



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

ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΟΣ Ι. ΛΟΛΑΣ

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Εποπτεία : Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022



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

**ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
 ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
 ΔΗΜΟΣ Ι. ΛΟΛΑΣ

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τη τριμελή εξεταστική επιτροπή την Οκτωβρίου 2022.

.....
 Παύλος Γεωργιλάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
 Κορρές Γεώργιος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
 Ιωάννης Γκόνοσ

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

.....
Λόλας Δήμος

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

Copyright © Λόλας Δήμος, 2022

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 τη 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παύλο Γεωργιλάκη για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής και για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Π. Καραφώτη για την επίβλεψη, καθοδήγηση και βοήθειά του, που κατέστησε δυνατή τη περάτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ ακόμα τον παιδικό φίλο και συνάδελφο Ιωάννη Μαρκεζίνη για τη πολύπλευρη υποστήριξή του, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και τους γονείς μου για τη πολύτιμη στήριξή τους.

Στους γονείς μου, Ιωάννη και Αθηνά.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής (ΔΔ) ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την ελαχιστοποίηση: 1) των απωλειών ενεργού ισχύος του ΔΔ, και 2) του αριθμού των χειρισμών των διακοπών με τους οποίους είναι εξοπλισμένο το ΔΔ.

Στα σύγχρονα ΔΔ, η αυξημένη ενσωμάτωση μονάδων διανεμημένης παραγωγής παρέχει τη δυνατότητα στον Διαχειριστή του ΔΔ για μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικούς τρόπους, καθώς και των απωλειών ενεργού ισχύος του ΔΔ.

Αρχικά αναλύεται το πρόβλημα της AC ροής ισχύος σε ακτινικό δίκτυο διανομής. Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής αρχικά διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού και στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς το οποίο επιλύεται μέσω του solver CPLEX (IBM).

Το συγκεκριμένο μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς προσομοιώθηκε μέσω των εργαλείων GAMS και MATLAB και εφαρμόστηκε στο τυποποιημένο ΔΔ 33 κόμβων της βιβλιογραφίας.

Μελετήθηκαν υποπεριπτώσεις με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας στους όρους των απωλειών και των χειρισμών διακοπών. Με βάση αυτούς βρέθηκαν οι βέλτιστες τοπολογίες του ΔΔ στη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν από μικρή έως στοιχειώδη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος.

Παρουσιάζεται οικονομική μελέτη εφαρμογής με στόχο την πραγματική προσέγγιση του κόστους αλλαγής κατάστασης διακοπών και εξετάζεται η εγκατάσταση αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών. Σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου και τις παραδοχές που έγιναν, η εγκατάσταση αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών κρίνεται εν γένει επικερδής.

Τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις.

Λέξεις –Κλειδιά

Δίκτυα διανομής, ημερήσια επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής, βελτιστοποίηση με μαθηματικό προγραμματισμό, ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος, πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με κωνικούς περιορισμούς δεύτερης τάξης, μονάδες διανεμημένης παραγωγής, διανεμημένοι ενεργειακοί πόροι.

Abstract

The scope of this Diploma Thesis is the formulation and solution of the optimal reconfiguration problem of power distribution network (DN), with the purpose of minimizing: 1) the active power losses of the DN, and 2) the number of controlling actions in the switches with which the DN is equipped.

In modern DNs, the high penetration of distributed generation units offers the operator of the DN the ability to minimize the production of electrical energy via the conventional generation units and also the active power losses of the DN.

In this Thesis, firstly, the AC power flow problem is being analysed in radial distribution networks. The problem of optimal reconfiguration of the distribution grid is initially formed as a mixed integer nonlinear programming problem and next is transformed to a mixed integer problem with quadric constraints that is solved by the CPLEX solver.

This specific mixed integer model with quadric constraints was formulated and solved using GAMS and was applied to a standard DN of 33 nodes of the bibliography.

Differing scenarios are analyzed in regard to the coefficients of the terms of the power losses and the changes of switch statuses. Using those coefficients, the optimal configurations of the DN are found for a period of 24 hours. The results show minor to substantial reduction of active power losses.

An economic study is presented regarding the cost of changing the switch status and the installation of automated remote-controlled switches. According to the input data, the results show the installation of automated remote-controlled switches to be in general profitable.

The results of the present Thesis are summarized and future research on the topic is proposed.

Keywords

Distribution Networks, Intraday reconfiguration of distribution networks, optimization using mathematical programming, minimizing active power losses, mixed integer problem with second order quadric constraints, distributed power generation units, distributed energy resources

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	19
1.1 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	19
1.2.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	20
1.2.2 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.....	20
1.2.3 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	20
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	21
Κεφάλαιο 2: Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	23
2.1 Εισαγωγή.....	23
2.2 Διανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι.....	23
2.2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	24
2.2.2 Επιπτώσεις Διείσδυσης Μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής	27
2.3 Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	28
2.3.1 Υποσταθμοί Υποβιβασμού Τάσης και Μετασχηματιστές Υποβιβασμού.....	28
2.3.2 Συστήματα Βοηθητικών Πυκνωτών.....	29
2.3.4 Συστήματα Γείωσης.....	30
2.3.5 Διακοπτικά Στοιχεία.....	30
2.4 Απώλειες Ενεργού Ισχύος Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	32
2.5 Επαναδιαμόρφωση Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	34
2.5.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση του Προβλήματος της Βέλτιστης Επαναδιαμόρφωσης των Δικτύων Διανομής.....	37
2.5.2 Επαναδιαμόρφωση Ευφύων Δικτύων Διανομής.....	39
2.5.3 Ημερήσια Επαναδιαμόρφωση Δικτύων Διανομής.....	40
Κεφάλαιο 3: Μοντέλο βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής για μείωση των απωλειών ισχύος	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Σύνολα, Παράμετροι και Μεταβλητές.....	44
3.3 Αντικειμενική Συνάρτηση Προβλήματος.....	46
3.3.1 Αντικειμενική Συνάρτηση.....	46
3.3.2 Εξισώσεις Μαθηματικού Μοντέλου.....	47
3.4 Περιορισμοί του Προβλήματος.....	49
3.4.1 Περιορισμοί Ισχύος.....	49
3.4.2 Περιορισμοί Τάσης.....	50

3.5	Παρουσίαση και Ανάλυση Περιπτώσεων	50
3.5.1	<i>Εισαγωγή</i>	50
3.5.2	<i>Περίπτωση 1.α</i>	52
3.5.3	<i>Περίπτωση 2.α</i>	52
3.5.4	<i>Περίπτωση 1.β</i>	53
3.5.5	<i>Περίπτωση 2.β</i>	53
Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη Κώδικα Βέλτιστης Επαναδιαμόρφωσης Δικτύων Διανομής για Μείωση των Απωλειών Ενεργού Ισχύος		55
4.1	Εισαγωγή	55
4.1.1	<i>Μαθηματικός Προγραμματισμός</i>	55
4.1.2	<i>Δομή των Υπολογιστικών Εργαλείων</i>	56
4.2	Τα Αρχεία Εισόδου και Εξόδου Excel	57
4.2.1	<i>Εισαγωγή στο Λογισμικό Microsoft Excel</i>	57
4.2.2	<i>Τα Αρχεία Εισόδου Excel</i>	58
4.2.3	<i>Τα Αρχεία Εξόδου Excel</i>	59
4.3	Το Λογισμικό MATLAB.....	59
4.3.1	<i>Εισαγωγή στο Λογισμικό MATLAB</i>	59
4.3.2	<i>Εισαγωγή, Επεξεργασία και Εξαγωγή Δεδομένων στο MATLAB</i>	60
4.4	Το Λογισμικό GAMS	62
4.4.1	<i>Εισαγωγή στο Λογισμικό GAMS</i>	62
4.4.2	<i>Τα Αρχεία Εισόδου στο Περιβάλλον GAMS</i>	62
4.4.3	<i>Τα Αρχεία Εξόδου στο Περιβάλλον GAMS</i>	63
4.4.4	<i>Η Μοντελοποίηση στο Περιβάλλον GAMS</i>	64
4.5	Διεπαφή MATLAB-GAMS.....	67
Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές και Αποτελέσματα.....		69
5.1	Εισαγωγή	69
5.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	71
5.2.1	<i>Περίπτωση 1.α</i>	71
5.2.2	<i>Περίπτωση 2.α</i>	72
5.2.3	<i>Περίπτωση 1.β</i>	75
5.2.4	<i>Περίπτωση 2.β</i>	77
5.3	Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	79
5.3.1	<i>Σύγκριση Περιπτώσεων α</i>	79
5.3.2	<i>Σύγκριση Περιπτώσεων β</i>	81
5.3.3	<i>Σύγκριση όλων των περιπτώσεων</i>	83

Κεφάλαιο 6: Ανάλυση κόστους.....	85
6.1 Εισαγωγή	85
6.2 Παραδοχές	85
6.2.1 Κόστος Αλλαγής Κατάστασης Διακοπών	85
6.2.2 Κόστος Απωλειών Ισχύος.....	87
6.2.3 Κόστος Βελτιστοποίησης	87
6.3 Οικονομική Ανάλυση	88
6.3.1 Μελέτη κόστους με αποκλειστική χρήση χειροκίνητων διακοπών.....	88
6.3.2 Εγκατάσταση Τηλεχειριζόμενων Διακοπών	89
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.....	95
7.1 Ανακεφαλαίωση	95
7.2 Συμβολή της Διπλωματικής Εργασίας	96
7.3 Επεκτάσεις.....	96
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία.....	99
Κεφάλαιο 9: Παράρτημα.....	101
Κατάλογος σχημάτων	17
Κατάλογος πινάκων	18

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Χερσαίο Αιολικό Πάρκο	25
Σχήμα 2.2: Μονάδα Αξιοποίησης Ενέργειας Κυμάτων	26
Σχήμα 2.3: Τμήμα Υποσταθμού Υποβιβασμού Τάσης 150/33kV	29
Σχήμα 2.4: Διακόπτης Φορτίου SF ₆ , 11kV	31
Σχήμα 2.5: Απομακρυσμένος Ελεγκτής ενός ΔΑΕ	32
Σχήμα 2.6: Ροή Ισχύος και Απώλειες μεταξύ δύο Κόμβων	33
Σχήμα 2.7: Σύνθετο Δίκτυο	36
Σχήμα 2.8: Το Δίκτυο IEEE-33 στην Αρχική Τοπολογία του	36
Σχήμα 4.1: Ενδοεπικοινωνία Excel - MATLAB – GAMS & Γραμμική Ροή Ενδοεπικοινωνίας	57
Σχήμα 4.2: Προφίλ Ζήτησης και Διανεμημένης Παραγωγής	58
Σχήμα 4.3: MATLAB – Εντολές Χρήστη και Δημιουργία Αρχείου Εξόδου	60
Σχήμα 4.4: MATLAB - Παραδείγματα Εισαγωγής και Επεξεργασίας Δεδομένων ...	61
Σχήμα 4.5: MATLAB - Παραδείγματα Μορφοποίησης και Εξαγωγής Δεδομένων ..	61
Σχήμα 4.6: GAMS – Παράδειγμα Άμεσης Εισαγωγής Παραμέτρων	63
Σχήμα 4.7: Παράδειγμα Αρχείου Εισόδου “Input.gdx”	63
Σχήμα 4.8: Παράδειγμα Αρχείου Εξόδου “Output.gdx”	64
Σχήμα 4.9: Παραδείγματα Δήλωσης Συνόλων και Εξισώσεων	65
Σχήμα 4.10: Παραδείγματα Εξισώσεων Περιπτώσεων 1.α και 1.β	65
Σχήμα 4.11: GAMS - Επιλογές	66
Σχήμα 4.12: Απαισπάσματα Κώδικα Διεπαφής MATLAB – GAMS	68
Σχήμα 5.1: Αρχική Τοπολογία - Έγχυση από Υποσταθμό	70
Σχήμα 5.2: Αρχική Τοπολογία - Απώλειες Δικτύου	70
Σχήμα 5.3: Αρχική Τοπολογία - Ελάχιστη Τάση Κόμβων	70
Σχήμα 5.4: Περίπτωση 1.α – Απώλειες Δικτύου	71
Σχήμα 5.5: Περίπτωση 1.α – Ελάχιστη Τάση Κόμβων	72
Σχήμα 5.6: Περίπτωση 2.α - Απώλειες Δικτύου	74
Σχήμα 5.7: Περίπτωση 2.α - Ελάχιστη Τάση Κόμβων	74
Σχήμα 5.8: Περίπτωση 1.β - Απώλειες Δικτύου	76
Σχήμα 5.9: Περίπτωση 1.β - Ελάχιστη Τάση Κόμβων	77
Σχήμα 5.10: Περίπτωση 2.β - Απώλειες Ενεργού Ισχύος	78
Σχήμα 5.11: Περίπτωση 2.β - Ελάχιστη Τάση Κόμβων	79
Σχήμα 5.12: Σύγκριση Περιπτώσεων 1α και 2α - Απώλειες Ενεργού Ισχύος	80
Σχήμα 5.13: Σύγκριση Περιπτώσεων 1α και 2α - Ελάχιστη Τάση Κόμβων	81
Σχήμα 5.14: Σύγκριση Περιπτώσεων 1β και 2β - Απώλειες Ενεργού Ισχύος	82
Σχήμα 5.15: Σύγκριση Περιπτώσεων 1β και 2β - Ελάχιστη Τάση Κόμβων	82
Σχήμα 5.16: Σύγκριση Περιπτώσεων - Απώλειες Ενεργού Ισχύος	84
Σχήμα 6.1: Μελέτη κόστους– Μηνιαίο κέρδος λόγω ελαχιστοποίησης απωλειών	89
Σχήμα 6.2: Μελέτη κόστους– Μηνιαίο κόστος συνεργείων	89
Σχήμα 6.3: Μελέτη κόστους – Μηνιαίο ολικό κόστος περιπτώσεων	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Περιπτώσεις.....	51
Πίνακας 5.1: Περίπτωση 2.α - Τοπολογίες.....	73
Πίνακας 5.2: Περίπτωση 1.β – Τοπολογίες.....	75
Πίνακας 5.3: Περίπτωση 2.β – Τοπολογίες.....	77
Πίνακας 5.4: Περιπτώσεις ‘α’ – Μέσες τιμές ενεργών απωλειών και ελαχίστων τάσεων	80
Πίνακας 5.5: Περιπτώσεις ‘β’ – Μέσες τιμές ενεργών απωλειών και ελαχίστων τάσεων	82
Πίνακας 5.6: Σύγκριση περιπτώσεων - Ποσοστιαία μείωση μέσου όρου απωλειών ενεργού ισχύος	83

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το ΣΗΕ πρέπει να εξυπηρετεί τα ηλεκτρικά του φορτία με οικονομικό και αξιόπιστο τρόπο.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ημερήσια επαναδιαμόρφωση του ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας για ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος με παράλληλη ελαχιστοποίηση του πλήθους αλλαγών κατάστασης των διακοπών του ΔΔ.

Η ανάγκη για επαναδιαμόρφωση του ΔΔ προκύπτει από την είσοδο ΑΠΕ σε αυτό. Αυτές δεν έχουν σταθερή παραγωγή αλλά εξαρτώνται από φυσικά φαινόμενα. Έτσι η βέλτιστη τοπολογία του ΔΔ δεν είναι σταθερή παντός καιρού αλλά μεταβάλεται στην διάρκεια μίας μέρας. Με την αλλαγή κατάστασης των διακοπών του ΔΔ πετυχαίνουμε την εύρεση νέων τοπολογιών. Οι εν λόγω αλλαγές επιφέρουν κάποιο κόστος που αφορά πληρωμή ανθρώπινου δυναμικού ή εγκατάσταση αυτόματων διακοπών.

Το πρόβλημα της παρούσας διπλωματικής συνοψίζεται σε μία αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση. Περιλαμβάνει δύο όρους-κόστη. Ο ένας αφορά το κόστος των απωλειών ενεργού ισχύος και ο δεύτερος το κόστος αλλαγών κατάστασης των διακοπών.

Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης γίνεται με την κατασκευή και επίλυση ενός μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού στα υπολογιστικά εργαλεία GAMS και MATLAB. Το μοντέλο που κατασκευάζεται είναι πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (MIQCP).

Έπειτα εισάγονται οι τιμές κόστους της σύγχρονης (2021) ελληνικής πραγματικότητας. Αυτές το σύστημα λειτουργίας και διαχείρισης ενός πραγματικού ελληνικού ΔΔ. Το πρόβλημα και η επίλυση του εξετάζεται σε πρακτική εφαρμογή.

Τα αποτελέσματα σε θεωρητική μελέτη και σε μελέτη εφαρμογής δείχνουν σημαντικό οικονομικό όφελος στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάζονται.

1.2.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από συμβατικές πηγές ενέργειας και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Οι συμβατικές πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από καύση λιγνίτη, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία, αιολική ενέργεια, πυρηνική ενέργεια, ενέργεια των κυμάτων, βιομάζα και γεωθερμία. Στη παρούσα διπλωματική μελετούνται και αξιολογούνται οι ΑΠΕ που αφορούν την αιολική και ηλιακή ενέργεια.

Η καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μολύνει το περιβάλλον παράγοντας μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα αλλά και άλλων σωματιδίων που είναι βλαβερά για την ανθρώπινη υγεία και μεγεθύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την αύξηση καρκινογενέσεων και άλλων παθήσεων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Συνεπώς, η παγκόσμια κοινότητα στρέφεται όλο και περισσότερο στην αντικατάσταση της καύσης ορυκτών καυσίμων από ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει στόχους και οδικούς χάρτες για τα επόμενα έτη που οδηγούν το έτος 2050 στον στόχο για την πλήρη κατάργηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2.2 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται με υψηλή και υπερυψηλή τάση και περιλαμβάνει υποσταθμούς, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, αποζεύκτες, πυλώνες και άλλα στοιχεία δευτερεύουσας σημασίας. Η υπερυψηλή τάση (400kV για την Ελλάδα) και η υψηλή τάση (150kV) επιτυγχάνονται μέσω μετασχηματιστών και χρησιμοποιούνται για την οικονομικότερη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος, και το ρεύμα είναι αντιστρόφως ανάλογο της τάσης. Έτσι, οι υψηλότερες τάσεις οδηγούν σε μικρότερες απώλειες, και συνεπώς σε οικονομικότερη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2.3 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι επίσης μέρος των ΣΗΕ. Στο δίκτυο διανομής (ΔΔ) χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα τάσης. Τα επίπεδα αυτά είναι η μέση τάση (μερικές δεκάδες kV) και η χαμηλή τάση (400 – 230 V). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα ΔΔ είναι μετασχηματιστές υποβιβασμού, γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης, κατάλληλοι κόμβοι, αποζεύκτες και διακόπτες.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται ανάλυση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ). Εξετάζονται κατόπιν οι διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτές αποτελούν κύρια υποομάδα των ΜΔΠ. Αναλύονται επίσης οι τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζονται στα δίκτυα διανομής από την αυξανόμενη διείσδυση των ΜΔΠ. Στη συνέχεια, εξετάζεται αναλυτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιεί ένα τυπικό ΔΔ, δίνοντας έμφαση στα διακοπτικά στοιχεία. Εξετάζονται οι απώλειες που προκύπτουν σε αυτό και η επαναδιαμόρφωσή του. Στόχος είναι η μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος. Επιπλέον, αναλύεται η έννοια της ημερήσιας επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής. Παρουσιάζεται αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ημερήσια επαναδιαμόρφωση του ΔΔ. Αυτό γίνεται διότι η ημερήσια επαναδιαμόρφωση του ΔΔ αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται η παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου της βέλτιστης ημερήσιας επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής. Αρχικά παρουσιάζονται και εξηγούνται τα σύμβολα, τα σύνολα, οι παράμετροι και οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται. Έπειτα παρουσιάζονται οι εξισώσεις του μοντέλου. Παρουσιάζονται επίσης οι περιορισμοί του μοντέλου, οι λόγοι ύπαρξής τους και η μαθηματική διατύπωσή τους. Γίνεται τέλος, ο διαχωρισμός σε κύριες περιπτώσεις. Με βάση αυτές εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο. Για την κάθε προσέγγιση γίνονται οι κατάλληλες προσαρμογές..

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου. Για τον σκοπό αυτό, παρουσιάζονται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν (MATLAB, GAMS, και Microsoft Excel), καθώς και ο τρόπος ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ τους. Ακόμη, παρουσιάζονται αποσπάσματα κώδικα στα λογισμικά GAMS και MATLAB.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων κάθε περίπτωσης. Αυτά αφορούν τις απώλειες ενεργού ισχύος του ΔΔ, τις ελάχιστες τάσεις των κόμβων και τις τελικές τοπολογίες που εξάγονται. Κατόπιν γίνεται η σύγκριση αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται μια μελέτη κόστους εφαρμογής της προτεινόμενης προσέγγισης. Για τον σκοπό αυτό γίνεται παρουσίαση και ανάλυση του συνόλου των παραδοχών που απαιτούνται. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται αναβάθμιση του ΔΔ με την εισαγωγή αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών. Για αυτήν την αναβάθμιση εισάγονται υποπεριπτώσεις. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από οικονομικής σκοπιάς.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται η σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται η εξαγωγή των συμπερασμάτων και προτείνονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2: Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Θεωρώντας την πορεία της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση, το τελευταίο τμήμα ενός ΣΗΕ αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο διανομής (ΔΔ) λαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο μεταφοράς και τη διανέμει στους καταναλωτές. Χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα τάσης, η μέση τάση (μερικές δεκάδες kV - παραδοσιακά όριο θεωρούνται τα 69kV) και η χαμηλή τάση (400 – 230 V). Τα μέσα που χρησιμοποιεί είναι μετασχηματιστές υποβιβασμού, γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης, ζυγοί, αποζεύκτες και διακόπτες.

Αφετηρία του συστήματος της διανομής είναι οι υποσταθμοί υποβιβασμού της τάσης από υψηλή σε μέση τάση. Από αυτούς τους κόμβους του δικτύου, είτε θα υπάρχει απευθείας παροχή μέσης τάσης στους καταναλωτές μέσης τάσης, είτε θα υπάρχει ροή ισχύος προς υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης σε χαμηλή τάση, στην οποία συνδέονται μικρότεροι καταναλωτές, όπως οι οικιακοί. Όσον αφορά την κατασκευαστική διαμόρφωση των ΔΔ, σημαντικό ρόλο έχουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και η χωροταξική διαμόρφωση. Βασικός παράγοντας στην δόμηση ενός ΔΔ είναι η σχετική πληθυσμιακή συγκέντρωση στην περιοχή που καλείται να εξυπηρετήσει. Τα αστικά δίκτυα διανομής είναι κυρίως υπόγεια, καθώς τα εναέρια δίκτυα σε μεγάλη πυκνότητα έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην ασφάλεια και την αισθητική. Αντίθετα, στην επαρχία προτιμώνται τα εναέρια δίκτυα, λόγω του μικρότερου κόστους και της ευκολότερης αποκατάστασης βλαβών. Υπεύθυνος για τη διαχείριση του ΔΔ της Ελλάδας είναι από το 2010, ο ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας). Τα ΔΔ είναι το τμήμα ενός ΣΗΕ που εμφανίζει τις μεγαλύτερες απώλειες, καθώς αποτελεί τη βαθμίδα του δικτύου με τις σχετικά χαμηλότερες τάσεις. Στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης των απωλειών του ΔΔ, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, με κύριες την εγκατάσταση πυκνωτών αντιστάθμισης και την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ [1].

2.2 Διανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι

Ως διανεμημένοι ενεργειακοί πόροι (distributed energy resources) εννοούνται οι μικρής ισχύος μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) (distributed generation), τα ανταποκρινόμενα φορτία (responsive loads) και οι μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, εγκατεστημένες κοντά στην κατανάλωση. ΜΔΠ είναι, για παράδειγμα, τα μικρής ισχύος φωτοβολταϊκά συστήματα, ενώ τέτοιες μονάδες αποθήκευσης είναι οι συστοιχίες μπαταριών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται πολλοί σχετικοί όροι για να αναφερθούν στη διανεμημένη παραγωγή. Τέτοιοι όροι είναι η

διανεμημένη παραγωγή (distributed generation), διάσπαρτη (dispersed), αποκεντρωμένη (decentralized) ή ενσωματωμένη (embedded). Αυτοί οι όροι συχνά χρησιμοποιούνται για αναφορά στις ίδιες μονάδες, αλλά δεν είναι πάντα συνώνυμοι. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η αναφορά σε αυτές θα πραγματοποιείται με τον όρο μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ). Η ισχύς των ΜΔΠ μπορεί να κυμαίνεται από λίγα kW έως μερικές εκατοντάδες MW.

Συγκεκριμένα, οι ΜΔΠ μπορούν να διαχωριστούν σε συμβατικές και σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν οι διανεμημένες πηγές που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, όπως μικρές νηξελογεννήτριες και αεριοστρόβιλοι. Στη δεύτερη, ανήκουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα, τα αιολικά πάρκα, μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες, και άλλα.

Υπάρχουν τόσο οικονομικοί, όσο και περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί λόγοι για την αύξηση της εισαγωγής ΜΔΠ στα ΔΔ. Καθώς η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται συνεχώς, η εγκατάσταση ΜΔΠ δύναται να ανταποκριθεί κατάλληλα σε αυτήν. Η εναλλακτική λύση, που αφορά την κατασκευή μεγάλων εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εμπεριέχει μεγαλύτερο επενδυτικό ρίσκο, καθώς απαιτεί μεγαλύτερο κεφάλαιο και μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής. Επιπρόσθετα, με σωστό σχεδιασμό, οι ΜΔΠ μπορεί να αυξήσουν την ποιότητα ισχύος ενός ΔΔ και την αξιοπιστία του και ταυτόχρονα να μειώσουν τις απώλειες. Οι περιβαλλοντικοί στόχοι κρατών ή οργανισμών σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο απαιτούν ολοένα και μεγαλύτερη ποσοστιαία παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ. Ο κύριος λόγος είναι, μεταξύ άλλων, η ελαχιστοποίηση εκπομπών αερίων που ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

2.2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ΑΠΕ ανάλογα με την πρωτογενή μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που αξιοποιούν, μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- **Φωτοβολταϊκά συστήματα.** Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ή πάρκα, μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Βασικό στοιχείο της λειτουργίας τους είναι η χρήση ενός ημιαγωγικού στοιχείου, με συνηθέστερο το πυρίτιο (Si). Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων μετασχηματισμού ενέργειας είναι η ευρεία κλίμακα εφαρμογών τους, η οποία κυμαίνεται από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές πολύ μικρής ισχύος, όπως ηλιακοί φορτιστές ηλεκτρονικών συσκευών (power banks), υπολογιστές τσέπης κ.α., έως πολύ μεγάλα υπαίθρια φωτοβολταϊκά πάρκα, δεκάδων MW. Στα δεύτερα, η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται και μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από πλήθος ηλιακών κυψελών, που είναι ημιαγωγοί πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Επίσης, μεγάλο πλεονέκτημά τους θεωρείται η αθόρυβη και χωρίς ρύπους λειτουργία τους.

- **Ανεμογεννήτριες.** Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο γίνεται ως επί το πλείστον με ανεμογεννήτριες (Σχήμα 2.1). Καθώς ο άνεμος προσπίπτει στα πτερύγια της φτερωτής της ανεμογεννήτριας, δημιουργεί περιστροφική κίνηση, η οποία μέσω μηχανικής σύζευξης με γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος, παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Εγκαθιστώντας και συνδέοντας συστοιχίες ανεμογεννητριών, δημιουργείται ένα αιολικό πάρκο. Τα τρία βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας είναι η ταχύτητα εκκίνησης, η ταχύτητα

αποκοπής και η ονομαστική ταχύτητα. Ως ταχύτητα εκκίνησης ορίζεται η ταχύτητα του ανέμου στην οποία αποκτά τη δυνατότητα να παράγει ενεργό ισχύ. Ως ταχύτητα αποκοπής θεωρείται η ταχύτητα του ανέμου, η οποία υπερβαίνει τα λειτουργικά όρια της ανεμογεννήτριας. Σε αυτήν την περίπτωση, η λειτουργία της διακόπτεται για την αποφυγή μηχανικών βλαβών. Έτσι, σε αυτήν την κατάσταση, η παραγωγή ισχύος είναι μηδενική. Η ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας βρίσκεται στο διάστημα, στο οποίο μπορεί να παράγει την ονομαστική της ενεργό ισχύ αλλά δεν υπερβαίνει το όριο της ταχύτητας αποκοπής.



Σχήμα 2.1: Χερσαίο Αιολικό Πάρκο

- **Υδροηλεκτρικοί σταθμοί.** Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με τον όγκο νερού, τη διατομή των αγωγών και την υψομετρική διαφορά της υδατόπτωσης, επιλέγονται διαφορετικοί τύποι υδροστροβίλων, με κυριότερους τους υδροστρόβιλους τύπου Kaplan και Pelton. Η μορφολογία των πρώτων, μοιάζει με αυτή μιας προπέλας πλοίου και η πρόσπτωση νερού στα πτερύγια γίνεται παράλληλα με τον άξονα περιστροφής τους. Αντίθετα, η μορφολογία των δεύτερων είναι συγγενική με τον τροχό ενός νερόμυλου, όπου η πρόσπτωση νερού στα πτερύγια γίνεται παράκεντρα και κάθετα ως προς τον άξονα περιστροφής τους. Για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της διαθεσιμότητας του όγκου νερού, εισάγονται υδροηλεκτρικοί σταθμοί σε φράγματα. Με αυτόν τον τρόπο, το επίπεδο ισχύος αυξάνεται και γίνεται λόγος για υδροηλεκτρικό εργοστάσιο. Υπό ένα πρίσμα, τέτοιες μονάδες δεν χαρακτηρίζονται πλέον ως ΑΠΕ, καθώς η επίδραση στο φυσικό περιβάλλον και στη γεωμορφολογία είναι εκτεταμένη.

- **Μονάδες βιομάζας.** Στις μονάδες αυτές, ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιείται η βιομάζα, η οποία προέρχεται από φυτικούς ή ζωικούς οργανισμούς. Κυρίως προέρχεται από οργανικά απόβλητα και θεωρείται ανανεώσιμη, καθώς αποκαθίσταται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Έτσι, το όφελος χρήσης της είναι διπλό.

- **Γεωθερμικές μονάδες.** Γεωθερμία ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια της Γης. Γίνεται προσβάσιμη για εκμετάλλευση, καθώς διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται όταν, λόγω γεωμορφολογικών συνθηκών, παρουσιάζονται ρεύματα μεταφοράς. Αυτά όμως, περιορίζονται στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, είτε δημιουργούνται λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων. Κυρίως αξιοποιείται κοντά στους πόλους, λόγω του πεπλατυσμένου, σφαιρικού σχήματος της γης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας που αξιοποιεί ιδιαίτερα την γεωθερμία, αποτελεί η Ισλανδία.

- **Μονάδες αξιοποίησης ενέργειας των κυμάτων (Σχήμα 2.2).** Ως ενέργεια κυμάτων ορίζεται η ενέργεια που προέρχεται από τη θάλασσα, και είναι είτε μηχανική, είτε θερμική. Η μηχανική ενέργεια αφορά την κινητική ενέργεια των κυμάτων, η οποία αξιοποιείται καθώς τα κύματα προσπίπτουν σε στροβίλους, δημιουργώντας περιστροφική κίνηση, είτε από την εισροή υδάτων σε τεχνητές δεξαμενές, λόγω του φαινομένου της παλίρροιας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε στενές εκβολές ποταμών, μέσω της δημιουργίας φραγμάτων. Η θερμική ενέργεια αφορά τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού και αξιοποιείται υπό την προϋπόθεση ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πυθμένα και επιφάνειας υπερβαίνει τους 3,5 βαθμούς Κελσίου.



Σχήμα 2.2: Μονάδα Αξιοποίησης Ενέργειας Κυμάτων

- **Πυρηνικοί σταθμοί.** Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται με τη σχάση ή τη σύντηξη πυρήνων σωματιδίων. Για την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που εκλύεται από αυτές τις αντιδράσεις και για την ελεγχόμενη δημιουργία τους, αυτές πραγματοποιούνται σε ειδικούς αντιδραστήρες. Τα συνηθέστερα χημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας είναι το ουράνιο, το πλουτόνιο και ισότοπα αυτών. Τόσο η ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται, όσο και τα πυρηνικά απόβλητα είναι ελάχιστα,

συγκριτικά με την ποσότητα ενέργειας που εκλύεται. Για αυτόν τον λόγο η πυρηνική ενέργεια τείνει να θεωρείται ανανεώσιμη.

Τα μεγάλα αιολικά και τα ηλιακά πάρκα αντιμετωπίζονται ως μονάδες παραγωγής σημαντικής ισχύος. Ωστόσο, οι μονάδες αυτές διαφέρουν από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν διαθέτουν δυνατότητα ελέγχου της παραγωγής της ενέργειας. Μια ακόμα αδυναμία των συγκεκριμένων ΑΠΕ, αφορά το γεγονός ότι στα σύγχρονα ΣΗΕ, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα με την κατανάλωσή της. Ακόμη, δεν υπάρχει ακόμη η δυνατότητα της αποδοτικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, στα μεγέθη που εξετάζονται. Έτσι, όταν υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής, δεν είναι πάντα αξιοποιήσιμη όλη η ενέργεια των ΑΠΕ, καθώς πρέπει να διατηρηθεί η ομαλή λειτουργία του ΣΗΕ. Έτσι, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μείζον θέμα έρευνας σήμερα και θα εξακολουθήσει να αποτελεί, αναμφισβήτητα, για τα επόμενα χρόνια.

