



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εφαρμογές της Βέλτιστης Ροής Ισχύος σε Δίκτυα  
Διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Γεωργίου

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2020





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

## Εφαρμογές της Βέλτιστης Ροής Ισχύος σε Δίκτυα Διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Γεωργίου

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23<sup>η</sup> Ιουλίου 2020

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

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

.....  
Γεωργιλάκης  
Πάυλος  
Αναπλ. Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

.....

Θωμάς Γεωργίου

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

Copyright © Θωμάς Γεωργίου, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη και η μετάβαση των παθητικών δικτύων διανομής σε ενεργά δίκτυα διανομής, λόγω της αυξημένης ανάγκης για διείσδυση διανεμημένης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), επιφέρει αρκετές αλλαγές στο παραδοσιακό τρόπο λειτουργίας τους και έτσι προκύπτουν αρκετές προκλήσεις για έρευνα των διαφόρων καινούριων χαρακτηριστικών τους, που αφορούν τη σωστή λειτουργία τους.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διατύπωση κατάλληλων μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος, τα οποία να μπορούν να εφαρμόζονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης της λειτουργίας των ενεργών δικτύων διανομής, καθώς η βέλτιστη ροή ισχύος αποτελεί ένα από τα πιο βασικά εργαλεία για τη μελέτη και αξιοποίηση, όχι μόνο των συστημάτων μεταφοράς, αλλά και των δικτύων διανομής.

Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται δύο μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος, προερχόμενα από τις εξισώσεις DistFlow, των οποίων οι μη γραμμικοί περιορισμοί χαλαρώνονται με τη βοήθεια κωνικού προγραμματισμού δεύτερης τάξης (Second-Order Conic Programming – SOCP) και εξετάζονται εάν λειτουργούν σωστά με βάση το αρχικό πλήρες μη γραμμικό μοντέλο τους, σε δίκτυα διανομής με διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής. Αφού γίνει αυτό εφαρμόζονται σε προβλήματα ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος των ενεργών δικτύων διανομής, ώστε να διαπιστώσουμε κατά πόσο λειτουργούν σωστά και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω προβλήματα βελτιστοποίησης της λειτουργίας των δικτύων αυτών.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, διανεμημένη παραγωγή, ενεργά δίκτυα διανομής, ευελιξία, βέλτιστη ροή ισχύος, προβλήματα βελτιστοποίησης, κυρτός προγραμματισμός δεύτερης τάξης, κυρτή χαλάρωση, ακρίβεια, αυξημένο πρόβλημα, έλεγχος ενεργού ισχύος, έλεγχος αέργου ισχύος



## **ABSTRACT**

The development and the transition of passive distribution networks to active distribution networks, due to the increasing need for penetration of distributed generation coming from renewable energy sources (RES), brings several changes into their traditional mode of operation and therefore a lot of challenges arise for the research of their several new characteristics, regarding their proper operation.

This diploma thesis focuses on the formulation of appropriate optimal power flow (OPF) models, which could be implemented in optimization problems, regarding the operation of active distribution networks, as the optimal power flow constitutes one of the most vital tools for the study and the utilization, not only the transmission systems, but also the distribution networks.

More specifically, two optimal power flow models are presented, which derive from the DistFlow equations, whose non-linear constraints are relaxed using second-order conic programming (SOCP) and their proper operation based on their original full non-linear model is being tested, applying them in distribution networks with distributed generation units. Once this is done, they are implemented in active and reactive control problems of active distribution network, in order to determine if they are work properly and can be used in further optimization problems, regarding the operation of these networks.

## **KEYWORDS**

Power distribution networks, distributed generation, active distribution networks, flexibility, optimal power flow, optimization problems, second-order cone programming, convex relaxation, exactness, augmented problem, active power control, reactive power control





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Σαββόπουλο, για την άψογη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του σε όλα τα καθοριστικά σημεία της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους μου και γενικά όλους όσους βρέθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



# Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	9
Πίνακας περιεχομένων.....	11
1 Εισαγωγή.....	13
1.1 Γενικά.....	13
1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	14
2 Ενεργά Δίκτυα Διανομής και Ευελιξία.....	15
2.1 Εισαγωγή.....	15
2.2 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	16
2.2.1 Κατηγορίες Δικτύων Διανομής.....	16
2.2.2 Στοιχεία και εξοπλισμός δικτύων διανομής.....	16
2.2.3 Διατάξεις Δικτύων Διανομής.....	17
2.2.4 Λειτουργία Δικτύων Διανομής.....	18
2.2.5 Τεχνικά Προβλήματα Δικτύων Διανομής λόγω Υψηλής Διείσδυσης Διεσπαρμένων Μονάδων Παραγωγής.....	18
2.3 Ενεργά Δίκτυα Διανομής.....	20
2.3.1 Ορισμός Ενεργών Δικτύων Διανομής.....	20
2.3.2 Βέλτιστη Λειτουργία Ενεργών Δικτύων Διανομής.....	21
2.4 Ευελιξία στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	22
3 Βέλτιστη Ροή Ισχύος.....	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Οικονομική Κατανομή Φορτίου.....	26
3.3 Βέλτιστη AC Ροή Ισχύος.....	26
3.4 Βέλτιστη DC Ροή Ισχύος.....	28
3.5 Μοντέλο Ροών Ισχύος Κλάδου.....	29
3.5.1 Βέλτιστη Ροή Ισχύος Μοντέλου DistFlow.....	31
3.5.2 Βέλτιστη Ροή Ισχύος Μοντέλου LinDistFlow.....	31
4 Βέλτιστη Ροή Ισχύος με χαλάρωση SOCP.....	33
4.1 Εισαγωγή.....	33
4.2 Κυρτή Χαλάρωση και Ακρίβεια Χαλάρωσης.....	33
4.3 Χαλαρώσεις Κωνικού Προγραμματισμού Δεύτερης Τάξης.....	34
4.3.1 Προβλήματα Κωνικού Προγραμματισμού Δεύτερης Τάξης.....	34
4.3.2 Διατύπωση Γενικευμένου Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος SOCP.....	35
4.3.3 Ακρίβεια Χαλάρωσης Γενικευμένου Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος SOCP.....	35
4.4 Σύγκριση Μεθόδων Βέλτιστης Ροής Ισχύος.....	36
4.4.1 Διατύπωση Προβλημάτων Βέλτιστης Ροής Ισχύος.....	36
4.4.2 Διαδικασία.....	38
4.4.3 Αποτελέσματα.....	40
4.5 Διαφορά Αυξημένου και Μη Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος.....	42
4.5.1 Διαδικασία.....	42
4.5.2 Αποτελέσματα.....	43
5 Εφαρμογή.....	47
5.1 Ανακεφαλαίωση.....	47

5.2 Έλεγχος Ενεργού Ισχύος.....	47
5.2.1 Διαδικασία .....	47
5.2.2 Αποτελέσματα.....	49
5.2.3 Παρατηρήσεις .....	51
5.3 Έλεγχος Αέργου Ισχύος.....	52
5.3.1 Διαδικασία .....	52
5.3.2 Αποτελέσματα.....	53
5.3.3 Παρατηρήσεις .....	55
6 Συμπεράσματα.....	57
6.1 Σύνοψη.....	57
6.2 Συμπεράσματα .....	57
6.3 Επέκταση Εργασίας .....	58
Παράρτημα Α.....	59
Παράρτημα Β.....	60
Παράρτημα Γ .....	64
Βιβλιογραφία .....	65

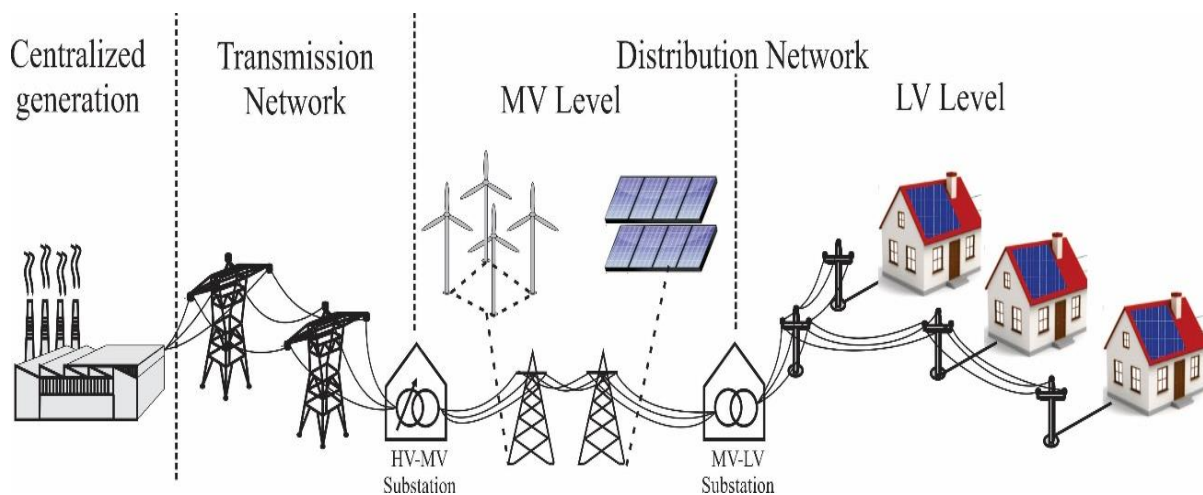
# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Βρισκόμαστε σε μια εποχή όπου η ενσωμάτωση μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ολοένα και αυξάνεται, λόγω της φιλικής τους φύσης προς το περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα οι αυξημένοι ρυθμοί ζωής σε ένα τεχνολογικά ανεπτυγμένο κόσμο συμβάλλουν στην αύξηση του φορτίου και μετατρέπουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Όλα αυτά επηρεάζουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στο επίπεδο λειτουργίας, προγραμματισμού και ανάπτυξης και κυρίως τα δίκτυα διανομής, τα οποία είχαν σχεδιαστεί πριν δεκαετίες με πιο απλό και παθητικό ρόλο, που αποσκοπούσε στην παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους διάφορους καταναλωτές μέσης τάσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ). Έτσι, αφού η σύνδεση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής δεν είχε προβλεφθεί, ούτε ληφθεί υπόψη στον τότε σχεδιασμό τους, στόχος είναι η αναβάθμιση των ήδη υπάρχοντων υποδομών με την εγκατάσταση προηγμένων υποδομών τεχνολογία πληροφορικής και επικοινωνιών, ώστε ο ρόλος των δικτύων διανομής να γίνει πιο ενεργός και να μπορούν να επιτευχθούν οι προκλήσεις για υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα, χωρίς πολλά προβλήματα. Πλέον, η φύση αυτή των δικτύων διανομής γίνεται παρόμοια με τα συστήματα μεταφοράς, οπότε δεν αντιμετωπίζονται απλά σαν ένας κόμβος, αλλά σαν ένα σύστημα το οποίο εσωτερικά μπορεί να κάνει χειρισμούς, να εποπτεύει και να ελέγχει, συντονισμένα και σε πραγματικό χρόνο τον εξοπλισμό του, αλλά και τη παραγωγή από διανεμημένες μονάδες παραγωγής, με στόχο τη βέλτιστη οικονομικά και τεχνικά λειτουργία του, υπό τις προϋποθέσεις που επιβάλλει η σύγχρονη εποχή, τη μεγαλύτερη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ και την αυξημένη ζήτηση φορτίου.

Ο προγραμματισμός της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, των συστημάτων μεταφοράς και των δικτύων διανομής, γίνεται με βάση την εκάστοτε κατάσταση του συστήματος, την διαθεσιμότητα των στοιχείων και του εξοπλισμού του, με στόχο την ομαλή ικανοποίηση της ζήτησης φορτίου, υπό κάποιους λειτουργικούς περιορισμούς, βελτιστοποιώντας είτε την μείωση του ωριαίου κόστους παραγωγής των γεννητριών, είτε την μείωση των συνολικών απωλειών ισχύος είτε ακόμα τη διακύμανση του μέτρου τάσης στους κόμβους. Η υψηλή διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής, ενισχύει τους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου, τόσο στην κανονική, όσο και στην έκτακτη κατάσταση λειτουργίας, αφού εισάγει νέα τεχνικά προβλήματα, όπως την ανύψωση τάσης στους κόμβους του δικτύου, την αμφίδρομη ροή ισχύος στις γραμμές του δικτύου και η συμφόρηση των γραμμών του δικτύου.

Η αναγκαία αυτή σταδιακή εξέλιξη των δικτύων διανομής, καθιστά πολύ μεγάλο το ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων, οι οποίοι να συμβάλλουν στην εύρεση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας, ανάπτυξης και σχεδιασμού των δικτύων, τόσο σε κανονική, όσο και σε έκτακτη κατάσταση, αξιοποιώντας όλες τις δυνατότητες που παρέχει ένα ενεργό δίκτυο διανομής, υπό τους αντίστοιχους περιορισμούς τους. Πολύ σημαντικό εργαλείο στη προσπάθεια αυτή αποτελεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος, με το οποίο μοντελοποιούμε τα πιο πάνω προβλήματα. Βέβαια, το πρόβλημα αυτό όσο πιο ακριβές θέλουμε να είναι τα αποτελέσματα, τόσο πιο περίπλοκο γίνεται, αφού εισάγει μη γραμμικούς περιορισμούς και τα προσεγγιστικά του μοντέλα, δεν αντικατοπτρίζουν σε όλες τις περιπτώσεις τη γενική λύση, όπως γίνεται στη περίπτωση των δικτύων διανομής. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί χαλαρωμένα μοντέλα, τα οποία απαλείφουν τη μη γραμμικότητα του προβλήματος, κάνοντας πιο εύκολη την εύρεση της λύσης και ταυτόχρονα η λύση αυτή είναι η γενική που απαιτείται.



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την ενσωμάτωση διανεμημένων μονάδων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. [17]

## 1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστούν πληροφορίες σχετικά με τα υπάρχοντα δίκτυα διανομής, έπειτα για τα σύγχρονα δίκτυα διανομής και πιο συγκεκριμένα τα ενεργά δίκτυα διανομής και την ευελιξία. Θα αναφερθούν δηλαδή λόγοι για τους οποίους τα αντικείμενα αυτά είναι σημαντικά και γιατί κατέχουν καίρια θέση στην ανάπτυξη, το σχεδιασμό και τη λειτουργία των σύγχρονων δικτύων διανομής.

Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 3, γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους βέλτιστης ροής ισχύος και των απλοποιημένων προσεγγίσεων τους, που χρησιμοποιούνται για της μελέτη της βέλτιστης λειτουργίας και του προγραμματισμού των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται αναφορά στην οικονομική κατανομή φορτίου, έπειτα παρουσιάζονται η AC ροή ισχύος και η γραμμικοποιημένη της εκδοχή, η DC ροή ισχύος, του μοντέλου έγχυσης ζυγού, που βρίσκει κυρίως εφαρμογή στα συστήματα μεταφοράς και τέλος η μη γραμμική και γραμμική μέθοδος βέλτιστης ροής ισχύος του μοντέλου ροής ισχύος κλάδου, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως στα ακτινικά δίκτυα και παίζει σημαντικό ρόλο για την εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών των δικτύων αυτών.

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η έννοια του κυρτού προγραμματισμού δεύτερης τάξης, αφού πρώτα γίνει εισαγωγή των εννοιών της χαλάρωσης των μη κυρτών προβλημάτων, καθώς και η ακρίβεια αυτής. Στη συνέχεια, γίνεται διατύπωση των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος και έπειτα εξετάζονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών, ώστε να γίνει αποτίμηση του χαλαρωμένου μοντέλου κυρτού προγραμματισμού δευτέρας τάξης και του αυξημένου του, όπως και οι διαφορές μεταξύ τους σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις δικτύων διανομής.

Στο κεφάλαιο 5, γίνεται εφαρμογή των χαλαρωμένων μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος που διατυπώνονται, τόσο σε προβλήματα ελέγχου ενεργού ισχύος, όσο και σε προβλήματα ελέγχου αέργου ισχύος των δικτύων διανομής, ώστε να διαπιστώσουμε εάν τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα και λειτουργούν όπως θα περιμέναμε.

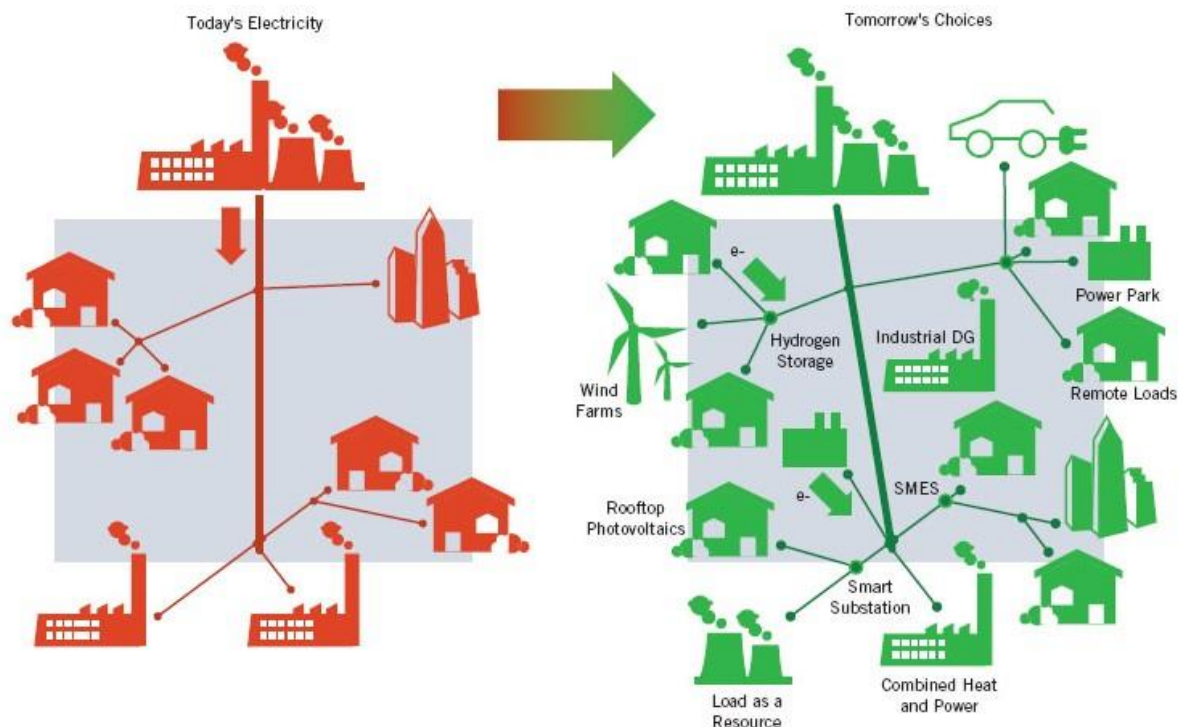
Τέλος, στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα που αναδεικνύονται από την εργασία αυτή και συγκεκριμένα τα υπολογιστικά κομμάτια των κεφαλαίων 4 και 5, καθώς και κάποια ενδιαφέροντα πεδία στα οποία μπορεί να επεκταθεί η εργασία αυτή.

## 2 Ενεργά Δίκτυα Διανομής και Ευελιξία

### 2.1 Εισαγωγή

Γενικά, όπως έχει αναφερθεί και πριν, τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποσκοπούν στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης (MT) και χαμηλής τάσης (XT) στους καταναλωτές. Τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής, των οποίων τις υποδομές συναντάμε μέχρι και σήμερα, χαρακτηρίζονται ως παθητικά δίκτυα, αφού λόγω της μεγάλης απουσίας διεσπαρμένης παραγωγής, η ροή ισχύος έχει κατεύθυνση μόνο προς τους καταναλωτές, κάτι το οποίο καθιστά πολύ πιο απλή τη λειτουργία και το σχεδιασμό τους. Η συνεχώς αυξανόμενη εγκατάσταση μονάδων διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ, απαιτεί σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία και τη δομή των δικτύων διανομής, καθώς πλέον ανά πάσα στιγμή, λόγω και της στοχαστικής τους φύσης, η ροή ισχύος μπορεί να αλλάζει φορά.

Η διείσδυση των μονάδων αυτών, οι οποίες βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προσφέρει πολύ σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς οδηγούμαστε σε όλο και πιο ανεξαρτοποιημένα από ορυκτά καύσιμα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στα πλαίσια μιας εναρμονισμένης και συλλογικής προσπάθειας για τη μείωση των ρύπων και τη δημιουργία πιο βιώσιμων συνθηκών ζωής σε όλο το πλανήτη. Για αυτό η εξέλιξη των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, από παθητικά συστήματα σε ενεργά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, είναι επιτακτική, ώστε να παρέχει πρόσφορο έδαφος για την ενσωμάτωση των διανεμημένων μονάδων παραγωγής. Παρόλα αυτά, η αυξημένη αυτή διείσδυση, επιφέρει και αρνητικές επιπτώσεις στην λειτουργία του δικτύου, την αγορά ενέργειας και το ρυθμιστικό πλαίσιο, αφού πλέον απαιτείται καλύτερος έλεγχος, μεγαλύτερη ευελιξία και περισσότερη εφεδρεία.



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη δικτύων διανομής από παθητικά σε ενεργά. [18]

Τα ενεργά δίκτυα διανομής που υιοθετούνται, έχουν πλέον παρόμοια λειτουργία με αυτή των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αφού έχουν τη δυνατότητα συντονισμένου

ελέγχου του εξοπλισμού του δικτύου, της παραγωγής των μονάδων διανεμημένης παραγωγής, των φορτίων που μπορούν να μεταβληθούν, με απώτερο σκοπό την βέλτιστη τεχνικά και οικονομικά λειτουργία του δικτύου σε συνδυασμό με τη ταυτόχρονη, όσο το δυνατό, μεγαλύτερη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, θα αναφερθούμε αρχικά για τα γενικά στοιχεία που καταρτίζουν τα δίκτυα διανομής, καθώς και τις πιο συνηθισμένες διατάξεις τους. Έπειτα, θα παρουσιαστούν τα ενεργά δίκτυα διανομής και οι προϋποθέσεις που χρειάζονται για να γίνουν πραγματικότητα και τέλος δίνεται ο ορισμός της ευελιξίας των ενεργών δικτύων διανομής και αναφέρεται η σημαντικότητά της.

