



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

Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε δίκτυα διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Χ. Αποστολόπουλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε δίκτυα διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Χ. Αποστολόπουλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

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

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Σπυρίδων Χ. Αποστολόπουλος

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

Copyright © Σπυρίδων Αποστολόπουλος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας αποκεντρωμένης μεθόδου για τη ρύθμιση της τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Μέσης Τάσης (MT). Το μεγάλο ενδιαφέρον για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και η αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) θέτει ένα πλήθος από προβλήματα και προκλήσεις, όπως το φαινόμενο της ανύψωσης των μέτρων τάσεων των ζυγών, για το οποίο απαιτούνται αξιόπιστες και αποδοτικές μέθοδοι αντιμετώπισης.

Αρχικά, γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και των επιπτώσεων που επιφέρει η μεγάλη ενσωμάτωση τους στα δίκτυα διανομής. Γίνεται επίσης αναφορά στην τεχνολογία των έξυπνων δικτύων, στα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων (MAS) και στις δυνατότητες που προσφέρουν για την εποπτεία και τον δυναμικό έλεγχο του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Έπειτα, περιγράφεται το πρόβλημα ανύψωσης τάσης και οι προσεγγίσεις για την εξομάλυνσή του, όπως εφαρμόζονται στα παθητικά δίκτυα. Ακόμα, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση ενός δικτύου διανομής με το πακέτο λογισμικού MATPOWER για την ανάλυση της ροής φορτίου. Ακολούθως, πραγματοποιείται ανάλυση της θεωρίας ευαισθησιών τάσης ως προς τις μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς του δικτύου και εξετάζεται η ακρίβεια 4 προσεγγιστικών μεθόδων υπολογισμού που μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα ακτινικής τοπολογίας. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές ελέγχου της τάσης των δικτύων διανομής και συγκρίνονται με βάση τα χαρακτηριστικά τους ώστε να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα. Παράλληλα, εξετάζεται η μέθοδος του κεντρικού ελέγχου και η εφαρμογή της μέσα από ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού.

Ο εξεταζόμενος αλγόριθμος αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης, στηρίζεται στην επικοινωνία μεταξύ των ευφυών πρακτόρων και τη διαχείριση της διαθέσιμης ενεργού ισχύος κάθε μονάδας ΔΠ. Στόχος είναι η επαναφορά των τάσεων που είναι εκτός ορίων, σε κανονικά επίπεδα με τη μικρότερη δυνατή περικοπή ενεργού ισχύος από τις μονάδες. Διενεργούνται προσομοιώσεις της αποκεντρωμένης μεθόδου σε 2 διαφορετικά δίκτυα MT, για διαφορετικά σενάρια φόρτισης και διαφορετικές περιπτώσεις εσωτερικών παραμέτρων της μεθόδου. Τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου, με αυτά που προκύπτουν από τον κεντρικό έλεγχο και την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης τετραγωνικού προγραμματισμού.

Λέξεις Κλειδιά

δίκτυα διανομής, ακτινικά, έλεγχος τάσης, διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ), συντελεστές ευαισθησιών τάσης, αποκεντρωμένος, κεντρικός, πρόβλημα βελτιστοποίησης, τετραγωνικός προγραμματισμός, σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων (MAS), περικοπή ισχύος

Abstract

The major objective of this diploma dissertation was the development of a decentralized voltage regulation method for radial medium voltage (MV) distribution networks. The great interest into renewable energy sources and the increasing penetration of distributed generation (DG) cause numerous problems and pose various challenges, like the voltage rise effect, which has to be addressed with reliable and efficient methods.

First, there is a short description of the various types of the distributed generators' characteristics and the effects of their increased penetration in the distribution network. The smart grid technologies are discussed along with the Multi-agent system (MAS) technologies and the possibilities that they offer for monitoring and dynamic control of the power systems. Then, the problem of voltage rise is formulated and different traditional solution approaches are listed, as they are applied nowadays at passive distribution networks. Next, the modelling of distribution networks using MATPOWER is described as well as, the ways of conducting the corresponding power flow simulations. Furthermore, the voltage sensitivity factors in terms of active and reactive power changes in network are provided. Four approximate calculation methods that can be applied to radial topology networks are examined and assessed. Then, an overview of the different voltage control architectures being used at distribution networks is provided and a comparison is made against their features to draw qualitative conclusions. Moreover, the central control and its application through a quadratic programming problem is examined.

The proposed decentralized voltage regulation algorithm, was developed based on the communication between intelligent agents that control the DG's operating point. The goal is to eliminate the voltage violations while minimizing the total active power curtailment of the DGs. Simulations of the decentralized algorithm are conducted in 2 different MV distribution grids, for different loading scenarios and different internal parameters of the algorithm. Finally, the results of the decentralized method, are compared with those obtained from the centralized one and the solution of its corresponding optimization problem.

Key Words

distribution networks, radial, voltage control, distributed generation (DG), voltage sensitivity factors, decentralized, centralized, optimization problem, quadratic programming, Multi-agent system (MAS), power curtailment

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015–2016 υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Χατζηαργυρίου, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. τον οποίο ευχαριστώ για την ανάθεσή της και την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Ιάσονα Κουβελιώτη - Λυσίκατο για την υπομονή του, την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στη μνήμη της Κατερίνας

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΕ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ	1
1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1
1.2 Διесπαρμένη παραγωγή.....	1
1.3 Πλεονεκτήματα διесπαρμένης παραγωγής.....	3
1.4 Μειονεκτήματα διесπαρμένης παραγωγής.....	4
1.5 Τεχνολογίες μονάδων ΔΠ.....	5
1.5.1 Μονάδες με συμβατικά καύσιμα.....	6
1.5.2 Μονάδες ΑΠΕ.....	9
1.6 Χρήσεις ΔΠ.....	14
1.7 Ευφυή δίκτυα.....	15
1.8 Συστήματα Πολλαπλών Ευφύων Πρακτόρων (Multi-Agent Systems / MAS).....	16
1.8.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά του ευφούς πράκτορα.....	16
1.8.2 Γλώσσα επικοινωνίας.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΥΨΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΠ	18
2.1 Προδιαγραφές μέτρου τάσης.....	18
2.2 Ενσωμάτωση Διесπαρμένης Παραγωγής και ΑΠΕ.....	19
2.3 Το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης σε δίκτυα διανομής με διесπαρμένη παραγωγή.....	19
2.3.1 Προφίλ της τάσης σε συμβατικό δίκτυο διανομής.....	20
2.3.2 Επίπτωση της διесπαρμένης παραγωγής.....	21
2.3.3 Εξέταση ακραίων σεναρίων.....	23
2.4 Αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης τάσης.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ	27
3.1 IEEE 13-Node Test Feeder.....	27
3.2 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα.....	32
3.3 Λογισμικό προσομοίωσης MATPOWER.....	34
3.4 Μοντελοποίηση.....	35
3.4.1 Μορφές Δεδομένων.....	35
3.4.2 Κλάδοι.....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΤΑΣΗΣ	37
4.1	Εισαγωγή.....	37
4.2	Επισκόπηση θεωρίας ευαισθησιών	37
4.3	Υπολογισμός ευαισθησιών τάσης ακτινικών δικτύων διανομής.....	40
	4.3.1 Πρώτη προσεγγιστική μέθοδος.....	41
	4.3.2 Άλλοι προσεγγιστικοί τύποι	46
4.4	Σύγκριση με Ιακωβιανές ευαισθησίες.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ	57
5.1	Εισαγωγή.....	57
5.2	Στοιχεία Κεντρικού Ελέγχου.....	58
5.3	Διατύπωση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	58
5.4	Αποκεντρωμένος Έλεγχος.....	65
5.5	Υβριδικός Έλεγχος.....	66
5.6	Σύγκριση των διαφόρων τεχνικών	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	68
6.1	Εισαγωγή.....	68
6.2	Περιγραφή προβλημάτων DCOP	68
6.3	Ανάπτυξη του μοντέλου πράκτορα	70
6.4	Συναρτήσεις κόστους ισχύος και τάσης.....	74
6.5	Στάδια εκτέλεσης του αλγορίθμου	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	81
7.1	Εισαγωγή.....	81
	7.1.1 Στόχος προσομοιώσεων.....	81
	7.1.2 Σύγκριση με την κεντρική μέθοδο ελέγχου	81
	7.1.3 Θεωρήσεις-παραδοχές.....	82
7.2	Προσομοίωση δικτύου 10 κόμβων.....	82
7.3	Προσομοίωση δικτύου 14 κόμβων.....	96
7.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
8.1 Σύνοψη της εργασίας.....		100
8.2 Προοπτικές συνέχισης.....		101
Βιβλιογραφία.....		103

ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΕ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις βασικές λειτουργίες: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που γίνεται η κατανάλωση της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς και από εκεί ξεκινούν τα δίκτυα διανομής που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης [1].

1.2 Διεσπαρμένη παραγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή (distributed generation-DG) ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, από μονάδες που βρίσκονται κοντά στο φορτίο και είναι διασυνδεδεμένες με το σύστημα διανομής. Η ονομαστική ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται κυμαίνεται από μερικά kW έως 50MW, αλλά συνήθως είναι της τάξης λίγων εκατοντάδων kW. Αν και αποτελεί σχετικά σύγχρονη τάση στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής δεν είναι καθόλου καινούργια. Οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας παρείχαν ισχύ σε καταναλωτές που βρίσκονταν σε κοντινές αποστάσεις, ενώ οι διάφορες ηλεκτροδοτούμενες περιοχές δεν ήταν διασυνδεδεμένες μεταξύ τους αλλά σχημάτιζαν «νησίδες». Τα πρώτα δίκτυα λειτουργούσαν υπό DC τάση (συνεχή τάση) και έτσι ήταν περιορισμένη η παροχή τάσης καθώς και η απόσταση ανάμεσα στον παραγωγό και τον

καταναλωτή. Στη συνέχεια, η τεχνολογική πρόοδος που σημειώθηκε, όπως η εμφάνιση δικτύων ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternate Current, AC), επέτρεψε τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις και την ανάπτυξη μεγάλων δικτύων μεταφοράς και διανομής. Επιπλέον, οι οικονομίες κλίμακας στην παραγωγή οδήγησαν σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος των εργοστασίων, καθώς και στη μείωση του κόστους ανά μονάδα. Η ασφάλεια της παροχής αυξήθηκε αφού, η μερική ή πλήρης ανεπάρκεια κάποιας μονάδας παραγωγής σε ένα χρονικό διάστημα μπορούσε να αντισταθμιστεί από τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής εντός του διασυνδεδεμένου συστήματος. Στην πραγματικότητα, αυτή η διασύνδεση του συστήματος υψηλής τάσης είχε ως αποτέλεσμα να γίνει εφικτή η οικονομία κλίμακας και εν τέλει οι τοπικές μονάδες παραγωγής ισχύος σχεδόν να εξαλειφθούν από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [2],[3].

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες παρατηρείται μεγάλη αύξηση στο ενδιαφέρον για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Οι κυριότεροι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό (σύμφωνα με το International Energy Agency, IEA) είναι:

- Η ανάπτυξη των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής και εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Η ανησυχία για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή.
- Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια.

Οι θεσμικές αλλαγές στη βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος και οι τεχνολογικές εξελίξεις προωθούν τη διεύθυνση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, αν και συχνά απαιτούνται δαπανηρές ενισχύσεις δικτύων και τρόποι ελέγχου για να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία. Η σύνδεση των νέων εγκαταστάσεων εμποδίζεται συχνά από ποικίλους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών εκτιμήσεων και των απαιτήσεων, που επιλύονται συνήθως εις βάρος του επενδυτή.

Η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας έχει διάφορες επιπτώσεις στη λειτουργία των συστημάτων ισχύος. Τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής στους πελάτες μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η παραγωγή ενέργειας όμως από διεσπαρμένες πηγές μετέτρεψε τα συστήματα διανομής από παθητικά σε ενεργητικά με ροές ισχύος και τάσεις που καθορίζονται τόσο από την παραγωγή όσο και από τα φορτία.

1.3 Πλεονεκτήματα διεσπαρμένης παραγωγής

Η διεξόδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) στα δίκτυα αποφέρει μια πληθώρα από οφέλη όχι μόνο σχετικά με τη λειτουργία του δικτύου αλλά και περιβαλλοντικά και οικονομικά.

Τεχνικά πλεονεκτήματα:

- Αξιοπιστία συστήματος: Η διεσπαρμένη παραγωγή μειώνει τα προβλήματα αξιοπιστίας του συστήματος, όταν αναφερόμαστε σε παρατεταμένη διακοπή στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς υπάρχουν πολλές μονάδες παραγωγής κατανομημένες στο δίκτυο και όχι μερικές κεντρικές. Επιπροσθέτως, πολλοί καταναλωτές, όπως νοσοκομεία, τηλεπικοινωνιακά κέντρα, βιομηχανία ημιαγωγών, εγκαταστάσεις επεξεργασίας τροφίμων, κ.ά., απαιτούν υψηλότερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος από τη συνηθισμένη, που προμηθεύεται το μεγαλύτερο μέρος των καταναλωτών. Για τους καταναλωτές αυτούς, η διακοπή ρεύματος ή η βύθιση τάσης μπορεί να έχει πολύ μεγάλες οικονομικές και όχι μόνο συνέπειες. Οι καταναλωτές αυτοί μπορούν με τη χρήση ανανεώσιμης διανεμημένης παραγωγής να ικανοποιήσουν τις αυξημένες ανάγκες τους για ποιότητα ισχύος και «τοπικής» αξιοπιστίας.
- Βελτίωση του συντελεστή χρησιμοποίησης των δικτύων, δεδομένου ότι πλέον περιορίζονται οι απαιτήσεις για την υπέρ-διαστασιολόγηση των μεγάλων σταθμών παραγωγής για την αντιμετώπιση μικρών σε διάρκεια αιχμών φορτίου.
- Βοηθούν στην αποσυμφόρηση των υπαρχόντων δικτύων μεταφοράς και διανομής, όπως επίσης και στη βελτίωση του προφίλ τάσης [3],[5].
- Οι ΜΔΠ μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών στα δίκτυα διανομής αν διαστασιολογηθούν και εγκατασταθούν κατάλληλα.

Οικονομικά [3],[5]:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει τις αυξημένες ανάγκες του φορτίου με την εγκατάστασή της σε συγκεκριμένες θέσεις, με συνέπεια την καθυστέρηση ή αποφυγή κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής.
- Από επενδυτικής σκοπιάς, είναι πρακτικά πολύ πιο εύκολο να βρεθούν κατάλληλες τοποθεσίες για την εγκατάσταση ΜΔΠ από ότι για την κατασκευή ενός μεγάλου, κεντρικού εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, ενώ οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Έτσι αποφεύγονται περιττές δαπάνες, υπάρχει ευελιξία σχετικά με τη συνολική δυνατότητα παραγωγής κάθε μονάδας και οι ποσότητες παραγόμενης ισχύος ανταποκρίνονται ακριβώς στις ανάγκες κατανάλωσης της περιοχής
- Οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης.

- Ένα ακόμα οικονομικό όφελος είναι πως με τη χρήση μονάδων ΑΠΕ ως διεσπαρμένη παραγωγή, προκαλείται μείωση της ζήτησης ορυκτών καυσίμων με επακόλουθη μείωση στην τιμή τους και καθυστέρηση στις αυξήσεις των τιμών ενέργειας γενικότερα.

Περιβαλλοντικά:

- Η αυξανόμενη αξιοποίηση των ΑΠΕ συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων επιβλαβών ρύπων όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου (SO_x, NO_x). Ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τέτοιες μορφές ενέργειας δίνεται η δυνατότητα σε χώρες που έχουν αναλάβει υποχρεώσεις για μείωση των εκπομπών ρύπων, να εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις αυτές.