2.2.2 *Επιπτώσεις Διείσδυσης Μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής*

Η εισαγωγή ΜΔΠ στα ΔΔ έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη αμφίδρομων ροών ισχύος. Έτσι, η είσοδος των ΜΔΠ στα ΔΔ έχει επιφέρει προκλήσεις στη σχεδίαση και τη λειτουργία τους. Οι κύριοι λόγοι είναι οι ακόλουθοι: ένα παραδοσιακό ΣΗΕ δεν σχεδιάστηκε με τέτοιες προδιαγραφές και συνεπώς δύναται να παρουσιάσουν διακυμάνσεις στις τάσεις, που να υπερβαίνουν τα όρια που του έχουν τεθεί. Επίσης, ο εγκατεστημένος εξοπλισμός προστασίας μπορεί να είναι λειτουργικά προσανατολισμένος σε ροή ισχύος μονής κατεύθυνσης (από τον υποσταθμό προς τα φορτία) και να παρουσιάσει σφάλμα ή να καταστραφεί σε αντίθετη ροή ισχύος. Συνήθως, οι ΜΔΠ συνδέονται στο δίκτυο και λειτουργούν υπό σταθερό συντελεστή ισχύος. Η πρακτική αυτή συναντάται ως ‘συνδέω και ξεχνώ’ (fit and forget) και οι μονάδες αντιμετωπίζονται από τον Διαχειριστή του ΔΔ ως ‘αρνητικά’ φορτία. Παρά το γεγονός πως η ‘πράσινη’ ενέργεια δεν έχει κόστος παραγωγής, πέραν των δαπανών εγκατάστασης και συντήρησης των μονάδων από ΑΠΕ, απαιτείται μελέτη για την σύνδεση των μονάδων ΑΠΕ στο δίκτυο. Οι κυριότερες προκλήσεις από τη σύνδεση στο δίκτυο των ΜΔΠ είναι οι ακόλουθες:

- **Επιπτώσεις στην προστασία του δικτύου.** Η εγκατάσταση πολλών ΜΔΠ σε ένα υφιστάμενο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στα μέσα προστασίας του δικτύου. Τα πιο σημαντικά φαινόμενα που δημιουργούνται είναι η μεταβολή της στάθμης βραχυκύκλωσης, η αμφίδρομη ροή ρεύματος βραχυκύκλωσης, η νησιδοποίηση (‘islanding’) και σφάλματα που προσομοιάζονται με λογικά λάθη, όπως είναι η πιθανή τύφλωση των προστασιών (‘false negative’) και η εσφαλμένη ενεργοποίηση τους (‘false positive’).
- **Ποιότητα ισχύος.** Το πλήθος των συνδεδεμένων ΜΔΠ σε ένα δίκτυο αυξάνεται. Πολλές από τις ΜΔΠ δεν χαρακτηρίζονται από σταθερή ή ελεγχόμενη συμπεριφορά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός συνδέσεων και αποσυνδέσεων των ‘αρνητικών’ φορτίων που αντιλαμβάνεται το δίκτυο. Έτσι, προκαλούνται απότομες διακυμάνσεις της τάσης. Επίσης, ανάλογα με το είδος των ΜΔΠ, το μέγεθός τους, τον τρόπο

διασύνδεσής τους και την παράλληλη λειτουργία τους, είναι πιθανόν να εισαχθούν στο δίκτυο αρμονικές συνιστώσες τάσης.

- **Ανύψωση τάσης.** Η σύνδεση ΜΔΠ μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες αυξομειώσεις της τάσης, με κυριότερη αιτία τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα. Αυτό συμβαίνει διότι η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, οι ροές ισχύος επιδρούν στο μέτρο της τάσης και αντίστροφα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις περιπτώσεις μεγάλης έγχυσης ισχύος από ΜΔΠ, να προκαλείται ανύψωση τάσης πλησίον του σημείου σύνδεσής τους στο δίκτυο.

- **Συμφόρηση γραμμών διανομής.** Όπως είναι αναμενόμενο, η μεγάλη διείσδυση ΜΔΠ οδηγεί σε μεγαλύτερες ροές ισχύος και αυξημένη ένταση ρεύματος στο υφιστάμενο δίκτυο. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υπερφορτίσεις των γραμμών διανομής, εάν δεν συνοδεύεται από την αντίστοιχη αναβάθμιση του δικτύου. Έτσι, επιβάλλεται να πραγματοποιούνται οι κατάλληλες ενέργειες και αναβαθμίσεις, ώστε οι γραμμές και ο εξοπλισμός να μην υπερβαίνουν τα λειτουργικά τους όρια.

2.3 Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του εξοπλισμού ενός τυπικού ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά είναι οι υποσταθμοί και οι μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης, τα συστήματα πυκνωτών και γειώσης, οι γραμμές διανομής και τα διακοπτικά στοιχεία.

2.3.1 Υποσταθμοί Υποβιβασμού Τάσης και Μετασχηματιστές Υποβιβασμού

Τα πρώτα στοιχεία του ΔΔ είναι οι μετασχηματιστές υποβιβασμού (**Σχήμα 2.3**) της τάσης, οι οποίοι μετασχηματίζουν την υψηλή τάση (ΥΤ) σε μέση τάση (ΜΤ). Βρίσκονται εγκατεστημένοι σε υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ, εξοπλισμένοι με τους απαραίτητους μηχανισμούς προστασίας που αποτελούνται από διακόπτες (συχνά αυτόματους), ασφαλειοαποζεύκτες, εγκάρσιες ή εν σειρά χωρητικότητες, γειώσεις και άλλους μηχανισμούς. Οι μετασχηματιστές του δικτύου επιτελούν το έργο υποβιβασμού της τάσης σε χαμηλότερα επίπεδα, διατηρώντας στο ακέραιο τη ροή ισχύος, με εξαίρεση τις εσωτερικές απώλειες που παρουσιάζουν. Στην Ελλάδα, οι συχνότεροι μετασχηματιστές υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ είναι οι 150/20kV και 150/33kV, και οι συχνότεροι μετασχηματιστές υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ είναι οι 20kV/400V και 33kV/400V. Συχνά βέβαια, είναι εξοπλισμένοι με έναν μηχανισμό μικρής μεταβολής της τάσης εξόδου. Αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και λειτουργεί παρέχοντας ένα σύστημα πολλαπλών λήψεων στο πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, και ενός μηχανισμού κινητών επαφών, στο δευτερεύον. Έτσι, δίνει τη δυνατότητα βηματικής αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού, υπό φορτίο. Έτσι, όταν παραβιάζεται το επίπεδο τάσης μιας γραμμής, ο Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, με μία ή περισσότερες αλλαγές λήψεων, επαναφέρει την τάση εντός των επιθυμητών ορίων.



Σχήμα 2.3: Τμήμα Υποσταθμού Υποβιβασμού Τάσης 150/33kV

2.3.2 Συστήματα Βοηθητικών Πυκνωτών

Συχνά, οι υποσταθμοί και οι μετασχηματιστές διαθέτουν συστοιχίες πυκνωτών, με στόχο τη ρύθμιση, τόσο του επιπέδου της τάσης, όσο και του συντελεστή φορτίου. Οι συστοιχίες πυκνωτών, είτε συνδέονται σε σειρά (series capacitors) είτε συνδέονται εγκάρσια (shunt capacitors). Οι εγκάρσιοι πυκνωτές χωρίζονται επίσης σε εγκάρσιους και στατούς. Η λειτουργία τους είναι αυτή της αντιστάθμισης, με την έννοια ότι μειώνουν την άεργο ισχύ που δημιουργείται, λόγω της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών. Έτσι, μεταβάλλουν τον συντελεστή ισχύος, φέροντάς τον κατά το δυνατόν, πλησιέστερα στη μονάδα. Παράλληλα, ανυψώνουν το επίπεδο τάσης. Έτσι, η χρήση τους οδηγεί σε οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος.

2.3.3 Γραμμές Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι γραμμές διανομής είναι ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του ΔΔ και το μεγαλύτερο μέρος των αγωγών σε ένα ΣΗΕ. Αποτελούν τον τρόπο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες συνολικές απώλειες ισχύος και τη μεγαλύτερη πτώση τάσης, από την αναχώρηση ως την άφιξή τους. Στην Ελλάδα, το δίκτυο μέσης τάσης χρησιμοποιεί τριφασικές γραμμές διανομής, που αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσης και έναν ουδέτερο. Η διανομή της χαμηλής τάσης (400V) πραγματοποιείται κυρίως μέσω τριφασικών γραμμών αλλά και κάποιων, λιγότερων στο πλήθος, μονοφασικών γραμμών (230V). Στην μέση και χαμηλή τάση δεν χρησιμοποιούνται γραμμές διανομής υπό συνεχές ρεύμα (DC), ενώ για την εγκατάσταση και την ασφαλή λειτουργία τους, αξιοποιείται πλήθος πυλώνων, συνδέσμων και μονωτών.

2.3.4 Συστήματα Γείωσης

Απαραίτητος μηχανισμός σε κάθε υποσταθμό είναι η γείωση. Ανάλογα με τον ρόλο που επιτελούν σε κάθε χρήση, οι γειώσεις κατηγοριοποιούνται σε γειώσεις προστασίας, ασφαλείας και λειτουργίας.

Η γείωση προστασίας συνδέει όλα τα αγώγιμα μέρη μιας εγκατάστασης με την γη, με στόχο την αποτροπή εμφάνισης επικίνδυνης τάσης σε αυτά. Έχει τρεις τρόπους κατασκευής: την άμεση γείωση, την ουδετέρωση και την γείωση με ηλεκτρονόμους διαφυγής.

Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει για την μεταφορά στατικών φορτίων προς την γη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας γείωσης αποτελεί το αλεξικέραυνο.

Η γείωση λειτουργίας αποτελεί τμήμα του κυκλώματος και αφορά τη γείωση του ουδέτερου κόμβου των μετασχηματιστών υποβιβασμού, την κατά διαστήματα γείωση του ουδέτερου κόμβου ενός δικτύου ΧΤ και την γείωση που χρησιμοποιούν οι τηλεφωνικές γραμμές ως δεύτερο αγωγό.

2.3.5 Διακοπτικά Στοιχεία

Τα διακοπτικά στοιχεία (διάφορα είδη διακοπών, ασφαλειών και αποζευκτών) είναι απαραίτητα για τη λειτουργία ενός ΣΗΕ. Χρησιμοποιούνται για την ευελιξία, την ασφάλεια, τη διαχείριση και την οικονομικότερη λειτουργία του. Ανάλογα με τα ρεύματα που μπορούν να διακόψουν, τα διακοπτικά στοιχεία μέσης τάσης μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες.

Για χειρισμούς σε μηδενικό ή ελάχιστο ρεύμα χρησιμοποιούνται αποζεύκτες και γειωτές (ή ασφαλειοαποζεύκτες). Έχουν ορατές επαφές, ώστε να διακρίνεται από απόσταση η κατάσταση λειτουργίας τους για λόγους ασφαλείας. Μανδαλώνονται μηχανικά με διακόπτες για την αποφυγή δημιουργίας επικίνδυνων τόξων και πρέπει να αντέχουν σε ρεύματα σφαλμάτων όταν είναι κλειστοί, αλλά και σε υπερτάσεις, όταν είναι ανοιχτοί. Η σειρά των χειρισμών που πρέπει να γίνουν είναι συγκεκριμένη και είναι η ακόλουθη. Για την απομόνωση της γραμμής υπό φορτίο, πρώτα ανοίγει ο διακόπτης φορτίου ή ισχύος, έπειτα ανοίγει ο αποζεύκτης, και τέλος, κλείνει ο γειωτής. Στην επανασύνδεση της γραμμής, η σειρά χειρισμών είναι η ακριβώς αντίθετη. Δηλαδή, πρώτα ανοίγει ο γειωτής, έπειτα κλείνει ο αποζεύκτης, και τέλος, κλείνει ο διακόπτης.

Σε λειτουργία υπό φορτίο και για ονομαστικά ρεύματα χρησιμοποιούνται διακόπτες φορτίου (**Σχήμα 2.4**). Στο άνοιγμα μιας μηχανικής επαφής, υπό μέση τάση, δημιουργούνται ηλεκτρικά τόξα, τα οποία έχουν αρνητικά αποτελέσματα στην αντοχή των υλικών. Για αυτό, η σβέση τους πρέπει να είναι γρήγορη και ελεγχόμενη. Η σβέση του τόξου μπορεί να γίνει στον αέρα, όπου η απόσταση που κινούνται οι αποζεύκτες είναι μεγάλη. Ο διακόπτης πρέπει να βρίσκεται σε ασφαλή θέση από άποψη απόστασης, τόσο σε σχέση με άλλα στοιχεία του εξοπλισμού, όσο και με πιθανή ανθρώπινη παρουσία. Σε αυτή την περίπτωση, το ηλεκτρικό τόξο και η κατάσταση λειτουργίας του διακόπτη, είναι ορατά από απόσταση, καθώς οι ακροδέκτες είναι ορατοί. Άλλοι τρόποι σβέσης τόξου πραγματοποιούνται εντός κυλινδρικών

θαλάμων με μονωμένα τοιχώματα, οι οποίοι περιέχουν αέρα, εξαφθοριούχο θείο (SF_6), ή κενό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι ακροδέκτες δεν είναι ορατοί, οπότε διαθέτουν ορατή ένδειξη κατάστασης λειτουργίας στο εξωτερικό τους (ανοιχτός – κλειστός).



Σχήμα 2.4: Διακόπτης Φορτίου SF_6 , 11kV

Στις ίδιες εντάσεις ρεύματος όπου χρησιμοποιούνται διακόπτες φορτίου, χρησιμοποιούνται επίσης διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches). Ο διακόπτης μόνωσης έχει την ικανότητα να ανοίγει σε ονομαστικά ρεύματα αλλά όχι σε ρεύματα βραχυκυκλώσεως. Έτσι, λειτουργεί σε συνδυασμό με έναν διακόπτη ισχύος. Έχει την ικανότητα να μετράει κύκλους επαναφοράς, δηλαδή ζεύγη υπερεντάσεων – διακοπής και ρυθμίζεται ώστε να ανοίγει μετά από έναν προκαθορισμένο αριθμό τέτοιων κύκλων (ένας έως τρεις).

Για ρεύματα σφάλματος χρησιμοποιούνται διακόπτες ισχύος, σε συνδυασμό με ηλεκτρονόμους, για πρωτογενή και δευτερογενή προστασία, αντίστοιχα. Όπως και στους διακόπτες φορτίου, οι διακόπτες ισχύος χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιούν για τη σβέση του τόξου. Οι συνηθέστεροι είναι οι διακόπτες ισχύος πτωχού ελαίου, οι εξαφθοριούχου θείου (SF_6) και οι διακόπτες κενού. Η πρωτογενής προστασία αφορά τους δύο εσωτερικούς μηχανισμούς προστασίας. Ένας διακόπτης ισχύος περιέχει ένα θερμικό στοιχείο – έλασμα, το οποίο χαλαρώνει όταν θερμαίνεται από παροδικά ρεύματα, μεγαλύτερα των ονομαστικών. Επίσης, περιέχει και ένα ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο, το οποίο ανταποκρίνεται σε απότομα ρεύματα (όπως, για παράδειγμα, αυτά των βραχυκυκλώσεων). Ο ηλεκτρονόμος χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τον διακόπτη, για λόγους καλύτερης συνεργασίας με τα όργανα της ΔΕΗ. Όπως και στους περισσότερους διακόπτες φορτίου, οι διακόπτες ισχύος δεν έχουν ορατούς ακροδέκτες. Συνεπώς, σε αυτούς χρησιμοποιείται πάντα ένδειξη κατάστασης λειτουργίας.

Σημαντική υποκατηγορία διακοπών με ευρεία εφαρμογή, αποτελούν οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ). Πρόκειται για διακόπτες που συνοδεύονται από ένα σύστημα ελέγχου, τον “Controller”, που φέρει έναν πίνακα ελέγχου (Σχήμα 2.5). Σε αυτόν έχουν μετακινηθεί οι ηλεκτρονόμοι (ή το σύστημα ελέγχου αυτών) ενός κλασικού διακόπτη ισχύος. Έτσι, έχει την δυνατότητα να ρυθμίζει και να διαχωρίζει την ελάχιστη ένταση διέγερσης η οποία προκαλείται από σφάλματα φάσης και σφάλματα γης. Επίσης, ρυθμίζει τους χρόνους επανάζευξης ή επαναφοράς στην αρχική κατάσταση. Βασικό πλεονέκτημά τους αποτελεί η ικανότητα του χειρισμού τους από απόσταση, παρέχοντας έτσι ασφάλεια στον χειριστή [2].



Σχήμα 2.5: Απομακρυσμένος Ελεγκτής ενός ΔΑΕ

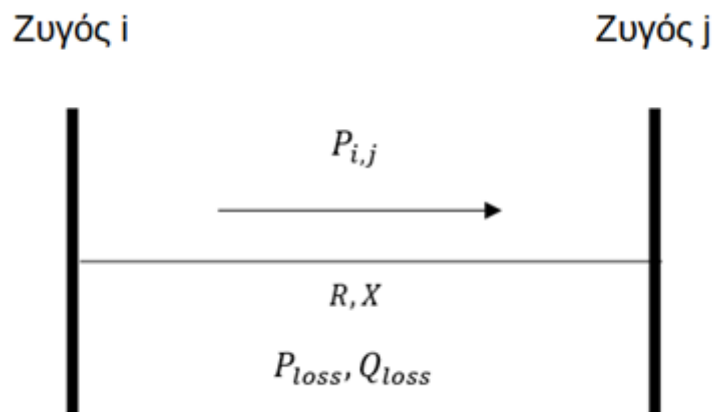
Η χρήση ασφαλειών είναι επίσης απαραίτητη στο ΔΔ. Αυτές είναι μιας χρήσης και αποτελούν το τελευταίο μέσο προστασίας του ΔΔ. Αυτό θα ενεργοποιηθεί σε περίπτωση που έχουν αποτύχει οι υπόλοιποι μηχανισμοί αντιμετώπισης σφάλματος. Στόχος τους είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής, του εξοπλισμού και η απομόνωση των προβληματικών μερών του δικτύου, για περιορισμό των βλαβών. Τα διάφορα μέρη του δικτύου χωρίζονται σε ζώνες προστασίας και προστατεύονται με διαβάθμιση στη χρήση των ασφαλειών. Ο εσωτερικός μηχανισμός λειτουργίας τους είναι παρόμοιος με αυτόν των διακοπών. Χωρίζονται σύμφωνα με τον μηχανισμό που χρησιμοποιούν, σε σκόνης και εκτόνωσης, για χρήση σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο. Οι ασφάλειες εκτόνωσης, επιπρόσθετα, χωρίζονται σε βραδείας ή ταχείας τήξης, ανάλογα με το αν ενεργοποιούνται σε υπερένταση διαρκείας ή σε υπερένταση κρουστικής μορφής.

2.4 Απώλειες Ενεργού Ισχύος Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως απώλεια ενέργειας ενός συστήματος, θεωρείται η μετατροπή ωφέλιμης ενέργειας σε μια μη αξιοποιήσιμη μορφή. Συχνά, αυτή η μορφή ενέργειας είναι η θερμότητα. Σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), οι θερμικές απώλειες προκύπτουν αφενός στη διαδικασία παραγωγής της όσο και στο σύστημα μεταφοράς και διανομής. Κατά την παραγωγή, όταν το ΣΗΕ βασίζεται στη καύση γαιανθράκων και βιομάζας, προκύπτει ένα μεγάλο μέρος θερμότητας που απορρίπτεται. Ακόμα και στην παραγωγή από ΑΠΕ, δημιουργούνται απώλειες, όπως για παράδειγμα οι θερμικές απώλειες μιας ανεμογεννήτριας. Οι απώλειες αυτές είναι ενέργεια που δεν μπορεί να αποφέρει κέρδος, όμως αντιστοιχεί σε κόστος παραγωγής. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της κατανάλωσης πρώτων υλών, αλλά και λόγω του κόστους αρχικής

επένδυσης των εγκαταστάσεων παραγωγής και της διαχείρισής τους. Έτσι, είναι σημαντικό να ελαχιστοποιούνται.

Συγκεκριμένα στα ΔΔ, κύρια πηγή απωλειών είναι οι γραμμές διανομής. Η απορροφούμενη ισχύς από μια γραμμή, η οποία χαρακτηρίζεται ως απώλεια ισχύος, είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ισχύος. Κατά τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, οι απώλειες αφορούν τις ενεργές και τις άεργες απώλειες που εμφανίζονται στις γραμμές του δικτύου. . Οι απώλειες ενεργού ισχύος προκύπτουν από την ωμική αντίσταση των γραμμών (R) και εκφράζουν την ισχύ της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική. Οι απώλειες άεργου ισχύος οφείλονται στην επαγωγική αντίδραση των γραμμών (X).



Σχήμα 2.6: Ροή Ισχύος και Απώλειες μεταξύ δύο Κόμβων

Ως ενεργός ισχύς, ορίζεται η ισχύς η οποία είναι ικανή να παράγει έργο, και συνεπώς, οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι μείζονος σημασίας. Η άεργος ισχύς προκύπτει μόνο στο εναλλασσόμενο ρεύμα και αντιπροσωπεύει τη στιγμιαία ισχύ που μεταφέρεται από το ένα άκρο της γραμμής στο άλλο, με αποτέλεσμα να έχει μηδενική μέση τιμή και άρα αδυναμία εκτέλεσης έργου [3]. Υπάρχουν πολλά δευτερεύοντα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που οδηγούν σε απώλειες σε ένα σύστημα μεταφοράς και διανομής ενέργειας. Αυτά είναι το επιδερμικό φαινόμενο, το φαινόμενο Corona, τα διαφεύγοντα ρεύματα, τα δινορεύματα και οι απώλειες των μετασχηματιστών. Το σύνολό τους δύναται να φτάσει από 3% έως 5% του συνολικού φορτίου [4]. Αυτό το μικρό σχετικά ποσοστό απωλειών είναι εγγενές σε ένα ΣΗΕ και δεν μπορεί εύκολα να μεταβληθεί.

Το επιδερμικό φαινόμενο συνίσταται στην ανομοιογενή κατανομή της πυκνότητας του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στους συμπαγείς αγωγούς. Έχει παρατηρηθεί ότι, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από υψίσυχο εναλλασσόμενο ρεύμα, η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη στην επιφάνειά του, ενώ εσωτερικά είναι οριακά μηδενική. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, τα κινούμενα φορτία διέρχονται μέσα σε έναν εξωτερικό φλοιό, στην επιφάνεια του αγωγού, με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης αυτού, όσο αυξάνεται η συχνότητα του ρεύματος.

Καθώς αυξάνεται η τάση λειτουργίας των εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνεται και η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια των αγωγών της γραμμής. Ο αέρας, ως μονωτικό υλικό, καλύπτει το σύνολο των εναέριων ηλεκτρικών γραμμών, καθώς και του εξοπλισμού των υποσταθμών. Όταν αυτή η ένταση υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή, γίνεται

διάσπαση του στρώματος του αέρα που περιβάλλει το στέρεο διηλεκτρικό του μονωτήρα. Εμφανίζεται δηλαδή το φαινόμενο Corona. Το φαινόμενο αυτό, κατά την εμφάνισή του, οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και σε φθορά ή και σε καταστροφή του εξοπλισμού, καθώς σχηματίζεται ηλεκτρικό τόξο στο μονωτικό υλικό του εξοπλισμού. Οι εκκενώσεις Corona λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια μονωτικών μέσων, όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί μια τιμή. Έτσι, ξεκινούν οι ηλεκτρικές εκκενώσεις στο στρώμα του αέρα. Η ένταση του φαινομένου Corona είναι πολυπαραγοντική και εξαρτάται από την υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, την περιεκτικότητα του αέρα, τους στερεούς ρύπους στα μονωτικά, τις αποστάσεις μόνωσης και την τάση. Εκτός από τις επιπρόσθετες απώλειες προκαλεί παράσιτα στους γειτονικούς ραδιοφωνικούς σταθμούς και τηλεοπτικούς δέκτες, δημιουργεί χαρακτηριστικό τριγμό λόγω των θυσανοειδών εκκενώσεων κατά μήκος των γραμμών (οι οποίες είναι ορατές υπό κατάλληλο φωτισμό), παραμορφώνει τα οδεύοντα κύματα και παράγει διαβρωτικά στοιχεία (όπως το όζον και διάφορα οξειδία αζώτου).

Καθώς οι γραμμές διανομής, που αναλύονται στο μοντέλο, διαθέτουν τόσο ωμική αντίσταση όσο και επαγωγική αντίδραση, μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύνθετο φορτίο ‘R, L’. Έτσι οι απώλειές τους μπορούν να εκφραστούν με τις ακόλουθες σχέσεις [5]:

$$P_{loss_{i,j}} = \frac{R_{i,j}|V_i|^2}{R_{i,j}^2 + (2\pi f)^2 L_i^2} = \frac{R_{i,j}|V_i|^2}{R_{i,j}^2 + X_{i,j}^2} \quad (2.1)$$

$$Q_{loss_{i,j}} = \frac{2\pi f L_i |V_i|^2}{R_i^2 + (2\pi f)^2 L_i^2} \quad (2.2)$$

όπου σε μία γραμμή που συνδέει δύο κόμβους i και j , αντίστοιχα, υπολογίζονται οι απώλειες της γραμμής, συναρτήσει των αμετάβλητων χαρακτηριστικών τους (ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση γραμμής R, X), των ρών ισχύος ($P_{i,j}, Q_{i,j}$) και της διαφοράς των τάσεων (πτώση τάσης) μεταξύ των κόμβων. Συμπληρώνεται πως με V συμβολίζεται η τάση κόμβου i ή j , L η αυτεπαγωγή της γραμμής και f η συχνότητα του δικτύου.

Κάθε φορτίο συνδεδεμένο σε ζυγό του συστήματος είναι συγκεκριμένο και πρέπει να ικανοποιείται κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, ένας σχετικά εύκολος τρόπος μείωσης των απωλειών είναι η αλλαγή της “διαδρομής” της ροής ισχύος. Με αυτήν τη μέθοδο, το ΣΗΕ δημιουργεί και εκμεταλλεύεται υψηλότερες τάσεις και άρα χαμηλότερα ρεύματα. Η εύρεση αυτής της βέλτιστης ‘διαδρομής’, ορίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF), το οποίο δύναται να επιλυθεί, μέσω της τεχνικής της επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής.

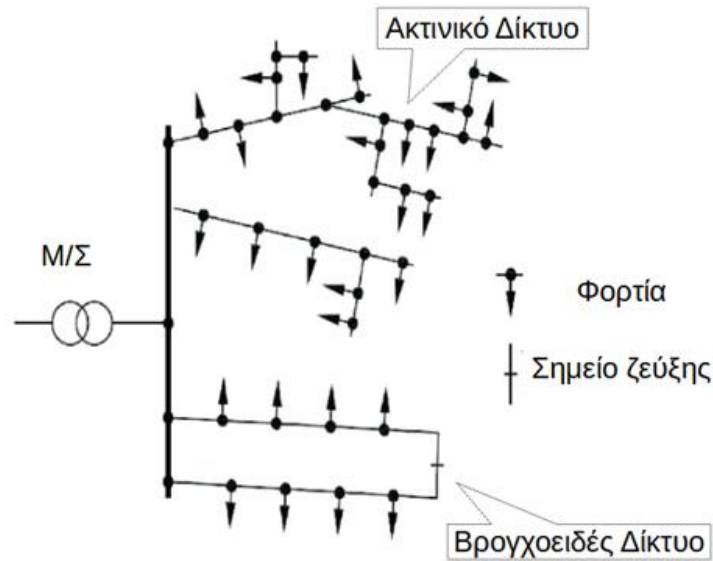
2.5 Επαναδιαμόρφωση Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένας σημαντικός και αποτελεσματικός τρόπος ελαχιστοποίησης των απωλειών ισχύος των ΔΔ είναι η εύρεση της τοπολογίας του δικτύου που τις ελαχιστοποιεί, ενώ παράλληλα ικανοποιεί τους εκάστοτε περιορισμούς που έχουν τεθεί. Η τοπολογία του δικτύου αλλάζει (ή επαναδιαμορφώνεται), όταν αλλάζουν οι γραμμές διανομής που χρησιμοποιεί. Με την αλλαγή

της κατάστασης λειτουργίας των διακοπών, τίθενται εντός ή εκτός λειτουργίας οι γραμμές διανομής στις οποίες αυτοί είναι συνδεδεμένοι [6]. Προκύπτει έτσι νέα τοπολογία του δικτύου που χρησιμοποιεί διαφορετικές γραμμές για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην διεθνή βιβλιογραφία η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης τοπολογίας του δικτύου διανομής συναντάται ως “Optimal Distribution Network Reconfiguration (ODNR)” .

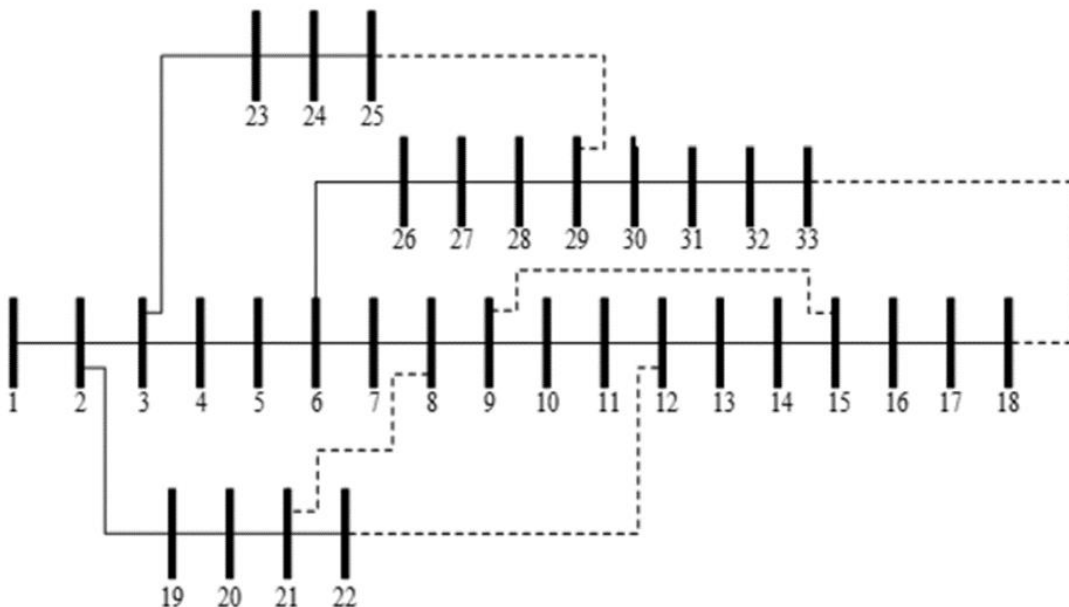
Είναι χρήσιμο να γίνει αναφορά στα τρία βασικά είδη τοπολογιών ενός δικτύου, τα οποία είναι: τα βροχοειδή, τα ακτινικά και τα δικτυωτά. Οι βροχοειδείς τοπολογίες συναντώνται κυρίως σε υπόγεια δίκτυα, ενώ οι ακτινικές τοπολογίες σε εναέρια δίκτυα. Τα δικτυωτά δίκτυα έχουν αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας, καθώς περιλαμβάνουν συνδέσεις πολλών τμημάτων και κόμβων του δικτύου, και συχνά είναι πολύ ακριβότερα και δυσχερέστερα στη σχεδίαση και την ανάλυσή τους. Στο **Σχήμα 2.7**, παρουσιάζεται ένα σύνθετο δίκτυο, που συνδυάζει δύο από τις τοπολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το ανώτερο τμήμα αποτελεί ένα ακτινικό δίκτυο, ενώ το κατώτερο είναι βροχοειδές. Βασικό πλεονέκτημα ενός βροχοειδούς δικτύου είναι η οικονομικότερη λειτουργία του. Επιπρόσθετα, όντας υπόγειο, είναι λιγότερο ευάλωτο σε σφάλματα λόγω εξωτερικών επιδράσεων. Εάν όμως συμβεί σφάλμα, η αποκατάστασή του είναι δυσκολότερη και ένα μεγάλο μέρος των καταναλωτών δύναται να μην εξυπηρετηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, τα ακτινικά δίκτυα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευελιξία στην επέκταση, στη διαχείριση και την αποκατάσταση σφαλμάτων. Οι ραγδαία αυξανόμενες ανάγκες για ενέργεια δίνουν αυξημένη βαρύτητα στην επεκτασιμότητα και την ευελιξία ενός δικτύου.

Τα ακτινικά δίκτυα αποτελούν μεγάλο μέρος των παγκόσμιων δικτύων διανομής. Σε αυτήν τη τοπολογία δικτύου, η διαδρομή από την αρχική παροχή (υποσταθμός διανομής) στη κατανάλωση, είναι μοναδική και αποτελεί τον λόγο που, σε περίπτωση σφάλματος, μία ή περισσότερες ομάδες καταναλωτών δεν θα εξυπηρετηθεί. Αυτό εξαρτάται από το πόσο κοντά στον υποσταθμό διανομής συνέβη το σφάλμα. Αυτό το μειονέκτημα αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με τη χρήση αποζευκτών, που είναι ανοιχτοί υπό φορτίο (tie switches) και έχουν τη δυνατότητα να συνδέσουν διαφορετικά μέρη του δικτύου. Έτσι, αν κάποια γραμμή διανομής βγει εκτός λειτουργίας λόγω σφάλματος, οι αποζεύκτες άλλης γραμμής πρέπει να κλείσουν, εισάγοντας νέα ροή ισχύος σε διαφορετική διαδρομή. Εξασφαλίζεται συνήθως έτσι, αδιάλειπτη εξυπηρέτηση των καταναλωτών.



