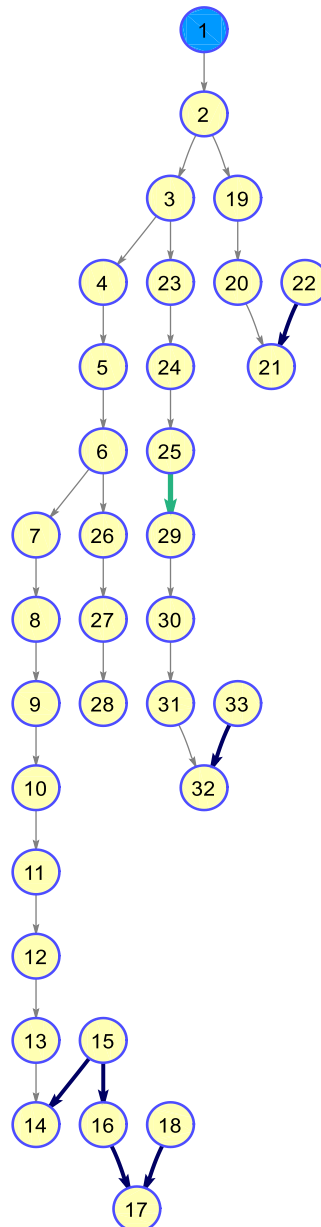


Σχήμα 4.5: Αρχική τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων με διείδυση ΔΠ

4.3.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29)

Στην προηγούμενη ενότητα μελετήσαμε την επίπτωση της σύνδεσης των κατάλληλων γραμμών στην κάλυψη της ισχύος των απομονωμένων κόμβων λόγω σφάλματος στην γραμμή (28, 29). Είναι φυσικό ότι με την τοποθέτηση κάποιων ΜΔΠ και την σύνδεση της κατάλληλης γραμμής τα αποτελέσματα θα παρουσιάσουν

βελτίωση αφού θα υπάρχει εγκατεστημένη ισχύς στο δίκτυο, η οποία θα μπορέσει να ικανοποιήσει κάποια φορτία χωρίς την παροχή ισχύος από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Τα αποτελέσματα της αποκατάστασης λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 και η τοπολογία του δικτύου μετά από τη σύνδεση της γραμμής που εξυπηρετήσε πλήρως τη ζήτηση φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (28, 29) και σύνδεση της γραμμής (25, 29)

Ζήτηση κόμβων 29 – 33 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)	
	0.74	$\tau_k = (18, 33)$
0.49		0

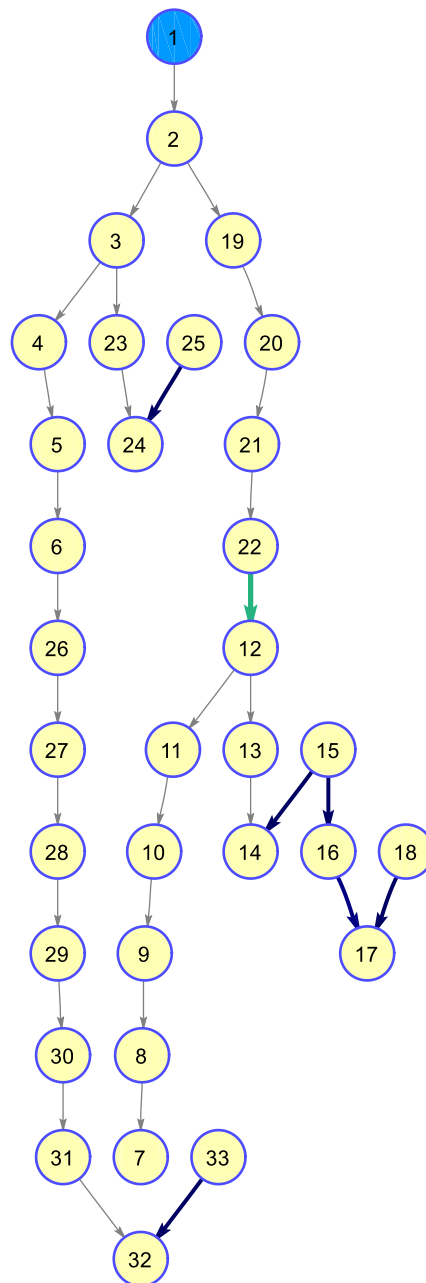
Πίνακας 4.4: Κατάσταση ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)

4.3.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (6, 7)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε περίπτωση σφάλματος στην γραμμή (6, 7), ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής για να απομονωθεί το σφάλμα. Λόγω του σφάλματος κάποια φορτία δεν ικανοποιούνται. Με την τοποθέτηση των ΜΔΠ, τα αποτελέσματα της επαναδιαμόρφωσης του δικτύου με όλες τις πιθανές γραμμές που μπορούν να συνδεθούν ώστε η τοπολογία να παραμείνει ακτινική συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.5. Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, οι γραμμές που με την σύνδεσή τους κατάφεραν να εξυπηρετήσουν πλήρως τα φορτία ήταν οι (21, 8) και (22, 12). Σε αντίθεση όμως με την εφαρμογή της μεθόδου στην προηγούμενη περίπτωση, η ζήτηση των φορτίων εξυπηρετήθηκε σε μεγαλύτερο ποσοστό με την σύνδεση της γραμμής (33, 18). Ο λόγος που συνέβη το παραπάνω, είναι γιατί οι ΜΔΠ κατάφεραν να εξυπηρετήσουν κάποια φορτία και έτσι η ισχύς που χρειάστηκε να διανεμηθεί στους απομονωμένους κόμβους από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ ήταν αρκετά μικρότερη. Οι τοπολογίες του ΔΔ μετά την επαναδιαμόρφωσή του και την πλήρη τροφοδότηση των φορτίων παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7 και 4.8.

Ζήτηση κόμβων 7 – 18: (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)		
	1.075	$\tau_k = (21, 8)$	$\tau_k = (22, 12)$
0		0	0.2954

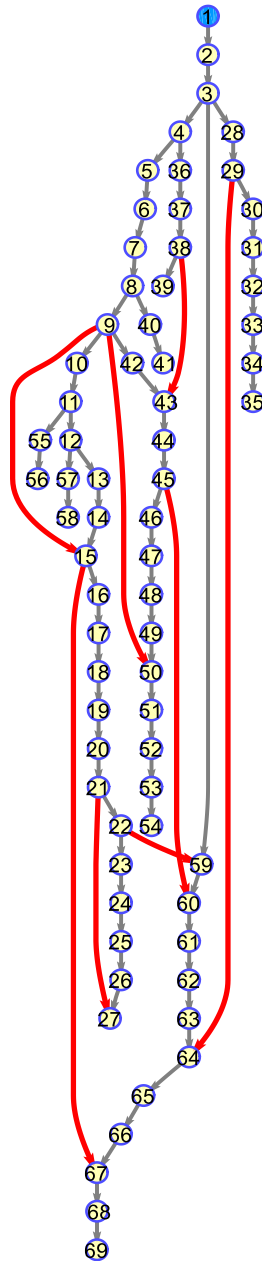
Πίνακας 4.5: Κατάσταση ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (6, 7)



Σχήμα 4.8: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (6, 7) και σύνδεση της γραμμής (22, 12)

4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΚΟΜΒΩΝ

Το δίκτυο 69 κόμβων που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9 είναι ένα ακτινικό ΔΔ με 1 υποσταθμό, 69 κόμβους και 76 γραμμές, 8 εκ των οποίων διαθέτουν αποζεύκτη ανοικτό υπό φορτίο, ο οποίος είναι ανοικτός κατά την κανονική λειτουργία του δικτύου. Το συνολικό του φορτίο έχει ζήτηση 3.8 MW.



Σχήμα 4.9: Αρχική τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων

4.4.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44)

Η εμφάνιση σφάλματος στην γραμμή (43, 44) έχει ως αποτέλεσμα την διακοπή παροχής ισχύος στους κόμβους 44 – 54. Οι γραμμές που με την σύνδεσή τους μπορούν να εξυπηρετήσουν μερικώς ή πλήρως το φορτίο και παράλληλα ικανοποιούν την ακτινική τοπολογία είναι η (9, 50) και η (60, 45). Ο Πίνακας 4.6 που ακολουθεί παρουσιάζει το συνολικό φορτίο που τροφοδότησε κάθε γραμμή στο αναδιαμορφωμένο δίκτυο. Παρατηρούμε ότι η σύνδεση της γραμμής (60, 45) ικανοποίησε πλήρως το φορτίο και η τοπολογία του αναδιαμορφωμένου δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 4.10.

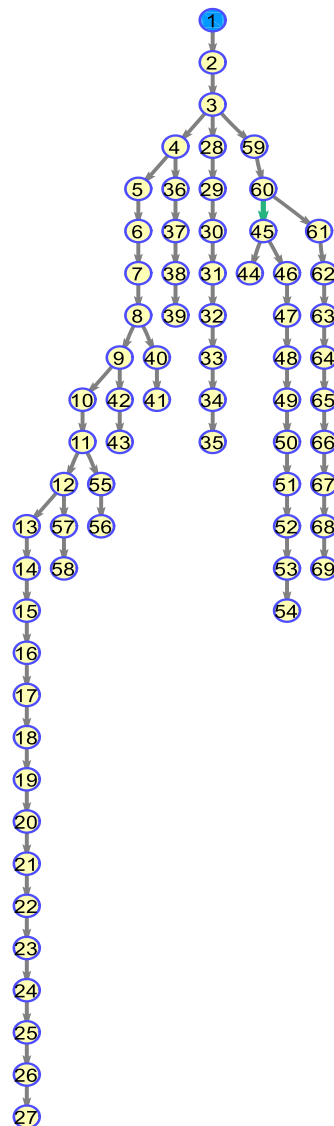
Ζήτηση κόμβων 44 - 54 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)	
	1.682	$\tau_k = (9, 50)$
0.2435		0
Πίνακας 4.6: Κατάσταση ΔΔ 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)		

4.4.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9)

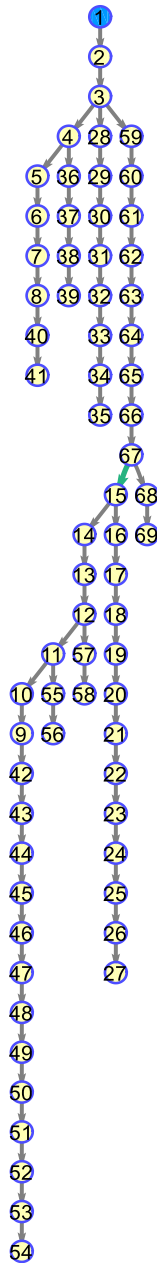
Σε περίπτωση σφάλματος στην γραμμή (8, 9), ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής αυτής για την απομόνωση του σφάλματος. Τα φορτία στους κόμβους 9 – 27, 42 – 58 δεν τροφοδοτούνται. Ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τις πιθανές γραμμές που με την σύνδεσή τους ικανοποιούν την ακτινική τοπολογία του δικτύου. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.7, παρατηρούμε ότι η γραμμή που είναι καταλληλότερη για σύνδεση στο δίκτυο είναι η (67,15) αφού εξυπηρετεί μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Το αναδιαμορφωμένο δίκτυο 69 κόμβων μετά τη σύνδεση της γραμμής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11.

Ζήτηση κόμβων 9 – 27, 42 – 58 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)			
	2.5060	$\tau_k = (38, 43)$	$\tau_k = (60, 45)$	$\tau_k = (59, 22)$
	1.3548	0.6657	0.6917	0.5313

Πίνακας 4.7: Κατάσταση ΔΔ 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8, 9)



Σχήμα 4.10: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (43, 44) και σύνδεση της γραμμής (60, 45)

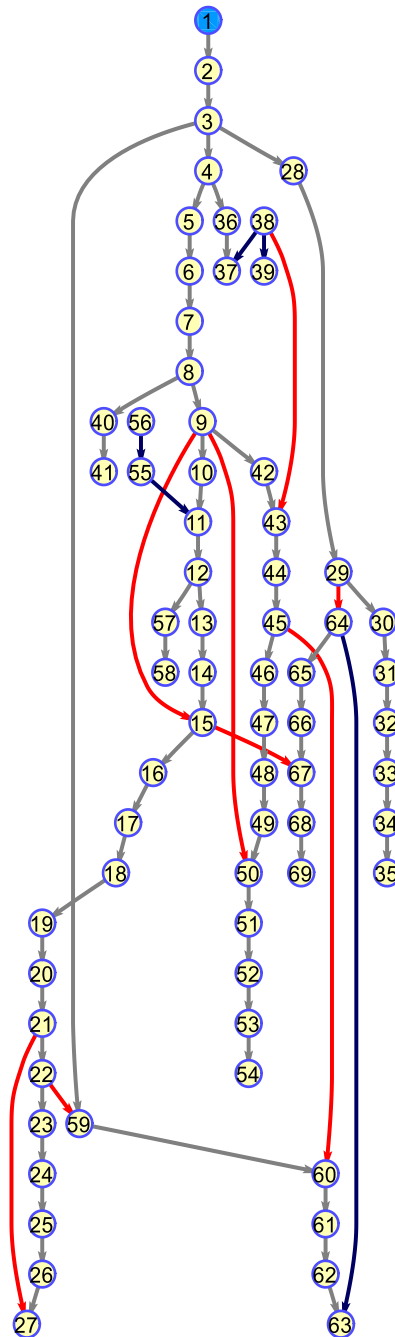


Σχήμα 4.11: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (8, 9) και σύνδεση της γραμμής (67, 15)

4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 69 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ

Για την κατασκευή του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, τοποθετήθηκαν στο δίκτυο, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, κάποιες ΜΔΠ. Η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ είναι ίση με το 40% του μέγιστου φορτίου του δικτύου και τα χαρακτηριστικά τους όπως και οι κόμβοι στους οποίους εγκαταστάθηκαν

φαίνονται στον Πίνακα 4.8. Σε αυτήν την ενότητα θα παρατηρήσουμε την επίδραση που έχει η εγκατάσταση των ΜΔΠ στην τροφοδότηση των απομονωμένων φορτίων, λόγω σφαλμάτων στις γραμμές του δικτύου, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για το ΔΔ 69 κόμβων χωρίς διείσδυση ΔΠ. Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται η αρχική τοπολογία του ΔΔ με διείσδυση ΔΠ.



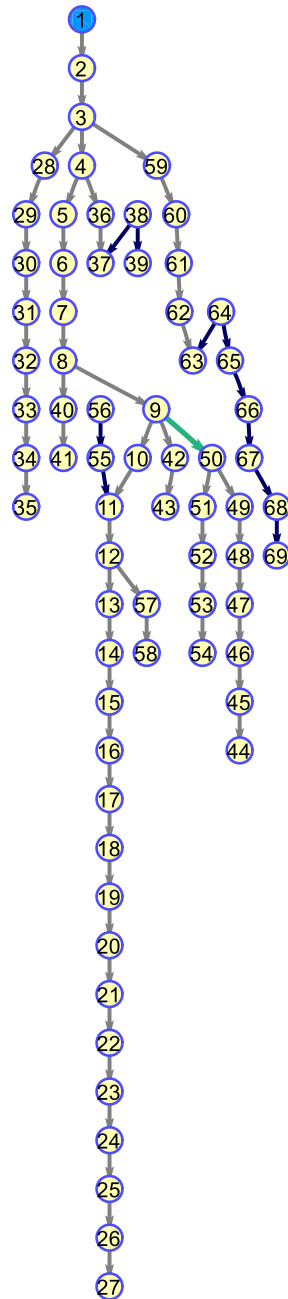
Σχήμα 4.12: Αρχική τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων με διείσδυση ΔΠ

ΜΔΠ	ΖΥΓΟΣ	ΕΙΔΟΣ	P_{DG} (MW)
DG_1	38	A/Γ	0.5
$DG_2 - DG_{10}$	3, 5, 7, 10, 15, 20, 50, 56, 64	Φ/B	0.1
Πίνακας 4.8: Δεδομένα ΜΔΠ του ΔΔ 69 κόμβων			

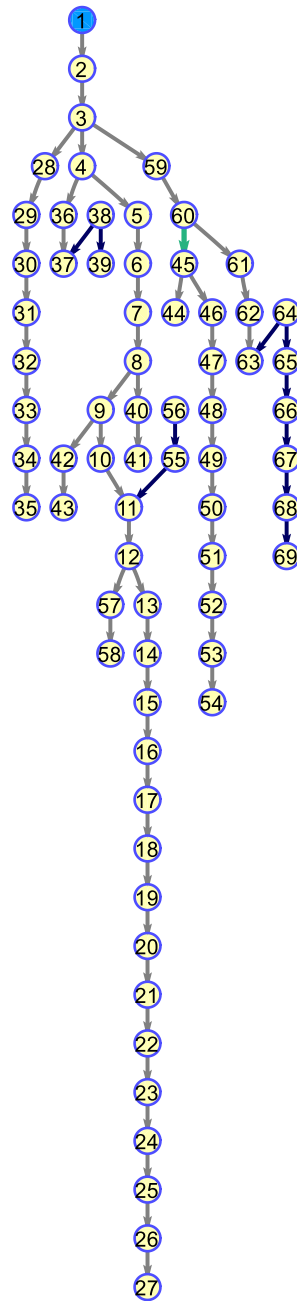
4.5.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44)

Η εμφάνιση σφάλματος στην γραμμή (43, 44) προκάλεσε την απομόνωση κάποιων κόμβων και συνεπώς την διακοπή τροφοδότησής τους. Προηγουμένως είδαμε την επίδραση της σύνδεσης των κατάλληλων γραμμών στην εξυπηρέτηση του φορτίου. Η εγκατάσταση των ΜΔΠ βοήθησε στην βελτίωση των αποτελεσμάτων αφού ικανοποιήθηκαν τα φορτία των κόμβων που είναι εγκατεστημένες και στη συνέχεια μπόρεσαν να παρέχουν την διαθέσιμη ισχύ τους στους γειτονικούς κόμβους. Τα αποτελέσματα με την εγκατάσταση των ΜΔΠ συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.9. Βάσει των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν με την εφαρμογή της μεθοδολογίας αποκατάστασης, συμπεραίνουμε ότι οι γραμμές που συνδέθηκαν (μία κάθε φορά) κατάφεραν να τροφοδοτήσουν πλήρως το φορτίο. Σε αντίθεση με την εφαρμογή της μεθόδου στην προηγούμενη ενότητα, η διείσδυση των ΜΔΠ προκάλεσε πλήρης εξυπηρέτηση των φορτίων και με τη σύνδεση της γραμμής (9, 50). Το αναδιαμορφωμένο δίκτυο με την σύνδεση των γραμμών (9, 50) και (60, 45) απεικονίζεται στα Σχήματα 4.13 και 4.14 αντίστοιχα.

Ζήτηση κόμβων 44 - 54 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)	
	1.682	$\tau_k = (9, 50)$
	0	0
Πίνακας 4.9: Κατάσταση ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)		



Σχήμα 4.13: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων, με διεϊσδυση ΔΠ, μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (43, 44) και σύνδεση της γραμμής (9, 50)



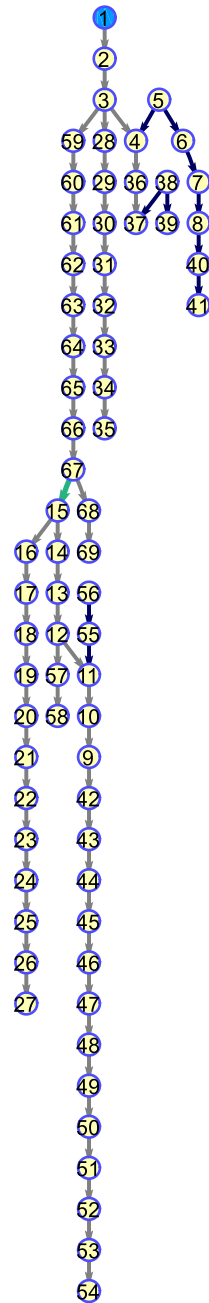
Σχήμα 4.14: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (43, 44) και σύνδεση της γραμμής (60, 45)

4.5.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9)

Στον Πίνακα 4.10 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της αποκατάστασης λειτουργίας του δικτύου 69 κόμβων με διείσδυση ΔΠ, μετά από την εμφάνιση σφάλματος στην γραμμή που ενώνει τους κόμβους 8 και 9. Στον Πίνακα 4.10 μπορούμε να διακρίνουμε ότι μετά την σύνδεση κάθε γραμμής για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου, παρουσιάζεται αύξηση στην εξυπηρέτηση του φορτίου σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας. Διαπιστώνουμε ότι η διείσδυση των ΜΔΠ στο ΔΔ πέτυχε καλύτερα αποτελέσματα στην εξυπηρέτηση των φορτίων, αφού οι ΜΔΠ κατάφεραν να εξυπηρετήσουν τα φορτία των κόμβων που είναι εγκατεστημένες και έπειτα να τροφοδοτήσουν τους γειτονικούς κόμβους. Έτσι, ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ χρειάστηκε να τροφοδοτήσει αρκετά μικρότερο μέρος του συνολικού φορτίου. Η γραμμή που ικανοποίησε το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου είναι η (67,15). Το Σχήμα 4.15 απεικονίζει το δίκτυο μετά την σύνδεσή της γραμμής (67, 15).