## **2.2 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας**

### **2.2.1 Κατηγορίες Δικτύων Διανομής**

Καταρχήν, τα δίκτυα διανομής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το που τοποθετούνται οι γραμμές τους σε σχέση με το έδαφος, στα εναέρια δίκτυα διανομής και στα υπόγεια δίκτυα διανομής. Τα εναέρια δίκτυα διανομής, προφανώς διακρίνονται από τις εναέρια τοποθετημένες γραμμές τους, προσαρτημένες στην κορυφή στύλων, οι οποίες φέρουν γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια. Αντίθετα, τα υπόγεια δίκτυα διανομής, χαρακτηρίζονται από γραμμές τοποθετημένες κάτω από την επιφάνεια της γης, των οποίων οι αγωγοί είναι θωρακισμένοι με συνθετική μόνωση. Πιο μικρό κόστος κατασκευής από τις δύο κατηγορίες, έχουν τα εναέρια δίκτυα διανομής, τα οποία συναντώνται σε περιοχές με μικρή πυκνότητα φορτίου, όπως σε χωριά και αγροτικές περιοχές, ενώ τα υπόγεια δίκτυα διανομής, προτιμώνται σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, όπου ο διαθέσιμος χώρος εγκατάστασης είναι πιο μικρός, όπως σε μεγαλουπόλεις και αστικές περιοχές.

### **2.2.2 Στοιχεία και εξοπλισμός δικτύων διανομής**

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται από κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που αφορούν τα στοιχεία τους και τον εξοπλισμό τους. Στη κατηγορία των στοιχείων βρίσκονται οι υποσταθμοί (Υ/Σ) υψηλής τάσης (ΥΤ)/μέσης τάσης (ΜΤ) και μέσης τάσης (ΜΤ)/χαμηλής τάσης(ΧΤ), οι οποίοι αποτελούν από τα πιο βασικά μέρη των δικτύων διανομής, ενώ κύριο τους στοιχείο είναι ο μετασχηματιστής (Μ/Σ) για τον υποβιβασμό ή ανύψωση τάσης από ένα επίπεδο σε άλλο. Οι Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ υποβιβάζουν την ΥΤ σε ΜΤ, οι Μ/Σ τους έχουν ονομαστική ισχύ της τάξης μερικών δεκάδων ΜVA, ενώ συνήθως αποτελούν και κόμβους του συστήματος μεταφοράς. Οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ υποβιβάζουν την ΜΤ σε ΧΤ και η ονομαστική τάση των Μ/Σ τους είναι της τάξης δεκάδων kVA μέχρι και κάποιων ΜVA.

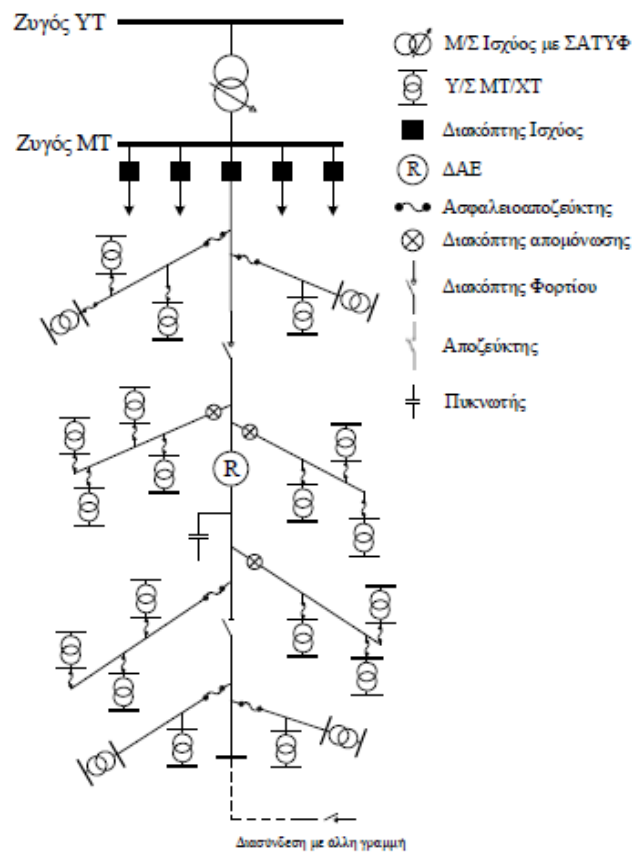
Όσον αφορά τον εξοπλισμό των δικτύων διανομής, αποτελείται από τα μέσα ρύθμισης τάσης, τα μέσα ζεύξης και τα μέσα προστασίας. Κυρίως, ως μέσα ρύθμισης της τάσης χρησιμοποιούνται ο Μ/Σ ισχύος του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, ο οποίος έχει σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και μπορεί ανάλογα με το φορτίο να μεταβάλει το λόγο μετασχηματισμού του μέσω του μεταγωγέα λήψεων, σε διακριτές τιμές, ώστε να διατηρηθεί η τάση των κόμβων εντός των επιτρεπτών ορίων, οι ρυθμιστές τάσης, οι οποίοι είναι αυτομετασχηματιστές με δυνατότητα μεταβολής της σχέσης μετασχηματισμού και επομένως της τάσης από το σημείο στο οποίο εγκαθίστανται και πέρα, οι εγκάρσιοι πυκνωτές, οι οποίοι παρέχουν άεργο ισχύ και συνεπώς ανύψωση τάσης όταν γίνει ζεύξη τους στο δίκτυο και οι λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Κυριότερες κατηγορίες των μέσων ζεύξης και απόζευξης των δικτύων διανομής αποτελούν οι αποζεύκτες, οι διακόπτες φορτίου και οι διακόπτες ισχύος. Τέλος, ως μέσα προστασίας, για την άμεση απομόνωση τμημάτων του δικτύου υπό σφάλμα από το υπόλοιπο δίκτυο,



χρησιμοποιούνται οι διακόπτες ισχύος που ελέγχονται από ηλεκτρονόμους προστασίας, οι ασφάλειες, οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς και οι διακόπτες απομόνωσης.

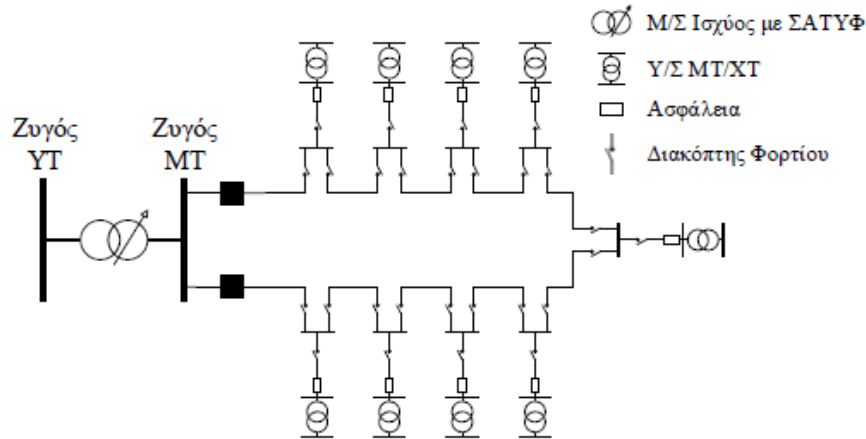
### 2.2.3 Διατάξεις Δικτύων Διανομής

Τα δίκτυα διανομής ανάλογα με τη διάταξη τους διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα ακτινικά και τα βροχοειδή δίκτυα διανομής. Η διάταξη των ακτινικών δικτύων διανομής συνήθως εφαρμόζονται σε εναέρια δίκτυα διανομής, που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές και εξυπηρετούν φορτία, τα οποία δεν απαιτούν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Αποτελούνται από μια κεντρική γραμμή, τον κορμό και τις διακλαδώσεις, στις οποίες τοποθετούνται οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Ρίζα του δέντρου αυτού που σχηματίζει το ακτινικό δίκτυο διανομής είναι ο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και φύλλα οι καταναλωτές φορτίων. Κατά μήκος του κορμού, στην αρχή των διακλαδώσεων και των Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ τοποθετούνται κατάλληλα μέσα ζεύξης και προστασίας, για τον κατάλληλο έλεγχο και απομόνωση τμημάτων του δικτύου. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Ακτινικό δίκτυο διανομής. [2]

Η άλλη κύρια κατηγορία διάταξης δικτύων διανομής, η βροχοειδής, συνήθως εφαρμόζεται σε υπόγεια δίκτυα διανομής αστικών περιοχών και λιγότερο σε εναέρια. Οι γραμμές της διάταξης αυτής συνιστούν τμήματα βρόγχου που αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο κόμβο, αυτόν με τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Τα βροχοειδή δίκτυα διανομής έχουν παρόμοια δομή με αυτή των ακτινικών, αφού σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο. Αυτό γίνεται έχοντας ένα διακόπτη φορτίου ανοικτό στο μέσο της κύριας γραμμής ή σε ένα Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ και έτσι ο βρόχος του δικτύου δεν κλείνει. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Βροχοειδές δίκτυο διανομής. [2]

## 2.2.4 Λειτουργία Δικτύων Διανομής

Το σύστημα διαχείρισης διανομής (Distribution management system - DMS), με τη χρήση συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής πληροφοριών (Supervisory control and data acquisition – SCADA), παρόμοιο με αυτό των συστημάτων μεταφοράς, συλλέγει δεδομένα μετρήσεων από στοιχεία ολόκληρου του δικτύου διανομής, με σκοπό την εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου, την εύρεση τυχόν μη κανονικών συνθηκών λειτουργίας και τη λήψη αποφάσεων για κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις. Ουσιαστικά, το DMS είναι υπεύθυνο για την εποπτεία και την λήψη αποφάσεων για την βέλτιστη λειτουργία του δικτύου διανομής. Για τον εντοπισμό βέλτιστης λειτουργίας του δικτύου, χρησιμοποιούνται μέθοδοι βέλτιστου ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος και μέθοδοι βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύου διανομής. Οι πρώτες μέθοδοι αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, αλλά με τα μέσα ρύθμισης τάσης, όπως ΣΑΤΥΦ, τους ρυθμιστές τάσης και τους αποζεύξιμους πυκνωτές να έχουν όσο λιγότερους χειρισμούς γίνεται. Οι δεύτερες μέθοδοι χρησιμοποιούν κατάλληλους χειρισμούς μεταβολής της κανονικής κατάστασης των διακοπών που βρίσκονται στις γραμμές του δικτύου, με στόχο κυρίως την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, την ισοκατανομή των φορτίων μεταξύ των κύριων γραμμών ή την μεγιστοποίηση της ελάχιστης τιμής της τάσης του δικτύου.

## 2.2.5 Τεχνικά Προβλήματα Δικτύων Διανομής λόγω Υψηλής Διείδυσης Διεσπαρμένων Μονάδων Παραγωγής

Η υψηλή διείδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως έχει προαναφερθεί, φέρει αρκετά τεχνικά προβλήματα. Πριν από κάθε σύνδεση μιας τέτοιας μονάδας στο δίκτυο διανομής, γίνεται εκτίμηση μέσω μελέτης, των

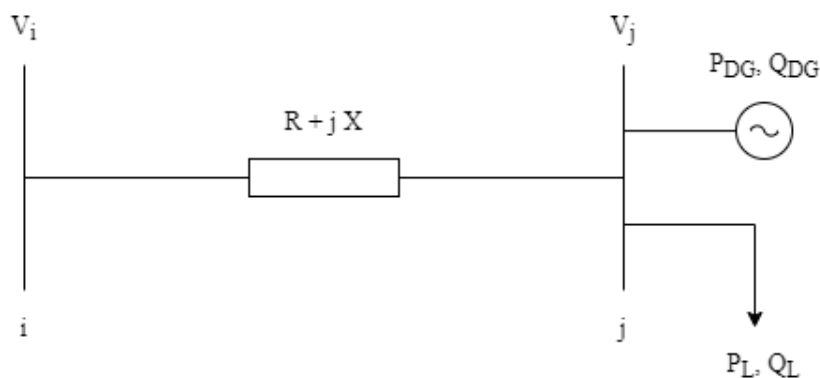
λειτουργικών περιορισμών του δικτύου τους οποίους τυχόν παραβιάζει η εγκατάσταση της, όπως των ορίων τάσης και συχνότητας, των ορίων φόρτισης γραμμών, τις αρμονικές που προσθέτει και τα flicker που εκπέμπει στο σύστημα, τόσο σε κανονική όσο και σε έκτακτη λειτουργία. Μετά τη σύνδεση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής, συνήθως λειτουργούν με σταθερό συντελεστή ισχύος, οπότε πολλές φορές αντιμετωπίζονται από το διαχειριστή του δικτύου σαν αρνητικά φορτία. Όλα αυτά αποτελούν καινούριες προκλήσεις για τη λειτουργία των δικτύων διανομής, τα οποία είχαν σχεδιαστεί προ πολλού, απλά για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς προς τους καταναλωτές, χωρίς να ληφθούν υπόψη τεχνικοί περιορισμοί για τη σύνδεση διανεμημένων μονάδων.

Ένα από τα πιο καιρία προβλήματα τα οποία οφείλουν να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα διανομής, λόγω της υψηλής διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ είναι η ανύψωση τάσης. Το μέτρο της τάσης στους ζυγούς του συστήματος διανομής πρέπει να βρίσκεται εντός κάποιων ορίων, όπως για παράδειγμα συνήθως μεταξύ 0,9 α.μ. και 1,1 α.μ. Η σύνδεση μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο πιθανόν να προκαλέσει ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στο μέτρο της τάσης, λόγω και της στοχαστικής φύσης των γεννητριών τους, κυρίως σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης φορτίου με ελάχιστη παραγωγή και ελάχιστης ζήτησης φορτίου με μέγιστη παραγωγή. Η μεταβολή του μέτρου της τάσης μεταξύ του κόμβου  $i$  και  $j$  του Σχήματος 2.4 υπολογίζεται από τη σχέση (2.1) που φαίνεται πιο κάτω.

$$\Delta V = V_i - V_j \approx \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_j} = \frac{R \cdot (P_L - P_{DG}) + X \cdot (Q_L - Q_{DG})}{V_j} \quad (2.1)$$

όπου  $V_i$  είναι το μέτρο της τάσης του ζυγού  $i$ ,  $R$  και  $X$  είναι ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση σειράς της γραμμής ( $i,j$ ), αντίστοιχα,  $P_L$  και  $Q_L$  είναι η ενεργός και άεργος ισχύς του φορτίου, αντίστοιχα,  $P_{DG}$  και  $Q_{DG}$  είναι η ενεργός και άεργος ισχύς η οποία προσφέρεται στο δίκτυο από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, αντίστοιχα. Όπως είναι ευρέως γνωστό η τιμή του λόγου της ωμικής αντίστασης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών διανομής, είναι αρκετά μεγάλη, ειδικά σε σχέση με την αντίστοιχη των συστημάτων μεταφοράς, οπότε όπως προκύπτει από την εξίσωση (2.1), η ροή ενεργού ισχύος επιδρά περισσότερο από την ροή άεργου ισχύος, στη μεταβολή της τάσης. Έτσι, η υψηλή διείσδυση διανεμημένης παραγωγής, οδηγεί στην ανύψωση τάσης ανάντη του σημείου σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.

Ένα άλλο σημαντικό τεχνικό ζήτημα το οποίο καλείται να αντιμετωπιστεί στα δίκτυα διανομής είναι η συμφόρηση των γραμμών τους. Λόγω της διανεμημένης τους τοποθέτησης, αλλά και της παραγωγής τους με διακύμανση, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, όσο αυξάνεται και η ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο και έτσι έχουν και σχετικά κοντινές αποστάσεις,



Σχήμα 2.4: Δίκτυο διανομής δύο κόμβων  $i$  και  $j$ , με φορτίο και διανεμημένη παραγωγή.

οδηγούν στην αύξηση του συνολικού ρεύματος που ρέει στις γραμμές. Αποτέλεσμα της συμφόρησης των γραμμών είναι η λειτουργία των γραμμών, των μετασχηματιστών και άλλων στοιχείων του δικτύου αρκετά κοντά στα τεχνικά τους όρια, κάτι που είναι ανεπιθύμητο.

Η υψηλή ενσωμάτωση διανεμημένων μονάδων παραγωγής, προκαλεί, επιπλέον, προβλήματα και στην προστασία του δικτύου διανομής, μεταξύ των οποίων τα πιο σημαντικά αφορούν τη μεταβολή της στάθμης βραχυκύκλωσης, την αμφίδρομη ροή ρεύματος βραχυκύκλωσης, που απαιτεί αύξηση των ηλεκτρονόμων προστασίας, ώστε να μην υπάρξει τύφλωση και εσφαλμένη λειτουργία των προστασιών και τη νησιδοποίηση.

Τέλος, σημαντικό τεχνικό ζήτημα το οποίο επηρεάζεται με την αυξημένη ενσωμάτωση της διανεμημένης παραγωγής είναι η ποιότητα ισχύος του δικτύου διανομής. Η ποιότητα ισχύος επηρεάζεται από αρμονικές παραμορφώσεις, οι οποίες προκαλούνται από τα ηλεκτρονικά ισχύος και τη μη ιδανικότητα των ηλεκτρικών μηχανών, και από το flicker, δηλαδή τις μικρές διακυμάνσεις της τάσης που προκαλούν μικρές διαταραχές στην φωτεινή ακτινοβολία και προέρχονται από τα μεταβατικά ζεύξης, την τύρβη, τη σκίαση πύργου και τη διάτμηση ανέμου των ανεμογεννητριών.

Συνεπώς, όλα αυτά τα τεχνικά προβλήματα προωθούν ακόμα περισσότερο την ανάγκη για εξέλιξη της λειτουργία και του σχεδιασμού των σύγχρονων δικτύων διανομής, μετατρέποντας το ρόλο των στοιχείων και του εξοπλισμού του δικτύου σε πιο ενεργό, με αποτέλεσμα την προαγωγή της ανάπτυξης του δικτύου τόσο σε μέγεθος όσο και σε αποδοτικότητα και το κυριότερο, τη περαιτέρω ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

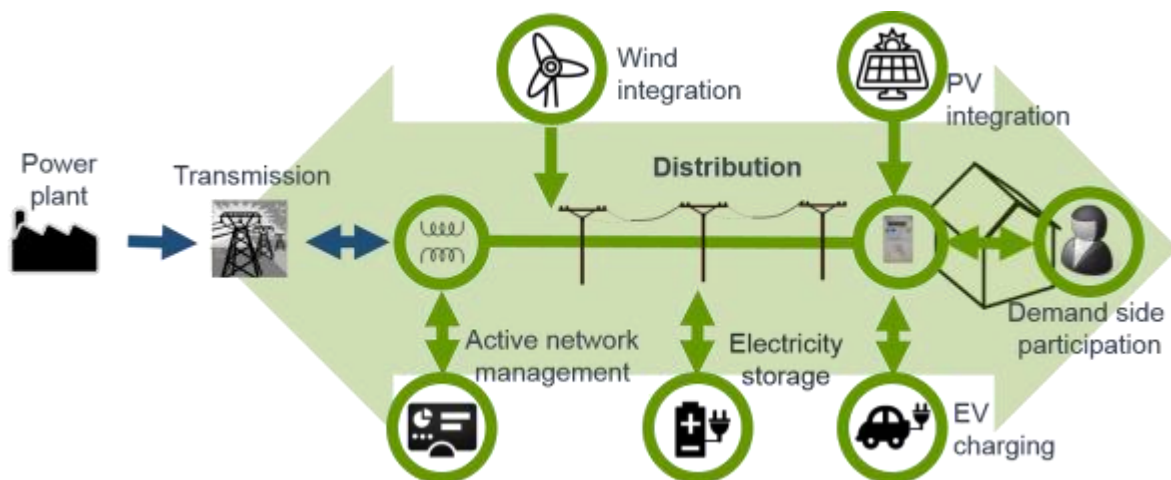
## **2.3 Ενεργά Δίκτυα Διανομής**

### **2.3.1 Ορισμός Ενεργών Δικτύων Διανομής**

Τα ενεργά δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη συνδυασμού διανεμημένης παραγωγής, ειδικά από ΑΠΕ στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων στο περιβάλλον, αλλά και έξυπνων και μεταβαλλόμενων φορτίων και μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία οι διαχειριστές τους έχουν την ικανότητα να ελέγχουν την λειτουργία τους και τη ροή ισχύος στις γραμμές τους με πιο ευέλικτο τρόπο. Η λειτουργία των ενεργών δικτύων διανομής γίνεται παρόμοια με αυτή των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αφού με τη βοήθεια των υποδομών τεχνολογίας πληροφορικής και επικοινωνιών και των προηγμένων υποδομών μετρήσεων, γίνεται πιο εφικτή η εποπτεία, ο έλεγχος και η επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων και του εξοπλισμού του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, αποφέροντας καλύτερη αντιμετώπιση στα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα, αλλά και καθιστώντας τα γενικά πιο αξιόπιστα, αποτελεσματικά και οικονομικά. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται μια αναπαράσταση τους, ενώ ουσιαστικά αποτελούν την νέα δομή των δικτύων διανομής, τα οποία μέχρι στιγμής είχαν πιο παθητικό ρόλο στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας ως μοναδική πηγή ισχύος, τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, για αυτό και η ενσωμάτωση όλων αυτών των στοιχείων φέρει κάποια ζητήματα.