1.4 Μειονεκτήματα διεσπαρμένης παραγωγής

Η εισαγωγή των αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας, σε ευρεία κλίμακα, επιφέρει ορισμένα μειονεκτήματα, τόσο οικονομικά όσο και τεχνικά, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

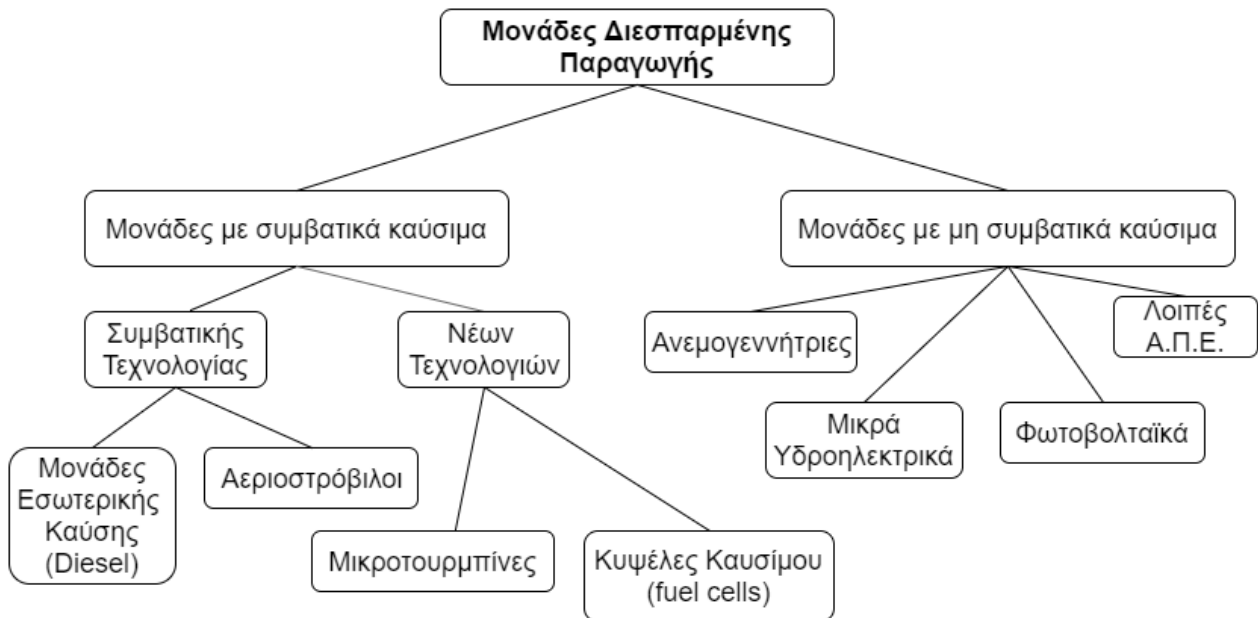
- Το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο για την εγκατάσταση της διεσπαρμένης παραγωγής είναι σχετικά χαμηλό λόγω του μικρού μεγέθους, αλλά το αρχικό οικονομικό κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής τα κόστη κεφαλαίων μπορεί να κυμαίνονται από 1000 €/kW έως 20000 €/kW στις τουρμπίνες καύσης και τις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχα [16].
- Η αυξημένη διείσδυση ΜΔΠ θα μειώσει το εύρος επιλογών μεταξύ των βασικών καυσίμων. Έχοντας υπόψη ότι οι περισσότερες ΜΔΠ εξαρτώνται από το αέριο αναμένεται αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό. Επίσης, το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Αλλαγή στην κατεύθυνση ροής ισχύος: Η διείσδυση αυξημένων ΜΔΠ μπορεί να προκαλέσει ροή ισχύος από τη χαμηλή στη μέση τάση. Έτσι χρειάζεται διαφορετικό σύστημα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης.
- Όταν είναι μεγάλη η διείσδυση των ΜΔΠ, η λειτουργία της προστασίας μπορεί να είναι εσφαλμένη, δηλαδή το σύστημα προστασίας μπορεί είτε να αποτύχει να λειτουργήσει είτε να λειτουργήσει με ανεπιθύμητο τρόπο. Η εγκατάσταση και σύνδεση των ΜΔΠ μπορεί να επηρεάσει τη συχνότητα του συστήματος.
- Επίπεδο τάσης: Ένα σημαντικό ζήτημα της διείσδυσης των ΜΔΠ σ' ένα ακτινικό δίκτυο διανομής είναι η αύξηση στα επίπεδα της τάσης. Η επίδραση στο τοπικό επίπεδο της τάσης εκεί που συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή στο

κεντρικό δίκτυο διανομής μπορεί να είναι σημαντική. Τα επίπεδα ανύψωσης τάσης σε ακτινικά συστήματα διανομής είναι ένα από τα κυριότερα ζητήματα σύνδεσης των συστημάτων παραγωγής, ιδίως όταν πρόκειται για συστήματα με ασθενές φορτίο [23].

1.5 Τεχνολογίες μονάδων ΔΠ

Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής αποτελούν συστήματα παραγωγής ενέργειας μικρής κλίμακας, μπορούν να συνδυάζονται με συστήματα αποθήκευσης και τοποθετούνται στον τελικό χρήστη ή κοντά σε αυτόν. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών όπως κυψέλες καυσίμου, μικροτουρμπίνες, εμβολοφόρους μηχανές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης διαθέτουν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου για την αποδοτική λειτουργία των ανεξάρτητων μονάδων παραγωγής και του δικτύου [5].

Στο σχήμα που παρατίθεται παρακάτω φαίνονται οι διάφοροι τύποι και τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.



Σχήμα 1.1 Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [21]

1.5.1 Μονάδες με συμβατικά καύσιμα [5], [6], [16], [17], [21]

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των βασικών κατηγοριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, όπως κλάσματα πετρελαίου και φυσικό αέριο.

Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW).

Οι περισσότερες μηχανές χρησιμοποιούν κλάσματα της απόσταξης του πετρελαίου, από βενζίνη για τις μικρότερες, πετρέλαιο diesel για τις λίγο μεγαλύτερες, έως και μαζούτ για μεγέθη που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή σε αυτόνομα νησιά. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες μετατροπής αυτών των μηχανών για να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ή προπάνιο ως καύσιμο προκειμένου να μειωθούν οι εκπεμπόμενοι και κυρίως σωματιδιακού χαρακτήρα ρύποι.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τρόποι λειτουργίας μιας μηχανής εσωτερικής καύσης:

- Εφεδρική (Stand by, back up unit), σε περιπτώσεις απώλειας δικτύου για την κάλυψη των φορτίων ανάγκης και από καταναλωτές που επιθυμούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία τους τοπικά.
- Κύρια (Prime)
- Εν δυνάμει κύρια (Continuous)

Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται από τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ειδικά για την παροχή ισχύος αιχμής, εξαιτίας της χαμηλής σχετικά ηλεκτρικής απόδοσής τους, αλλά και του μικρού χρόνου εκκίνησης και μεταβολής του φορτίου. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί ένα μείγμα συμπιεσμένου αέρα με καύσιμο, έτσι ώστε όταν αυτό εκτονωθεί σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, να παραχθεί μηχανικό έργο με αποτέλεσμα την κίνηση κάποιας γεννήτριας. Για τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων χρησιμοποιείται συνήθως φυσικό αέριο, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ελαφρά κλάσματα πετρελαίου. Οι αεριοστρόβιλοι έχουν μικρό βάρος και μέγεθος, χαμηλότερα επίπεδα θορύβου από τις άλλες μηχανές εσωτερικής καύσης αλλά απαιτούν περίπλοκες εργασίες συντήρησης σχετικά με τις προηγούμενες.



Εικόνα 1.1 Αεριοστρόβιλος [9]

Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι περιστροφικές μηχανές που παράγουν ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Ο όγκος των μονάδων αυτών είναι 0,4-1 m³ και η παραγωγή ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 20-500 kW. Τα καύσιμα που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι το φυσικό αέριο, το προπάνιο και το πετρέλαιο (diesel), ανάλογα με την περίπτωση. Οι μικροτουρμπίνες αποτελούνται από έναν συμπιεστή που συνδέεται με μια τουρμπίνα αερίου μέσω ενός θαλάμου καύσης, τη γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεση τους στο δίκτυο. Μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας. Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου χωρίς ανάκτηση, αέρας αναμιγνύεται με καύσιμο μέσα στον καυστήρα και αυτό αναφλέγεται.

Η καύση αυξάνει την θερμοκρασία, την πητικότητα και τον όγκο του αερίου. Αυτό κατευθύνεται προς τις λεπίδες της τουρμπίνας, περιστρέφοντάς την και ενεργοποιώντας το συμπιεστή. Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη αξιοπιστία και περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, από ότι οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας. Οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας από φύλλα μετάλλου, που ανακτά τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα αέρα που κατευθύνεται προς την εξάτμιση και το μεταβιβάζει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο προθερμασμένος αέρας χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία καύσης. Η προθέρμανση του αέρα μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στρόβιλου. Τα πλεονεκτήματα των μικροτουρμπίνων είναι πολλά. Η λειτουργία τους είναι σχεδόν αθόρυβη και με λίγες δονήσεις, έχουν σχετικά μικρό κόστος αρχικής εγκατάστασης, χαμηλά επίπεδα εκπομπής καυσαερίων, θερμικό βαθμό απόδοσης μεταξύ 5-30%, ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 28-30%, υψηλές ταχύτητες της τάξης των 60.000 rpm, μικρές ανάγκες συντήρησης και υψηλή αξιοπιστία.



Εικόνα 1.2 Μικροτουρμπίνα [10]

Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell - FC) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Αποτελείται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό.

Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα). Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα. Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, ενώ μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου ή του νερού.



Εικόνα 1.3 Κοψέλες καυσίμου [11]

1.5.2 Μονάδες ΑΠΕ

Οι κυριότερες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) που χρησιμοποιούνται στα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής είναι η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα. Εξαιρέσεις που δεν χαρακτηρίζονται ως μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να αφορούν μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες και μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Αιολική ενέργεια

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η μορφή τους περάσει πολλά στάδια στην πάροδο των χρόνων. Σχεδόν σε όλες τις ανεμογεννήτριες έχουν δοκιμαστεί πολλές και διαφορετικές λύσεις, τόσο όσον αφορά στον αριθμό των πτερυγίων αλλά και στον προσανατολισμό του άξονα. Οι δύο βασικές κατηγορίες ανεμογεννητριών προσδιορίζονται από τον προσανατολισμό του άξονά τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου και διακρίνονται σε: οριζοντίου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικας και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και κάθετου άξονα [12].

Όσον αφορά στον αριθμό των πτερυγίων διακρίνονται σε μονοπτέρυγες, διπτέρυγες, τριπτέρυγες, κ.λ.π. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανεμογεννήτριας σήμερα είναι ο τριπτέρυγος οριζοντίου άξονα.



Εικόνα 1.4 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

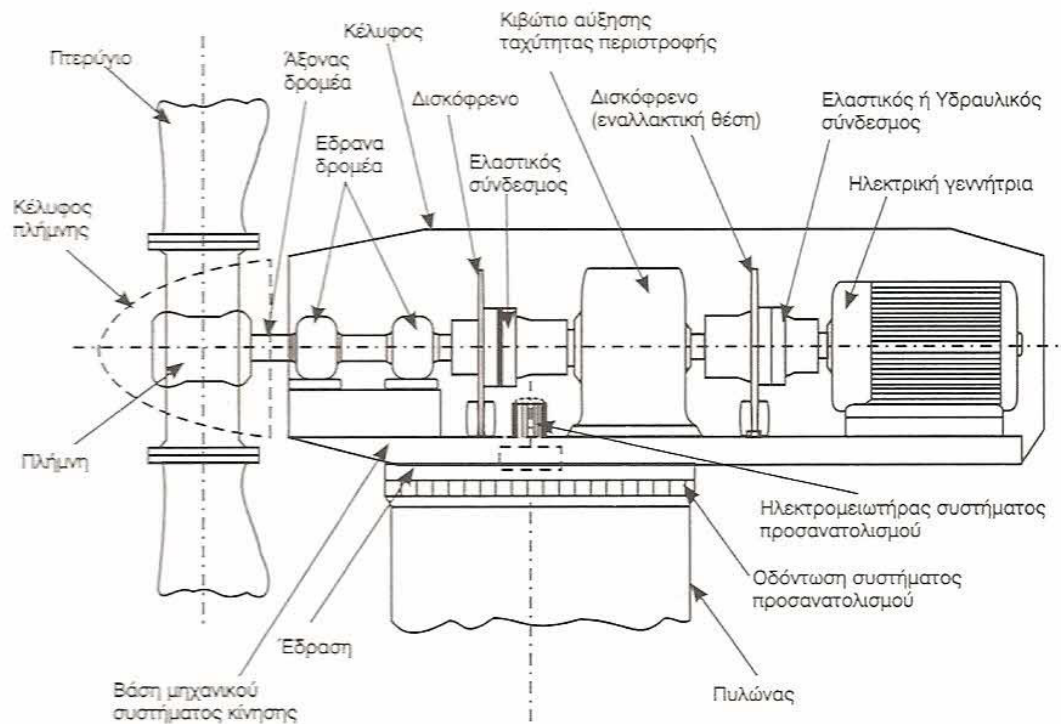
Κάθε ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα [13]:

- Τον πύργο
- Την έλικα με δύο ή τρία πτερύγια
- Το κιβώτιο ταχυτήτων (πολλαπλασιαστή στροφών)
- Τον μηχανισμό ελέγχου του βήματος των πτερυγίων
- Τον μηχανισμό περιστροφής και προσανατολισμού
- Το μηχανικό φρένο
- Την γεννήτρια
- Τον ηλεκτρικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου

Ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, διακρίνονται οι εξής περιοχές λειτουργίας:

- Την ταχύτητα σύνδεσης της ανεμογεννήτριας (cut-in speed), στην οποία αρχίζει να παράγει ισχύ.
- Την περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή (constant maximum C_p region), όπου η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε η απόληψη ισχύος από τον άνεμο να βελτιστοποιείται.
- Την περιοχή σταθερής ισχύος εξόδου (constant power output region).
- Την ταχύτητα αποσύνδεσης (cut-out speed).

Συστοιχίες ανεμογεννητριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μικροδίκτυα. Η λειτουργία τους στα πλαίσια ενός τέτοιου δικτύου σε συνεργασία με άλλες τεχνολογίες τοπικής παραγωγής, συστήματα συσσωρευτών και συμπαραγωγής συνεισφέρει στην οικονομικότερη κάλυψη των φορτίων.



Σχήμα 1.2 Τομή ατράκτου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα [13]

Ηλιακή Ενέργεια

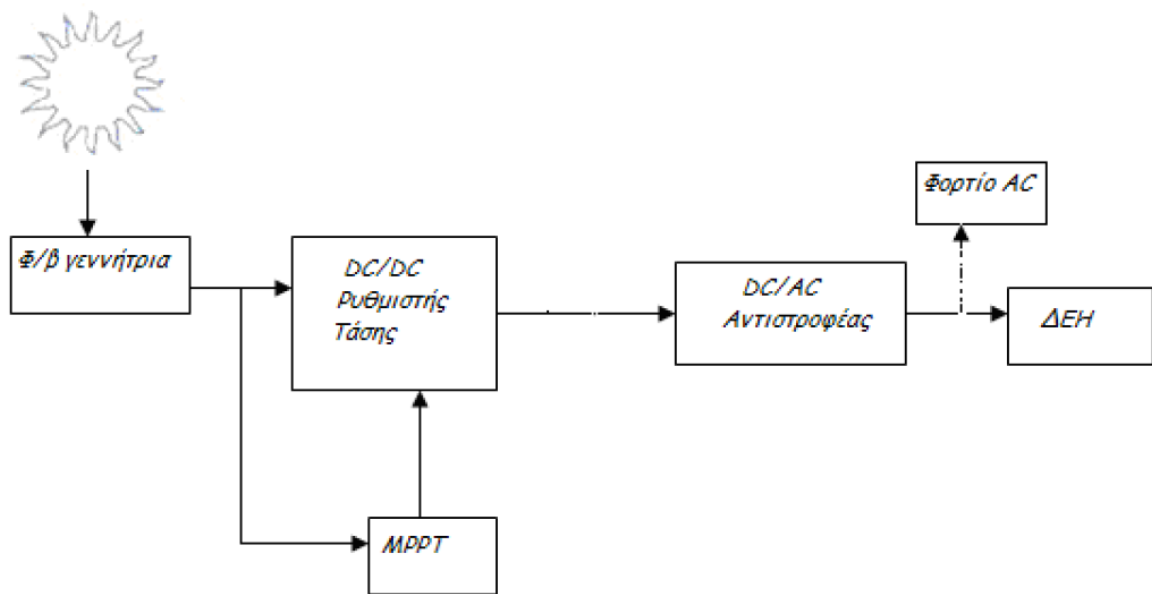
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα Φ/Β πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (solar cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Αποτελούνται από κατάλληλα επεξεργασμένους δίσκους πυριτίου (ηλιακά στοιχεία ή solar cells) που βρίσκονται ερμητικά σφραγισμένοι μέσα σε πλαστική ύλη για να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες και κυρίως την υγρασία. Η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί. Η κατασκευή αυτή, που δεν ξεπερνά σε πάχος τα 4 με 5 χιλιοστά του μέτρου, τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο αλουμινίου, όπως στους υαλοπίνακες των κτιρίων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων είναι:

- Απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα, π.χ. σε επίπεδο μερικών δεκάδων W ή και mW.
- Είναι εύχρηστα. Τα μικρά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν από τους ίδιους τους χρήστες.
- Μπορούν να εγκατασταθούν μέσα στις πόλεις, ενσωματωμένα σε κτίρια και δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον.
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα).