Ζήτηση κόμβων 9 – 27, 42 – 58 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)			
	2.5060	$\tau_k = (38, 43)$	$\tau_k = (60, 45)$	$\tau_k = (59, 22)$
	0.3546	0.0657	0.0917	0.0313

Πίνακας 4.10: Κατάσταση ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8, 9)



Σχήμα 4.15: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων, με διεϊσδυση ΔΠ, μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (8, 9) και σύνδεση της γραμμής (67, 15)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^οΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ενός ΔΔ είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που θα μπορέσει να αναπαραστήσει το πρόβλημα. Ένα τέτοιο μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού αποτελείται από ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης (decision variables), μέσω των οποίων είναι δυνατή η έκφραση των τεχνικών περιορισμών (constraints) του δικτύου. Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος ορίζει ένα εφικτό σύνολο (feasible set) και αποτελείται από το σύνολο των λύσεων που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς. Η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης από αυτό το εφικτό σύνολο γίνεται με βάση την τιμή που λαμβάνει μία συνάρτηση, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και εκφράζει το κόστος που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) της αντικειμενικής συνάρτησης [31].

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των ΔΔ για αποκατάσταση της λειτουργίας τους μετά από την εμφάνιση σφάλματος σε γραμμές και ζυγούς σε ΔΔ με διείσδυση ΔΠ και σε ΔΔ χωρίς διείσδυση ΔΠ αλλά και σε περίπτωση ολικής διακοπής λειτουργίας του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ σε δίκτυα με διείσδυση ΔΠ. Η επαναδιαμόρφωση βασίστηκε στην επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος (optimal power flow – OPF) αλλά και στην μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου χρησιμοποιώντας τους διακόπτες που διαθέτει το εκάστοτε δίκτυο και οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την σύνδεση/απόζευξη των γραμμών του δικτύου.

Αρχικά, γίνεται ο προσδιορισμός των εξισώσεων που συνδέουν τα ηλεκτρικά μεγέθη του συστήματος καθώς και το σύνολο των τεχνικών περιορισμών του δικτύου που αποτελείται από ένα σύστημα ανισοτήτων/εξισώσεων με αγνώστους τις

μεταβλητές απόφασης. Κάθε τιμή των μεταβλητών αυτών, όπου όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται, οδηγεί σε μία και μόνο κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Στο τέλος, παρουσιάζονται οι τιμές όλων των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος που ικανοποιούν τη βέλτιστη λύση για την ελαχιστοποίηση (ή την μεγιστοποίηση) της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην παρούσα εργασία, η βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ενός ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας εκφράζεται με μία αντικειμενική συνάρτηση, η οποία είναι άθροισμα συναρτήσεων και έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης περιοχής, την ελαχιστοποίηση των χειροκίνητων διακοπών, την ελαχιστοποίηση των τηλεχειριζόμενων διακοπών αλλά και την ελαχιστοποίηση της περικοπής ισχύος των ΜΔΠ στην περίπτωση μελέτης των ΔΔ με διείδυση ΔΠ.

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα γίνει διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος, θα γίνει ανάλυση των περιορισμών λειτουργίας καθώς και θα παρουσιαστεί η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου.

5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η βέλτιστη ροή ισχύος (ή φορτίου) σε ένα ΣΗΕ είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον προσδιορισμό των επιθυμητών τάσεων των κόμβων και των ροών ισχύος για μία δεδομένη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Η βέλτιστη ροή ισχύος είναι χρήσιμη για διάφορους λόγους και μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Εκλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος, αφού κατά τη διάρκεια της ημέρας τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς και είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας.
2. Διατήρηση των τάσεων και των ροών ισχύος εντός των περιορισμών λειτουργίας του εκάστοτε δικτύου.
3. Μελέτη και αντιμετώπιση ενδεχόμενων διαταραχών που μπορούν να υποστούν τα διάφορα στοιχεία του δικτύου. Αυτός ο λόγος αποτελεί και το θέμα της παρούσας εργασίας.
4. Μελέτες επέκτασης του δικτύου.

Κατά την διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος χρειάστηκε να προβούμε σε κάποιες παραδοχές για τα ΔΔ που μελετήσαμε. Ουσιαστικά θεωρήσαμε ότι τα συστήματα που εξετάσαμε είναι συμμετρικά τριφασικά δίκτυα, δηλαδή ότι οι γραμμές είναι συμμετρικές και παρουσιάζουν την ίδια σύνθετη αντίσταση σε κάθε φάση. Επίσης, τα φορτία παρουσιάζουν το ίδιο μέτρο έντασης σε κάθε φάση και οι γωνίες τους διαφέρουν κατά 120° . Έτσι, είναι δυνατή η ανάλυση του μονοφασικού ισοδύναμου (οι τιμές των άλλων φάσεων προκύπτουν με χρήση της τριφασικής συμμετρίας), η χρήση του ανά μονάδα συστήματος (α.μ.) και η μονογραμμική αναπαράσταση του συστήματος.

5.2.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στα ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας η ισχύς διανέμεται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ μέσω των γραμμών διανομής στους διάφορους ζυγούς (κόμβους) του δικτύου. Ο ζυγός τροφοδοσίας του δικτύου αναφέρεται ως ζυγός ταλάντωσης (ή ζυγός αναφοράς, slack bus), οι ζυγοί που φέρουν τα συνδεδεμένα φορτία αναφέρονται ως ζυγοί φορτίου (ή ζυγοί PQ) και οι ζυγοί που έχουν διασυνδεδεμένες γεννήτριες αναφέρονται ως ζυγοί παραγωγής (ή ζυγοί PV). Η διανομή της ισχύος και η κατεύθυνση της καθορίζεται πάντα από τις διαθέσιμες γραμμές που είναι συνδεδεμένες για μία δεδομένη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.

Τα σύνολα που πρέπει να οριστούν πριν από τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος είναι τα ακόλουθα:

- N: το σύνολο των ζυγών (κόμβων) του δικτύου
- L: το σύνολο των γραμμών (ακμών) του δικτύου

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος σε ένα δίκτυο, είναι αναγκαία η χρήση του πίνακα αγωγιμοτήτων, ο οποίος συμβολίζεται ως Y_{bus} . Κάθε γραμμή του δικτύου $(i, j) \in L$ που ενώνει τους ζυγούς i, j μπορεί να αναπαρασταθεί με το ανά φάση ισοδύναμο Π μοντέλο (Σχήμα 5.1) και χαρακτηρίζεται από το στοιχείο του πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{ij} :

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (5.1)$$

$$\text{όπου: } G_{ij} + jB_{ij} = -g_{ij} - jb_{ij}, \quad g_{ij} = g_{ji} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}, \quad b_{ij} = b_{ji} = \frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

R_{ij}, X_{ij} : αντίσταση και αντίδραση σειράς της γραμμής $(i, j) \in L$, αντίστοιχα

Στο Σχήμα 5.1, το μέγεθος y_{ij} παριστάνει την αγωγιμότητα σειράς της γραμμής (i, j) ενώ τα μεγέθη y_{sij} και y_{sji} παριστάνουν τις εγκάρσιες αγωγιμότητες. Οι αγωγιμότητες αυτές εκφράζονται συναρτήσει των αντιστάσεων και αντιδράσεων της γραμμής, ως εξής:

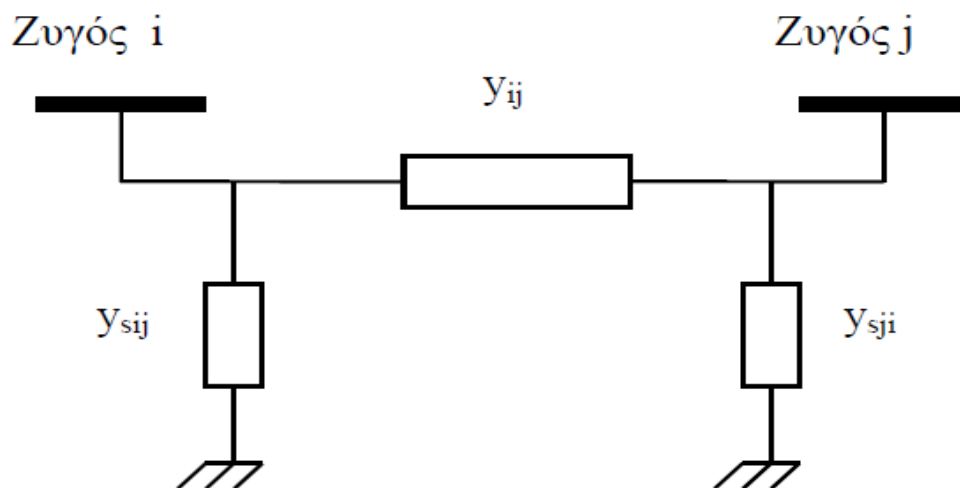
$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij},$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij},$$

$$y_{sji} = g_{sji} + jb_{sji},$$

Στην παρούσα εργασία, οι εγκάρσιες αγωγιμότητες ως προς τη γη θα θεωρηθούν μηδενικές και έτσι θα υπάρξει μία απλοποίηση στις εξισώσεις που θα προκύψουν. Δηλαδή για κάθε γραμμή $(i, j) \in L$ ισχύει:

$$y_{sij} = y_{sji} = 0$$



Σχήμα 5.1 Ισοδύναμο κύκλωμα Π γραμμής

Εκτός από τα δεδομένα των γραμμών του δικτύου που εξάγονται από τον πίνακα αγωγιμοτήτων, σημαντικό είναι και το σύνολο των πληροφοριών για κάθε ζυγό $i \in N$. Αυτό το σύνολο πληροφοριών εκφράζεται από τρία μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον κάθε ζυγό $i \in N$:

- Τάση του ζυγού i :

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (5.2)$$

όπου $|V_i|, \delta_i$: μέτρο και γωνία του ζυγού i , αντίστοιχα

- Κατανάλωση ισχύος στον ζυγό i :

$$S_{d_i} = P_{d_i} + jQ_{d_i} \quad (5.3)$$

όπου P_{d_i}, Q_{d_i} : η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος στον ζυγό i αντίστοιχα

- Παραγωγή ισχύος στο ζυγό i :

$$S_{g_i} = P_{g_i} + jQ_{g_i} \quad (5.4)$$

όπου P_{g_i}, Q_{g_i} : η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος στον ζυγό i αντίστοιχα

Τα παραπάνω μεγέθη, που ορίσαμε, μας δίνουν τη δυνατότητα για τον υπολογισμό της έγχυσης ενεργού και άεργου ισχύος στον ζυγό i ως διαφορά της παραγόμενης από την καταναλισκόμενη ισχύ, η οποία μπορεί να λάβει τόσο θετικές τιμές (εισερχόμενη στο δίκτυο) όσο και αρνητικές τιμές (εξερχόμενη από το δίκτυο). Η συνολική μιγαδική ισχύς που εγχέεται στον ζυγό i είναι η ακόλουθη:

$$S_i = S_{g_i} - S_{d_i} \stackrel{(5.3),(5.4)}{\iff} P_i + jQ_i = (P_{g_i} - P_{d_i}) + j(Q_{g_i} - Q_{d_i}) \quad (5.5)$$

Παρακάτω θα δοθεί ο αναλυτικός ορισμός της συνολικής έγχυσης μιγαδικής ισχύος σε κάθε ζυγό $i \in N$ κάνοντας χρήση και άλλων μεγεθών που χαρακτηρίζουν ένα ΔΔ.

Η ένταση του ρεύματος που εγχέεται στον ζυγό i σε συνάρτηση με τα στοιχεία Y_{in} του πίνακα αγωγιμοτήτων δίνεται από το άθροισμα:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (5.6)$$

όπου n : το σύνολο των κόμβων που συνδέονται με τον ζυγό i

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να ορίσουμε την μιγαδική ισχύ στο α.μ. σύστημα, που εγχέεται στον ζυγό i , συναρτήσει της τάσης του ζυγού και της έντασης του ρεύματος που εγχέεται σε αυτόν:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (5.7)$$

όπου I_i^* : ο συζυγής της έντασης ρεύματος I_i

Αντικαθιστώντας τώρα τις σχέσεις (5.1), (5.2), (5.6) στην (5.7) και εξισώνοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη της προκύπτουν οι εξισώσεις για το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό $i \in N$:

$$P_i = G_{ii}V_i^2 + \sum_{j \in n=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (5.8)$$

$$Q_i = -B_{ii}V_i^2 + \sum_{j \in n=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (5.9)$$

Επίσης, οι α.μ. ροές ενεργού και άεργου ισχύος P_{ij} , Q_{ij} με κατεύθυνση από τον ζυγό i προς τον ζυγό j (θετικές τιμές) ή αντίστροφα (αρνητικές τιμές), μπορούν να υπολογιστούν κάνοντας χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$P_{ij} = g_{ij}V_i^2 - |V_i||V_j|(g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (5.10)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij}V_i^2 - |V_i||V_j|(g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (5.11)$$

5.2.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο αριθμός των εξισώσεων μιγαδικής ισχύος, που παρουσιάστηκαν, εξαρτάται από τον αριθμό των ζυγών του εκάστοτε ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο που αποτελείται από n ζυγούς σχηματίζει n εξισώσεις μιγαδικής ροής ισχύος. Ουσιαστικά, προκύπτουν n μη – γραμμικές εξισώσεις ενεργού και n μη – γραμμικές εξισώσεις άεργου ισχύος. Η επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης καθίσταται αρκετά δύσκολη με την παρουσία αυτών των εξισώσεων αφού η προσθήκη του ισοζυγίου ροής ισχύος στους περιορισμούς του προβλήματος οδηγεί στην διατύπωση ενός μικτού-ακέραιου μη γραμμικού προβλήματος. Μέχρι σήμερα, η γραμμική DC ροή ισχύος που έχει χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση των παραπάνω μη γραμμικών εξισώσεων έχει παράγει ένα πιο απλό υπολογιστικά πρόβλημα μικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Παρόλα αυτά, ένα αρκετά σημαντικό μειονέκτημα παρουσιάζεται με τη χρήση του μοντέλου της DC ροής ισχύος, αφού δεν λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της άεργου ισχύος στις τάσεις των κόμβων του δικτύου. Πολλές μελέτες βελτιστοποίησης, όπως στην [26], έχουν συμπεριλάβει στους περιορισμούς του προβλήματος μόνο την ενεργό ροή ισχύος και έχουν θεωρήσει ότι το πλεόνασμα της άεργου ισχύος που παράγεται από την διείσδυση ΜΔΠ, χρησιμοποιείται για την διαδικασία της αντιστάθμισης. Στην [32] τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν έχουν συμπεριλάβει την DC ανάλυση της ροής ισχύος αλλά δεν καταφέρνουν να βρουν μία εφικτή λύση του προβλήματος που να ικανοποιεί τους περιορισμούς του ισοζυγίου της μιγαδικής ισχύος και τα λειτουργικά όρια των τάσεων ακόμη και όταν θεωρούνται στο δίκτυο γεννήτριες με επαρκή

παραγωγική ικανότητα άεργου ισχύος. Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, διαπίστωσε ότι ελλείψεις ή πλεονάσματα άεργου ισχύος οδήγησαν σε εκτός - ορίων τιμές των τάσεων σε ορισμένες περιοχές του δικτύου [33]. Για να μπορέσει να επιτευχθεί μία αρκετά άμεση και εφικτή αντιμετώπιση του προβλήματος, θα γίνει μία γραμμική προσέγγιση των εξισώσεων ροής μιγαδικής ισχύος η οποία λαμβάνει υπόψιν την τάση των ζυγών αλλά και την ροή άεργου ισχύος. Το μοντέλο για την γραμμικοποίηση των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία στηρίζεται στο ανάπτυγμα Taylor.

Η γραμμικοποίηση αναφέρεται στην αναζήτηση της γραμμικής προσέγγισης μίας συνάρτησης σε ένα δεδομένο σημείο [34]. Για την γραμμική προσέγγιση των μη γραμμικών εξισώσεων της ροής ισχύος θα κάνουμε χρήση του όρου πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor των εξισώσεων ροής ισχύος.

Για την γραμμική προσέγγιση των μη γραμμικών όρων είναι χρήσιμος ο ορισμός των παρακάτω σχέσεων:

- Το ανάπτυγμα Taylor πρώτης τάξης για μία συνάρτηση $f(x)$ μίας μεταβλητής γύρω από ένα σημείο a γράφεται ως εξής:

$$f(x) = f(a) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=a} (x - a) \quad (5.12)$$

- Το ανάπτυγμα Taylor πρώτης τάξης για μία συνάρτηση $f(x, y)$ δύο μεταβλητών γύρω από τα σημεία α, β εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f(x, y) = f(\alpha, \beta) + f_x(\alpha, \beta)(x - \alpha) + f_y(\alpha, \beta)(y - \beta) \quad (5.13)$$

- Το ανάπτυγμα Taylor πρώτης τάξης για μία συνάρτηση $f(x, y, z)$ τριών μεταβλητών γύρω από τα σημεία α, β, γ εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f(x, y, z) = f(\alpha, \beta, \gamma) + f_x(\alpha, \beta, \gamma)(x - \alpha) + f_y(\alpha, \beta, \gamma)(y - \beta) + f_z(\alpha, \beta, \gamma)(z - \gamma) \quad (5.14)$$

Στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας η διαφορά των γωνιών των τάσεων ανάμεσα σε δύο συνδεδεμένους ζυγούς i, j είναι αρκετά μικρή και έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε τη διαφορά αυτή ίση με το μηδέν. Στις εξισώσεις (5.8) – (5.11) παρατηρούμε ότι ο όρος $\delta_i - \delta_j$ εμφανίζεται στις τριγωνομετρικές συναρτήσεις sine και cosine. Με χρήση της εξίσωσης (5.12) συμπεραίνουμε ότι η γραμμική προσέγγιση των δύο αυτών όρων γύρω από το μηδέν είναι η ακόλουθη:

$$\sin(\delta_i - \delta_j) = \delta_i - \delta_j \quad (5.15)$$

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = 1 \quad (5.16)$$

Επίσης, οι τιμές των τάσεων σε κάθε ζυγό του δικτύου παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από το 1 α.μ. Με χρήση της σχέσης (5.12) η γραμμική προσέγγιση του όρου V_i^2 , για κάθε $i, j \in N$, γύρω από το 1 είναι η ακόλουθη:

$$V_i^2 = 2|V_i| - 1 \quad (5.17)$$

Στις εξισώσεις (5.8) – (5.11) παρατηρούμε τους μη γραμμικούς όρους $|V_i||V_j| \cos(\delta_i - \delta_j), |V_i||V_j| \sin(\delta_i - \delta_j)$. Με χρήση της (5.14) η γραμμική προσέγγιση των όρων γύρω από τα σημεία 1, 1, 0 είναι η ακόλουθη:

$$|V_i||V_j| \cos(\delta_i - \delta_j) = |V_i| + |V_j| - 1 \quad (5.18)$$

$$|V_i||V_j| \sin(\delta_i - \delta_j) = \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (5.19)$$

Βάσει των (5.15) – (5.19), οι εξισώσεις (5.8) – (5.11) γράφονται:

$$P_i \approx G_{ii}(2|V_i| - 1) + \sum_{j \in n=1}^N \left((|V_i| + |V_j| - 1)G_{ij} + B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \right) \quad (5.20)$$

$$Q_i \approx -B_{ii}(2|V_i| - 1) + \sum_{j \in n=1}^N \left(G_{ij}(\delta_i - \delta_j) - (|V_i| + |V_j| - 1)B_{ij} \right) \quad (5.21)$$

$$P_{ij} \approx g_{ij}(2|V_i| - 1) - \left((|V_i| + |V_j| - 1)g_{ij} + b_{ij}(\delta_i - \delta_j) \right) \quad (5.22)$$

$$Q_{ij} \approx -b_{ij}(2|V_i| - 1) - \left(g_{ij}(\delta_i - \delta_j) - (|V_i| + |V_j| - 1)b_{ij} \right) \quad (5.23)$$

Οι εξισώσεις που προκύπτουν για το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό $i \in N$ είναι οι εξής:

$$P_i = \sum_{j \in N_i} P_{ij} \quad (5.24)$$

$$Q_i = \sum_{j \in N_i} Q_{ij} \quad (5.25)$$

όπου N_i : το σύνολο των ζυγών οι οποίοι συνδέονται μέσω γραμμών με τον i

5.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ

Στις προηγούμενες ενότητες αυτού του Κεφαλαίου έγινε διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος και παρουσιάστηκε η μέθοδος γραμμικής προσέγγισης των εξισώσεων της. Το μοντέλο της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης, που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το Κεφάλαιο ενσωματώνει τις εξισώσεις ροής ισχύος στους περιορισμούς του προβλήματος και των διακοπών που διαθέτει το εκάστοτε ΔΔ. Σε περίπτωση σφάλματος σε κάποια γραμμή ή ζυγό του δικτύου, ο κατάλληλος

διακόπτης απομόνωσης ανοίγει αυτόματα έχοντας σαν αποτέλεσμα την απομόνωση κάποιας περιοχής του δικτύου. Για την άμεση εξυπηρέτηση των καταναλωτών, σημαντικό ρόλο έχουν οι τηλεχειριζόμενοι και χειροκίνητοι διακόπτες του δικτύου, έτσι ώστε να γίνει επαναδιαμόρφωση του δικτύου με την σύνδεση/απόζευξη των κατάλληλων γραμμών και να ανακατευθυνθεί η ισχύς.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί η μαθηματική μοντελοποίηση της εύρεσης των κατάλληλων διακοπών του ΔΔ για το πρόβλημα της επαναδιαμόρφωσης. Σε αντίθεση με τη συνεχή φύση των ηλεκτρικών μεγεθών (συνεχείς μεταβλητές) του δικτύου, οι διακόπτες παρουσιάζουν πεπερασμένες διακριτές καταστάσεις. Για την παράστασή τους θα χρησιμοποιηθούν δυαδικές μεταβλητές.