Για να υλοποιηθούν στη πραγματικότητα τα μελλοντικά αυτά δίκτυα διανομής πρέπει πρώτα να επιλυθούν κάποια προβλήματα, τα οποία προκύπτουν. Καίριο ζήτημα αποτελεί η αναβάθμιση των υποδομών τεχνολογίας πληροφορικής και επικοινωνιών και των μετρητικών διατάξεων, με τα οποία θα πραγματοποιούνται η εποπτεία, ο έλεγχος των συσκευών, ο έλεγχος εξόδου των διανεμημένων μονάδων παραγωγής και οι προηγμένες απαιτούμενες μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Χρειάζονται δηλαδή ενσωμάτωση στοιχείων λογισμικού και υλικού, αναβάθμιση συστημάτων εποπτείας υποσταθμών, έξυπνοι μετρητές για απόκτηση δεδομένων, προηγμένοι αισθητήρες για διαχείριση εξοπλισμού. Έτσι, επιτυγχάνονται πιο αξιόπιστες προβλέψεις φορτίων και παραγωγής ΑΠΕ και συνεπώς πιο αποδοτικός προγραμματισμός λειτουργίας, αλλά και πιο γρήγορες αντιδράσεις του δικτύου σε έκτακτες καταστάσεις. Ακόμη,

σημαντικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι τα τεχνικά προβλήματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω που προκαλεί η υψηλή διείσδυση των μονάδων ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής, που αφορούν κυρίως την ανύψωση και τη ρύθμιση τάσης, τις λειτουργίες προστασίας και ελέγχου, τον εντοπισμό και την εκκαθάριση σφαλμάτων και τις αρμονικές που προσθέτουν στο σύστημα. Επίσης, επιτακτική είναι η ανάγκη για την ανάπτυξη κατάλληλων σχημάτων ενεργού διαχείρισης του δικτύου (Active Network Management – ANM) από τον διαχειριστή του συστήματος διανομής, τα οποία θα αποσκοπούν στην αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία των δικτύων διανομής σε συνθήκες και κανονικής και έκτακτης λειτουργίας. Μερικά από τα σχήματα αυτά είναι ο συντονισμένος έλεγχος τάσης, η αποζημίωση αέργου ισχύος, ο έλεγχος των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, ο έλεγχος του προσαρμοστικού συντελεστή ισχύος, η περικοπή παραγωγής, η διαχείριση της αναδιαμόρφωσης δικτύου, η διαχείριση της αποθήκευσης ενέργειας, η διαχείριση της ζήτησης και η διαχείριση της εφεδρείας.



Σχήμα 2.5: Ενεργά δίκτυα διανομής. [18]

### 2.3.2 Βέλτιστη Λειτουργία Ενεργών Δικτύων Διανομής

Η βέλτιστη λειτουργία των ενεργών δικτύων διανομής αποτελεί σημαντικό ρόλο για την επαρκή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, την ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ και την οικονομική διαχείριση της ενέργειας. Η λειτουργία των δικτύων αυτών διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στη λειτουργία πραγματικού χρόνου, όπου οι δράσεις γίνονται σε πολύ μικρές χρονικές περιόδους και βασίζονται σε τηλεπικοινωνιακά σήματα ή αλγορίθμους εκτίμησης κατάστασης και στη προγραμματισμένη λειτουργία, στην οποία σχεδιάζεται πλάνο λειτουργίας μια ή και περισσότερες μέρες πριν, με βάση την πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και παραγωγής από ΑΠΕ.

Η βέλτιστη λειτουργία των ενεργών δικτύων διανομής σε κανονική κατάσταση επιτυγχάνεται με το συντονισμένο έλεγχο και λειτουργία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, των μονάδων αποθήκευσης, των μεταβαλλόμενων φορτίων, του εξοπλισμού του δικτύου και των έξυπνων ηλεκτρονικών συσκευών, με σκοπό την αξιόπιστη και οικονομική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, στην υψηλότερη επιτρεπόμενη διείσδυση ΑΠΕ. Η λειτουργία των δικτύων αυτών διανομής γίνεται είτε μέσω στρατηγικών κεντρικού ελέγχου είτε μέσω στρατηγικών αποκεντρωμένου ελέγχου. Στη πρώτη, οι αποφάσεις για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου γίνονται κεντρικά και χρειάζεται δυνατότητα εκτίμησης κατάστασης του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητα πρόβλεψης του φορτίου και της

παραγωγής από ΑΠΕ και κατάλληλο δίκτυο επικοινωνίας, ενώ στη δεύτερη, το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες, οι οποίες ελέγχονται από τοπικούς ελεγκτές ξεχωριστά, που μπορούν να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων για τη βέλτιστη λειτουργία των ενεργών δικτύων διανομής σε κανονική κατάσταση, οι μέθοδοι βέλτιστου ελέγχου τάσης και οι μέθοδοι βέλτιστης διαχείρισης ροής ισχύος των γραμμών διανομής. Οι πρώτες μέθοδοι, ουσιαστικά, επιτρέπουν τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος των διανεμημένων μονάδων παραγωγής, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες των παθητικών δικτύων διανομής που χρησιμοποιούν την πρακτική “συνδέω και ξεχνώ” (“fit and forget”), αντιμετωπίζοντας την διεσπαρμένη παραγωγή σαν αρνητικό φορτίο. Στόχος των μεθόδων βέλτιστου ελέγχου τάσης είναι η αντιμετώπιση των προβλημάτων που ανύψωσης και διακύμανσης τάσης που επιφέρουν στο δίκτυο οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ, ενώ μπορεί να είναι και κεντρικού και αποκεντρωμένου ελέγχου. Από την άλλη, οι μέθοδοι βέλτιστης διαχείρισης ροής ισχύος αποσκοπούν στον περιορισμό της συμφόρησης των γραμμών διανομής, που προκαλείται τις περισσότερες φορές σε συνθήκες υψηλής παραγωγής και χαμηλής ζήτησης φορτίου και η στρατηγική ελέγχου τους είναι συνήθως κεντρική.

Σε καταστάσεις εκτάκτου καταστάσεως, για τη βέλτιστη λειτουργία των ενεργών δικτύων διανομής λαμβάνονται υπόψη τα οφέλη των διανεμημένων μονάδων παραγωγής και των δυνατοτήτων εποπτείας, ελέγχου και επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο. Αποφεύγονται πιθανές υπερφορτίσεις των γραμμών και μεγάλες πτώσεις τάσης σε ορισμένους κόμβους και έτσι η αποκατάσταση των σφαλμάτων γίνεται με λιγότερους χειρισμούς διακοπών, χωρίς επιπλέον αποκοπή φορτίων. Οι στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων αυτών σε έκτακτες καταστάσεις διακρίνονται σε αυτές που δεν επιτρέπεται η νησιδοποιημένη λειτουργία και σε αυτές που επιτρέπεται, όπου ως νησιδοποίηση ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία μια τουλάχιστον διανεμημένη μονάδα παραγωγής συνεχίζει να τροφοδοτεί ακόμα τοπικά φορτία, παρά τη αποκοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας των φορτίων αυτών από το υπόλοιπο δίκτυο.

## 2.4 Ευελιξία στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Πολύ σημαντικό ρόλο στην μετάβαση από τα παθητικά στα ενεργά δίκτυα διανομής έχει η ευελιξία, η οποία υποστηρίζει την λειτουργία τους συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας ενεργό και άεργο ισχύ για την αποφυγή παραβιάσεων ορίων τάσης ή συμφόρηση γραμμής. Αποτελεί καθαρά προϊόν των ενεργών δικτύων διανομής και εξασφαλίζεται με την περαιτέρω εποπτεία, επικοινωνία και έλεγχο της διανεμημένης παραγωγής, των φορτίων και της αποθήκευσης, που πλέον αυτά προσφέρουν.

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται συνεχώς να είναι εξασφαλισμένη η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, και αφού η ζήτηση δεν είναι σταθερή, η παραγωγή πρέπει να είναι ευέλικτη ανά πάσα στιγμή να επαναφέρει την αυτή την ισότητα. Η διαδικασία αυτή γίνεται στις απορυθμιζουσες αγορές ενέργειας, αλλά και στα πλαίσια ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, αντισταθμίζοντας βλάβες γεννητριών, λάθη προβλέψεων ή θόρυβο φορτίων. Για να γίνει ενσωμάτωση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής μέσα στο σύστημα διανομής, είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται η αποκατάσταση των ανισορροπιών, παρόλο που ο αριθμός των μεγάλων σταθμών παραγωγής, οι οποίοι βοηθούν σε αυτό, μειώνεται. Έτσι, η ενσωμάτωση διεσπαρμένης παραγωγής, η οποία εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες ωθεί σε μεγαλύτερες αβεβαιότητες τη διαδικασία σχεδιασμού, λόγω των λαθών στις προβλέψεις. Επιπλέον και πολλά φορτία που είναι πλέον συνδεδεμένα στο δίκτυο γίνονται λιγότερο ελεγχόμενα, αφού εξαρτώνται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης, λόγω της απομακρυσμένης εγκατάστασης των αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής, οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων παραγωγής και κατανάλωσης αυξάνεται περισσότερο από

όσο ήταν με τον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος μεταφοράς και έτσι προκαλείται μεγαλύτερη μεταφορά ισχύος σε μεγαλύτερες αποστάσεις, με αποτέλεσμα την έντονη αύξηση της λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς και διανομής στα όρια τους.

Η αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών που συναντιούνται στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα, ώστε αυτά να λειτουργούν μέσα σε επιτρεπτά λειτουργικά όρια, γίνεται με την ευέλικτη συμπεριφορά των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, των μονάδων αποθήκευσης και φορτίων του συστήματος. Με τον όρο ευελιξία αναφερόμαστε στην προσαρμοστικότητα που έχει μια γεννήτρια ή φορτίο να μεταβάλει την τιμή της εν ώρα λειτουργίας, όταν επιβληθεί κάποιο συγκεκριμένο εξωτερικό σήμα. Η ευελιξία μια μονάδας του δικτύου διανομής, ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά της, ουσιαστικά υποδεικνύει πόση ενεργό ή άεργο ισχύ μπορεί να προσφέρει, πόσο γρήγορη ανταπόκριση έχει, πόσο γρήγορο ρυθμό μεταβολής έχει, ώστε να αποφευχθούν παραβιάσεις στα όρια λειτουργίας, όπως για παράδειγμα παραβίαση ορίου τάσης ή ροής ισχύος. Οι περισσότερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και οι μονάδες αποθήκευσης συνδέονται στο ηλεκτρικό σύστημα μέσω μετατροπέων, για αυτό και προσφέρουν γρήγορη και συνεχώς ελεγχόμενη δυνατότητα ευελιξίας, η οποία χρησιμεύει για τον έλεγχο της ροής φορτίου στα σημεία διασύνδεσης μεταξύ συστήματος διανομής και μεταφοράς.

Η ενσωμάτωση των ευελιξιών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει διάφορες περιόδους λήψης αποφάσεων, από μακροπρόθεσμους σχεδιασμούς επέκτασης δικτύου, λειτουργικούς σχεδιασμούς μέχρι και μεθόδους ελέγχου και παρακολούθησης πραγματικού χρόνου. Σε συνδυασμό με τη πρόβλεψη φορτίου και διεσπαρμένων γεννητριών, η οποία πρέπει να είναι αξιόπιστη, αποτελούν τους μηχανισμούς που καθορίζουν την διαθεσιμότητα της ευελιξίας του συστήματος και έτσι απαρτίζουν τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τον οποιοδήποτε σχεδιασμό πρέπει να πραγματοποιηθεί.

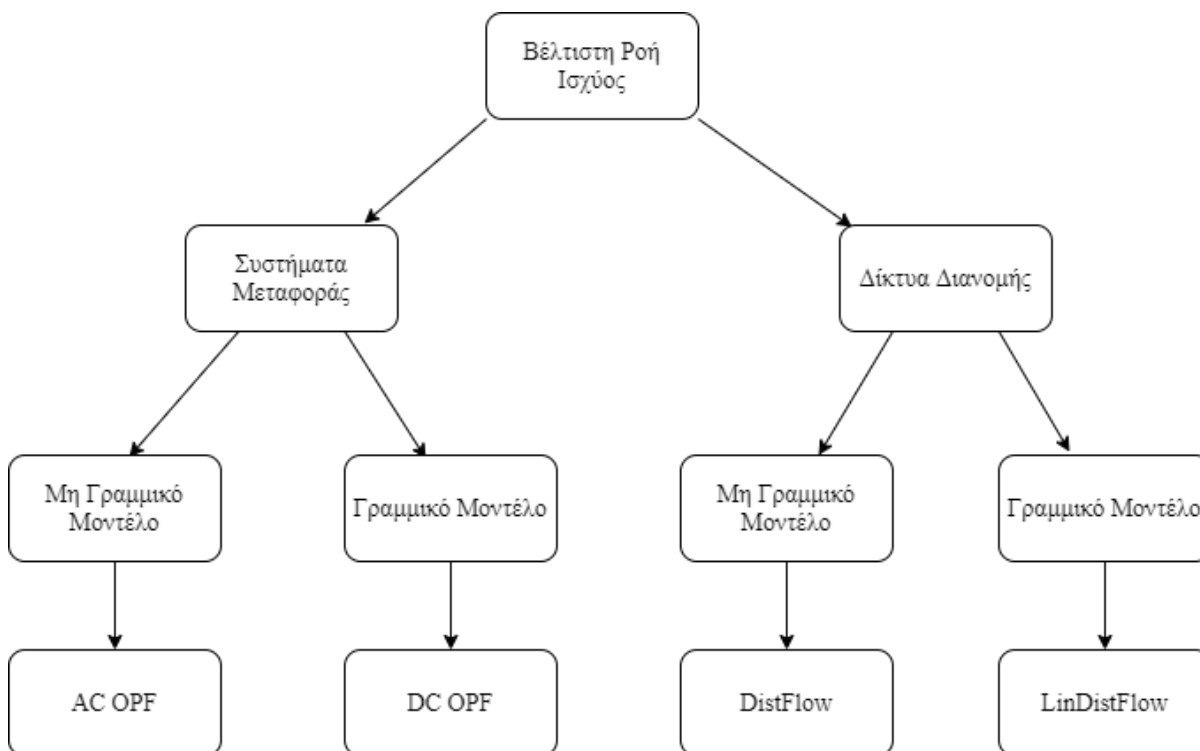




### 3 Βέλτιστη Ροή Ισχύος

#### 3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος έβρισκε συνήθως εφαρμογή στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ, έχει αποκτήσει ευρεία εφαρμογή και στα σύγχρονα δίκτυα διανομής. Η ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη για ενσωμάτωση όσο περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και η περαιτέρω απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν τη λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πιο περίπλοκη, οπότε κι η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος γίνεται πιο περίπλοκη.



Σχήμα 3.1: Κατηγορίες βέλτιστης ροής ισχύος ανάλογα με το δίκτυο και το μοντέλο που μελετάται.

Η βέλτιστη ροή ισχύος είναι ουσιαστικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά τη λειτουργία, το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με το οποίο προγραμματίζεται η ένταξη συγκεκριμένων μονάδων παραγωγής, ώστε η παραγωγή να ισούται με τη ζήτηση φορτίου, ελαχιστοποιώντας ή μεγιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση, υπό κάποιους περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να αφορά την ελαχιστοποίηση του μέτρου τάσης των ζυγών, των ωμικών απωλειών του συστήματος, της ροής ρεύματος των γραμμών ή όπως είναι παραδοσιακά την ελαχιστοποίηση του ωριαίου κόστους παραγωγής των μονάδων που εντάσσονται. Οι περιορισμοί αυτοί συνήθως αφορούν την διατήρηση του μέτρου των τάσεων, της ροής ισχύος και της ροής ρεύματος γραμμής μέσα σε επιτρεπτά όρια και πολλές φορές εισάγουν στο πρόβλημα μη γραμμικότητα, η οποία κάνει την επίλυση πιο περίπλοκη, οπότε για αυτό και πολλές μέθοδοι χρησιμοποιούν απλοποιημένα ή γραμμικοποιημένα μοντέλα βασισμένα σε παραδοχές, ώστε να διευκολυνθεί η λύση του

προβλήματος. Ωστόσο, λόγω της υψηλής τιμής του λόγου της ωμικής αντίστασης προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών των δικτύων διανομής σε σχέση με αυτές των συστημάτων μεταφοράς, οι προσεγγιστικές μέθοδοι για την επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτικές στα συστήματα διανομής.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν το στάδιο πριν τη βέλτιστη ροής ισχύος, η οικονομική κατανομή φορτίου και όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, τα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής μαζί με κάποιες προσεγγιστικές μεθόδους τους.

### 3.2 Οικονομική Κατανομή Φορτίου

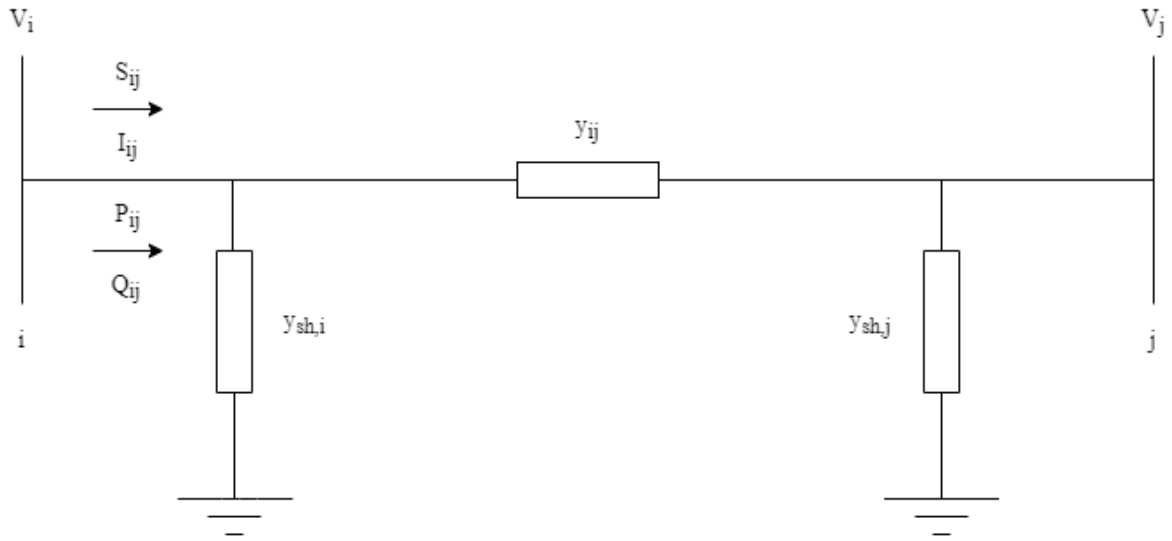
Οικονομική κατανομή φορτίου είναι η διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία καθορίζει ποιες γεννήτριες θα λειτουργήσουν στο ελάχιστο ωριαίο κόστος και πόση ενεργή ισχύ θα παράγουν, ώστε να εξυπηρετηθεί η ζήτηση φορτίου, μέσα στα όρια λειτουργίας κάθε γεννήτριας. Δηλαδή, από το πρόβλημα βελτιστοποίησης αυτό εξαιρούνται περιορισμοί του δικτύου, όπως τα όρια των γραμμών, επιπρόσθετοι περιορισμοί των γεννητριών και επιπλέον περιορισμοί ασφαλείας. Ουσιαστικά, στη διαδικασία αυτή αμελείται η τοπολογία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών του, ενώ θεωρείται ένας μόνο ζυγός στον οποίο είναι συνδεδεμένες όλες οι γεννήτριες και το συνολικό φορτίο και συνεπώς δεν λαμβάνονται υπόψη όρια γραμμών, συμφορήσεις γραμμών και απώλειες γραμμών. Έτσι, αποτελεί ένα πολύ απλοποιημένο πρόβλημα χωρίς γραμμικοποιήσεις, το οποίο βέβαια αμελεί πολύ σοβαρά στοιχεία και για αυτό χρησιμοποιείται μόνο στα αρχικά στοιχεία της αγοράς ενέργειας.

### 3.3 Βέλτιστη AC Ροή Ισχύος

Βέλτιστη AC ροή ισχύος αποτελεί το μοντέλο υπολογισμού που χρησιμοποιεί τις εξισώσεις της AC ροής ισχύος, δηλαδή το πλήρες δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τα μέτρα τάσεων, την άεργο ισχύ, το ρεύμα γραμμής και το ωμικό μέρος των γραμμών, οπότε και ωμικές απώλειες, παρέχοντας έτσι μεγάλη ακρίβεια, αλλά ταυτόχρονα και πολυπλοκότητα.

Το σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι αφού αποτελεί το πιο πλήρες μοντέλο βέλτιστης ροής φορτίου, είναι και πιο πολύπλοκη, αφού οι εξισώσεις της AC ροής ισχύος είναι μη γραμμικές, τετραγωνικές και έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης γίνεται μη γραμμικό μη κυρτό πρόβλημα. Τα προβλήματα του τύπου αυτού είναι δυσκολότερο να λυθούν και δεν είναι εγγυημένη η εύρεση ολικού ελαχίστου, για αυτό και τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια «κυρτοποίησης» του, με δεσπόζουσα τεχνική την χαλάρωση των μη κυρτών περιορισμών σε κυρτούς, ώστε να βρεθεί με σιγουριά το ολικό βέλτιστο. Εάν το ολικό βέλτιστο αποτελεί εφικτή λύση και για το αρχικό μη κυρτό πρόβλημα, τότε αποτελεί και τη βέλτιστη λύση, αλλιώς γίνεται προσπάθεια εύρεσης εφικτής λύσης όσο πιο κοντά στο ολικό βέλτιστο.

Σύμφωνα με την AC ροή ισχύος για τους ζυγούς  $i$  και  $j$ , θεωρώντας το  $\pi$ -μοντέλο γραμμής, που φαίνεται στο Σχήμα 3.2, η μιγαδική τάση στο ζυγό  $i$  ισούται με  $\bar{V}_i = V_i \angle \delta_i$ , η σύνθετη αγωγιμότητα γραμμής αναπαρίσταται με  $y_{ij} = \frac{1}{R_{ij} + jX_{ij}}$ , ενώ η εγκάρσια αγωγιμότητα στα δύο άκρα της γραμμής με  $y_{sh,i} = y_{sh,j} = j \frac{b_{ij}}{2}$ .



Σχήμα 3.2: π-μοντέλο της γραμμής (i,j).

Επίσης, ισχύουν οι πιο κάτω σχέσεις:

$$I_{ij} = y_{sh,i}V_i + y_{ij}(V_i - V_j) \quad (3.1)$$

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i(y_{sh,i}^*V_i^* + y_{ij}^*(V_i^* - V_j^*)) \quad (3.2)$$

$$P_{ij} = g_{ij}V_i^2 - g_{ij}V_iV_j\cos\delta_{ij} - b_{ij}V_iV_j\sin\delta_{ij} \quad (3.3)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij}V_i^2 + b_{ij}V_iV_j\cos\delta_{ij} - g_{ij}V_iV_j\sin\delta_{ij} \quad (3.4)$$

Η εξίσωση (3.1) αφορά το ρεύμα γραμμής μεταξύ του κόμβου i και j, η εξίσωση (3.2) αφορά τη ροή μιγαδικής ισχύος στη γραμμή (i,j) και οι εξισώσεις (3.3) και (3.4) αναφέρονται στη ροή ενεργού και αέργου ισχύος της γραμμής (i,j), αντίστοιχα.