- Είναι βαθμωτά συστήματα, δηλαδή μπορούν να επεκταθούν σε μεταγενέστερη φάση για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών, χωρίς μετατροπή του αρχικού συστήματος.
- Οι απαιτήσεις συντήρησης είναι σχεδόν μηδενικές.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία κατά τη λειτουργία. Οι εγγυήσεις που δίνονται από τους κατασκευαστές για τις Φ/Β γεννήτριες είναι περισσότερο από 25 χρόνια καλής λειτουργίας.

Τα Φ/Β συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα απομονωμένα (Stand-alone) ή εκτός δικτύου (Off grid) συστήματα και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid connected). Τα απομονωμένα Φ/Β συστήματα διακρίνονται επίσης σε αυτόνομα και υβριδικά. Όσο αφορά στη λειτουργία τους, τα Φ/Β συστήματα διακρίνονται σε συστήματα με αποθήκευση και χωρίς αποθήκευση. Τέλος, χωρίζονται σε διάσπαρτα ή αποκεντρωμένα (Decentralized), κεντρικού σταθμού (Centralized) και καταναμημένα (Distributed) [14], [15], [16].



Σχήμα 1.3 Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος [16]

Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια, είναι η πιο σημαντική και ευρεία χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Σε όλο τον κόσμο υπάρχουν σήμερα περίπου 45.000 μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα σε λειτουργία. Η χώρα με τη μεγαλύτερη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι ο Καναδάς και ακολουθούν οι Η.Π.Α. και η Βραζιλία.

Οι περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας απαιτούν το χτίσιμο μεγάλων φραγμάτων σε ποταμούς, αλλά και να έχει ποικίλες περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις.

Στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια ικανοποιεί περίπου το 9% των ενεργειακών μας αναγκών σε ηλεκτρισμό. Τα υδροηλεκτρικά έργα ταξινομούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα διαφέρουν σημαντικά από της μεγάλης κλίμακας σε ότι αφορά τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών, κάτι το οποίο μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρό και με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής. Ωστόσο, ως διεσπαρμένη παραγωγή θεωρούνται τα μικρά υδροηλεκτρικά που εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια, δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποταμίευσης υδάτων και η λειτουργία τους παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική όχληση. Μόνο οι υδροηλεκτρικές μονάδες μικρότερης δυναμικότητας των 30 MW χαρακτηρίζονται ως μικρής κλίμακας.

Αποθήκευση ενέργειας/Συστήματα UPS

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιάλειπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.

Υβριδικά Συστήματα

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού διεσπαρμένης παραγωγής. Τα υβριδικά συστήματα εκμεταλλεύονται ταυτόχρονα την ηλιακή & την αιολική ενέργεια. Διαθέτουν φωτοβολταϊκούς συλλέκτες και ανεμογεννήτρια ώστε να παράγουν ρεύμα και από τον ήλιο και από τον άνεμο ταυτόχρονα. Το πλεονέκτημα των υβριδικών συστημάτων είναι ότι όταν υστερεί η μία πηγή ενέργειας, συνήθως πλεονεκτεί η άλλη. Αρκετά συνηθισμένος είναι ο συνδυασμός ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών στοιχείων, ενώ διαδεδομένος είναι και ο συνδυασμός ηλιακού θερμικού συλλέκτη με καυστήρα πετρελαίου ή βιομάζας. Ο συνδυασμός ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται συχνά σε απομονωμένες κατοικίες και οικισμούς όπου η πρόσβαση στο κεντρικό δίκτυο είναι πολύ δαπανηρή ή ακόμα και αδύνατη. Συνήθως στο σύστημα προστίθεται και μία ηλεκτρογεννήτρια με συμβατικά καύσιμα για μεγαλύτερη αξιοπιστία, ενώ η χρήση των μπαταριών (ή και κυψελών καύσιμου με υδρογόνο) είναι

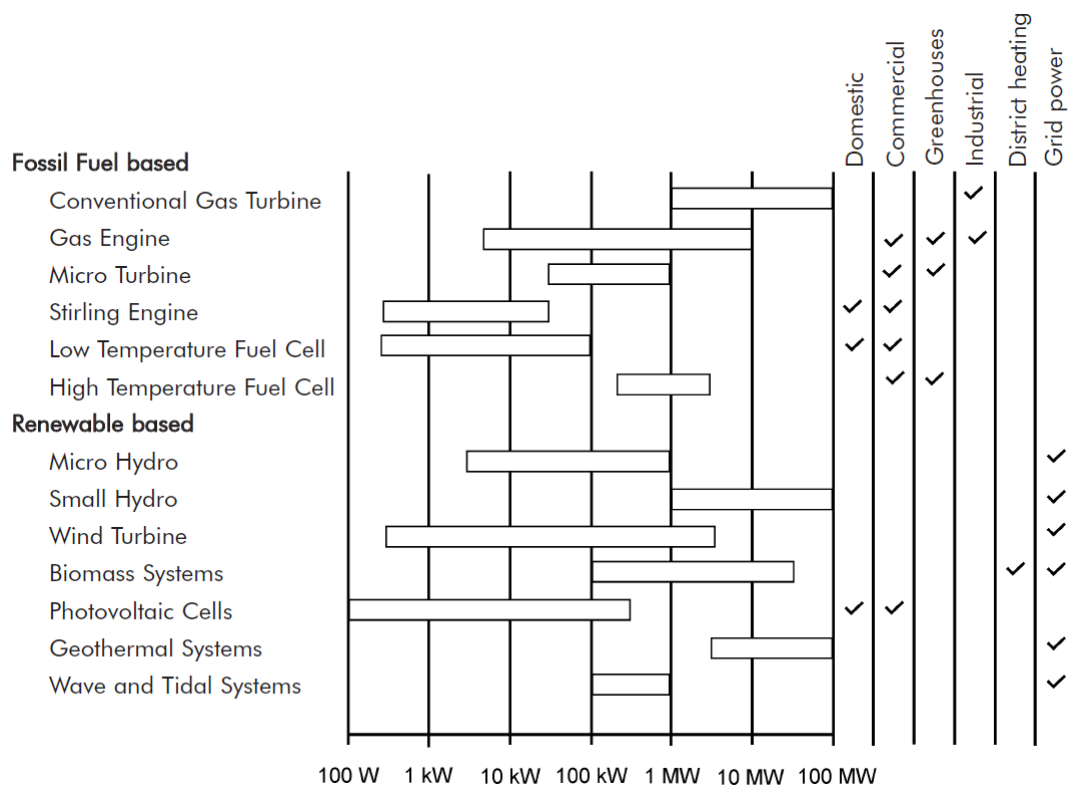
σχεδόν απαραίτητη σαν η πιο εύκολη και απλή λύση παροχής σταθερής τάσης στο σύστημα, αλλά και εφεδρείας. Κάποια επιπλέον παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι:

- Μηχανή Stirling συνδυασμένη με ένα ηλιακό πιάτο.
- Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου συνδυασμένη με μια τουρμπίνα αερίου ή μικροτουρμπίνα.
- Ανεμογεννήτριες με μπαταρία αποθήκευσης και εφεδρικές γεννήτριες diesel.
- Μηχανές συνδυασμένες με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

1.6 Χρήσεις ΔΠ

Οι τυπικές χρήσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι [7]:

- Οικιακή (παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης)
- Εμπορική (παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης)
- Βιομηχανική (παροχή ατμού, ηλεκτρισμού και θέρμανσης)
- Ισχύς δικτύου (παροχή ηλεκτρισμού στο δίκτυο)
- Περιφερειακή θέρμανση (παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης μέσω του δικτύου θέρμανσης)
- Θερμοκήπια (παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης)



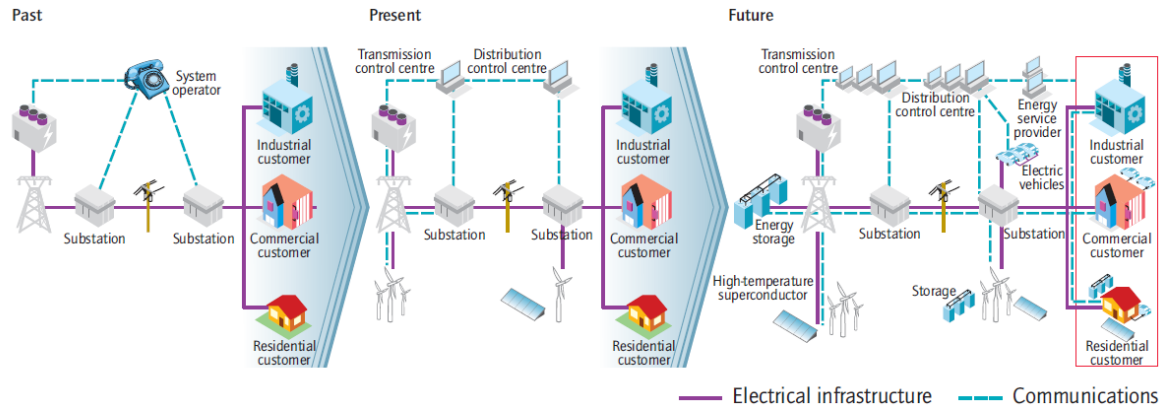
Σχήμα 1.4 Τυπικές χρήσεις και εύρος ισχύος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [7]

1.7 Ευφυή δίκτυα

Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που με τη χρήση ψηφιακής τεχνολογίας, μπορεί να παρακολουθεί και να ελέγχει τις δράσεις όλων των χρηστών που συνδέονται με αυτό, παραγωγών και καταναλωτών, με σκοπό να διασφαλιστεί η σταθερότητα, η οικονομία και η ασφάλεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ευφυή ή έξυπνα δίκτυα έχουν ως κύριους άξονες την ευφυή συνύπαρξη και συνεργασία της κεντρικής και δεσπαρμένης παραγωγής με τους καταναλωτές και το διαχειριστή του δικτύου, με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση του εξοπλισμού και την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος. Επιτρέπουν την εμπορία ενέργειας και την βελτιστοποίηση του κόστους μέσω χρονομεταβλητών τιμολογίων ή διαφόρων κινήτρων εξαρτώμενων από το μεταβαλλόμενο φορτίο. Δηλαδή με βάση την αμφίδρομη επικοινωνία και ροή πληροφορίας παροτρύνουν την ενεργό συμμετοχή του πελάτη [42].

Τα έξυπνα δίκτυα, για την επιτυχή ανάπτυξή τους, οφείλουν να έχουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά, όπως [43]:

- Να λειτουργούν πιο αποδοτικά και αξιόπιστα, διασφαλίζοντας και βελτιώνοντας την ασφάλεια και ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την ικανότητα να αυτοδιορθώνονται (self-healing).
- Να κινητοποιούν τους καταναλωτές ώστε να συμμετέχουν ενεργά στις λειτουργίες του δικτύου.
- Να αντέχουν σε εξωτερικές καταπονήσεις, ώστε οι υποδομές και ο εξοπλισμός που θα εγκατασταθεί να μην χρειάζονται συχνή αντικατάσταση.
- Να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της επάρκειας του εξειδικευμένου προσωπικού που θα βοηθήσει στην ανάπτυξη πρωτοποριακών τεχνολογιών.
- Να προσαρμόσουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς παραγωγής και αποθήκευσης.
- Να επιτρέπουν τη μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Να διευκολύνουν τη διασύνδεση περιοχών που έχουν διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Να εναρμονιστούν η αγορά ηλεκτρισμού, οι τεχνικές προδιαγραφές και τα νομοθετικών-ρυθμιστικά πλαίσια κάθε χώρας.



Εικόνα .1 Σύνθεση έξυπνων δικτύων [42]

1.8 Συστήματα Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems / MAS)

Η τεχνολογία που αναφέρεται στους ευφυείς πράκτορες αποτελεί ένα αυτόνομο επιστημονικό πεδίο με αρκετά μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια. Συνδυάζει στοιχεία από την τεχνητή νοημοσύνη, τον αντικειμενοστραφή και τον παράλληλο προγραμματισμό και βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς, ένας εκ των οποίων είναι και ο έλεγχος των ηλεκτρικών δικτύων.

Οι απαιτήσεις για τη βέλτιστη λειτουργία των σύγχρονων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας επιφέρουν μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα, το δίκτυο πλέον αποτελεί ένα δυναμικό περιβάλλον μέσα στο οποίο θα καλούνται όλες οι ευφυείς διατάξεις που διασυνδέονται σε αυτό (μετρητές, αισθητήρες κ.α.) να αλληλεπιδρούν, να επικοινωνούν, να προσαρμόζονται και να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους (είτε η μία στην άλλη, είτε στο διαχειριστή του συστήματος). Τα συστήματα ευφυών πρακτόρων πραγματεύονται όλη τη διαδικασία της ανάληψης αυτών των καθηκόντων.

1.8.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά του ευφυούς πράκτορα

Όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία [43], [44], υπάρχουν διαφορετικές διατυπώσεις για το τι αποτελεί έναν ευφυή πράκτορα και πώς διαχωρίζεται η έννοια αυτή από το λογισμικό. Ένας αποδεκτός ορισμός που έχει προκύψει, περιγράφει τον πράκτορα ως μία διαδικασία λογισμικού με τις εξής ιδιότητες:

- Αυτονομία: ο κάθε πράκτορας έχει τη ευχέρεια να λειτουργεί ανεξάρτητα από ανθρώπινη παρέμβαση και έχει τη δυνατότητα να ελέγχει τη λειτουργία του και την κατάστασή του.
- Κοινωνικότητα: Οι πράκτορες επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.
- Αντιδραστικότητα: Οι πράκτορες μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα σε αλλαγές και πληροφορίες που δέχονται από τον πραγματικό κόσμο (φυσικό ή ηλεκτρικό περιβάλλον), τους άλλους πράκτορες, το διαδίκτυο ή το χρήστη του

γραφικού περιβάλλοντος επικοινωνίας (GUI). Για παράδειγμα, αν αποσυνδεθούν κάποιοι πράκτορες που επιτηρούν μονάδες ΔΠ, τότε οι υπόλοιποι θα ενημερωθούν άμεσα και θα προβούν σε σημαντικές λειτουργικές αλλαγές προκειμένου να ρυθμίσουν αυτόματα το δίκτυο ή το μικροδίκτυο.

- Προνοητικότητα. Είναι προγραμματισμένοι ώστε να παρουσιάζουν μεταβλητές συμπεριφορές επίτευξης των στόχων τους. Αυτό σημαίνει ότι επιδιώκουν με κάθε τρόπο να τους επιτύχουν, είτε με την συνεργατική επικοινωνία με άλλους, είτε με ανταγωνιστική.
- Αξιοπιστία, με την έννοια ότι δεν πρέπει σκόπιμα να παρέχουν εσφαλμένες ή ψευδής πληροφορίες σε άλλους προς όφελός τους.
- Κινητικότητα. Οι ευφυής πράκτορες θα πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα να μετακινούνται σε άλλες πλατφόρμες συστημάτων κατά τη διάρκεια συντηρήσεων.