5.3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ

Για την μαθηματική μοντελοποίηση των διακοπών που είναι εξοπλισμένο το εκάστοτε ΔΔ είναι χρήσιμος ο ορισμός των παρακάτω συνόλων [35]:

- SW_M : είναι το σύνολο των διακοπών που η κατάστασή τους ελέγχεται χειροκίνητα
- SW_R : είναι το σύνολο των διακοπών που η κατάστασή τους ελέγχεται τηλεχειριζόμενα

Για την αρχική κατάσταση των τηλεχειριζόμενων και των χειροκίνητων διακοπών είναι αρκετά χρήσιμος ο ορισμός των παρακάτω δυαδικών μεταβλητών:

- SWM_I : εκφράζει την αρχική κατάσταση των χειροκίνητων διακοπών, δηλαδή αν $SWM_{Iij} = 1$, τότε ο διακόπτης της γραμμής $(i, j) \in L$ είναι κλειστός κατά την κανονική κατάσταση λειτουργίας του δικτύου, αλλιώς είναι αρχικά ανοικτός.
- SWR_I : εκφράζει την αρχική κατάσταση των τηλεχειριζόμενων διακοπών, δηλαδή αν $SWR_{Iij} = 1$, τότε ο διακόπτης της γραμμής $(i, j) \in L$ είναι κλειστός

κατά την κανονική κατάσταση λειτουργίας του δικτύου, αλλιώς είναι αρχικά ανοικτός.

Επίσης, σημαντικό ρόλο στην διατύπωση του προβλήματος έχει η κατάσταση των γραμμών στο αναδιαμορφωμένο ΔΔ. Με τον όρο κατάσταση θέλουμε να δηλώσουμε αν μία γραμμή $(i, j) \in L$ διαρρέεται από ρεύμα μετά την διαδικασία της επαναδιαμόρφωσης. Έτσι, πρέπει να εισάγουμε μία νέα μεταβλητή που θα αντιπροσωπεύει την κατάσταση της γραμμής. Η δυαδική μεταβλητή αυτή συμβολίζεται με S_{ij} και ορίζεται ως εξής:

- $S_{ij} = 1$: η γραμμή $(i, j) \in L$ είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο για την διαδικασία της αποκατάστασης της λειτουργίας του.
- $S_{ij} = 0$: η γραμμή $(i, j) \in L$ δεν έχει συνδεθεί στο δίκτυο για την διαδικασία της αποκατάστασης της λειτουργίας του.

5.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, στην παρούσα εργασία, θα μελετηθούν και ΔΔ με διείσδυση ΔΠ. Ουσιαστικά, η κατασκευή των ΔΔ με διείσδυση ΔΠ θα πραγματοποιηθεί με τη εγκατάσταση κάποιων ΜΔΠ σε ορισμένους ζυγούς των δικτύων. Επιπλέον, υπενθυμίζουμε ότι όλες οι ΜΔΠ βρίσκονται στη ΜΤ και για αυτό το λόγο η απεικόνιση των δικτύων ξεκινάει από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και καταλήγει στους πελάτες ΜΤ και τους Μ/Σ διανομής (ΜΤ/ΧΤ).

Τα είδη των ΜΔΠ, που μπορεί να είναι διασυνδεδεμένα σε ένα ΔΔ, διακρίνονται στις “μη ελεγχόμενες” και στις “ελεγχόμενες” ΜΔΠ. Οι “μη ελεγχόμενες” ΜΔΠ δεν μπορούν να προβούν σε περικοπή της παραγωγής ισχύος για την ικανοποίηση των περιορισμών λειτουργίας του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι αποτελούν επενδύσεις ενίσχυσης του δικτύου και η επίδραση της ΔΠ στο δίκτυο μελετάται κατά το στάδιο σχεδιασμού και η διασύνδεσή της γίνεται μόνο όταν στο χειρότερο δυνατό σενάριο λειτουργίας δεν παραβιάζεται κανένας από τους περιορισμούς του δικτύου. Από την άλλη μεριά, οι “ελεγχόμενες” ΜΔΠ έχουν την δυνατότητα να περικόπτουν την

παραγωγή τους σε περίπτωση υπερφόρτωσης των γραμμών του δικτύου αλλά και για την ευρύτερη ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών [36].

Οι ΜΔΠ που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν μοντέλο είναι “ελεγχόμενες” και η παραγωγή ενεργού ισχύος επιλέχθηκε να είναι η μέγιστη δυνατή. Επιπλέον, ο συντελεστής ισχύος (Σ.Ι) των ΜΔΠ θεωρήθηκε ότι είναι κυμαινόμενος εντός συγκεκριμένων ορίων έτσι ώστε να είναι ευέλικτη η προσαρμογή της άεργου ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου (παραγωγή ή κατανάλωση άεργου ισχύος).

Για την εξέταση των ΔΔ με διείδυση ΔΠ είναι σκόπιμο να ορίσουμε και το ακόλουθο σύνολο:

- G : το σύνολο των “ελεγχόμενων” ΜΔΠ

5.3.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Για την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ είναι αναγκαία η τήρηση των περιορισμών λειτουργίας του. Στο παρόν μοντέλο λαμβάνονται υπόψιν περιορισμοί που αφορούν τα μέτρα των τάσεων και τις τιμές γωνιών των ζυγών, το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε ζυγό, την ικανότητα των γραμμών και τις παραγωγές ισχύος των ΜΔΠ. Οι σχετικοί περιορισμοί λειτουργίας:

- Όρια μέτρων τάσεων στους ζυγούς:

$$0.95 \text{ α.μ} \leq V_i \leq 1.05 \text{ α.μ}, \quad i \in N (i \neq \text{slack bus}) \quad (5.26)$$

- Τάση και γωνία του ζυγού ταλάντωσης:

$$V_{\text{slack_bus}} = 1 \text{ α.μ} \quad (5.27)$$

$$\delta_{\text{slack_bus}} = 0 \text{ rad} \quad (5.28)$$

- Ισοζύγιο ισχύος:

Οι εξισώσεις για το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό $i \in N$:

$$P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j \in N_i} P_{ij} \quad (5.29)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} = \sum_{j \in N_i} Q_{ij} \quad (5.30)$$

$$0 \leq P_{D_i} \leq P_{Demand_i} \quad (5.31)$$

$$0 \leq Q_{D_i} \leq Q_{Demand_i} \quad (5.32)$$

όπου P_{Demand_i} , Q_{Demand_i} : η ζήτηση του κόμβου (ζυγού) i σε ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα

Οι σχέσεις (5.29) και (5.30) εγγυώνται το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό. Οι σχέσεις (5.31) και (5.32) εκφράζουν τα όρια αποκοπής φορτίου, θεωρώντας φορτία σταθερού συντελεστή ισχύος.

- Ικανότητα των γραμμών:

Οι σχέσεις (5.22) και (5.23) εκφράζουν την ροή ενεργού και άεργου ισχύος από τον ζυγό i στον j . Οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζονται όταν η γραμμή $(i, j) \in L$ είναι συνδεδεμένη στο αναδιαμορφωμένο δίκτυο και για να λάβουμε υπόψιν τη συνθήκη αυτή, πρέπει να συμπεριληφθούν οι παρακάτω περιορισμοί:

$$-P_{ij}^{max} S_{ij} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{max} S_{ij} \quad (5.33)$$

$$-Q_{ij}^{max} S_{ij} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij}^{max} S_{ij} \quad (5.34)$$

$$\begin{aligned}
& -M(1 - S_{ij}) \leq \\
P_{ij} - \left(g_{ij}(2|V_i| - 1) - \left((|V_i| + |V_j| - 1)g_{ij} + b_{ij}(\delta_i - \delta_j) \right) \right) & \quad (5.35) \\
& \leq M(1 - S_{ij})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -M(1 - S_{ij}) \leq \\
Q_{ij} - \left(-b_{ij}(2|V_i| - 1) - \left(g_{ij}(\delta_i - \delta_j) - (|V_i| + |V_j| - 1)b_{ij} \right) \right) & \quad (5.36) \\
& \leq M(1 - S_{ij})
\end{aligned}$$

όπου M: ένας μεγάλος αριθμός

Οι σχέσεις (5.33) - (5.36), για κάθε $(i, j) \in L$, ισχύουν ανεξαρτήτως της κατάστασης των διακοπών. Οι σχέσεις (5.35) και (5.36) μετατρέπονται σε ισότητες όταν η γραμμή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, δηλαδή $S_{ij} = 1$, και συνδέουν το μέτρο και τη γωνία της τάσης με την ροή ισχύος. Επίσης, οι αποδεκτές τιμές των μεταβλητών P_{ij} , Q_{ij} εξασφαλίζονται μέσω των σχέσεων (5.33), (5.34). Σε περίπτωση που η γραμμή δεν χρειάζεται να συνδεθεί για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου, δηλαδή $S_{ij} = 0$, τότε οι μεταβλητές P_{ij} , Q_{ij} γίνονται ίσες με το μηδέν, ενώ η επιλογή της παραμέτρου M επιτρέπει τον υπολογισμό του μέτρου και της γωνίας της τάσης των ζυγών που βρίσκονται στα άκρα της γραμμής.

- Περιορισμοί ισχύος των ΜΔΠ:

$$P_{DG_i}^{min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{max}, \quad i \in G \quad (5.37)$$

$$Q_{DG_i}^{min} \leq Q_{DG_i} \leq Q_{DG_i}^{max}, \quad i \in G \quad (5.38)$$

Στο παρόν μοντέλο βελτιστοποίησης θεωρήθηκε ότι οι ΜΔΠ έχουν συνολική μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ που είναι ίση με το 40% του φορτίου του εκάστοτε ΔΔ και μπορούν να αποκόψουν την παραγωγή τους από 0% - 100%, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Επίσης, ο Σ.Ι των ΜΔΠ κυμαίνεται από 0.95 χωρητικός μέχρι 0.95 επαγωγικός. Οπότε οι σχέσεις (5.37) και (5.38) μπορούν να γραφθούν ως εξής:

$$0 \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{max}, \quad i \in G \quad (5.39)$$

$$-P_{DG_i} \tan(\varphi_{DG_i}) \leq Q_{DG_i} \leq P_{DG_i} \tan(\varphi_{DG_i}), \quad i \in G \quad (5.40)$$

όπου φ_{DG_i} : η γωνία του συντελεστή ισχύος της ΜΔΠ που είναι τοποθετημένη στον ζυγό $i, i \in G$.

- Περιορισμός ακτινικής τοπολογίας:

Η επαναδιαμόρφωση ενός ΔΔ προϋποθέτει την εύρεση της κατάλληλης σύνδεσης/απόζευξης των γραμμών έτσι ώστε η τοπολογία να παραμείνει ακτινική. Η συνθήκη αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί με την προσθήκη πρόσθετων περιορισμών, οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι το δίκτυο αντιστοιχεί σε ένα συνδετικό δέντρο (spanning tree) που είναι συνδεδεμένο στον κόμβο του υποσταθμού. Με αυτόν τον τρόπο, η ακτινική τοπολογία του δικτύου μπορεί να διατηρηθεί ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης των ροών ισχύος στις γραμμές του [19].

Για την μαθηματική μοντελοποίηση του συνδετικού δέντρου είναι αναγκαία η εισαγωγή δύο δυαδικών μεταβλητών β_{ij} και β_{ji} για κάθε γραμμή $(i, j) \in L$. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του συνδετικού δέντρου που μπορεί να διασφαλίσει την ακτινική τοπολογία του ΔΔ, είναι ότι κάθε κόμβος του δικτύου, εκτός του υποσταθμού, έχει ακριβώς έναν γονέα. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = S_{ij}, \quad (i, j) \in L \quad (5.41)$$

$$\sum_{j \in N_i} \beta_{ij} = 1, \quad i \in N \quad (5.42)$$

όπου N_i : το σύνολο των κόμβων που συνδέονται με τον i

$$\beta_{1j} = 0, \quad j \in N_1 \quad (5.43)$$

$$\beta_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in L \quad (5.44)$$

Η σχέση (5.41) εκφράζει ότι μία γραμμή του δικτύου ανήκει στο συνδεδετικό δέντρο αν ο κόμβος j είναι γονέας του κόμβου i ($\beta_{ij} = 1$) ή ο κόμβος i είναι γονέας του κόμβου j ($\beta_{ji} = 1$). Η (5.42) απαιτεί ότι κάθε κόμβος εκτός του κόμβου του υποσταθμού έχει ακριβώς έναν γονέα, ενώ η (5.43) εκφράζει ότι ο κόμβος 1 του υποσταθμού δεν έχει κανέναν γονέα.

Τέλος, σημαντικό ρόλο για την εύρεση της ακτινικής τοπολογίας του δικτύου, με έναν υποσταθμό, έχει και η σχέση:

$$\sum_{ij \in L} S_{ij} = N - 1, \quad (i, j) \in L \quad (5.45)$$

5.3.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Στο παρόν μοντέλο, το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ενός ΔΔ για την αποκατάσταση της λειτουργίας του εκφράζεται από μία αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτελείται από άθροισμα συναρτήσεων. Οι συναρτήσεις που αποτελούν την αντικειμενική συνάρτηση σε αυτή την εργασία, είναι οι εξής:

1) Ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης περιοχής

$$z_1 = \min \left(\sum_{i=1}^N w_{L_i} (P_{Demand_i} - P_{D_i}) + \sum_{i=1}^N w_{L_i} (Q_{Demand_i} - Q_{D_i}) \right) \quad (5.46)$$

όπου,

w_{L_i} : ο συντελεστή βάρους του φορτίου του κόμβου (ζυγού) i

P_{Demand_i} , Q_{Demand_i} : η ζήτηση του κόμβου (ζυγού) i σε ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα

P_{D_i} , Q_{D_i} : η εξυπηρέτηση της ζήτησης του κόμβου (ζυγού) i σε ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα μετά από την επαναδιαμόρφωση του δικτύου

2) Ελαχιστοποίηση του αριθμού χειρισμών των χειροκίνητων διακοπών

$$z_2 = \min \left(\sum_{ij=1}^{SW_M} w_{SW_{Mij}} (S_{ij} - SWM_{Iij})^2 \right) \quad (5.47)$$

όπου,

$w_{SW_{Mij}}$: ο συντελεστής βάρους της γραμμής (i, j) που διαθέτει χειροκίνητο διακόπτη

S_{ij} : η κατάσταση της γραμμής, που διαθέτει χειροκίνητο διακόπτη, (i, j) στο αναδιαμορφωμένο δίκτυο

SWM_{Iij} : η αρχική κατάσταση της γραμμής, που διαθέτει χειροκίνητο διακόπτη, (i, j)

3) Ελαχιστοποίηση του αριθμού χειρισμών των τηλεχειριζόμενων διακοπών

$$z_3 = \min \left(\sum_{ij=1}^{SW_R} w_{SW_{Rij}} (S_{ij} - SWR_{Iij})^2 \right) \quad (5.48)$$

όπου,

$w_{SW_{Rij}}$: ο συντελεστής βάρους της γραμμής (i, j) που διαθέτει τηλεχειριζόμενο διακόπτη

S_{ij} : η κατάσταση της γραμμής, που διαθέτει τηλεχειριζόμενο διακόπτη, (i, j) στο αναδιαμορφωμένο δίκτυο

SWR_{Iij} : η αρχική κατάσταση της γραμμής, που διαθέτει τηλεχειριζόμενο διακόπτη, (i, j)

4) Ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των ΜΔΠ

$$z_4 = \min \left(\sum_{i=1}^G w_{DG_i} (P_{DG_i^0} - P_{DG_i}) \right) \quad (5.49)$$

όπου,

w_{DG_i} : ο συντελεστής βάρους της ΜΔΠ που είναι εγκατεστημένη στον κόμβο (ζυγό) i

$P_{DG_i^0}$: η παραγωγή ενεργού ισχύος της ΜΔΠ του κόμβου (ζυγού) i κατά την κανονική λειτουργία του δικτύου

P_{DG_i} : η παραγωγή ενεργού ισχύος της ΜΔΠ του κόμβου (ζυγού) i μετά από την επαναδιαμόρφωση του δικτύου

Η σχέση (5.46) έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση της τροφοδότησης των φορτίων μετά από την διαδικασία της επαναδιαμόρφωσης. Ο συντελεστής βάρους w_{D_i} εκφράζει το κόστος της αντίστοιχης ενέργειας για την περικοπή του φορτίου του κόμβου i , $i \in N$ όπου οι τιμές του δεν είναι ίδιες για όλα τα φορτία. Ο λόγος της διαφοροποίησης των τιμών είναι διότι στο παρόν μοντέλο επαναδιαμόρφωσης δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων, τα οποία συνήθως αναφέρονται σε βιομηχανικά εργοστάσια, νοσοκομεία, φωτισμούς δρόμων αλλά και σε άλλες υποδομές που σχετίζονται με τις βασικές ανάγκες της ανθρώπινης ζωής [37]. Οι (5.47) και (5.48) αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του αριθμού χειρισμών των διακοπών ανεξαρτήτως το είδος τους, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος της επαναδιαμόρφωσης του δικτύου. Συγκεκριμένα η (5.47) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των χειρισμών των χειροκίνητων διακοπών ενώ η (5.48) στην ελαχιστοποίηση των χειρισμών των τηλεχειριζόμενων διακοπών. Παρόλα αυτά, η προτίμηση στη χρήση των τηλεχειριζόμενων διακοπών για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου εξασφαλίζεται από τον συντελεστή βάρους $w_{SW_{Rij}}$, όπου ισχύει ότι $w_{SW_{Mij}} < w_{SW_{Rij}}$. Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί $w_{SW_{Mij}} = 1$, για κάθε $(i, j) \in SW_M$ και $w_{SW_{Rij}} = 10$, για κάθε $(i, j) \in SW_R$. Η (5.49) χρησιμοποιείται στην εξέταση των $\Delta\Delta$ με διείδυση $\Delta\Pi$ και έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της περικοπής της ισχύος των ΜΔΠ. Επειδή στο μοντέλο χρησιμοποιούνται οι α.μ τιμές των φορτίων και των ΜΔΠ συμπεραίνουμε ότι οι τιμές των συντελεστών βαρών τους πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των διακοπών. Επίσης, ο συντελεστής βάρους των ΜΔΠ δεν λαμβάνει την ίδια τιμή για όλες τις μονάδες αλλά δίνεται μεγαλύτερη τιμή στις ΜΔΠ που είναι τοποθετημένες κοντά στα κρίσιμα φορτία του δικτύου. Επομένως, σε αυτήν την

εργασία ισχύει ότι $w_{SW_{Mij}} < w_{SW_{Aij}} \ll w_{DG_i} < w_{L_i}$. Έτσι για την αντιμετώπιση μίας διαταραχής θα δοθεί έμφαση στην εξυπηρέτηση των φορτίων με όσο το δυνατόν λιγότερες κινήσεις διακοπών και περικόπτοντας μικρότερο ποσοστό της ισχύος των ΜΔΠ.

Το ολοκληρωμένο πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του δικτύου για την αντιμετώπιση διαταραχών στα δίκτυα που δεν υπάρχει διείσδυση ΔΠ, θα γίνει με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$Z_1 = z_1 + z_2 + z_3 \quad (5.50)$$

Υπό τους περιορισμούς:

(5.26) – (5.36), (5.41) – (5.45)

Αντίθετα, το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης για την αντιμετώπιση κάποιας διαταραχής σε ΔΔ με διείσδυση ΔΠ θα πραγματοποιηθεί με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$Z_2 = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \quad (5.51)$$

Υπό τους περιορισμούς:

(5.26) – (5.36), (5.39) – (5.45)

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ΔΔ για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους αναπτύχθηκε κώδικας με τη βοήθεια του YALMIP, όπου αποτελεί μία εργαλειοθήκη μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB. Η παρουσίαση της εργαλειοθήκης αυτής θα γίνει στο επόμενο Κεφάλαιο, ενώ οι εφαρμογές και τα αποτελέσματα του μοντέλου εκτίθενται στο Κεφάλαιο 7.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα προσπαθήσουμε να λύσουμε στην παρούσα εργασία. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι μεταβλητές που αποτελούν το πρόβλημα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: 1) τις μεταβλητές που μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε πραγματική τιμή (συνεχείς μεταβλητές) και 2) τις μεταβλητές που υποχρεούνται να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές (διακριτές μεταβλητές) και συγκεκριμένα είναι δυαδικές.

Ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να πάρει την εξής γενική μορφή:

Ελαχιστοποίηση της: $f(x, y)$

Υπό τους περιορισμούς: $h(x, y) = 0$

$$g(x, y) \leq 0$$

$$x \in X \subseteq R^n$$

$$y \in Y \subseteq Z^m$$

Τα σύνολα X, Y των μεταβλητών, η μορφή της f που αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση καθώς και οι μορφές των g, h που αντιπροσωπεύουν τους περιορισμούς του προβλήματος καθορίζουν τα μαθηματικά χαρακτηριστικά του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διακριθεί στις εξής κατηγορίες:

- Προβλήματα γραμμικού (Linear Programming – LP) και μη-γραμμικού προγραμματισμού (Non-Linear Programming – NLP):

Στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, οι f , h , g είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών. Από την άλλη μεριά, όταν το σύνολο των περιορισμών ή των αντικειμενικών συναρτήσεων αποτελούνται από μη γραμμικές συναρτήσεις, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως μη γραμμικό. Επίσης, δύο κατηγορίες των προβλημάτων του μη – γραμμικού προγραμματισμού αποτελούν τα προβλήματα που περιέχουν τετραγωνικές αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί τους είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών (Quadratic Programming – QPP) καθώς και τα προβλήματα που στους περιορισμούς τους περιέχουν τετραγωνικούς όρους, ανεξάρτητα της αντικειμενικής συνάρτησης (Quadratically Constrained Programming – QCQP) [31], [38].

- Προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών:

Σε ένα πρόβλημα συνεχών μεταβλητών, όλες οι μεταβλητές είναι πραγματικοί αριθμοί δηλαδή μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή. Υπάρχουν όμως προβλήματα που για να έχει νόημα η λύση τους, πρέπει κάποιες από τις μεταβλητές να λαμβάνουν ακέραιες τιμές. Τα προβλήματα αυτά ονομάζονται μικτά ακέραια προβλήματα (Mixed Integer Programming Problem – MIP). Αν τώρα όλες οι ακέραιες μεταβλητές υποχρεούνται να είναι δυαδικές (0/1), τότε το πρόβλημα ανήκει στον 0/1 μικτό ακέραιο προγραμματισμό (0/1 Mixed Integer Programming Problem – 0/1 MIP). Τέλος, αν όλες οι μεταβλητές του προβλήματος πρέπει να είναι ακέραιες, τότε το πρόβλημα ανήκει στον ακέραιο προγραμματισμό (Integer Programming Problem – IPP) [31].

Με βάση τις κατηγορίες που αναλύσαμε παραπάνω, τα προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού διακρίνονται σε προβλήματα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), προβλήματα μικτού ακέραιου μη – γραμμικού προγραμματισμού (MINLP), προβλήματα μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού (MIQP) και προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (MIQCP).

Τα προβλήματα που αναλύθηκαν παραπάνω παρουσιάζουν αρκετές διαφορές στην διαδικασία επίλυσής τους. Ουσιαστικά, την μεγαλύτερη ευκολία στην επίλυση παρουσιάζουν τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού αφού το εφικτό σύνολο των λύσεων είναι μία κυρτή περιοχή και για αυτό τον λόγο είναι δυνατή η εύρεση του ολικού βέλτιστου. Αντιθέτως, τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού ενδέχεται να παρουσιάζουν μη κυρτές ή και ασυνεχείς περιοχές. Η ιδιότητα αυτή καθιστά την επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων αρκετά δύσκολη διότι η ύπαρξη αρκετών τοπικών βέλτιστων οδηγεί σε αδυναμία γνώσης εάν μία λύση, από τις υποψήφιες, αντιστοιχεί στο ολικό βέλτιστο. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι τα QP προβλήματα, αν και ανήκουν στην κατηγορία του μη γραμμικού προγραμματισμού, επιλύονται ευκολότερα από τα περισσότερα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού. Στην περίπτωση ένταξης ακέραιων μεταβλητών, όπως είδαμε στις κατηγορίες του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος γίνεται πιο σύνθετη [31]. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα 0/1 ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με n μεταβλητές υπάρχουν 2^n συνδυασμοί που πρέπει να ελεγχθούν. Σε αυτά τα προβλήματα υπάρχει εκθετική αύξηση της δυσκολίας του προβλήματος διότι κάθε φορά που ο αριθμός των μεταβλητών αυξάνεται κατά μία μονάδα, ο αριθμός των λύσεων διπλασιάζεται .

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος όπως φαίνεται και στις εξισώσεις (5.8) - (5.11) περιέχει αρκετά έντονες μη γραμμικές συναρτήσεις (ημιτονοειδείς). Ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίστηκε αυτό το ζήτημα ήταν η γραμμική προσέγγιση των μη γραμμικών όρων. Παρόλα αυτά, το πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία του 0/1 μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού (0/1 MIQP) λόγω των αντικειμενικών συναρτήσεων (5.47), (5.48). Βέβαια, το πρόβλημα MIQP μας έδωσε την δυνατότητα μεγαλύτερης ευκολίας επίλυσης από το αρχικό MINLP πρόβλημα.

6.2 YALMIP

Για την ανάπτυξη και την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το YALMIP (= Yet Another LMI Parser). Το YALMIP αποτελεί μία εργαλειοθήκη για το περιβάλλον MATLAB, η οποία είναι αρκετά ισχυρή

ώστε να υποστηρίξει αρκετά μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της εργαλειοθήκης αυτής είναι τα ακόλουθα [39]:

- Απλοποίηση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης αφού η ανάπτυξη κώδικα για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος πραγματοποιείται κάνοντας χρήση τυπικών εντολών του προγράμματος MATLAB. Στην πραγματικότητα, τρεις βασικές εντολές του YALMIP είναι αρκετές για την πλειοψηφία των χρηστών ώστε να μοντελοποιήσουν και να επιλύσουν το δικό τους πρόβλημα βελτιστοποίησης.
- Ικανότητα μοντελοποίησης προβλημάτων χωρίς να παίζει ρόλο το μέγεθος των δεδομένων τους. Ουσιαστικά, με χρήση μίας εντολής και καθορίζοντας τον αριθμό των μεταβλητών της, δίνεται η δυνατότητα δήλωσης των μεταβλητών που είναι του ίδιου είδους με ενιαίο τρόπο. Έτσι, η ανάπτυξη του ίδιου κώδικα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έκφραση τόσο μικρών προβλημάτων όσο και για μεγαλύτερα προβλήματα.
- Υποστήριξη διάφορων μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού. Τα τελευταία χρόνια, το YALMIP έχει εξελιχθεί σημαντικά αφού ο χρήστης καθίσταται ικανός να μοντελοποιήσει τις περισσότερες κατηγορίες των προβλημάτων του μαθηματικού προγραμματισμού ενώ ταυτόχρονα απαλλάσσετε από τις δυσκολίες που αφορούν τις τεχνικές επίλυσης. Για την επίλυση των προβλημάτων το YALMIP είναι ικανό να αλληλεπιδράσει με ένα σύνολο επιλυτών, το οποίο περιλαμβάνει και επιλυτές δωρεάν διάθεσης αλλά και εμπορικούς, και έτσι ο χρήστης μπορεί εύκολα να ορίσει, μέσω μίας εντολής, τον κατάλληλο “solver” για την επίλυση του προβλήματος.

6.2.1 ΣΥΝΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ YALMIP

Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 μοντελοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού MATLAB και της εργαλειοθήκης YALMIP. Οι βασικές εντολές που

χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό των μεταβλητών, των περιορισμών αλλά και της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζονται παρακάτω [40]:

A. Μεταβλητές απόφασης

Τον κεντρικό ρόλο, σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, κατέχουν οι μεταβλητές απόφασης αφού μέσω αυτών προσδιορίζεται το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος. Στο YALMIP οι μεταβλητές απόφασης αντιπροσωπεύονται από τα αντικείμενα **sdpvar**. Όταν δηλώνεται μία μεταβλητή απόφασης τότε πρέπει να συμπεριλαμβάνονται και οι διαστάσεις της. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο n κόμβων η μεταβλητή απόφασης των μέτρων των τάσεων των κόμβων είναι ένας πίνακας n γραμμών, μίας στήλης και δηλώνεται με την παρακάτω εντολή:

$$BusVoltage = sdpvar(n, 1, 'full')$$

Επίσης, το YALMIP προσφέρει μία πληθώρα εντολών που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων τύπων μεταβλητών. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει στο πρόβλημα ακέραιες, δυαδικές αλλά και ημι-συνεχείς μεταβλητές (semi-continuous variables) (μία ημι-συνεχής μεταβλητή μπορεί να λάβει είτε την τιμή μηδέν είτε οποιαδήποτε άλλη τιμή μεταξύ ενός κάτω και άνω ορίου) κάνοντας χρήση των εντολών **intvar**, **binvar** και **semivar** αντίστοιχα.

Επιπλέον είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει σχεδόν όλες τις εντολές του MATLAB σε ένα αντικείμενο **sdpvar**.

B. Δήλωση περιορισμών

Όπως έχουμε αναφέρει, ένα εφικτό σύνολο ορίζεται το σύνολο των λύσεων που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος. Η δήλωση των περιορισμών στο YALMIP πραγματοποιείται αρκετά εύκολα. Παρακάτω, ο κώδικας που παρουσιάζεται δημιουργεί μία λίστα περιορισμών, οι οποίοι δηλώνουν ότι τα μέτρα των τάσεων όλων των κόμβων είναι μεταξύ των τιμών 0.95 α.μ και 1.05 α.μ ενώ η τάση του ζυγού ταλάντωσης είναι ίση με 1 α.μ.

```

constraints = [];
constraints = [constraints, 0.95 <= BusVoltage(:) <= 1.05];
constraints = [constraints, BusVoltage(slack_bus) == 1];

```

C. Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Εφόσον έχουν οριστεί οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί τότε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μπορεί να επιλυθεί. Αν θεωρήσουμε ότι θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση Z που υπόκειται στους περιορισμούς *constraints*, τότε μπορούμε εύκολα να το πραγματοποιήσουμε χρησιμοποιώντας την εντολή **optimize**. Μία ακόμα σημαντική εντολή, που διαθέτει το YALMIP, είναι η **sdpsettings** και χρησιμοποιείται για να καθορίσει ο χρήστης τον κατάλληλο επιλυτή για το πρόβλημα. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που περιγράφει την ελαχιστοποίηση της Z που υπόκειται στους περιορισμούς *constraints* χρησιμοποιώντας έναν συγκεκριμένο επιλυτή.

```

Objective = Z;
options = sdpsettings(solver, '...');
diagnostics = optimize(constraints, Objective, options);

```

6.3 Ο ΕΠΙΛΥΤΗΣ GUROBI

Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5, ανήκει στην κατηγορία των μικτών ακέραιων τετραγωνικών προβλημάτων.

Στην παρούσα εργασία για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο επιλυτής GUROBI [41]. Ο GUROBI προσφέρει αρκετές δυνατότητες και είναι ικανός να λύσει προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (LP), τετραγωνικού προγραμματισμού (QP), μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού (MIQP), τετραγωνικών περιορισμών (QCP) και μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς

περιορισμούς (MIQCP) σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ο επιλυτής GUROBI για την λύση των προβλημάτων μικτού ακέραιου προγραμματισμού είναι ο Branch-and-Bound.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο θα γίνει μία παρουσίαση των εφαρμογών του μοντέλου της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης σε ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος. Τα δίκτυα που θα χρησιμοποιηθούν είναι δίκτυα 33 και 69 κόμβων (ζυγών), τα οποία θα αποτελούνται από δίκτυα με διείσδυση ΔΠ και από δίκτυα χωρίς διείσδυση ΔΠ, και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Οι διαταραχές που θα προσπαθήσουμε να αντιμετωπίσουμε αναφέρονται σε σφάλματα γραμμών, κόμβων αλλά και σε ολική διακοπή (διακοπή παροχής του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ) των δικτύων με διείσδυση ΔΠ. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος της βελτιστοποίησης, στα δίκτυα χωρίς διείσδυση ΔΠ, αποτελούνται από τις απαραίτητες αλλαγές κατάστασης των διακοπών και από τα φορτία που κατάφεραν να τροφοδοτήσουν. Από την άλλη, στα ΔΔ με διείσδυση ΔΠ θα εξάγονται και αποτελέσματα για την περικοπή ισχύος των ΜΔΠ που διαθέτει το εκάστοτε δίκτυο.

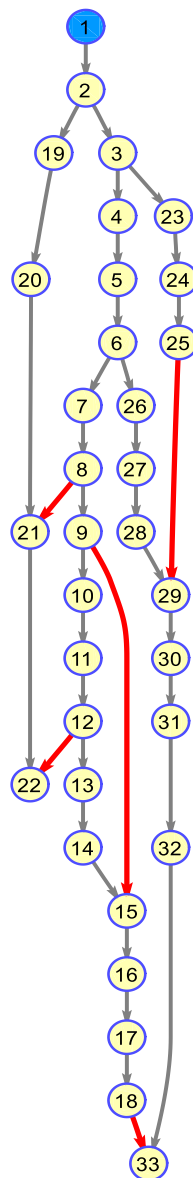
Όλες οι εφαρμογές του μοντέλου της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκαν με χρήση Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής Intel Core i3 370M @ 2.40 GHz
- Μνήμη RAM 8 GB
- Σκληρός δίσκος Samsung SSD 850 EVO

7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 33 ΚΟΜΒΩΝ

Το δίκτυο των 33 κόμβων αποτελείται από 1 υποσταθμό, 33 κόμβους και 37 γραμμές, 20 εκ των οποίων είναι εξοπλισμένες με τηλεχειριζόμενο διακόπτη και οι

υπόλοιπες είναι εξοπλισμένες με χειροκίνητο διακόπτη. Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει την αρχική κατάσταση των γραμμών με διακόπτη, δηλαδή την κατάστασή τους στην αρχική τοπολογία του ΔΔ. Επίσης, η αρχική τοπολογία του ΔΔ 33 κόμβων απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1.



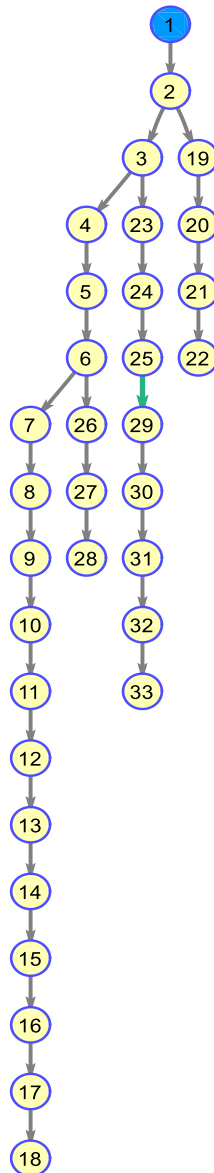
Σχήμα 7.1: Αρχική τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων

ΕΙΔΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΟΙ	ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΙ
ΚΛΕΙΣΤΟΙ	(1, 2), (2, 19), (19, 20), (21, 22), (3,4), (6, 7), (9,10), (11, 12), (13, 14), (15,16), (3, 23), (23, 24), (24, 25), (26, 27), (28, 29)	(2, 3), (4, 5), (5, 6), (7, 8), (8, 9), (10, 11), (12, 13), (14, 15), (16, 17), (17, 18), (6, 26), (27, 28), (29, 30), (30, 31), (31, 32), (32, 33), (20, 21)
ΑΝΟΙΚΤΟΙ	(8, 21), (9,15), (12,22), (18, 33), (25,29)	
Πίνακας 7.1: Αρχική κατάσταση διακοπτών ΔΔ 33 κόμβων		

7.2.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29)

Όπως είδαμε και στις εφαρμογές του Κεφαλαίου 4, η διακοπή λειτουργίας της γραμμής που συνδέει τους κόμβους 28 και 29 έχει ως αποτέλεσμα την διακοπή τροφοδότησης των κόμβων 29, 30, 31, 32, 33. Στον Πίνακα 7.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ και στο Σχήμα 7.2 απεικονίζεται το δίκτυο με την γραμμή που χρειάστηκε να συνδεθεί ώστε να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα φορτία δίνοντας προτεραιότητα στα κρίσιμα φορτία του δικτύου.

Ζήτηση κόμβων 29 – 33:	0.74 MW, 0.34 MVar
Σύνδεση γραμμής:	(25, 29)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0.58 MW, 0 MVar
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	4.657 sec
Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 33 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)	

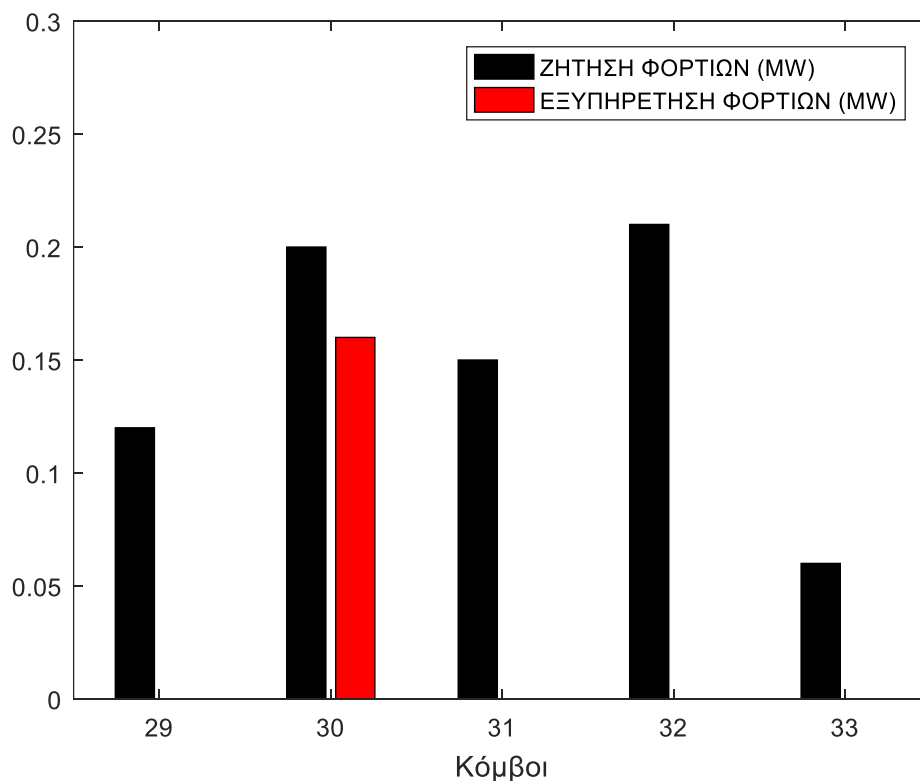


Σχήμα 7.2: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)

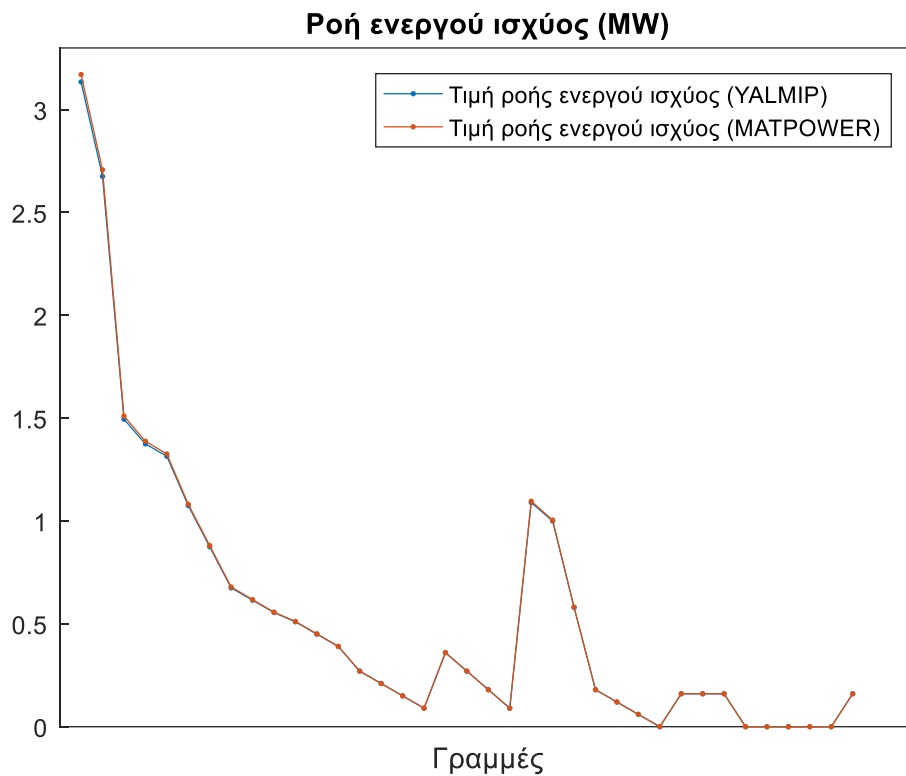
Το Σχήμα 7.3 απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις της ζήτησης των φορτίων σε MW και της ζήτησης που εξυπηρετήθηκε μετά την σύνδεση της κατάλληλης γραμμής. Παρατηρούμε ότι η επαναδιαμόρφωση του δικτύου δεν μπόρεσε να ικανοποιήσει

κάποια φορτία διότι έδωσε προτεραιότητα στην μερική εξυπηρέτηση των φορτίων που θεωρήθηκαν κρίσιμα λόγω του συντελεστή βάρους.