Το πρόβλημα της βέλτιστης AC ροής ισχύος διατυπώνεται όπως φαίνεται πιο κάτω, θεωρώντας ως N το σύνολο των ζυγών του συστήματος μεταφοράς, ως  $N_G$  το σύνολο των γεννητριών του συστήματος μεταφοράς και ως L το σύνολο των γραμμών:

$$\min \sum_i c_i P_{G_i} \quad \forall i \in N_G \quad (3.5)$$

$$P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_i P_{ij} \quad \forall i \in N \quad (3.6)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} = \sum_i Q_{ij} \quad \forall i \in N \quad (3.7)$$

$$P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{max} \quad \forall i \in N_G \quad (3.8)$$

$$Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{max} \quad \forall i \in N_G \quad (3.9)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 \quad \forall (i,j) \in L \quad (3.10)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad \forall i \in N \quad (3.11)$$

$$\delta_{min} \leq \delta_i \leq \delta_{max} \quad \forall i \in N \quad (3.12)$$

Η σχέση (3.5) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, οι (3.6) και (3.7) αφορούν τις εξισώσεις ροών ενεργού και αέργου ισχύος, αντίστοιχα, οι (3.8) και (3.9) εισάγουν στο πρόβλημα τα επιτρεπτά όρια παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος κάθε γεννήτριας και η (3.10) τα όρια φαινόμενης ισχύος της κάθε γραμμής. Επίσης, ο περιορισμός (3.11) αναφέρεται στα επιτρεπτά όρια του μέτρου της τάσης και ο (3.12) στα όρια της γωνίας της τάσης σε rad.

### 3.4 Βέλτιστη DC Ροή Ισχύος

Βέλτιστη DC ροή ισχύος αποτελεί το προσεγγιστικό μοντέλο των μη γραμμικών εξισώσεων της AC ροής ισχύος, το οποίο προκύπτει μετά από κάποιες παραδοχές. Οι παραδοχές οι οποίες οδηγούν στο γραμμικοποιημένο μοντέλο υπολογισμού των ροών ενεργού ισχύος, είναι τα μέτρα των τάσεων σε όλους τους ζυγούς να θεωρούνται ίσα με την ονομαστική τους τιμή και οι ωμικές αντιστάσεις των γραμμών να αμελούνται. Το μοντέλο αυτό σε σχέση με την οικονομική κατανομή φορτίου λαμβάνει υπόψη τις γραμμές του δικτύου, καθώς και τους περιορισμούς τους και έτσι συχνά το βλέπουμε να χρησιμοποιείται σε μελέτες ανάπτυξης του συστήματος, σε μελέτες όπου ο προσεγγιστικός αυτός υπολογισμός των ροών ενεργού ισχύος και των μέτρων των τάσεων ζυγών είναι αποδεκτός. Σε σχέση με την βέλτιστη AC ροή ισχύος έχει μικρότερη ακρίβεια, αφού δε λαμβάνει υπόψη τα μέτρα τάσεων, την άεργο ισχύ, το ρεύμα γραμμής και το ωμικό μέρος των γραμμών.

Σύμφωνα με τη DC ροή ισχύος για τους ζυγούς  $i$  και  $j$  ισχύουν οι δύο πιο κάτω υποθέσεις:

- 1) Σταθερό μέτρο τάσης στην ονομαστική τιμή:  $V_i = V_j = 1 \text{ αμ}$
- 2) Μικρές γωνιακές διαφορές:  $\sin(\delta_i - \delta_j) = \delta_i - \delta_j$
- 3) Μηδενική ροή αέργου ισχύος:  $Q_{ij} = 0$

Έτσι, η ροή ισχύος με τη μέθοδο αυτή γραμμικοποιείται υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{ij} = \frac{\delta_i - \delta_j}{X_{ij}} = B_{ij}(\delta_i - \delta_j) = -P_{ji}$$

Γενικά οι υποθέσεις αυτές της σταθερής τάσης, της μικρής διαφοράς των γωνιών και της μηδενικής ροής αέργου ισχύος, λειτουργούν σε προβλήματα που αφορούν συστήματα που δεν είναι υπερφορτωμένα ή πιο γενικά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το ωμικό μέρος των γραμμών του είναι στη πραγματικότητα αμελητέο, οι αντισταθμίσεις αέργου ισχύος είναι αρκετές και υπάρχει μεγαλύτερος έλεγχος τάσης.

Το πρόβλημα της βέλτιστης DC ροής ισχύος διατυπώνεται ως εξής:

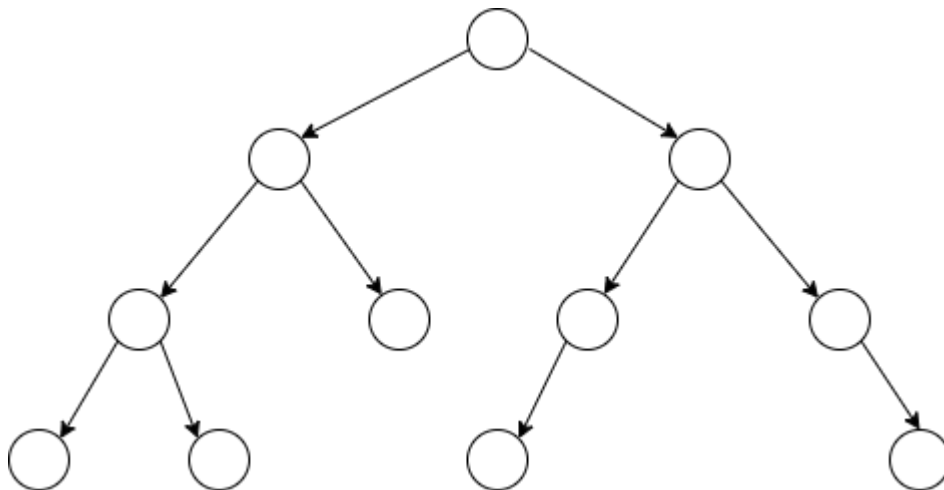
$$(3.5), (3.8), (3.12) \quad (3.13)$$

$$P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_i (B_{ij}(\delta_i - \delta_j)) \quad \forall i \in N \quad (3.14)$$

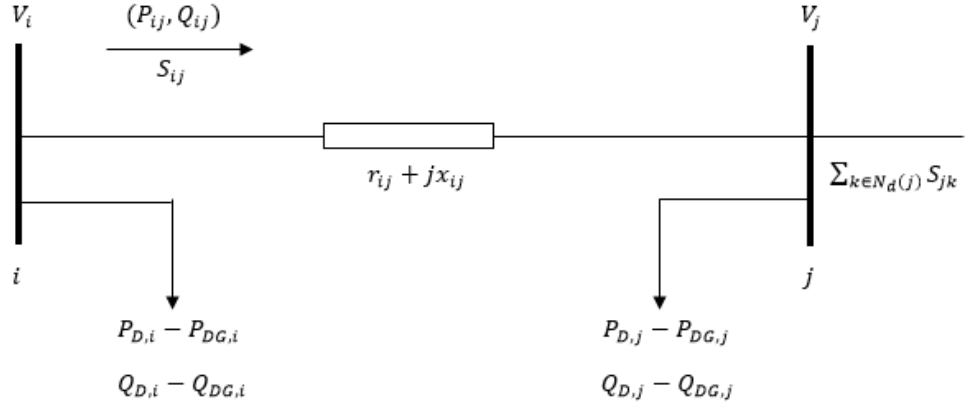
$$-P_{ij,max} \leq B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \leq P_{ij,max} \quad \forall (i,j) \in L \quad (3.15)$$

### 3.5 Μοντέλο Ροών Ισχύος Κλάδου

Οι εξισώσεις του μοντέλου ροών ισχύος κλάδου (Branch flow model), που παρουσιάζονται πιο κάτω, χρησιμοποιούνται για τη περιγραφή του ισοζυγίου ισχύος των δικτύων διανομής σε ακτινική λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση. Ουσιαστικά, στο μοντέλο αυτό το δίκτυο διανομής αναπαρίσταται ως ένας κατευθυνόμενος γράφος, ένα κατευθυνόμενο γεννητικό δέντρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, με ρίζα τον Υ/Σ ΥΤ/ ΜΤ. Η κατεύθυνση του δέντρου ορίζεται αυθαίρετα, αλλά συνήθως προτιμάται η κατεύθυνση από τον κόμβο του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ προς τους κόμβους φύλλα, η οποία είναι και η κατεύθυνση της έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ προς το δίκτυο διανομής. Σύμφωνα με τη σύμβαση αυτή και με βάση το Σχήμα 3.4, οι κόμβοι  $i$  και  $j$  σχηματίζουν τον κλάδο  $(i, j)$ , όπου ο κόμβος  $i$  είναι ο πρόγονος του  $j$  και ο κόμβος  $j$  είναι ο απόγονος του  $i$ . Σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής κάθε κόμβος έχει μόνο ένα πρόγονο, εκτός από τον κόμβο στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, ο οποίος δεν έχει κανένα πρόγονο. Ορίζουμε ως  $N_s$  το σύνολο όλων των κόμβων του δικτύου, ως  $N$  το σύνολο των κόμβων του δικτύου διανομής, χωρίς το κόμβο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, ως  $L$  το σύνολο των κλάδων του δικτύου, ως  $N_d(j)$  το σύνολο των κόμβων που είναι απόγονοι του κόμβου  $j$  και ως  $L_d(i, j)$  το σύνολο των κλάδων που είναι απόγονοι του κλάδου  $(i, j)$ .



Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση του δικτύου διανομής με κατευθυνόμενο γεννητικό δέντρο.



Σχήμα 3.4: Κλάδος (i, j) δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επομένως, το μοντέλο ροών ισχύος κλάδου μπορεί να περιγραφεί από τις πιο κάτω εξισώσεις DistFlow:

$$P_{ij} - I_{ij}^2 r_{ij} - \sum_{k \in N_d(j)} P_{jk} = P_{D,j} - P_{DG,j} \quad \forall j \in N \quad (3.16)$$

$$Q_{ij} - I_{ij}^2 x_{ij} - \sum_{k \in N_d(j)} Q_{jk} = Q_{D,j} - Q_{DG,j} \quad \forall j \in N \quad (3.17)$$

$$P_{G,j} - P_{D,j} = \sum_{k \in N_d(j)} P_{jk} \quad \forall j \in N_s/N \quad (3.18)$$

$$Q_{G,j} - Q_{D,j} = \sum_{k \in N_d(j)} Q_{jk} \quad \forall j \in N_s/N \quad (3.19)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij}^2 \quad \forall (i, j) \in L \quad (3.20)$$

$$V_i^2 I_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall (i, j) \in L \quad (3.21)$$

Οι εξισώσεις (3.16) και (3.17) εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο j, αντίστοιχα, ενώ οι εξισώσεις (3.18) και (3.19) αφορούν μόνο τον κόμβο του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, αφού εκφράζουν την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα, στο υπόλοιπο δίκτυο. Η (3.20) υπολογίζει το τετράγωνο του μέτρου της τάσης ενός κόμβου συναρτήσει του πρόγονου κόμβου του, ενώ η (3.21) δίνει το μέτρο της φαινόμενης ισχύος που διαρρέει τον κλάδο (i, j).

### 3.5.1 Βέλτιστη Ροή Ισχύος Μοντέλου DistFlow

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος με βάση το μοντέλο ροών ισχύος κλάδων για ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής διατυπώνεται ως εξής:

$$\min \sum_{i \in N} C_{G,i}(P_{G_i}) + C_{DG,i}(P_{DG_i}) \quad (3.22)$$

$$(3.16)-(3.21) \quad (3.23)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad \forall i \in N \quad (3.24)$$

$$P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{max} \quad \forall i \in N \quad (3.25)$$

$$Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{max} \quad \forall i \in N \quad (3.26)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 \quad \forall (i,j) \in L \quad (3.27)$$

Το πρόβλημα αυτό της βελτιστοποίησης ως έχει, ουσιαστικά αποτελεί το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος DistFlow, το οποίο είναι μη γραμμικό πρόβλημα. Όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, με χαλάρωση του μη γραμμικού περιορισμού ισότητας (3.21), του μοντέλου του αυτού, προκύπτει το μοντέλο με τους κωνικούς περιορισμούς δεύτερης τάξης, εξαλείφοντας έτσι την μη γραμμικότητα των περιορισμών.

### 3.5.2 Βέλτιστη Ροή Ισχύος Μοντέλου LinDistFlow

Εάν θέλουμε μια προσεγγιστική γραμμική λύση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το γραμμικοποιημένο αντίστοιχο πρόβλημα Linearized DistFlow ή LinDistFlow, στο οποίο καταλήγουμε αγνοώντας το ρεύμα γραμμής, δηλαδή τον τετραγωνικό περιορισμό ισότητας (3.21) και άρα και το τελευταίο όρο της ισότητας (3.20). Δηλαδή, έχουμε την πιο κάτω διατύπωση με αντικειμενική συνάρτηση και πάλι την (3.22), έχοντας πλέον γραμμικούς περιορισμούς και επομένως λιγότερη πολυπλοκότητα, αλλά και μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με το πραγματικό πρόβλημα.

$$P_{ij} - \sum_{k \in N_d(j)} P_{jk} = P_{D,j} - P_{DG,j} \quad \forall j \in N \quad (3.28)$$

$$P_{ij} - \sum_{k \in N_d(j)} P_{jk} = P_{D,j} - P_{DG,j} \quad \forall j \in N \quad (3.29)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) \quad \forall (i, j) \in L \quad (3.30)$$

$$(3.18)-(3.19), (3.24)-(3.27) \quad (3.31)$$



## 4 Βέλτιστη Ροή Ισχύος με χαλάρωση SOCP

### 4.1 Εισαγωγή

Οι απλοποιήσεις των προβλημάτων βελτιστοποίησης γίνονται είτε με χαλαρώσεις είτε με προσεγγίσεις. Ενώ οι χαλαρώσεις περικλείουν τους μη κυρτούς εφικτούς χώρους λύσεων των εξισώσεων ροής ισχύος, καταλαμβάνοντας έτσι μεγαλύτερο χώρο, οι προσεγγίσεις απλοποιούν τις εξισώσεις της ροής ισχύος, χρησιμοποιώντας κάποιες υποθέσεις για συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων, έτσι όταν αυτές οι υποθέσεις ισχύουν, μπορούν να αναπαραστήσουν τη συμπεριφορά του συστήματος και πολλές φορές σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας έχουν ικανοποιητική ακρίβεια. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν δύο μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος μαζί με τα προσεγγιστικά τους μοντέλα, στο κεφάλαιο αυτό θα εισάγουμε την έννοια της κυρτής χαλάρωσης περιορισμών του προβλήματος βελτιστοποίησης, καθώς και την ακρίβεια αυτών. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν κάποια μοντέλα που διατυπώθηκαν και θα συγκριθούν με κάποια άλλα μοντέλα αναφοράς, ώστε να εκτιμηθεί κατά πόσο σωστά ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα δοκιμαστικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

### 4.2 Κυρτή Χαλάρωση και Ακρίβεια Χαλάρωσης

Ουσιαστικά αυτό που επιτυγχάνεται με την κυρτή χαλάρωση είναι η εξασφάλιση κάποιων ορίων για τη τιμή της βέλτιστης αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού μη κυρτού προβλήματος ή και επαρκών συνθηκών ώστε να αποσαφηνιστεί η μη εφικτότητα του προβλήματος αυτού. Επιπλέον, για συγκεκριμένες περιπτώσεις προβλημάτων βελτιστοποίησης, κάποιες κυρτές χαλαρώσεις μπορούν να οδηγήσουν στο ολικό βέλτιστο, υπό ορισμένες επαρκείς συνθήκες, οι οποίες μπορεί να εκτιμώνται πριν την χαλαρωμένη λύση, μέσω των παραμέτρων και της τοπολογίας του δικτύου του προβλήματος ή να ελέγχονται μετά τη λύση.

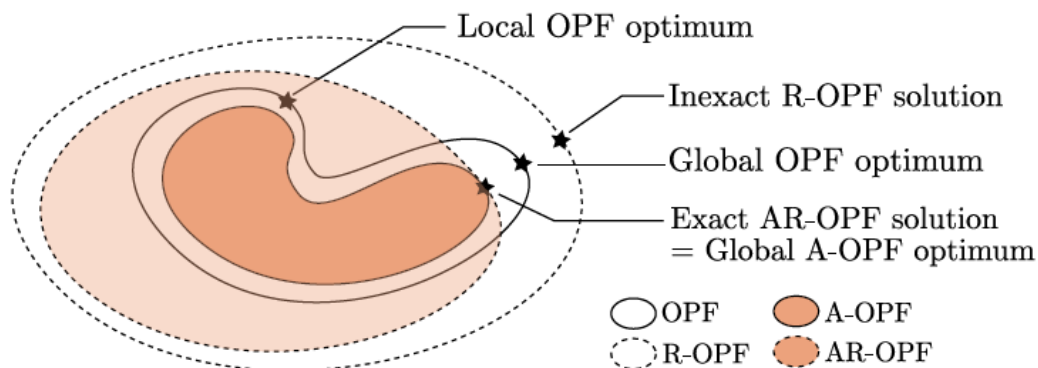
Πιο συγκεκριμένα, αφού οι κυρτές χαλαρώσεις, περιβάλλουν τον μη κυρτό εφικτό χώρο λύσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1, οι λύσεις που προκύπτουν από το χαλαρωμένο πρόβλημα περιορίζουν τη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δίνοντας κάτω όριο για προβλήματα ελαχιστοποίησης και άνω όριο για προβλήματα μεγιστοποίησης. Επίσης, εάν το χαλαρωμένο πρόβλημα δεν έχει εφικτή λύση, τότε και το μη κυρτό πρόβλημα δεν είναι εφικτό, όμως αυτό αποτελεί επαρκή αλλά όχι ικανή συνθήκη, αφού η εφικτότητα του χαλαρωμένου προβλήματος δεν είναι ικανή να καθορίσει αν το αρχικό πρόβλημα είναι επίσης εφικτό. Από την άλλη, ένας αλγόριθμος τοπικής λύσης μπορεί να επιβεβαιώσει την εφικτότητα ενός προβλήματος, αλλά εάν αυτός δε συγκλίνει σε εφικτό σημείο, δε σημαίνει ότι το αρχικό πρόβλημα δεν έχει εφικτή λύση, έτσι ουσιαστικά οι χαλαρώσεις αποτελούν συμπλήρωμα των αλγορίθμων τοπικών λύσεων. Για αυτό και το χάσμα βελτιστοποίησης υπολογίζεται μέσω αλγορίθμων ολικής λύσης, συγκρίνοντας το όριο της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης μιας χαλάρωσης με το όριο της αντίστοιχης τιμής ενός εφικτού σημείου που προκύπτει από αλγόριθμο τοπικής λύσης. Για την εξασφάλιση ολικού βέλτιστου, οι αλγόριθμοι αυτοί προσπαθούν να μειώσουν το χάσμα αυτό με διάφορες τεχνικές.

Είναι αξιοσημείωτο πως η μη κυρτότητα, την οποία προσπαθούμε να εξαλείψουμε με τις χαλαρώσεις, δεν προέρχεται μόνο από τις εξισώσεις της ροής ισχύος, αλλά και από άλλες πηγές μη κυρτότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ακόμα και μετά από κυρτή χαλάρωση των εξισώσεων ροής ισχύος. Οι πηγές αυτές, μπορεί να είναι το on/off της κατάστασης των γεννητριών σε προβλήματα δέσμευσης μονάδας και οι δυαδικές μεταβλητές που σχετίζονται με τους πυκνωτές μεταγωγής. Βέβαια, μια διατύπωση

προβλήματος, η οποία αντιμετωπίζει την μη κυρτότητα που αφορά τις εξισώσεις ροής ισχύος, επιφέρει αρκετά θεωρητικά και υπολογιστικά πλεονεκτήματα, αφού, για παράδειγμα, μια γραμμική χαλάρωση των εξισώσεων αυτών μπορεί να οδηγήσει σε ένα μικτού-ακεραίου γραμμικό πρόβλημα, για το οποίο υπάρχουν στην αγορά αρκετοί ικανοί επιλυτές για την εξασφάλιση της ολικά βέλτιστης λύσης του χαλαρωμένου προβλήματος.

Η ακρίβεια της χαλάρωσης είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο, το οποίο ουσιαστικά μετράει πόσο καλή είναι η χαλάρωση και πόσο καλά αντιπροσωπεύει το αρχικό πρόβλημα, ενώ κάποιες χαλαρώσεις των εξισώσεων ροής ισχύος είναι ακριβείς για συγκεκριμένα προβλήματα βελτιστοποίησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Μια ακριβής χαλάρωση εξασφαλίζει όριο το οποίο είναι ίσο με τη ολικά βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή δεν υφίσταται χάσμα χαλάρωσης μεταξύ των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης της λύσης του μη κυρτού προβλήματος και μιας ακριβής χαλάρωσης του. Μια ακριβής χαλάρωση πιθανόν να προσφέρει ολικά βέλτιστες μεταβλητές απόφασης, για τις οποίες το αρχικό μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης πετυχαίνει ολικά βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, πιθανόν όμως και όχι.