1.8.2 Γλώσσα επικοινωνίας

Η FIPA [46] που είναι ο οργανισμός για τα πρότυπα των ευφυών πρακτόρων έχει ορίσει μία γλώσσα για την επικοινωνία των πρακτόρων την οποία ονομάζει Agent Communication Language. Το κάθε μήνυμα που ανταλλάσσουν οι πράκτορες έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τον αποστολέα (sender) του μηνύματος.
- Μία λίστα από τους αποδέκτες (receivers) του μηνύματος. Μία ένδειξη για τον σκοπό του μηνύματος που ονομάζεται “performative”. Η ένδειξη αυτή μπορεί να πάρει τις εξής τιμές: REQUEST, εάν απαιτείται ο αποδέκτης να εκτελέσει μία πράξη, INFORM, εάν ο αποστολέας θέλει να ανακοινώσει ένα γεγονός στον αποδέκτη, QUERY_IF, εάν ο αποστολέας θέλει να πληροφορηθεί για την ισχύ ενός γεγονότος, CFP αίτηση για προσφορές σε μία δημοπρασία ή επίλυση ενός προβλήματος και PROPOSE, ACCEPT_PROPOSAL, REJECT_PROPOSAL, για χρήση σε μία διαπραγμάτευση.
- Το περιεχόμενο (content) δηλαδή την πραγματική πληροφορία που περιέχεται στο μήνυμα.
- Την γλώσσα του περιεχομένου (content language) δηλαδή το συντακτικό που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το περιεχόμενο.
- Την οντολογία (ontology) δηλαδή το λεξικό που περιγράφει τις λέξεις και τις έννοιες που χρησιμοποιούνται μέσα στο περιεχόμενο του μηνύματος.
- Μια σειρά από ενδείξεις προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση ταυτόχρονα πλέον του ενός διαλόγων όπως για παράδειγμα ο κωδικός της συζήτησης (conversationid) ή το σε ποιο μήνυμα απαντά το τρέχον μήνυμα (reply-with, in-reply-to, reply-by).

ΑΝΥΨΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

2.1 Προδιαγραφές μέτρου τάσης

Οι μεταβολές και οι αντίστοιχες αποκλίσεις της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών από την ονομαστική τάση, μπορούν να διακριθούν:

- Στις αργές μεταβολές (ή διακυμάνσεις) της τάσης, οι οποίες οφείλονται στις μεταβολές του φορτίου, που προκαλούν πτώσεις τάσης στα στοιχεία του δικτύου διανομής (γραμμές και μετασχηματιστές).
- Στις απότομες μεταβολές της τάσης (συχνά διάρκειας δευτερολέπτων), οι οποίες μπορεί να οφείλονται στο περιοδικά μεταβαλλόμενο φορτίο ορισμένων μηχανημάτων (για παράδειγμα, κατά τη λειτουργία του κινητήρα ενός συμπιεστή), στις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας ορισμένων συσκευών (για παράδειγμα, την εκκίνηση κινητήρων) ή τη διακοπτόμενη λειτουργία αυτών (για παράδειγμα ηλεκτροκάμιοι και ηλεκτροσυγκολλήσεις).

Η αποφυγή εμφάνισης ενοχλητικών απότομων μεταβολών της τάσης επιτυγχάνεται κυρίως με περιορισμούς, τους οποίους θέτουν οι Κανονισμοί και οι Ηλεκτρικές Επιχειρήσεις, για τις ηλεκτρικές συσκευές κατανάλωσης.

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η αντιμετώπιση των αργών μεταβολών στην τάση με κατανεμημένο αλγόριθμο. Επειδή η τάση τροφοδότησης των συσκευών κατανάλωσης δεν είναι πρακτικά εφικτό να τηρείται συνεχώς ίση με την ονομαστική της τιμή, με βάση την οποία κατασκευάζονται οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, έχουν καθιερωθεί συγκεκριμένα όρια για τη διακύμανση της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών, τα οποία υποχρεούνται να τηρούν οι Ηλεκτρικές Επιχειρήσεις Διανομής. Ως τάση τροφοδότησης ενός καταναλωτή δικτύου νοείται η μετρούμενη τάση στο σημείο σύνδεσης του καταναλωτή στο δίκτυο, όπου εγκαθίσταται και ο μετρητής.

Με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 50160 [22], στο ευρωπαϊκό και στο ελληνικό δίκτυο ΧΤ, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, με εξαίρεση τις διακοπές τάσης, σε διάστημα μίας εβδομάδας, το 95% των ανά δεκάλεπτο μέσων τιμών των ενδεικνύμενων τιμών της τάσης πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων του $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης του δικτύου ΧΤ. Η ίδια προδιαγραφή ισχύει και για το δίκτυο ΜΤ, δηλαδή, το 95% των ανά δεκάλεπτο μέσων τιμών των ενδεικνύμενων τιμών της τάσης πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων του $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης του δικτύου ΜΤ.

2.2 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένης Παραγωγής και ΑΠΕ

Η προσθήκη διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα διανομής είναι μία από τις κύριες αιτίες της εξέλιξης των εργαλείων ανάλυσης των συστημάτων διανομής τα τελευταία 15 χρόνια. Η εισαγωγή διεσπαρμένης παραγωγής σε υπάρχοντα συστήματα διανομής απαιτεί την προσεκτική ενσωμάτωσή της, σύμφωνα με τα πρότυπα λειτουργίας του συστήματος διανομής. Οι κύριες ανησυχίες περιλαμβάνουν την ανύψωση της τάσης και τη ρύθμιση της τάσης, τις μεταβολές της τάσης, τις λειτουργίες προστασίας και ελέγχου, την επίδραση στην ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, την επίδραση στον εντοπισμό και στην εκκαθάριση των σφαλμάτων, την ανάγκη για έναν μετασχηματιστή διασύνδεσης, τη διαμόρφωση του μετασχηματιστή, τις αρμονικές, τη μεταβολή της συχνότητας και την απόκριση σε ανισοροπίες του συστήματος.

Καθώς αυξάνει η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, αυξάνει και η ανάγκη για περισσότερο αναλυτικές μελέτες. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μία ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία διεσπαρμένης παραγωγής, επειδή με τη ραγδαία αύξηση των επιπέδων διείσδυσής της επηρεάζει σημαντικά την καμπύλη της τάσης και γενικότερα τη λειτουργία του δικτύου διανομής.

Από την άλλη πλευρά, ένα πλεονέκτημα των ΜΔΠ σε συνδυασμό με τις ραγδαία εξελισσόμενες τεχνολογίες της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών, είναι η δυνατότητα για εφαρμογή κατάλληλων εργαλείων-μηχανισμών ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που δημιουργούνται στο δίκτυο.

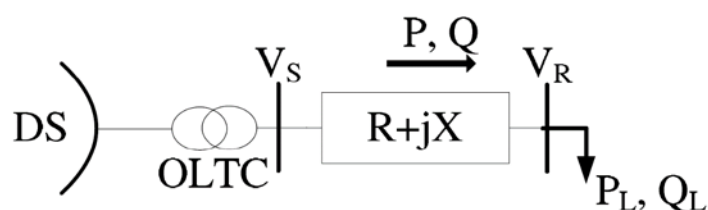
2.3 Το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης σε δίκτυα διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές μέσω των δικτύων διανομής. Οι υπάρχουσες μέθοδοι ελέγχου στα δίκτυα διανομής είχαν σχεδιαστεί για παθητικά δίκτυα με μονόδρομη ροή ισχύος. Ο έλεγχος της τάσης στηριζόταν σε μια απλή πολιτική σταθερής τάσης. Σε ενεργά δίκτυα διανομής με αμφίδρομη ροή ισχύος, η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα αυτού του ελέγχου γίνεται ανεπαρκής.

Συγκεκριμένα, τα σύγχρονα συστήματα διανομής έχουν σχεδιαστεί για να αποδέχονται εγχύσεις ρεύματος από το δίκτυο μεταφοράς και στη συνέχεια να το διανέμουν στους πελάτες, η ροή τόσο της πραγματικής όσο και της άεργου ισχύος είναι πάντα από το υψηλότερο στο χαμηλότερο επίπεδο τάσης. Ωστόσο, με σημαντική διείσδυση των διεσπαρμένων παραγωγών, η ροή της ισχύος μπορεί να αντιστραφεί και το δίκτυο διανομής δεν είναι πλέον ένα παθητικό κύκλωμα που εφοδιάζει τα φορτία αλλά ένα ενεργό σύστημα με τις ροές ισχύος και τις τάσεις να καθορίζονται τόσο από την παραγωγή όσο και από το φορτίο. Ως εκ τούτου, υπάρχουν δραματικές αλλαγές στη φύση των δικτύων διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή. Οι συνδέσεις της διεσπαρμένης παραγωγής στα συστήματα διανομής, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, προκαλούν αύξηση του επιπέδου της τάσης.

2.3.1 Προφίλ της τάσης σε συμβατικό δίκτυο διανομής

Τα περισσότερα δίκτυα διανομής διαμορφώνονται ως παθητικά δίκτυα με ακτινική διάταξη, δηλαδή όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους. Έτσι, οι κλάδοι του δικτύου δεν συνδέονται μεταξύ τους, αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Η ροή της ισχύος, τόσο της πραγματικής P όσο και της άεργου Q , είναι πάντοτε από το υψηλότερο στο χαμηλότερο επίπεδο της τάσης. Συνήθως, ο λόγος της επαγωγικής αντίδρασης προς την αντίσταση X/R για το δίκτυο μεταφοράς είναι ≥ 10 και αυτός του δικτύου διανομής είναι $\leq 0,5$. Αυτές οι υψηλές αντιστάσεις οδηγούν στην πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής από την πρωτεύον υποσταθμό μέχρι το σημείο σύνδεσης του πελάτη. Το μέγεθος της πτώσης τάσης μπορεί να υπολογιστεί από την ανάλυση του συστήματος διανομής δύο ζυγών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.1 Συμβατικό σύστημα διανομής δύο ζυγών

Στο Σχήμα 2.1, το DS δηλώνει το σύστημα διανομής (Distribution System), OLTC είναι ο Μ/Σ μεταβλητής λήψης, V_S είναι η τάση στο άκρο αναχώρησης και V_R η τάση στο άκρο άφιξης της γραμμής. Επίσης, P και Q είναι η πραγματική και άεργος ισχύς αντίστοιχα που παρέχονται από τον υποσταθμό διανομής (DS) προς τους καταναλωτές, ενώ P_L και Q_L είναι η πραγματική και άεργος ισχύς του φορτίου. Η τάση στο άκρο αναχώρησης ισούται με:

$$\hat{V}_S = \hat{V}_R + \hat{I} (R + jX)$$

όπου \hat{I} ($I = |\hat{I}|$) είναι η αναπαράσταση του φάσρα του ρεύματος που ρέει στη γραμμή. Η μιγαδική ισχύς που παρέχεται από το σύστημα διανομής παριστάνεται ως:

$$\hat{S} = P + jQ = \hat{V}_S \hat{I}^*$$

Οπότε, το ρεύμα που ρέει στη γραμμή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\hat{I} = \frac{P - jQ}{\hat{V}_S}$$

Χρησιμοποιώντας την τιμή του \hat{I} , η τάση στο άκρο αναχώρησης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\hat{V}_S = \hat{V}_R + \frac{P - jQ}{\hat{V}_S} (R + jX) = \hat{V}_R + \frac{RP + XQ}{\hat{V}_S} + j \frac{XP - RQ}{\hat{V}_S}$$

Άρα, η πτώση τάσης πάνω στη γραμμή, δηλαδή μεταξύ του άκρου αναχώρησης και άφιξης θα είναι:

$$\Delta \hat{V} = \hat{V}_S - \hat{V}_R = \frac{RP + XQ}{\hat{V}_S} + j \frac{XP - RQ}{\hat{V}_S}$$

Δεδομένου ότι η γωνία μεταξύ της τάσης στο άκρο αναχώρησης και της τάσης στο άκρο άφιξης είναι πολύ μικρή, η πτώση τάσης είναι περίπου ίση με το πραγματικό μέρος της πτώσης τάσης. Εάν ο ζυγός στο άκρο αναχώρησης θεωρηθεί ως ζυγός αναφοράς, η γωνία της τάσης σε αυτόν το ζυγό είναι 0° , δηλαδή $\hat{V}_S = |\hat{V}_S| = V_S$. Ως εκ τούτου, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής:

$$\Delta V \cong \frac{RP + XQ}{V_S} \quad (1)$$

Εάν η τάση στο άκρο αναχώρησης θεωρηθεί ως βάση τάσης, τότε η V_S μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη μονάδα. Άρα η τελευταία εξίσωση γίνεται:

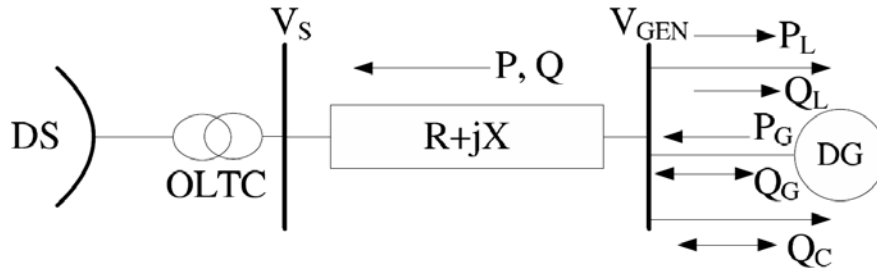
$$\Delta V \cong RP + XQ \quad (2)$$

2.3.2 Επίπτωση της διεσπαρμένης παραγωγής

Όταν συνδέονται γεννήτριες στο σύστημα διανομής, η ροή ισχύος και το προφίλ της τάσης επηρεάζονται καθώς το σύστημα δεν είναι πλέον παθητικό. Για την παραγωγή ενέργειας, μια γεννήτρια είναι πιθανό να λειτουργεί σε μια υψηλότερη τάση σε σύγκριση με τους άλλους κόμβους στους οποίους παρέχεται ισχύς. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση στο άκρο άφιξης V_R θα είναι:

$$V_R \cong V_S + RP + XQ \quad (3)$$

αφού η κατεύθυνση της ροής ισχύος έχει αντιστραφεί. Έτσι, η τάση στο σημείο σύνδεσης της γεννήτριας θα αυξηθεί πάνω από την τάση στο άκρο αναχώρησης, γεγονός που μπορεί να αποσαφηνιστεί από το σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2 Σύστημα διανομής δύο ζυγών με διεσπαρμένη γεννήτρια

Η διεσπαρμένη γεννήτρια συνδέεται εκεί που η τάση (V_{GEN}) θεωρείται ότι είναι 11 kV, P_G και Q_G είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα που παράγει η γεννήτρια, P_L και Q_L είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς που καταναλώνει το φορτίο και Q_C είναι η άεργος ισχύς αντιστάθμισης. Αυτή η γεννήτρια μαζί με το φορτίο και τον αντισταθμιστή συνδέεται στο σύστημα διανομής μέσω εναέριας γραμμής διανομής με σύνθετη αντίσταση $R + jX$ και μέσω Μ/Σ μεταβλητής λήψης (OLTC). Η αύξηση του μέτρου της τάσης κατά μήκος του δικτύου διανομής του σχήματος 2.2 μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta V = V_{GEN} - V_S \cong \frac{RP + XQ}{V_{GEN}} \quad (4)$$

όπου: $P = P_G - P_L$ και $Q = \pm Q_G - Q_L \pm Q_C$.