Σχήμα 2.7: Σύνθετο Δίκτυο

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ακτινικού δικτύου είναι το δίκτυο IEEE-33, ένα θεωρητικό δίκτυο τριάντα τριών (33) κόμβων, που ενδείκνυται για εφαρμογή μοντέλων βελτιστοποίησης, καθώς έχει υψηλές απαιτήσεις από άποψη φορτίου και ορίων λειτουργίας. Όπως είναι λογικό, πρέπει να εξασφαλίζεται η διαρκής εξυπηρέτηση των καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι σε κάθε κόμβο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, εάν τεθεί εκτός λειτουργίας μια γραμμή του δικτύου λόγω σφάλματος, ή για βελτιστοποίηση της λειτουργίας του, μια άλλη γραμμή πρέπει να ενεργοποιηθεί, για να εξασφαλίσει αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Έτσι προκύπτει πως, τόσο ο συνολικός αριθμός των ενεργών όσο και των ανενεργών γραμμών, διατηρείται σταθερός, εφόσον εξυπηρετούνται τα φορτία όλων των κόμβων.



Σχήμα 2.8: Το Δίκτυο IEEE-33 στην Αρχική Τοπολογία του

2.5.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση του Προβλήματος της Βέλτιστης Επαναδιαμόρφωσης των Δικτύων Διανομής

Στην ενότητα αυτή θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, και θα παρουσιαστούν περιληπτικά άρθρα της διεθνούς βιβλιογραφίας, τα οποία θα εξεταστούν ως προς τους πρωταρχικούς στόχους που θέτουν. Η ελαχιστοποίηση του πλήθους αλλαγών κατάστασης διακοπών χαρακτηρίζεται ως δευτερεύον στόχος. Αυτό διότι προκύπτει από την επαναδιαμόρφωση, ως μέσο επίλυσης προβλημάτων. Αναγνωρίζονται έτσι, οι ακόλουθοι έξι βασικοί λόγοι επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής:

1. Ελαχιστοποίηση απωλειών.
2. Βελτίωση αξιοπιστίας.
3. Εξισορρόπηση φορτίων.
4. Διείσδυση μονάδων διανεμημένης παραγωγής.
5. Βελτίωση τάσεων
6. Αποκατάσταση λειτουργίας σε περίπτωση σφάλματος.

Η πλειονότητα των άρθρων θέτει περισσότερους από έναν άμεσους στόχους. Ταυτόχρονα, με έμμεσο τρόπο, μέσω της χρήσης περιορισμών, τίθενται επιπρόσθετοι στόχοι.

Στο άρθρο των Baran και Wu [7] πραγματοποιείται επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής με την αλλαγή της κατάστασης των διακοπών απομόνωσης (sectionalizing switches). Σκοπός είναι η μείωση των απωλειών ισχύος και η εξισορρόπηση του φορτίου στο σύστημα διανομής. Επομένως, οι κατηγορίες, στις οποίες ανήκει, είναι οι ανωτέρω 1 (ελαχιστοποίηση απωλειών) και 3 (εξισορρόπηση φορτίων). Η επίλυση του προβλήματος, αναζητείται σε σχετικές ακτινικές διαμορφώσεις. Για να βοηθηθεί η αναζήτηση, γίνονται δύο προσεγγίσεις ροής ισχύος, με διαφορετικό βαθμό ακρίβειας. Οι μέθοδοι είναι υπολογιστικά ελκυστικές και γενικά δίνουν συντηρητικές εκτιμήσεις για τη μείωση των απωλειών. Για την εξισορρόπηση φορτίου, χρησιμοποιείται ένας δείκτης εξισορρόπησης φορτίου και αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης, για τη μείωση των απωλειών, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εξισορρόπηση φορτίου. Περιλαμβάνονται επίσης αποτελέσματα δοκιμών, για να δείξουν την αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

Στο άρθρο των Zidan et al. [8], παρουσιάζεται μία μέθοδος βασισμένη σε έναν γενετικό αλγόριθμο (GA) για τη διερεύνηση του προβλήματος της επαναδιαμόρφωσης του συστήματος διανομής. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μεταβολής του φορτίου και της στοχαστικής ισχύος παραγωγής των ανανεώσιμων ΜΔΠ. Η μέθοδος που παρουσιάζεται προσδιορίζει το ετήσιο σχήμα αναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος λειτουργίας μεταγωγής. Σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθούν οι ετήσιες απώλειες ενέργειας με τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμόρφωσης για κάθε εποχή του έτους. Οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με την παραγόμενη ισχύ των ΜΔΠ και με το μεταβαλλόμενο φορτίο, λαμβάνονται υπόψη με τη δημιουργία ενός πιθανοτικού μοντέλου παραγωγής-φορτίου. Το μοντέλο αυτό συνδυάζει όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας των ΜΔΠ που αποτελούν ΑΠΕ, με τη πιθανότητα εμφάνισής τους. Στη συνέχεια, ενσωματώνεται το μοντέλο αυτό στο

πρόβλημα αναδιαμόρφωσης. Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν τα όρια τάσης, τα όρια ρεύματος γραμμής, την ακτινική τοπολογία και την τροφοδοσία όλων των φορτίων. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, χρησιμοποιούνται ως μελέτες περίπτωσης τόσο συμμετρικά όσο και μη συμμετρικά ΔΔ.

Στο άρθρο του M. Raoufat [2] παρουσιάζεται μια μέθοδος, βασισμένη σε γενετικό αλγόριθμο για τη ταυτόχρονη κατανομή ΜΔΠ και τηλεχειριζόμενων διακοπών σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η βελτίωση της αξιοπιστίας και η μείωση των ενεργειακών απωλειών. Επίσης, κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, καθορίζονται τα βέλτιστα μεγέθη των ΜΔΠ. Χρησιμοποιείται ένα πολυεπίπεδο ετήσιο μοντέλο φορτίου για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης.

Στο άρθρο των M.R. Narimani et al. [6], η προτεινόμενη προσέγγιση εξετάζει ταυτόχρονα την αξιοπιστία, το κόστος λειτουργίας και τις απώλειες ισχύος. Με την προσθήκη του στόχου της βελτίωσης της αξιοπιστίας στο πρόβλημα επαναδιαμόρφωσης, το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο και πρέπει να επιλυθεί με έναν ακριβή αλγόριθμο. Ως εκ τούτου, η μελέτη χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο αναζήτησης, ο οποίος επωφελείται από μια ειδική στρατηγική μετάλλαξης, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος επεξεργασίας και να βελτιωθεί η ποιότητα των λύσεων, ιδίως για να αποφευχθεί η παγίδευση σε τοπικά βέλτιστα.

Στο άρθρο των R. Syarhputra et al. [9], παρουσιάζεται μια μέθοδος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ΔΔ με διείσδυση ΜΔΠ. Η επαναδιαμόρφωση γίνεται για να επιτευχθούν οι ελάχιστες απώλειες ενεργού ισχύος. Η παρουσία ΜΔΠ στα συστήματα διανομής έχει δημιουργήσει ορισμένα προβλήματα, όπως αύξηση της τάσης. Σε αυτή τη μελέτη, η τεχνική της επαναδιαμόρφωσης του δικτύου βασίζεται σε μια διευρυμένη 'ασαφή' πολυαντικειμενική μέθοδο. Η αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλών στόχων λαμβάνει υπόψη την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων της τάσης από τα επιθυμητά όρια και την εξισορρόπηση του φορτίου μεταξύ των γραμμών τροφοδοσίας, ενώ εφαρμόζεται σε μια ακτινωτή δομή του δικτύου, στην οποία όλα τα φορτία πρέπει να είναι υπό τάση.

Στο άρθρο των M. Zare et al. [10], προτείνεται μια μεθοδολογία για την επίλυση της ταυτόχρονης βέλτιστης τοποθέτησης ανεμογεννητριών και διακοπών, καθώς και της επαναδιαμόρφωσης του δικτύου, για την ενίσχυση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας του. Οι απώλειες ισχύος, ο δείκτης απόκλισης τάσης, το κόστος των διακοπών και το κόστος αξιοπιστίας, με βάση το αναμενόμενο κόστος διακοπής εξυπηρέτησης του πελάτη, θεωρούνται ως αντικειμενικές συναρτήσεις. Η προσέγγιση αποφέρει κέρδη χρησιμοποιώντας έναν νέο αλγόριθμο πολλαπλών στόχων, που βασίζεται σε μια τροποποιημένη τεχνητή αποικία μελισσών, για την παροχή της καλύτερης συμβιβαστικής λύσης μεταξύ των αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων.

Στο άρθρο των T.Thang et al. [11], παρουσιάζεται ένας ακόμη αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ. Το πρόβλημα που εξετάζεται στην εργασία είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, η εξισορρόπηση φορτίου, ο αριθμός των διακοπικών πράξεων και η απόκλιση τάσης κάθε κόμβου. Η μέθοδος είναι εξοπλισμένη με ένα εργαλείο αναζήτησης γύρω από την τρέχουσα βέλτιστη λύση, με μεγάλα και μικρά βήματα, για να βελτιωθεί το αποτέλεσμα της συνολικής βελτιστοποίησης. Η αποτελεσματικότητα του εφαρμοζόμενου μοντέλου δοκιμάστηκε σε δίκτυα 33 και 70 κόμβων και τα αποτελέσματα των δοκιμών που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με εκείνα άλλων μεθόδων της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η εφαρμοζόμενη

μέθοδος μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματική μέθοδο για προβλήματα επαναδιαμόρφωσης δικτύου, με έναν και πολλαπλούς στόχους.

Στο άρθρο των A. Jafari et al. [12], προτείνεται ένας υβριδικός αλγόριθμος για τη δυναμική και πολύ-αντικειμενική επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής. Επιχειρείται ταυτόχρονα η ελαχιστοποίηση απωλειών, η μεγιστοποίηση αξιοπιστίας και η βέλτιστη τοποθέτηση ΜΔΠ και τηλεχειριζόμενων διακοπών. Ο ευριστικός αλγόριθμος που χρησιμοποιεί προσομοιάζει τον τρόπο μεταγραφής και μετάλλαξης χρωμοσωμάτων για τη βέλτιστη τοποθέτηση των ΜΔΠ και των τηλεχειριζόμενων διακοπών. Η προσαρμοστική ενημέρωση του αλγορίθμου αυξάνει την ταχύτητα σύγκλισης της υβριδικής μεθόδου και προσφέρει μια προσέγγιση ταχείας απόκρισης, για τη δυναμική επαναδιαμόρφωση του δικτύου.

Στο άρθρο των Q. Qi και J. Wu [13], διερευνάται το μέγιστο επίπεδο διείσδυσης ΜΔΠ που μπορεί να δεχθεί το ΔΔ, χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του. Χρησιμοποιούνται τρεις προσεγγίσεις και μια συνδυαστική μέθοδος που χρησιμοποιεί επαναδιαμόρφωση δικτύου για τον συντονισμό με τη λειτουργία ‘μαλακού ανοικτού σημείου’ (Soft Open Point - SOP). Αναλύονται οι επιπτώσεις της ενσωμάτωσης ΜΔΠ και των θέσεων SOP, στα επίπεδα μέγιστης διείσδυσης.

Στο άρθρο των A. Botea et. al. [14], αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ για την αποκατάσταση λειτουργίας των διακοπών, όπου το κόστος των ενεργειών εναλλαγής κατάστασης των διακοπών κυριαρχεί του συνολικού κόστους. Όταν το δίκτυο επανέρχεται στην κανονική του διαμόρφωση σχετικά γρήγορα, είναι δευτερεύουσας σημασίας οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και η ανισορροπία φορτίου κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης της λειτουργίας του ΔΔ. Προτείνονται οι αλγόριθμοι βέλτιστης ενημερωμένης αναζήτησης σε συνδυασμό με ευριστικούς αλγόριθμους για την επαναδιαμόρφωση των ΔΔ.

Στο άρθρο των T. Ding et. al. [15], προτείνεται ένα μοντέλο για την αποκατάσταση της εξυπηρέτησης των φορτίων του ΔΔ. Το μοντέλο βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται για την επαναδιαμόρφωση του ΔΔ και τον σχηματισμό μικροδικτύου, ενώ παράλληλα ικανοποιούνται διάφοροι λειτουργικοί περιορισμοί. Η προτεινόμενη μέθοδος εκμεταλλεύεται τα οφέλη της ευελιξίας που παρέχονται από τον εκσυγχρονισμό του δικτύου, για να καταστεί δυνατή η τροφοδότηση των πιο κρίσιμων φορτίων του. Συγκεκριμένα, ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με κωνικούς περιορισμούς δεύτερης τάξης, χρησιμοποιείται για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας της προτεινόμενης βελτιστοποίησης.

2.5.2 Επαναδιαμόρφωση Ευφυών Δικτύων Διανομής

Η είσοδος ΜΔΠ στο ΔΔ δημιουργεί αμφίδρομες ροές ισχύος. Για την ένταξη και καλύτερη αξιοποίησή τους, απαιτείται μια μορφή έξυπνου ελέγχου, σε κεντρική ή αποκεντρωμένη μορφή. Αυτό είναι πρόβλημα που αφορά σύγχρονα ευφυή δίκτυα (smart grids). Ένα τέτοιο δίκτυο αποτελεί αναβάθμιση ενός παραδοσιακού δικτύου του 20ού αιώνα. Βασίζεται σε σύγχρονο μετρητικό εξοπλισμό, με στόχο να λαμβάνει αποφάσεις για την καλύτερη διαχείριση της παραγωγής και ζήτησης και την επίτευξη καλύτερης αξιοπιστίας [16]. Συγκεκριμένα στην εργασία [17], γίνεται μια προσέγγιση, που έχει ως πρωταρχικό στόχο τη μέγιστη αξιοποίηση της διανεμημένης παραγωγής. Γίνεται ένας διαχωρισμός των μοντέλων

που επιλύουν προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος, σε αυτά που αφορούν στατική επαναδιαμόρφωση δικτύου και σε αυτά που αφορούν δυναμική επαναδιαμόρφωση δικτύου. Τα πρώτα αναφέρονται σε δίκτυα που βρίσκονται σε στάδιο σχεδιασμού ή έχουν ως στόχο μια προκαθορισμένη ετήσια ή εποχιακή τοπολογία. Τα δεύτερα αξιοποιούν τηλεχειριζόμενους διακόπτες, με κεντρική ενεργή διαχείριση δικτύου (Active Network Management), για την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η δεύτερη προσέγγιση εξετάζεται και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ο κεντρικός έλεγχος αφορά τη συλλογή πληροφοριών για ολόκληρο το δίκτυο, σε όλα ή σε μεμονωμένα επίπεδα, ενώ ο αποκεντρωμένος έλεγχος αφορά μικρότερα τμήματα αυτού. Φυσικά, αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί και σε μικρότερα δίκτυα, όπως το τυποποιημένο δίκτυο των 33 κόμβων της βιβλιογραφίας, όπου λόγω του επιπέδου τάσης του, θεωρείται δίκτυο διανομής. Ο κεντρικός και ο αποκεντρωμένος έλεγχος έχουν, τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα. Βασικό μειονέκτημα του αποκεντρωμένου ελέγχου, σε σχέση με τον κεντρικό, είναι πως δεν μπορεί να λάβει αποφάσεις για ενέργειες που απαιτούν συνεργασία περισσότερων τμημάτων, πέραν του τμήματος που επιβλέπει. Αντίστοιχα, ο κεντρικός έλεγχος, ενώ δεν αντιμετωπίζει το ίδιο πρόβλημα, δεν μπορεί να εξετάζει με την ίδια αποδοτικότητα την πληθώρα δεδομένων που διαχειρίζεται ο αποκεντρωμένος έλεγχος και να λαμβάνει λεπτομερείς αποφάσεις που δύναται να βελτιστοποιήσουν ένα μικρότερο τμήμα του δικτύου.

2.5.3 Ημερήσια Επαναδιαμόρφωση Δικτύων Διανομής

Η ημερήσια επαναδιαμόρφωση (Intraday Reconfiguration) ΔΔ αφορά τη δυναμική επαναδιαμόρφωση του δικτύου, σύμφωνα με την [18], και συγκεκριμένα, την επαναδιαμόρφωση του δικτύου ανά χρονικά διαστήματα μικρότερα του 24ώρου. Παραδοσιακά, το συνολικό φορτίο ενός δικτύου δεν είναι σταθερό στη διάρκεια μιας ημέρας, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Η ζήτηση καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, τα ωράρια εργασίας στις βιομηχανίες, έκτακτα καιρικά φαινόμενα και λοιπά. Η παραγωγή ενέργειας από συμβατικά μέσα, μπορεί να ανταποκριθεί με ακρίβεια στη διακύμανση του φορτίου. Αντιθέτως, σε μια ΜΔΠ με μεταβλητή συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της μέρας (ΑΠΕ), το μέτρο της παρεχόμενης ισχύος στο δίκτυο μεταβάλλεται Έτσι, ο διαχειριστής του ΔΔ, έχοντας τη δυνατότητα να μεταβάλει την τοπολογία του δικτύου κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, μπορεί να επιτύχει οικονομικότερη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, επιλέγει τις τοπολογίες εκείνες, που ελαχιστοποιούν κάθε χρονικό διάστημα τις απώλειες ή επιτυγχάνουν και λοιπούς στόχους. Έτσι, σε ένα μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο, οι συνολικές απώλειες ενέργειας μειώνονται, λόγω της αυξημένης ευελιξίας του δικτύου.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί, ότι ο αριθμός των αλλαγών της τοπολογίας του δικτύου σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, είναι πεπερασμένος. Βασικός περιορισμός είναι ο οικονομικός, καθώς οι αλλαγές κατάστασης διακοπών έχουν κόστος λειτουργίας, λόγω του συνεργείου που πρέπει να εκτελέσει την εκάστοτε αλλαγή, αλλά και κόστος επένδυσης σε τηλεχειριζόμενους διακόπτες. Ακόμη, κατά το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός διακόπτη, δημιουργούνται συχνά ηλεκτρικά τόξα, που προκαλούν, μέσω υπερεντάσεων και πτώσεως τάσης, προβλήματα στο δίκτυο.

Το κόστος λειτουργίας ενός ΔΔ περιέχει πολυάριθμες μεταβλητές, και έτσι καθίσταται δύσκολος ο υπολογισμός του σε πραγματικές συνθήκες. Η αξιοπιστία ενός δικτύου είναι από τους παράγοντες που δύναται να έχουν άμεση επίδραση στο ολικό κόστος λειτουργίας [19]. Κάποιες από αυτές όμως, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προβλεφθούν σε μακροχρόνιο επίπεδο, καθώς εξαρτώνται από την πορεία της οικονομίας, αλλά και περιβαλλοντικούς παράγοντες, που είτε θα προσφέρουν σημαντικές επιδοτήσεις είτε αυξημένα κόστη, με τη μορφή προστίμων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, θα εξεταστεί η λειτουργία ενός θεωρητικού δικτύου (in silico), με την εισαγωγή ορισμένων βασικών οικονομικών μεγεθών της σύγχρονης ελληνικής πραγματικότητας.

Το βασικό κόστος λειτουργίας ενός τέτοιου δικτύου έγκειται στην πληρωμή του ανθρώπινου δυναμικού, που καλείται να αλλάζει την τοπολογία του ΔΔ, ανάλογα με τους στόχους που έχουν τεθεί. Έστω λοιπόν ότι λαμβάνεται η απόφαση σε επίπεδο κεντρικού ή αποκεντρωμένου ελέγχου, πως το δίκτυο πρέπει να αλλάξει την υπάρχουσα τοπολογία του, πραγματοποιώντας μία αλλαγή γραμμής. Δηλαδή, η γραμμή «Α» θα τεθεί εκτός λειτουργίας και η γραμμή «Β» θα τεθεί εντός λειτουργίας. Αυτή η εναλλαγή θα πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα και στις δύο γραμμές. Εάν οι δυο γραμμές διαθέτουν τηλεχειριζόμενους αυτόματους διακόπτες, θεωρείται πως το κόστος της αλλαγής είναι αμελητέο, καθώς ο θεωρητικός χρόνος ζωής ενός τέτοιου διακόπτη κυμαίνεται περί των δέκα χιλιάδων αλλαγών κατάστασής του. Σε αντίθετη περίπτωση, θεωρείται πως οι γραμμές διαθέτουν διακόπτες, όπου η αλλαγή της κατάστασής τους πρέπει να γίνει χειροκίνητα από χειριστές. Έτσι, υπολογίζεται ένα κόστος, που αφορά τη μισθοδοσία του ανθρώπινου δυναμικού. Συγκεκριμένα, πρέπει να αποσταλεί ταυτόχρονα και στις δύο γραμμές, από ένα συνεργείο για να πραγματοποιήσει την εκάστη αλλαγή. Σε θεωρητικό επίπεδο, κάθε γραμμή συνδέεται με δύο διακόπτες, έναν σε κάθε άκρο της, οι οποίοι πρέπει να διαχειρίζονται ταυτόχρονα. Στην πράξη, όταν πρέπει να αποσταλεί συνεργείο για να τις πραγματοποιήσει, αποστέλλεται ένα συνεργείο, το οποίο πρώτα θα κάνει τον κατάλληλο χειρισμό στο ένα άκρο κι έπειτα στο άλλο. Στο απλοϊκό παράδειγμα που τέθηκε, θα αποσταλούν δύο συνεργεία, έκαστο σε κάθε μία γραμμή τη δεδομένη χρονική στιγμή t_0 , το οποίο θα αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας διακόπτη και αποζεύκτη στο ένα άκρο της γραμμής που ανέλαβε. Σε δεύτερο χρόνο, θα μεταβεί στο άλλο άκρο για τις αντίστοιχες ενέργειες. Για λόγους ασφαλείας, κάθε συνεργείο πρέπει να αποτελείται από δύο τουλάχιστον άτομα. Τελικά, εξάγεται το ασφαλές συμπέρασμα πως η εναλλαγή δυο γραμμών, απαιτεί την απασχόληση τεσσάρων εργαζομένων. Είναι προφανές πως η αλλαγή επιπλέον γραμμών την ίδια χρονική στιγμή, ή σε κοντινή χρονικά στιγμή, απαιτεί ακέραιο πολλαπλάσιο εργαζομένων. Στο Κεφάλαιο 6, θα παρουσιαστεί αναλυτική μελέτη κόστους.

Κεφάλαιο 3: Μοντέλο βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής για μείωση των απωλειών ισχύος

3.1 Εισαγωγή

Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καλείται η διαδικασία μεταβολής της τοπολογίας του δικτύου, από την υπάρχουσα στη βέλτιστη τοπολογία. Ο στόχος αυτής εκφράζεται μέσα από τους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης που καλείται το μοντέλο να ελαχιστοποιήσει, ή να μεγιστοποιήσει. Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής, με πρώτο στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Το δίκτυο μεταβάλλει τη τοπολογία του, μέσω της σύνδεσης και της απόσχευσης, χρησιμοποιώντας τα διακοπτικά στοιχεία, με τα οποία είναι εξοπλισμένο. Το βέλτιστο αποτέλεσμα προκύπτει, όταν οι μεταβλητές ελέγχου σταθεροποιηθούν, ικανοποιώντας τους περιορισμούς του μοντέλου. Έτσι, είναι αναγκαία η επίλυση εξισώσεων και ανισώσεων, που συνδέουν τα ηλεκτρικά μεγέθη του δικτύου και τους περιορισμούς που πρέπει να ικανοποιούνται σε ένα πραγματικό δίκτυο. Θέτοντας ως σταθερές τα στοιχεία των γραμμών και κόμβων, τα φορτία που πρέπει να ικανοποιηθούν και τη διανεμημένη παραγωγή, ως μεταβλητές ελέγχου θεωρούνται οι λειτουργικές καταστάσεις των διακοπτικών στοιχείων. Αυτές περιγράφουν επαρκώς και με ακρίβεια την τοπολογία. Υπάρχει πλήθος εφικτών λύσεων, δηλαδή τοπολογιών που ικανοποιούν τους λειτουργικούς περιορισμούς. Η καταλληλότερη λύση από αυτές, είναι η βέλτιστη, την οποία αναζητά το μοντέλο. Στη παρούσα εργασία, η αντικειμενική συνάρτηση είναι εξίσωση, που ελαχιστοποιείται και έχει ως όρους, το άθροισμα των απωλειών σε κάθε περίπτωση που μελετάται, ενώ σε άλλες εμπεριέχει και το πλήθος του αριθμού αλλαγών κατάστασης των διακοπών.

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προτείνεται ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με κωνικούς περιορισμούς δεύτερης τάξης για την επίλυση του προβλήματος. Τελικά, με τη χρήση των προαναφερθεισών τεχνικών, το πρόβλημα OPF επιλύεται από τον CPLEX ως γραμμικό.

Στη παρούσα διπλωματική, εξετάζονται αρχικά τέσσερις υποπεριπτώσεις εφαρμογής του βασικού μαθηματικού μοντέλου, με τις βασικές μετατροπές των παραμέτρων, μεταβλητών και σχέσεων που απαιτούνται σε αυτές. Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά, θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση του βασικού μοντέλου. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει η παρουσίαση και η επεξήγηση των περιπτώσεων, και τέλος, θα παρουσιαστούν οι προσαρμογές του σε κάθε περίπτωση.

3.2 Σύνολα, Παράμετροι και Μεταβλητές

Για τη καλύτερη κατανόηση του μαθηματικού μοντέλου που διατυπώνεται, κρίνεται σκόπιμη η αρχική παρουσίαση όλων των μεγεθών και όρων που χρησιμοποιούνται.

➤ Τα διάφορα σύνολα που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα:

- Ω_b : Σύνολο κόμβων
Το σύνολο αυτό περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του συστήματος. Στην εκτέλεση του μοντέλου για το δίκτυο των 33 κόμβων, το σύνολο των κόμβων είναι 33 και όλοι οι κόμβοι εξυπηρετούν φορτία, εκτός του πρώτου κόμβου, που θεωρείται κόμβος αναφοράς (slack).
- Ω_l : Σύνολο γραμμών
Πρόκειται για το σύνολο όλων των εγκατεστημένων γραμμών μεταξύ των κόμβων
- Ω_s : Σύνολο κόμβων υποσταθμών
- Ω_{sw} : Σύνολο διακοπών γραμμών Το σύνολο αυτό εκφράζει όλες τις γραμμές που φέρουν διακόπτες και έτσι εξ ορισμού.
- Ω_{mz} : Σύνολο των διακοπών που είναι ανοιχτοί την αρχική χρονική στιγμή t_0
Το σύνολο αυτό χρησιμοποιείται σε υποπερίπτωση, που αναλύεται στο **Κεφάλαιο 5**. Περιλαμβάνει τους 5 διακόπτες, που είναι ανοιχτοί την προηγούμενη χρονική στιγμή από αυτήν που εξετάζεται. Εκφράζει έτσι, την αρχική τοπολογία κάθε κλήσης του μοντέλου.
- Ω_T : Σύνολο χρονικών στιγμών Περιλαμβάνει όλα τα χρονικά στιγμιότυπα για τα οποία επιλύεται το πρόβλημα ροής ισχύος.

➤ Οι παράμετροι που εισάγονται είναι οι ακόλουθες:

- c_{loss} : Συντελεστής κόστους απωλειών, €/kW.
- c_{sw} : Συντελεστής κόστους αλλαγών κατάστασης διακοπών €.
- $R_{i,j}$: Ωμική αντίσταση γραμμής $i - j \in \Omega_l$
- $X_{i,j}$: Επαγωγική αντίδραση γραμμής $i - j \in \Omega_l$
- PL_i : Ενεργό φορτίο κόμβου $i \in \Omega_b$
- QL_i : Άεργο φορτίο κόμβου $i \in \Omega_b$
- M : Σχετικά μεγάλος αριθμός.
- $SSlim_i$: Όριο έγχυσης ισχύος στον κόμβο i . $Smax_{i,j}$
- $Smax_{i,j}$: Μέγιστη ροή ισχύος στη γραμμή $i - j \in \Omega_l$

- $Vmin_i/Vmax_i$: Όρια τάσης κόμβων $i \in \Omega_b$
- $SunP_i$: Έγχυση ενεργού ισχύος από ηλιακό πάρκο στον κόμβο $i \in \Omega_b$
Εάν δεν υπάρχει ηλιακό πάρκο στον κόμβο 'i', ή, υπάρχει αλλά τη δεδομένη χρονική στιγμή δεν έχει παραγωγή η τιμή της μεταβλητής είναι 0.
- $WindP_i$: Έγχυση ενεργού ισχύος από αιολικό πάρκο στον κόμβο 'i', $i \in \Omega_b$
Εάν δεν υπάρχει αιολικό πάρκο στον κόμβο 'i', ή, υπάρχει αλλά τη δεδομένη χρονική στιγμή δεν έχει παραγωγή η τιμή της μεταβλητής είναι 0.
- $sw_{inop_{i,j}}$: Οι αρχικά ανοιχτοί διακόπτες του δικτύου, $'i,j' \in \Omega_{mz}$
Λαμβάνει τη τιμή 1 στις θέσεις 'i,j' όπου εμφανίζονται οι ανοιχτοί διακόπτες της αρχικής τοπολογίας.

➤ Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

Συνεχείς μεταβλητές:

- Vsq_i : Τετράγωνο τάσης στον κόμβο $i \in \Omega_b$
Καθώς η τάση δεν χρησιμοποιείται ως μεταβλητή στο μοντέλο, η τετραγωνική τιμή της αντιμετωπίζεται ως γραμμική μεταβλητή.
- $Vaux_i$: Βοηθητική τιμή τάσης στον κόμβο $i \in \Omega_b$
Λειτουργεί με στόχο την επίτευξη της κυρτότητας του μοντέλου και η λειτουργία της αναλύεται στις εξισώσεις στις οποίες εμφανίζεται.
- $P_{i,j}$: Ενεργός ροή ισχύος στη γραμμή $i - j \in \Omega_l$
Η ενεργός ροή ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j .
- $Q_{i,j}$: Άεργος ροή ισχύος στη γραμμή $i - j \in \Omega_l$
Η άεργος ροή ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j .
- Ps_i : Έγχυση ενεργού ισχύος στον κόμβο $i \in \Omega_s$
Πρόκειται για την έγχυση ενεργού ισχύος από τον υποσταθμό, ο οποίος τροφοδοτεί το δίκτυο.
- Qs_i : Έγχυση άεργου ισχύος στον κόμβο $i \in \Omega_s$
Πρόκειται για την έγχυση άεργου ισχύος στον κόμβο αναφοράς από τον υποσταθμό ο οποίος τροφοδοτεί το δίκτυο.
- $Ploss_i$: Απώλειες ενεργού ισχύος στον κόμβο $i \in \Omega_b$
Προκύπτουν από τον νόμο του Ωμ και εμφανίζονται εξαιτίας της ωμικής αντίστασης των γραμμών του ΔΔ.
- $Qloss_i$: Απώλειες άεργου ισχύος στον κόμβο $i \in \Omega_b$
Προκύπτουν από τον νόμο του Ωμ και εμφανίζονται εξαιτίας της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών του ΔΔ.

Δυαδικές μεταβλητές:

- $sw_{i,j}$: Κατάσταση διακοπών συστήματος, $i, j \in \Omega_{sw}$
Λαμβάνει τη τιμή 1 όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, ενώ τη τιμή 0 όταν είναι ανοιχτός.
- $rd_{i,j}$: Μεταβλητή ακτινικότητας του συστήματος, $i, j \in \Omega_l$
Λαμβάνει τη τιμή 1, όταν ο κόμβος i είναι πατέρας του κόμβου j , ενώ λαμβάνει την τιμή 0 σε κάθε άλλη περίπτωση.
- $sw_{op_{i,j}}$: Κατάσταση διακοπών συστήματος, $i, j \in \Omega_{sw}$
Είναι το δυαδικό αντίθετο της μεταβλητής $sw_{i,j}$ και λαμβάνει τη τιμή 1 όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, ενώ την τιμή 0 όταν είναι κλειστός
- $sw_{inop_{i,j}}$: Αρχική κατάσταση διακοπών συστήματος, $i, j \in \Omega_{mz}$
(Initially open switches.) Ενημερώνεται από το σύνολο Ω_{mz} (map-zero) και λαμβάνει τη τιμή 1 στις θέσεις i, j , όπου σε προηγούμενη χρονική στιγμή, ή, στην αρχική τοπολογία οι διακόπτες ήταν ανοιχτοί, δηλαδή $sw_{op_{i,j}} = 1$.

Διακριτή Μεταβλητή

- N : Άθροισμα αλλαγών κατάστασης διακοπών, $N \in \mathbb{N}$
Η μεταβλητή είναι φυσικός αριθμός και εκφράζει τις συνολικές αλλαγές διακοπών που υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση.