Επίσης, είναι σημαντικό να αναφέρουμε και την αύξηση (augmentation) του αρχικού προβλήματος, με την προσθήκη επιπλέον περιορισμών, κάτι το οποίο όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.1, περιορίζει το χώρο της εφικτής λύσης, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει την πιθανότητα ακριβής χαλάρωσης και εύρεσης ολικά βέλτιστης λύσης του αυξημένου προβλήματος, που μπορεί να είναι η ίδια με του αρχικού ή έστω υποβέλτιστη.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Venn για τη περίπτωση όπου το χαλαρωμένο πρόβλημα (R-OPF) είναι μη ακριβές και το αυξημένο χαλαρωμένο πρόβλημα (AR-OPF) είναι ακριβές. [6]

## 4.3 Χαλαρώσεις Κωνικού Προγραμματισμού Δεύτερης Τάξης

### 4.3.1 Προβλήματα Κωνικού Προγραμματισμού Δεύτερης Τάξης

Ο κωνικός προγραμματισμός δεύτερης τάξης (second order cone programming-SOCP) αποτελεί μια γενίκευση του γραμμικού προγραμματισμού, αφού στους γραμμικούς περιορισμούς (4.2), προσθέτονται κωνικοί περιορισμοί δεύτερης τάξης (4.3), ώστε να παίρνει τελικά τη πιο κάτω μορφή:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^m} c^T x \quad (4.1)$$

$$Ax = b \quad (4.2)$$

$$\|E_i x + d_i\|_2 \leq g_i^T x + f_i, \quad i = 1, \dots, r \quad (4.3)$$

$$x \geq 0 \quad (4.4)$$

όπου  $x \in \mathbb{R}^m$  αποτελεί το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης,  $c^T \in \mathbb{R}^m$  είναι η γραμμική αντικειμενική συνάρτηση,  $A \in \mathbb{R}^{p \times m}$  είναι ένας συγκεκριμένος πίνακας με  $p$  γραμμές και  $m$  στήλες,  $b \in \mathbb{R}^p$  είναι ένα συγκεκριμένο διάνυσμα,  $\|\cdot\|_2$  είναι η Ευκλείδεια νόρμα ενός διανύσματος,  $E_i \in \mathbb{R}^{m_i \times m}$  είναι ένας πίνακας,  $g_i^T \in \mathbb{R}^m$  και  $d_i \in \mathbb{R}^{m_i}$  είναι διανύσματα,  $f_i \in \mathbb{R}$  είναι βαθμωτό μέγεθος και  $r$  είναι ο αριθμός των κωνικών περιορισμών δεύτερης τάξης.

Τα προβλήματα κωνικού προγραμματισμού δεύτερης τάξης είναι κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης, οπότε μπορούν να λυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο, δηλαδή ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση τους είναι στη χειρότερη περίπτωση ανάλογος ενός πολυωνύμου του αριθμού των μεταβλητών και των περιορισμών του. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτό έχει προωθήσει το κωνικό προγραμματισμό δεύτερης τάξης σε μεγάλο πεδίο εφαρμογών και πιο ειδικά στη διατύπωση πολλών προβλημάτων που αφορούν τη λειτουργία και το σχεδιασμό των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της κυρτής χαλάρωσης που προσφέρουν.

Οι κυρτές χαλαρώσεις των προβλημάτων βελτιστοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας διατυπώσεις κωνικού προγραμματισμού δευτέρας τάξης, προέκυψαν από χαλαρώσεις βασισμένες σε διατυπώσεις ημιορισμένου προγραμματισμού, που χρησιμοποιούνται για τη χαλάρωση του μοντέλου της AC βέλτιστης ροής ισχύος. Ενώ υπάρχουν χαλαρώσεις τέτοιες που αφορούν και το μοντέλο έγχυσης ζυγού αλλά και το μοντέλο ροών ισχύος κλάδου, στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με το δεύτερο μοντέλο.

### 4.3.2 Διατύπωση Γενικευμένου Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος SOCP

Οι εξισώσεις DistFlow αγνοούν τις φασικές γωνίες των τάσεων και επομένως αποτελούν ακριβή αναπαράσταση των ακτινικών δικτύων, αλλά χαλάρωση για τα πεπλεγμένα δίκτυα. Οι εξισώσεις είναι γραμμικές για το τετράγωνο του μέτρου της τάσης  $u_i$  κάθε ζυγού και για τις ροές του τετραγώνου του μέτρου του ρεύματος  $l_{ij}$ , της ενεργού ισχύος  $P_{ij}$  και της αέργου ισχύος  $Q_{ij}$  κάθε γραμμής του δικτύου. Η χαλάρωση του μοντέλου αυτού γίνεται με αντικατάσταση της μη γραμμικής ισότητας (3.21) με μια ανισότητα στη μορφή ενός περιστρεφόμενου κωνικού περιορισμού δευτέρας τάξης, όπως πιο κάτω:

$$u_i l_{ij} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall (i, j) \in L \quad (4.5)$$

Έτσι, η χαλαρωμένη βέλτιστη ροή ισχύος μπορεί να εκφραστεί από τις σχέσεις (3.16)-(3.20),(3.22),(3.24)-(3.27),(4.5).

### 4.3.3 Ακρίβεια Χαλάρωσης Γενικευμένου Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος SOCP

Όσον αφορά την ακρίβεια της χαλάρωσης του μοντέλου (3.16)-(3.20),(3.22),(3.24)-(3.27),(4.5) έχουν αναπτυχθεί επαρκείς συνθήκες εκ των προτέρων, οι οποίες κυρίως αφορούν προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος με χαλάρωση κωνικού προγραμματισμού δεύτερης τάξης.

Οι περισσότερες από αυτές χρησιμοποιούν υπόθεση υπερικανοποίησης φορτίων, η οποία επιτρέπει τη ζήτηση ενεργού και αέργου φορτίου να αυξάνεται αυθαίρετα ή με άλλα λόγια δεν εφαρμόζει κάτω όριο στις εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος. Ακολούθως, παρουσιάζονται μερικές μορφές γνωστών επαρκών συνθηκών για ακρίβεια των χαλαρώσεων κωνικού προγραμματισμού δευτέρας τάξης, οι οποίες εφαρμόζονται σε μόνο σε ισορροπημένα μονοφασικά ισοδύναμα μοντέλα δικτύων.

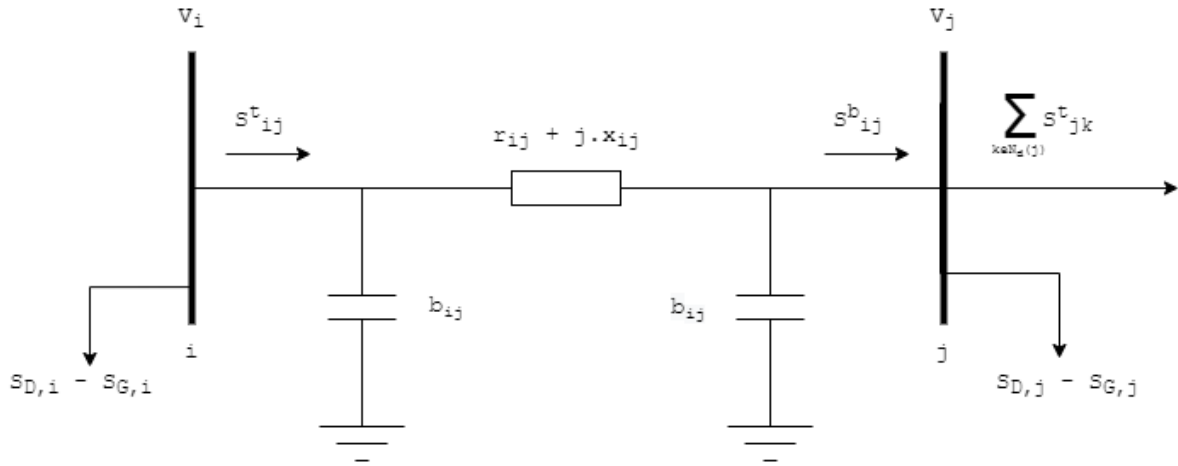
Η πρώτη αφορά πεπλεγμένα δίκτυα με πολλούς ελεγχόμενους ιδανικούς μετασχηματιστές με δυνατότητα αλλαγής φάσης και κάποια μη ασήμαντη τεχνική υπόθεση, όπως αυτήν της υπερικανοποίησης φορτίων. Εδώ, οι συγκεκριμένοι μετασχηματιστές πρέπει έχουν διάταξη τέτοια ώστε στο δίκτυο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να υφίσταται ένα συνεκτικό δέντρο και αυτοί να είναι τοποθετημένοι σε κάθε κλάδο του δικτύου που δεν ανήκει στο συνεκτικό δέντρο. Άλλες επαρκείς συνθήκες ακρίβειας της χαλάρωσης αποτελούν τα ακτινικά δίκτυα που ικανοποιούν τουλάχιστον μια από τις μη ασήμαντες τεχνικές υποθέσεις, όπως την υπερικανοποίηση φορτίων, τα ακτινικά δίκτυα στα οποία δεν υπάρχει αντίστροφη ροή ισχύος ή υπάρχει αντίστροφη ροή ισχύος και αφορά μόνο την ενεργό ή την άεργο ισχύ και τα πεπλεγμένα δίκτυα, τα οποία είναι αμιγώς ωμικά, δηλαδή χωρίς αντιδράσεις, χωρίς αγωγιμότητες και χωρίς εγχύσεις αέργου ισχύος, και έχουν κάποια υπόθεση ή συνθήκη για τα όρια της τάσης και της έγχυσης ισχύος.

Λόγω της μεγάλης διείδυσης των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στα δίκτυα διανομής, υπάρχει δυσκολία στην εύρεση επαρκών συνθηκών για την ακρίβεια της χαλάρωσης των προβλημάτων κωνικού προγραμματισμού δευτέρας τάξης, οι οποίες απαιτούν μη ύπαρξη άνω ορίου στα επίπεδα της τάσης ή μη ύπαρξη άνω ορίου στη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος. Έτσι, προτείνεται η αύξηση του αρχικού προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος με την χρήση επιπλέον περιορισμών, οι οποίοι συρρικνώνουν το χώρο των εφικτών λύσεων και έπειτα η χαλάρωση του. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να οριστούν πιο ήπιες συνθήκες για την απόδειξη της ακρίβειας του προβλήματος αυτού, κάτι που εγγυάται για τα προβλήματα βέλτιστης ροής ακτινικών, μονογραμμικών δικτύων ένα εφικτό βέλτιστο σημείο, ακόμη κι αν αυτό δεν είναι το ολικό βέλτιστο.

## 4.4 Σύγκριση Μεθόδων Βέλτιστης Ροής Ισχύος

### 4.4.1 Διατύπωση Προβλημάτων Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Στο σημείο αυτό και με βάση όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής, θεωρείται κατάλληλη η παρουσίαση των μοντέλων και διατυπώσεων του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος που μελετάμε στην εργασία αυτή. Τα μοντέλα που μελετάμε είναι πέντε, αλλά το ένα είναι ουσιαστικά το πρόβλημα AC OPF, το οποίο λύνει το MATPOWER με το δικό του επιλυτή και άρα οι διατυπώσεις είναι τέσσερεις και όλες πηγάζουν από τις εξισώσεις ροών ισχύος κλάδου (3.22)-(3.27) του μοντέλου DistFlow, που είδαμε στην Ενότητα 3.5. Όπως, αναφέρθηκε και πιο πάνω από το μοντέλο αυτό με προσεγγίσεις καταλήγουμε στο μοντέλο LinDistFlow, με χαλάρωση του περιορισμού (3.21) έχουμε το μοντέλο κωνικού προγραμματισμού δευτέρας τάξης (SOCP) και με αύξηση των περιορισμών αυτού καταλήγουμε στο αυξημένο μοντέλο κωνικού προγραμματισμού δευτέρας τάξης (Augmented SOCP). Επειδή, στις προσομοιώσεις δεν αμελούμε την εγκάρσια αγωγιμότητα  $b_{ij}$ , εάν υπάρχει, η οποία είναι η μισή της εγκάρσιας αγωγιμότητας γραμμής (i,j), ενώ επίσης, διαχωρίζονται οι ισχύεις στην αρχή και στο τέλος της γραμμής, παρουσιάζουμε πιο κάτω την ολοκληρωμένη διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος DistFlow, σύμφωνα με το Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Κλάδος γραμμής (i,j) δικτύου διανομής με εγκάρσια αγωγιμότητα και τα μεγέθη που χρησιμοποιούμε για τη συγκεκριμένη διατύπωση.

$$\min \sum_{i \in N} C_{G,i}(P_{G_i}) \quad (4.6)$$

$$S_{G,j} - S_{D,j} = \sum_{k \in N_d(j)} S^t_{jk} \quad \forall j \in N_s/N \quad (4.7)$$

$$S^b_{ij} = S_{D,j} - S_{G,j} + \sum_{k \in N_d(j)} S^t_{jk} \quad \forall j \in N \quad (4.8)$$

$$S^t_{ij} = S_{D,j} - S_{G,j} + \sum_{k \in N_d(j)} S^t_{jk} + z_{ij} l_{ij} - j(u_i + u_j) b_{ij} \quad \forall j \in N \quad (4.9)$$

$$u_j = u_i - 2[P^t_{ij} r_{ij} + (Q^t_{ij} + u_i b_{ij}) x_{ij}] + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \quad \forall (i,j) \in L \quad (4.10)$$

$$u_i l_{ij} = (P^t_{ij})^2 + (Q^t_{ij} + u_i b_{ij})^2 \quad \forall (i,j) \in L \quad (4.11)$$

$$V_{min}^2 \leq u_i \leq V_{max}^2 \quad \forall i \in N \quad (4.12)$$

$$P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{max} \quad \forall i \in N \quad (4.13)$$

$$Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{max} \quad \forall i \in N \quad (4.14)$$

$$(P^t_{ij})^2 + (Q^t_{ij})^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 \quad \forall (i,j) \in L \quad (4.15)$$

$$(P^b_{ij})^2 + (Q^b_{ij})^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 \quad \forall (i,j) \in L \quad (4.16)$$

Για το μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος του LinDistFlow, εξαλείφουμε τους όρους που αφορούν το τετράγωνο του μέτρου του ρεύματος  $l_{ij}$ , από τους περιορισμούς (4.9) και (4.10), όπως και ολόκληρο το μη γραμμικό περιορισμό (4.11). Για τη διατύπωση του μοντέλου της χαλαρωμένης βέλτιστης ροής ισχύος SOCP, χαλαρώνουμε το περιορισμό (4.11), ως εξής:

$$u_i l_{ij} \geq (P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t + u_i b_{ij})^2 \quad \forall (i, j) \in L \quad (4.17)$$

Για το αυξημένο μοντέλο του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος SOCP, χρησιμοποιούμε τον χαλαρωμένο περιορισμό (4.17) και προσθέτουμε τους πιο κάτω επιπλέον περιορισμούς:

$$\hat{S}_{ij}^t = S_{D,j} - S_{G,j} + \sum_{k \in N_d(j)} \hat{S}_{jk}^t - j(\bar{u}_i + \bar{u}_j) b_{ij} \quad \forall j \in N \quad (4.18)$$

$$\bar{u}_j = \bar{u}_i - 2[\hat{P}_{ij}^t r_{ij} + (\hat{Q}_{ij}^t + u_i b_{ij}) x_{ij}] \quad \forall (i, j) \in L \quad (4.19)$$

$$\bar{S}_{ij}^t = S_{D,j} - S_{G,j} + \sum_{k \in N_d(j)} \bar{S}_{jk}^t + z_{ij} \bar{l}_{ij} \quad \forall j \in N \quad (4.20)$$

$$u_j \bar{l}_{ij} \geq \max \{(\hat{P}_{ij}^b)^2, (\bar{P}_{ij}^b)^2\} + \max \{(\hat{Q}_{ij}^b - \bar{u}_i b_{ij})^2, (\bar{Q}_{ij}^b - \bar{u}_i b_{ij})^2\} \quad \forall (i, j) \in L \quad (4.21)$$

$$u_i \bar{l}_{ij} \geq \max \{(\hat{P}_{ij}^t)^2, (\bar{P}_{ij}^t)^2\} + \max \{(\hat{Q}_{ij}^t - \bar{u}_i b_{ij})^2, (\bar{Q}_{ij}^t - \bar{u}_i b_{ij})^2\} \quad \forall (i, j) \in L \quad (4.22)$$

$$\bar{S}_{ij}^b = S_{D,j} - S_{G,j} + \sum_{k \in N_d(j)} \bar{S}_{jk}^t, \quad \hat{S}_{ij}^b = S_{D,j} - S_{G,j} + \sum_{k \in N_d(j)} \hat{S}_{jk}^t \quad \forall j \in N \quad (4.23)$$

$$\bar{u}_i \leq V_{max}^2 \quad \forall (i, j) \in L \quad (4.24)$$

$$P_{ij}^t \leq \bar{P}_{ij}^t \leq P_{ij}^{max}, Q_{ij}^t \leq \bar{Q}_{ij}^t \leq Q_{ij}^{max} \quad \forall i \in N \quad (4.25)$$

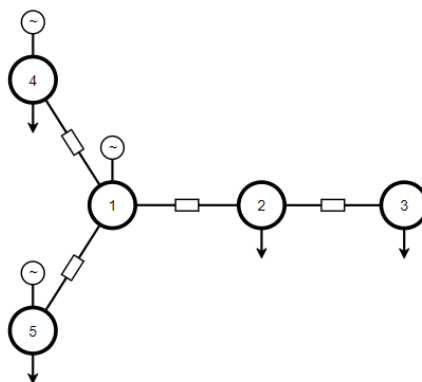
Για τα μοντέλα χαλαρωμένης βέλτιστης ροής ισχύος πρέπει να αξιολογηθεί και η ακρίβεια της χαλάρωσης τους σε σχέση με τα αρχικά τους μη χαλαρωμένα, δηλαδή κατά πόσο οι βέλτιστες λύσεις τους είναι εφικτές και για τα αρχικά τους προβλήματα, ικανοποιώντας όλους τους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Ουσιαστικά, η χαλάρωση των προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος SOCP και Augmented SOCP κρίνεται ακριβής εάν τα υπόλοιπα των χαλαρωμένων περιορισμών (4.17) είναι μηδενικά, δηλαδή τα δύο μέλη είναι ίσα.

#### 4.4.2 Διαδικασία

Τα μοντέλα της βέλτιστης ροής ισχύος που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, εφαρμόζονται στα τροποποιημένα δίκτυα διανομής 5 και 69 κόμβων από τα δεδομένα δικτύων του MATPOWER [12],[13], των οποίων τα δεδομένα παραθέτονται αναλυτικά στο

Παράρτημα Α και Παράρτημα Β, αντίστοιχα. Σε κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα προσθέτονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίες παράγουν μόνο ενεργό ισχύ και εξετάζουμε την ακρίβεια τους, συγκρίνοντας κάποιες συγκεκριμένες παραμέτρους. Τα δίκτυα αυτά στην μελέτη αυτή θεωρούνται ισορροπημένα, μονογραμμικά συστήματα, για τα οποία χρησιμοποιείται μόνο η σύνθετη αντίσταση των γραμμών της θετικής ακολουθίας. Για όλα τα μοντέλα της ενότητας αυτής, το ωριαίο κόστος παραγωγής ρυθμίζεται στα 2 \$/MWh για τη γεννήτρια στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και για τις υπόλοιπες γεννήτριες στο 1 \$/MWh, ενώ τα όρια μέτρου τάσης καθορίζονται από 0,9 α.μ. μέχρι 1,1 α.μ. Επίσης, ελέγχονται κατά πόσο είναι ακτινικά, ώστε αν δεν είναι να τροποποιηθούν κατάλληλα για να γίνουν, κάτι το οποίο ελέγχεται με τις ορθές φορές των ροών ενεργού ισχύος από τη DC βέλτιστη ροής ισχύος με τη βοήθεια του MATPOWER του δικτύου χωρίς παραγωγή από διανεμημένες μονάδες. Για τα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος Augmented SOCP και SOCP, ελέγχεται και η ακρίβεια της χαλάρωσης τους σε σχέση με το αρχικό τους πρόβλημα, υπολογίζοντας τη διαφορά της τιμής των δύο μελών του χαλαρωμένου περιορισμού (4.17) και χαρακτηρίζοντας τα ως ακριβή για διαφορές κάτω των  $10^{-2}$  α.μ., αφού λόγω της αριθμητικής ακρίβειας των επιλυτών δεν μπορούμε να έχουμε διαφορά ακριβώς μηδενική. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που διαμορφώνονται σε κάθε μοντέλο, προφανώς εκτός από το ήδη υπάρχον του MATPOWER, υλοποιούνται στη MATLAB χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη βελτιστοποίησης YALMIP [14] και επιλύονται με τη βοήθεια του επιλυτή IPOPT [15]. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι ο αλγόριθμος του επιλυτή IPOPT γραμμικοποιεί τυχόν μη γραμμικούς περιορισμούς, οπότε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε για το μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος DistFlow, δεν είναι τελείως αντιπροσωπευτικά για το αρχικό μοντέλο του προβλήματος.

Αρχικά, εξετάζουμε το δίκτυο διανομής 5 κόμβων που ουσιαστικά προκύπτει από το δίκτυο 4 ζυγών του MATPOWER και φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στο δίκτυο δηλαδή αυτό, προσθέτουμε ένα επιπλέον ζυγό και δύο μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής 1 MW, χωρίς δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Πιο συγκεκριμένα στο πίνακα αυτό φαίνονται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε μοντέλου, η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ προς το δίκτυο διανομής, το ελάχιστο και μέγιστο μέτρο τάσης που παρατηρείται και ο υπολογιστικός χρόνος κάθε μοντέλου. Έτσι, αξιολογείται η ακρίβεια και η πολυπλοκότητα των διαφόρων μοντέλων, προσεγγιστικών και μη, μεταξύ τους και σε σχέση με το μοντέλο του MATPOWER. Έπειτα, εξετάζουμε ένα μεγαλύτερο δίκτυο διανομής και συγκεκριμένα αυτό με τους 69 ζυγούς του MATPOWER, στο οποίο προσθέτουμε επιπλέον 7 μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής 1 MW και σταθερά μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Αντίστοιχα με τα αποτελέσματα του πρώτου δικτύου, στον Πίνακα 4.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη βέλτιστη ροή ισχύος του μεγάλου δικτύου διανομής.