Εάν η V_{GEN} εκφραστεί στο ανά μονάδα σύστημα, τότε η εξίσωση (4) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta V = V_{GEN} - V_S \cong R (P_G - P_L) + X (\pm Q_G - Q_L \pm Q_C) \quad (5)$$

Θεωρώντας σύμβαση γεννήτριας, οι γεννήτριες παράγουν πάντα ενεργό ισχύ ($+P_G$) και μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφούν άεργο ισχύ ($\pm Q_G$), ενώ το φορτίο καταναλώνει και ενεργό ($-P_L$) και άεργο ισχύ ($-Q_L$). Οι αντισταθμιστές είναι δυνατόν είτε να παράγουν ή να καταναλώσουν άεργο ($\pm Q_C$).

Μικρές σύγχρονες γεννήτριες συμπαραγωγής, μικρές ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα συνδέονται στο σύστημα διανομής. Στο σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας, η σύγχρονη γεννήτρια παράγει ενεργό ισχύ, όταν το ηλεκτρικό φορτίο των συστημάτων πέσει κάτω από την έξοδο της γεννήτριας, αλλά μπορεί να απορροφήσει ή να παράγει άεργο ισχύ ανάλογα με τη ρύθμιση του συστήματος διέγερσης της γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες παράγουν επίσης ενεργό ισχύ αλλά απορροφούν άεργο. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται για να παράγουν ενεργό ισχύ υπό ένα καθορισμένο συντελεστή ισχύος, αλλά μπορεί να εισάγουν αρμονικές ρευμάτων. Συνεπώς, η ισχύς που ρέει μέσα από τα κυκλώματα

μπορεί να έχει οποιαδήποτε κατεύθυνση, ανάλογα με τα μεγέθη των ενεργών και άεργων φορτίων του δικτύου σε σχέση με τις εξόδους της γεννήτριας και τις ενδεχόμενες απώλειες στις γραμμές.

2.3.3 Εξέταση ακραίων σεναρίων

Από την εξίσωση (5) προκύπτει:

$$P_G = \frac{V_{GEN} - V_S + RP_L - X (\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{R} \quad (6)$$

Δηλαδή, το μέγεθος της παραγωγής που είναι δυνατόν να συνδεθεί στο δίκτυο διανομής εξαρτάται από τα μέτρα τάσης στα άκρα της γραμμής, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αγωγών και το μήκος της γραμμής, το τοπικό φορτίο και την έγχυση ή απορρόφηση αέργου ισχύος.

Όταν πρόκειται να συνδεθεί μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, ο διαχειριστής του δικτύου από την πλευρά του πρέπει να εξετάσει τα χειρότερα σενάρια λειτουργίας, δηλαδή τις εξής περιπτώσεις:

- ελάχιστο φορτίο – μέγιστη παραγωγή
- μέγιστο φορτίο – ελάχιστη παραγωγή
- μέγιστο φορτίο – μέγιστη παραγωγή

Το μέγεθος της ανύψωσης τάσης σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να υπολογιστεί για κάποιο από τα παραπάνω σενάρια μέσω της εξίσωσης (5). Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε την περίπτωση ελαχίστου φορτίου και μέγιστης παραγωγής, έχουμε:

$$P_L = 0, \quad Q_L = 0, \quad P_G = P_{Gmax}$$

και αν υποθέσουμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, τότε οι ποσότητες $\pm Q_G$ και $\pm Q_C$ θα είναι μηδενικές. Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση (5) μπορεί να γραφεί ως:

$$\Delta V_{worst} = V_{GENmax} - V_S \cong RP_{Gmax} \quad (7)$$

Από τη σχέση (7) φαίνεται πως η ανύψωση της τάσης εξαρτάται από την ωμική αντίσταση της γραμμής και της παρεχόμενης ισχύος από τη διανεμημένη μονάδα παραγωγής. Αν η αντίσταση θεωρηθεί σταθερή, τότε:

$$\Delta V_{worst} \propto P_{Gmax} \quad (8)$$

Δηλαδή το μέτρο της τάσης στα δίκτυα διανομής με εγκατεστημένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, είναι ευθέως ανάλογο με το ποσό ενεργού ισχύος που παράγεται από αυτές τις μονάδες.

Το πρόβλημα της αύξησης τάσης γίνεται εντονότερο όταν δεν υπάρχουν αρκετά φορτία και η ενεργός ισχύς ρέει προς το ανάντη σύστημα. Επίσης, από τη σχέση (7) προκύπτει ο περιορισμός σχετικά με τη δυνατότητα σύνδεσης μονάδων παραγωγής ισχύος σε ένα συγκεκριμένο ζυγό στο σύστημα διανομής ως εξής:

$$P_{Gmax} \cong \frac{V_{GENmax} - V_S}{R} \quad (9)$$

2.4 Αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης τάσης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συστήματα διανομής είναι ήδη εξοπλισμένα με μέσα προστασίας έναντι υπερτάσεων. Ωστόσο, τέτοιου είδους μέτρα μπορεί να θέσουν προσωρινά εκτός συστήματος κάποιες διεσπαρμένες μονάδες ή ακόμα και να αποκόψουν ολόκληρες γραμμές του συστήματος διανομής, με απρόβλεπτες οικονομικές επιπτώσεις για τους καταναλωτές και το διαχειριστή του συστήματος. Θεωρητικά, από την παραπάνω ανάλυση μπορούν να προταθούν οι παρακάτω προσεγγίσεις για την εξομάλυνση του προβλήματος:

1. Μείωση ωμικών αντιστάσεων των γραμμών

Αν το ποσό παραγωγής ισχύος μιας συνδεδεμένης μονάδας θεωρηθεί σταθερό, τότε από την εξίσωση (7) προκύπτει:

$$\Delta V_{worst} \propto R \quad (10)$$

Είναι φανερό ότι η πιο ακραία περίπτωση ανύψωσης τάσης, δηλαδή αύξηση του μέτρου V_{GEN} , συμβαίνει όταν υπάρχει μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος και αυτό το μέγεθος είναι ευθέως ανάλογο με την ωμική αντίσταση των αγωγών. Η αντίσταση μιας γραμμής μπορεί να μειωθεί επιλέγοντας μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγό, ωστόσο στην πραγματικότητα είναι πολύ δύσκολο να γίνουν αλλαγές στις υπάρχουσες υποδομές των δικτύων για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο. Όμως, οι διαχειριστές των δικτύων θα πρέπει να εξετάσουν τη μείωση των αντιστάσεων κατά την κατασκευή νέων γραμμών, ώστε να επιτραπεί μεγαλύτερη διείσδυση διεσπαρμένων μονάδων.

2. Αντιστάθμισης αέργου ισχύος

Από την εξίσωση (5), έχουμε:

$$\Delta V = V_{GEN} - V_S \cong R(P_G - P_L) + XQ_{import} \quad (11)$$

όπου, $Q_{import} = \pm Q_G - Q_L \pm Q_C$

Αν θεωρήσουμε την ακραία περίπτωση μέγιστης παραγωγής/μηδενικού φορτίου και λειτουργία των μονάδων με συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας, η εξίσωση (11) μπορεί να γραφεί:

$$\Delta V_{worst} = V_{GENmax} - V_S \cong RP_{Gmax} + XQ_{import} \quad (12)$$

Από την εξίσωση (11), παρατηρούμε ότι αν η ποσότητα XQ_{import} λάβει μεγάλες αρνητικές τιμές, δηλαδή αν αυξηθεί η εγγεόμενη άεργος ισχύς, η ανύψωση τάσης θα μειωθεί. Το ποσό της άεργου που μπορεί να παραχθεί γενικά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των γεννητριών. Συνήθως, μια σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει με συντελεστή ισχύος 0,95 χωρητικό ενώ μια ανεμογεννήτρια με τιμές χωρητικού συντελεστή ισχύος περίπου 0,9.

Είναι σημαντική η παρατήρηση ότι η αποτελεσματικότητα της εισαγωγής άεργου ισχύος, επηρεάζεται σημαντικά από την τιμή του λόγου X/R . Στο πλαίσιο αυτό, η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος είναι πιο αποτελεσματική σε εναέρια δίκτυα (με τυπική τιμή επαγωγικής αντίδρασης περίπου 0,4 Ω/km), από ότι σε καλωδιακά δίκτυα (με τυπική αντίδραση 0,1 Ω/km). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η απορρόφηση άεργου ισχύος θα οδηγήσει σε αύξηση των ζημιών. Επομένως στο σχεδιασμό ενός τέτοιου σχήματος ελέγχου θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και οι απώλειες.

3. Συντονισμένος έλεγχος τάσης

Στα συμβατικά παθητικά δίκτυα διανομής, είναι συνηθισμένη πρακτική να ανυψώνεται το μέτρο της τάσης στο άκρο αναχώρησης, ώστε καθώς αυτό πέφτει λόγω της ωμικής αντίστασης να παραμένει εντός των προβλεπόμενων ορίων $\pm 10\%$ στο άκρο άφιξης. Όπως είδαμε παραπάνω, ισχύει:

$$\Delta V_{worst} = V_{GENmax} - V_S \quad (13)$$

Συνεπώς, ρυθμίζοντας την τάση στο άκρο αναχώρησης μέσω ρυθμιστή τάσης υπό φορτίο (OLTC), μπορούμε να μεταβάλλουμε την αύξηση της τάσης. Αυτός ο τρόπος ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί σε σχετικά μικρά συστήματα διανομής, αλλά στην περίπτωση των μεγάλων και σύνθετων δικτύων που περιλαμβάνουν πολλούς μετασχηματιστές διανομής μπορεί να είναι ανέφικτος.

4. Περικοπή παραγόμενης ενεργού ισχύος

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πιθανότητα να συμβούν τέτοια ακραία σενάρια (σύμπτωση ελάχιστης κατανάλωσης και μέγιστης παραγωγής) είναι γενικά πολύ μικρή. Επομένως, θα ήταν προτιμότερο να λειτουργούν μεγαλύτερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ταυτόχρονα να υπάρχει δυνατότητα μείωσης της

παραγόμενης ισχύος τους στην περίπτωση που παρατηρηθεί αύξηση της τάσης πάνω από τα όρια στο ζυγό σύνδεσής τους.

Αν συμβολίσουμε ως P_{Gcur} την ποσότητα περικοπής ισχύος (kW), από την (9) προκύπτει ότι:

$$P_{Gmax} - P_{Gcur} \cong \frac{V_{GENmax} - V_S}{R} \quad (14)$$

και λόγω της (13) :

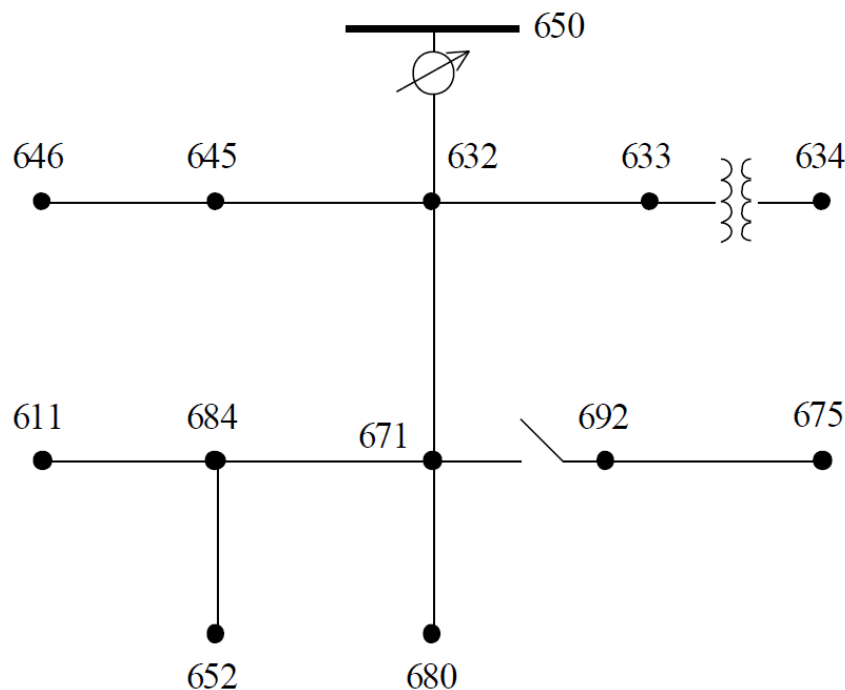
$$\Delta V_{worst} \cong RP_{Gmax} - RP_{Gcur} \Rightarrow$$

$$\Delta V_{worst} \cong R(P_{Gmax} - P_{Gcur}) \quad (15)$$

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ

3.1 IEEE 13-Node Test Feeder

Τα δεδομένα και τα χαρακτηριστικά του δικτύου IEEE 13-node test feeder διατίθενται από την κοινότητα ηλεκτρικής ενέργειας της IEEE (IEEE Power and Energy Society) για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Το συγκεκριμένο πρότυπο δίκτυο είναι σχετικά μικρό, κάτι που προσφέρεται για επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις. Πρόκειται για ένα σύστημα ζυγών με ασύμμετρα και διανεμημένα φορτία, με γραμμές μεταφοράς τόσο εναέριες όσο και υπόγειες, με πυκνωτές και έναν μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα όπως δίνεται από την κοινότητα του IEEE. Το πρότυπο αυτό δίκτυο περιλαμβάνει έναν μετασχηματιστή τάσης, έναν ρυθμιστή τάσης, πέντε διαφορετικές διατάξεις εναερίων γραμμών μεταφοράς και δύο διατάξεις υπογείων γραμμών, δύο συστοιχίες πυκνωτών, δώδεκα κομμάτια γραμμών μεταφοράς, έναν διακόπτη, οκτώ συγκεντρωμένα φορτία και ένα διανεμημένο.



Σχήμα 3.1 IEEE 13 Node Distribution Test Feeder

Το δίκτυο λειτουργεί υπό ονομαστική τάση 4,16 kV και για τους υπολογισμούς επιλέχθηκε βάση ισχύος ίση με 5 MVA. Όλες οι παράμετροι και τα δεδομένα που χαρακτηρίζουν το δίκτυο των 13 κόμβων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Φορτία:

Το IEEE-13 δίκτυο αποτελείται από 3 είδη φορτίων τόσο σε συνδεσμολογία αστέρα όσο και σε τριγώνου: σταθερής ισχύος (PQ), σταθερής αντίστασης (Z) και σταθερού ρεύματος (I). Υπάρχει ακόμα ένα διανεμημένο φορτίο κατά μήκος της γραμμής 632-671. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι κωδικοί για τα μοντέλα φορτίου και τα αντίστοιχα δεδομένα του δικτύου.

Πίνακας 3.1 Κωδικοί περιγραφής μοντέλων φορτίων

Code	Connection	Model
Y-PQ	Wye	Constant kW and KVAr
Y-I	Wye	Constant Current
Y-Z	Wye	Constant Impedance
D-PQ	Delta	Constant kW and KVAr
D-I	Delta	Constant Current
D-Z	Delta	Constant Impedance

Πίνακας 3.2 Δεδομένα συγκεντρωμένων φορτίων
IEEE 13 Node Distribution Test Feeder

Node	Load Model	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Πίνακας 3.3 Δεδομένα διανεμημένου φορτίου IEEE 13 Node Distribution Test Feeder

Node A	Node B	Load Model	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
			kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Από τα δεδομένα προκύπτει η κατανάλωση kW, kVAr και ο συντελεστής ισχύος σε κάθε φάση. Τα μεγέθη του σταθερού ρεύματος και της σταθερής εμπέδησης μπορούν να υπολογιστούν υποθέτοντας ονομαστική τάση (1.0 per unit). Η ονομαστική συχνότητα είναι 60Hz και η ονομαστική τάση εξαρτάται από τη συνδεσμολογία (αστέρας ή τρίγωνο) και από την τάση του κόμβου στον οποίο είναι συνδεδεμένο το φορτίο.

Για τη μοντελοποίηση όλων των τύπων φορτίων χρησιμοποιήθηκε το μονοφασικό μοντέλο σταθερής ισχύος (PQ), με το λογισμικό προσομοίωσης MATPOWER. Επειδή δεν είναι όλα τα φορτία τριφασικά και ακόμα και αυτά που είναι τριφασικά έχουν διαφορετικές τιμές ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε φάση, οι ισχύεις P και Q για το μονοφασικό μοντέλο προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$P = \frac{P_{ph1} + P_{ph2} + P_{ph3}}{3} \quad \text{και} \quad Q = \frac{Q_{ph1} + Q_{ph2} + Q_{ph3}}{3}$$

όπου P_{ph1} , P_{ph2} , P_{ph3} και Q_{ph1} , Q_{ph2} , Q_{ph3} οι καταναλώσεις ενεργού και άεργου ισχύος ανά φάση.