3.3 Αντικειμενική Συνάρτηση Προβλήματος

3.3.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση 'f', είναι ο όρος που ελαχιστοποιείται, καθώς Το πρόβλημα προς επίλυση είναι πρόβλημα βέλτιστης ροής (OPF). Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση f , είναι ο όρος που ελαχιστοποιείται. Αρχικά, περιλαμβάνει μόνο το άθροισμα των απωλειών ενεργού ισχύος, ενώ στην εξέταση των διαφόρων περιπτώσεων που αναλύονται στη συνέχεια, προστίθεται και ο όρος του αθροίσματος των αλλαγών κατάστασης των διακοπών.

$$\min f = \sum_{i \in \Omega_n} P_{loss_i} \quad (3.1)$$

3.3.2 Εξισώσεις Μαθηματικού Μοντέλου

Οι εξισώσεις (3.1) έως (3.17) αποτελούν τον κορμό του μοντέλου και περιγράφουν με ακρίβεια τη λειτουργία του. Το μαθηματικό μοντέλο είναι βασισμένο στο άρθρο του Π. Καραφώτη και Π. Γεωργιλιάκη [20]. Εκτός από αυτές όμως, κατά την εφαρμογή του στο υπολογιστικό εργαλείο GAMS και έμμεσα στο πρόγραμμα MATLAB, χρησιμοποιούνται επιπλέον συμπληρωματικές σχέσεις Αυτό δημιουργεί ευελιξία για την εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων, καλύτερη και πιο κατανοητή συλλογή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων και επιδρά στη ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος OPF. Επίσης, για τη προσαρμογή του μοντέλου στις περιπτώσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια εισάγεται ο δείκτης t σε μεταβλητές και παραμέτρους, εισάγοντας στο μοντέλο τη φυσική σημασία της λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Αρχικά, κρίνεται απαραίτητο να επεξηγηθούν οι ιδιαίτεροι όροι που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Συγκεκριμένα, ως ‘πατέρα’ ενός κόμβου j , θεωρούμε εκείνο τον κόμβο i , που τον τροφοδοτεί με ισχύ. Έτσι προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: α) κάθε ροή από κόμβο ‘πατέρα’ προς κόμβο ‘παιδί’ είναι θετική και β) καθώς το μοντέλο αφορά αποκλειστικά ακτινικό δίκτυο, κάθε κόμβος ‘παιδί’ έχει μόνο έναν κόμβο ‘πατέρα’ ενώ το αντίθετο δεν ισχύει απαραίτητα. Δηλαδή κάθε κόμβος ‘πατέρας’ μπορεί να τροφοδοτεί περισσότερους από έναν κόμβους ‘παιδιά’.

$$Ploss_i = Ps_i + \sum_{j \in \Omega_n} (P_{j,i} - P_{i,j}) + SunP_i + WindP_i - PL_i \forall i \in \Omega_n \quad (3.2)$$

$$Qloss_i = Qss_i + \sum_{j \in \Omega_n} (Q_{j,i} - Q_{i,j}) - QL_i \forall i \in \Omega_n \quad (3.3)$$

$$Vsqr_i \leq Vsqr_j - 2(P_{j,i}R_{i,j} - Q_{j,i}X_{i,j}) - M(1 - rd_{j,i}) \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.4)$$

$$Vsqr_i \geq Vsqr_j - 2(P_{j,i}R_{i,j} - Q_{j,i}X_{i,j}) + M(1 - rd_{j,i}) \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.5)$$

$$Vsqr_j \leq Vaux_i + M(1 - rd_{j,i}) \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.6)$$

$$Vsqr_j \geq Vaux_i - M(1 - rd_{j,i}) \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.7)$$

$$Vaux_i Ploss_i \geq R_{i,j} (P_{j,i}^2 + Q_{j,i}^2) \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.8)$$

$$Vaux_i Qloss_i \geq X_{i,j}(P_{j,i}^2 + Q_{j,i}^2) \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.9)$$

$$0 \leq Ps_i \leq Ps_{max} \forall i \in \Omega_s \quad (3.10)$$

$$0 \leq Qs_i \leq Qs_{max} \forall i \in \Omega_s \quad (3.11)$$

$$P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2 \leq Smax_{i,j} \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.12)$$

$$V_{min}^2 \leq Vsqr_i \leq V_{max}^2 \forall i \in \Omega_n \quad (3.13)$$

$$|P_{i,j}| \leq Mrd_{j,i} \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.14)$$

$$|Q_{i,j}| \leq Mrd_{j,i} \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.15)$$

$$rd_{i,j} + rd_{j,i} = 1 \forall i, j \in \Omega_l \setminus \Omega_{sw} \quad (3.16)$$

$$rd_{i,j} + rd_{j,i} = sw_{i,j} \forall i, j \in \Omega_{sw} \quad (3.17)$$

Οι εξισώσεις (3.2) και (3.3) υπολογίζουν τις απώλειες ισχύος με βάση το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις αυτές αθροίζουν τις εισροές ισχύος στον κόμβο i που προκύπτουν:

- από τον υποσταθμό,
- από το άθροισμα των ροών που εισέρχονται ή εξέρχονται από αυτόν,
- από τη διανεμημένη παραγωγή ενεργού ισχύος, που δύναται να είναι συνδεδεμένη στον κόμβο
- από τα φορτία ισχύος που εξυπηρετούνται από τον κόμβο.

Οι ανισώσεις (3.4) και (3.5) είναι ένας μετασχηματισμός του κλασσικού τύπου πτώσης τάσης ' $V_i - V_j = I * Z$ ', όπως εμφανίζεται στο Κεφάλαιο 8, του συγγράμματος του Π.

Γεωργιλιάκη [21] με τις εξής διαφορές. Αρχικά, ο νέος όρος $M(1 - rd_{j,i})$, δεσμεύει την τάση σε καθορισμένη τιμή μόνο στη περίπτωση όπου το εσωτερικό της παρένθεσης έχει μηδενικό άθροισμα. Έτσι, η διπλή ανίσωση συγκλίνει στην ισότητα μόνο στη περίπτωση που ο κόμβος i είναι ‘πατέρας’ του κόμβου j . Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, ο όρος αποκτά τιμή πολύ μεγαλύτερη από τους υπόλοιπους, διασφαλίζοντας την ανεξαρτησία των τάσεων σε κόμβους που δεν συνδέονται. Στη περίπτωση που συνδέονται, αλλά ο κόμβος j είναι ο ‘πατέρας’ του i επίσης διασφαλίζεται η ανεξαρτησία των τάσεων, καθώς η δημιουργία αρνητικών ροών ισχύος είναι ανεπιθύμητη στο παρόν μοντέλο. Επίσης, για την ελαχιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών, η τάση χρησιμοποιείται με το τετράγωνό της, ενώ οι όροι του ρεύματος και της σύνθετης αντίστασης εκφράζονται μέσω της ενεργού και άεργου ισχύος και της επιμέρους αντίστασης και αντίδρασης της κάθε γραμμής. Οι ανισώσεις (3.6) και (3.9) ως προς τον όρο $M(1 - rd_{j,i})$ λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, καθιστώντας το μοντέλο κυρτό (convex). Η συνδυαστική λειτουργία τους υπολογίζει τις ενεργές και άεργες απώλειες P_{loss_i} και Q_{loss_i} , αντίστοιχα. Στις εξισώσεις (3.10), (3.11) και (3.12) θέτονται τα όρια της έγχυσης ισχύος από τον υποσταθμό στον κόμβο αναφοράς (slack), καθώς και τα όρια μεταφοράς φαινόμενης ισχύος μεταξύ των κόμβων μέσω των γραμμών του δικτύου.

Στη διπλή ανίσωση (3.13) εκφράζονται οι περιορισμοί του τετραγώνου της τάσης των κόμβων, που ανάγονται στα λειτουργικά όρια του επίπεδου τάσης των κόμβων, για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Στις εξισώσεις (3.14), (3.15) μέσω του όρου $Mrd_{j,i}$, θέτονται τα όρια μεταφοράς ισχύος μεταξύ των κόμβων (όταν υπάρχει ροή) και παράλληλα εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία των πλασματικών ροών που σχηματίζονται όταν δεν υπάρχει η σχέση κόμβου ‘πατέρα’ και κόμβου ‘παιδιού’. Οι σχέσεις (3.16) και (3.17) καθορίζουν τη λειτουργία της μεταβλητής rd , διαμορφώνοντας του ρόλους του κόμβου ‘πατέρα’ και του κόμβου ‘παιδιού’ με τον κατάλληλο τρόπο. Πιο αναλυτικά, στην εξίσωση (3.16), η μεταβλητή $rd_{i,j}$, όταν η γραμμή $i-j$ υπάρχει αλλά δεν έχει συνδεδεμένους διακόπτες είτε θα έχει τον ρόλο του κόμβου ‘πατέρα’, είτε θα έχει τον ρόλο του κόμβου ‘παιδιού’. Η μεταβλητή $rd_{j,i}$ θα έχει αναλάβει τον δυαδικά αντίθετο ρόλο. Αυτό από φυσικής σημασίας εκφράζει την ύπαρξη ροής ισχύος με συγκεκριμένη κατεύθυνση, μεταξύ των κόμβων στους οποίους σχηματίζεται. Στην εξίσωση (3.17), η μεταβλητή $sw_{i,j}$, η οποία είναι η μεταβλητή ελέγχου και εκφράζει τη τοπολογία του δικτύου, ενημερώνεται από τις μεταβλητές $rd_{i,j}$ και $rd_{j,i}$. Δηλαδή, όταν γίνεται η υπολογιστική προσπέλαση των εξισώσεων των γραμμών που διαθέτουν διακόπτες, εάν υπάρχει η προαναφερθείσα σχέση μεταξύ των κόμβων, τότε αυστηρά μία εκ των $rd_{i,j}$ και $rd_{j,i}$ θα έχει μοναδιαία τιμή, η γραμμή $i-j$ θα βρίσκεται σε λειτουργία και η μεταβλητή $sw_{i,j}$ θα λαμβάνει επίσης μοναδιαία τιμή.

3.4 Περιορισμοί του Προβλήματος

3.4.1 Περιορισμοί Ισχύος

Οι εξισώσεις (3.10), (3.11), (3.12), (3.14), και (3.15) αποτελούν περιορισμούς ισχύος. Οι περιορισμοί σε ένα πραγματικό δίκτυο, αφορούν περισσότερο τα ρεύματα που διέρχονται μέσα στις γραμμές και όχι τη ροή ή έγχυση ισχύος σε αυτές. Αυτό συμβαίνει διότι τα

πραγματικά όρια λειτουργίας εκφράζουν την αντοχή των υλικών (χαλκός, μονώσεις, κ.α.) που αντιστοιχούν στα θερμικά όρια λειτουργίας. Το κύριο μέρος των απωλειών αφορά τις ωμικές απώλειες και αντιπροσωπεύει τον μετασχηματισμό ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα. Μέσω του νόμου του Ωμ, η ισχύς των απωλειών είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος που ρέει στις γραμμές. Όμως, καθώς στο μοντέλο γίνεται απαλοιφή του όρου του ρεύματος, για λόγους ελαχιστοποίησης των μεταβλητών, ταχύτερης εκτέλεσης και απλότητας, οι περιορισμοί θερμότητας ανάγονται τελικά σε περιορισμούς ισχύος.

3.4.2 Περιορισμοί Τάσης

Σε κάθε πραγματικό δίκτυο που διαχειρίζεται ηλεκτρική ενέργεια υπάρχουν περιορισμοί τάσης για λόγους ασφαλούς λειτουργίας, ομοιομορφίας στη σχεδίαση, συντήρησης, χρήσης, και αξιοπιστίας. Πιο συγκεκριμένα, σε οποιαδήποτε υποενοότητα του δικτύου χρησιμοποιούνται τεχνικές ηλεκτρικής μόνωσης. Το πιο συνηθισμένο και ταυτόχρονα απλοϊκό παράδειγμα, είναι η χρήση μονωτήρων για την ανάρτηση γραμμών, στους πυλώνες εναέριων δικτύων διανομής. Τα λειτουργικά τους όρια και χαρακτηριστικά εμπεριέχουν τάσεις διάτρησης και υπερπήδησης, που εάν υπερβληθούν προκαλείται σφάλμα στη λειτουργία ή και καταστροφή του μονωτήρα. Έτσι και για λόγους οικονομικής σχεδίασης και συντήρησης, καθορίζονται συγκεκριμένα επιτρεπτά όρια τάσης σε κάθε κόμβο. Τα παραδοσιακά όρια διακύμανσης της τάσης περιορίζονται στο 0,1 ανά μονάδα, δηλαδή στο $\pm 10\%$. Η προσέγγιση που γίνεται στο μοντέλο, καθώς χρησιμοποιείται ως μεταβλητή το τετράγωνο αυτής, περιορίζει τη διακύμανση του τετραγώνου της τάσης στο 0.1 ανά μονάδα. Θέτοντας τιμή βασικής τάσης στα 12,66 kV, αυτά τα όρια διαμορφώνονται κατά προσέγγιση από 12.01 kV έως τα 13.28 kV (0.9486 α.μ. έως τα 1.0488 α.μ.). Στο μοντέλο δηλαδή θέτονται αυστηρότερα όρια στη διακύμανση τάσης, περίπου στο 5% της ονομαστικής τιμής. Η επιλογή αυτή γίνεται καθώς η μικρότερη διακύμανση τάσης είναι ποιοτικά καλύτερη, καθώς δεσμεύει το δίκτυο σε λειτουργία εγγύτερα στις ονομαστικές τιμές του. Καθώς η αντικειμενική συνάρτηση αφορά την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, ελαχιστοποιούνται οι ροές ισχύος και τελικά οι διαφορές τάσεων μεταξύ των κόμβων. Έτσι, τα αυστηρότερα όρια της τάσης που τέθηκαν 'συνεργάζονται' με τη λειτουργία των εξισώσεων για την επίτευξη του στόχου.

3.5 Παρουσίαση και Ανάλυση Περιπτώσεων

3.5.1 Εισαγωγή

Στο βασικό μαθηματικό μοντέλο παρατηρείται εύκολα πως δεν εμφανίζεται πουθενά εξάρτηση που να σχετίζεται με τον χρόνο, ούτε κάποια ελαχιστοποίηση του πλήθους των αλλαγών της κατάστασης των διακοπών. Έτσι, επιλέγονται τέσσερις βασικές περιπτώσεις όπου γίνεται η κατεξοχήν επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας. Όπως είναι αναμενόμενο, η βασική διαφοροποίηση της κάθε περίπτωσης προβάλλεται μέσω της αντικειμενικής τους συνάρτησης. Εκτός αυτής, στον **Πίνακα 3.1** παρουσιάζονται και οι βασικές διαφορές στον τρόπο λειτουργίας του μοντέλου.

Πίνακας 3.1: Περιπτώσεις λειτουργίας του μοντέλου

<p>Περίπτωση 1α :</p> <ul style="list-style-type: none"> Εύρεση μίας τοπολογίας για όλες τις χρονικές στιγμές, ενώ δεν υπάρχει κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών $\min f = \sum_{t \in [1,12]} \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_{i,t})$	<p>Περίπτωση 2α :</p> <ul style="list-style-type: none"> Εύρεση μίας τοπολογίας για όλες τις χρονικές στιγμές, ενώ υπάρχει κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών $\min f = c_{loss} \sum_{t \in [1,12]} \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_{i,t})$ $+ c_{sw} \sum_{i,j \in \Omega mz} (sw_{in_{op_{i,j}}} - sw_{op_{i,j}})$
<p>Περίπτωση 1β :</p> <ul style="list-style-type: none"> Εύρεση 12 τοπολογιών, μία για κάθε χρονική στιγμή, με 12 κλήσεις του μοντέλου, ενώ δεν υπάρχει κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών $\min f = \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_i)$	<p>Περίπτωση 2β :</p> <ul style="list-style-type: none"> Εύρεση 12 τοπολογιών, μία για κάθε χρονική στιγμή, με 12 κλήσεις του μοντέλου, ενώ υπάρχει κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών $\min f = c_{loss} \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_i)$ $+ c_{sw} \sum_{i,j \in \Omega mz} (sw_{in_{op_{i,j}}} - sw_{op_{i,j}})$

Εξετάζοντας τον πίνακα κατά γραμμές ή κατά στήλες, προκύπτει και η ανάλογη ομαδοποίηση των περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, εξετάζοντας τις στήλες του **Πίνακα 3.1** προκύπτει η ομαδοποίηση σε περιπτώσεις '1' και '2'. Η περίπτωση '1' έχει μόνο τον όρο των απωλειών ισχύος στην αντικειμενική συνάρτηση, ενώ στη περίπτωση '2' προστίθεται και ο όρος που αφορά τις αλλαγές κατάστασης διακοπών. Επίσης, καθώς οι όροι της συνάρτησης αυξάνονται πέραν της μονάδας, συνοδεύονται από τους κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας, c_{loss} και c_{sw} του κόστους απωλειών και του κόστους αλλαγής κατάστασης διακοπών, αντίστοιχα.

Εξετάζοντας τον πίνακα κατά γραμμές, προκύπτει η ομαδοποίηση σε περιπτώσεις 'α' και 'β'. Πιο αναλυτικά, στη περίπτωση 'α', γίνεται μία κλήση του μοντέλου, με στόχο την εύρεση μιας μοναδικής και βέλτιστης τοπολογίας για όλα τα χρονικά στιγμιότυπα που έχουν επιλεχθεί. Όπως θα εξηγηθεί στο **Κεφάλαιο 4**, τα χρονικά στιγμιότυπα που επιλέγονται είναι δώδεκα (12) και επιλέγονται για να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά ενός δικτύου διανομής, στη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Στη περίπτωση 'β', το μοντέλο καλείται δώδεκα φορές, μία για κάθε χρονικό στιγμιότυπο, με στόχο την τελική εύρεση δώδεκα βέλτιστων τοπολογιών. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν εμφανίζεται δείκτης χρόνου t στην περίπτωση 'β'.

3.5.2 Περίπτωση 1.α

Στην περίπτωση ‘1.α’ γίνεται μία κλήση του μοντέλου με στόχο την εύρεση μιας μοναδικής, βέλτιστης τοπολογίας για όλες τις χρονικές στιγμές, χωρίς να ελαχιστοποιείται το πλήθος αλλαγών κατάστασης των διακοπών. Συνεπώς, οι μεταβλητές που χρειάζεται να περιέχουν δείκτη χρόνου είναι οι ακόλουθες:

$$\{ Ploss_{i,t}, Qloss_{i,t}, SunP_{i,t}, WindP_{i,t}, PL_{i,t}, PSS_{i,t}, QSS_{i,t}, P_{i,j,t}, Q_{i,j,t}, Vsqr_{i,t}, Vaux_{i,t} \}$$

Αντίθετα, οι μεταβλητές $rd_{i,j}$, $sw_{i,j}$ αντίθετα, δεν εμφανίζουν δείκτη χρόνου t καθώς στόχος είναι η εύρεση μόνο μίας τοπολογίας. Το άθροισμα, που ελαχιστοποιεί η αντικειμενική συνάρτηση, επεκτείνεται και περιλαμβάνει τα αθροίσματα των απωλειών ισχύος, που συγκεντρώνονται στους κόμβους κάθε χρονική στιγμή. Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

$$\min f = \sum_{t \in [1,12]} \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_{i,t}) \quad (3.18)$$

3.5.3 Περίπτωση 2.α

Στη περίπτωση ‘2.α’ γίνεται μία κλήση του μοντέλου, με στόχο την εύρεση μιας μοναδικής, βέλτιστης τοπολογίας για όλες τις χρονικές στιγμές, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του πλήθους αλλαγών κατάστασης των διακοπών. Συνεπώς οι μεταβλητές που χρειάζεται να περιέχουν δείκτη χρόνου t , είναι οι ακόλουθες:

$$\{ Ploss_{i,t}, Qloss_{i,t}, SunP_{i,t}, WindP_{i,t}, PL_{i,t}, PSS_{i,t}, QSS_{i,t}, P_{i,j,t}, Q_{i,j,t}, Vsqr_{i,t}, Vaux_{i,t} \}$$

Αντίθετα, οι μεταβλητές $rd_{i,j}$, $sw_{i,j}$ αντίθετα, δεν εμφανίζουν δείκτη t , καθώς στόχος είναι η εύρεση μόνο μίας τοπολογίας. Καθώς έχει γίνει η παραδοχή πως όλοι οι κόμβοι του συστήματος πρέπει να εξυπηρετούνται κάθε χρονική στιγμή και πως το δίκτυο παραμένει ακτινικό, το άθροισμα των ανοιχτών διακοπών (όπως αντίστοιχα και των κλειστών), παραμένει σταθερό. Η μέθοδος που υπολογίζονται οι αλλαγές διακοπών είναι η εξής. Εξετάζοντας μόνο τις θέσεις i, j που προϋπήρχαν ανοιχτοί διακόπτες αφαιρούνται αυτοί που έχουν μείνει ανοιχτοί. Ακόμη, επιλέγονται τέτοιοι συντελεστές c_{loss} , c_{sw} , ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε τρία διαφορετικά επίπεδα σχετικού κόστους απωλειών (χαμηλού, μέσου και υψηλού).

Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

$$\min f = c_{loss} \sum_{t \in [1,12]} \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_{i,t}) + c_{sw} \sum_{i,j \in \Omega mz} (sw_{inop_{i,j}} - sw_{op_{i,j}}) \quad (3.19)$$

3.5.4 Περίπτωση 1.β

Στη περίπτωση ‘1.β’ γίνονται 12 επαναλαμβανόμενες κλήσεις του μοντέλου, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος. Κάθε κλήση παράγει τη βέλτιστη τοπολογία κάθε χρονικής στιγμής με πλήρη ανεξαρτησία από τις υπόλοιπες κλήσεις. Συνεπώς οι μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου δεν περιέχουν δείκτη χρόνου, όμως συνολικά τα αποτελέσματα επεξεργάζονται και παρουσιάζονται με τρόπο παρόμοιο με τη περίπτωση ‘1.α’. Η διαφορά προφανώς έγκειται στη τελική εξαγωγή 12 βέλτιστων τοπολογιών αντί μίας. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση έτσι, διαμορφώνεται ακολούθως στην απλούστερη μορφή της:

$$\min f = \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_i) \quad (3.20)$$

3.5.5 Περίπτωση 2.β

Στη περίπτωση ‘2.β’ γίνονται 12 επαναλαμβανόμενες κλήσεις του μοντέλου, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος και την ελαχιστοποίηση του πλήθους αλλαγών κατάστασης των διακοπών. Κάθε κλήση παράγει τη βέλτιστη τοπολογία κάθε χρονικής στιγμής, όμως σε αντίθεση με τη περίπτωση ‘1.β’, κάθε κλήση του μοντέλου έχει εξάρτηση από τη βέλτιστη τοπολογία, που έχει εξάγει η προηγούμενη κλήση, καθώς με βάση αυτή επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει το πλήθος αλλαγών κατάστασης των διακοπών της. Στη πρώτη εκτέλεση του μοντέλου ως τοπολογία προηγούμενης χρονικής στιγμής θεωρείται η αρχική τοπολογία του δικτύου. Ο υπολογισμός αλλαγών κατάστασης διακοπών σε κάθε κλήση γίνεται όμοια με τη περίπτωση 1.β. Σε δεύτερο χρόνο, αθροίζονται οι αλλαγές και των δώδεκα τοπολογιών και κλήσεων του μοντέλου, μέσω του MATLAB, όπως θα αναλυθεί στο **Κεφάλαιο 4**. Συνεπώς, οι μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου δεν περιέχουν δείκτη χρόνου, όμως συνολικά τα αποτελέσματα επεξεργάζονται και παρουσιάζονται με τρόπο παρόμοιο με τη περίπτωση ‘2.α’. Η διαφορά με αυτήν επίσης έγκειται στην τελική εξαγωγή 12 βέλτιστων τοπολογιών, αντί μίας. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ακόλουθη:

$$\min f = c_{loss} \sum_{i \in \Omega n} (Ploss_i) + c_{sw} \sum_{i,j \in \Omega mz} (sw_{inop_{i,j}} - sw_{op_{i,j}}) \quad (3.21)$$

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη Κώδικα Βέλτιστης Επαναδιαμόρφωσης Δικτύων Διανομής για Μείωση των Απωλειών Ενεργού Ισχύος

4.1 Εισαγωγή

Εδώ και δεκαετίες, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην επίλυση μαθηματικών προβλημάτων. Οι κύριοι λόγοι της χρήσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών στην επίλυση προβλημάτων είναι η πολυπλοκότητα αυτών, το πλήθος των μεταβλητών, των παραμέτρων και των στοιχείων γενικά που χρήζουν επεξεργασίας, το πλήθος μαθηματικών πράξεων που πρέπει να εκτελεστούν και η τεράστια συγκριτική ταχύτητα και ακρίβεια, με την οποία αυτές πρέπει να πραγματοποιηθούν. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης, στην πλειονότητα τους, λόγω αυτών των συνθηκών, θεωρούνται αδύνατον να επιλυθούν με το χέρι. Έτσι, και στον τομέα των ΣΗΕ, όπου συχνά τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν έχουν τέτοια μορφή, η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι απαραίτητη.

4.1.1 Μαθηματικός Προγραμματισμός

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, στη γενική του μορφή, αποτελείται από τα εξής στοιχεία. Σημείο έναρξης είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή τη συνάρτηση καλείται το μαθηματικό πρόγραμμα να ελαχιστοποιήσει, υπό ένα πλήθος περιορισμών που θέτονται. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τέτοιοι είναι οι περιορισμοί τάσης και ισχύος.

Ανάλογα με τη γραμμικότητα ή μη των συναρτήσεων, τα προβλήματα αυτά θεωρούνται γραμμικά (linear) ή μη γραμμικά, αντίστοιχα (non linear). Ακόμη, ανάλογα με τα σύνολα στα οποία ανήκουν οι μεταβλητές του προβλήματος, δύναται να χωριστούν σε άλλες κατηγορίες, με τις κυριότερες να αφορούν τη διακριτότητα αυτών. Συγκεκριμένα, τα προβλήματα βελτιστοποίησης διακρίνονται σε συνεχή (continuous), καθώς οι μεταβλητές τους αφορούν πραγματικούς αριθμούς και σε διακριτά (discrete). Ακόμη, είναι δυνατόν ένα πρόβλημα να περιγράφεται μαθηματικά, τόσο από συνεχείς, όσο και από διακριτές μεταβλητές. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα ονομάζεται μικτού ακέραιου (Mixed Integer) προγραμματισμού. Χρησιμοποιώντας τις δυο αυτές κατηγοριοποιήσεις, προκύπτει μια πρώτη επαρκής περιγραφή για τα μαθηματικά προβλήματα σε υπολογιστικό περιβάλλον. Δύο αρκετά συνήθεις χαρακτηρισμοί, εμφανίζονται με τις συντομογραφίες MILP (Mixed Integer Linear Programming) και MINLP (Mixed Integer Non-Linear Programming). Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος, τόσο δυσκολότερη είναι η επίλυσή του. Έτσι, τα προβλήματα μικτού ακέραιου είναι εν γένει δυσκολότερα στην επίλυση από τα αμιγώς συνεχή ή διακριτά. Τα μη γραμμικά προβλήματα απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης από τα γραμμικά. Ακόμη, διάφορες μέθοδοι και αλγόριθμοι επίλυσης μη γραμμικών

προβλημάτων, συχνά περιορίζονται στην εύρεση τοπικών και όχι ολικών βέλτιστων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς: MIQCP (Mixed Integer Quadric Constrained Programming). Αν και ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των μη γραμμικών προβλημάτων, χρησιμοποιούν τους απλούστερους δυνατούς μη γραμμικούς περιορισμούς κι έτσι, η επίλυσή τους γίνεται σε μικρότερο σχετικά χρόνο.

4.1.2 Δομή των Υπολογιστικών Εργαλείων

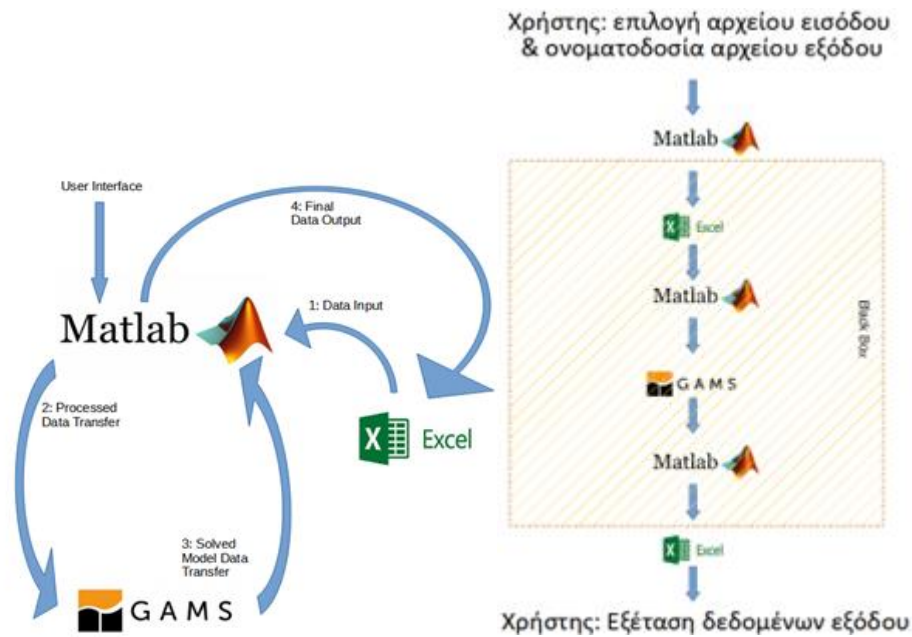
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η μετάβαση από το μαθηματικό μοντέλο στην εφαρμογή ‘in silico’, στο θεωρητικό δίκτυο IEEE-33. Τα προγραμματιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι τα υπολογιστικά φύλλα Microsoft Excel, το πρόγραμμα MATLAB και το εργαλείο μαθηματικού προγραμματισμού GAMS.

Για τη μοντελοποίηση ενός δικτύου, σε υπολογιστικό περιβάλλον, κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή πλήθους δεδομένων. Αυτά αφορούν τα χαρακτηριστικά του δικτύου, τα οποία αφορούν κυρίως τις παραμέτρους του μοντέλου. Έτσι, χρειάζεται ένας τρόπος τυποποιημένης, οργανωμένης και αποδοτικής εισαγωγής δεδομένων αλλά και αποτελεσματικής εξαγωγής αυτών, για την καλύτερη κατανόηση, χρήση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Για τις παραπάνω χρήσεις επιλέγονται τα υπολογιστικά φύλλα του Excel.

Το πρόγραμμα MATLAB θεωρείται ένα πολύ εύελκτο μαθηματικό εργαλείο. Είναι φιλικό προς τον χρήστη και δεν απαιτεί υψηλό επίπεδο προγραμματιστικών γνώσεων για τη χρήση του, όπως άλλες εμπορικές γλώσσες προγραμματισμού. Σημαντικό προτέρημά του, που το καθιστά δημοφιλές, είναι η ικανότητά του να ‘συνεργάζεται’ με άλλα προγράμματα που χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών εφαρμογών. Το MATLAB επιλέγεται για την ικανότητα επεξεργασίας δεδομένων και ανταλλαγής τους με τα φύλλα Excel και με το πρόγραμμα GAMS.

Το λογισμικό GAMS αφορά το κύριο μέρος του μαθηματικού προγραμματισμού του μοντέλου. Διαθέτει ένα εύρος επιλυτών (solvers), όπου για κάθε μορφή προβλήματος βελτιστοποίησης επιλέγεται ο καταλληλότερος επιλύτης. Η επικοινωνία του με το περιβάλλον, γίνεται μέσω της ανταλλαγής δεδομένων με το MATLAB και της κλήσης του, από αυτό.

Η αναλυτική ενδοεπικοινωνία των προγραμμάτων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1**. Ο χρήστης (User Interface), για τη χρήση του μοντέλου, ανοίγει το πρόγραμμα MATLAB, εκτελεί τον κώδικα (run), επιλέγει το αρχείο Excel, από το οποίο θα αντληθούν τα δεδομένα – παράμετροι (1: Data Input), και ορίζει το όνομα του αρχείου εξόδου – Excel. Έπειτα, το Matlab αντλεί τα επιλεγμένα δεδομένα από αυτό, τα μορφοποιεί μέσω εσωτερικής επεξεργασίας, ‘καλεί’ το λογισμικό GAMS και μεταφέρει σε αυτό τα μορφοποιημένα δεδομένα (2: Processed Data Transfer).



Σχήμα 4.1: Ενδοεπικοινωνία Excel - MATLAB – GAMS & Γραμμική Ροή Ενδοεπικοινωνίας

Μετά την επίλυση του προβλήματος OPF που έχει διατυπωθεί στο GAMS, τα αποτελέσματα επιστρέφονται με την αντίστροφη διαδικασία στο Matlab (3: Solved Model Data Transfer). Πραγματοποιείται μια δεύτερη μορφοποίηση των δεδομένων, δημιουργείται ένα αρχείο εξόδου - Excel – και τα τελικά αποτελέσματα (4: Final Data Output) κατηγοριοποιούνται και παρουσιάζονται σε έναν προκαθορισμένο αριθμό υπολογιστικών φύλλων.

Από την οπτική του χρήστη, αυτή η διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων είναι ‘αόρατη’ και δεν υπάρχει άμεση επαφή με το λογισμικό GAMS. Έτσι, η ενδοεπικοινωνία των προγραμμάτων, για πιο συνοπτική παρουσίαση, αντιμετωπίζεται ως ένα ‘μαύρο κουτί – ‘Black Box’, που περιλαμβάνει τη γραμμική ροή ενεργειών, όπως παρουσιάζεται επίσης στο **Σχήμα 4.1**.

4.2 Τα Αρχεία Εισόδου και Εξόδου Excel

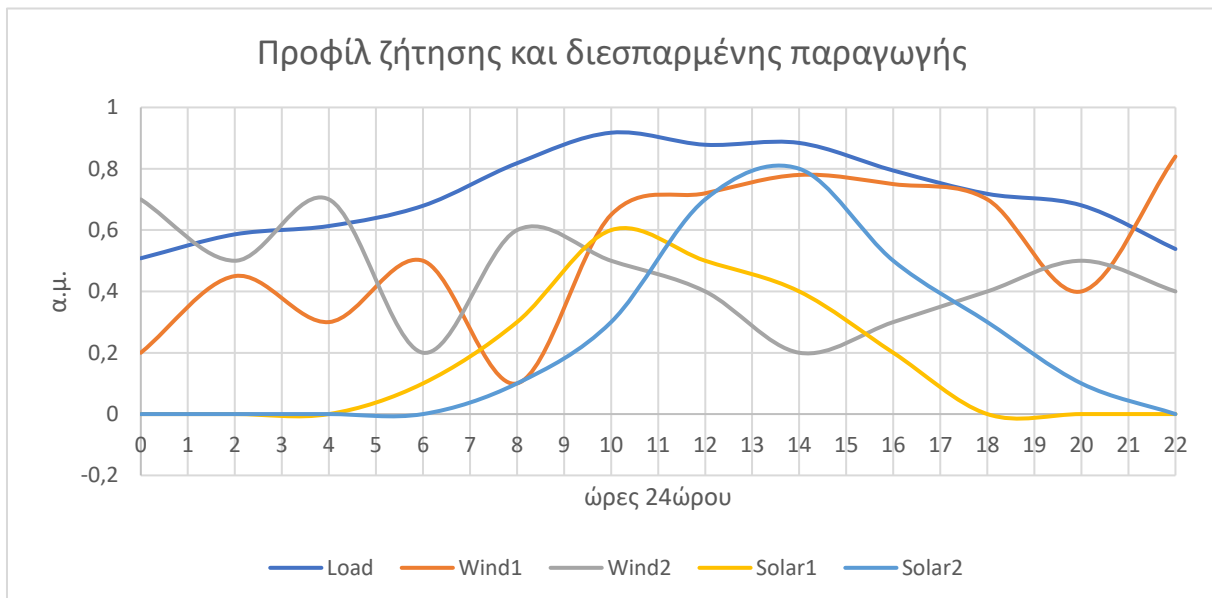
4.2.1 Εισαγωγή στο Λογισμικό Microsoft Excel

Το λογισμικό Microsoft Excel αποτελεί αναμφίβολα το πιο διαδεδομένο σύστημα υπολογιστικών φύλλων. Εκτός από την αποθήκευση και ομαδοποίηση δεδομένων, διαθέτει πλήθος εργαλείων, που αφορούν την επεξεργασία δεδομένων και τη παρουσίασή τους, όπως συναρτήσεις και διαγράμματα, αντίστοιχα. Επίσης, σημαντικό, πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως, λόγω της καθολικής χρήσης του από ιδιώτες, επαγγελματίες και ιδρύματα, χρησιμοποιείται και επικοινωνεί εύκολα με τα περισσότερα προγράμματα που απαιτούν μαζική ανταλλαγή δεδομένων.