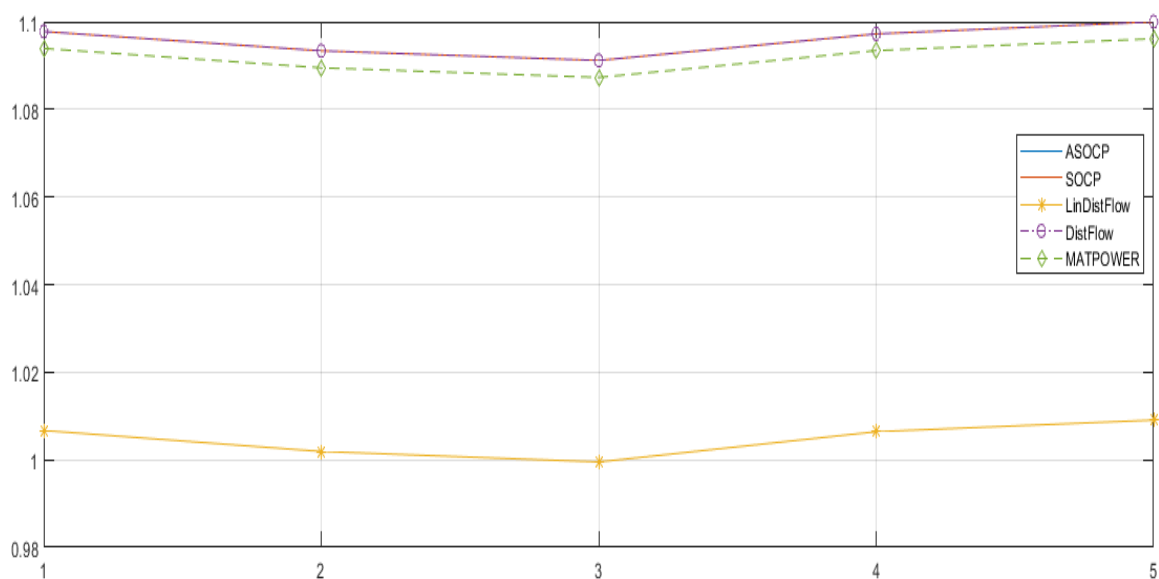
Σχήμα 4.3: Δίκτυο διανομής 5 κόμβων.

### 4.4.3 Αποτελέσματα

Πιο κάτω φαίνονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος για τα δίκτυα που αναφέρθηκαν πιο πάνω, όπως και οι γραφικές απεικονίσεις του μέτρου τάσεως των ζυγών.

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βέλτιστης ροής ισχύος για το δίκτυο διανομής 5 κόμβων χρησιμοποιώντας τα μοντέλα που αναφέρθηκαν.

Δίκτυο Διανομής 5 κόμβων					
	ASOCP	SOCP	LinDistFlow	DistFlow	MATPOWER
Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)	1,6040	1,6040	1,6000	1,6040	1,6041
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	-0,4000	-0,4000	-0,4000	-0,4000	-0,3982
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVar)	0,6081	0,6081	0,6000	0,6081	0,6067
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_3 = 1,0912$	$V_3 = 1,0912$	$V_3 = 0,9995$	$V_3 = 1,0912$	$V_3 = 1,0873$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_5 = 1,1000$	$V_5 = 1,1000$	$V_5 = 1,0091$	$V_5 = 1,1000$	$V_5 = 1,0961$
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	1,0470	0,7030	0,6720	0,6900	0,2016

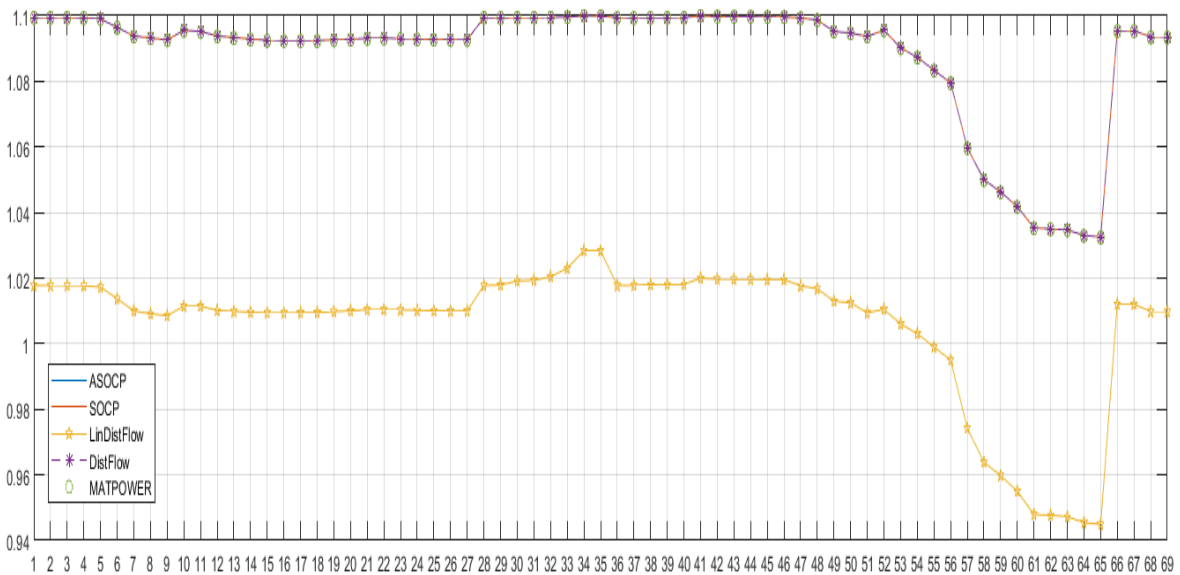


Εικόνα 4.1: Γραφική απεικόνιση του μέτρου τάσης σε α.μ. (άξονας y) των 5 ζυγών του δικτύου (άξονας x) των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος.



Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βέλτιστης ροής ισχύος για το δίκτυο διανομής 69 κόμβων χρησιμοποιώντας τα μοντέλα που αναφέρθηκαν.

Δίκτυο Διανομής 69 κόμβων					
	ASOCP	SOCP	LinDistFlow	DistFlow	MATPOWER
Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)	3,9393	3,9393	3,8021	3,9393	3,9392
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	0	0	0	0	0
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVar)	2,7539	2,7539	2,6947	2,7539	2,7539
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0325$	$V_{65} = 1,0325$	$V_{65} = 0,9449$	$V_{65} = 1,0325$	$V_{65} = 1,0324$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{34,41} = 1,1000$	$V_{34,41} = 1,1000$	$V_{34} = 1,0284$	$V_{34,41} = 1,1000$	$V_{41} = 1,1000$
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	1,0940	0,6500	0,6050	0,6370	0,2854



Εικόνα 4.2: Γραφική απεικόνιση του μέτρου τάσης σε α.μ. (άξονας y) των 69 ζυγών του δικτύου (άξονας x) των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος.

Παρατηρούμε ότι και για τα δύο δίκτυα έχουμε ίδια αποτελέσματα για τα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος ASOCP, SOCP και DistFlow, καθώς οι διαφορές τους είναι πολύ πιο

κάτω από  $10^{-4}$  αντίστοιχες μονάδες μέτρησης. Επίσης, γίνεται ξεκάθαρο ότι το μοντέλο LinDistFlow με τις προσεγγίσεις είναι πολύ απλοποιημένο τελικά και έχει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα υπόλοιπα, άρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εις βάθος ανάλυση.

Όσον αφορά τα μέγιστα και ελάχιστα μέτρα τάσης, παρατηρούμε ότι και για τα πέντε μοντέλα, βρίσκονται στους ίδιους ζυγούς, εκτός από ο μέγιστο μέτρο τάσης στο δίκτυο 69 κόμβων που διαφέρουν οι ζυγοί, για το μοντέλο αναφοράς και το LinDistFlow. Οι τιμές του μέτρου των τάσεων των ζυγών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1 και Εικόνα 4.2 είναι πάρα πολύ κοντινές εκτός από το μοντέλο LinDistFlow, που είναι όπως περιμέναμε πιο κοντά στο 1 α.μ., αλλά έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Όσον αφορά την συμπεριφορά των μοντέλων ASOCP, SOCP και DistFlow σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς του AC OPF του MATPOWER, είναι παρόμοια, όπως θα θέλαμε και έχουν πάρα πολύ κοντινά αποτελέσματα. Σε σχέση με τις διαφορές ανάμεσα στα τρία αυτά μοντέλα και του μοντέλου αναφοράς, σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι η μεγαλύτερη απόκλιση στις ροές ισχύος στο δίκτυο 5 ζυγών είναι στα 0,0027 MW, για την ενεργό ισχύ που ρέει στη γραμμή 1-4, ενώ αντίστοιχα για το δίκτυο 69 ζυγών, η μεγαλύτερη απόκλιση είναι στα 0,0352 MW, για την ενεργό ισχύ που ρέει στη γραμμή 11-66. Για την απόκλιση στο μέτρο της τάσης έχουμε πολύ καλά αποτελέσματα, αφού για το μικρότερο δίκτυο διανομής κόμβων είναι μικρότερη από  $10^{-4}$  α.μ. και για το μεγαλύτερο δίκτυο μικρότερη από  $10^{-3}$  α.μ.

Οι υπολογιστικοί χρόνοι που φαίνονται δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματική διαφορά μεταξύ των μοντέλων, γιατί υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που διαφοροποιούνται. Καταρχήν, το μοντέλο του MATPOWER, υπολογίζεται με πολύ πιο διαφορετικό τρόπο από τα άλλα, για τα οποία χρησιμοποιούμε το YALMIP, οπότε δεν μπορούμε να συγκρίνουμε ξεκάθαρα τα τέσσερα μοντέλα αυτά με τα ήδη υπάρχον του MATPOWER. Επίσης, για το μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος DistFlow, χρησιμοποιείται ένας χειροκίνητος χειρισμός για την μείωση του πεδίου ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή της παραγόμενης ενεργού ισχύος και προφανώς αυτό αποσυμφορίζει την υπολογιστική απαίτηση του προβλήματος, για αυτό και δεν μπορούμε να συγκρίνουμε αντικειμενικά το πρόβλημα αυτό με τα υπόλοιπα που υλοποιούνται μέσω YALMIP. Έτσι, καταλήγουμε ότι η πιο αντικειμενική σύγκριση των υπολογιστικών χρόνων, μπορεί να γίνει μεταξύ των μοντέλων ASOCP, SOCP και LinDistFlow, τα οποία και για τα δύο δίκτυα διανομής που εξετάζονται έχουν ξεκάθαρες διαφορές. Όπως, θα ήταν λογικό το LinDistFlow, είναι το γραμμικοποιημένο προσεγγιστικό μοντέλο, οπότε είναι και το πιο γρήγορο και το ASOCP το πιο αργό, αφού αποτελεί το αυξημένο μοντέλο με επιπλέον περιορισμούς του SOCP.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω αξιολογούμε την ακρίβεια της χαλάρωσης των μοντέλων ASOCP και SOCP, σε σχέση με τα αρχικά τους προβλήματα και σε σχέση με το όριο παραβίασης  $10^{-2}$  α.μ. κρίνονται και για τα δύο δίκτυα διανομής ακριβή.

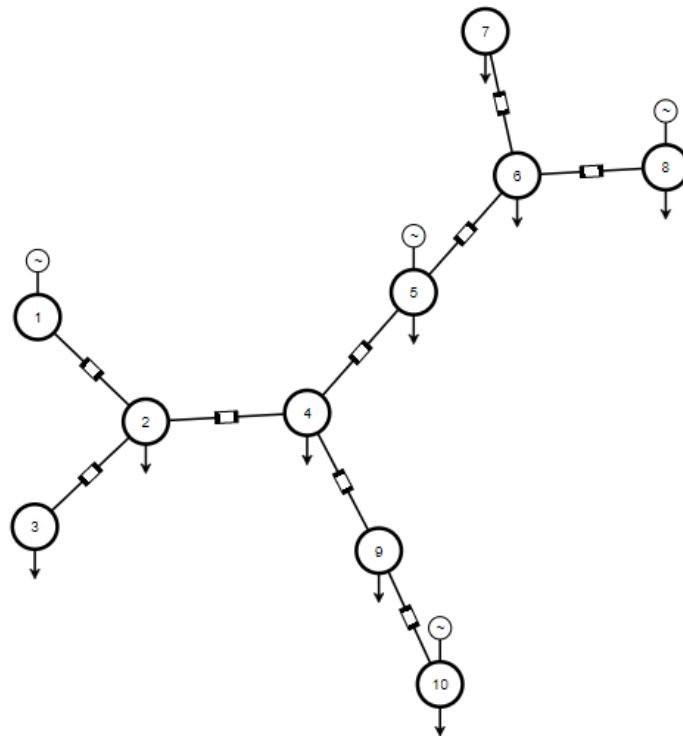
## 4.5 Διαφορά Αυξημένου και Μη Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος

### 4.5.1 Διαδικασία

Παρατηρείται ότι τα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος Augmented SOCP και SOCP έχουν πάρα πολύ μικρές διαφορές στις βέλτιστες τιμές που μας δίνουν, όχι μόνο από τις πιο πάνω προσομοιώσεις που παρουσιάζονται αλλά και από άλλες που έχουν εξεταστεί, κάτι που σαφώς προκύπτει όταν και οι δύο χαλαρώσεις είναι ακριβείς και από τα αρχικά προβλήματα προκύπτει το ίδιο ολικό βέλτιστο. Στην ενότητα αυτή προσπαθούμε να βρούμε και να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων για ένα δίκτυο διανομής τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους. Δηλαδή, θέλουμε να βρούμε την περίπτωση όπου το αυξημένο πρόβλημα με τους επιπλέον περιορισμούς που του τοποθετούνται σταματά να έχει την ίδια ολική λύση με το αρχικό μη χαλαρωμένο πρόβλημα.

Μετά από αρκετές δοκιμές, αλλάζοντας τα όρια του μέτρου τάσης, τη ενεργό και άεργο ζήτηση, τα στοιχεία των γραμμών και τα όρια της ροής φαινόμενης ισχύος καταλήγουμε σε ένα δίκτυο διανομής 10 ζυγών, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Η γεννήτρια του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ βρίσκεται στο ζυγό 1 με κόστος παραγωγής στα 2 \$/MWh, ενώ τα όρια των μέτρων των τάσεων των ζυγών είναι από 0,99 α.μ. μέχρι 1,01 α.μ. Υπάρχει και διεσπαρμένη παραγωγή με γεννήτριες κόστους παραγωγής 1 \$/MWh στους ζυγούς 5, 8 και 10. Επιπλέον, για κάθε γραμμή καθορίζονται η αντίσταση, η αντίδραση και η συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα στα 0,06 α.μ. και το όριο ροής φαινόμενης ισχύος στα 5 MVA. Πιο αναλυτικά τα στοιχεία του δικτύου αυτού παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής ισχύος του δικτύου διανομής αυτού για Augmented SOCP και SOCP φαίνονται στον Πίνακα 4.3, ενώ στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος των δύο μοντέλων αυτών.



Σχήμα 4.4: Δίκτυο διανομής 10 κόμβων.

#### 4.5.2 Αποτελέσματα

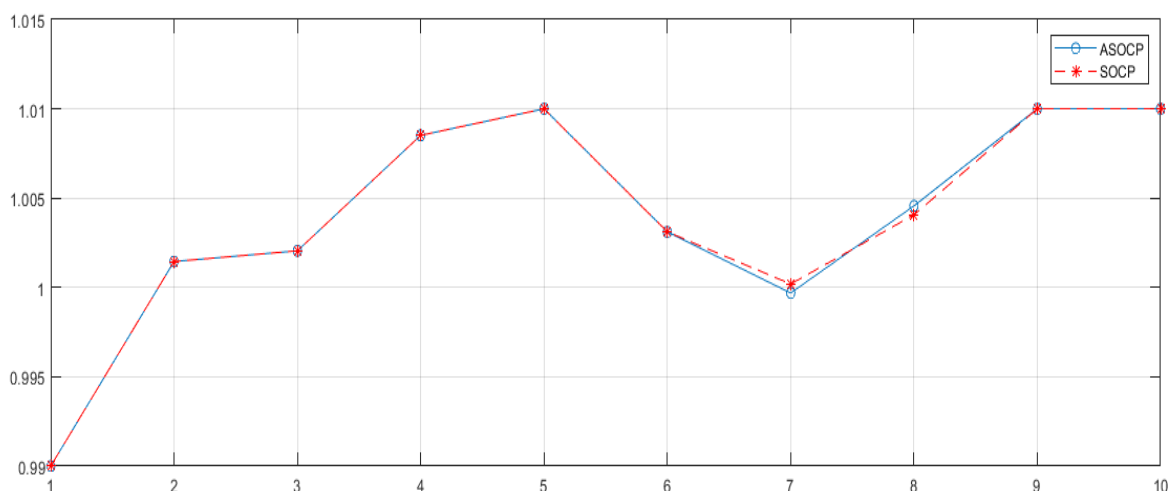
Πιο κάτω φαίνονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα του αυξημένου και μη μοντέλου βέλτιστης ροής ισχύος για τα δίκτυο διανομής 10 ζυγών που αναφέρθηκε πιο πάνω, όπως και η γραφική αναπαράσταση του μέτρου τάσεως των ζυγών για τα μοντέλα αυτά.

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βέλτιστης ροής ισχύος για το δίκτυο διανομής 10 κόμβων χρησιμοποιώντας τα χαλαρωμένα μοντέλα.

Δίκτυο Διανομής 10 κόμβων		
	ASOCP	SOCP
Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)	3,6739	3,6739
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	0,8116	0,8116
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	-2,9493	-2,9493
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_1 = 0,9900$	$V_1 = 0,9900$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{5,9,10} = 1,0100$	$V_{5,9,10} = 1,0100$
Ακριβές Χαλάρωση	OXI	OXI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	1,3280	0,7340

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις ροές ενεργού και αέργου ισχύος βέλτιστης ροής ισχύος των δύο χαλαρωμένων μοντέλων για το δίκτυο διανομής 10 κόμβων.

Γραμμή	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)		Ροή Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	
	ASOCP	SOCP	ASOCP	SOCP
1-2	0,8116	0,8116	-2,9493	-2,9493
2-3	0,1217	0,1217	-0,5204	-0,5204
2-4	0,5126	0,5126	-1,9712	-1,9712
4-5	0,0162	0,0162	-0,5692	-0,5692
5-6	0,8943	0,8943	-0,0399	-0,0399
6-7	0,7907	0,7065	0,1490	0,0645
6-8	-0,0211	0,0630	0,3343	0,4187
4-9	0,3515	0,3515	-0,9009	-0,9009
9-10	0,2260	0,2260	-0,3753	-0,3753



Εικόνα 4.3: Γραφική απεικόνιση του μέτρου τάσης σε α.μ. (άξονας y) των 69 ζυγών του δικτύου (άξονας x) των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος.

Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι οι μεγάλες διαφορές των δύο αυτών μοντέλων βρίσκονται στις ροές ισχύος τους, αλλά για συγκεκριμένες γραμμές, οι οποίες ουσιαστικά είναι δύο, οι 6-7 και 6-8. Οι διαφορές είναι της τάξης των  $10^{-2}$  MW και MVA<sub>r</sub>, κάτι που όμως όντως είναι υπολογίσιμο, αν αναλογιστεί κανείς ότι για τα μοντέλα αυτά οι μεταξύ τους αποκλίσεις ροών ισχύος και για το δίκτυο διανομής 5 ζυγών και 69 ζυγών είναι πολύ μικρότερες από  $10^{-4}$  MW και MVA<sub>r</sub>. Επίσης, παρατηρούνται διαφορές και στα μέτρα των τάσεων των ζυγών 7 και 8, όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση της Εικόνα 4.3, της τάξεως του  $10^{-4}$  α.μ., ενώ και πάλι στα δίκτυα διανομής 5 και 69 ζυγών, οι διαφορές ήταν μικρότερες του  $10^{-4}$  α.μ.

Όσον αφορά την ακρίβεια της χαλάρωσης των δύο μοντέλων, παρατηρούμε ότι και τα δύο είναι ανακριβή. Υπάρχει η περίπτωση να έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ της βέλτιστης ροής ισχύος των δύο μοντέλων, αλλά ταυτόχρονα να είναι και οι δύο χαλαρώσεις ακριβείς, κάτι που γίνεται όταν το αυξημένο μοντέλο έχει υποβέλτιστη ολική λύση. Προφανώς, όταν έχουμε έστω μια ανακριβή χαλάρωση, οι λύσεις θα είναι διαφορετικές και θα πετυχαίναμε το σκοπό μας, αλλά τελικά η περίπτωση αυτή που μελετάμε είναι αυτή δύο ανακριβών χαλαρώσεων της βέλτιστης ροής ισχύος για Augmented SOCP και SOCP, αντίστοιχα.



## 5 Εφαρμογή

### 5.1 Ανακεφαλαίωση

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, βρισκόμαστε στο σημείο όπου οι έννοιες των ενεργών δικτύων διανομής και της ευελιξίας έχουν συστηθεί και οι οποίες πρόκειται να έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς κινούμαστε προς ένα κόσμο και σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λιγότερο εξαρτώμενο από ορυκτά καύσιμα και περισσότερο από βιώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα ενεργά δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από αυξημένη διείσδυση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, κάτι το οποίο με τη σειρά του απαιτεί καλύτερες μεθόδους σχεδιασμού, εποπτείας, ελέγχου και επικοινωνίας μεταξύ των στοιχείων του συστήματος. Έτσι, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για εύρεση της βέλτιστης τεχνικής και οικονομικής λειτουργίας του ενεργού δικτύου διανομής με τη βοήθεια αλγορίθμου βελτιστοποίησης, ο οποίος θα εγγυάται την εύρωστη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, ικανοποιώντας όλες αυτές τις σύνθετες συνθήκες. Σημαντικό κομμάτι αποτελεί και η ευελιξία του συστήματος διανομής, διότι είναι αυτή που εξασφαλίζει κατά κύριο λόγο την ελευθερία του συστήματος, να λειτουργήσει περισσότερο προς τα όρια έχοντας περισσότερη ασφάλεια και να εισάγει περισσότερες διανεμημένες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, που ουσιαστικά είναι και το ζητούμενο.