Το διανεμημένο φορτίο ανάμεσα στους κόμβους 632 και 671 χωρίστηκε σε δύο ίσα μέρη, όπου το 50% του φορτίου τοποθετήθηκε στην αρχή της γραμμής και το υπόλοιπο στο τέλος αυτής.

Εγκάρσιοι πυκνωτές:

Οι συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών μπορεί να συνδέονται σε τρίγωνο ή αστέρα όπου υπάρχουν 3 φάσεις και μεταξύ φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης στην περίπτωση μονοφασικής σύνδεσης. Μοντελοποιούνται ως στοιχεία εγκάρσιας χωρητικότητας (susceptance), σύμφωνα με τη σχέση:

$$B_c = \omega C = \frac{Q}{V^2} \quad [S]$$

Πίνακας 3.4 Δεδομένα εγκάρσιων πυκνωτών ανιστάθμισης αέργου ισχύος

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611	0	0	100
Total	200	200	300

Γραμμές μεταφοράς:

Η περιγραφή και τα μεγέθη των τμημάτων των γραμμών δίνονται στους παρακάτω πίνακες και αναφέρονται στη διάμετρο των αγωγών, τη διάταξη των καλωδίων φάσεων από αριστερά προς τα δεξιά, τις αποστάσεις μεταξύ τους και το μήκος τους, όπως αναφέρονται στο [23]. Όλες οι μονάδες στη συνέχεια μετατράπηκαν σε αυτές του Διεθνούς Συστήματος (SI) και στο ανά μονάδα σύστημα όπου ήταν απαραίτητο.

Πίνακας 3.5 Δεδομένα υπογείων τμημάτων γραμμής

Config.	Phasing	Cable	Neutral	Space ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Πίνακας 3.6 Δεδομένα εναερίων τμημάτων γραμμής

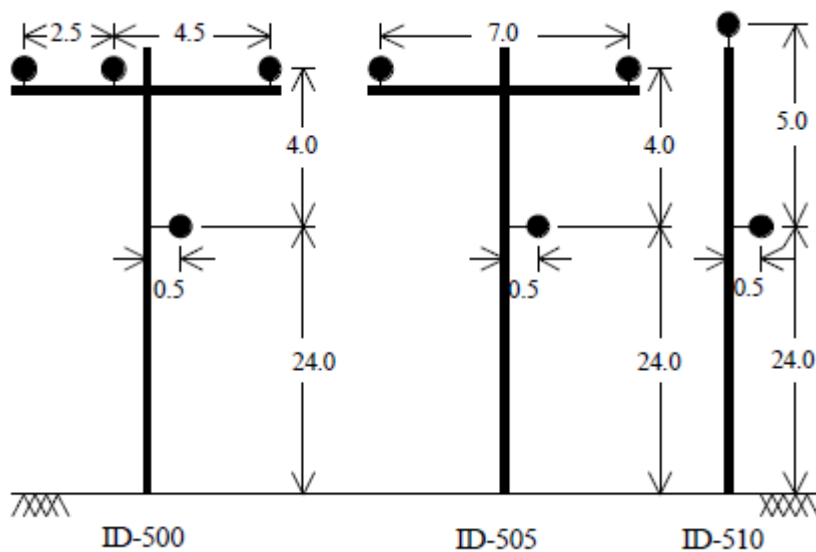
Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
		ACSR	ACSR	ID
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510

Πίνακας 3.7 Κωδικοί χαρακτηρισμού κάθε τμήματος γραμμής

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Πίνακας 3.8 Κωδικοί εναερίων γραμμών

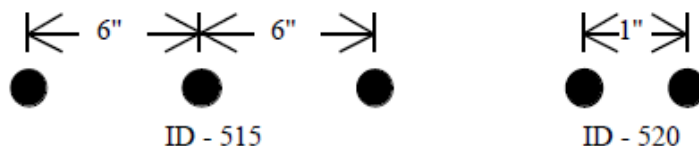
Spacing ID	Space ID
500	Three-Phase, 4 wire
505	Two-Phase, 3 wire
510	Single-Phase, 2 wire



Σχήμα 3.2 Αποστάσεις εναερίων γραμμών

Πίνακας 3.8 Κωδικοί εναερίων γραμμών

Spacing ID	Space ID
515	Three-Phase, 3 Cable
520	Single-Phase, 2 cable



Σχήμα 3.3 Αποστάσεις υπογείων γραμμών

3.2 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα

Τα τριφασικά συστήματα μπορούν να αναλυθούν και να μελετηθούν εύκολα με τη βοήθεια ισοδύναμων μονοφασικών κυκλωμάτων. Ένα τριφασικό σύστημα μπορεί να παρασταθεί από ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα όταν είναι συμμετρικό, δηλαδή όλες οι φάσεις είναι ίδιες, δεν υπάρχουν ζεύξεις μεταξύ φάσεων, ή όταν υπάρχουν ζεύξεις και είναι όλες ίσες μεταξύ τους, και επιπλέον το κύκλωμα τροφοδοτείται από συμμετρικό σύστημα τάσεων. Η συμμετρία του συστήματος στην περίπτωση αυτή είναι διαγώνια και κυκλική. Τα τριφασικά συστήματα τα οποία συναντώνται στην πράξη, δεν είναι απολύτως συμμετρικά, όπως συμβαίνει και για το συγκεκριμένο παράδειγμα του δικτύου IEEE 13 Node Distribution Test Feeder. Όμως αν οι ασυμμετρίες που οφείλονται σε ζεύξεις μεταξύ φάσεων, δηλαδή αμοιβαίες επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις, είναι σχετικά πολύ μικρές και μπορούν να αγνοηθούν, τότε το σύστημα αποκτά δυνατότητα μονοφασικής ισοδυναμίας.

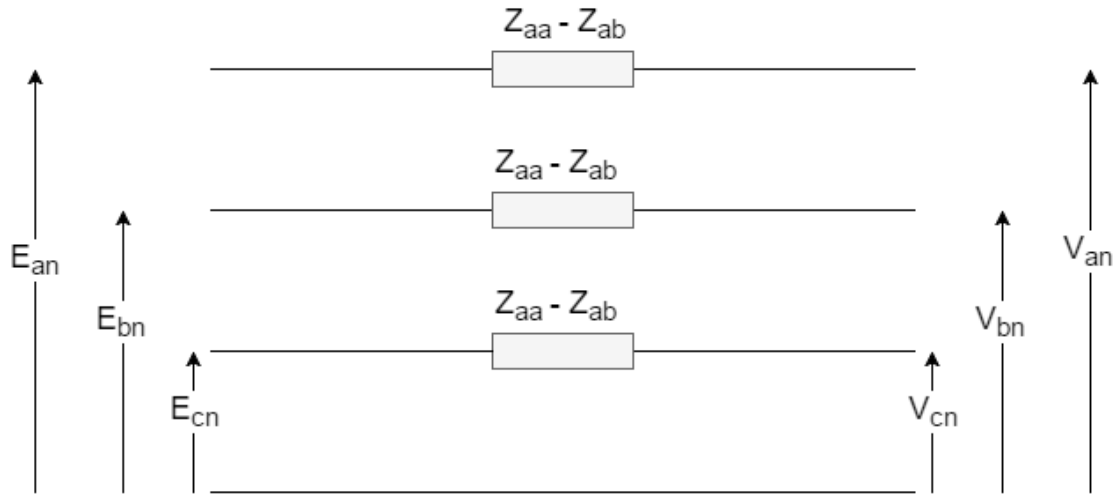
Η μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς έγινε με τη χρήση του μονοφασικού μοντέλου π-ισοδύναμου. Το συγκεκριμένο δίκτυο δεν είναι απολύτως συμμετρικό και συνεπώς το ρεύμα διαφέρει από φάση σε φάση. Για να αναλυθούν οι συγκεκριμένες συνθήκες χρειάστηκε να εφαρμοστεί η παρακάτω προσέγγιση για τις αντιστάσεις των γραμμών. Από τα δεδομένα του δικτύου μας δίνεται η μήτρα αντιστάσεων:

$$[\hat{Z}_\varphi] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix}$$

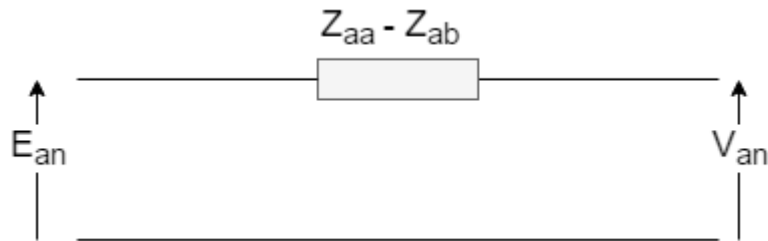
για τις οποίες ισχύει: $\hat{Z}_{ab} \cong \hat{Z}_{ba}$, $\hat{Z}_{ac} \cong \hat{Z}_{ca}$, $\hat{Z}_{bc} \cong \hat{Z}_{cb}$

Το μονοφασικό ισοδύναμο μπορεί να σχηματιστεί μόνο στην περίπτωση που έχουμε κυκλική και διαγώνια συμμετρία για τον πίνακα $[\hat{Z}_\phi]$, δηλαδή:

$$\hat{Z}_{aa} = \hat{Z}_{bb} = \hat{Z}_{cc} \quad \text{και} \quad \hat{Z}_{ab} = \hat{Z}_{ac} = \hat{Z}_{bc}$$



Σχήμα 3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα συμμετρικής τριφασικής γραμμής τροφοδοτούμενο από συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων



Σχήμα 3.5 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού κυκλώματος σχ. 3.4

Επίσης από τα δεδομένα, αυτές οι τιμές σύνθετων αντιστάσεων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους: $\hat{Z}_{aa} \cong \hat{Z}_{bb}$, $\hat{Z}_{bb} \cong \hat{Z}_{cc}$, $\hat{Z}_{ab} \cong \hat{Z}_{ac}$, $\hat{Z}_{ac} \cong \hat{Z}_{bc}$

Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση σειράς στο μονοφασικό ισοδύναμο-π είναι:

$$\hat{Z}_s = \hat{Z}_{aa} - \hat{Z}_{ab}$$

Τέλος, αμελούνται οι χωρητικότητες μεταξύ φάσεων και οι χωρητικότητες μεταξύ κάθε αγωγού και γης είναι ίσες μεταξύ τους, οπότε από τα δεδομένα προκύπτει η εγκάρσια αντίστροφη χωρητική αντίδραση $b_c = \omega C$ σε $\mu S/\text{mile}$.

Μετασηματιστές:

Το πρότυπο δίκτυο δεκατριών κόμβων της IEEE περιλαμβάνει δύο μετασηματιστές. Ο ένας λειτουργεί ως ρυθμιστής τάσης και βρίσκεται ακριβώς μετά τον υποσταθμό σε συνδεσμολογία Δ-Υ. Ο δεύτερος είναι ένας τριφασικός μετασηματιστής υποβιβασμού τάσης και βρίσκεται ανάμεσα στους κόμβους 633 και 634. Σχετικά με τη μοντελοποίησή τους, λάβαμε υπόψιν μόνο τις ονομαστικές τιμές ωμικής αντίστασης και επαγωγικής αντίδρασης σειράς (r % και x %).

Συσκευή Προστασίας:

Το πρότυπο δίκτυο των 13 κόμβων περιλαμβάνει μια συσκευή προστασίας (τριφασικός διακόπτης) ανάμεσα στους κόμβους 671 και 692. Η συσκευή αυτή παραλείφθηκε στη μοντελοποίηση του δικτύου διότι δεν έχει κάποια επίδραση στις μεταβολές τάσεις των ζυγών.

3.3 Λογισμικό προσομοίωσης MATPOWER

Το MATPOWER [52] είναι ένα πακέτο προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με λογισμικό ανοικτού κώδικα που βασίζεται στο MATLAB. Χρησιμοποιείται ευρέως στην εκπαίδευση και στην έρευνα για την επίλυση προβλημάτων AC και DC Ροής Φορτίου (Power Flow-PF) και Βέλτιστης Ροής Φορτίου (Optimal Power Flow-OPF). Ενώ συχνά χρησιμοποιείται σαν ένα εργαλείο για την απλή εκτέλεση προσομοιώσεων που ορίζονται μέσω ενός αρχείου εισόδου, το λογισμικό αυτό είναι πολύτιμο ως μια βιβλιοθήκη λειτουργιών για χρήση σε προσαρμοσμένο κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια κάποιας έρευνας. Σε αυτό το χαμηλότερο επίπεδο, το MATPOWER παρέχει εύκολες στη χρήση λειτουργίες για τη διαμόρφωση πινάκων \mathbf{Yb} και \mathbf{B} ενός συνηθισμένου δικτύου, τον υπολογισμό της μεταφοράς ισχύος και διάφορων συντελεστών διακοπής της διανομής (PTDFs, LODFs) και τον αποτελεσματικό υπολογισμό πρώτων και δεύτερων παραγώγων των εξισώσεων ροής ισχύος, ανάμεσα σε άλλα. Σε υψηλότερο επίπεδο, η δομή της Βέλτιστης Ροής Φορτίου έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι επεκτάσιμη, επιτρέποντας στο χρήστη να εισάγει μεταβλητές, κόστη και γραμμικούς περιορισμούς ανάλογα με τις ανάγκες του.

Η προεπιλεγμένη μέθοδος επίλυσης της Βέλτιστης Ροής Φορτίου είναι μία μέθοδος επίλυσης εσωτερικού σημείου υψηλής απόδοσης (primal-dual interior point solver) που εφαρμόζεται στο MATLAB. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης γενικώς αλλά περιλαμβάνει και μια συνάρτηση η οποία την καθιστά ικανή να διαμορφώνει και να επιλύει προβλήματα γραμμικού (Linear Programming-LP) και τετραγωνικού (Quadratic Programming-QP) προγραμματισμού.

3.4 Μοντελοποίηση

Το MATPOWER χρησιμοποιεί όλα τα μοντέλα σταθερής κατάστασης που τυπικά εφαρμόζονται για τη ανάλυση της ροής φορτίου. Επειδή στο πρόβλημά μας θα χρησιμοποιήσουμε τα AC μοντέλα, θα περιγράψουμε μόνο αυτά στη συνέχεια. Τα μέτρα όλων των μεγεθών εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα και οι γωνίες σε rad. Όλοι οι ζυγοί αριθμούνται διαδοχικά ξεκινώντας από το 1 και οι γεννήτριες ταυτοποιούνται από το ζυγό στον οποίο είναι συνδεδεμένες. Τα μοντέλα και οι εξισώσεις παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων και διανυσμάτων, λόγω της ικανότητας του MATLAB να τους χειρίζεται αποτελεσματικά.

3.4.1 Μορφές Δεδομένων

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το MATPOWER είναι τα M-αρχεία ή MAT-αρχεία του MATLAB που ορίζουν και επιστρέφουν μια δομή (struct) του MATLAB. Η μορφή του M-αρχείου είναι ένα κείμενο το οποίο μπορεί να γραφεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου. Τα πεδία (fields) της δομής είναι η βάση ισχύος (baseMVA), ο ζυγός (bus), ο κλάδος (branch), η γεννήτρια (gen) και προαιρετικά το κόστος της γεννήτριας (gencost) από τα οποία το baseMVA είναι βαθμωτό ενώ όλα τα υπόλοιπα είναι μήτρες. Στις μήτρες η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ζυγό, κλάδο ή γεννήτρια. Ο αριθμός των γραμμών στα πεδία των δομών bus, branch και gen συμβολίζεται με nb, nl και ng αντίστοιχα.