4.2.2 Τα Αρχεία Εισόδου Excel

Τα αρχεία εισόδου σε μορφή Excel που χρησιμοποιούνται, περιέχουν όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για τη μοντελοποίηση του εξεταζόμενου δικτύου. Ένα μέρος αυτών των παραμέτρων, χαρακτηρίζουν πρωτογενώς το δίκτυο και είναι τυποποιημένες. Αυτές οι παράμετροι είναι τα όρια τάσεων και ισχύος όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά των κόμβων και των γραμμών (αρίθμηση, διασύνδεση, αντιστάσεις και αυτεπαγωγές, ονομαστικό φορτίο).

Τα χαρακτηριστικά της διανεμημένης παραγωγής διαμορφώνονται εκ των υστέρων και εισάγονται στο αρχείο εισόδου Excel. Αυτά είναι το είδος της πηγής (αιολική ή ηλιακή) και η ονομαστική τους ισχύς (0.5 MW). Επιπρόσθετα, για τη μελέτη της ημερήσιας επαναδιαμόρφωσης, εισάγονται τα προφίλ κατανάλωσης και διανεμημένης παραγωγής, στη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η κατανομή της ζήτησης και της διανεμημένης παραγωγής. Η χρονική διακύμανση της κατανάλωσης, βασίζεται στο σύγγραμμα του Κ. Βουρνά και Γ. Κονταξή [22], ενώ της διανεμημένης παραγωγής από αιολικά και ηλιακά πάρκα στο άρθρο των Α. Sharovalon et al. [23]. Στη διαδικασία μορφοποίησής τους, για τη δημιουργία εντονότερων διακυμάνσεων και αντικρουόμενων συμπεριφορών, εντός λογικών πλαισίων, επιλέγονται διακριτά στιγμιότυπα για την εισαγωγή στο μοντέλο. Παράγονται έτσι τρία σύνολα, δώδεκα τιμών έκαστο, που κυμαίνονται εντός της μονάδας. Αυτά πολλαπλασιάζονται, με τη μορφή συντελεστών, με την ονομαστική ισχύ του φορτίου κάθε κόμβου (Load) και την ονομαστική παραγωγή των διανεμημένων πηγών, αντίστοιχα (Wind1, Wind2, Solar1 και Solar2).



Σχήμα 4.2: Προφίλ Ζήτησης και Διανεμημένης Παραγωγής

Επιπλέον παρέμβαση, στο αρχικό δίκτυο της IEEE που χρησιμοποιήθηκε, αποτελεί η απουσία διακοπών σε κάθε γραμμή. Καθώς το δίκτυο δεν διαθέτει εφεδρικές γραμμές μεταξύ όλων των κόμβων, προκύπτουν σύνολα κόμβων (sections) τα οποία διατηρούν τη σύνδεσή τους, σε κάθε βέλτιστη τοπολογία, που προκύπτει σε κάθε περίπτωση. Έτσι, για οικονομία

υπολογιστικού χρόνου, ορισμένες γραμμές θεωρήθηκαν μόνιμα κλειστές, ώστε το μοντέλο να μην εξετάζει τοπολογίες που είχαν απορριφθεί εκ των προτέρων, όπως αποδείχθηκε από πρωταρχικές εκτελέσεις.

Στο Παράρτημα (**Κεφάλαιο 9**) παρουσιάζονται όλες οι τιμές, που αντλούνται από το αρχείο εισόδου Excel.

4.2.3 Τα Αρχεία Εξόδου Excel

Τα αρχεία εξόδου σε μορφή Excel, περιέχουν πλήθος χρήσιμων πληροφοριών για το επιλυμένο μοντέλο. Συγκεκριμένα, εκτός από τη νέα τοπολογία του δικτύου, η οποία εμφανίζεται τόσο με το σύνολο των κλειστών διακοπών όσο και με το σύνολο των ανοιχτών διακοπών, περιέχει πληροφορίες για την έκβαση της εκτέλεσης (όπως, για παράδειγμα, εάν η εκτέλεση κατέληξε σε ολικό ελάχιστο ή τερματίστηκε λόγω χρόνου) και τον χρόνο εκτέλεσης του λογισμικού GAMS. Ακόμη, περιέχει τα μεγέθη έγχυσης του κόμβου του υποσταθμού (ενεργός, άεργος και φαινόμενη έγχυση ισχύος), τις τάσεις όλων των κόμβων σε κάθε χρονική στιγμή, τις ελάχιστες τάσεις αυτών σε κάθε χρονική στιγμή, σε πραγματικά μεγέθη και σε ανά μονάδα. Τέλος, συμπεριλαμβάνει τις συνολικές ενεργές και άεργες απώλειες του δικτύου, σε κάθε χρονική στιγμή. Από αυτά, στο **Κεφάλαιο 5** θα παρουσιαστούν τα μεγέθη που κρίνονται πιο χρήσιμα για τη κατανόηση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων.

4.3 Το Λογισμικό MATLAB

4.3.1 Εισαγωγή στο Λογισμικό MATLAB

Το λογισμικό MATLAB (συντομογραφία που προκύπτει από τη φράση ‘Matrix Laboratory’) αποτελεί παράλληλα ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής αλλά και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Όπως προκύπτει και από την ονομασία του, αποθηκεύει δεδομένα και κάνει πράξεις με βάση την άλγεβρα πινάκων. Εκτός από το γεγονός πως χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, αποτελεί και ισχυρό εργαλείο προγραμματισμού, καθώς, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί στοιχεία και εντολές της προγραμματιστικής γλώσσας ‘C++’. Επιπλέον, διαθέτει εργαλεία στατιστικής ανάλυσης και παρουσίασης, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο σε περισσότερους από είκοσι εκατομμύρια χρήστες, σε πεδία που περιλαμβάνουν – αλλά δεν περιορίζονται μόνο σε αυτά– όπως η μηχανική, οι φυσικές επιστήμες και τα οικονομικά. Η ευρεία χρήση του MATLAB οφείλεται στην ευκολία επικοινωνίας με πιο εξειδικευμένα προγράμματα που χρησιμοποιούνται στα διάφορα επιστημονικά και εμπορικά πεδία.

```

5   %% Input Network Data
6   -   Filename=[];
7
8   -   while isempty(Filename) || ~ischar(Filename)
9
10  -       Filename=uigetfile('*.xlsx','Import the Data of the Network');
11
12  -   end
13
14  -   prompt = 'Give the name of the output file: ' ;
15  -   Outputfile=input(prompt,'s');
16
17  -   if isempty(Outputfile)
18
19  -       Outputfile='Results';
20
21  -   end
22
23  -   Outputfile = [Outputfile '.xlsx'];

```

Σχήμα 4.3: MATLAB – Εντολές Χρήστη και Δημιουργία Αρχείου Εξόδου

4.3.2 Εισαγωγή, Επεξεργασία και Εξαγωγή Δεδομένων στο MATLAB

Η εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό MATLAB, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται με τη χρήση αρχείου Excel. Στις γραμμές 5 έως 23 του κώδικα του MATLAB που παρατίθενται στο Σχήμα 4.3, διατυπώνεται η διαδικασία επιλογής του αρχείου εισόδου, η ονομασία του αρχείου εξόδου και η δημιουργία αυτού.

Έπειτα, γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων στο MATLAB από το επιλεγμένο Excel με τη μορφή μεταβλητών. Αυτά αφορούν:

- Υποσταθμούς: (στην περίπτωση του δικτύου που εξετάζεται είναι ένας). Συγκεκριμένα, τις τιμές βάσης τάσης και ισχύος, και τα όρια τάσης του,
- Κόμβους: Τον αριθμό τους, τον τύπο τους (ταλάντωσης ή όχι), τα όρια τάσεών τους και την ενεργή και άεργη ζήτηση που εξυπηρετούν με τη μορφή φορτίου,
- Γραμμές μεταφοράς: Τον αριθμό τους, τους κόμβους που συνδέουν, εάν φέρουν διακόπτες ή όχι, την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίδρασή τους,
- Διανεμημένη παραγωγή: Την ονομαστική παραγωγή των πηγών, το είδος τους (αιολικά ή ηλιακά πάρκα) και τους κόμβους στους οποίους συνδέονται
- Τα ημερήσια προφίλ ζήτησης του δικτύου και παραγωγής των διανεμημένων πηγών.

Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, οι τιμές με τις οποίες το GAMS επιλύει το μοντέλο είναι ανά μονάδα. Στο Σχήμα 4.4 αποτυπώνεται ένα παράδειγμα τόσο εισαγωγής δεδομένων,

```

32      %New Hourly Profiles Data
33 -    LoadData=xlsread(Filename, 'LoadProfile');
34 -    SunData=xlsread(Filename, 'SunProfile');
35 -    WindData=xlsread(Filename, 'WindProfile');
--
44      %Base system
45 -    Sbase = SubstationData(1,4);
46 -    Vbase = SubstationData(1,5);
47 -    Zbase = (Vbase^2)/Sbase;
48 -    Ibase = (Sbase*10^3) / (sqrt(3)*Vbase);

```

Σχήμα 4.4: MATLAB - Παραδείγματα Εισαγωγής και Επεξεργασίας Δεδομένων

όσο και σχηματισμού των κατάλληλων τιμών βάσεων για τις απαραίτητες επεξεργασίες. Έτσι, μέσω του λογισμικού MATLAB γίνεται επίσης η κατάλληλη αναγωγή σε αυτές.

Μετά την επίλυση του μοντέλου, το GAMS επιστρέφει τα αποτελέσματα στο MATLAB, το οποίο εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία, με στόχο να παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα και σε φυσικά μεγέθη. Μείζονος σημασίας είναι επίσης ο μετασχηματισμός πινάκων που εκτελείται στον κώδικα, καθώς η μορφή των πινάκων που χρησιμοποιούνται στο GAMS διαφέρουν από την ευανάγνωστη μορφή με την οποία παρουσιάζονται στο Excel. Η ενημέρωση του αρχείου εξόδου Excel είναι και η τελευταία ενέργεια που πραγματοποιεί το MATLAB πριν τον τερματισμό του. Κρίνεται σε αυτό το σημείο χρήσιμη η παρουσίαση αποσπασμάτων του κώδικα ως παράδειγμα των λειτουργιών που αναφέρθηκαν.

```

299      %fix the shape of slack values
300 -    for i=1:Nslack*TimeH
301 -        CountSlackstemp(i)=mod(i,Nslack);
302 -        if CountSlackstemp(i)==0 CountSlackstemp(i)=Nslack; end
303 -        CountTimetemp(1)=1;
304 -        CountTimetemp(i+1)=fix(i/Nslack)+1;
305 -    end
475      %Final Topology
476 -    xlswrite(Outputfile,sw_val, 'Closed_switches');
477 -    xlswrite(Outputfile,opensw_val, 'Open_Switches');

```

Σχήμα 4.5: MATLAB - Παραδείγματα Μορφοποίησης και Εξαγωγής Δεδομένων

4.4 Το Λογισμικό GAMS

4.4.1 Εισαγωγή στο Λογισμικό GAMS

Η ονομασία GAMS προκύπτει από τα αρχικά της φράσης ‘General Algebraic Modeling Systems’. Πρόκειται δηλαδή, για ένα περιβάλλον μαθηματικής μοντελοποίησης, στο οποίο μπορούν να επιλυθούν όλα τα προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού. Δημιουργήθηκε αρχικά τη δεκαετία του 1970, από τη Παγκόσμια Τράπεζα (World Bank), για τη μοντελοποίηση οικονομικών μεγεθών και ήταν το πρώτο λογισμικό που συνδύασε την αλγεβρική μαθηματική γλώσσα, με τις παραδοσιακές έννοιες του προγραμματισμού λογισμικού, με στόχο τη περιγραφή και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Καθώς εισήχθη στην αγορά ως εμπορικό προϊόν το 1987, βρήκε ευρεία εφαρμογή σε επιστημονικά ιδρύματα και εταιρίες και σήμερα χρησιμοποιείται σε περισσότερες από 120 χώρες παγκοσμίως. Διαθέτει ορισμένα πλεονεκτήματα, στα οποία οφείλει την ευρεία επιτυχία του. Αρχικά, υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ της μοντελοποίησης και της επίλυσης, η οποία πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός επιλυτή (solver), από ένα ευρύ πλήθος διαθέσιμων. Έτσι, ο προγραμματιστής επικεντρώνεται μόνο στη μοντελοποίηση του προβλήματος και επιλέγει τον καταλληλότερο επιλυτή, για το είδος του προβλήματος που έχει διατυπώσει. Ακόμη, στο περιβάλλον του GAMS είναι δυνατή η περιγραφή και η επίλυση τόσο μικρών όσο και μεγάλων προβλημάτων βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας την ίδια έκταση προγραμματιστικού κώδικα. Αυτό πραγματοποιείται με τη διατύπωση περιορισμών αλλά και συγκεκριμένων εξαιρέσεων, που καθορίζονται από τον προγραμματιστή. Ακόμη, καθώς μιμείται τη μαθηματική περιγραφή μοντέλου, αποτελεί οικείο περιβάλλον για μαθηματικούς προγραμματιστές. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα εύκολου καθορισμού της ακρίβειας της λύσης, μέσω των επιλογών (Options).

4.4.2 Τα Αρχεία Εισόδου στο Περιβάλλον GAMS

Υπάρχουν δύο τρόποι εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα GAMS, έμμεσα και άμεσα. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.6**, η άμεση εισαγωγή δεδομένων είναι απλοϊκή και ιδιαίτερα χρήσιμη όταν πρόκειται για μικρό πλήθος παραμέτρων. Όμως, καθώς συχνά είναι απαραίτητη η εισαγωγή μεγάλου αριθμού μεταβλητών, όπως συμβαίνει και στο παρόν μοντέλο, χρησιμοποιούνται και αρχεία εισόδου (Input.gdx). Η μορφή των δεδομένων αποτυπώνεται στο

Σχήμα 4.7. Έτσι, καθίσταται δυνατή η εισαγωγή παραμέτρων με συνοπτικό και ομαδοποιημένο τρόπο, με τη μορφή πινάκων.

SCALARS		
vmin	Ελάχιστο επίπεδο τάσης σε ανά μονάδα τιμή	/0.9/
vmax	Μέγιστο επίπεδο τάσης σε ανά μονάδα τιμή	/1.1/
BM	Μεγάλος ακέραιος αριθμός	/1000/
;		

Σχήμα 4.6: GAMS – Παράδειγμα Άμεσης Εισαγωγής Παραμέτρων

Entry	Symbol	Type	Dim	Nr Elem
6	BranchLim	Par	2	74
10	CLoadP	Par	1	32
11	CLoadQ	Par	1	32
12	CurrentSun	Par	1	0
13	CurrentWind	Par	1	2
1	I	Set	1	33
7	mapNet	Par	2	74
8	mapSW	Par	2	46
9	mapzero	Par	2	10
4	R	Par	2	74
2	Slack	Set	1	1
3	SSLim	Par	1	1
5	X	Par	2	74

R(*, *): Line restistance (p.u)	
1 2	0.00575259116172393
2 1	0.00575259116172393
3	0.0307595167324284
19	0.0102323747345198
3 2	0.0307595167324284
4	0.0228356655660625
23	0.0281515090257032
4 3	0.0228356655660625
5	0.0237777927519847
5 4	0.0237777927519847
6	0.0510994811437299
6 5	0.0510994811437299
7	0.0116798814042811
26	0.0126656833604117

Σχήμα 4.7: Παράδειγμα Αρχείου Εισόδου “Input.gdx”

4.4.3 Τα Αρχεία Εξόδου στο Περιβάλλον GAMS

Μετά την εκτέλεση, εάν αυτή είναι σχετικά επιτυχημένη, παράγεται ένα αρχείο εξόδου (Output.gdx). Αυτό περιέχει πληροφορίες που επιλέγονται από τον προγραμματιστή και μπορεί να περιέχει το επίπεδο τις τιμές είτε μεταβλητών είτε παραμέτρων. Η ανάγνωση αυτών γίνεται

στο ίδιο περιβάλλον του GAMS (Σχήμα 4.8) και έχει παρόμοια μορφή με τα αρχεία εισόδου που περιγράφηκαν.

Entry	Symbol	Type	Dim	Nr Elem
3	elapsed	Par	0	1
1	modelStat	Par	0	1
15	N	Var	0	1
12	opensw	Var	2	1,089
4	P	Var	2	1,089
8	Ploss	Var	1	33
6	Pss	Var	1	33
5	Q	Var	2	1,089
9	Qloss	Var	1	33
7	Qss	Var	1	33
2	solveStat	Par	0	1
11	sw	Var	2	1,061
14	TPL	Var	0	1
13	TQL	Var	0	1
10	Vsqr	Var	1	33

sw(l, i): Switches						
	1	2		3		
	Upper	Level	Marginal	Upper	Level	Marginal
1	0					0
2				0	1	NA
3	0	1	NA			0
4	0			0	1	NA
5	0			0		0
6	0			0		0
7	0			0		0
8	0			0		0
9	0			0		0

Σχήμα 4.8: Παράδειγμα Αρχείου Εξόδου “Output.gdx”

4.4.4 Η Μοντελοποίηση στο Περιβάλλον GAMS

Η μοντελοποίηση του προβλήματος στο λογισμικό GAMS δύναται να διαχωριστεί σε τρεις κύριες ενότητες:

- Τη δήλωση μεταβλητών, παραμέτρων και την ενημέρωσή τους μέσω του MATLAB, την αρχικοποίηση αυτών ή τη δέσμευση αυτών σε προκαθορισμένες τιμές (όταν κρίνεται απαραίτητο) και τη δήλωση των εξισώσεων προς επίλυση,
- Τη διατύπωση των εξισώσεων,
- Τη διατύπωση επιλογών (options), που σχετίζονται με την εκτέλεση του κώδικα.

Όπως στις περισσότερες γλώσσες προγραμματισμού, οι μεταβλητές και οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν, πρέπει πρώτα να δηλωθούν. Κατά τη δήλωση αυτή, καθορίζεται το είδος τους (για παράδειγμα, ελεύθερες, θετικές, δυαδικές και λοιπές). Ένα προτέρημα του λογισμικού, καθώς διευκολύνει τη διατύπωση μαθηματικών προβλημάτων, είναι η δήλωση και χρήση συνόλων (Sets), κατά αναλογία με τα μαθηματικά σύνολα που περιγράφηκαν στο **Κεφάλαιο 3**. Έτσι, στη διατύπωση των εξισώσεων, οι οποίες έχουν κατά κανόνα δείκτες που απευθύνονται σε σύνολα, ο προγραμματιστής έχει τη δυνατότητα επιλογής για ποιους δείκτες θα εκτελεστεί η εξίσωση. Αυτή η επιλογή γίνεται προφανώς για τη σωστή εκτέλεση του κώδικα αλλά και για λόγους ελαχιστοποίησης της έκτασης αυτού.

Περίπτωση 1.α		Περίπτωση 1.β	
SETS			
I	Σύνολο Ζυγών	I	Σύνολο Ζυγών
Slack(I)	Σύνολο Ζυγών Ταλάντωσης	Slack(I)	Σύνολο Ζυγών Ταλάντωσης
t	Σύνολο Ωρών		
;			
EQUATIONS			
EqP(I, t)	Ισοζύγιο Ενεργού Ισχύος	EqP(I)	Ισοζύγιο Ενεργού Ισχύος
EqQ(I, t)	Ισοζύγιο Αέργου Ισχύος	EqQ(I)	Ισοζύγιο Αέργου Ισχύος

Σχήμα 4.9: Παραδείγματα Δήλωσης Συνόλων και Εξισώσεων

4.4.4.1 Δήλωση Μεταβλητών, Παραμέτρων και Εξισώσεων

Καθώς η μοντελοποίηση αλλάζει, ανάλογα με τη περίπτωση που εξετάζεται, είναι αναγκαίο να υπάρξει διαφοροποίηση στη δήλωση των μεταβλητών, των παραμέτρων και των εξισώσεων του μοντέλου. Συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί (Πίνακας 3.1), οι περιπτώσεις ‘α’, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις ‘β’, δεν περιέχουν μεταβλητή χρόνου, καθώς το λογισμικό GAMS καλείται ξεχωριστά για κάθε διαφορετική χρονική στιγμή.

4.4.4.2 Διατύπωση Εξισώσεων

Όπως είναι αναμενόμενο, οι εξισώσεις του μοντέλου διαφοροποιούνται σε κάθε περίπτωση. Αυτό δεν αφορά μόνο την ύπαρξη ή μη συνόλου ή δείκτη χρόνου, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο παράδειγμα. Στην περίπτωση ‘1.α’ η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει μόνο τον όρο των απωλειών, ενώ στην ‘2.α’ περιλαμβάνει και τον όρο αλλαγής κατάστασης των διακοπών. Έτσι, είναι αναγκαία η εισαγωγή μιας νέας συνάρτησης που να τον υπολογίζει. Αυτή, όπως φαίνεται και στο , φέρει το όνομα ‘CountSw’ (Count Switches – Μέτρηση διακοπών).

```

Περίπτωση 1.α
Objective..  f =e= SUM(t, TotalPloss(t));

Περίπτωση 2.α
CountSw..   N =e= SUM((I, J) $mapzero(I, J) , (mapzero(I, J) - opensw(I, J)) / 2 ;
Objective..  f =e= Closs * SUM(t, TotalPloss(t)) + Csw * N;

```

Σχήμα 4.10: Παραδείγματα Εξισώσεων Περιπτώσεων 1.α και 1.β

Στο **Κεφάλαιο 2** έχει διατυπωθεί πως στόχος των περιπτώσεων ‘α’ είναι η εύρεση μοναδικής τοπολογίας, που αντιστοιχεί στις πέντε ανενεργές γραμμές του δικτύου.

Όμως, καθώς κάθε γραμμή $i-j$ που φέρει διακόπτες διαθέτει έναν στην αναχώρηση και έναν στην άφιξη, η τοπολογία ουσιαστικά περιγράφεται από δέκα ανοιχτούς διακόπτες, δηλαδή πέντε ζεύγη. Αυτός είναι και ο λόγος ύπαρξης της διαίρεσης δια δύο, στο τέλος της εξίσωσης ‘CountSw’. Αναλύοντας την εξίσωση ‘CountSw’ μπορεί να γίνει κατανοητή η λειτουργία της. Αρχικά, η συνθήκη ‘\$marzero(I,J)’ δεσμεύει το λογισμικό να εκτελέσει την εξίσωση, μόνο στις θέσεις i, j , όπου βρίσκονταν ανοιχτοί διακόπτες στην αρχική τοπολογία. Έτσι, στην αφαίρεση ‘marzero(I,J) – opensw(I,J)’, διατυπώνεται η εξής λογική μέτρησης: ‘Από τους 10 αρχικά ανοιχτούς διακόπτες, αφάιρεσε αυτούς που έχουν μείνει ανοιχτοί. Το υπόλοιπο είναι οι διακόπτες που έχουν αλλάξει κατάσταση λειτουργίας, από ανοιχτοί σε κλειστοί.’ Για λόγους απλότητας, η μία αλλαγή που μετράται, αναλογεί σε δύο αλλαγές γραμμών (η γραμμή που ενεργοποιείται και η γραμμή που απενεργοποιείται) και άρα τέσσερις αλλαγές κατάστασης διακοπών, καθώς κάθε γραμμή διαθέτει δύο διακόπτες.

4.4.4.3 Η Διατύπωση των Επιλογών

Βασικό στοιχείο της μοντελοποίησης σε λογισμικό GAMS οποιουδήποτε μαθηματικού προβλήματος, είναι η επιλογή του κατάλληλου επιλυτή (Solver). Ο solver CPLEX της IBM κρίνεται ο καταλληλότερος για την επίλυση του παρόντος μοντέλου. Είναι ακριβής και επιλύει το μοντέλο με υψηλή ταχύτητα. Αν και ο CPLEX εκτελεί γραμμική επίλυση, κρίνεται ο καταλληλότερος για το παρόν μοντέλο. Αυτό συμβαίνει διότι πραγματοποιεί μια έμμεση γραμμικοποίηση προβλημάτων μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP) και προβλημάτων τετραγωνικών περιορισμών (QCP). Το παρόν πρόβλημα αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω (miqcp), όπως διατυπώνεται στο **Σχήμα 4.11**.

```

MODEL    DML_24 /all/ ;

OPTION   miqcp = cplex;

OPTION   reslim = 3600;

OPTION   optca=0;

OPTION   optcr=0;

SOLVE   DML_24 USING miqcp MINIMIZING f;

```

Σχήμα 4.11: GAMS - Επιλογές

Στη δεύτερη γραμμή: ‘OPTION miqucp = cplex;’, διατυπώνεται η σύνδεση του επιλυτή CPLEX με το πρόβλημα μορφής μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (MIQCP). Στη τελευταία γραμμή, το μοντέλο με τίτλο ‘DML_24’, όπως δηλώνεται στη πρώτη γραμμή (και περιέχει τις προαναφερθείσες μεταβλητές, εξισώσεις και λοιπά), δηλώνεται ως πρόβλημα μορφής MIQCP και δηλώνεται επίσης η αντικειμενική του συνάρτηση f , προς ελαχιστοποίηση. Η επιλογή ‘OPTION reslim = 3600’ εισάγει εναλλακτική συνθήκη τερματισμού, όταν ο χρόνος εκτέλεσης υπερβεί τον προκαθορισμένο χρόνο που είναι ίσος με 3600 δευτερόλεπτα. Οι επιλογές ‘ortca = 0;’ και ‘ortcr = 0;’, δεσμεύουν τον επιλυτή στην εύρεση του ολικού ελαχίστου και στη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Όλες αυτές οι επιλογές είναι κοινές και για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζονται.

4.5 Διεπαφή MATLAB-GAMS

Η κλήση του λογισμικού GAMS πραγματοποιείται μέσω του MATLAB και η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δυο προγραμμάτων αποτελεί δομικό στοιχείο της λειτουργίας του μοντέλου. Έτσι, οι ενέργειες που πραγματοποιούνται είναι τρεις:

- Κλήση GAMS
- Μεταφορά δεδομένων από MATLAB σε GAMS
- Επιστροφή αποτελεσμάτων από GAMS σε MATLAB

Στις περιπτώσεις ‘1.α’ και ‘2.α’ (Πίνακας 3.1), όπου ζητούμενη είναι η εύρεση μοναδικής τοπολογίας, οι παραπάνω ενέργειες πραγματοποιούνται μία φορά, το GAMS ενημερώνεται με τις τιμές των παραμέτρων και των δώδεκα χρονικών στιγμών και ομοίως επιστρέφει αποτελέσματα και για τις δώδεκα χρονικές στιγμές. Αντίθετα, στις περιπτώσεις ‘1.β’ και ‘2.β’, οι παραπάνω ενέργειες εκτελούνται δώδεκα φορές. Συγκεκριμένα, στο λογισμικό MATLAB είναι αποθηκευμένες οι τιμές των παραμέτρων για όλες τις χρονικές στιγμές, που χρησιμοποιεί το μοντέλο στο GAMS. Έτσι, σε κάθε κλήση, το δεύτερο ενημερώνεται με τις τιμές που αφορούν μόνο τη χρονική στιγμή t (και φυσικά την τοπολογία της προηγούμενης χρονικής στιγμής $t-1$), για την οποία επιλύει το πρόβλημα OPF και επιστρέφει τις αντίστοιχες τιμές. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός βρόχου. Σε κάθε επανάληψη, οι παράμετροι που προορίζονται για την ενημέρωση του GAMS, λαμβάνουν τις νέες τιμές και οι τιμές των μεταβλητών εξόδου ενημερώνουν τους αντίστοιχους πίνακες, που διατηρούν τις τιμές τους εκτός του βρόχου.

Στο Σχήμα 4.12, λόγω της διαφορετικής ονομασίας των τελευταίων μεταβλητών, είναι εμφανής η προαναφερθείσα διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων (παραδείγματος χάριν LoadP και CurrentLoadP). Όμως, εκτός από τις παραμέτρους με το πρόθεμα ‘Current-’, εντός του βρόχου, στη περίπτωση ‘2.β’ (και ‘1.β’), λαμβάνει νέες τιμές και η παράμετρος ‘mapzero’. Όμως, εφόσον δεν αλλάζει διαστάσεις, όπως συμβαίνει στις επόμενες παραμέτρους, δεν είναι αναγκαία η δημιουργία νέας παραμέτρου, για τη μεταβίβαση τιμών. Καθώς οι παράμετροι ‘Bus, SlackBus, SSLim, R, X, BranchLim, mapN, mapSW’, δεν έχουν καμία χρονική εξάρτηση, μεταφέρονται αυτούσιες σε κάθε περίπτωση.

```
Περίπτωση 2.α
wgdX ('Input',Bus,SlackBus,T,SSLim,R,X,BranchLim,mapN,mapSW,mapzero, LoadP,LoadQ, HourlySun,HourlyWind);
gams_output = 'std';
gams('DNL_24_Case_2a');
solGDX = 'Output.gdx';

Περίπτωση 2.β
wgdX ('Input',Bus,SlackBus,SSLim,R,X,BranchLim,mapN,mapSW,mapzero, CurrentLoadP,CurrentLoadQ, CurrentSun,CurrentWind);
gams_output = 'std';
gams('DNL_24_Case_2b');
solGDX = 'Output.gdx';
```

Σχήμα 4.12: Αποσπάσματα Κώδικα Διεπαφής MATLAB – GAMS

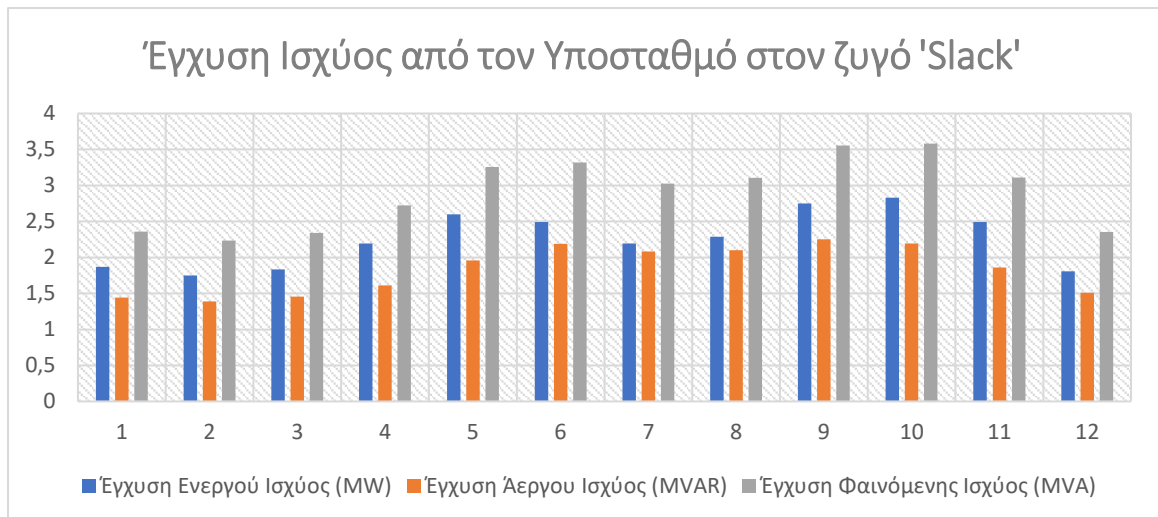
Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές και Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

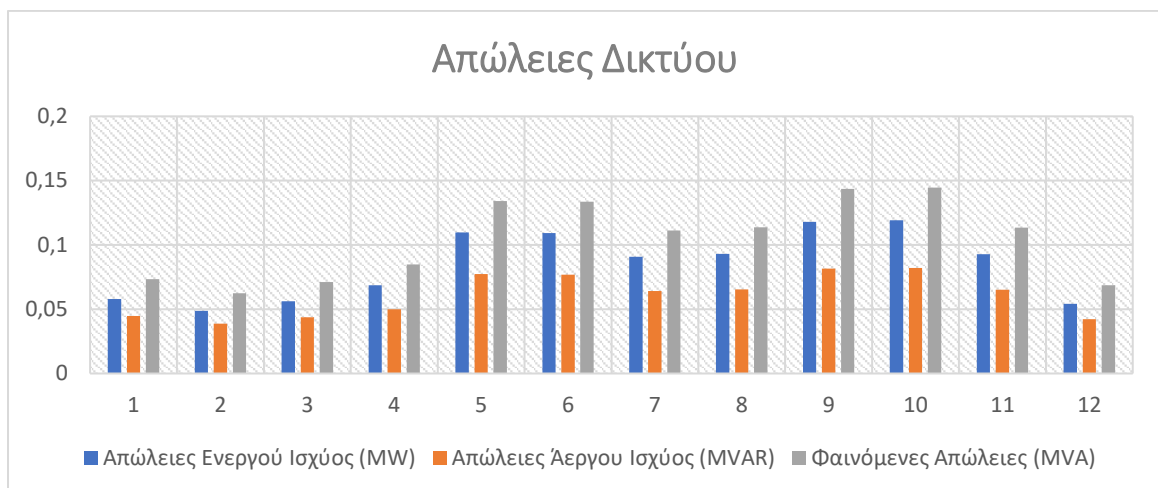
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου σε κάθε περίπτωση (1.α, 2.α, 1.β, 2.β), όπως έχει περιγραφεί στο **Κεφάλαιο 4**. Έπειτα, θα ακολουθήσει η συγκριτική παρουσίασή τους. Αρχικά όμως, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστεί η εφαρμογή του μοντέλου με το σύνολο των επεμβάσεων και παραδοχών που έχουν γίνει σε αυτό. Έτσι, η αρχική τοπολογία του θεωρείται ‘κλειδωμένη’, δηλαδή χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της. Θα παραχθεί, λοιπόν, ένα σύνολο αποτελεσμάτων, που θα αποτελέσει σημείο αναφοράς ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης για τις τέσσερις περιπτώσεις. Το σύνολο των διακοπών, που είναι ανοιχτοί στην αρχική τοπολογία είναι οι: {8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29}, όπως φαίνονται στο **Σχήμα 2.8**. Στο **Σχήμα 5.1**, **Σχήμα 5.2** και **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αρχικής τοπολογίας, όπως αυτά προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος OPF. Αυτά είναι η έγχυση ισχύος από τον υποσταθμό, οι απώλειες του δικτύου και οι ελάχιστες τάσεις που εμφανίζονται στους κόμβους σε κάθε χρονική στιγμή που εξετάζεται.