Στη συνέχεια αναλύσαμε την έννοια της βέλτιστης ροής ισχύος, το οποίο είναι το εργαλείο προγραμματισμού και σχεδιασμού της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και όσο περισσότερους περιορισμούς λαμβάνουμε υπόψη τόσο πιο αξιόπιστη είναι η λειτουργία του. Παρουσιάστηκαν τα μοντέλα έγχυσης ζυγού και ροής ισχύος κλάδου, ενώ διατυπώθηκαν και τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος με το καθένα από αυτά. Το μοντέλο ροής ισχύος κλάδου, είναι αυτό που προτιμάται για την αναπαράσταση ακτινικών δικτύων διανομής και παρουσιάζονται προσεγγιστικά και χαλαρωμένα μοντέλα του, ώστε να καταλήξουμε στο χαλαρωμένο μοντέλο κυρτού προγραμματισμού δεύτερης τάξης (SOCP) και το αντίστοιχο αυξημένο, των οποίων διατυπώνεται το πρόβλημα και καταγράφονται αποτελέσματα προσομοίωσης για κάποια δίκτυα διανομής. Έτσι, αφού κρίνονται ικανοποιητικά τα αποτελέσματα που αποφέρουν τα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος SOCP και το Augmented SOCP, χρησιμοποιούνται σε κάποιες εφαρμογές ελέγχου, βοηθώντας μας να εξασφαλίσουμε μερικά ασφαλή συμπεράσματα για κάποιες σημαντικές λειτουργίες ελέγχου των ενεργών δικτύων διανομής.

### 5.2 Έλεγχος Ενεργού Ισχύος

Στην ενότητα αυτή θα εφαρμόσουμε τα χαλαρωμένα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος, που παρουσιάστηκαν πριν, σε προβλήματα ελέγχου ενεργού ισχύος και πιο συγκεκριμένα σε προβλήματα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση τις απώλειες ενεργού ισχύος και το τετραγωνικό κόστος παραγωγής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία και το δίκτυο διανομής στο οποίο εφαρμόστηκαν τα προβλήματα αυτά, μαζί με τα αποτελέσματα που πήραμε.

#### 5.2.1 Διαδικασία

Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούμε τα χαλαρωμένα μοντέλα της βέλτιστης ροής ισχύος SOCP και Augmented SOCP που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και συγκεκριμένα τους περιορισμούς (4.8)-(4.10), (4.12)-(4.16), (4.17) και (4.8)-(4.10), (4.12)-(4.16), (4.17)-(4.25), αντίστοιχα. Στο πρώτο σενάριο, όπου εξετάζουμε τις απώλειες ισχύος ως

αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης εφαρμόζουμε την σχέση (5.1), η οποία ουσιαστικά εκφράζει την ελαχιστοποίηση των ωμικών απωλειών των γραμμών του δικτύου διανομής. Στο δεύτερο σενάριο, όπου εξετάζεται η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται η σχέση (5.2), που μοιάζει με την (4.6), αλλά τώρα το  $C_{G,i}$  αποτελεί τετραγωνική συνάρτηση κόστους παραγωγής.

$$\min \sum_{i \in N} r_{ij} l_{ij} \quad (5.1)$$

$$\min \sum_{i \in N} C_{G,i} (P_{G,i}) \quad (5.2)$$

Τα μοντέλα αυτά και για τα δύο σενάρια εφαρμόζονται σε τροποποιημένο δίκτυο διανομής 69 κόμβων από τα δεδομένα δικτύων του MATPOWER, τα στοιχεία του οποίου βρίσκονται στο Παράρτημα Β και μοιάζει με αυτό που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το δίκτυο, όπως είναι, έχει μια γεννήτρια στον ζυγό 1, που βρίσκεται ο  $Y/\Sigma$   $YT/MT$ , η οποία έχει δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος από 0 μέχρι 999 MW και δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος από -999 μέχρι 999 MVA<sub>r</sub>. Για την εφαρμογή αυτή προσθέτουμε τυχαία διανεμημένη παραγωγή στο δίκτυο και συγκεκριμένα στους ζυγούς 10, 22 και 34, με δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος από 0 μέχρι 1 MW, αλλά χωρίς δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Τα όρια μέτρου τάσης καθορίζονται και πάλι από 0,9 α.μ. μέχρι 1,1 α.μ., ενώ το δίκτυο ελέγχεται με τη βοήθεια της DC βέλτιστη ροής ισχύος του MATPOWER του δικτύου, χωρίς παραγωγή από διανεμημένες μονάδες, και είναι όντως ακτινικό. Για κάθε σενάριο ελέγχεται όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ακρίβεια της χαλάρωσης των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος Augmented SOCP και SOCP, υπολογίζοντας τη διαφορά της τιμής των δύο μελών του χαλαρωμένου περιορισμού (4.17), με όριο απόφασης τα  $10^{-2}$  α.μ. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που διαμορφώνονται με τα δύο μοντέλα και για τα δύο σενάρια, υλοποιούνται στη MALTAB χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη βελτιστοποίησης YALMIP και επιλύονται με τη βοήθεια του επιλυτή IPOPT.

Για το πρώτο σενάριο, δηλαδή το πρόβλημα ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η (5.1), οπότε τα ωριαία κόστη των γεννητριών δεν παίζουν κάποιο ρόλο. Δε χρειάζεται κάποια άλλη ενέργεια, οπότε τρέχουμε την προσομοίωση και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στον Πίνακα 5.1. Για το δεύτερο σενάριο και το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού ωριαίου κόστους παραγωγής, με αντικειμενική συνάρτηση τη (5.2), ρυθμίζουμε κατάλληλα τα κόστη παραγωγής των γεννητριών. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας κόστους δευτέρας τάξης καθορίζεται για όλες τις γεννήτριες στο 1 \$/MWh<sup>2</sup>, ενώ ο γραμμικός παράγοντας κόστους ρυθμίζεται στα 2 \$/MWh για τη γεννήτρια στον  $Y/\Sigma$   $YT/MT$  και για τις υπόλοιπες γεννήτριες στο 1 \$/MWh. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του σεναρίου αυτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Επίσης, στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος Augmented SOCP και SOCP για το ίδιο δίκτυο, με γραμμικό κόστος γεννητριών και συγκεκριμένα τιμή 2 \$/MWh για τη γεννήτρια στον  $Y/\Sigma$   $YT/MT$  και 1 \$/MWh για τις διανεμημένες γεννήτριες, ώστε να το τα χρησιμοποιήσουμε ως σύγκριση για τα σενάρια που εξετάζουμε.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τα δύο σενάρια και τη χαλαρωμένη βέλτιστη ροή ισχύος με γραμμικό κόστος που εξετάζουμε και φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες, αφορούν την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από τον  $Y/\Sigma$   $YT/MT$  προς το δίκτυο διανομής, τις συνολικές απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος στις γραμμές του δικτύου, το ελάχιστο και μέγιστο μέτρο τάσης που παρατηρείται και ο υπολογιστικός χρόνος κάθε μοντέλου. Επίσης, για το σενάριο 2, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2 και τη βέλτιστη ροή ισχύος που χρησιμοποιούμε ως



αναφορά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3, παρουσιάζεται και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των δύο μοντέλων, η οποία εκφράζεται σε \$/h, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση για το σενάριο 1, ουσιαστικά είναι οι ωμικές απώλειες των γραμμών.

### 5.2.2 Αποτελέσματα

Πιο κάτω φαίνονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των χαλαρωμένων μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος για τα δύο σενάρια που αναφέρθηκαν για τον έλεγχο ενεργού ισχύος και για την βέλτιστη ροή ισχύος με γραμμικό κόστος.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος.

Σενάριο 1		
	ASOCP	SOCP
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	2,4206	2,4206
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVar)	2,7584	2,7584
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1441	0,1441
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVar)	0,0637	0,0637
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0274$	$V_{65} = 1,0274$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_1 = 1,1000$	$V_1 = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	8,0240	1,4320

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης τετραγωνικού κόστους παραγωγής.

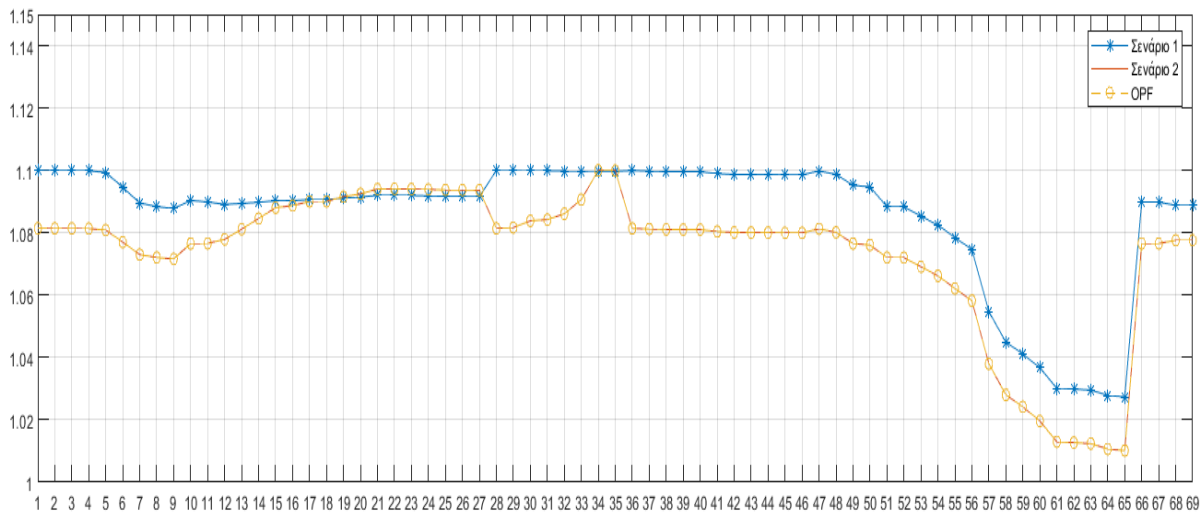
Σενάριο 2		
	ASOCP	SOCP
Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)	8,9126	8,9126
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	0,9780	0,9780
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVar)	2,7691	2,7691

Πίνακας 5.2: (Συνέχεια)		
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1759	0,1759
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	0,0744	0,0744
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0102$	$V_{65} = 1,0102$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{34} = 1,1000$	$V_{34} = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	4,4860	1,2160

Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης τετραγωνικού κόστους παραγωγής.

Βέλτιστη Ροή Ισχύος		
	ASOCP	SOCP
Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)	4,9561	4,9561
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	0,9780	0,9780
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	2,7691	2,7691
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1759	0,1759
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	0,0744	0,0744
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0102$	$V_{65} = 1,0102$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{34} = 1,1000$	$V_{34} = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	9,6250	2,2180

Επίσης, παρουσιάζουμε και μια γραφική απεικόνιση του μέτρου της τάσης σε α.μ. των 69 ζυγών για κάθε σενάριο και για τη βέλτιστη ροή ισχύος.



Εικόνα 5.1: Γραφική απεικόνιση του μέτρου τάσης σε α.μ. (άξονας y) των ζυγών του δικτύου (άξονας x) του μοντέλου SOCP για τα δύο σενάρια εφαρμογής ελέγχου ενεργού ισχύος και της βέλτιστης ροής ισχύος.

### 5.2.3 Παρατηρήσεις

Καταρχήν, εκτός από ότι υπολογίζεται, φαίνεται ξεκάθαρα και για τα δύο σενάρια, ότι η χαλάρωση των μοντέλων Augmented SOCP και SOCP, είναι ακριβής, αφού έχουμε με κατώφλι  $10^{-4}$  των αντίστοιχων μονάδων μέτρησης, ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα για κάθε περίπτωση, οπότε έχουμε αρκετά καλή εξασφάλιση της ορθότητας των μοντέλων και των αποτελεσμάτων που παίρνουμε. Επίσης, βλέπουμε μια σχετικά υπολογίσιμη διαφορά, όπως περιμέναμε, στον υπολογιστικό χρόνο μεταξύ των δύο μοντέλων ASOCP και SOCP κάθε σεναρίου, με το πρώτο να είναι προφανώς πιο περίπλοκο, λόγω των επιπλέον περιορισμών.

Όσον αφορά τα μοντέλα ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος, σε σχέση με τα μοντέλα χαλαρωμένης βέλτιστης ροής ισχύος, παρατηρούμε όπως αναμέναμε αρκετά μεγαλύτερη έγχυση ενεργού ισχύος από την γεννήτρια του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, αλλά ελαφρώς μικρότερη έγχυση αέργου ισχύος. Οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι όντως μικρότερες για τα μοντέλα του πρώτου σεναρίου, όπως όμως και οι απώλειες αέργου ισχύος. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές του μέτρου τάσης, παρατηρούνται στους ίδιους ζυγούς, με ίδια μέγιστη τιμή αλλά διαφορετική ελάχιστη τιμή, ενώ όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1, οι τιμές του μέτρου τάσης των μοντέλων ελαχιστοποίησης των απωλειών ισχύος είναι πιο κοντά στο 1,1 α.μ. σε σχέση με αυτές των μοντέλων της βέλτιστης ροής ισχύος, συνεπώς έχουν μικρότερη διακύμανση.

Όσον αφορά τα μοντέλα ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού κόστους παραγωγής, δηλαδή της βέλτιστης ροής ισχύος με τετραγωνικό κόστος σε σχέση με τα μοντέλα της βέλτιστης ροής ισχύος με γραμμικό κόστος, παρατηρούμε όπως περιμέναμε, πως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή το συνολικό ωριαίο κόστος παραγωγής, είναι μεγαλύτερο στη πρώτη περίπτωση. Λόγω της μεγαλύτερης τιμής του γραμμικού παράγοντα κόστους και στις δύο αυτές περιπτώσεις, βλέπουμε πως όλα τα υπόλοιπα μεγέθη είναι ακριβώς τα ίδια και οι εγχύσεις ισχύος και οι απώλειες ισχύος και τα μέτρα των τάσεων, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.1, που συμπίπτουν. Οπότε, καταλήγουμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το

μοντέλο αυτό, της χαλαρωμένης βέλτιστης ροής ισχύος το ίδιο αποτελεσματικά και για τετραγωνικές και για γραμμικές συναρτήσεις του ωριαίου κόστους παραγωγής.

### 5.3 Έλεγχος Αέργου Ισχύος

Στην ενότητα αυτή θα εφαρμόσουμε τα χαλαρωμένα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος, που παρουσιάστηκαν πριν, σε προβλήματα ελέγχου αέργου ισχύος και πιο συγκεκριμένα σε προβλήματα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση τις απώλειες αέργου ισχύος και την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αέργου ισχύος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία και τα δίκτυο διανομής στο οποίο εφαρμόστηκαν τα προβλήματα αυτά, μαζί με τα αποτελέσματα που πήραμε.

#### 5.3.1 Διαδικασία

Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούμε τα χαλαρωμένα μοντέλα της βέλτιστης ροής ισχύος SOCP και Augmented SOCP που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και συγκεκριμένα τους περιορισμούς (4.8)-(4.10), (4.12)-(4.16), (4.17) και (4.8)-(4.10), (4.12)-(4.16), (4.17)-(4.25), αντίστοιχα. Συνολικά εξετάζουμε τέσσερα διαφορετικά σενάρια ελέγχου αέργου ισχύος, αλλά ουσιαστικά χρησιμοποιούμε δύο αντικειμενικές συναρτήσεις σε δύο διαφορετικά δίκτυα. Για τα σενάρια 3 και 5, όπου έχουμε ελαχιστοποίηση των απωλειών αέργου ισχύος, ως αντικειμενική συνάρτηση εφαρμόζεται η σχέση (5.3), ενώ για τα σενάρια 4 και 6, στα οποία εξετάζουμε την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αέργου ισχύος, ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται η σχέση (5.4).

$$\min \sum_{i \in N} x_{ij} l_{ij} \quad (5.3)$$

$$\min \sum_{i \in N} Q_{G_i} \quad (5.4)$$

Τα μοντέλα για τα σενάρια 3 και 4, εφαρμόζονται στο τροποποιημένο δίκτυο διανομής 69 κόμβων από τα δεδομένα δικτύων του MATPOWER, το οποίο παρουσιάστηκε και στην ενότητα 5.2.1. Οπότε, αφού άεργο ισχύ μπορεί να προσφέρει μόνο η γεννήτρια του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, τότε η εφαρμογή που εξετάζουμε για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αέργου ισχύος ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση της έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο διανομής από το σύστημα μεταφοράς. Για τα σενάρια 5 και 6, χρησιμοποιούμε το δίκτυο αυτό της ενότητας 5.2.1, αλλά με επιπλέον δυνατότητα παραγωγής των διανεμημένων γεννητριών, όχι μόνο ενεργού ισχύος, αλλά και αέργου ισχύος από -1 μέχρι 1 MVA<sub>r</sub>. Συνεπώς, πρόβλημα του σεναρίου 6, δεν είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο διανομής. Για την εφαρμογή αυτή και πάλι ελέγχεται η ακρίβεια της χαλάρωσης των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος Augmented SOCP και SOCP, υπολογίζοντας τη διαφορά της τιμής των δύο μελών του χαλαρωμένου περιορισμού (4.17), με όριο απόφασης τα  $10^{-2}$  α.μ. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που διαμορφώνονται με τα δύο μοντέλα, υλοποιούνται στη MATLAB χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη βελτιστοποίησης YALMIP και επιλύονται με τη βοήθεια του επιλυτή IPOPT.

Για το σενάριο 3, δηλαδή το πρόβλημα ελαχιστοποίησης των απωλειών αέργου ισχύος, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η (5.3), που εκφράζει την ελαχιστοποίηση των επαγωγικών απωλειών των γραμμών του δικτύου, οπότε τα ωριαία κόστη των γεννητριών δεν παίζουν κάποιο ρόλο, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Για το

επόμενο σενάριο και το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της παραγωγής αέργου ισχύος ή ισοδύναμα το πρόβλημα ελαχιστοποίησης έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο διανομής, με αντικειμενική συνάρτηση τη (5.4), πάλι τα κόστη των γεννητριών δε παίζουν ρόλο, αφού ουσιαστικά, όπως είναι η αντικειμενική συνάρτηση, θεωρούνται ως 1 \$/MWh. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του σεναρίου αυτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Το σενάριο 5 είναι το αντίστοιχο του σεναρίου 3 και το σενάριο 6 το αντίστοιχο του σεναρίου 4, άλλα με το τροποποιημένο δίκτυο 69 ζυγών με δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος και από τις διανεμημένες γεννήτριες. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τις προσομοιώσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 5.6 και Πίνακα 5.7, αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα για τα τέσσερα αυτά σενάρια εφαρμογής ελέγχου αέργου ισχύος που εξετάζουμε, φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες και αφορούν την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ προς το δίκτυο διανομής, τις συνολικές απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος στις γραμμές του δικτύου, το ελάχιστο και μέγιστο μέτρο τάσης που παρατηρείται και ο υπολογιστικός χρόνος κάθε μοντέλου.

### 5.3.2 Αποτελέσματα

Πιο κάτω φαίνονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των χαλαρωμένων μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος για τα τέσσερα σενάρια που αναφέρθηκαν για την εφαρμογή ελέγχου αέργου ισχύος.

Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης των απωλειών αέργου ισχύος χωρίς διανεμημένη παραγωγή αέργου ισχύος.

Σενάριο 3		
	ASOCP	SOCP
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	2,3153	2,3151
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	2,7583	2,7583
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1444	0,1444
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	0,0636	0,0636
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0279$	$V_{65} = 1,0279$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_1 = 1,1000$	$V_1 = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	5,3750	1,4540

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης της παραγωγής αέργου ισχύος χωρίς διανεμημένη παραγωγή αέργου ισχύος.

Σενάριο 4		
	ASOCP	SOCP
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	2,3149	2,3149
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	2,7583	2,7583
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1444	0,1444
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	0,0636	0,0636
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0279$	$V_{65} = 1,0279$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_1 = 1,1000$	$V_1 = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	11,9990	1,3130

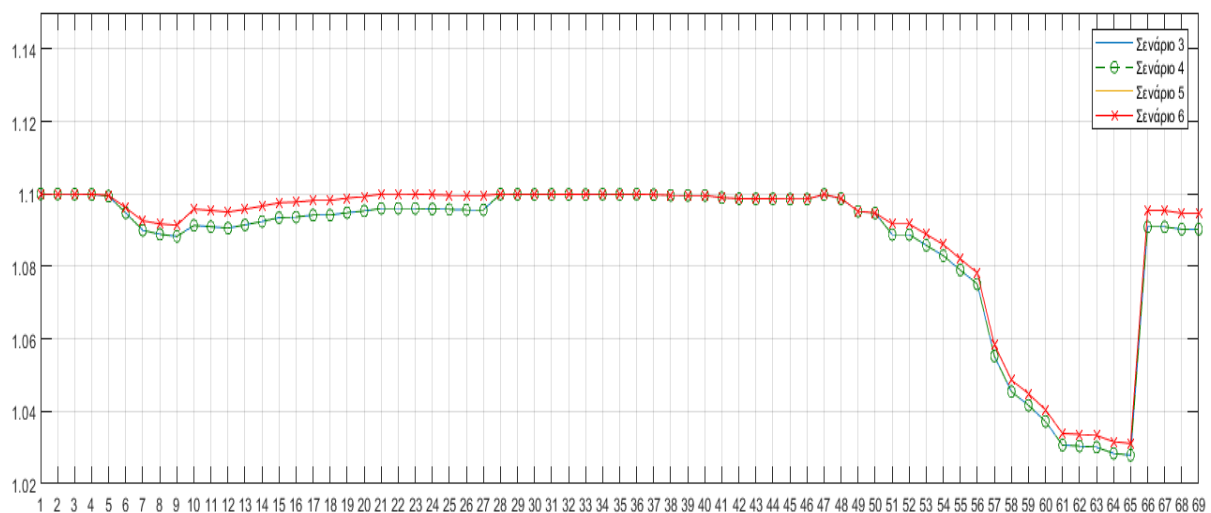
Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης των απωλειών αέργου ισχύος με διανεμημένη παραγωγή αέργου ισχύος.

Σενάριο 5		
	ASOCP	SOCP
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	2,4074	2,4074
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	1,4703	1,4703
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1267	0,1267
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	0,0547	0,0547
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0311$	$V_{65} = 1,0311$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{1,22,34} = 1,1000$	$V_{1,22,34} = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	5,6420	1,5940

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σενάριο ελαχιστοποίησης της παραγωγής αέργου ισχύος με διανεμημένη παραγωγή αέργου ισχύος.