3.4.2 Κλάδοι

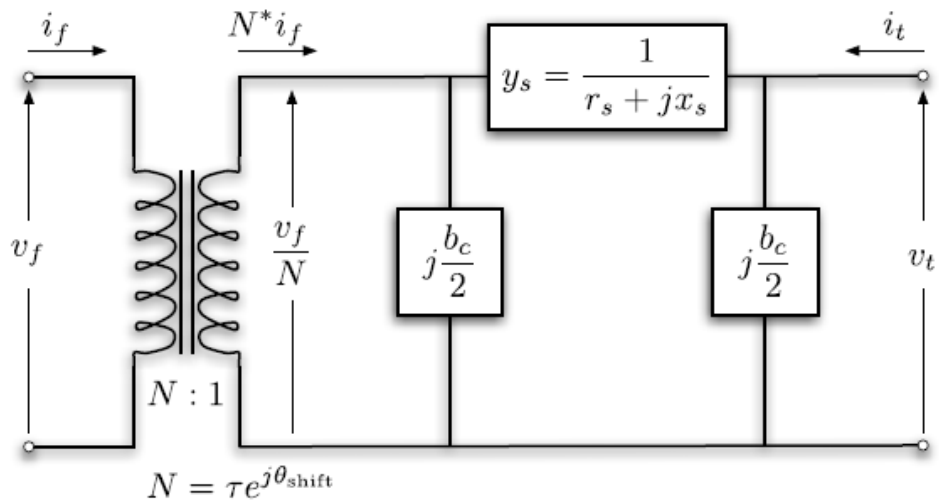
Όλες οι γραμμές μεταφοράς, οι μετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές αλλαγής φάσης μοντελοποιούνται με ένα κοινό μοντέλο κλάδου, το οποίο αποτελείται από μία αντίσταση σειράς $z_s = r_s + jx_s$ και ολική χωρητικότητα φόρτισης b_c σε σειρά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή φάσης. Ο μετασχηματιστής, του οποίου η αναλογία ρύθμισης (tap ratio) έχει μέτρο τ και γωνία αλλαγής φάσης θ_{shift} , βρίσκεται στο αριστερό άκρο του κλάδου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.6. Οι παράμετροι της ωμικής αντίστασης r_s , της επαγωγικής αντίδρασης x_s , της εγκάρσιας χωρητικότητας b_c , τ και θ_{shift} εισάγονται στις κατάλληλες στήλες του πίνακα στη δομή branch.

Τα διανυσματικά ρεύματα i_f και i_t στην αναχώρηση (from) και στην άφιξη (to) του κλάδου αντίστοιχα, μπορούν να εκφραστούν με τη βοήθεια μιας 2×2 μήτρας αγωγιμοτήτων Y_{br} και των αντίστοιχων τερματικών τάσεων v_f και v_t :

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix}$$

Στο αντίστοιχο ισοδύναμο π , η εν σειρά αγωγιμότητα συμβολίζεται με $y_s = 1/z_s$, η μήτρα αγωγιμοτήτων του κλάδου μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} \left(y_s + \frac{jb_c}{2}\right) \frac{1}{\tau^2} & \frac{-y_s}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ \frac{-y_s}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j \frac{b_c}{2} \end{bmatrix}$$



Σχήμα 3.6 Μονοφασικό π -ισοδύναμο μοντέλο κλάδου

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΤΑΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια των ευαισθησιών τάσης ως προς τη μεταβολή της ενεργού και αέργου ισχύος. Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης τάσης βασίζεται στην αξιοποίηση της υψηλής ενσωμάτωσης μονάδων ΔΠ, μέσω της διαχείρισης της παραγωγής τους. Γενικά, όταν μια γεννήτρια εγγέει ισχύ στο δίκτυο παρατηρείται ανύψωση της τάσης, όμως κάποιοι ζυγοί επηρεάζονται περισσότερο. Στα δίκτυα μεταφοράς ΥΤ, το μέτρο της τάσης επηρεάζεται κυρίως από τις εγχύσεις αέργου ισχύος, διότι η ωμική αντίσταση των γραμμών σε σχέση με την επαγωγική τους αντίδραση είναι αμελητέα. Αντίθετα, στα δίκτυα διανομής ΜΤ/ΧΤ, το μέτρο της τάσης εξαρτάται και από την παραγωγή/κατανάλωση ενεργού ισχύος. Η επίδραση αυτή μελετάται μέσω των συντελεστών ευαισθησίας τάσης. Επίσης, με βάση τις τιμές αυτές, έχουν αναπτυχθεί διάφορα σχήματα ρύθμισης τάσης (π.χ. [49]), με σκοπό να διευκολυνθεί η ένταξη των διεσπαρμένων μονάδων στο σύστημα και ταυτόχρονα την ελαχιστοποίηση των μεταβολών ισχύος που απαιτούνται από κάθε μονάδα.

4.2 Επισκόπηση θεωρίας ευαισθησιών

Η θεωρία ανάλυσης ευαισθησιών τάσης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ρύθμισης τάσης στα δίκτυα μεταφοράς ΥΤ. Βασίζεται στον υπολογισμό των στοιχείων της Ιακωβιανής μήτρας, η οποία αποτελεί γραμμικοποιημένη σχέση μεταξύ της τάσης (μέτρο και γωνία) των ζυγών του δικτύου και των μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό.

Οι ζυγοί ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε 3 κατηγορίες:

1. *Ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς*: ο ζυγός του συστήματος που χρησιμεύει για να αντισταθμίσει τις - άγνωστες αρχικά - απώλειες του δικτύου και για την άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Το μέτρο τάσης (V) και η φασική γωνία (θ) θεωρούνται δεδομένα.

2. *Ζυγός φορτίου ή ζυγός PQ*: οποιοσδήποτε ζυγός για τον οποίο η έγχυση πραγματικής ισχύος (P) και αέργου (Q) θεωρούνται γνωστές, ενώ άγνωστα είναι το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης.

3. *Ζυγός παραγωγής ή ζυγός PV*: οποιοσδήποτε ζυγός για τον οποίο η έγχυση πραγματικής ισχύος (P) και το μέτρο της τάσης (V) θεωρούνται γνωστά, ενώ άγνωστες είναι η έγχυση αέργου και η φασική γωνία της τάσης.

Η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό i του συστήματος περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$P_i = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad \text{και} \quad Q_i = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

όπου V_i, V_j τα μεγέθη των τάσεων των ζυγών i και j αντίστοιχα, $G_{ij} + B_{ij}$ το i,j στοιχείο της μήτρας αγωγιμοτήτων και N το πλήθος των ζυγών [27].

Εάν αριθμήσουμε τους ζυγούς ώστε ο ζυγός 1 να είναι ο ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως m να είναι οι ζυγοί παραγωγής και $m+1$ έως N οι ζυγοί φορτίου, τότε η Ιακωβιανή μήτρα J είναι [28]:

$$\begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial |V_{m+1}|} |V_{m+1}| & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_N|} |V_N| \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial |V_{m+1}|} |V_{m+1}| & \cdots & \frac{\partial P_N}{\partial |V_N|} |V_N| \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial |V_{m+1}|} |V_{m+1}| & \cdots & \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial |V_N|} |V_N| \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial |V_{m+1}|} |V_{m+1}| & \cdots & \frac{\partial Q_N}{\partial |V_N|} |V_N| \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Η Ιακωβιανή έχει διαστάσεις $(2N-m-1) \times (2N-m-1)$. Οι υπομήτρες $J_{p\theta}$ και J_{qv} είναι τετραγωνικές με διαστάσεις $(N-1) \times (N-1)$ και $(N-m) \times (N-m)$ αντίστοιχα, ενώ οι J_{pv} και $J_{q\theta}$ δεν είναι τετραγωνικές.

Οι εξισώσεις ροής ισχύος για κάθε κόμβο i μιας γραμμής, είναι της μορφής:

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i = V_i^2 [Y_{i(i+1)} + Y_{i(i-1)}] - \hat{V}_i [\hat{V}_{i+1} Y_{i(i+1)} + \hat{V}_{i-1} Y_{i(i-1)}]$$

όπου Y_{ij} είναι το (i,j) στοιχείο της μήτρας αγωγιμοτήτων του δικτύου.

Μέσω της γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής ισχύος γύρω από το σημείο λειτουργίας, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q/V^0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (1)$$

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, τα δίκτυα διανομής MT περιλαμβάνουν κυρίως αγωγούς με σχετικά μεγάλο λόγο R/X , δεν ισχύει η υπόθεση ότι η ΔP είναι συζευγμένη κυρίως με τη $\Delta \theta$ και η ΔQ με τη ΔV .

Ωστόσο, η επίδραση των μεταβολών παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος στις τάσεις των ζυγών μπορεί να περιγραφεί ξεχωριστά από την (1) μέσω των εξισώσεων:

$$[\Delta P] = [J_{pv} - J_{p\theta} J_{q\theta}^{-1} J_{qv}] [\Delta V] = [A] [\Delta V] \quad (2)$$

$$[\Delta Q/V^0] = [J_{qv} - J_{q\theta} J_{p\theta}^{-1} J_{pv}] [\Delta V] = [B] [\Delta V] \quad (3)$$

Από αυτές τις εξισώσεις μπορούμε να συμπεράνουμε την ικανότητα για ρύθμιση της τάσης, μέσω μεταβαλλόμενης ενεργού ή/και άεργου ισχύος των μονάδων ΔΠ στη Μ.Τ.

Θεωρώντας ότι η ζήτηση φορτίου και η παραγωγή ενεργού ισχύος είναι σταθερές, η (3) μπορεί να γραφεί:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ [\Delta Q_g/V_g^0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta V_L] \\ [\Delta V_g] \end{bmatrix} \quad (4)$$

όπου τα ΔQ_g και ΔV_g αντιστοιχούν στη μεταβολή της αέργου ισχύος και της τάσης των ζυγών παραγωγής ενώ τα ΔQ_L και ΔV_L αντιστοιχούν στη μεταβολή της αέργου ισχύος και της τάσης των ζυγών φορτίου. Άρα:

$$[\Delta V_g] = [D] [\Delta Q_g/V_g^0] \quad (5)$$

όπου: $[D] = [C_{21} C_{11}^{-1} C_{12} - C_{22}]^{-1}$ (6)

Χρησιμοποιώντας την (6), ο συντελεστής ευαισθησίας αέργου ισχύος β_j καθορίζεται ως:

$$\beta_j = \frac{D_{ij}}{V_j^0} \quad (7)$$

και δηλώνει την ευαισθησία της τάσης του ζυγού i για μεταβολή της αέργου ισχύος της γεννήτριας j [30], [49]. Συνεπώς τα μέτρα τάσης των ζυγών είναι δυνατόν να ελεγχθούν μέσω κατάλληλης μεταβολής της αέργου βασισμένης στις τιμές των παραγόντων β_j .

Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να δειχθεί και η σχέση μεταξύ των τάσεων των ζυγών και της παραγωγής ενεργού ισχύος. Αυτή η διαδικασία ελέγχου επιλέγεται όταν η δυνατότητα παραγωγής αέργου από τις γεννήτριες διεσπαρμένης παραγωγής έχει φτάσει στο όριο. Αν $\Delta Q = 0$, η μεταβολή ενεργού προκύπτει από την (2) ως εξής:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ [\Delta P_g] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta V_L] \\ [\Delta V_g] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Οπότε,
$$[\Delta V_g] = [F] [\Delta P_g] \quad (9)$$

όπου:
$$[F] = [E_{21} \ E_{11}^{-1} \ E_{12} - E_{22}]^{-1} \quad (10)$$

Από την (10) προκύπτει ένας παράγοντας ευαισθησίας ενεργού ισχύος γ_j που καθορίζεται ως:

$$\gamma_j = E_{ij} \quad (11)$$

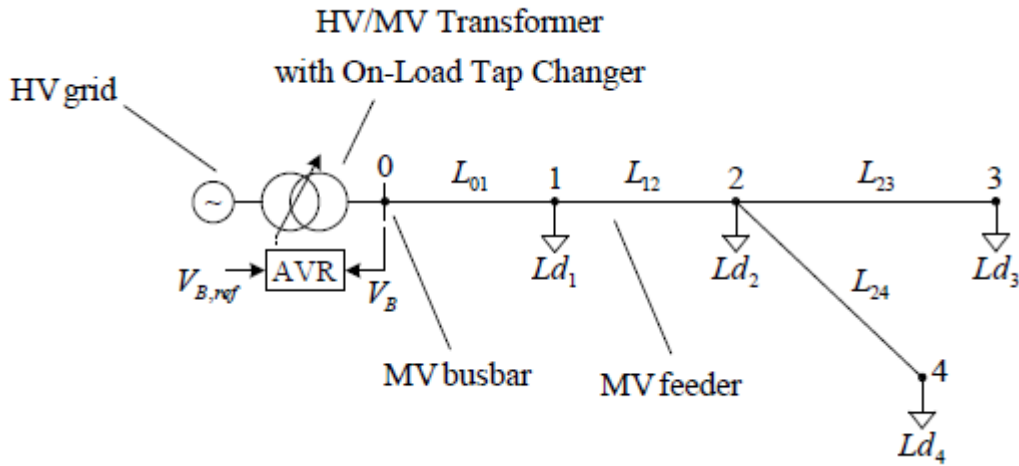
Επομένως, η μεταβολή της παραγωγής ενεργού μπορεί επίσης να συμβάλλει στη ρύθμιση της τάσης μέσω κατάλληλων συγκρίσεων των παραγόντων ευαισθησίας γ_j . Ο έλεγχος της τάσης χρησιμοποιώντας την παραγωγή αέργου ισχύος παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα στην περίπτωση βύθιση τάσης στο τέλος μιας γραμμής, καθώς συχνά απαιτούνται μεγάλα ποσά αέργου που μπορεί να υπερβαίνουν τα όρια δυνατοτήτων παραγωγής της γεννήτριας. Επιπλέον, για την ενεργό ισχύ έχουμε μόνο τη δυνατότητα απομείωσης ή περικοπής της, και ένα τέτοιο σχήμα ελέγχου θα ήταν χρήσιμο μόνο σε περιπτώσεις ανύψωσης τάσης. Επομένως, θεωρητικά, ο συνδυασμός των σχημάτων παροχής αέργου και περικοπής ενεργού αποτελεί μία καλύτερη λύση, για την αντιμετώπιση διαφόρων μεταβολών της τάσης.

4.3 Υπολογισμός ευαισθησιών τάσης ακτινικών δικτύων διανομής

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα της παραπάνω μεθόδου καθώς και η ανάγκη γνώσης όλων των δεδομένων τάσης και γωνίας του δικτύου, την καθιστούν μη αποδοτική για να εφαρμοσθεί για τον έλεγχο της τάσης ενός ακτινικού δικτύου διανομής. Στη συνέχεια αποδίδονται 4 τρόποι προσεγγιστικού υπολογισμού, οι οποίοι αξιοποιούν τα χαρακτηριστικά του ακτινικού δικτύου με σκοπό την αποφυγή περιττών υπολογισμών.