Τέλος, στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης για τις τιμές της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του δικτύου σε σύγκριση με τις τιμές που εξήχθησαν από το MATPOWER μετά την εκτέλεση του προβλήματος ροής φορτίου με δεδομένη την αναδιαμορφωμένη τοπολογία του ΔΔ.



Σχήμα 7.3: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 33 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)



Σχήμα 7.4: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 33 κόμβων μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)

7.2.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (2, 19) ΚΑΙ (13, 14)

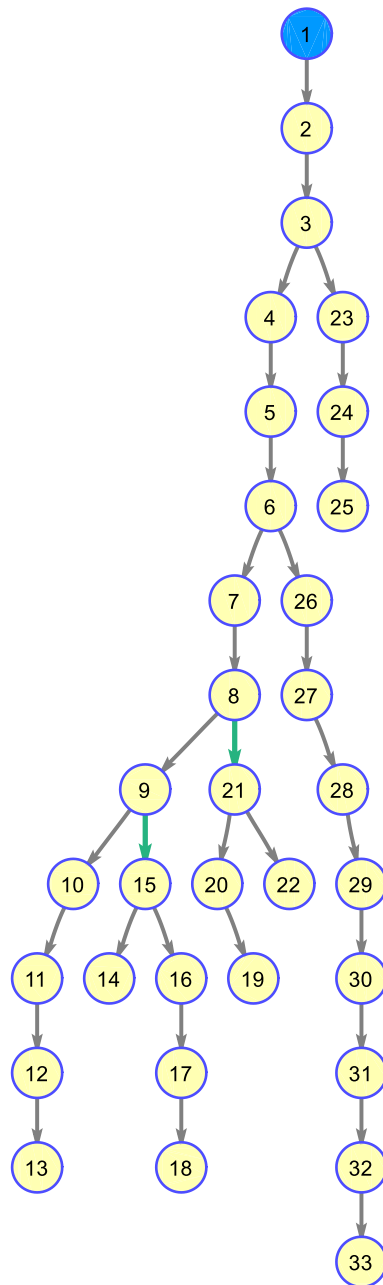
Σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας των γραμμών (2, 19) και (13, 14) θα απομονωθεί μεγάλη περιοχή του δικτύου. Συγκεκριμένα, η διακοπή λειτουργίας της γραμμής (2, 19) θα προκαλέσει διακοπή τροφοδότησης στους κόμβους 19, 20, 21, 22 ενώ η διακοπή λειτουργίας της γραμμής (13, 14) θα είναι υπεύθυνη για την απομόνωση των κόμβων 14, 15, 16, 17, 18. Επομένως, θα χρειαστεί να συνδεθούν παραπάνω από μία γραμμές ώστε να αποκατασταθεί η λειτουργία του ΔΔ σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την

επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης και το Σχήμα 7.5 απεικονίζει το δίκτυο μετά την επαναδιαμόρφωσή του.

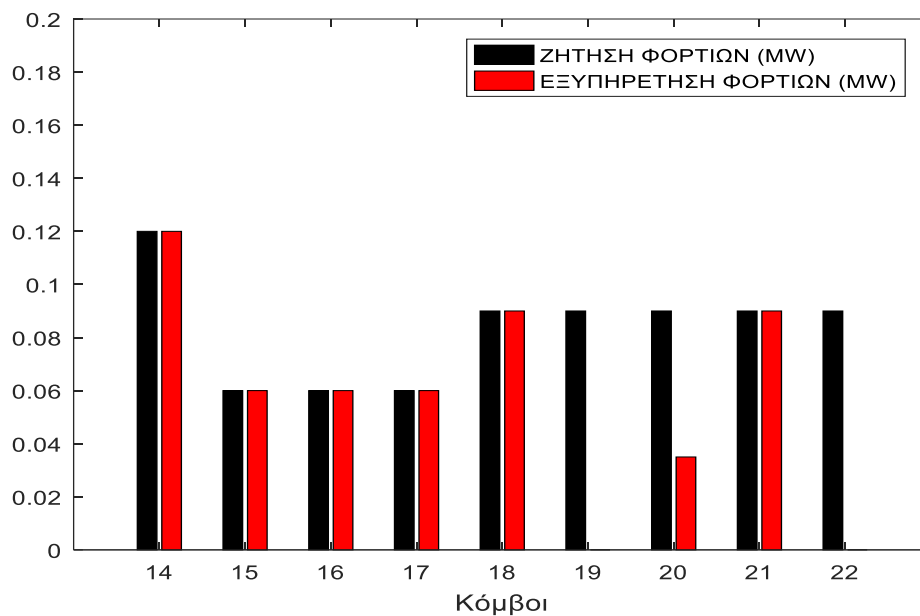
Στο Σχήμα 7.6 μπορούμε να διακρίνουμε τα φορτία που τροφοδοτήθηκαν πλήρως και αυτά που τροφοδοτήθηκαν μερικώς. Παρατηρούμε ότι η επαναδιαμόρφωση του δικτύου τροφοδότησε πλήρως τα φορτία των κόμβων 14 - 18. Επιπλέον, μία σημαντική παρατήρηση είναι η εξυπηρέτηση των κόμβων 20, 21 σε σχέση με τα φορτία των κόμβων 19, 22 τα οποία δεν τροφοδοτήθηκαν. Ο λόγος είναι ότι δόθηκε προτεραιότητα στα φορτία των κόμβων 20, 21 (κρίσιμα φορτία) και έτσι υπήρχε μία διαφοροποίηση στις τιμές των βαρών τους σε σχέση με τα φορτία των άλλων δύο κόμβων.

Στο Σχήμα 7.7 απεικονίζεται η γραφική παράσταση των τιμών της ροής ενεργού ισχύος που προέκυψαν από το πρόβλημα της βελτιστοποίησης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του προβλήματος της ροής φορτίου, με δεδομένη την αναδιαμορφωμένη τοπολογία του ΔΔ, που εξήχθησαν από το MATPOWER. Παρατηρούμε ότι, και σε αυτήν την περίπτωση σφάλματος, η μέθοδος γραμμικής προσέγγισης των εξισώσεων της βέλτιστης ροής ισχύος που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 δεν εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις.

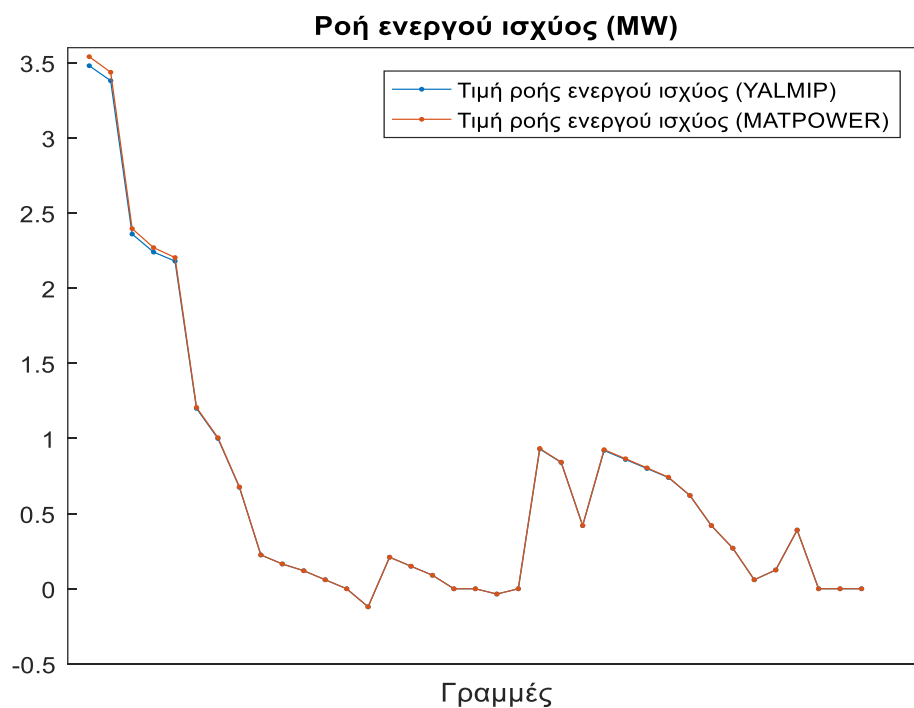
Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	0.75 MW, 0.33 MVar
Σύνδεση γραμμών:	(9, 15), (8, 21)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0.235 MW, 0 MVar
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	1.088 sec
Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 33 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (2, 19) και (13, 14)	



Σχήμα 7.5: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (2, 19) και (13, 14)



Σχήμα 7.6: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 33 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (2, 19) και (13, 14)



Σχήμα 7.7: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 33 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (2, 19) και (13, 14)

7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 33 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΠ

Το ΔΔ 33 κόμβων με διείσδυση ΔΠ, που θα εξετάσουμε σε αυτό το Κεφάλαιο, έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το δίκτυο που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 4. Οι ΜΔΠ που είναι διασυνδεδεμένες με το δίκτυο φέρουν μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ που είναι ίση με το 40 % του μέγιστου φορτίου και τα δεδομένα τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4. Υπενθυμίζουμε ότι η άεργος ισχύς κάθε μονάδας είναι δυνατόν να προσαρμοστεί ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου εξαιτίας του κυμαινόμενου συντελεστή ισχύος (βλ. σχέση (5.40)). Επίσης, η αρχική κατάσταση των διακοπών φαίνεται στον Πίνακα 7.1 και η αρχική τοπολογία του ΔΔ 33 κόμβων με διείσδυση ΔΠ απεικονίζεται στο Σχήμα 7.8.

ΜΔΠ	ΖΥΓΟΣ	ΕΙΔΟΣ	P_{DG} (MW)
DG_1	25	A/Γ	0.5
$DG_2 - DG_{10}$	10 – 12, 15, 16, 18, 19, 22, 33	Φ/B	0.1

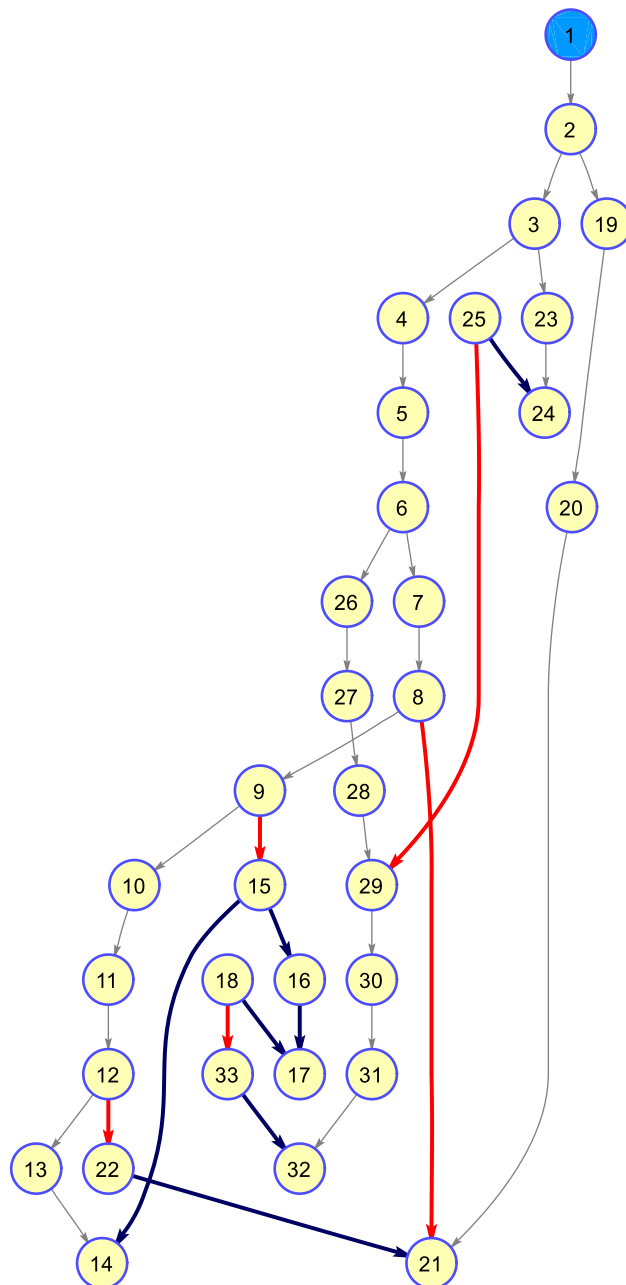
Πίνακας 7.4: Δεδομένα ΜΔΠ του ΔΔ 33 κόμβων με διείσδυση ΔΠ

7.3.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (7, 8) ΚΑΙ (23, 24)

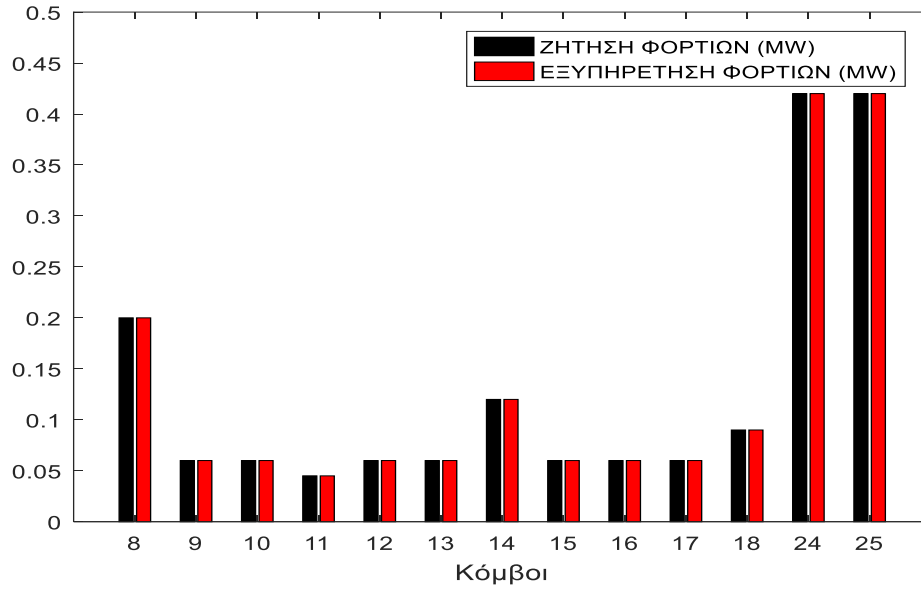
Η διακοπή λειτουργίας της γραμμής που συνδέει τους κόμβους 7 και 8 έχει ως συνέπεια την διακοπή τροφοδότησης των κόμβων 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 και 18, ενώ η διακοπή λειτουργίας της γραμμής (23, 24) επηρεάζει τους κόμβους 24 και 25. Για να μπορέσει να δημιουργηθεί ένα νέο μονοπάτι για την κατεύθυνση της ροής ισχύος προς τους απομονωμένους κόμβους και να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του ΔΔ, χρειάστηκε να κλείσει ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής που συνδέει τους κόμβους 29 και 25 αλλά και ο τηλεχειριζόμενος διακόπτης της γραμμής (22, 12). Με την σύνδεση των γραμμών αυτών, το αναδιαμορφωμένο δίκτυο είναι ικανό να τροφοδοτήσει πλήρως όλα τα φορτία των απομονωμένων κόμβων,

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.9. Ο Πίνακας 7.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης και το Σχήμα 7.11 απεικονίζει το ΔΔ μετά από την σύνδεση των κατάλληλων γραμμών.

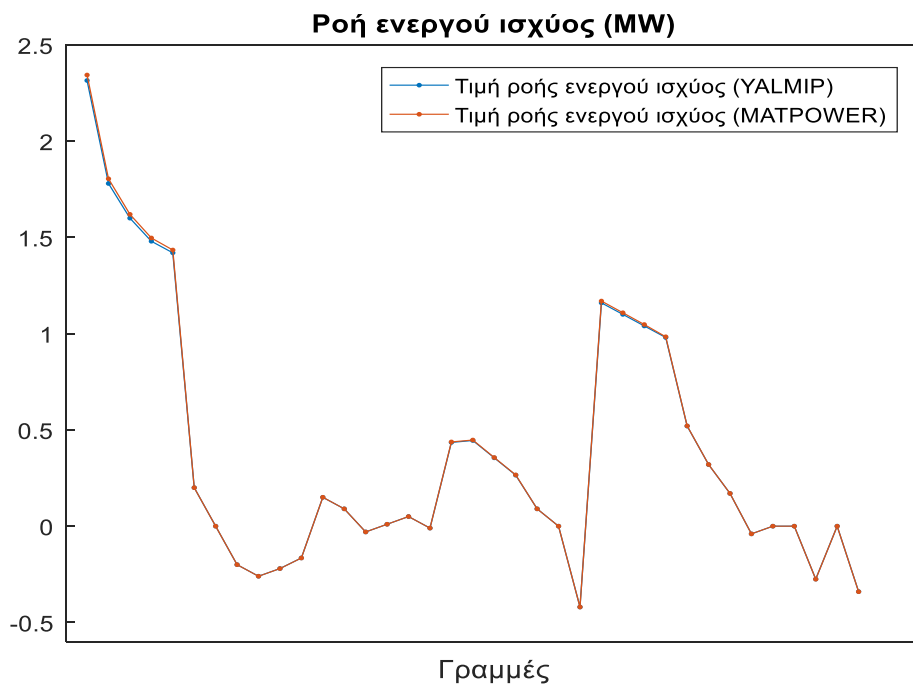
Τέλος, στο Σχήμα 7.10 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του προβλήματος με τα αποτελέσματα που εξάγονται από το MATPOWER με δεδομένη την αναδιαμορφωμένη τοπολογία του ΔΔ.



Σχήμα 7.8: Αρχική τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων με διείδυση ΔΠ



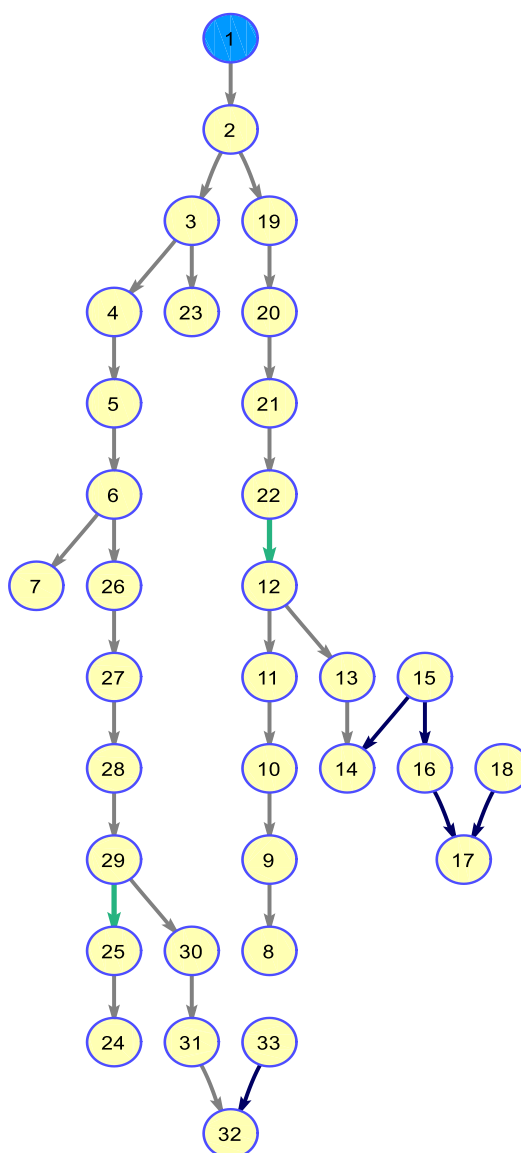
Σχήμα 7.9: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 33 κόμβων, με διεύθυνση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (7, 8) και (23, 24)



Σχήμα 7.10: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 33 κόμβων, με διεύθυνση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (7, 8) και (23, 24)

Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	1.715 MW, 0.81 MVar
Σύνδεση γραμμών:	(22, 12), (29, 25)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0 MW, 0 MVar
Περικοπή ενεργού ισχύος ΜΔΠ:	0 MW
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	0.56 sec

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 33 κόμβων, με διείδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (7, 8) και (23, 24)



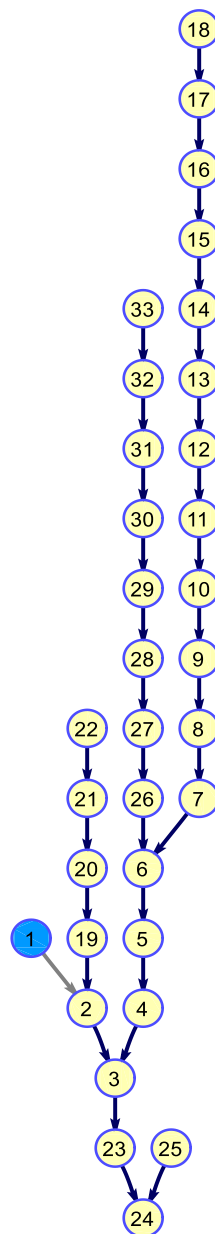
Σχήμα 7.11: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων, με διείδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (7, 8) και (23, 24)