Η μέση έγχυση ενεργού ισχύος διαμορφώνεται στα 2.2583 MW και οι μέσες απώλειες ενεργού ισχύος στα 0.0849 MW. Στο μοντέλο γίνεται η παραδοχή πως όλα τα φορτία ικανοποιούνται κάθε χρονική στιγμή. Συνεπώς, από το ισοζύγιο ισχύος προκύπτει πως όλη η έγχυση ισχύος από τον υποσταθμό και από τις διανεμημένες πηγές καταναλώνεται στους κόμβους ή μετατρέπεται σε απώλειες μέσω των γραμμών. Έτσι, όσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες, τόσο μεγαλύτερη είναι και η έγχυση.

Επίσης, οι τάσεις στους κόμβους και κατά συνέπεια οι ελάχιστες τιμές αυτών έχουν άμεση σχέση με τις απώλειες, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (3.6) και (3.7) του μαθηματικού μοντέλου. Έτσι, προκύπτει η εκτίμηση πως όσο θα ελαχιστοποιούνται οι απώλειες, τόσο θα ελαχιστοποιείται η έγχυση ισχύος και θα βελτιώνεται το επίπεδο τάσης.



Σχήμα 5.1: Αρχική Τοπολογία - Έγχυση από Υποσταθμό



Σχήμα 5.2: Αρχική Τοπολογία - Απώλειες Δικτύου



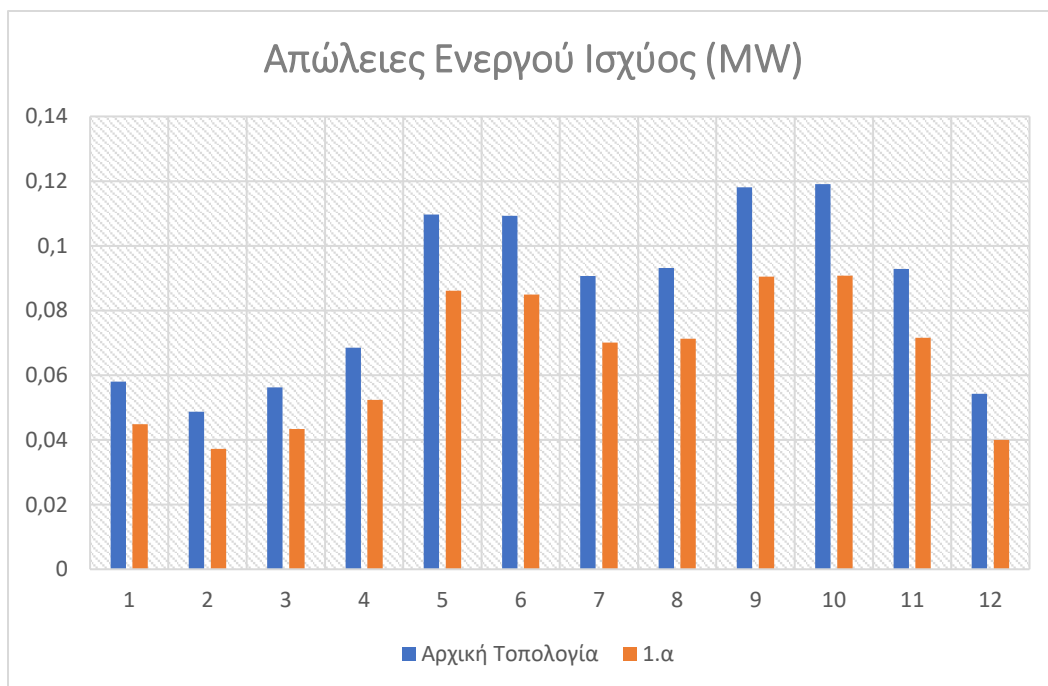
Σχήμα 5.3: Αρχική Τοπολογία - Ελάχιστη Τάση Κόμβων

5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

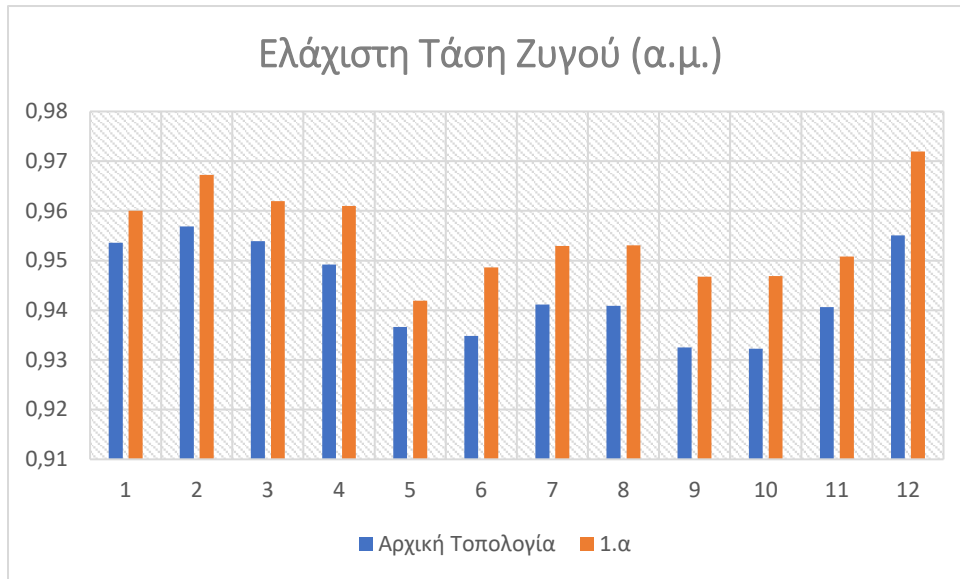
5.2.1 Περίπτωση 1.α

Όπως παρουσιάστηκε και στα **Κεφάλαιο 3 και Κεφάλαιο 4**, η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται αφορά την αναζήτηση μοναδικής βέλτιστης τοπολογίας, χωρίς την ελαχιστοποίηση του πλήθους αλλαγών κατάστασης διακοπών. Η τοπολογία που προκύπτει διαθέτει τους ακόλουθους ανοιχτούς διακόπτες: {6-7, 8-9, 14-15, 15-16, 25-29}. Παρατηρείται ότι οι απαιτούμενες αλλαγές κατάστασης διακοπών για την επίτευξη της βέλτιστης τοπολογίας είναι τέσσερεις, ενώ η γραμμή '25-29' έχει παραμείνει ανενεργή.

Οι μέσες απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, όπως προκύπτουν και από το **Σχήμα 5.4** διαμορφώνονται στα 0.06525 MW από τα 0.0849 MW της αρχικής τοπολογίας. Η ποσοστιαία μείωση αντιστοιχεί στο 23.12% ως προς τις απώλειες της αρχικής τοπολογίας. Αντίστοιχη είναι και η μείωση των απωλειών άεργου ισχύος από 0.06099 MVar σε 0.04851 MVar (μείωση 20.45%). Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.5**, παρατηρείται αυξημένο επίπεδο ελάχιστης τάσης σε σχέση με την αρχική, αποτέλεσμα αναμενόμενο.



Σχήμα 5.4: Περίπτωση 1.α – Απώλειες Δικτύου



Σχήμα 5.5: Περίπτωση 1.α – Ελάχιστη Τάση Κόμβων

5.2.2 Περίπτωση 2.α

Ο στόχος σε αυτήν τη περίπτωση, όπως φαίνεται και από την αντικειμενική συνάρτηση (**Πίνακας 3.1**), είναι επίσης η εύρεση μοναδικής τοπολογίας, όπως και στην περίπτωση 1.α., είναι επίσης η εύρεση μοναδικής τοπολογίας όπως και στην περίπτωση 1.α. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εισάγεται επίσης το κόστος αλλαγών κατάστασης διακοπών σε σχέση με τις απώλειες. Λαμβάνονται έτσι μετρήσεις για χαμηλό, μέσο και υψηλό, σχετικό κόστος απωλειών ισχύος, ως προς τις αλλαγές κατάστασης των διακοπών. Τα τρία αυτά επίπεδα προκύπτουν από τις τιμές των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης, όπου η αναλογία C_{loss}/C_{sw} διαμορφώνεται στις τιμές 100, 1000 και 10000. Οι τοπολογίες που προκύπτουν παρουσιάζονται για λόγους συσχέτισης στον **Πίνακα 5.1**.

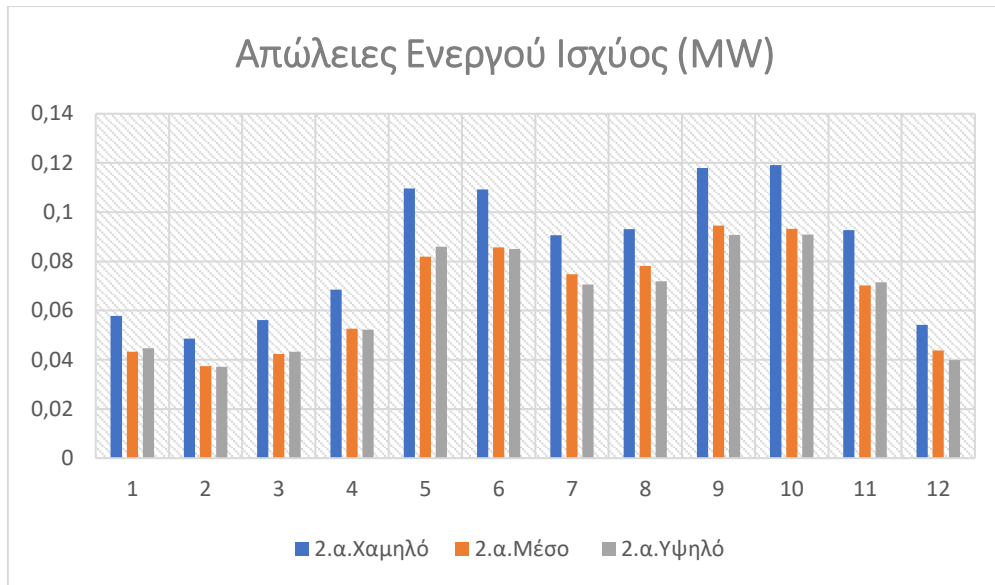
Στην πρώτη στήλη του **Πίνακα 5.1** εμφανίζονται όλοι οι διακόπτες που αλλάζουν κατάσταση λειτουργίας σε κάποια χρονική στιγμή για όλα τα διαφορετικά σχετικά κόστη. Στη στήλη 'τ' συμβολίζονται με '1' οι ανοιχτοί διακόπτες της αρχικής τοπολογίας. Ομοίως, στις επόμενες στήλες με '1' συμβολίζονται οι ανοιχτοί διακόπτες της κάθε υποπερίπτωσης. Η χρωματική επισήμανση αφορά τη μέτρηση των αλλαγών, όπως είχε περιγραφεί στο **Κεφάλαιο 4** (διακόπτες που ήταν ανοιχτοί και έκλεισαν ή το αντίστροφο). Όπως είναι φυσικό, όσο αυξάνει η σχετική βαρύτητα του όρου των απωλειών, τόσο πιο 'εύκολο' είναι για το μοντέλο να αλλάξει τοπολογία. Έτσι, στην τελευταία γραμμή παρατηρείται ότι οι συνολικές αλλαγές είναι οι εξής:

- Στην περίπτωση χαμηλού σχετικού κόστους απωλειών δεν αλλάζει κατάσταση κανένας διακόπτης. Συνεπώς, η τοπολογία παραμένει η αρχική και εμφανίζει τα ίδια επίπεδα απωλειών και τάσης με αυτήν.
- Στην περίπτωση μέσου σχετικού κόστους εμφανίζονται δύο αλλαγές.

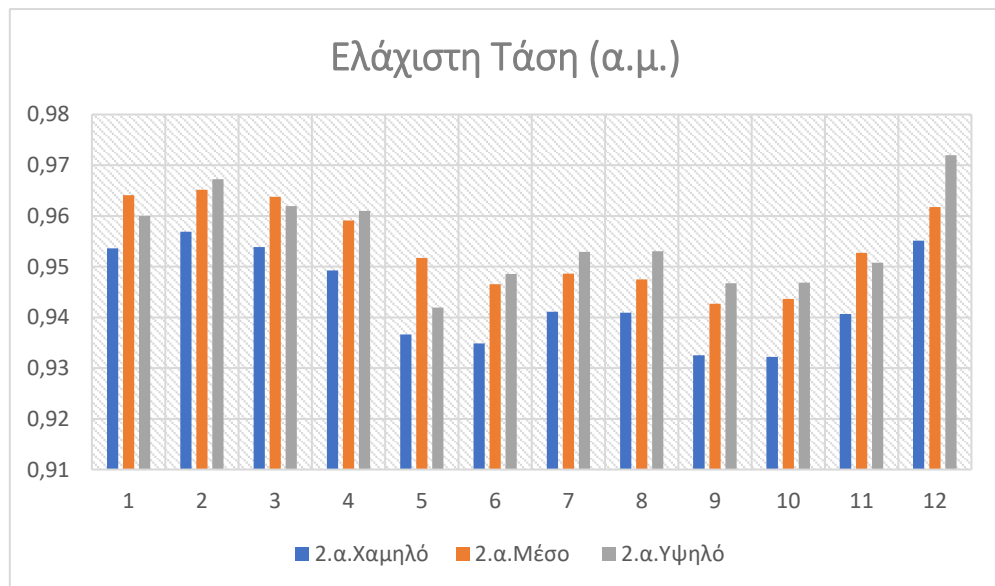
Στην περίπτωση υψηλού σχετικού κόστους εμφανίζονται τρεις αλλαγές, καθώς το μοντέλο τείνει να προσεγγίσει τη περίπτωση '1.α'.

Πίνακας 5.1: Περίπτωση 2.α - Τοπολογίες

2.α.X,M,Y	t_0	2.α.Χαμηλό	2.α.Μέσο	2.α.Υψηλό
6-7	0	0	1	1
8-9	0	0	1	0
8-21	1	1	0	0
9-10	0	0	0	1
9-15	1	1	1	1
12-22	1	1	0	0
15-16	0	0	0	1
18-33	1	1	1	0
25-29	1	1	1	1
N	-	0	2	3



Σχήμα 5.6: Περίπτωση 2.α - Απώλειες Δικτύου



Σχήμα 5.7: Περίπτωση 2.α - Ελάχιστη Τάση Κόμβων

Στο **Σχήμα 5.6** και στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται οι απώλειες και οι ελάχιστες τάσεις του δικτύου, αντίστοιχα.

Υπενθυμίζεται ότι, η πρώτη στήλη ‘2.α.Χαμηλό’ αντιπροσωπεύει τις απώλειες της αρχικής τοπολογίας. Επίσης, παρατηρείται η συσχέτιση μεταξύ των αλλαγών κατάστασης διακοπών και των απωλειών. Δηλαδή, όσο μικραίνει το σχετικό κόστος αλλαγών κατάστασης διακοπών, τόσο αυτές αυξάνουν. Έτσι, η τοπολογία προσεγγίζει τη βέλτιστη όπως αυτή παρουσιάζεται στην περίπτωση 1.α, και οι απώλειες μειώνονται. Οι τοπολογίες που εμφανίζονται στις υποπεριπτώσεις μέσου και υψηλού κόστους, θα μπορούσαν να θεωρηθούν

ως ενδιάμεσα βήματα μεταξύ της ‘Αρχικής Τοπολογίας – Τοπολογίας Χαμηλού Κόστους’ και της ‘Τοπολογίας 1.α’, όπου το κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών είναι μηδενικό.

Στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται, αντίστοιχα, οι τάσεις της περίπτωσης 2.α.. Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται η σταδιακή βελτίωση του επιπέδου ελάχιστων τάσεων, εξετάζοντας διαδοχικά τις υποπεριπτώσεις χαμηλού, μέσου και υψηλού σχετικού κόστους απωλειών.

5.2.3 Περίπτωση 1.β

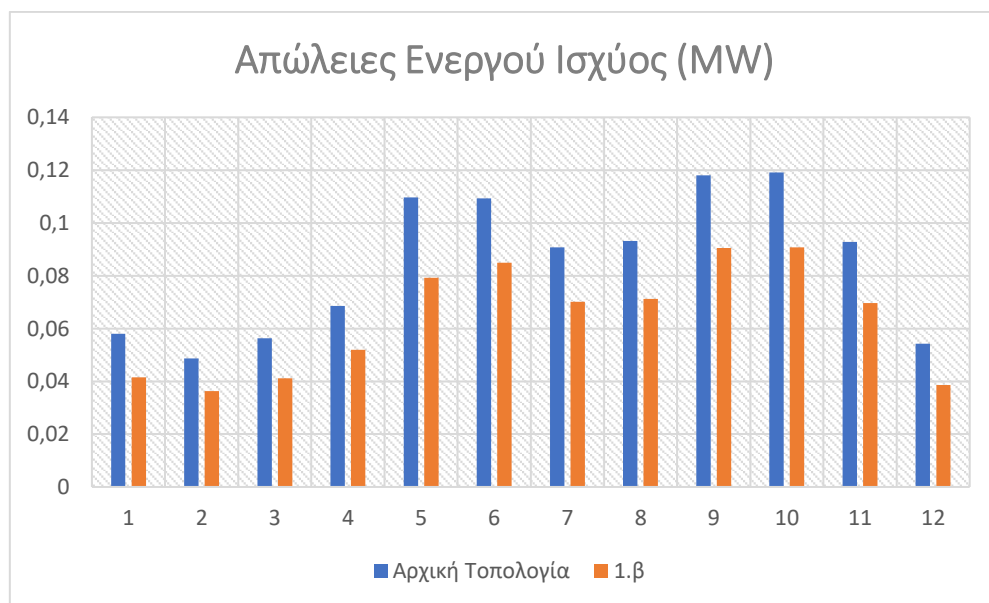
Σε αυτήν τη περίπτωση στόχος είναι η εύρεση συνολικά δώδεκα βέλτιστων τοπολογιών, μία για κάθε χρονική στιγμή. Στην περίπτωση 1.β, για την οποία καλείται το μοντέλο, δεν υπάρχει κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών. Οι εξαγόμενες τοπολογίες παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 5.1**.

Πίνακας 5.2: Περίπτωση 1.β – Τοπολογίες

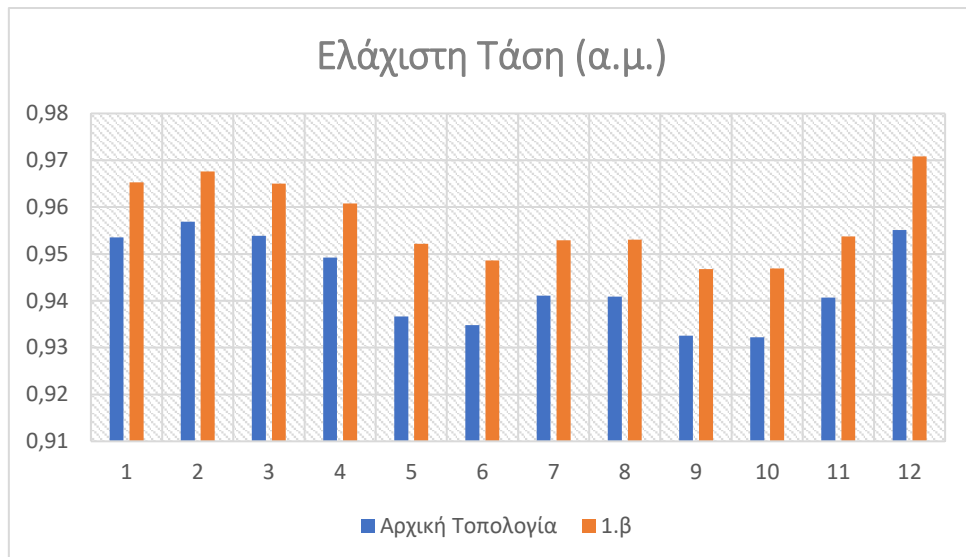
1.β	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
6-7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
7-8	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
8-9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
8-21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-10	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
9-15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15-16	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
18-33	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
25-29	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
28-29	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
N	-	4	1	1	1	1	3	1	0	0	0	1	4

Όπως και στην παρουσίαση των τοπολογιών των υποπεριπτώσεων 2.α, στη πρώτη στήλη εμφανίζονται όλοι οι διακόπτες που αλλάζουν τη κατάσταση λειτουργίας τους. Στην τελευταία γραμμή αθροίζονται οι εν λόγω αλλαγές. Στη στήλη 't₀' παρουσιάζεται επίσης η αρχική τοπολογία. Με '1' συμβολίζεται η κατάσταση λειτουργίας στην οποία ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Με κίτρινη χρωματική επισήμανση παρουσιάζονται οι αλλαγές που παρατηρούνται, ενώ με κόκκινη επισημαίνονται τα αθροίσματα αυτών. Το συνολικό άθροισμα αλλαγών είναι N=17. Παρατηρείται επίσης μια χαρακτηριστική συμπεριφορά στις γραμμές των διακοπών {8-21, 9-15, 12-22}, οι οποίες επισημαίνονται με 'bold' αλλά και στη γραμμή του διακόπτη {14-15}. Συγκεκριμένα, οι πρώτοι τρεις από αυτούς είναι ανοιχτοί στην αρχική τοπολογία, ενώ σε κάθε χρονική στιγμή που επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος είναι κλειστοί. Αυτό σημαίνει ότι οι γραμμές {8-21, 9-15, 12-22} είναι 'καλές' γραμμές για το δίκτυο, με την έννοια ότι οι ροές ισχύος σε αυτές είναι σταθερά προτιμητέες για την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Αντίθετα, η γραμμή {14-15} απενεργοποιείται άμεσα και δεν ενεργοποιείται ξανά, για τα δεδομένα ζήτησης και διανεμημένης παραγωγής που έχουν εισαχθεί. Οι γραμμές {15-16, 18-33} παρουσιάζουν επίσης αξιοσημείωτη συμπεριφορά αλλά για διαφορετικό λόγο. Τις χρονικές στιγμές t₁-t₆, παρατηρείται διαρκής εναλλαγή αυτών των γραμμών, γεγονός που αποδίδεται στην έντονα διαφορετική συμπεριφορά της αιολικής παραγωγής. Ακόμη, μέχρι τη χρονική στιγμή t₆, η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μηδενική, ή σχετικά μικρή, καθώς αντιστοιχεί σε νυχτερινές ή πρώτες πρωινές ώρες. Όταν αυτή αυξάνεται, από τη χρονική στιγμή t₇ και έπειτα, τότε η συμπεριφορά των διακοπών αυτών των γραμμών εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα. Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα διαγράμματα ενεργών απωλειών και τάσεων του δικτύου, στη παρούσα περίπτωση 1.β, στο **Σχήμα 5.8** και στο **Σχήμα 5.9**, αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι, οι απώλειες του δικτύου είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές της αρχικής τοπολογίας. Συγκεκριμένα, οι μέσες απώλειες του δικτύου κυμαίνονται στα 0.06381 MW, από τα 0.0849 MW της αρχικής τοπολογίας (μείωση 25.29% από τις αρχικές απώλειες). Αντίστοιχα, έχει βελτιωθεί και το επίπεδο των ελάχιστων τάσεων, καθώς παρουσιάζουν σημαντική αύξηση.



Σχήμα 5.8: Περίπτωση 1.β - Απώλειες Δικτύου



Σχήμα 5.9: Περίπτωση 1.β - Ελάχιστη Τάση Κόμβων

5.2.4 Περίπτωση 2.β

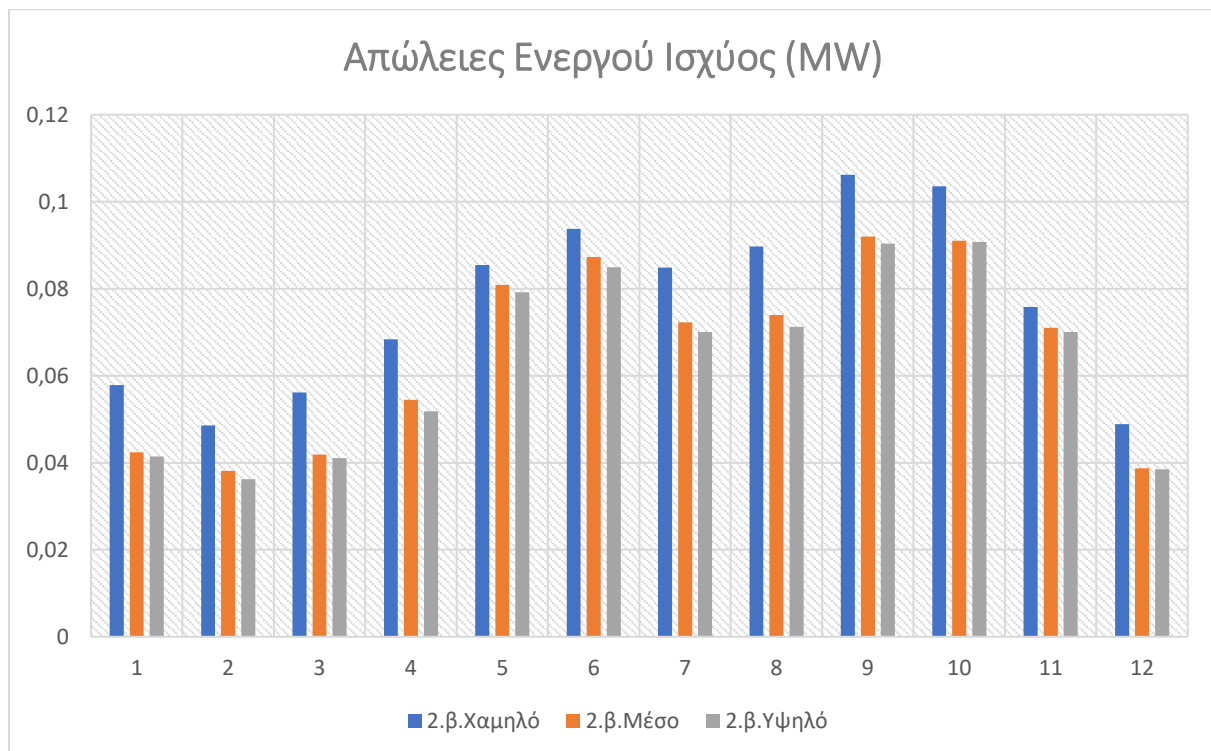
Σε αυτή την περίπτωση στόχος είναι η εύρεση 12 βέλτιστων τοπολογιών, με τη προσθήκη σχετικού κόστους αλλαγής κατάστασης διακοπών. Οι εξαγόμενες τοπολογίες των υποπεριπτώσεων χαμηλού, μέσου και υψηλού σχετικού κόστους, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακας 5.3**.

Πίνακας 5.3: Περίπτωση 2.β – Τοπολογίες

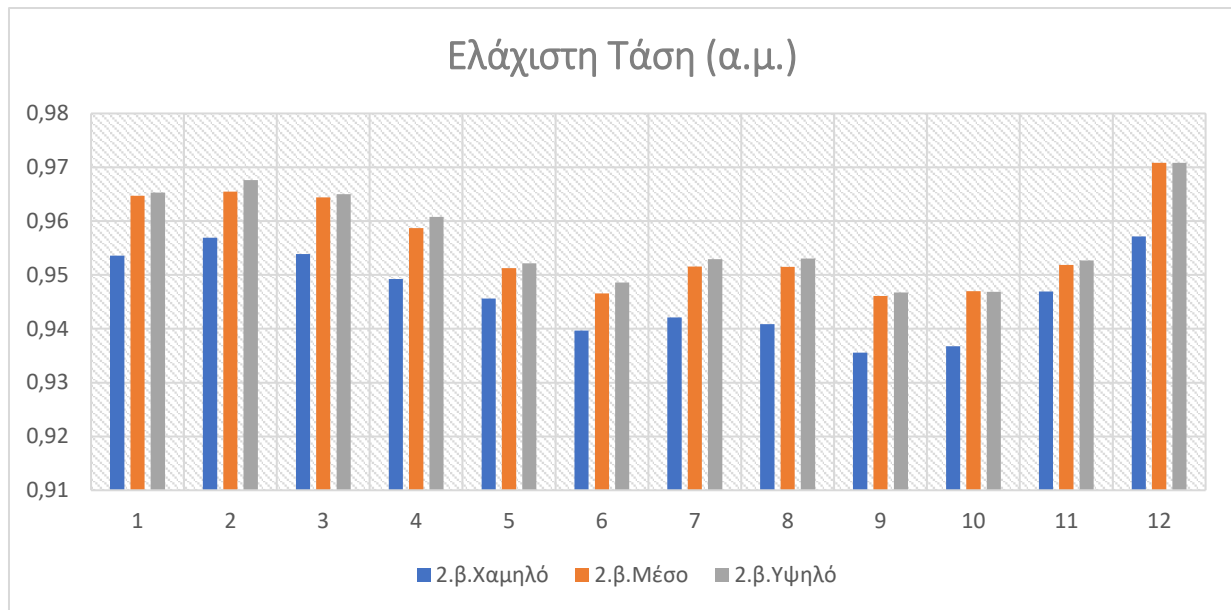
2.β.X,M,Y	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
6-7	0	0	0	0	0	0	Y	Y	Y	Y	Y	Y	0
7-8	0	Y	Y	Y	Y	Y	0	M	M	M	M	M	M,Y
8-9	0	0	0	0	0	X	X	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X
8-21	1	X,M	X,M	X,M	X,M	1	X,M	X	X	X	X	X	X
9-10	0	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M	M	M	M	M	M,Y
9-15	1	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M	X,M
12-22	1	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
15-16	0	0	Y	0	Y	0	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M	M,Y
18-33	1	1	X,M	1	X,M	1	X	X	X	X	X	X,Y	X
25-29	1	X	X	X	X	X	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X
28-29	0	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M,Y	M	M	M	M	M	M	M,Y
N(X)	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
N(M)	4	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
N(Y)	17	4	1	1	1	1	3	1	0	0	0	1	4

Καθώς έχουν συμπτυχθεί τρεις υποπεριπτώσεις στον ίδιο πίνακα, χρησιμοποιείται ο εξής συμβολισμός για λόγους σαφήνειας. Με ‘0’ συμβολίζονται οι κλειστοί διακόπτες και με ‘1’ οι διακόπτες που είναι ανοιχτοί την εκάστοτε χρονική στιγμή, για όλες τις υποπεριπτώσεις. Με τα αρχικά της κάθε υποπερίπτωσης (X, M, Y) συμβολίζονται οι ανοιχτοί διακόπτες τους, αντίστοιχα. Με κίτρινο χρώμα έχει επισημανθεί η μοναδική αλλαγή κατάστασης διακόπτη που παρουσιάζει η υποπερίπτωση χαμηλού κόστους (‘N(X)’). Με πορτοκαλί χρώμα επισημαίνονται οι αλλαγές της υποπερίπτωσης μέσου (‘N(M)’) και ενδεικτικά, με κόκκινο χρώμα έχουν επισημανθεί οι αλλαγές μεταξύ των χρονικών στιγμών $t_{11}-t_{12}$ της υποπερίπτωσης υψηλού κόστους (‘N(Y)’). Παρατηρείται επίσης ότι η βέλτιστη τοπολογία που εξάγει η υποπερίπτωση υψηλού κόστους συμπίπτει με τη βέλτιστη τοπολογία της περίπτωσης 1.β. Στο **Σχήμα 5.10** και στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζονται τα διαγράμματα απωλειών και ελάχιστων τάσεων του δικτύου για κάθε υποπερίπτωση.