Σενάριο 6		
	ASOCP	SOCP
Έγχυση Ενεργού Ισχύος (MW)	2,4117	2,4117
Έγχυση Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	1,4532	1,4532
Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	0,1267	0,1267
Απώλειες Αέργου Ισχύος (MVA <sub>r</sub> )	0,0547	0,0547
Ελάχιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{65} = 1,0311$	$V_{65} = 1,0311$
Μέγιστο Μέτρο Τάσης (α.μ.)	$V_{1,22,34} = 1,1000$	$V_{1,22,34} = 1,1000$
Ακριβές Χαλάρωση	NAI	NAI
Υπολογιστικός Χρόνος (s)	7,5640	1,7810

Επίσης, παρουσιάζουμε και μια γραφική απεικόνιση του μέτρου της τάσης σε α.μ. των 69 ζυγών για κάθε σενάριο.



Εικόνα 5.2: Γραφική απεικόνιση του μέτρου τάσης σε α.μ. (άξονας y) των ζυγών του δικτύου (άξονας x) του μοντέλου SOCP για τα τέσσερα σενάρια εφαρμογής ελέγχου αέργου ισχύος.

### 5.3.3 Παρατηρήσεις

Καταρχήν, εκτός από ότι υπολογίζεται, φαίνεται ξεκάθαρα και για τα δύο σενάρια, ότι η χαλάρωση των μοντέλων Augmented SOCP και SOCP, είναι ακριβής, αφού έχουμε με

κατώφλι  $10^{-3}$  των αντίστοιχων μονάδων μέτρησης, ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα για κάθε περίπτωση, οπότε έχουμε αρκετά καλή εξασφάλιση της ορθότητας των μοντέλων και των αποτελεσμάτων που παίρνουμε. Επίσης, βλέπουμε μια σχετικά υπολογίσιμη διαφορά, όπως περιμέναμε, στον υπολογιστικό χρόνο μεταξύ των δύο μοντέλων ASOCP και SOCP κάθε σεναρίου, με το πρώτο και πάλι να είναι πιο περίπλοκο, λόγω των επιπλέον περιορισμών, ενώ παρατηρείται μια αρκετά μεγάλη διαφορά τον χρόνο του μοντέλου ASCOP του σεναρίου 5, σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια.

Όπως αναμέναμε τα αποτελέσματα του σεναρίου 3 και 4 είναι σχεδόν τα ίδια, με πάρα πολύ μικρές διαφορές, αφού το δίκτυο στο οποίο εφαρμόζονται έχει έγχυση αέργου ισχύος μόνο από την γεννήτρια του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και ταυτόχρονα, όπως προαναφέρθηκε, ισοδυναμούν και με το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της έγχυσης αέργου ισχύος από το σύστημα μεταφοράς στο δίκτυο διανομής. Τα μέτρα τάσεων των ζυγών των δύο αυτών σεναρίων, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.2, συμπίπτουν.

Τα αποτελέσματα των σεναρίων 5 και 6, ενώ μοντελοποιούνται για το ίδιο δίκτυο διανομής, στο οποίο υπάρχει δυνατότητα διανεμημένης παραγωγής αέργου ισχύος, παρουσιάζουν κάποιες μικρές διαφορές στις τιμές των εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα στο σενάριο 5, παρατηρείται μικρότερη τιμή έγχυσης ενεργού ισχύος, αλλά μεγαλύτερη τιμή έγχυσης αέργου ισχύος, με τα υπόλοιπα μεγέθη να είναι πάρα πολύ κοντινά. Και πάλι τα μέτρα τάσεων των ζυγών των δύο αυτών σεναρίων, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.2, συμπίπτουν.

Όσον αφορά τα μοντέλα ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος, δηλαδή τα σενάρια 3 και 5, παρατηρούμε, όπως αναμέναμε, αρκετά μικρότερη έγχυση αέργου ισχύος από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ του δικτύου με τη δυνατότητα διανεμημένης παραγωγής αέργου ισχύος, αλλά ελαφρώς μεγαλύτερη έγχυση ενεργού ισχύος. Λόγω της παραγωγής αέργου ισχύος και από τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, βλέπουμε ότι οι απώλειες αέργου ισχύος στις γραμμές είναι μικρότερες στο σενάριο 5, όπως και οι απώλειες ενεργού ισχύος. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές του μέτρου τάσης, παρατηρούνται στους ίδιους ζυγούς, με ίδια μέγιστη τιμή αλλά διαφορετική ελάχιστη τιμή, ενώ γενικά βλέπουμε πως οι τιμές του μέτρου τάσης των μοντέλων ελαχιστοποίησης των απωλειών ισχύος του σεναρίου 5, είναι πιο κοντά στο 1,1 α.μ. σε σχέση με αυτές του σεναρίου 3, άρα έχουν μικρότερη διακύμανση. Βέβαια, γενικά, σύμφωνα και με την Εικόνα 5.2, οι τιμές των μέτρων των τάσεων των δύο σεναρίων είναι πολύ κοντά. Τα ίδια γενικά συμπεράσματα παίρνουμε και από τη σύγκριση των μοντέλων ελαχιστοποίησης της παραγωγής αέργου ισχύος των σεναρίων 4 και 6, απλά με κάποιες πολύ μικρές διαφορές στις τιμές εγχύσεως ενεργού και άεργου ισχύος.

Σύγκριση επιδέχονται και τα σενάρια 1 με 3, δηλαδή το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ενεργού ισχύος με το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της αέργου ισχύος για το ίδιο ακριβώς δίκτυο διανομής, χωρίς δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος από τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής. Παρατηρούνται πολύ κοντινά αποτελέσματα μεταξύ τους, δηλαδή διαφορά της τάξης των  $10^{-4}$  MW και MVAr, εκτός από την έγχυση ενεργού ισχύος από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ του δικτύου του σεναρίου 1, που είναι κατά 0,1 MW μεγαλύτερη. Η έγχυση αέργου ισχύος είναι η ίδια, ενώ όπως περιμέναμε οι απώλειες ενεργού ισχύος στο σενάριο 1 είναι ελαφρώς μικρότερες από τις αντίστοιχες του σεναρίου 3 και οι απώλειες αέργου ισχύος του σεναρίου 3 είναι ελαφρώς μικρότερες από αυτές του σεναρίου 1. Όσον αφορά τις τιμές του μέτρου τάσης, οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους παρατηρούνται στους ίδιους ζυγούς, με ίδια μέγιστη τιμή και σχεδόν ίδια ελάχιστη τιμή.



## 6 Συμπεράσματα

### 6.1 Σύνοψη

Γίνεται όλο και πιο ξεκάθαρο πως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, θα κατέχουν εξέχοντα ρόλο στα μελλοντικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, παρέχουν πιο φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία. Έτσι, λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ, της ενίσχυσης της αβεβαιότητας και των προβλημάτων στο δίκτυο, λόγω της διακύμανσης της παραγωγής των μονάδων αυτών, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για περαιτέρω συντονισμένο έλεγχο, εποπτεία, επικοινωνία και προγραμματισμό σε πιο γρήγορο χρονικό διάστημα των ενεργών δικτύων διανομής μαζί και με την διαθέσιμη ευελιξία που προσφέρουν.

Για αυτό το λόγο στην εργασία αυτή, χρησιμοποιούμε ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία προγραμματισμού της βέλτιστης λειτουργίας των δικτύων διανομής, τη βέλτιστη ροή ισχύος και συγκεκριμένα εξετάζουμε την αποτελεσματικότητα μοντέλων κυρτής χαλαρωμένης βέλτιστης ροής ισχύος βασισμένα στις εξισώσεις DistFlow, καθώς και την ακρίβεια της χαλάρωσής τους, η οποία μας εγγυάται την εύρεση ολικά βέλτιστης λύσης. Σκοπός μας είναι η διατύπωση των μοντέλων αυτών να μπορεί να εφαρμοστεί εκτός από προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος και σε εφαρμογές, όπως αυτές που εξετάζουμε, ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος και άλλες, προσφέροντας γρήγορη και ικανοποιητική λύση.

### 6.2 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 4, τα αποτελέσματα που πήραμε δείχνουν ότι τα χαλαρωμένα μοντέλα SOCP και Augmented SOCP είναι πολύ καλά, αφού καταρχήν είναι ακριβείς οι χαλαρώσεις τους και επιπλέον σε σχέση με το αρχικό πλήρες μη κυρτό πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος με βάση τις εξισώσεις DistFlow, αλλά και το αντίστοιχο λυμένο πρόβλημα AC OPF από τη MATPOWER, έχουν αμελητέες διαφορές, ειδικά για το μεγάλο δίκτυο διανομής. Οπότε τα χαλαρωμένα μοντέλα κρίνονται πολύ ικανοποιητικά. Επίσης, εξετάζουμε και περίπτωση που τα μοντέλα μεταξύ τους, το αυξημένο και μη, να έχουν διαφορετικές τιμές της τάξης  $10^{-4}$  α.μ. και πάνω, που αφορά δίκτυο διανομής 10 ζυγών με πολύ περιορισμένα όρια μέτρου τάσης και ροής ισχύος. Οι διαφορές είναι σε κάποια σημεία μη αμελητέες, ενώ και τα δύο μοντέλα έχουν μη ακριβείς χαλαρώσεις, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το αυξημένο μοντέλο μπορεί να οδηγηθεί σε μη αμελητέα συρρίκνωση του χώρου εφικτής λύσης του και να βρίσκει μη ολικά βέλτιστη λύση, αλλά σε ακραίες περιπτώσεις και έτσι οι αυξημένοι περιορισμοί είναι αρκετά καλοί.

Όσον αφορά το Κεφάλαιο 5, αυτό εφαρμόσαμε τα χαλαρωμένα μοντέλα SOCP και Augmented SOCP, που χρησιμοποιήσαμε πριν για βέλτιστη ροή ισχύος, σε προβλήματα ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, σε προβλήματα ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος και ελαχιστοποίησης τετραγωνικού κόστους παραγωγής που αφορούν την ενεργό ισχύ και σε προβλήματα ελαχιστοποίησης των απωλειών άεργου ισχύος και ελαχιστοποίησης της παραγωγής άεργου ισχύος σε δίκτυο με και χωρίς διανεμημένη παραγωγή άεργου ισχύος, που αφορούν την άεργο ισχύ. Τα αποτελέσματα που πήραμε, τα οποία παρουσιάστηκαν πιο πάνω, είναι πολύ ικανοποιητικά και για τα δύο μοντέλα, ως προς την ακρίβεια της χαλάρωσής τους, αλλά κυρίως και ως προς την ελαχιστοποίηση κάθε φορά της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης, όπως φαίνεται συγκρίνοντας μεταξύ τους τα σενάρια. Αυτό, μας οδηγεί σε ένα αρκετά ασφαλές συμπέρασμα όσον αφορά την διατύπωση

των προβλημάτων που έχουμε χρησιμοποιήσει, η οποία κρίνεται ικανοποιητική για τα ενεργά δίκτυα διανομής που εξετάσαμε με τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής.

### **6.3 Επέκταση Εργασίας**

Προφανώς τα μοντέλα αυτά χαλαρωμένης βέλτιστης ροής ισχύος που αναπτύχθηκαν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για μελλοντική επέκταση της έρευνας, η οποία να αφορά την εφαρμογή των μοντέλων αυτών σε προβλήματα με στοχαστικούς περιορισμούς, σε προβλήματα δέσμευσης μονάδας, σε προβλήματα TSO/DSO συντονισμού και σε επιπλέον προβλήματα ελέγχου των ενεργών δικτύων διανομής, προφανώς με ανάλογες τροποποιήσεις κάθε φορά στις αντικειμενικές συναρτήσεις και τους περιορισμούς. Επίσης, μελλοντική επέκταση της εργασίας αυτής μπορεί να αφορά και πολυφασικά μη ισορροπημένα δίκτυα διανομής, όπως και επιπλέον χαρακτηριστικά των ενεργών δικτύων διανομής, όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, την αποθήκευση και τα μεταβαλλόμενα φορτία.

## Παράρτημα Α

Στον Πίνακα Α παρατίθενται τα δεδομένα του δικτύου διανομής 5 κόμβων που χρησιμοποιήθηκε στην Ενότητα 4.4.

Πίνακας Α: Δεδομένα δικτύου διανομής 5 κόμβων.

Βάση Ισχύος (MVA)		1			
Βασική Τάση Κόμβων Δικτύου Διανομής (kV)		20			
Κόμβος Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ		5			
Βασική Τάση Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (kV)		150			
Ενεργός Ισχύς Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (MW)		0,4			
Άεργος Ισχύς Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (MVA <sub>r</sub> )		0,2			
Κόμβος Αποστολής	Κόμβος Λήψης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Ενεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MW)	Άεργος Ισχύς Κόμβου Λήψης (MVA <sub>r</sub> )
5	1	0,003	0,006	0	0
1	2	0,003	0,006	0,4	0,2
2	3	0,003	0,006	0,4	0,2
1	4	0,003	0,006	0,4	0,2

## Παράρτημα Β

Στον Πίνακα Β παρατίθενται τα δεδομένα του δικτύου διανομής 69 κόμβων που χρησιμοποιήθηκε στην Ενότητα 4.4, 5.2 και 5.3.

Πίνακας Β: Δεδομένα δικτύου διανομής 69 κόμβων.

Βάση Ισχύος (MVA)		10			
Βασική Τάση Κόμβων Δικτύου Διανομής (kV)		12,7			
Κόμβος Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ		1			
Βασική Τάση Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (kV)		12,7			
Ενεργός Ισχύς Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (MW)		0			
Άεργος Ισχύς Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (MVA <sub>r</sub> )		0			
Κόμβος Αποστολής	Κόμβος Λήψης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Ενεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MW)	Άεργος Ισχύς Κόμβου Λήψης (MVA <sub>r</sub> )
1	2	0,0000	0,0001	0	0
2	3	0,0000	0,0001	0	0
3	4	0,0001	0,0002	0	0
4	5	0,0016	0,0018	0	0
5	6	0,0228	0,0116	0,0026	0,0022
6	7	0,0238	0,0121	0,0404	0,0300
7	8	0,0058	0,0029	0,0750	0,0540
8	9	0,0031	0,0016	0,0300	0,0220
9	10	0,0511	0,0169	0,0280	0,0190
10	11	0,0117	0,0039	0,1450	0,1040
11	12	0,0444	0,0147	0,1450	0,1040
12	13	0,0643	0,0212	0,0080	0,0055

Πίνακας Β: (Συνέχεια)

Κόμβος Αποστολής	Κόμβος Λήψης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Ενεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MW)	Αεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MVar)
13	14	0,0651	0,0215	0,0080	0,0055
14	15	0,0660	0,0218	0	0
15	16	0,0123	0,0041	0,0455	0,0300
16	17	0,0234	0,0077	0,0600	0,0350
17	18	0,0003	0,0001	0,0600	0,0350
18	19	0,0204	0,0068	0	0
19	20	0,0131	0,0043	0,0010	0,0006
20	21	0,0213	0,0070	0,1140	0,0810
21	22	0,0009	0,0003	0,0053	0,0035
22	23	0,0099	0,0033	0	0
23	24	0,0216	0,0071	0,0280	0,0200
24	25	0,0467	0,0154	0	0
25	26	0,0193	0,0064	0,0140	0,0100
26	27	0,0108	0,0036	0,0140	0,0100
3	28	0,0003	0,0007	0,0260	0,0186
28	29	0,0040	0,0098	0,0260	0,0186
29	30	0,0248	0,0082	0	0
30	31	0,0044	0,0014	0	0
31	32	0,0219	0,0072	0	0
32	33	0,0523	0,0176	0,0140	0,0100

Πίνακας Β: (Συνέχεια)					
Κόμβος Αποστολής	Κόμβος Λήψης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Ενεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MW)	Αεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MVar)
33	34	0,1066	0,0352	0,0195	0,0140
34	35	0,0920	0,0304	0,0060	0,0040
3	36	0,0003	0,0007	0,0260	0,0186
36	37	0,0040	0,0098	0,0260	0,0186
37	38	0,0066	0,0077	0	0
38	39	0,0019	0,0022	0,0240	0,0170
39	40	0,0001	0,0001	0,0240	0,0170
40	41	0,0454	0,0531	0,0012	0,0010
41	42	0,0193	0,0226	0	0
42	43	0,0026	0,0030	0,0060	0,0043
43	44	0,0006	0,0007	0	0
44	45	0,0068	0,0086	0,0392	0,0263
45	46	0,0001	0,0001	0,0392	0,0263
4	47	0,0002	0,0005	0	0
47	48	0,0053	0,0130	0,0790	0,0564
48	49	0,0181	0,0442	0,3847	0,2745
49	50	0,0051	0,0125	0,3847	0,2745
8	51	0,0058	0,0030	0,0405	0,0283
51	52	0,0207	0,0070	0,0036	0,0027
9	53	0,0109	0,0055	0,0043	0,0035

Πίνακας Β: (Συνέχεια)					
Κόμβος Αποστολής	Κόμβος Λήψης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Ενεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MW)	Αεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MVar)
53	54	0,0127	0,0065	0,0264	0,0190
54	55	0,0177	0,0090	0,0240	0,0172
55	56	0,0176	0,0089	0	0
56	57	0,0992	0,0333	0	0
57	58	0,0489	0,0164	0	0
58	59	0,0190	0,0063	0,1000	0,0720
59	60	0,0241	0,0073	0	0
60	61	0,0317	0,0161	1,2440	0,8880
61	62	0,0061	0,0031	0,0320	0,0230
62	63	0,0090	0,0046	0	0
63	64	0,0443	0,0226	0,2270	0,1620
64	65	0,0650	0,0331	0,0590	0,0420
11	66	0,0126	0,0038	0,0180	0,0130
66	67	0,0003	0,0001	0,0180	0,0130
12	68	0,0461	0,0152	0,0280	0,0200
68	69	0,0003	0,0001	0,0280	0,0200

## Παράρτημα Γ

Στον Πίνακα Γ παρατίθενται τα δεδομένα του δικτύου διανομής 10 κόμβων που χρησιμοποιήθηκε στην Ενότητα 4.5.

Πίνακας Γ: Δεδομένα δικτύου διανομής 10 κόμβων.

Βάση Ισχύος (MVA)		10				
Βασική Τάση Κόμβων Δικτύου Διανομής (kV)		11				
Κόμβος Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ		1				
Βασική Τάση Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (kV)		11				
Ενεργός Ισχύς Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (MW)		0				
Άεργος Ισχύς Κόμβου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (MVA <sub>r</sub> )		0				
Κόμβος Αποστολής	Κόμβος Λήψης	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Συνολική Εγκάρσια Αγωγιμότητα (α.μ.)	Ενεργός Ισχύς Κόμβου Λήψης (MW)	Άεργος Ισχύς Κόμβου Λήψης (MVA <sub>r</sub> )
1	2	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
2	3	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
2	4	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
4	5	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
5	6	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
6	7	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
6	8	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
4	9	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08
9	10	0,006	0,006	0,006	0,12	0,08



## Βιβλιογραφία

- [1] Π. Σ. Γεωργιλάκης, “Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας,” Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015
- [2] Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, “Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας,” Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Ιούνιος 2019.
- [3] Vasileios A. Evangelopoulos, Pavlos S. Georgilakis, Nikos D. Hatziargyriou, “Optimal operation of smart distribution networks: A review of models, methods and future research,” *Electric Power Systems Research*, Volume 140, 2016, Pages 95-106, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.035>.
- [4] Savvopoulos, Nikolaos & Konstantinou, Theodoros & Hatziargyriou, Nikos. (2019). “TSO-DSO Coordination in Decentralized Ancillary Services Markets.” 1-6.
- [5] S. Chatzivasileiadis, *Optimization in Modern Power Systems. Lecture Notes*, Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, 2018
- [6] Bobo, Lucien & Venzke, Andreas & Chatzivasileiadis, Spyros. (2020). “Second-Order Cone Relaxations of the Optimal Power Flow for Active Distribution Grids.”
- [7] Dalhues, Stefan & Zhou, Yang & Pohl, Oliver & Erlemeyer, Florian & Schmid, Dennis & Zwartscholten, Jannik & Hagemann, Zita & Wagner, Christian & Mayorga Gonzalez, Daniel & Liu, Hua & Zhang, Mingmin & Liu, Jiayan & Rehtanz, Christian & Li, Yong & Cao, Yijia. (2019). “Research and Practice of Flexibility in Distribution Systems: A Review,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 5. 285-294.
- [8] Nick, Mostafa & Cherkaoui, Rachid & Le Boudec, Jean-Yves & Paolone, Mario. (2018). “An Exact Convex Formulation of the Optimal Power Flow in Radial Distribution Networks Including Transverse Components,” *IEEE Transactions on Automatic Control*. PP.
- [9] Gan, Lingwen & Li, Na & Topcu, Ufuk & Low, Steven. (2013). “Exact Convex Relaxation of Optimal Power Flow in Radial Networks,” *Automatic Control, IEEE Transactions on*. 60
- [10] Farivar, Masoud & Low, Steven. (2013). “Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part I,” *Power Systems, IEEE Transactions on*. 28. 2554-2564.
- [11] Molzahn, Daniel & Hiskens, Ian. (2019). “A Survey of Relaxations and Approximations of the Power Flow Equations,” 4. 1-221.
- [12] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez (2019). *MATPOWER (Version 7.0)* [Software]. Available: <https://matpower.org>
- [13] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez. *MATPOWER User's Manual, Version 7.0*. 2019. [Online]. Available: <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-7.0.pdf>
- [14] J. Lofberg, "YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB," 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508), New Orleans, LA, 2004, pp. 284-289
- [15] A. Wächter and L.T. Biegler. “On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming,” *Mathematical Programming*, 106(1):25–57, 2006
- [16] Kienle, Frank & De Schryver, Christian. (2012). “100% Green Computing At The Wrong Location?”
- [17] Everton Luiz de Aguiar, Rafael Cardoso, Carlos Marcelo de Oliveira Stein, Jean Patric da Costa and Emerson Giovanni Carati (May 11th 2016). “Distributed Renewable Power Sources in Weak Grids — Analysis and Control,” IntechOpen
- [18] <https://www.edsoforsmartgrids.eu/>
- [19] [github.com/LucienBobo/SOCP\\_OPF\\_Nick2017](https://github.com/LucienBobo/SOCP_OPF_Nick2017)
- [20] <https://immersive.erc.monash.edu/stac/>