7.3.2 ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟΝ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ 1

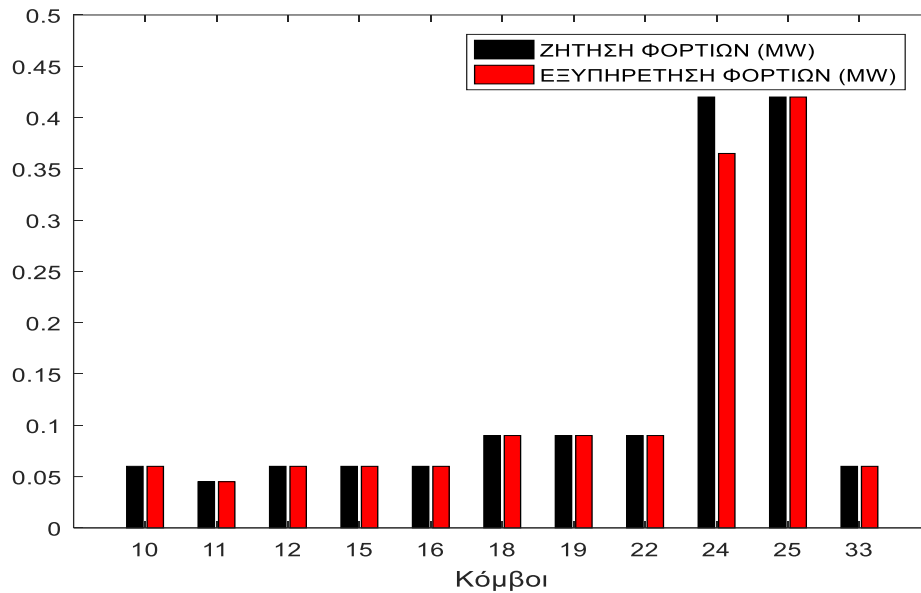
Σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος στον Μ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ, θα διακοπεί η τροφοδότηση όλων των συνδεδεμένων φορτίων του ΔΔ. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η παροχή ισχύος, μετά από την ολική διακοπή τροφοδότησης εξαιτίας της εμφάνισης σφάλματος στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ, προέρχεται μόνο από τις ΜΔΠ. Όπως έχουμε αναφέρει, οι ΜΔΠ μπορούν να παράγουν και άεργο ισχύ, εξαιτίας του Σ.Ι. Επιπλέον, είδαμε και στην Ενότητα 2.4.1 ότι είναι αναγκαία η ύπαρξη μονάδων παραγωγής με δυνατότητα αυτόματης εκκίνησης (black start capability) ώστε να ξεκινήσει η παραγωγή. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι υπάρχουν τέτοιες μονάδες που είναι ικανές να τροφοδοτήσουν τις ΜΔΠ, που είναι εγκατεστημένες στο δίκτυο που θα μελετήσουμε, και με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η συνέχεια της διαδικασίας αποκατάστασης με την εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων. Ο Πίνακας 7.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης και το Σχήμα 7.12 απεικονίζει το αναδιαμορφωμένο δίκτυο.

Όπως μπορούμε να δούμε και στο Σχήμα 7.13, οι ΜΔΠ, αφού τροφοδότησαν το φορτίο του κόμβου που είναι εγκατεστημένες (λόγω του συντελεστή βάρους), έδωσαν προτεραιότητα στην τροφοδότηση κάποιων φορτίων λόγω των μεγαλύτερων τιμών βάρους που τα αντιπροσώπευαν στην αντικειμενική συνάρτηση. Τα υπόλοιπα φορτία του ΔΔ που είχαν χαμηλότερη τιμή βάρους, δηλαδή θεωρήθηκαν λιγότερο κρίσιμα, δεν τροφοδοτήθηκαν. Στο Σχήμα 7.14 απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ με διείδυση ΔΠ.

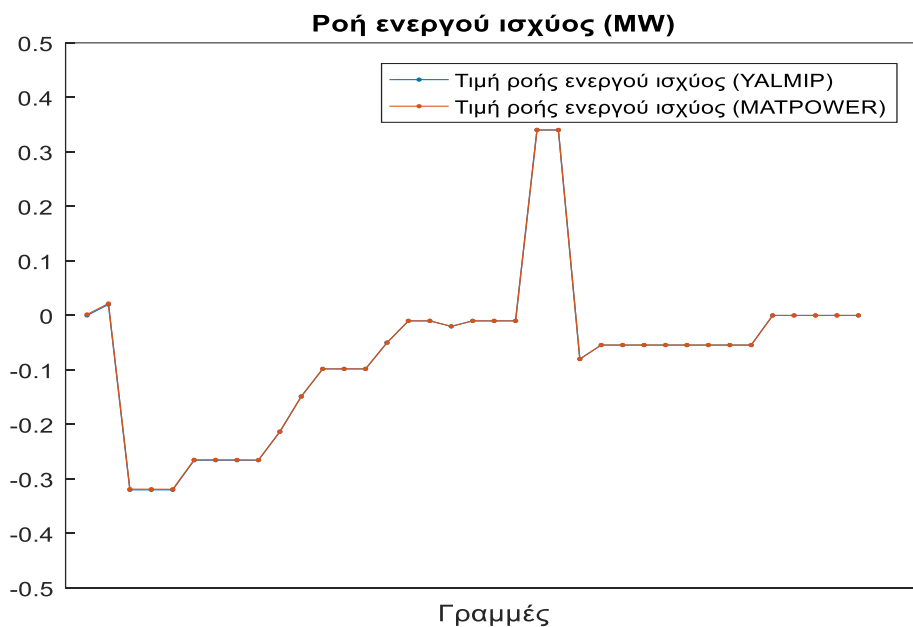
Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	3.715 MW, 1.76 MVar
Σύνδεση γραμμών:	-
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	2.315 MW, 1.3 MVar
Περικοπή ενεργού ισχύος ΜΔΠ:	0 MW
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	302.7063 sec
Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 33 κόμβων, με διείδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας του υποσταθμού	



Σχήμα 7.12: Τοπολογία ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας του υποσταθμού (το βέλος που αντιστοιχεί από τον κόμβο 1 στον 2 δεν έχει σημασία αφού δεν υπάρχει παροχή ισχύος από τον υποσταθμό)



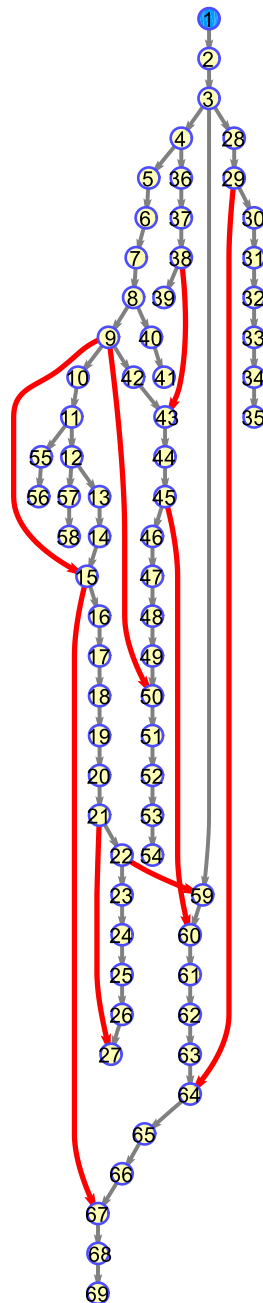
Σχήμα 7.13: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωσή του ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας του υποσταθμού



Σχήμα 7.14: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 33 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας του υποσταθμού

7.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΚΟΜΒΩΝ

Το ΔΔ 69 κόμβων, που εμφανίζεται στο Σχήμα 7.15, είναι ένα ακτινικό δίκτυο που αποτελείται από έναν υποσταθμό, 69 κόμβους, 76 γραμμές και 34 διακόπτες. Η αρχική κατάσταση των διακοπών αλλά και το είδος τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7. Τα επιπλέον χαρακτηριστικά του ΔΔ αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.



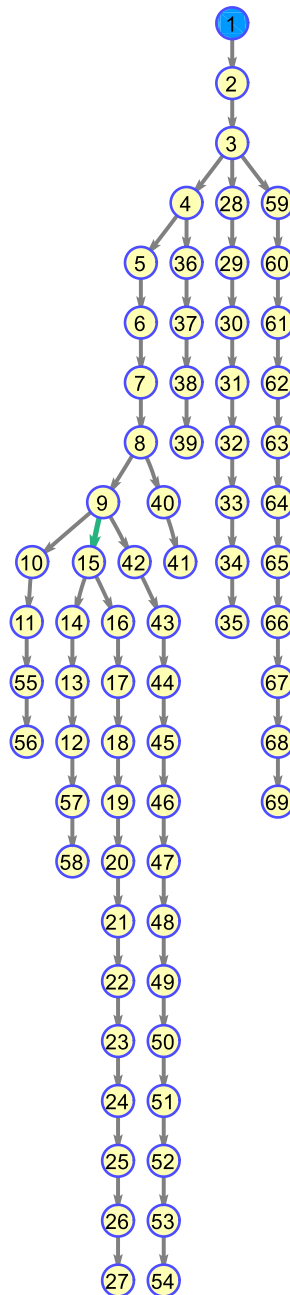
Σχήμα 7.15: Αρχική τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων

ΕΙΔΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΟΙ	ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΙ
ΚΛΕΙΣΤΟΙ	(3, 4), (9,10), (15, 16), (3, 28), (33, 34), (52, 53), (12, 57), (21, 22)	(1,2), (2, 3), (4, 5), (5, 6), (8,9), (11, 12), (12, 13), (14, 15), (18, 19), (20, 21), (22, 23), (25, 26), (43, 44), (60, 61), (4, 36), (8,40), (9,42), (49, 50)
ΑΝΟΙΚΤΟΙ	(9, 15), (21, 27), (38, 43), (9, 50), (45, 60), (29, 64), (22, 59), (15, 67)	
Πίνακας 7.7: Αρχική κατάσταση διακοπών ΔΔ 69 κόμβων		

7.4.1 ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟΝ ΚΟΜΒΟ 12

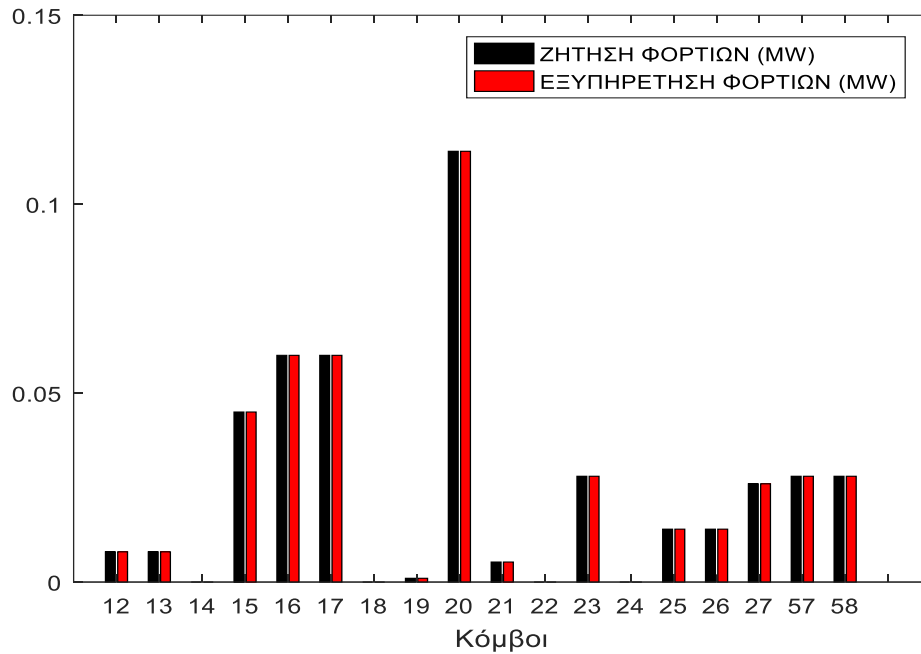
Σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος στον κόμβο 12, τότε οι διακόπτες των γραμμών (11, 12), (12, 57) και (12, 13) ανοίγουν αυτόματα έτσι ώστε να απομονώσουν το σφάλμα. Επομένως, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 7.15, ένα μεγάλο κομμάτι του δικτύου βγαίνει εκτός λειτουργίας. Το κομμάτι, αυτό, περιλαμβάνει τους κόμβους 12 μέχρι 27 και τους κόμβους 57, 58. Τα αποτελέσματα του προβλήματος της βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.8 και το δίκτυο μετά την επαναδιαμόρφωσή του απεικονίζεται στο Σχήμα 7.16.

Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	0.4393 MW, 0.2938 MVar
Σύνδεση γραμμών:	(9, 15)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0 MW, 0 MVar
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	0.875 sec
Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 69 κόμβων λόγω σφάλματος στον κόμβο 12	

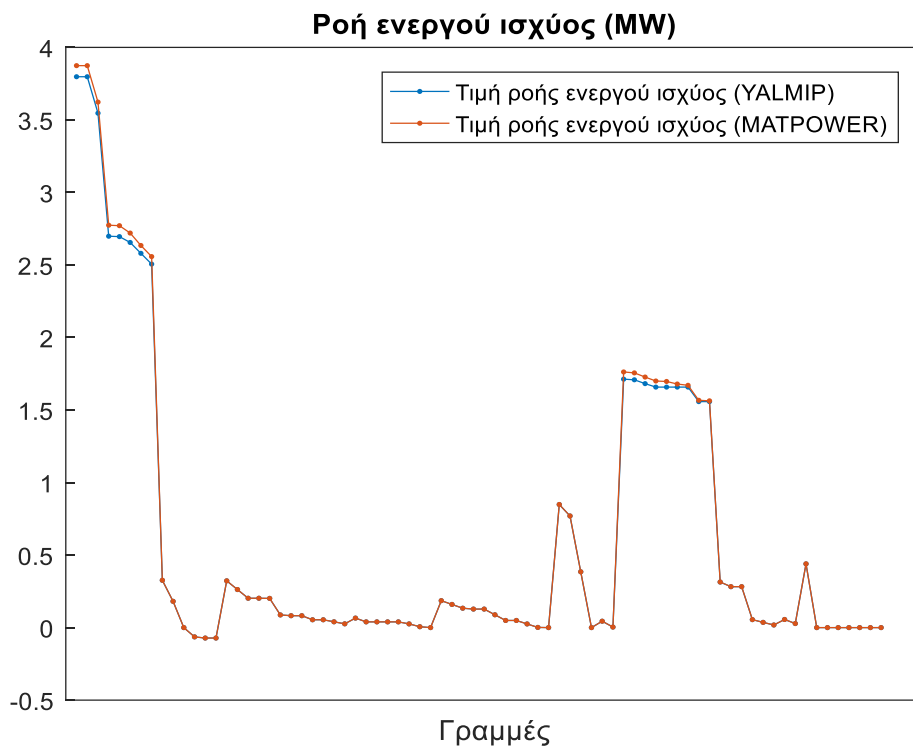


Σχήμα 7.16: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στον κόμβο 12

Από τον Πίνακα 7.8, παρατηρούμε ότι η σύνδεση της (9, 15) κατάφερε να τροφοδοτήσει πλήρως όλα τα απομονωμένα, λόγω σφάλματος, φορτία και η γραφική παράσταση της εξυπηρετούμενης ζήτησης απεικονίζεται στο Σχήμα 7.17. Επίσης, το Σχήμα 7.18 παρουσιάζει την γραφική παράσταση των τιμών της ροής ενεργού ισχύος.



Σχήμα 7.17: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 69 κόμβων λόγω σφάλματος στον κόμβο 12

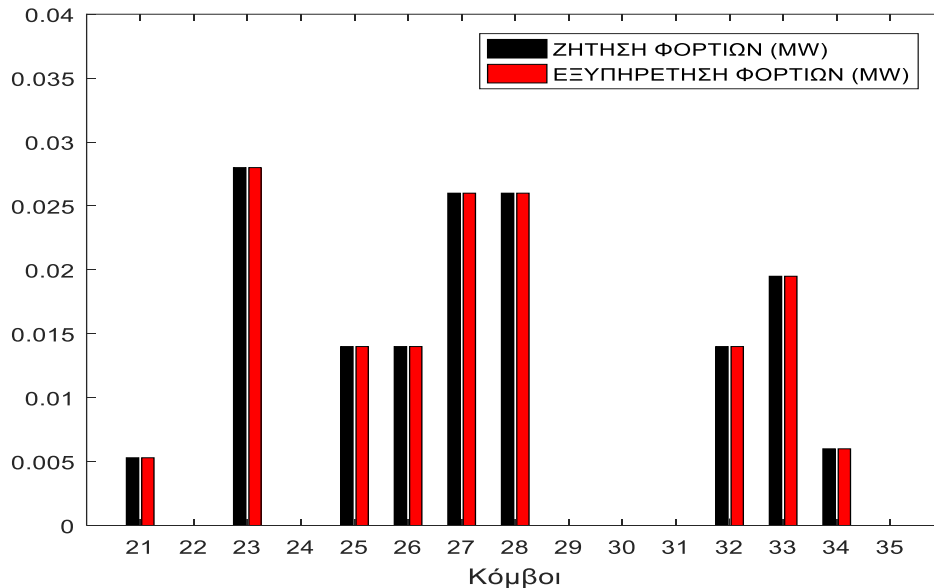


7.4.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (3, 28) ΚΑΙ (20, 21)

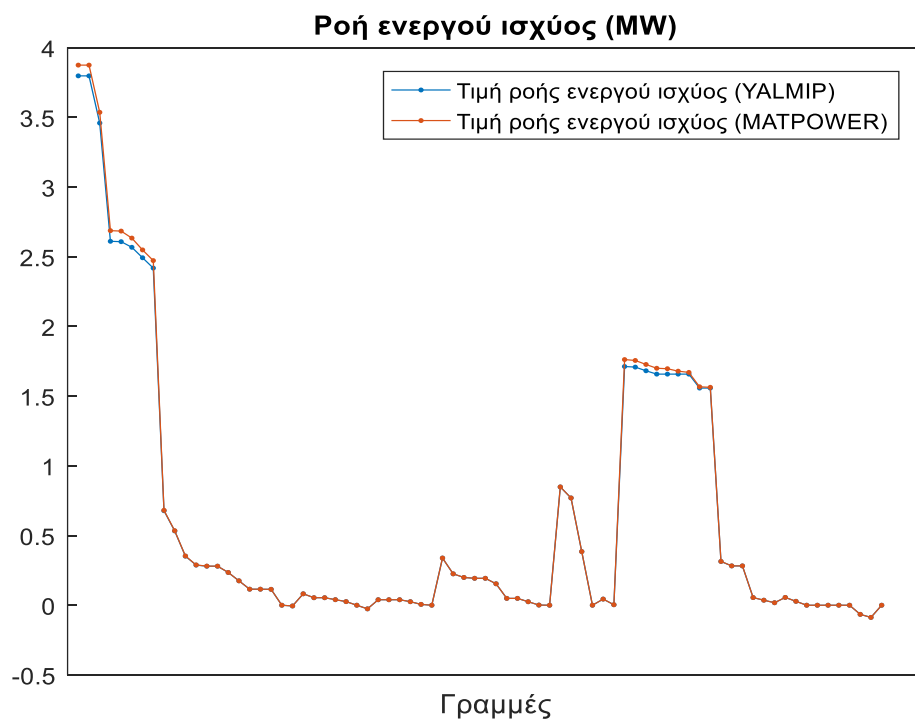
Η εμφάνιση σφάλματος της γραμμής (3,28) έχει ως συνέπεια την διακοπή τροφοδοσίας στους κόμβους 28 – 35, ενώ η διακοπή λειτουργίας της γραμμής (20, 21) επηρεάζει την τροφοδότηση των κόμβων 21 – 27. Συνεπώς, ένα μεγάλο κομμάτι του δικτύου επηρεάζεται από την διακοπή λειτουργίας αυτών των γραμμών και για να αποκατασταθεί η λειτουργία του δικτύου χρειάστηκε να συνδεθούν οι γραμμές (59, 22), (64, 29), οι οποίες είναι εξοπλισμένες με τηλεχειριζόμενο διακόπτη. Με την σύνδεση των γραμμών, τα φορτία των κόμβων που επηρεάστηκαν από το σφάλμα τροφοδοτούνται πλήρως όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.19. Επιπλέον, ο Πίνακας 7.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης λόγω εμφάνισης σφάλματος στις γραμμές (3, 28) και (20, 21) και το Σχήμα 7.21 απεικονίζει το ΔΔ μετά την επαναδιαμόρφωση.

Επίσης, το Σχήμα 7.20 παρουσιάζει την ροή ενεργού ισχύος που υπολογίστηκε από το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του προβλήματος ροής φορτίου που εκτελέστηκε από το MATPOWER με δεδομένη την αναδιαμορφωμένη τοπολογία του ΔΔ.

Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	0.1528 MW, 0.1082 MVar
Σύνδεση γραμμών:	(59, 22), (64, 29)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0 MW, 0 MVar
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	1.087 sec
Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 69 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (3, 28) και (20, 21)	

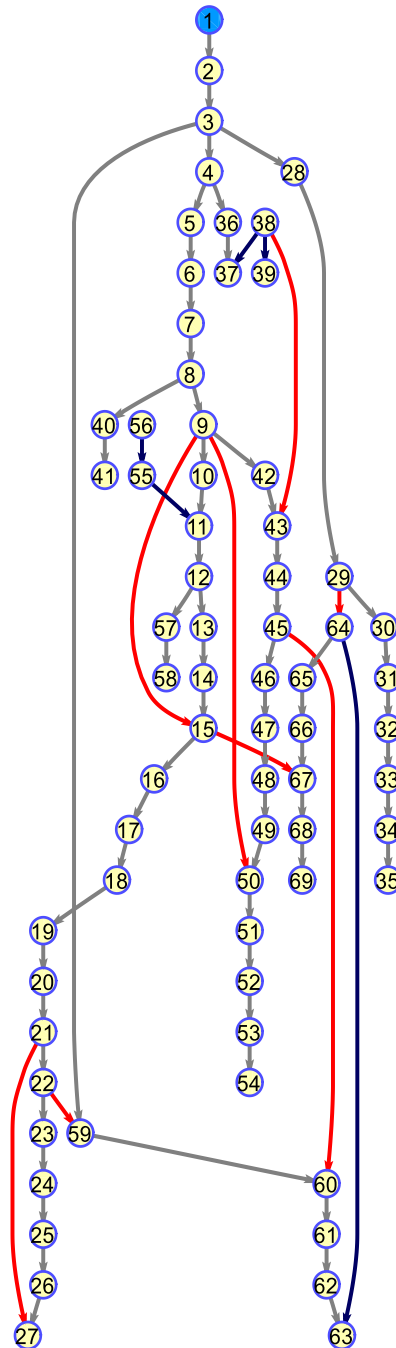


Σχήμα 7.19: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 69 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (3, 28) και (20, 21)



Σχήμα 7.20: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας των γραμμών (3, 28) και (20, 21)

προσαρμοσθεί ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου εξαιτίας του κυμαινόμενου συντελεστή ισχύος και έτσι μπορεί να παράγει και άεργο ισχύ. (βλ. σχέση (5.40)). Επίσης, η αρχική κατάσταση των διακοπών φαίνεται στον Πίνακα 7.7 και η αρχική τοπολογία του ΔΔ 69 κόμβων με διείσδυση ΔΠ απεικονίζεται στο Σχήμα 7.22.



Σχήμα 7.22: Αρχική τοπολογία του ΔΔ 69 κόμβων με διείσδυση ΔΠ

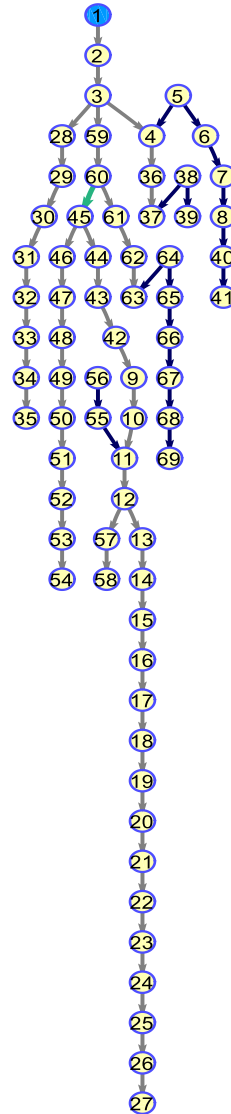
ΜΔΠ	ΖΥΓΟΣ	ΕΙΔΟΣ	P_{DG} (MW)
DG_1	38	A/Γ	0.5
$DG_2 - DG_{10}$	3, 5, 7, 10, 15, 20, 50, 56, 64	Φ/Β	0.1
Πίνακας 7.10: Δεδομένα ΜΔΠ του ΔΔ 69 κόμβων			

7.5.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9)

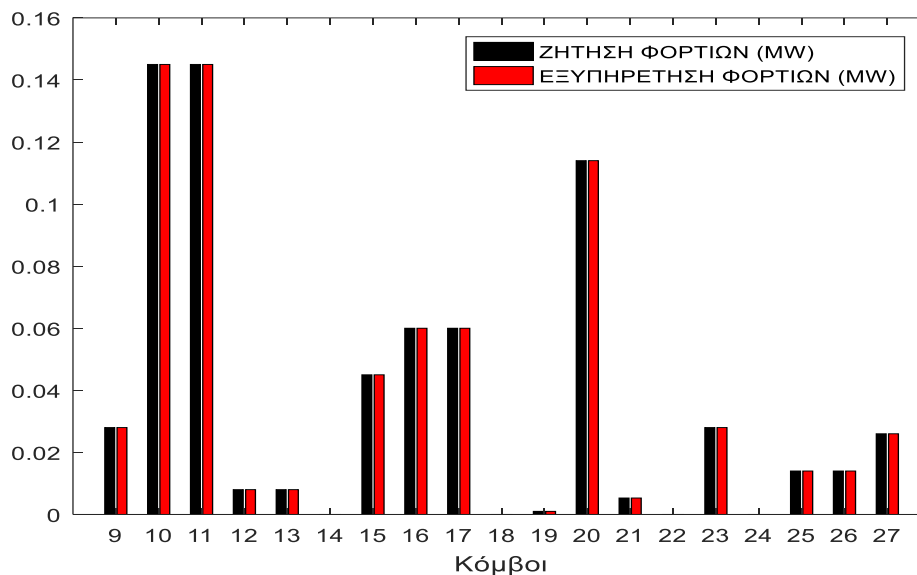
Σε περίπτωση σφάλματος στην γραμμή (8, 9), ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής αυτής για την απομόνωση του σφάλματος. Τα φορτία των κόμβων 9 – 27, 42 – 58 δεν τροφοδοτούνται. Ο Πίνακας 7.11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης και τις γραμμές που με την σύνδεσή τους ικανοποιούν τους λειτουργικούς περιορισμούς του ΔΔ. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.11 παρατηρούμε ότι η γραμμή που είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο είναι η (60, 45) αφού εξυπηρετεί μεγαλύτερο μέρος των φορτίων. Το αναδιαμορφωμένο δίκτυο 69 κόμβων μετά τη σύνδεση της κατάλληλης γραμμής απεικονίζεται στο Σχήμα 7.23.

Τα Σχήματα 7.24(α) και 7.24(β) παρουσιάζουν την εξυπηρετούμενη ζήτηση των απομονωμένων κόμβων. Επίσης, το Σχήμα 7.25 απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις των ρών ενεργού ισχύος από τα αποτελέσματα που εξήγαγε το YALMIP και τα αποτελέσματα του προβλήματος ροής φορτίου που λύθηκε με χρήση του MATPOWER με δεδομένη την αναδιαμορφωμένη τοπολογία του ΔΔ.

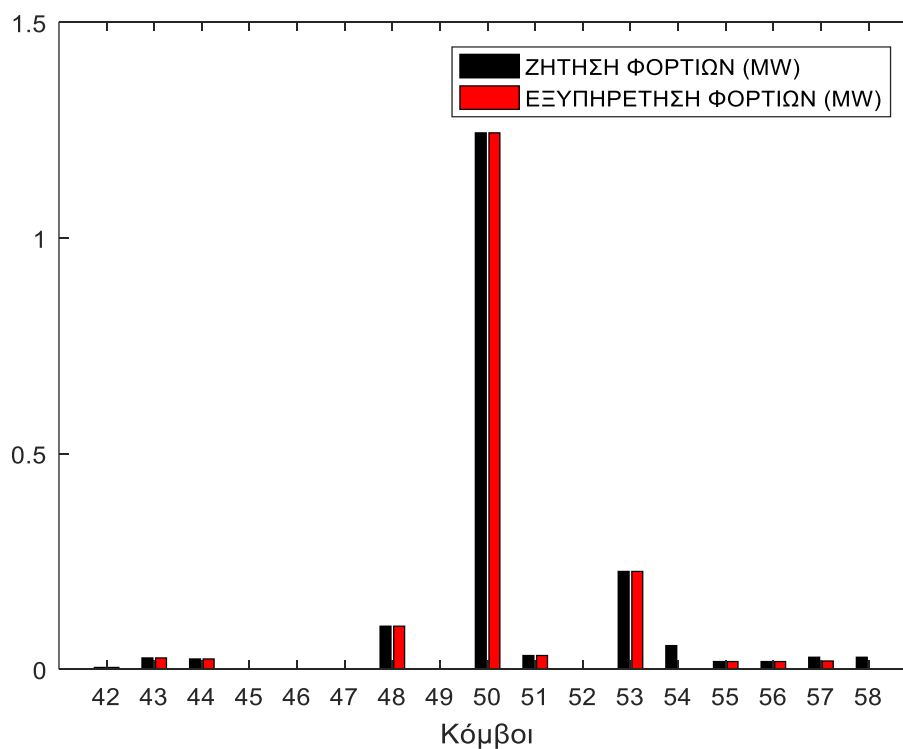
Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	2.5060 MW, 1.7743 MVar
Σύνδεση γραμμών:	(60, 45)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0.0917 MW, 0 MVar
Περικοπή ενεργού ισχύος ΜΔΠ:	0 MW
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	1.334 sec
Πίνακας 7.11: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 69 κόμβων, με διεύθυνση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8,9)	



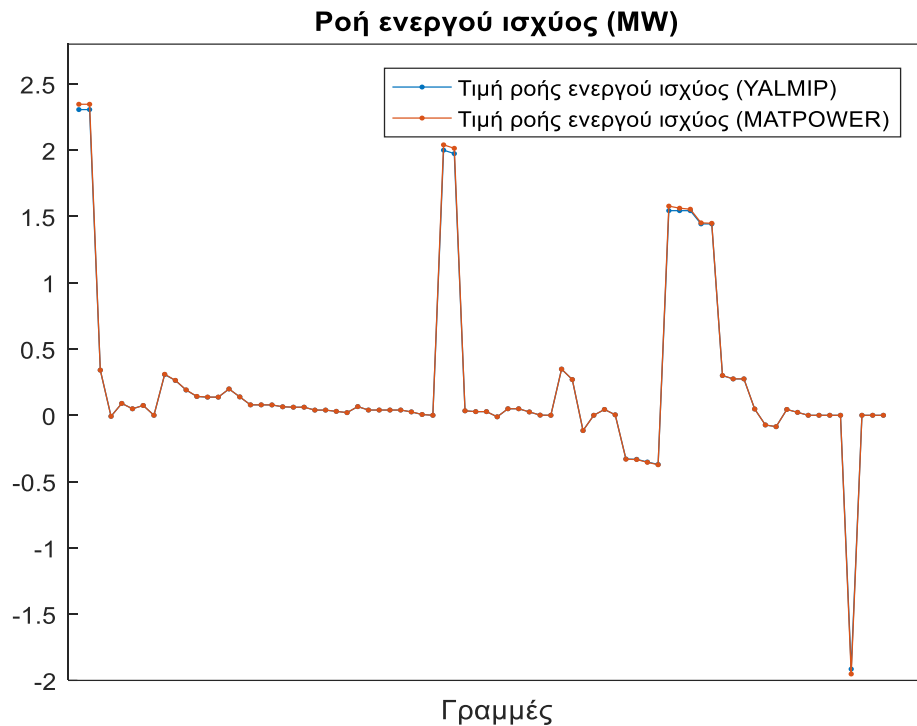
Σχήμα 7.23: Τοπολογία ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά από την επαναδιαμόρφωσή του λόγω σφάλματος στην γραμμή (8, 9)



Σχήμα 7.24(α): Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8, 9)



Σχήμα 7.24(β): Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8, 9)



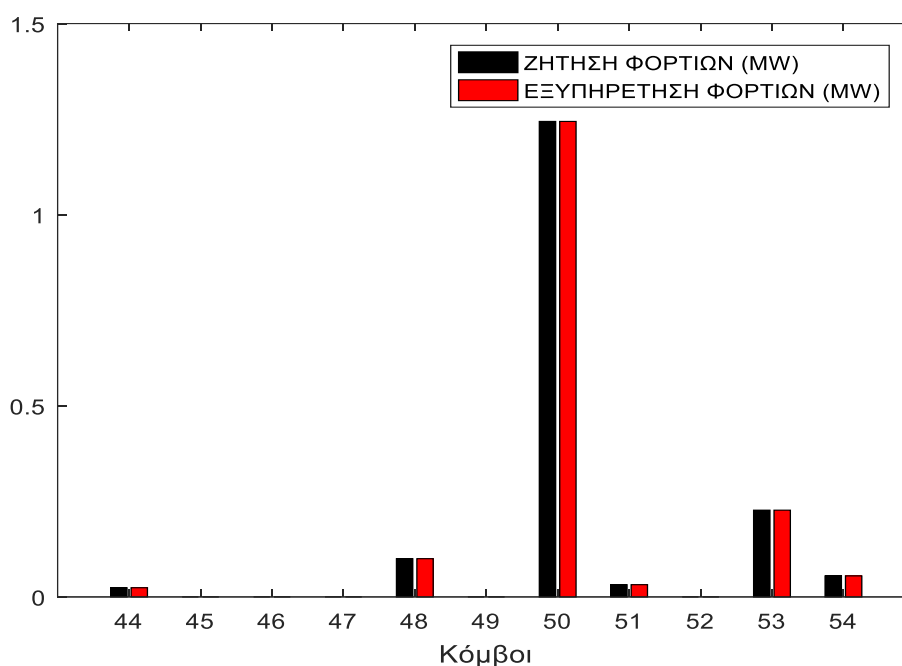
Σχήμα 7.25: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8,9)

7.5.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44)

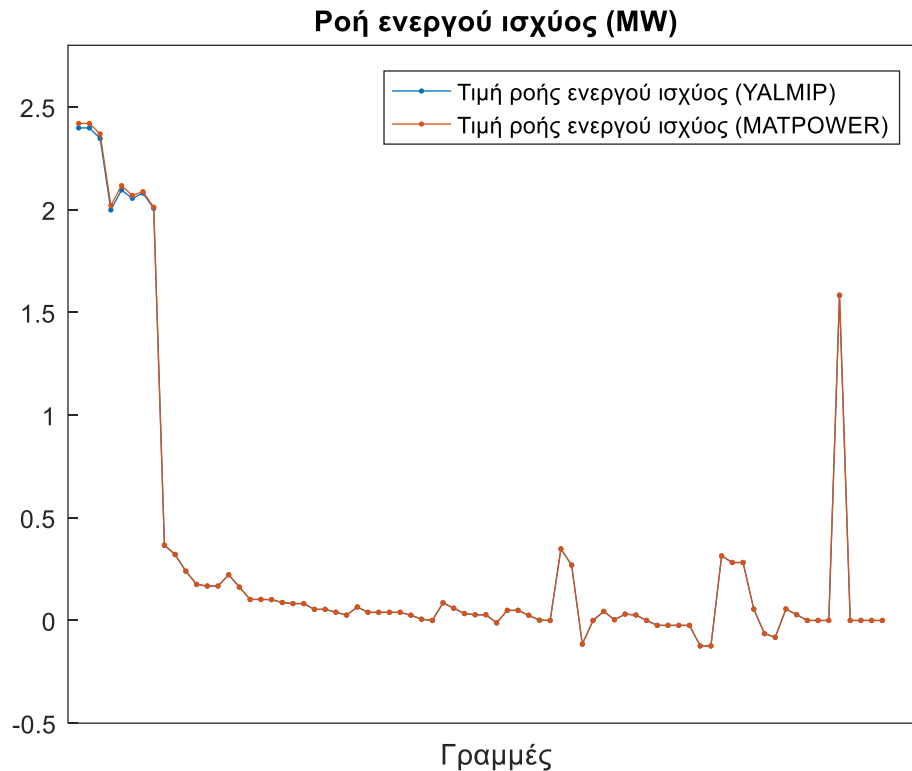
Σε περίπτωση σφάλματος στην γραμμή (43, 44), ανοίγει αυτόματα ο διακόπτης της γραμμής αυτής για την απομόνωση του σφάλματος. Συνεπώς, τα φορτία των κόμβων 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 δεν τροφοδοτούνται. Ο Πίνακας 7.12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης και τις γραμμές που με την σύνδεσή τους ικανοποιούν τους λειτουργικούς περιορισμούς του ΔΔ. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα παρατηρούμε ότι η γραμμή που είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο είναι η (9, 50), η οποία κατάφερε να τροφοδοτήσει πλήρως τα φορτία, όπως μπορούμε να δούμε και στο Σχήμα 7.26. Το αναδιαμορφωμένο δίκτυο 69 κόμβων μετά τη σύνδεση της κατάλληλης γραμμής απεικονίζεται στο Σχήμα 7.27.

Επίσης, το Σχήμα 7.28 απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις των ρών ενεργού ισχύος από τα αποτελέσματα που εξήγαγε το YALMIP και τα αποτελέσματα του προβλήματος ροής φορτίου που λύθηκε με χρήση του MATPOWER με δεδομένη την αναδιαμορφωμένη τοπολογία του ΔΔ, αντίστοιχα.

Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	1.6820 MW, 1.2050 MVar
Σύνδεση γραμμών:	(9, 50)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0 MW, 0 MVar
Περικοπή ενεργού ισχύος ΜΔΠ:	0 MW
Χρόνος εκτέλεσης κώδικα:	2.577 sec
Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)	



Σχήμα 7.26: Γραφική παράσταση εξυπηρετούμενης ζήτησης (MW) μετά την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)



Σχήμα 7.28: Γραφική παράσταση της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)

7.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MATPOWER – YALMIP)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο αποτελούν μία εφαρμογή του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών ΔΔ για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους. Η ακρίβεια των υπολογισμών ροής φορτίου εξαρτάται από την ακριβή προσέγγιση των εξισώσεών της. Οι Πίνακες 7.13 και 7.14 παρουσιάζουν, τη μέση τιμή και το μέγιστο εκατοστιαίο σφάλμα που παρατηρήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων που υπολόγισε το MATPOWER και των αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης για την ροή ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα σε ορισμένες εφαρμογές της μεθόδου.

ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑ (%) (MATPOWER – YALMIP)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ MATPOWER P (MW)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ YALMIP P (MW)
(28, 29)	1.10410 %	0.5476	0.5435
(2, 19), (13, 14)	1.69497 %	0.6763	0.6696
(7, 8), (23, 24)	1.06837 %	0.3827	0.3788
ΚΟΜΒΟΣ 12	1.86821 %	0.4664	0.4567
(8, 9)	1.45299 %	0.2268	0.2243
Πίνακας 7.13: Μέση τιμή και μέγιστο σφάλμα (%) ροής ενεργού ισχύος (MATPOWER – YALMIP)			

ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑ (%) (MATPOWER – YALMIP)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ MATPOWER Q (MVA _r)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ YALMIP Q (MVA _r)
(28, 29)	1.12359 %	0.3144	0.3114
(2, 19), (13, 14)	2.22222 %	0.3382	0.3332
(7, 8), (23, 24)	1.28275 %	0.2257	0.2227
ΚΟΜΒΟΣ 12	1.31501 %	0.4346	0.4306
(8, 9)	0.70666 %	0.2058	0.2048
Πίνακας 7.14: Μέση τιμή και μέγιστο σφάλμα (%) ροής άεργου ισχύος (MATPOWER – YALMIP)			

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τους παραπάνω Πίνακες, το σφάλμα που παρουσιάζεται σε όλες τις εφαρμογές της μεθόδου είναι αρκετά μικρό (μέσα στα αποδεκτά όρια). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η γραμμική προσέγγιση των εξισώσεων της ροής ισχύος δείχνει ικανοποιητική ακρίβεια στον υπολογισμό της.

7.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ

Σημαντικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της απλοϊκής μεθόδου αποκατάστασης με τα αποτελέσματα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης. Για να μπορέσουμε να εξάγουμε σωστά συμπεράσματα για την απόδοση της απλοϊκής μεθόδου, είναι αναγκαία η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το πρόβλημα της βελτιστοποίησης κατά την αντιμετώπιση ίδιων τύπων σφαλμάτων. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των εφαρμογών των δύο μεθόδων για την εξυπηρέτηση της ζήτησης (MW) των απομονωμένων κόμβων.

7.7.1 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (28, 29)

Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 4, η απλοϊκή μέθοδος αποκατάστασης εφαρμόστηκε στο δίκτυο 33 ζυγών για διακοπή λειτουργίας της γραμμής (28, 29). Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή της απλοϊκής μεθόδου εμφανίζονται στον Πίνακα 7.15 (α), ενώ ο Πίνακας 7.15 (β) παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Ζήτηση κόμβων 29 - 33 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)	
0.74	$\tau_k = (18, 33)$	$\tau_k = (25, 29)$
	0.7103	0.5823
Πίνακας 7.15 (α): Κατάσταση ΔΔ 33 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)		

Ζήτηση κόμβων 29 – 33:	0.74 MW
Σύνδεση γραμμής:	(25, 29)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0.58 MW
Πίνακας 7.15 (β): Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 33 κόμβων λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (28, 29)	

Βάσει του Πίνακα 7.15 (α) παρατηρούμε ότι η γραμμή που είναι κατάλληλη για σύνδεση είναι η (25, 29), αφού ικανοποιεί την ακτινική τοπολογία του δικτύου, αλλά εξυπηρετεί και το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Από τον Πίνακα 7.15 (β) παρατηρούμε ότι η βέλτιστη γραμμή που πρέπει να συνδεθεί για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου είναι η (25, 29). Επίσης, η απόκλιση που εμφανίζεται στην μη εξυπηρετούμενη ισχύ ανάμεσα στις δύο μεθόδους οφείλεται στο γεγονός ότι στη βέλτιστη μέθοδο έχουμε πλήρη μοντελοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου κάτι που δεν ισχύει για την απλοϊκή μέθοδο.