Παρατηρείται ότι η μείωση των απωλειών από την υποπερίπτωση χαμηλού κόστους ($N(X) = 1$) στην υποπερίπτωση μέσου κόστους ($N(M) = 4$) είναι σημαντική σε κάθε χρονική στιγμή και ως αποτέλεσμα και οι διαφορές των μέσων ισχύων τους μειώνονται (από 0.07659 MW σε 0.06533 MW, μείωση 14,7%). Παρά τον σημαντικά αυξημένο αριθμό αλλαγών μεταξύ των υποπεριπτώσεων 2.β.Μ ($N(M) = 4$) και 2.β.Υ ($N(Y) = 17$), δεν παρατηρείται ανάλογη μείωση των απωλειών (από 0.06533 MW σε 0.0638 MW, μείωση 2.34%). Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο καθώς με τους συγκεκριμένους συντελεστές βαρύτητας οι επιπλέον 13 αλλαγές δεν κρίνονται από το μοντέλο ως το ίδιο αποδοτικές για την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Αντίστοιχη βελτίωση με τις απώλειες παρατηρείται και στις ελάχιστες τάσεις των υποπεριπτώσεων



Σχήμα 5.10: Περίπτωση 2.β - Απώλειες Ενεργού Ισχύος



Σχήμα 5.11: Περίπτωση 2.β - Ελάχιστη Τάση Κόμβων

5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν οι παραπάνω περιπτώσεις με διαφορετικές ομαδοποιήσεις με σκοπό την καλύτερη σύγκριση μεταξύ τους. Πρώτη τέτοια συγκεντρωτική παρουσίαση επιλέγεται να γίνει για τις περιπτώσεις ‘α’ κι έπειτα για τις περιπτώσεις ‘β’. Στο τέλος θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, όλων των περιπτώσεων, υπό το πρίσμα των απωλειών ενεργού ισχύος που εμφανίζουν.

5.3.1 Σύγκριση Περιπτώσεων α

Κοινό στοιχείο των περιπτώσεων ‘α’ (1.α, 2.α.Χ, 2.α.Μ, 2.α.Υ), αποτελεί η μοναδική τοπολογία την οποία εξάγουν, για όλες τις χρονικές στιγμές. Ως μέτρο σύγκρισης εμφανίζονται ταυτόχρονα στα διαγράμματα και τα σχετικά μεγέθη της αρχικής τοπολογίας.

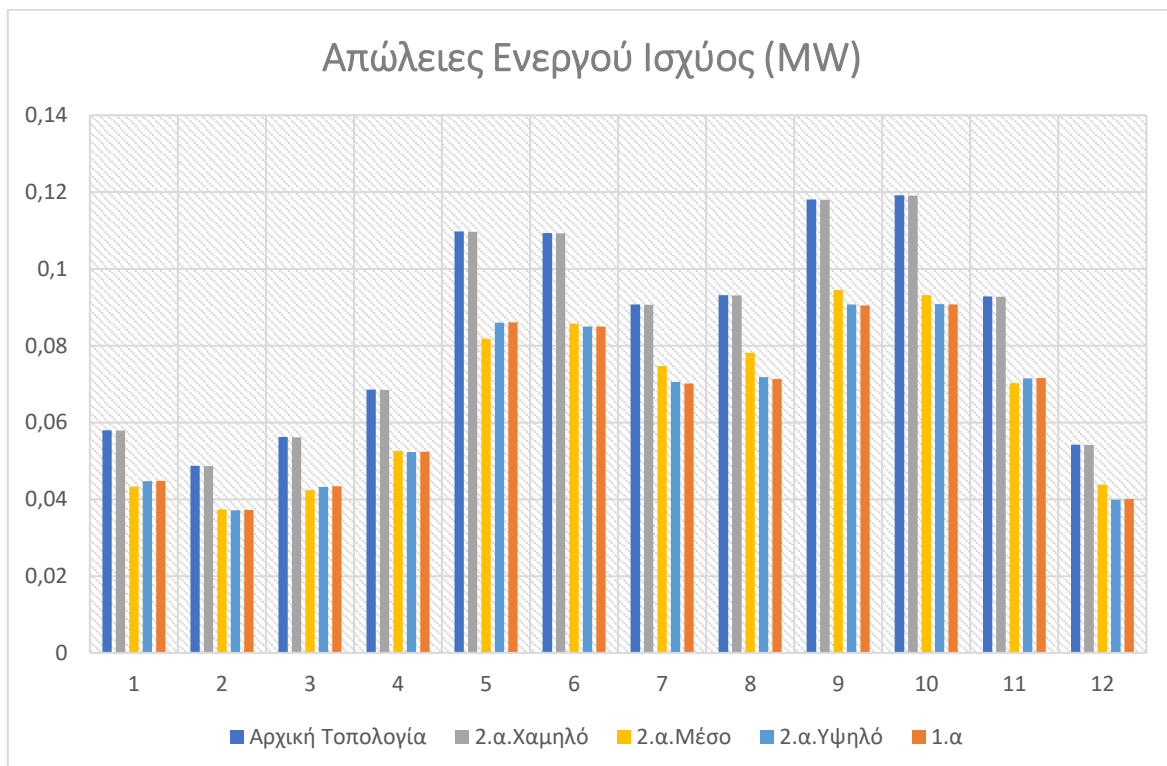
Όπως έχει προαναφερθεί, η τοπολογία της υποπερίπτωσης ‘2.α.Χαμηλό’ συμπίπτει με την αρχική. Επομένως, τα μεγέθη που εμφανίζονται στον πίνακα συμπίπτουν, όπως και οι μέσοι όροι που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Το ίδιο όμως δεν συμβαίνει μεταξύ της υποπερίπτωσης ‘2.α.Υψηλό’ και της 1.α καθώς ‘απέχουν’ μία αλλαγή. Παρά το γεγονός πως φαίνεται ότι τα μεγέθη απωλειών και τάσεων ταυτίζονται και στα δυο διαγράμματα, αυτό δεν ισχύει. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τη μικρή απόκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του μέσου όρου των απωλειών στον **Πίνακα 5.4**.

Στη δεύτερη γραμμή του **Πίνακα 5.4** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές των απωλειών κάθε περίπτωσης, αυτές φαίνονται στην δεύτερη γραμμή του πίνακα, με την υπενθύμιση των αλλαγών κατάστασης των διακοπών τους. Στη τρίτη γραμμή εμφανίζεται ο μέσος όρος των ελαχίστων τάσεων κάθε χρονικής στιγμής.

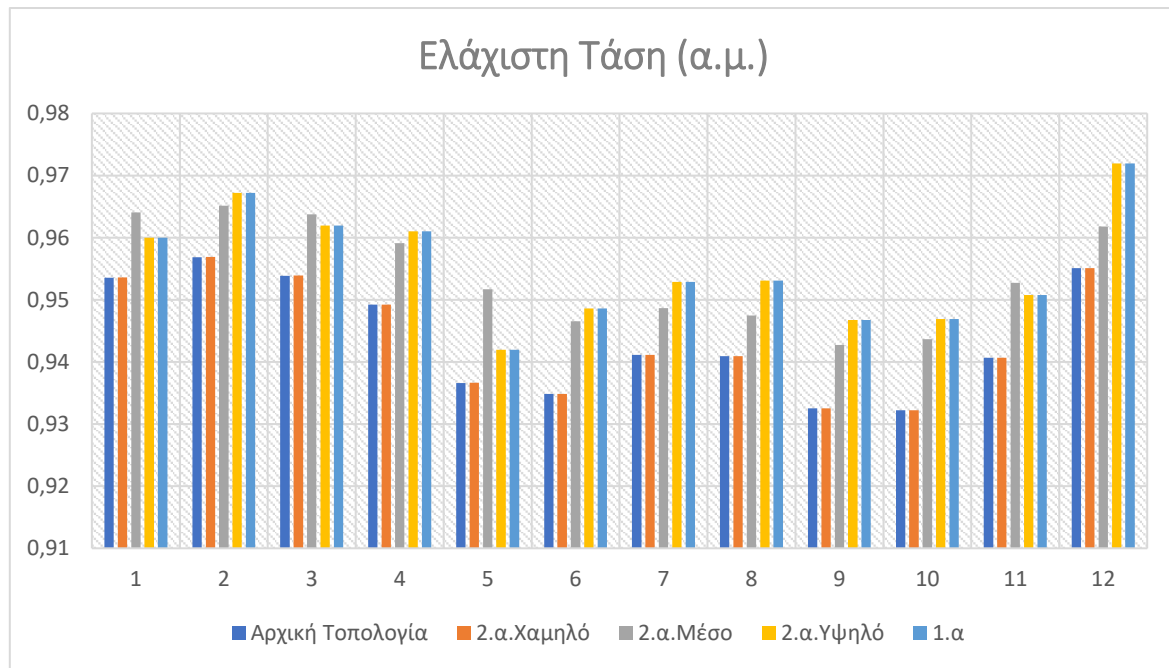
Παρατηρείται επίσης ότι το 'βήμα' των δύο αλλαγών μεταξύ των υποπεριπτώσεων χαμηλού και μέσου κόστους οδηγεί σε σημαντική μείωση των απωλειών (περίπου 0.01841 MW). Το αποτέλεσμα αυτό δεν επαναλαμβάνεται μεταξύ της υποπερίπτωσης μέσου κόστους και της περίπτωσης 1.α (περίπου 0.00124 MW) οι οποίες επίσης 'απέχουν' δύο αλλαγές.

Πίνακας 5.4: Περιπτώσεις 'α' – Μέσες τιμές ενεργών απωλειών και ελαχίστων τάσεων

Σύγκριση περιπτώσεων 'α'	Αρχική Τοπολογία	2.α.Χαμηλό (N=0)	2.α.Μέσο (N=2)	2.α.Υψηλό (N=3)	1.α (N=4)
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	0.0849	0.0849	0.06649	0.0653	0.06525
Μέσος όρος ελαχίστων τάσεων (α.μ.)	0.94396	0.94396	0.95395	0.95526	0.95526



Σχήμα 5.12: Σύγκριση Περιπτώσεων 1α και 2α - Απώλειες Ενεργού Ισχύος



Σχήμα 5.13: Σύγκριση Περιπτώσεων 1α και 2α - Ελάχιστη Τάση Κόμβων

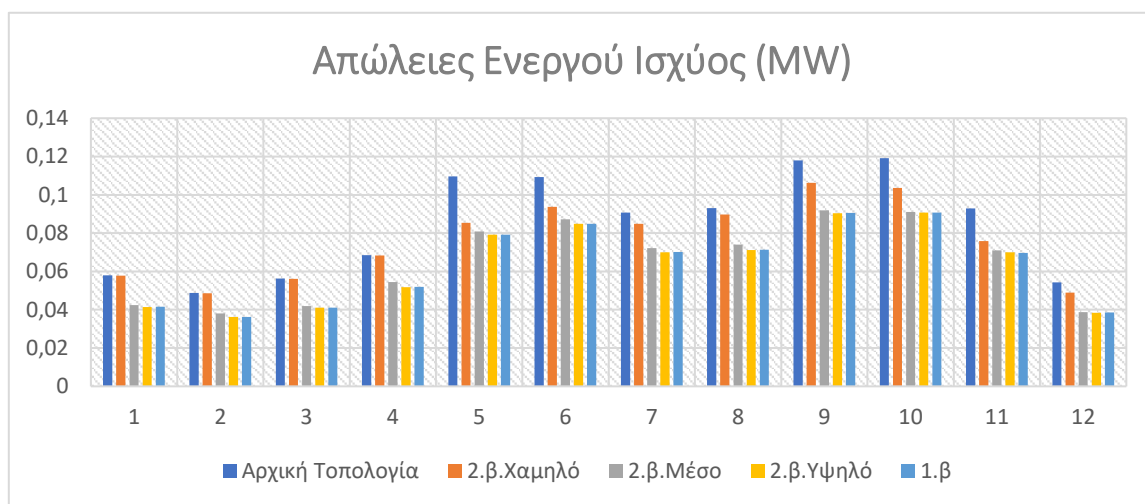
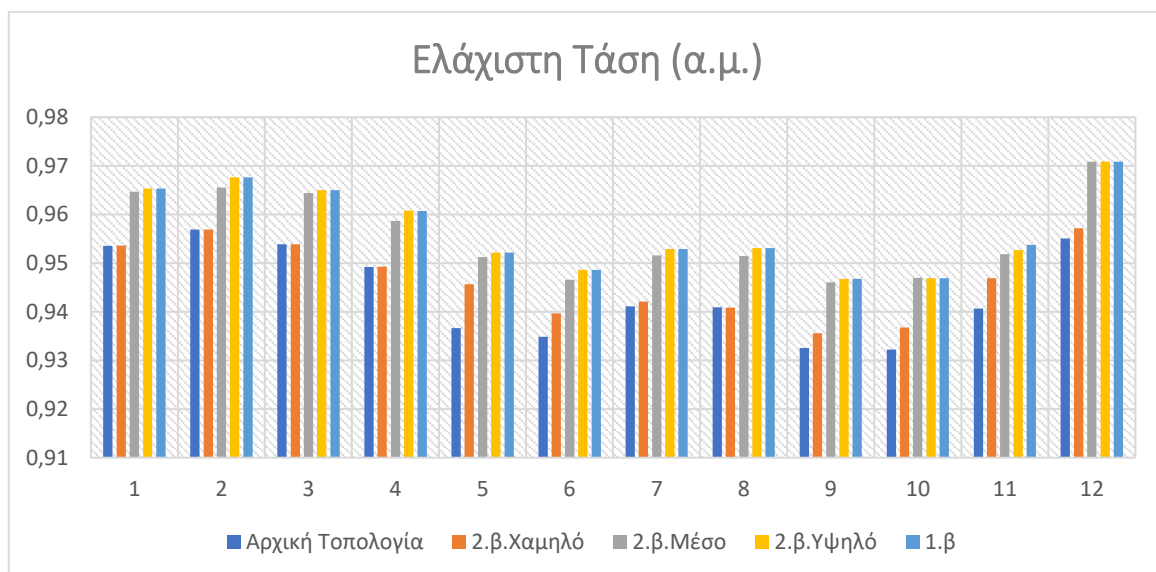
5.3.2 Σύγκριση Περιπτώσεων β

Σκοπός αυτής της υποενότητας είναι η συγκριτική παρουσίαση των περιπτώσεων ‘β’ (1.β, 2.β.Χ, 2.β.Μ, 2.β.Υ) υπό το πρίσμα του κοινού τους χαρακτηριστικού, που αφορά την εύρεση δώδεκα βέλτιστων τοπολογιών. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.14** και στο **Σχήμα 5.15**, σχεδόν σε όλες τις χρονικές στιγμές, διαφαίνεται μια ομαδοποίηση στα μεγέθη, μεταξύ της αρχικής τοπολογίας και της υποπερίπτωσης ‘2.β.Χαμηλό’ και των υπόλοιπων τριών που βρίσκονται χωρικά δεξιότερα (2.β.Μέσο, 2.β.Υψηλό και 1.β). Εδώ εμπίπτει και η ανάλυση που έγινε στη περίπτωση 2.β, η οποία υποστηρίζει αυτή την άτυπη ομαδοποίηση. Η υποπερίπτωση υψηλού κόστους εξάγει την ίδια τοπολογία με την 1.β και η υποπερίπτωση χαμηλού κόστους απωλείων ‘απέχει’ από την αρχική τοπολογία μόνο κατά μία αλλαγή.

Στον **Πίνακα 5.5** γίνεται η συνοπτική παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, που αφορούν τις απώλειες και τις ελάχιστες τάσεις. Όπως είναι αναμενόμενο, ο μέσος όρος των απωλειών ελαχιστοποιείται καθώς αυξάνονται οι αλλαγές κατάστασης διακοπών και ο μέσος όρος των ελάχιστων τάσεων αυξάνεται.

Πίνακας 5.5: Περιπτώσεις 'β' – Μέσες τιμές ενεργών απωλειών και ελαχίστων τάσεων

Σύγκριση περιπτώσεων 'β'	Αρχική Τοπολογία	2.β.Χαμηλό (N=1)	2.β.Μέσο (N=4)	2.β.Υψηλό (N=17)	1.β (N=17)
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	0.0849	0.07659	0.06533	0.0638	0.0638
Μέσος όρος ελαχίστων τάσεων (α.μ.)	0.94396	0.94653	0.95582	0.95697	0.95697

**Σχήμα 5.14:** Σύγκριση Περιπτώσεων 1β και 2β - Απώλειες Ενεργού Ισχύος**Σχήμα 5.15:** Σύγκριση Περιπτώσεων 1β και 2β - Ελάχιστη Τάση Κόμβων

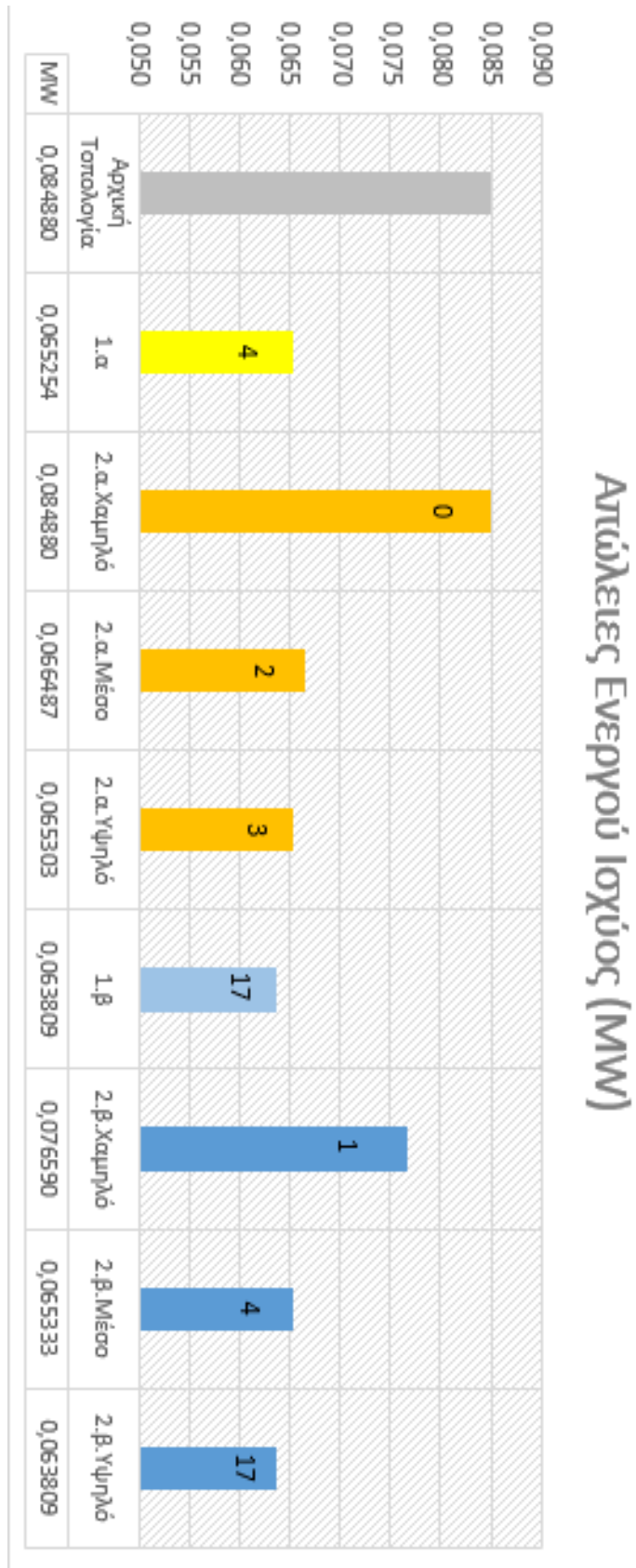
5.3.3 Σύγκριση όλων των περιπτώσεων

Στο **Σχήμα 5.16** παρουσιάζονται γραφικά και αριθμητικά οι μέσοι όροι των απωλειών όλων των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Παράλληλα, διατυπώνεται στο διάγραμμα και ο αριθμός αλλαγών κατάστασης των διακοπών με μαύρο χρώμα, σε κάθε μπάρα του διαγράμματος. Ακολούθως, θεωρείται χρήσιμο να παρουσιαστεί η ποσοστιαία μείωση των απωλειών, σε σχέση με αυτές της αρχικής τοπολογίας η οποία απεικονίζεται στον **Πίνακα 5.6**.

Παρατηρείται πως η περίπτωση που ελαχιστοποιεί στο μέγιστο δυνατό τις απώλειες, είναι η περίπτωση 2.β, με υψηλό σχετικό κόστος απωλειών. Αυτή συμπίπτει με τη περίπτωση 1.β, όπου δεν υπάρχει κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών.

Πίνακας 5.6: Σύγκριση περιπτώσεων - Ποσοστιαία μείωση μέσου όρου απωλειών ενεργού ισχύος

Περιπτώσεις	1.α	2.α Χαμηλό	2.α Μέσο	2.α Υψηλό	1.β	2.β Χαμηλό	2.β Μέσο	2.β Υψηλό
Ποσοστιαία μείωση μέσου όρου απωλειών ενεργού ισχύος (%)	23.55	0	22.07	23.49	25.3	9.95	23.46	25.3



Σχήμα 5.16: Σύγκριση Περιπτώσεων - Απώλειες Ενεργού Ισχύος

Κεφάλαιο 6: Ανάλυση κόστους

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται η σύνδεση του θεωρητικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων του με τα βασικότερα, πραγματικά οικονομικά μεγέθη, τα οποία θα πρέπει να εξεταστούν σε μια ρεαλιστική εφαρμογή. Σε πρώτο επίπεδο, θα γίνουν κάποιες απαραίτητες παραδοχές, καθώς οι μεταβλητές που σχετίζονται με το οικονομικό κόστος στο σύνολό τους είναι πολυπληθείς και συχνά δεν περιέχουν μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας. Έπειτα, με βάση αυτές, γίνεται η οικονομική ανάλυση της εφαρμογής, η οποία βασίζεται στα οικονομικά μεγέθη της ελληνικής αγοράς.

6.2 Παραδοχές

6.2.1 Κόστος Αλλαγής Κατάστασης Διακοπών

Αφετηρία για να γίνουν οι απαραίτητες παραδοχές είναι η εξής απλοϊκή πρόταση: “Η γραμμή $i-j$ πρέπει να αλλάξει κατάσταση λειτουργίας”. Προκύπτει έτσι η πρώτη παραδοχή:

- **Παραδοχή 1:** Σε κάθε γραμμή που υπάρχουν εγκατεστημένοι διακόπτες, αυτοί είναι χειροκίνητοι.

Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να υπάρξει ανθρώπινη επέμβαση για την αλλαγή της κατάστασης των δύο διακοπών της γραμμής, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στην αρχή και στο πέρας της γραμμής. Προφανώς, σε ένα πραγματικό δίκτυο η ανθρώπινη παρουσία αφορά εργαζόμενους που προσλαμβάνονται από τον διαχειριστή του δικτύου. Έτσι, η δεύτερη παραδοχή που γίνεται από οικονομικής άποψης, αφορά τις χρηματικές απολαβές των εργαζομένων.

- **Παραδοχή 2:** Μισθός εργαζόμενου: Ως μηνιαίος μισθός του εργαζομένου ο οποίος καλείται να προβεί στις παραπάνω εργασίες ορίζονται τα 2.500 €.

Επιλέγεται η τιμή των δύο χιλιάδων πεντακοσίων ευρώ, καθώς εξετάζεται το κόστος ως προς τον διαχειριστή, ο οποίος οφείλει να καταβάλει και ένσημα για κάθε εργαζόμενο. Αυτό είναι ένα οικονομικό μέγεθος, το οποίο ανταποκρίνεται στα δεδομένα της ελληνικής αγοράς, καθώς ο εργαζόμενος πρέπει να είναι ειδικευμένος και κατάλληλα εκπαιδευμένος.

- **Παραδοχή 3:** Αριθμός ατόμων που αποτελούν ένα συνεργείο λειτουργίας αποζεύκτη: 2.

Για λόγους ασφαλείας, όταν χρειάζεται να γίνει χειροκίνητα αλλαγή κατάστασης διακόπτη, ο διαχειριστής πρέπει να αποστέλλει τουλάχιστον δύο εργαζόμενους για να την πραγματοποιήσει. Στη θεωρητική ανάλυση ενός δικτύου διανομής θεωρείται δεδομένο πως οι

διακόπτες στην αναχώρηση και την άφιξη της γραμμής, ανοίγουν ή κλείνουν ταυτόχρονα. Σε υπαρκτά, όμως, δίκτυα διανομής, κυρίως για την ελαχιστοποίηση του κόστους, αυτό δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Αντίθετα, αποστέλλεται ένα συνεργείο, το οποίο θα επέμβει πρώτα στο ένα άκρο της γραμμής και έπειτα στο άλλο. Έτσι, η γραμμή παραμένει για ένα χρονικό διάστημα υπό τάση, όμως δεν υπάρχει ροή ισχύος σε αυτή καθώς παύει να τροφοδοτεί φορτία.

- **Παραδοχή 4:** Μέγιστος χρόνος επέμβασης συνεργείου: 4 ώρες

Στο μοντέλο που αναλύεται στο **Κεφάλαιο 5** υπάρχουν τριάντα τρεις (33) κόμβοι υπό μέση τάση. Ένα πραγματικό δίκτυο, με αυτά τα μεγέθη, μπορεί να καλύπτει αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα. Έτσι, ο χρόνος επέμβασης εξαρτάται αφενός από την απόσταση που πρέπει να διανύσει το συνεργείο και αφετέρου από την ταχύτητα με την οποία θα το κάνει. Αυτή μπορεί να είναι μεγάλη αν θεωρηθεί πως υπάρχουν οδοί ταχείας κυκλοφορίας, είτε μικρή εάν πρέπει να χρησιμοποιηθούν επαρχιακές ή και αγροτικές οδοί. Σε αυτόν τον χρόνο, δύναται να συνυπολογιστεί η μετάβαση στο δεύτερο άκρο της γραμμής, ώστε να γίνει η αντίστοιχη επέμβαση και ο χρόνος επιστροφής του συνεργείου, ώστε να είναι και πάλι διαθέσιμο. Φυσικά, ο διαχειριστής έχει την επιλογή να ελαχιστοποιήσει αυτόν τον χρόνο εάν έχει τοποθετήσει τη βάση του συνεργείου σε σημείο κοντά σε γραμμές με έντονη δραστηριότητα, αναφορικά με τη κατάσταση λειτουργίας τους. Επίσης, εάν διαθέτει ικανοποιητική πρόβλεψη φορτίου και διανεμημένης παραγωγής, μπορεί να εκτελέσει διαδοχικές επεμβάσεις σε κοντινές χωρικά γραμμές, χωρίς να απαιτείται η επιστροφή του συνεργείου στη βάση, για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας.

- **Παραδοχή 5:** Κάθε αλλαγή κατάστασης διακόπτη γίνεται ταυτόχρονα με το κλείσιμο ενός άλλου.

Βασικός στόχος του διαχειριστή του ΔΔ είναι η ικανοποίηση όλου το φορτίου του ΔΔ, κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, δεν επιτρέπεται να τεθεί κόμβος (ή ολόκληρο τμήμα του δικτύου) εκτός λειτουργίας. Άρα, για κάθε γραμμή που κλείνει ή ανοίγει, μια άλλη κατάλληλη γραμμή επιβάλλεται να παρουσιάζει ταυτόχρονα την αντίθετη συμπεριφορά. Ως αποτέλεσμα, για κάθε συνεργείο που πραγματοποιεί επέμβαση σε μια γραμμή, ένα ακόμα συνεργείο πρέπει ταυτόχρονα να ρυθμίζει τη συμπεριφορά της αντίστοιχης γραμμής.

- **Παραδοχή 6:** Μεταβατικά φαινόμενα αγνοούνται.

Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε μία αλλαγή κατάστασης διακοπών, όπως αυτή μετράται στο θεωρητικό μοντέλο, τα δύο συνεργεία πρέπει να πραγματοποιούν ταυτόχρονα αλλαγές κατάστασης διακοπών, ώστε να μην συμβεί σφάλμα. Έτσι, θα πρέπει οι αλλαγές να γίνονται με απόλυτη χρονική ακρίβεια, ή να κλείνει πρώτα ο διακόπτης της ανενεργής γραμμής και έπειτα να ανοίγει ο διακόπτης της ενεργής, δημιουργώντας ένα βροχοειδές υποδίκτυο. Φυσικά, αυτό σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιθανό να προκαλέσει ροές ισχύος που δεν είναι συμβατές με τα μέσα προστασίας και να οδηγήσει επίσης σε σφάλματα. Καθώς στη παρούσα διπλωματική εργασία δεν πραγματοποιείται ανάλυση σφαλμάτων και μεταβατικών φαινομένων, αυτά αγνοούνται για λόγους απλοποίησης.

6.2.2 Κόστος Απωλειών Ισχύος

Βασικός παράγοντας για την εκτίμηση του κόστους απωλειών είναι το κόστος μίας κιλοβατώρας, που αγοράζει ή παράγει ο διαχειριστής. Όπως έχει διατυπωθεί, το δίκτυο μεταφέρει ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση. Οι απώλειες συνιστούν τη διαφορά των δύο αυτών ποσών. Το ποσό που 'πουλάει' ο διαχειριστής εξαρτάται μόνο από τις ανάγκες των καταναλωτών. Έτσι, η ελαχιστοποίηση των απωλειών δεν συνεπάγεται την αύξηση της διαθέσιμης ενέργειας προς πώληση, αλλά τη μείωση της παραγωγής. Άρα, δεν έχει φυσικό νόημα να κοστολογηθεί η απώλεια ενέργειας σύμφωνα με τη τιμή πώλησής της στους καταναλωτές, δηλαδή, για παράδειγμα, με το κοστολόγιο της Δ.Ε.Η. ($C_{kW}=0.16 \text{ €}$ έως 0.2€ κατά προσέγγιση, το οποίο κοστολογείται ανάλογα με την ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον καταναλωτή). Είναι επίσης λογικό, πως όσο αυξάνεται το ποσοστό ανανεώσιμης ενέργειας σε ένα δίκτυο, τόσο μειώνεται η τιμή αγοράς της, καθώς δεν καταναλώνεται οποιοδήποτε είδος καυσίμου. Στην Ελλάδα, η παραγωγή μη ανανεώσιμης ενέργειας, προέρχεται από την καύση λιγνίτη και φυσικού αερίου. Έτσι, για την κοστολόγηση με ακρίβεια, θα ήταν αναγκαίος ο υπολογισμός παραγόντων, όπως η τιμή αγοράς λιγνίτη ή φυσικού αερίου, λειτουργικά έξοδα του εργοστασίου, διάφορες χρηματικές ποινές που αφορούν την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου και λοιπά. Επίσης, θα πρέπει να γίνει και η παραδοχή, εάν ο διαχειριστής είναι ανεξάρτητος ή παράγει ο ίδιος την ενέργεια που μεταφέρει. Καθώς στο παρόν μοντέλο η διείσδυση διανεμημένης παραγωγής είναι μικρή σχετικά με το συνολικό φορτίο και για την αποφυγή των προαναφερθέντων υπολογισμών, που εμπεριέχουν μεγάλη πιθανότητα σφάλματος και δυσκολία εύρεσης πληροφοριών, γίνεται η ακόλουθη παραδοχή:

- **Παραδοχή 7:** Κόστος παραγωγής μίας kWh: $C_{kW}=0.12 \text{ €}$.

6.2.3 Κόστος Βελτιστοποίησης

Ύστερα από τη μελέτη κόστους, με βάση το εγκατεστημένο δίκτυο, πραγματοποιείται νέα προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση του κόστους αλλαγής κατάστασης διακοπών. Καθώς αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από την απασχόληση ανθρώπινου δυναμικού (για τη λειτουργία των χειροκίνητων διακοπών), ελαχιστοποιείται με την εγκατάσταση αυτόματων, τηλεχειριζόμενων διακοπών. Έτσι, η πρώτη παραδοχή που πρέπει να γίνει, αφορά την τιμή τους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους εγκατάστασής τους. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει γραμμή 12.66 kV, όπως αυτές που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Αντίθετα, οι γραμμές 33kV και οι αντίστοιχοι αυτόματοι διακόπτες είναι ευρέως διαδεδομένοι. Ανάλογα επίσης με τον διαχειριστή των γραμμών αυτών, εφαρμόζονται διαφορετικά πρότυπα και επιλέγονται οι κατάλληλοι διακόπτες. Η τιμή αυτών, κυμαίνεται από 8.000€ έως 15.000€. Είναι λογική επίσης η υπόθεση, πως η τιμή κάθε προϊόντος διαμορφώνεται σύμφωνα με την εκάστοτε ζήτηση, παραγωγή και την ποσότητα τεμαχίων που αφορά η συναλλαγή. Έτσι γίνεται η επόμενη παραδοχή:

- **Παραδοχή 8:** Κόστος ομοπολικού τριφασικού αυτόματου διακόπτη: 10.000 € .

Όπως έχει προαναφερθεί, κάθε αλλαγή κατάστασης που υπολογίζει το μοντέλο, αντιστοιχεί σε τέσσερις πραγματικές αλλαγές κατάστασης διακοπών. Δεν έχει λοιπόν νόημα να γίνει εγκατάσταση μοναδικού τηλεχειριζόμενου διακόπτη σε μία γραμμή, καθώς ο αριθμός συνεργείων που θα χρειαστεί για τη λειτουργία του δικτύου δεν θα μεταβληθεί. Για αυτόν τον λόγο γίνεται η ακόλουθη και τελευταία παραδοχή:

- **Παραδοχή 9:** Οι αυτόματοι διακόπτες εγκαθίστανται σε τετράδες.

6.3 Οικονομική Ανάλυση

6.3.1 Μελέτη κόστους με αποκλειστική χρήση χειροκίνητων διακοπών

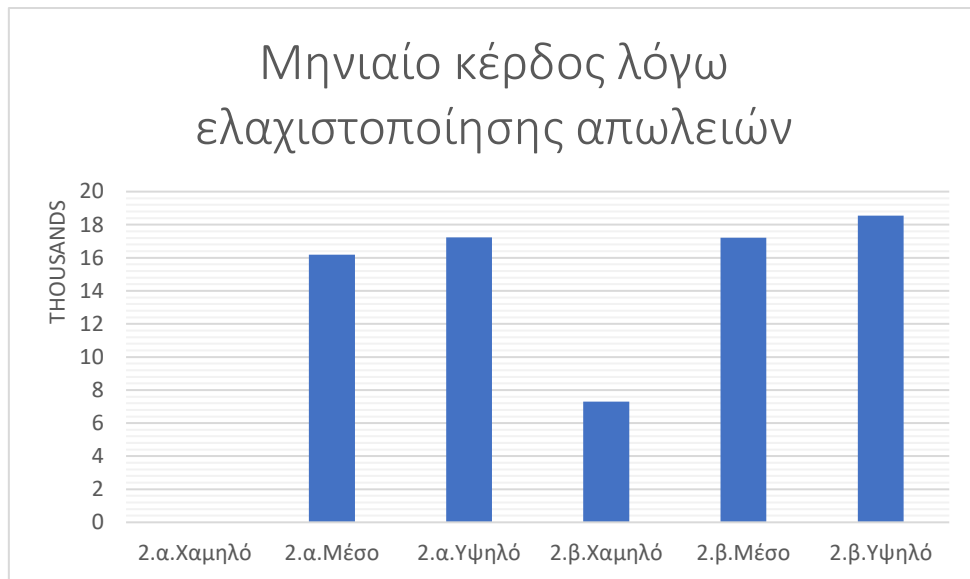
Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές που αναλύθηκαν στη προηγούμενη ενότητα, δημιουργούνται τα ακόλουθα κόστη, που ανάγονται σε μηνιαία βάση.

$$\text{Μηνιαίο κόστος παραγωγής απωλειών} = P_{\text{(loss, μέσο, αρχικής)}} * 24 * 30 * C_{\text{kW}} = 73.336 \text{ €}$$

Χρησιμοποιώντας την ποσοστιαία μείωση των απωλειών, που εμφανίζει η κάθε περίπτωση, εξάγονται τα μηνιαία κέρδη κάθε εφαρμογής του μοντέλου. Παρουσιάζονται συγκεκριμένα, οι υποπεριπτώσεις μέσου και υψηλού κόστους των περιπτώσεων 'α' και 'β', στο **Σχήμα 6.1**.

$$\text{Μηνιαίο κόστος ενός συνεργείου} = 2.500 * 2 = 5.000 \text{ €}$$

Με βάση το μηνιαίο κόστος κάθε συνεργείου, αλλά και τους χρόνους που απαιτεί η κάθε παρέμβαση στη τοπολογία, υπολογίζονται τα συνολικά έξοδα των συνεργείων, όπως αυτά παρουσιάζονται αντίστοιχα στο **Σχήμα 6.2**. Καθώς κάθε αλλαγή κατάστασης διακοπών όπως αυτή υπολογίζεται στο μοντέλο απαιτεί δύο συνεργεία για να την πραγματοποιήσουν (1 αλλαγή = $2 * 5.000 \text{ €} = 10.000 \text{ €}$), γενικεύοντας ο αναγνώστης μπορεί να οδηγηθεί στην λανθασμένη εντύπωση πως αυτή η σχέση επεκτείνεται για κάθε αριθμό αλλαγών. Αυτό όμως θα ίσχυε μόνο στη περίπτωση που ο συνολικός αριθμός αλλαγών θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί σε χρονικό διάστημα εντός τετράωρου, κάτι το οποίο δεν ισχύει πάντα. Αυτός είναι ο λόγος που για παράδειγμα η περίπτωση 2.β υψηλού κόστους απαιτεί 10 συνεργεία για να εφαρμοστεί αντί 34 (17 που είναι ο συνολικός αριθμός αλλαγών μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο επί 2 συνεργεία που χρειάζονται για τη κάθε αλλαγή). Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι η σχέση των συντελεστών απωλειών – αλλαγών που είχε προταθεί στο **Κεφάλαιο 4** και παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 5**, δεν επιβεβαιώνεται σε καμία πραγματική εφαρμογή. Για αυτόν τον λόγο επιχειρείται εκ νέου επέμβαση στο δίκτυο, με την εγκατάσταση αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών.



Σχήμα 6.1: Μελέτη κόστους– Μηνιαίο κέρδος λόγω ελαχιστοποίησης απωλειών



Σχήμα 6.2: Μελέτη κόστους– Μηνιαίο κόστος συνεργείων

6.3.2 Εγκατάσταση Τηλεχειριζόμενων Διακοπών

Καθώς οι περιπτώσεις χαμηλού σχετικού κόστους απωλειών δεν παρουσιάζουν σημαντική μείωση αυτών, δεν θα αναλυθούν περαιτέρω. Επίσης οι περιπτώσεις ‘α’ όπου η τοπολογία είναι μοναδική και όλες οι αλλαγές γραμμών πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στην αρχή της ημέρας, αφενός παρουσιάζουν μικρότερη μείωση απωλειών από τις τοπολογίες της περίπτωσης ‘β’ και αφετέρου απαιτούν μεγάλο κόστος συνεργείων για μικρό σχετικό έργο. Έτσι, η εισαγωγή τηλεχειριζόμενων διακοπών στο σενάριο εφαρμογής τους οδηγείται εκ προοιμίου σε χειρότερα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.1: Μελέτη κόστους – Τοπολογίες περίπτωσης 2.β.Μ

2.β.Μ.Α	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
7-8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
8-21	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
9-10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12-22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
18-33	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
25-29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28-29	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
N(M.A)	2	1*	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Η περίπτωση 2.β μέσου σχετικού κόστους εμφανίζει υψηλά κέρδη, λόγω μείωσης απωλειών. Ταυτόχρονα παρουσιάζει χαμηλά κόστη συνεργειών. Έτσι, εγκαθίστανται τέσσερα ζεύγη αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών στις γραμμές {7-8, 8-21, 15-16, 18-33}.

Με γαλάζιο χρώμα επισημαίνονται οι διακόπτες που αντικαθίστανται με αυτόματους, τηλεχειριζόμενους. Επίσης, όπως στο Κεφάλαιο 5, με γκρι χρώμα επισημαίνονται οι διακόπτες που διατηρούν σταθερή συμπεριφορά, εάν εξαιρεθεί η αρχική τοπολογία. Προκύπτουν έτσι, οι αλλαγές που επισημαίνονται με αστερίσκο (*), τη χρονική στιγμή t_1 . Υπό αυτό το πρίσμα και για τη διάρκεια ενός μήνα, θεωρείται πως η επόμενη χρονική στιγμή της t_{12} είναι η t_1 . Στο τελευταίο κελί της δεύτερης στήλης αναγράφεται με μπλε χρώμα ο αριθμός των απαιτούμενων συνεργειών, που θα χρειαζόταν, εάν εκτελούνταν οι αντίστοιχες αλλαγές σε χειροκίνητους διακόπτες. Αυτός ο χρόνος υπολογίζεται ως το μέγιστο των αθροισμάτων, δύο διαδοχικών κελιών, της τελευταίας γραμμής. Ο λόγος είναι πως έχει γίνει η παραδοχή ότι κάθε συνεργείο, που εκτελεί την αλλαγή κατάστασης χειροκίνητου διακόπτη, δεσμεύεται για τέσσερις ώρες. Δύο διαδοχικά χρονικά στιγμιότυπα ουσιαστικά αξιοποιούν το ίδιο συνεργείο, καθώς τα χρονικά στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί αφορούν διάστημα δύο ωρών.

Η περίπτωση 2.β υψηλού σχετικού κόστους είναι αυτή με τα βέλτιστα αποτελέσματα, όπως έχει παρουσιαστεί στο **Κεφάλαιο 5**. Στο ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 6.2**) γίνεται μία επανεξέταση της συμπεριφοράς των αλλαγών των γραμμών της.

Πίνακας 6.2: Μελέτη κόστους – Τοπολογίες περίπτωσης 2.β.Υ

2.β.Υ.Α	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
6-7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
7-8	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
8-9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
8-21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-10	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
9-15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15-16	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
18-33	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
25-29	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
28-29	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
N(Y)	4	1*	1	1	1	1	3	1	0	0	0	1	4
N(H.A)	3	0*	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3

Οι σκιάσεις χρησιμοποιούνται με την ίδια λογική με τον **Πίνακα 6.1**, με την εξής προσθήκη: με μπλε χρώμα επισημαίνονται οι γραμμές των διακοπών που εμφανίζουν σχετικά πολλές εναλλαγές κατάστασης και ως αποτέλεσμα έχουν προτεραιότητα στην αντικατάστασή τους από αυτόματους, τηλεχειριζόμενους. Έτσι, εξετάζονται δύο υποπεριπτώσεις εγκατάστασης. Η πρώτη αφορά τη μερική εγκατάσταση αυτών και η δεύτερη αφορά την ολική εγκατάσταση τους.

Στη μερικώς αυτοματοποιημένη υποπερίπτωση 2.β.Υ, εγκαθιστώνται αυτόματοι διακόπτες στις γραμμές {15-16, 18-33}, οι οποίες επισημαίνονται στον **Πίνακα 6.2** με μπλε σκίαση. Στη πλήρως αυτοματοποιημένη υποπερίπτωση 2.β.Υ, αντικαθιστώνται όλοι οι χειροκίνητοι διακόπτες, δηλαδή στις γραμμές {6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 15-16, 18-33, 25-29, 28-29}.

Ακόμη βέβαια και με την υπόθεση πως τα προφίλ διανεμημένης παραγωγής και ζήτησης διατηρούνται σχετικά σταθερά κάθε μέρα του μήνα, προστίθεται και η περίπτωση όπου επιβάλλεται να υπάρχει, τουλάχιστον ένα συνεργείο διαθέσιμο, για λόγους ασφαλείας. Προκύπτει έτσι το διάγραμμα του **Σχήματος 6.3**, όπου αναλύονται τα οικονομικά μεγέθη των απωλειών και των συνεργείων.

Οι κόκκινες μπάρες αφορούν το ελάχιστο κόστος συνεργείου ασφαλείας (Ε.Κ.Σ.Α.), εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Τα αρχικά 'H/A' και 'A' χρησιμοποιούνται για την αναφορά στις περιπτώσεις όπου έχει γίνει μερική εγκατάσταση αυτόματων, τηλεχειριζόμενων διακοπών

(ημιαυτοματοποίηση) ή πλήρης (αυτοματοποίηση). Σε αυτό το διάγραμμα, περιγράφονται αναλυτικά τα κόστη της εφαρμογής κάθε περίπτωσης και οι επιμέρους προελεύσεις αυτών.

Στον κάτωθι πίνακα, υπολογίζονται τα ζεύγη αυτόματων, τηλεχειριζόμενων διακοπών, που εγκαθιστώνται σε κάθε περίπτωση και τα συνολικά κόστη τους. Ακόμη, υπολογίζεται ο χρόνος απόσβεσης που θα χρειαστεί για κάθε τέτοια επένδυση, αναλόγως ποια περίπτωση θεωρείται ότι εφαρμοζόταν προ αυτής. Και εδώ, με κόκκινο χρώμα, συμβολίζεται η επιπρόσθετη θεώρηση ελάχιστου κόστους συνεργείου ασφαλείας και συγκεκριμένα ο εναλλακτικός χρόνος απόσβεσης σε αυτό το σενάριο.

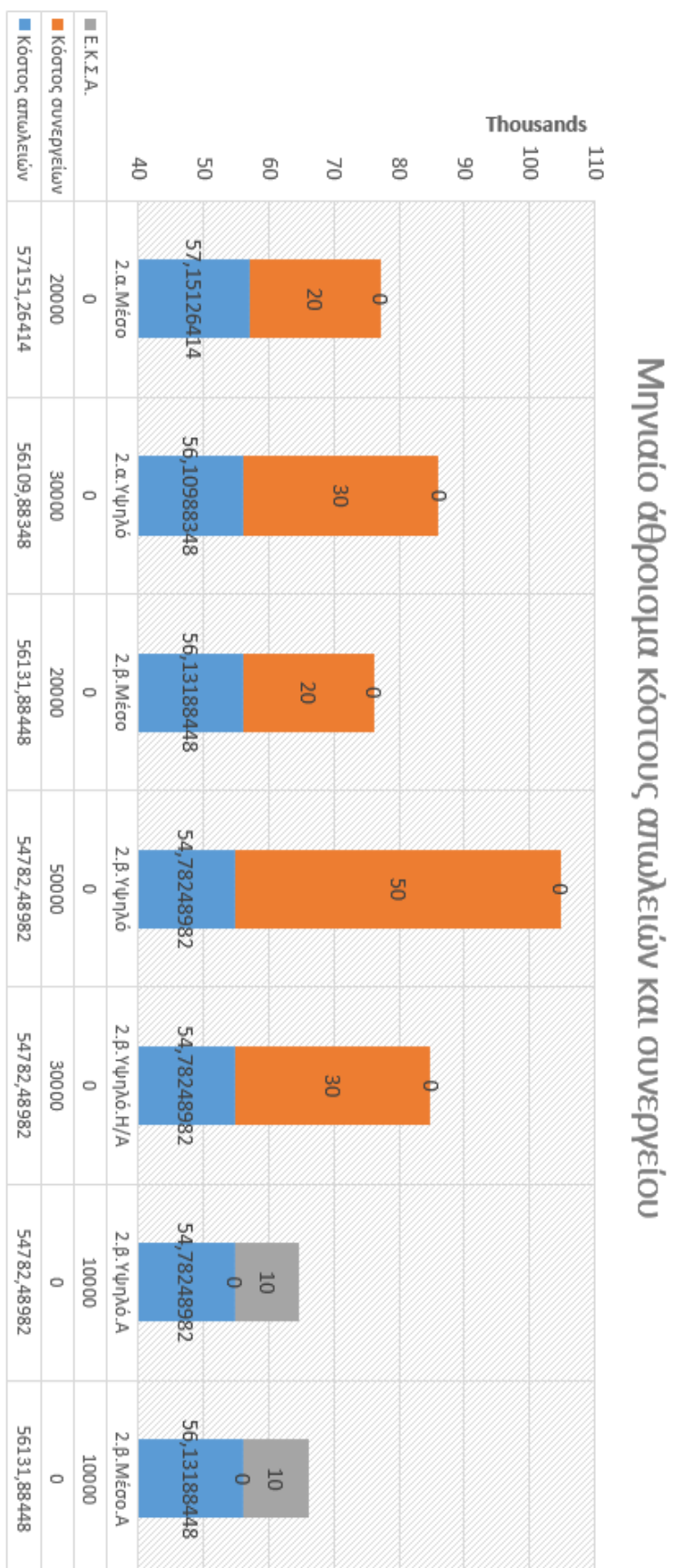
Στη τελευταία γραμμή της στήλης ‘2.β.Υ Μερικώς Αυτοματοποιημένη’, δεν εμφανίζεται νούμερο, καθώς όπως είναι διακριτό στο **Σχήμα 6.3**, η εφαρμογή της περίπτωσης 2.β.Μ οδηγεί σε υψηλότερα κόστη, από την εφαρμογή της 2.β.Υ.Η/Α.

Είναι προφανές ότι το ελάχιστο συνολικό κόστος, χωρίς εγκατάσταση αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών, εκ των περιπτώσεων που παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 44, είναι η περίπτωση 2.β.Μ. Με την εν λόγω εγκατάσταση, βέλτιστη κρίνεται η 2.β.Υ.Α. Παρόλα αυτά, η καταλληλότερη περίπτωση δεν είναι καθολική για κάθε εφαρμογή, διότι οι στόχοι του διαχειριστή δύναται να περιλαμβάνουν και άλλες συνιστώσες, όπως προαναφέρθηκε. Τέτοιες είναι συχνά: το επίπεδο εκπομπών καυσαερίων, το διαθέσιμο κεφάλαιο για επένδυση ή οι κανόνες ασφαλείας.

Αν και τα οικονομικά μεγέθη που έχουν επιλεγεί, βρίσκονται εντός λογικού εύρους, η απουσία ακρίβειας και το πλήθος παραδοχών, χαρακτηρίζουν τη μελέτη κόστους αναμφίβολα ως μια προσέγγιση.

Πίνακας 6.3: Μελέτη κόστους – Αυτοματοποίηση περιπτώσεων

	2.β.Μ Πλήρως Αυτοματοποιημένη	2.β.Υ Μερικώς Αυτοματοποιημένη	2.β.Υ Πλήρως Αυτοματοποιημένη
Ζεύγη αυτόματων διακοπών	4	2	8
Κόστος αυτόματων διακοπών (€)	80.000	40.000	160.000
Χρόνος απόσβεσης ως προς τη 2.β.Υ (Μήνες)	1.6 2	2	3.2 4
Χρόνος απόσβεσης ως προς τη 2.β.Μ (Μήνες)	4 8	-	7.5 14.1



Σχήμα 6.3: Μελέτη κόστους – Μηνιαίο ολικό κόστος περιπτώσεων

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

7.1 Ανακεφαλαίωση

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ημερήσια επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής (ΔΔ) ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχους:

- 1) την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του ΔΔ και
- 2) την ελαχιστοποίηση του πλήθους αλλαγών κατάστασης διακοπών.

Καθώς αυξάνεται η διείσδυση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) στα δίκτυα διανομής, δημιουργούνται προκλήσεις για τον διαχειριστή του δικτύου. Παράλληλα, δημιουργούνται ευκαιρίες για τη μεγιστοποίηση του κέρδους και για την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα οι ΜΔΠ αφορούν κυρίως αιολικές και φωτοβολταϊκές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες παρουσιάζουν συμπεριφορά μεταβλητή και εξαρτώμενη από την ηλιοφάνεια και τις καιρικές συνθήκες. Το δίκτυο διανομής καλείται, από παθητικό, να εξελιχθεί σε ενεργητικό, ώστε να αξιοποιήσει τον έλεγχο των ΜΔΠ και το εργαλείο της επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ, για την καλύτερη λειτουργία του ΔΔ. Συγκεκριμένα, ο διαχειριστής του ΔΔ προβαίνει σε ενέργειες που αφορούν την ημερήσια επαναδιαμόρφωση του ΔΔ, γεγονός που προσδίδει ευελιξία και αυξημένη αποδοτικότητα σε αυτό. Το κόστος αλλαγής κατάστασης διακοπών αποδεικνύεται πολυεπίπεδο και η ελαχιστοποίησή του παρουσιάζει προκλήσεις αλλά και σημαντικά οφέλη. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε, παρουσιάστηκαν περιληπτικά διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι, τόσο στοχαστικές όσο και μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγεται μαθηματική μέθοδος βελτιστοποίησης για την επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος στα πλαίσια της βέλτιστης ημερήσιας επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με μικρό σχετικά υπολογιστικό κόστος. Για την αποτελεσματική επίλυση, η μέθοδος βασίζεται σε μοντέλο βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς. Σε πρώτο επίπεδο, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται ως εργαλείο για τον ημερήσιο προγραμματισμό λειτουργίας του δικτύου διανομής. Καθορίζει τη βέλτιστη διάταξή του βάσει του προβλεπόμενου φορτίου και της προβλεπόμενης παραγωγής από αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι όσο το κόστος αλλαγής της κατάστασης των διακοπών μεγαλώνει σε σχέση με το κόστος των απωλειών, τόσο αυξάνουν οι απώλειες ενεργού ισχύος της βέλτιστης τοπολογίας. Αυτό όμως δεν συμβαίνει αναλογικά. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι οι πιο καίριες αλλαγές γραμμών που θα πραγματοποιηθούν στην νέα τοπολογία επηρεάζουν δραστηκότερα τις απώλειες ισχύος. Όσο το κόστος της αλλαγής της κατάστασης των διακοπών μικραίνει, τόσο αυξάνεται ο αριθμός των αλλαγών αυτών. Όμως, η επίδραση στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος είναι σχετικά μικρότερη. Επίσης, αποδεικνύεται πως η βέλτιστη τοπολογία που εξάγεται έχει λιγότερες απώλειες, όταν δίνεται στο μοντέλο η δυνατότητα να πραγματοποιήσει αλλαγές γραμμών μέσα στη διάρκεια της ημέρας.

Σε δεύτερο επίπεδο, προτείνεται μια οικονομική ανάλυση για την εκ νέου ελαχιστοποίηση του κόστους αλλαγής διακοπών. Για τη καλύτερη επίτευξη του στόχου αυτού, προτείνεται επιπρόσθετα η εγκατάσταση αυτόματων τηλεχειριζόμενων διακοπών.

7.2 Συμβολή της Διπλωματικής Εργασίας

Αναγνωρίζονται τρία επίπεδα συμβολής της διπλωματικής εργασίας, σε ερευνητικό επίπεδο:

- Εξελίσσεται το μοντέλο βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς και πραγματοποιούνται ευρέσεις βέλτιστων τοπολογιών για το πρότυπο δίκτυο 33 κόμβων του IEEE, ανάλογα με το επίπεδο σχετικού κόστους αλλαγής κατάστασης διακοπών.
- Η ημερήσια επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής προτείνεται ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο ελαχιστοποίησης των απωλειών ισχύος και επίτευξης καλύτερων λειτουργικών χαρακτηριστικών. Οι διαφορετικές περιπτώσεις και υποπεριπτώσεις που παρουσιάζονται προσδίδουν στον διαχειριστή του δικτύου διανομής σχετικά μεγάλη προσαρμοστικότητα στους στόχους που θέτει.
- Η μελέτη κόστους, σχετικά με τις απώλειες ισχύος και το κόστος αλλαγής διακοπών, αναδεικνύει το πλήθος των διαστάσεων του προβλήματος και παρουσιάζει αποδοτικές λύσεις. Η εγκατάσταση αυτόματων, τηλεχειριζόμενων διακοπών, κρίνεται ως αποτελεσματική επένδυση για τη μείωση του κόστους λειτουργίας του δικτύου διανομής.

7.3 Επεκτάσεις

Οι επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω τρεις ενότητες:

- **Μοντελοποίηση κόστους αλλαγών κατάστασης αυτόματων διακοπών.** Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το κόστος χειροκίνητων διακοπών, το οποίο εξετάζεται ως εξαρτώμενο από τις αμοιβές του ανθρώπινου δυναμικού που τις εκτελεί. Καθώς η ημερήσια επαναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής απαιτεί πλήθος αλλαγών της κατάστασης των διακοπών, σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, ο χρόνος ζωής των διακοπών επηρεάζεται αρνητικά. Η μοντελοποίηση του κόστους αυτού, εκτιμάται ότι θα δώσει νέα διάσταση στον τομέα της επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής.
- **Εισαγωγή δεικτών αξιοπιστίας.** Ο αυξημένος αριθμός αλλαγών κατάστασης διακοπών προκαλεί αναμφίβολα μεταβατικά φαινόμενα, τα οποία αγνοούνται στη παρούσα διπλωματική εργασία. Επομένως, κρίνεται χρήσιμη η ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς του ΔΔ στη διαδικασία επαναδιαμόρφωσης, σε ημερήσια βάση, σε συνδυασμό με τη μελέτη σφαλμάτων.

- **Μοντελοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ζήτησης.** Υπό το πρίσμα της ημερήσιας επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής, κρίνεται χρήσιμη η μοντελοποίηση των χρησιμοποιούμενων ΑΠΕ, για μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτό επεκτείνεται ως και την είσοδο μεταβλητών, που σχετίζονται άμεσα με καιρικά δεδομένα και βραχυχρόνιες ή μακροχρόνιες προβλέψεις. Το ίδιο δύναται να εφαρμοστεί και στον τομέα της ζήτησης, τόσο για εξαρτώμενες από τον καιρό και την εποχή μεταβλητές, όσο και για ιδιαίτερα φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν αυτή και είναι δυνατόν, σε ένα βαθμό, να προβλεφθούν.

Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

- [1] A. Ehsan and Q. Yang, “Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques,” *Applied Energy*, vol. 210, pp. 44–59, 2018.
- [2] M. Raoofat, “Simultaneous allocation of DGs and remote controllable switches in distribution networks considering multilevel load model,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, pp. 1429–1436, 2011.
- [3] Β. Παπαδιάς, *Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας*, Αθήνα: Συμμετρία, 1985
- [4] E. Benedict, T. Collins, D. Gotham, S. Hoffman, D. Karipides, and E. Benedict, “LOSSES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS,” *Purdue Univ. Purdue e-Pubs ECE Tech. Reports Electr. Comput. Eng.*, pp. 12–13, Accessed: Dec. 09, 2021. [Online]. Available: <http://docs.lib.purdue.edu/ecetr/266>.
- [5] Β. ΠΑΠΑΔΙΑΣ, *Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας*, Αθήνα: Τυπογραφική Μονάδα Ε.Μ.Π., 1985
- [6] M. R. Narimani, A. A. Vahed, R. Azizipanah-Abarghooee, and M. Javidsharifi, “Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost,” *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 1, pp. 55–69, Jan. 2014.
- [7] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989, doi: 10.1109/61.25627.
- [8] A. Zidan and E. F. El-Saadany, “Distribution system reconfiguration for energy loss reduction considering the variability of load and local renewable generation,” *Energy*, vol. 59, pp. 698–707, Sep. 2013.
- [9] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, “Optimal distribution network reconfiguration with penetration of distributed energy resources,” *2014 1st Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. Green Technol. Its Appl. a Better Futur. ICITACEE 2014 - Proc.*, pp. 388–393, Mar. 2015, doi: 10.1109/ICITACEE.2014.7065777.
- [10] M. Zare, R. Azizipanah-Abarghooee, R. A. Hooshmand, and M. Malekpour, “Optimal reconfiguration of distribution systems by considering switch and wind turbine placements to enhance reliability and efficiency,” *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 6, pp. 1271–1284, Mar. 2018.
- [11] T. Thanh *et al.*, “multi-objective electric distribution network reconfiguration solution using runner-root algorithm,” *Applied Soft Computing*, vol. 52, pp. 93–108, Mar. 2017.
- [12] A. Jafari, H. Ganjeh Ganjehlou, F. Baghal Darbandi, B. Mohammdi-Ivatloo, and M. Abapour, “Dynamic and multi-objective reconfiguration of distribution network using a novel

hybrid algorithm with parallel processing capability,” *Applied Soft Computing*, vol. 90, p. 106146, May 2020.

[13] Q. Qi and J. Wu, “Increasing Distributed Generation Penetration using Network Reconfiguration and Soft Open Points Selection and/or peer-review under responsibility of ICAE,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2169–2174, 2017

[14] A. Botea, J. Rintanen, and D. Banerjee, “Optimal reconfiguration for supply restoration with informed A* Search,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 583–593, 2012.

[15] T. Ding, Y. Lin, Z. Bie, and C. Chen, “A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration,” *Applied Energy*, vol. 199, pp. 205–216, 2017.

[16] M. Hossein Amrollahi and S. Mohammad Taghi Bathaee, “Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response,” *Applied Energy*, vol. 202, pp. 66–77, 2017.

[17] F. Capitanescu, L. F. Ochoa, H. Margossian, and N. D. Hatziargyriou, “Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 346–356, 2015.

[18] P. M. De Quevedo, J. Contreras, A. Mazza, G. Chicco, and R. Porumb, “Reliability Assessment of Microgrids with Local and Mobile Generation, Time-Dependent Profiles, and Intraday Reconfiguration,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 61–72, Jan. 2018.

[19] R. Chhetri, K. R. Puri, A. B. Subba, and K. Pelden, “Reliability Assessment of Distribution System through Cost Analysis,” *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, vol. 3, no. 4, pp. 560–565, July-Aug. 2020.

[20] P. A. Karafotis and P. S. Georgilakis, “Reliability improvement and loss minimization by optimal distribution network reconfiguration,” in *6th IEEE International Energy Conference, ENERGYCon 2020*, Sep. 2020, pp. 23–28, doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236545.

[21] Π. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2013>, 2015

[22] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας*, Αθήνα: Συμμετρία, 2010

[23] A. Shapovalov, C. Spieker, C. Rehtanz, and T. Engelmeyer, “Forecast-based network reconfiguration algorithm,” in *Proceedings - 2014 Power Systems Computation Conference, PSCC 2014*, Feb. 2014, doi: 10.1109/PSCC.2014.7038419.

Κεφάλαιο 9: Παράρτημα

Στο παράρτημα παρουσιάζονται τα δεδομένα του δικτύου διανομής του IEEE των 33 κόμβων.

Τιμές Υποσταθμού					
Κόμβος Ταλάντωσης	Ονομαστική Τάση (α.μ.)	Βάση ισχύος (MVA)	Βάση Τάσης	Ελάχιστη Τάση (α.μ.)	Μέγιστη Τάση (α.μ.)
1	1.00	10	12.66	0.95	1.05

Τιμές Κόμβων					
Κόμβος	Τύπος*	Ελάχιστη Τάση (α.μ.)	Μέγιστη Τάση (α.μ.)	Ενεργός Ζήτηση (MW)	Άεργος Ζήτηση (MVAR)
1	3	0.95	1.05	0.0000	0.0000
2	1	0.95	1.05	0.1000	0.0600
3	1	0.95	1.05	0.0900	0.0400
4	1	0.95	1.05	0.1200	0.0800
5	1	0.95	1.05	0.0600	0.0300
6	1	0.95	1.05	0.0600	0.0200
7	1	0.95	1.05	0.2000	0.1000
8	1	0.95	1.05	0.2000	0.1000
9	1	0.95	1.05	0.0600	0.0200
10	1	0.95	1.05	0.0600	0.0200
11	1	0.95	1.05	0.0450	0.0300
12	1	0.95	1.05	0.0600	0.0350
13	1	0.95	1.05	0.0600	0.0350
14	1	0.95	1.05	0.1200	0.0800
15	1	0.95	1.05	0.0600	0.0100
16	1	0.95	1.05	0.0600	0.0200
17	1	0.95	1.05	0.0600	0.0200
18	1	0.95	1.05	0.0900	0.0400
19	1	0.95	1.05	0.0900	0.0400
20	1	0.95	1.05	0.0900	0.0400
21	1	0.95	1.05	0.0900	0.0400
22	1	0.95	1.05	0.0900	0.0400
23	1	0.95	1.05	0.0900	0.0500
24	1	0.95	1.05	0.4200	0.2000
25	1	0.95	1.05	0.4200	0.2000
26	1	0.95	1.05	0.0600	0.0250
27	1	0.95	1.05	0.0600	0.0250
28	1	0.95	1.05	0.0600	0.0200
29	1	0.95	1.05	0.1200	0.0700
30	1	0.95	1.05	0.2000	0.6000
31	1	0.95	1.05	0.1500	0.0700

Τιμές Κόμβων					
Κόμβος	Τύπος*	Ελάχιστη Τάση (α.μ.)	Μέγιστη Τάση (α.μ.)	Ενεργός Ζήτηση (MW)	Άεργος Ζήτηση (MVAR)
32	1	0.95	1.05	0.2100	0.1000
33	1	0.95	1.05	0.0600	0.0400

*Με 3 συμβολίζεται ο κόμβος έγχυσης από υποσταθμό και με 1 οι λοιποί κόμβοι.

Τιμές Γραμμών Μεταφοράς					
Κόμβος Αναχώρησης	Κόμβος Αφίξης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Όριο ισχύος (MVA)	Διακόπτες*
1	2	0.0057526	0.0029324	10	0
2	3	0.0307595	0.0156668	10	1
3	4	0.0228357	0.0116300	10	1
4	5	0.0237778	0.0121104	10	0
5	6	0.0510995	0.0441115	10	0
6	7	0.0116799	0.0386085	10	1
7	8	0.0443860	0.0146685	10	1
8	9	0.0642643	0.0461705	10	1
9	10	0.0651378	0.0461705	10	1
10	11	0.0122664	0.0040555	10	0
11	12	0.0233598	0.0077242	10	1
12	13	0.0915922	0.0720634	10	1
13	14	0.0337918	0.0444796	10	0
14	15	0.0368740	0.0328185	10	1
15	16	0.0465635	0.0340039	10	1
16	17	0.0804240	0.1073775	10	0
17	18	0.0456713	0.0358133	10	0
2	19	0.0102324	0.0097644	10	1
19	20	0.0938508	0.0845668	10	1
20	21	0.0255497	0.0298486	10	1
21	22	0.0442301	0.0584805	10	1
3	23	0.0281515	0.0192356	10	1
23	24	0.0560285	0.0442425	10	0
24	25	0.0559037	0.0437434	10	0
6	26	0.0126657	0.0064514	10	1
26	27	0.0177320	0.0090282	10	0
27	28	0.0660737	0.0582559	10	0
28	29	0.0501761	0.0437122	10	1
29	30	0.0316642	0.0161285	10	1
30	31	0.0607953	0.0600840	10	0
31	32	0.0193729	0.0225799	10	0
32	33	0.0212759	0.0330805	10	0
8	21	0.1247851	0.1247851	10	1
9	15	0.1247851	0.1247851	10	1

Τιμές Γραμμών Μεταφοράς					
Κόμβος Αναχώρησης	Κόμβος Αφίξης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Όριο ισχύος (MVA)	Διακόπτες*
12	22	0.1247851	0.1247851	10	1
18	33	0.0311963	0.0311963	10	1
25	29	0.0311963	0.0311963	10	1

*Με 1 συμβολίζονται οι γραμμές που διαθέτουν διακόπτες και με 0 οι λοιπές γραμμές.

Τιμές Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ)		
Κόμβος	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Τύπος ΜΔΠ(Ηλιακή=1, Αιολική=2)
5	0.5	1
12	0.5	1
18	0.5	2
23	0.5	2

Προφίλ Ζήτησης και Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ)				
Φορτίο	Φωτοβολταϊκή ΜΔΠ Κόμβου 5	Φωτοβολταϊκή ΜΔΠ Κόμβου 12	Αιολική ΜΔΠ Κόμβου 18	Αιολική ΜΔΠ Κόμβου 23
0.608152	0	0	0.2	0.7
0.586141	0	0	0.45	0.5
0.613315	0	0	0.3	0.7
0.679348	0.1	0	0.5	0.2
0.818207	0.3	0.1	0.1	0.6
0.917663	0.6	0.3	0.65	0.5
0.878261	0.5	0.7	0.72	0.4
0.884239	0.4	0.8	0.78	0.2
0.944293	0.2	0.5	0.75	0.3
0.918207	0	0.3	0.7	0.4
0.780707	0	0.1	0.4	0.5
0.638315	0	0	0.84	0.4