7.7.2 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (8, 9)

Άλλη μία σύγκριση που μπορεί να διεξαχθεί ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι η εφαρμογή τους στην διακοπή λειτουργίας της γραμμής (8, 9) στο δίκτυο 69 ζυγών με διείσδυση ΔΠ. Ο Πίνακας 7.16 (α) παρουσιάζει τα αποτελέσματα της απλοϊκής μεθόδου, ενώ στον Πίνακα 7.16 (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Ζήτηση κόμβων 9 – 27, 42 – 58 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)			
	2.5060	$\tau_k = (38, 43)$ 0.3546	$\tau_k = (60, 45)$ 0.0657	$\tau_k = (59, 22)$ 0.0917
Πίνακας 7.16 (α): Κατάσταση ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8, 9)				

Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	2.5060 MW
Σύνδεση γραμμών:	(60, 45)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0.0917 MW
Πίνακας 7.16 (β): Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 69 κόμβων, με διείδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (8,9)	

Βάσει του Πίνακα 7.16 (β) παρατηρούμε ότι η βέλτιστη γραμμή που χρειάζεται να συνδεθεί για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου είναι η (60, 45). Το πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την εφαρμογή της απλοϊκής μεθόδου είναι ότι τα αποτελέσματά της προτείνουν ως κατάλληλη γραμμή την (67, 15). Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι δύο μέθοδοι αποκλίνουν αφού τα αποτελέσματά τους έρχονται σε αντιπαράθεση. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων κατέχει το γεγονός ότι η απλοϊκή μέθοδος δεν βρίσκει την βέλτιστη λύση, αλλά μία λύση που ικανοποιεί την ακτινική τοπολογία του δικτύου.

7.7.3 ΔΙΑΚΟΠΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (43, 44)

Τέλος, η σύγκριση των δύο μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί και με την εφαρμογή τους στη διακοπή λειτουργίας της γραμμής (43, 44) του δικτύου 69 κόμβων με διείδυση ΔΠ. Τα αποτελέσματα της απλοϊκής μεθόδου παραθέτουν δύο πιθανές γραμμές που με την σύνδεσή τους ικανοποιούν την ακτινική τοπολογία του δικτύου και εξυπηρετούν πλήρως το φορτίο. Οι Πίνακες 7.17 (α) και 7.17 (β) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της απλοϊκής μεθόδου και τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης, αντίστοιχα.

Ζήτηση κόμβων 44 - 54 (MW)	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς (MW)	
	1.682	$\tau_k = (9, 50)$
	0	0
Πίνακας 7.17 (α): Κατάσταση ΔΔ 69 κόμβων, με διείδυση ΔΠ, μετά την επαναδιαμόρφωσή του λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)		

Ζήτηση απομονωμένων κόμβων:	1.682 MW
Σύνδεση γραμμών:	(9, 50)
Μη εξυπηρετούμενη ισχύς:	0 MW
Πίνακας 7.17 (β): Αποτελέσματα του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ 69 κόμβων, με διείσδυση ΔΠ, λόγω διακοπής λειτουργίας της γραμμής (43, 44)	

Βάσει του Πίνακα 7.17 (α) παρατηρούμε ότι η απλοϊκή μέθοδος παραθέτει δύο πιθανές γραμμές που με την σύνδεσή τους (μία κάθε φορά) μπορούν να τροφοδοτήσουν πλήρως το φορτίο. Ο Πίνακας 7.17 (β) παρουσιάζει ότι η βέλτιστη γραμμή που πρέπει να συνδεθεί είναι η (9, 50), κάτι που συμπίπτει και με τα αποτελέσματα της απλοϊκής μεθόδου. Όμως, σημαντικό μειονέκτημα της απλοϊκής μεθόδου είναι η αβεβαιότητα που προσδίδει αφού παρουσιάζει δύο πιθανές κατάλληλες γραμμές για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της επαναδιαμόρφωσης ακτινικών δικτύων διανομής (ΔΔ) για την αποκατάσταση της λειτουργίας τους μετά από την εμφάνιση σφάλματος σε κάποιο στοιχείο του δικτύου. Βασικός στόχος της εργασίας αποτέλεσε η γρήγορη αποκατάσταση της λειτουργίας των ΔΔ και η ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης περιοχής. Μία επιπρόσθετη λύση στο πρόβλημα αυτό θεωρήθηκε και η διεύθυνση της διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στα ΔΔ, αφού υφίσταται επιπλέον διαθέσιμη ισχύς που μπορεί να ικανοποιήσει κάποιο μέρος των φορτίων. Επιπλέον, τα σύγχρονα μέσα ελέγχου των ΔΔ μπορούν να υποστηρίξουν την ύπαρξη των ΔΠ χωρίς την παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου.

Αρχικά, έγινε ανάπτυξη ενός απλοϊκού αλγορίθμου σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ο οποίος κάνει χρήση των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί από τη ροή ισχύος των γραμμών πριν από την εμφάνιση σφάλματος αλλά και της ικανότητάς τους. Στόχος της μεθοδολογίας αυτής είναι η αλλαγή της κατάστασης των ανοικτών υπό φορτίο αποζευκτών (tie – switches) έτσι ώστε να εντοπισθεί η κατάλληλη γραμμή που ικανοποιεί την ακτινική τοπολογία του δικτύου αλλά και εξυπηρετεί μεγαλύτερο μέρος των φορτίων.

Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε πρότυπα δίκτυα διανομής της IEEE των 33 και 69 ζυγών και οι δοκιμές που έγιναν αφορούσαν την διακοπή λειτουργίας μίας γραμμής του δικτύου. Αρχικά, εξετάστηκε η διακοπή λειτουργίας μίας γραμμής σε δίκτυα χωρίς διεύθυνση ΔΠ και έπειτα έγινε εφαρμογή σε δίκτυα με διεύθυνση ΔΠ. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συμπεριλάμβαναν, σε κάθε εφαρμογή, τη σύνδεση των κατάλληλων γραμμών που ικανοποιούν την ακτινική τοπολογία του δικτύου αλλά και την εξυπηρέτηση των φορτίων που επιτυγχάνεται. Επίσης, όλες οι

εφαρμογές της μεθόδου στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ έδειξαν αύξηση στην εξυπηρέτηση των φορτίων σε σύγκριση με τα δίκτυα χωρίς διείσδυση ΔΠ.

Το υπόλοιπο μέρος της εργασίας αφορά την διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ΔΔ. Η διατύπωση του προβλήματος βασίστηκε στο μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος, το οποίο τροποποιήθηκε κατάλληλα, αφού πραγματοποιήθηκε γραμμικοποίηση των μη γραμμικών όρων του, έτσι ώστε να αποκτήσει ευνοϊκότερα χαρακτηριστικά επίλυσης. Τελικά, με την εισαγωγή των δυαδικών μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν τους διαθέσιμους διακόπτες του εκάστοτε δικτύου, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως 0/1 μικτό ακέραιο τετραγωνικό πρόβλημα (0/1 MIQP). Στο πρόβλημα αυτό αναζητείται η κατάσταση λειτουργίας του δικτύου, η οποία ικανοποιεί τους περιορισμούς λειτουργίας του. Στο εν λόγω μοντέλο, οι περιορισμοί λειτουργίας αποτελούνται από τα επιθυμητά όρια των τάσεων των ζυγών, την ικανότητα των γραμμών, το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε ζυγό αλλά και την ακτινική τοπολογία του δικτύου. Επίσης, για την μελέτη των δικτύων με διείσδυση ΔΠ λήφθηκαν υπόψιν και τα λειτουργικά όρια των μονάδων αλλά και η ικανότητά τους να μπορούν να παράγουν και άεργο ισχύ.

Η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης περιοχής, δίνοντας προτεραιότητα στα κρίσιμα φορτία του δικτύου, και την ελαχιστοποίηση του αριθμού των χειρισμών των διακοπών δίνοντας προτεραιότητα στους τηλεχειριζόμενους διακόπτες έναντι των χειροκίνητων. Επιπλέον, στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ, η αντικειμενική συνάρτηση σχεδιάστηκε με σκοπό και την ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των ΜΔΠ. Καθοριστικό ρόλο στην επίλυση του προβλήματος έχουν οι συντελεστές βάρους αφού επιλέχθηκαν έτσι ώστε να επιτευχθεί η επαναδιαμόρφωση του δικτύου δίνοντας έμφαση στην εξυπηρέτηση των φορτίων με όσο το δυνατόν λιγότερους χειρισμούς διακοπών. Επίσης, στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ δόθηκε έμφαση και στην ελαχιστοποίηση της περικοπής της παραγωγής ενεργού ισχύος των ΜΔΠ.

Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι η γραμμική προσέγγιση των εξισώσεων ροής φορτίου δεν εμφάνισε σημαντικά σφάλματα και έτσι μπορέσαμε να μοντελοποιήσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια το πρόβλημα της βέλτιστης

επαναδιαμόρφωσης ικανοποιώντας όλους τους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου

Το προτεινόμενο μοντέλο υλοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB με χρήση της εργαλειοθήκης YALMIP και εφαρμόστηκε σε πρότυπα δίκτυα διανομής της IEEE των 33 και 69 ζυγών. Οι διαταραχές που δοκιμάστηκαν αφορούν την διακοπή λειτουργίας σε μία γραμμή, σε δύο γραμμές αλλά και την εμφάνιση σφάλματος σε κάποιον ζυγό του δικτύου. Επιπλέον, στα δίκτυα με διείσδυση ΔΠ θεωρήθηκε και ολική διακοπή (σφάλμα στον ζυγό του υποσταθμού).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι στις περισσότερες δοκιμές τα φορτία τροφοδοτήθηκαν πλήρως κάτι που είναι σημαντικό αφού είναι πρωταρχικός στόχος της αποκατάστασης. Επιπλέον, στις δοκιμές που δεν ήταν εφικτή η πλήρης τροφοδότηση των φορτίων, τότε δόθηκε έμφαση στα κρίσιμα φορτία λόγω διαφοροποίησης των τιμών βάρους στην αντικειμενική συνάρτηση. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί και η προτίμηση των τηλεχειριζόμενων διακοπών. Σε όλα τα σενάρια μπορούμε να δούμε ότι προτιμήθηκε η σύνδεση γραμμών που διαθέτουν τηλεχειριζόμενο διακόπτη για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου. Μία ακόμα παρατήρηση αποτελεί και η ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος αφού σε όλες τις δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν σε δίκτυα με διείσδυση ΔΠ, υπάρχει μέγιστη διείσδυση των ΜΔΠ. Τέλος, η εμφάνιση σφάλματος στον ζυγό του υποσταθμού αντιμετωπίστηκε με την χρήση των ΜΔΠ, οι οποίες ήταν ικανές να υποστηρίξουν ένα μέρος των φορτίων και με την παραγωγή ενεργού αλλά και άεργου ισχύος. Καθοριστικό ρόλο στην εξυπηρέτηση αυτών των φορτίων αποτέλεσαν οι συντελεστές βάρους που τα αντιπροσώπευαν στην αντικειμενική συνάρτηση.

Τέλος, παρουσιάστηκαν συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα του απλοϊκού αλγορίθμου και στα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης για αντιμετώπιση της ίδιας διαταραχής. Η εξέταση του απλοϊκού αλγορίθμου μας έδωσε ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αφού δεν χρειάστηκε ο υπολογισμός της νέας ροής φορτίου μετά από κάθε αλλαγή κατάστασης των διακοπών. Βέβαια, η σύγκριση της βελτιστοποίησης με τον απλοϊκό αλγόριθμο δεν παρουσίασε σε όλες τις περιπτώσεις ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μία εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι η μελέτη μόνο της ροής ενεργού ισχύος. Με αυτό τον τρόπο, ο απλοϊκός αλγόριθμος δεν είναι σε θέση να λάβει υπόψιν όλους τους περιορισμούς λειτουργίας του δικτύου όπως είναι

τα μέτρα των τάσεων, οι ροές άεργου ισχύος αλλά και η παραγωγή των ΜΔΠ. Αντίθετα, οφείλουμε να πούμε ότι η βέλτιστη μέθοδος μοντελοποιεί όλα τα χαρακτηριστικά του δικτύου και η λύση της ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς λειτουργίας. Το μειονέκτημα όμως που παρουσιάζεται είναι η δυσκολία επίλυσης του προβλήματος λόγω των μη κυρτών περιοχών λύσεων, κάτι που στην παρούσα εργασία αντιμετωπίστηκε με τη γραμμική προσέγγιση των μη γραμμικών όρων, έχοντας ως αποτέλεσμα την διατύπωση του προβλήματος ως κυρτό.

8.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η εφαρμογή του απλοϊκού αλγορίθμου δεν μας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε όλες τις εφαρμογές, για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου και την εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Μία πιθανή επέκταση του αλγορίθμου είναι και η μελέτη της ροής άεργου ισχύος έτσι ώστε να διατυπωθεί ένα πιο ολοκληρωμένο πρόβλημα επαναδιαμόρφωσης. Επίσης, μπορεί να δοκιμαστεί και μία πιο ενδελεχής σύγκριση των δύο μεθόδων σε πιο περίπλοκα και εκτενή δίκτυα, όπου η αντιμετώπιση μίας διαταραχής θα είναι πιο απαιτητική.

Στα πλαίσια του προβλήματος της βελτιστοποίησης, η γραμμική προσέγγιση της ροής ισχύος που πραγματοποιήθηκε θεώρησε την τιμή του $\cos\phi$ ίση με την μονάδα. Μία πιθανή επέκταση της μεθόδου είναι η τμηματική γραμμικοποίηση του $\cos\phi$ χρησιμοποιώντας κατάλληλο περιορισμό έτσι ώστε να δοκιμαστεί η μείωση των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στις ροές ισχύος.

Εξαιρετικό ενδιαφέρον έχει επίσης και η διείσδυση των ΜΔΠ στα ΔΔ. Στην παρούσα εργασία, οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μικρή εγκατεστημένη ισχύ. Με την ένταξη περισσότερων μονάδων θα είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης των φορτίων λόγω σφάλματος στον ζυγό του υποσταθμού. Επίσης, θα είναι δυνατή και η μελέτη της περικοπής ισχύος των μονάδων λόγω μη ικανοποίησης των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου. Τέλος, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοσθεί και για μελέτη της τοποθέτησης των μονάδων σε καταλληλότερες θέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [2] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [3] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, *Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας*, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://www.rae.gr>
- [4] Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, [Online].
[Διαθέσιμο]: <https://www.deddie.gr/el/i-etaireia/profil>
- [5] Προστασία Περιβάλλοντος, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://www.ee.teihal.gr/labs/pkoukos/>
- [6] Richard C. Dorf, *Energy, Resources & Policy*, Addison-Wesley Pub. Co., 1978.
- [7] Ιάσοντας Κουβελιώτης – Λυσίακος, Διπλωματική εργασία, *Μελέτη αρμονικών σε δίκτυα χαμηλής τάσης με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών*, Αθήνα, 2013, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/8071>
- [8] Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, [Online].
[Διαθέσιμο]: https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_Πηγές_Ενέργειας
- [9] Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>
- [10] Γ. Τσιλιγκιρίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, 2015, [Online].
[Διαθέσιμο]: http://users.auth.gr/tsil/01_Συγγράμματα/ΑΠΕ/
- [11] Turan Gönen, *Electric power distribution system engineering*, 3rd edition, CRC Press, 6 Jan. 2014.

- [12] Zhenyu Tan, Rui Fan, Yu Liu, Liangyi Sun, “Microgrid black-start after natural disaster with load restoration using spanning tree search”, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [13] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira, F. O. Resende, “MICROGRIDS BLACK START AND ISLANDED OPERATION”, 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
- [14] TechTarget, smart grid, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://whatis.techtarget.com/definition/smart-grid>
- [15] Vehbi C. Gungor, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati, Gerhard P. Hancke, “Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 4, p. 529 – 539, Nov. 2011.
- [16] Xi Fang, Satyajayant Misra, Guoliang Xue, Dejun Yang, “Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no.4, p. 944 – 980, 2012.
- [17] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [18] Y. Kumar, B. Das, and J. Sharma, “Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, p. 261-270, Jan. 2008.
- [19] Rabih A. Jabr, Ravindra Singh, Bikash C. Pal, “Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 2, p. 1106 – 1115, May 2012.
- [20] H. Lee Willis, *Power Distribution Planning Reference Book*, Second Edition, CRC Press, 1 March 2004.
- [21] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994.
- [22] Hong Xiaoyu, Xia Mingchao, Han Yinghui, “A Service Restoration Method for Active Distribution Network”, Energy Procedia, vol. 61, p. 339-344, 2014.

- [23] J.W. Feltes, Carlos Grande-Moran, “Black start studies for system restoration”, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE
- [24] S. S. Ćurčić, 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,” *Electric Power Systems Research*, vol. 35, p. 73–86, 1996.
- [25] Anmar Arif, Zhaoyu Wang, “Service restoration in resilient power distribution systems with networked microgrid”, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [26] Ranadhir Sarkar, Azwirman Gusrialdi, Zhihua Qu, “An adaptive restorative method for resilient power distribution networks”, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [27] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez & others, MATPOWER, A MATLAB Power System Simulation Package, [Online].
[Διαθέσιμο]: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>
- [28] MATLAB biograph object, [Online].
[Διαθέσιμο]: <https://ch.mathworks.com/help/bioinfo/ref/biograph.html>
- [29] Αναζήτηση Κατά Βάθος (DFS - Depth-first search), [Online].
[Διαθέσιμο]: https://el.wikipedia.org/wiki/Αναζήτηση_Κατά_Βάθος
- [30] Distribution Test Feeders, [Online].
[Διαθέσιμο]: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>
- [31] E. Castillo, A. J. Gonejo, P. Pedregal, R. Garcíá, N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. Wiley - Interscience, 2001.
- [32] P.A. Trodden, W.A. Bukhsh, A. Grothey, K.I.M. McKinnon, “MILP formulation for controlled islanding of power networks”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 45, no. 1, p. 501-508, February 2013.
- [33] Paul A. Trodden, Waqqas Ahmed Bukhsh, Andreas Grothey, Ken I. M. McKinnon, “Optimization-Based Islanding of Power Networks Using Piecewise Linear AC Power Flow”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, p. 1212 – 1220, May 2014.
- [34] Linearization, [Online].

[Διαθέσιμο]: <https://en.wikipedia.org/wiki/Linearization>

- [35] Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Διπλωματική εργασία, *ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ*, Αθήνα, 2016, [Online].

[Διαθέσιμο]: <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/44199>

- [36] Ilya Bilibin, Florin Capitanescu, “Contributions to thermal constraints management in radial active distribution systems”, *Electric Power Systems Research*, vol. 111, p. 169-176, June 2014.

- [37] Haixiang Gao, Ying Chen, Yin Xu, Chen-Ching Liu, “Resilience-Oriented Critical Load Restoration Using Microgrids in Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, p. 2837 – 2848, Nov. 2016.

- [38] CPLEX, User's Manual for CPLEX, Discrete optimization, Solving mixed integer programming problems with quadratic terms, [Online].

[Διαθέσιμο]: <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter>

- [39] Johan Löfberg, “YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB”, In Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan, 2004.

- [40] [Online]. [Διαθέσιμο]: <https://yalmip.github.io/>

- [41] GUROBI OPTIMIZATION, [Online]. [Διαθέσιμο]: <http://www.gurobi.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΓΡΑΜΜΕΣ	ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ (MW)
(1, 2)	4
(2, 3)	3.5
(3, 4)	2.5
(4, 5)	2.5
(5, 6)	2.5
(6, 7)	1.2
(7, 8)	1
(8, 9)	1
(9, 10)	0.95
(10, 11)	0.9
(11, 12)	0.75
(12, 13)	0.6
(13, 14)	0.5
(14, 15)	0.3
(15, 16)	0.3
(16, 17)	0.2
(17, 18)	0.2
(2, 19)	1.5
(19, 20)	1.5
(20, 21)	1.5
(21, 22)	1.4
(3, 23)	2.5
(23, 24)	1
(24, 25)	1
(6, 26)	1.5
(26, 27)	1.2
(27, 28)	1.2
(28, 29)	1
(29, 30)	0.75
(30, 31)	0.5
(31, 32)	0.5
(32, 33)	0.3
(25, 29)	1.5
(8, 21)	1.5
(12, 22)	1.5
(9, 15)	1.5
(18, 33)	1.5
Ικανότητα γραμμών ΔΔ 33 κόμβων [26]	