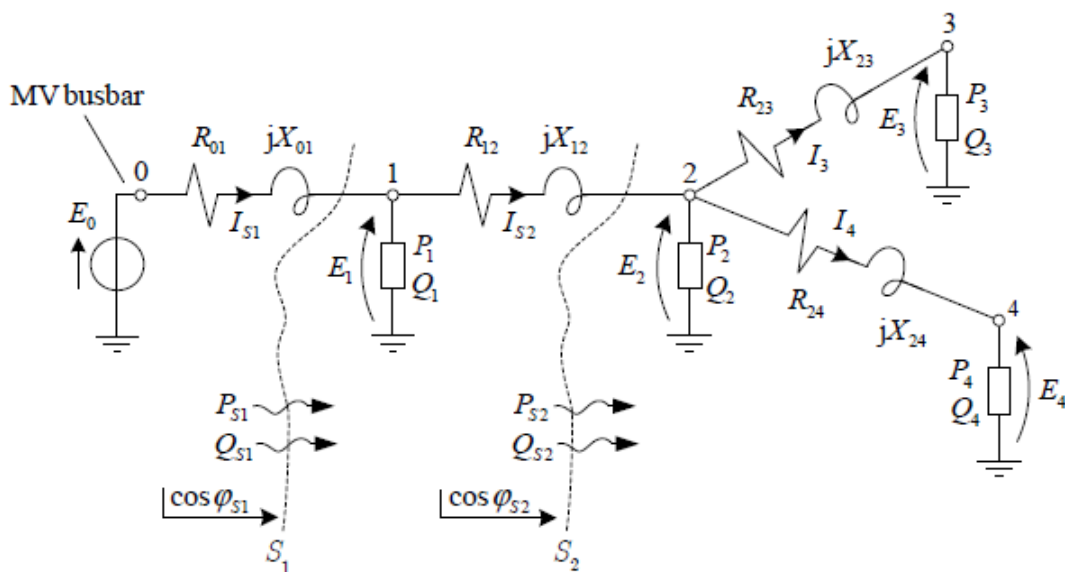
4.3.1 Πρώτη προσεγγιστική μέθοδος

Έστω το δίκτυο διανομής 4 κόμβων του σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1. Παράδειγμα δικτύου διανομής 4 κόμβων [31]

Τα φορτία L_{d1} , L_{d2} , L_{d3} , L_{d4} θεωρούνται σταθερής ισχύος (PQ) και συμμετρικά. Οι γραμμές $L_{01} \dots L_{24}$ μοντελοποιούνται με το RL κύκλωμα θετικής ακολουθίας αλλά αμελούνται οι εγκάρσιες χωρητικότητες. Ο ζυγός 0 αντιστοιχεί στο ζυγό του υποσταθμού MT/XT με σταθερό μέτρο τάσης E_0 . Αυτή επιλέγεται ως η τιμή αναφοράς της τάσης και συμπίπτει με την ονομαστική, δηλαδή $E_0 = V_n / \sqrt{3}$. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα [31]

Επειδή ο ζυγός ταλάντωσης είναι ρυθμισμένος σε τάση E_0 , μπορούμε να προσδιορίσουμε ως V_{0i} την τάση οποιουδήποτε ζυγού E_i ως προς τον ζυγό αναφοράς, δηλαδή:

$$V_{0i} = E_0 - E_1 \quad (12)$$

Σε ένα ακτινικό δίκτυο όπως το εικονιζόμενο, η διαφορά τάσης υπολογίζεται ως το άθροισμα τάσεων από τον ζυγό MT μέχρι τον i -οστό κόμβο. Για παράδειγμα, αν $i=3$:

$$V_{03} = E_0 - E_3 \quad (13)$$

Στη σχέση αυτή προσθαφαιρώντας τους επιμέρους όρους τάσης των ζυγών που μεσολαβούν λαμβάνουμε:

$$V_{03} = (E_0 - E_1) + (E_1 - E_2) + (E_2 - E_3) = V_{01} + V_{12} + V_{23} \quad (14)$$

όπου V_{03} είναι το άθροισμα των διαφορών τάσης V_{01} , V_{12} και V_{23} . Εφόσον οι παράμετροι του δικτύου και η ροή ισχύος είναι γνωστά, η τάση V_{23} μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{23} &= E_2 - E_3 = R_{23} I_3 \cos \varphi_3 + X_{23} I_3 \sin \varphi_3 = \\ &= \frac{R_{23} I_3 E_3 \cos \varphi_3 + X_{23} I_3 E_3 \sin \varphi_3}{E_3} = \frac{R_{23} P_3 + X_{23} Q_3}{E_3} \end{aligned} \quad (15)$$

όπου $\cos \varphi_3$ είναι ο συντελεστής ισχύος για το φορτίο Ld_3 , P_3 και Q_3 η ενεργός και άεργος ισχύς του, ενώ I_3 , R_{23} και X_{23} είναι το ρεύμα, η ωμική αντίσταση και η αντίδραση της γραμμής L_{23} .

Αν υποθεθεί ότι το μέτρο τάσης των κόμβων έχει την ίδια τιμή με την ονομαστική τάση E_n , μπορούμε να γράψουμε:

$$V_{23} \cong \frac{R_{23} P_3 + X_{23} Q_3}{E_n} \quad (16)$$

Με τον ίδιο τρόπο, για τους κόμβους 1 και 2 προκύπτει:

$$\begin{aligned} V_{12} &= E_1 - E_2 = R_{12} I_2 \cos \varphi_{S2} + X_{12} I_2 \sin \varphi_{S2} = \\ &= \frac{R_{12} E_2 I_2 \cos \varphi_{S2} + X_{12} E_2 I_2 \sin \varphi_{S2}}{E_2} \cong \frac{R_{12} P_{S2} + X_{12} Q_{S2}}{E_n} \end{aligned} \quad (17)$$

όπου P_{S2} και Q_{S2} είναι η ενεργός και άεργος ισχύς που καταναλώνονται στον τομέα S_2 και $\cos\phi_2$ ο συντελεστής ισχύος του ίδιου τομέα. Για τις ισχύεις P_{S2} και Q_{S2} ισχύει:

$$P_{S2} = P_2 + P_3 + P_4 + P_{R23} + P_{R24} \quad (18)$$

$$Q_{S2} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{X23} + Q_{X24} \quad (19)$$

όπου P_{R23} και P_{R24} είναι οι ωμικές απώλειες των γραμμών εξαιτίας των R_{23} R_{24} , ενώ Q_{X23} και Q_{X24} είναι η απορροφούμενη άεργος ισχύς από τις επαγωγικές αντιδράσεις X_{23} και X_{24} .

Οι απώλειες ενεργού και αέργου στις γραμμές θεωρούνται αμελητέες, επειδή είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ενεργές και άεργες καταναλώσεις και παραγωγές. Με την παραδοχή αυτή χάνεται η εξάρτηση της τάσης με τις ενεργές απώλειες, πράγμα το οποίο επιφέρει ορισμένο σφάλμα το οποίο θα μελετήσουμε σε επόμενη ενότητα. Συνεπώς μπορούμε να γράψουμε:

$$P_{S2} \cong P_2 + P_3 + P_4 \quad (20)$$

$$Q_{S2} \cong Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (21)$$

και

$$V_{12} \cong \frac{R_{12}(P_2 + P_3 + P_4) + X_{12}(Q_2 + Q_3 + Q_4)}{E_n} \quad (22)$$

Τέλος, η διαφορά τάσης V_{01} ισούται με:

$$V_{01} = E_0 - E_1 \cong \frac{R_{01}P_{S1} + X_{01}Q_{S1}}{E_n} \quad (23)$$

όπου:

$$P_{S1} \cong P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (24)$$

$$Q_{S1} \cong Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (25)$$

συμβολίζουν τις ισχύεις διαμέσου του τομέα S_1 .

Από τις σχέσεις (14), (16), (17) και (23) παρατηρούμε ότι η διαφορά τάσης V_{03} είναι συνάρτηση όλων των φορτίων και των ισχύων $P_1...P_4$ και $Q_1...Q_4$. Το ίδιο ισχύει και για την τάση E_3 :

$$E_3 = E_0 - V_{03} = E_0 - (V_{01} + V_{12} + V_{23}) \quad (26)$$

επειδή η E_0 είναι σταθερά. Διαφορετικά, μπορούμε να γράψουμε:

$$E_3 = f(P_1 \dots P_4, Q_1 \dots Q_4) \quad (27)$$

Η εξίσωση (27) δείχνει ότι κάθε μεταβολή ενεργού/αέργου ισχύος (σε κάποιο κόμβο j) που ορίζεται ως:

$$\Delta P_j = P_j^f - P_j^0 \quad (28)$$

$$\Delta Q_j = Q_j^f - Q_j^0 \quad (29)$$

όπου $P_j^f (Q_j^f)$, $P_j^0 (Q_j^0)$ είναι οι τελικές και αρχικές τιμές ισχύος αντίστοιχα, προκαλεί μία μεταβολή τάσης στον κόμβο 3:

$$\Delta E_3 = E_3^f - E_3^0 \quad (30)$$

Η μεταβολή ΔE_3 μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \Delta E_3 = & \frac{\partial E_3}{\partial P_1} \Delta P_1 + \frac{\partial E_3}{\partial P_2} \Delta P_2 + \frac{\partial E_3}{\partial P_3} \Delta P_3 + \frac{\partial E_3}{\partial P_4} \Delta P_4 + \\ & + \frac{\partial E_3}{\partial Q_1} \Delta Q_1 + \frac{\partial E_3}{\partial Q_2} \Delta Q_2 + \frac{\partial E_3}{\partial Q_3} \Delta Q_3 + \frac{\partial E_3}{\partial Q_4} \Delta Q_4 \end{aligned} \quad (31)$$

Οι μερικές παράγωγοι $\partial E_i / \partial P_j$ και $\partial E_i / \partial Q_j$ εκφράζουν το κατά πόσο επηρεάζεται η μεταβολή της τάσης του ζυγού i (ΔE_i), από την έγχυση ή απορρόφηση ισχύος (ΔP_j και ΔQ_j) στο ζυγό j και αποτελούν τους παράγοντες ευαισθησίας. Για όλους τους ζυγούς μπορούμε να γράψουμε την παρακάτω σχέση πινάκων:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \\ \Delta E_3 \\ \Delta E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial P_1} & \frac{\partial E_1}{\partial P_2} & \frac{\partial E_1}{\partial P_3} & \frac{\partial E_1}{\partial P_4} \\ \frac{\partial E_2}{\partial P_1} & \frac{\partial E_2}{\partial P_2} & \frac{\partial E_2}{\partial P_3} & \frac{\partial E_2}{\partial P_4} \\ \frac{\partial E_3}{\partial P_1} & \frac{\partial E_3}{\partial P_2} & \frac{\partial E_3}{\partial P_3} & \frac{\partial E_3}{\partial P_4} \\ \frac{\partial E_4}{\partial P_1} & \frac{\partial E_4}{\partial P_2} & \frac{\partial E_4}{\partial P_3} & \frac{\partial E_4}{\partial P_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_4} \\ \frac{\partial E_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_4} \\ \frac{\partial E_3}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_3}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_3}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_3}{\partial Q_4} \\ \frac{\partial E_4}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_4}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_4}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_4}{\partial Q_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} \quad (32)$$

και σε πιο συμπαγή μορφή:

$$[\Delta E] = [s_P][\Delta P] + [s_Q][\Delta Q] \quad (33)$$

όπου $[s_P]$ και $[s_Q]$ είναι οι πίνακες ενεργών και άεργων ευαισθησιών αντίστοιχα, $[\Delta P]$ και $[\Delta Q]$ τα διανύσματα μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς που προκαλούν μεταβολές των τάσεων $[\Delta E]$.

Από την (26), με χρήση των (16), (17), (23) προκύπτει ότι:

$$E_3 = E_0 - \frac{R_{01}P_{S1} + X_{01}Q_{S1}}{E_n} - \frac{R_{23}P_3 + X_{23}Q_3}{E_n} - \frac{R_{01}P_{S1} + X_{01}Q_{S1}}{E_n}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις μερικές παραγώγους:

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_1} = -\frac{X_{01}}{E_n}$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_2} = -\frac{X_{01} + X_{12}}{E_n}$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_3} = -\frac{X_{01} + X_{12} + X_{23}}{E_n}$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_4} = -\frac{X_{01} + X_{12}}{E_n}$$

Παρομοίως:

$$[s_Q] = -\frac{1}{E_n} \begin{bmatrix} X_{01} & X_{01} & X_{01} & X_{01} \\ X_{01} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} \\ X_{01} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} + X_{23} & X_{01} + X_{12} \\ X_{01} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} + X_{24} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Παρατηρώντας τη μορφή της σχέσης (34), μπορούμε να εξάγουμε τον εξής εποπτικό κανόνα:

“Το στοιχείο i,j του πίνακα $[s_Q]$ αποτελεί το άθροισμα όλων των επαγωγικών αντιδράσεων των κλάδων εκείνων των οποίων η ροή ισχύος τροφοδότησε και τους 2 κόμβους i και j , πολλαπλασιασμένο με τον παράγοντα $-1/E_n$ ”.

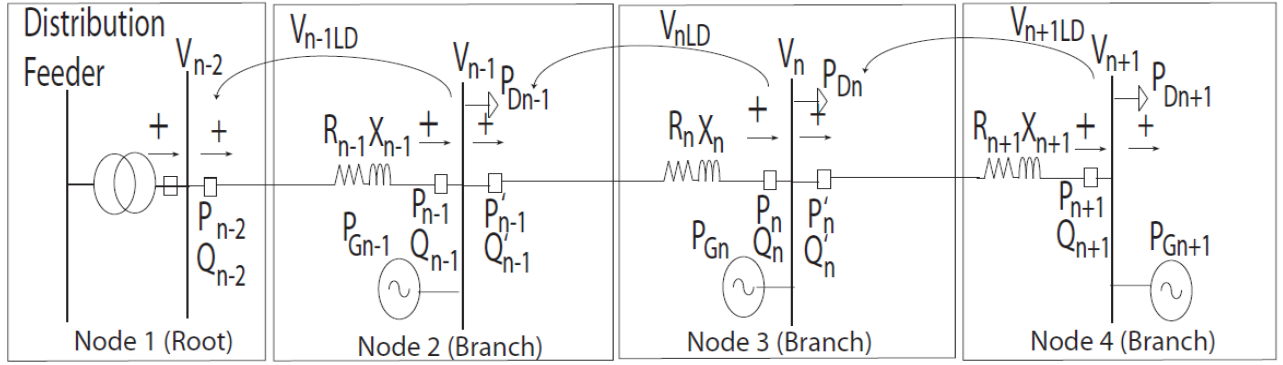
Αντίστοιχα προκύπτει ο πίνακας με τους παράγοντες ευαισθησίας ως προς την μεταβολή της ενεργού ισχύος:

$$[s_P] = -\frac{1}{E_n} \begin{bmatrix} R_{01} & R_{01} & R_{01} & R_{01} \\ R_{01} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} \\ R_{01} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} + R_{23} & R_{01} + R_{12} \\ R_{01} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} + R_{24} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Το αρνητικό πρόσημο στις σχέσεις (34), (35) σημαίνει πως αν αυξηθεί η κατανάλωση ισχύος (ενεργού ή/και αέργου) σε έναν ή περισσότερους ζυγούς, θα παρατηρηθεί αντίστοιχη μείωση του μέτρου τάσης, ενώ αν μειωθεί η κατανάλωση ή συνδεθεί κάποια μονάδα παραγωγής θα συμβεί αύξηση τάσης.

4.3.2 Άλλοι προσεγγιστικοί τύποι

Για τις επόμενες 3 προσεγγιστικές μεθόδους υπολογισμού, οι παράγοντες ευαισθησίας εκφράζουν το ρυθμό μεταβολής της τάσης σε κάθε ζυγό ως προς την μεταβολή της ροής ισχύος στον ίδιο ζυγό, που ρέει από ανάντη. Η ορολογία που θα χρησιμοποιηθεί παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Παράδειγμα ακτινικού δικτύου 4 κόμβων [32]

Όταν αναφερόμαστε σε έναν ζυγό n , τα ηλεκτρικά μεγέθη που σχετίζονται με αυτόν είναι:

- $P_{(G/L)n}$: Παραγόμενη ή καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς στον κόμβο n .
- P_n : Ποσότητα εισερχόμενης ενεργού ισχύος που ρέει στον κόμβο n από το ανάντη δίκτυο.
- V_n : Το μέτρο τάσης του κόμβου.
- X_n, R_n : Επαγωγική αντίδραση και ωμική αντίσταση του κλάδου μεταξύ των κόμβων $n-1$ και n .
- V_{nLD} : Πτώση τάσης κατά μήκος του παραπάνω κλάδου.

Οι παράγοντες ευαισθησίας αναφερόμενοι σε κάθε ζυγό, εκτός από το ζυγό αναφοράς που διατηρεί σταθερή τάση, μπορούν να προσεγγιστούν ως εξής [32]:

$$\frac{\partial V_n}{\partial P_n} = \frac{R_n}{V_{n(old)}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_i}{V_i} \quad \text{και} \quad \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} = \frac{X_n}{V_{n(old)}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{X_i}{V_i} \quad (36\text{-μέθοδος } \beta)$$

$$\frac{\partial V_n}{\partial P_n} = \frac{R_n}{\sqrt{V_{n-1}^2 - 4 R_n P_n}} \quad \text{και} \quad \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} = \frac{X_n}{\sqrt{V_{n-1}^2 - 4 X_n Q_n}} \quad (37\text{-μέθοδος } \gamma)$$

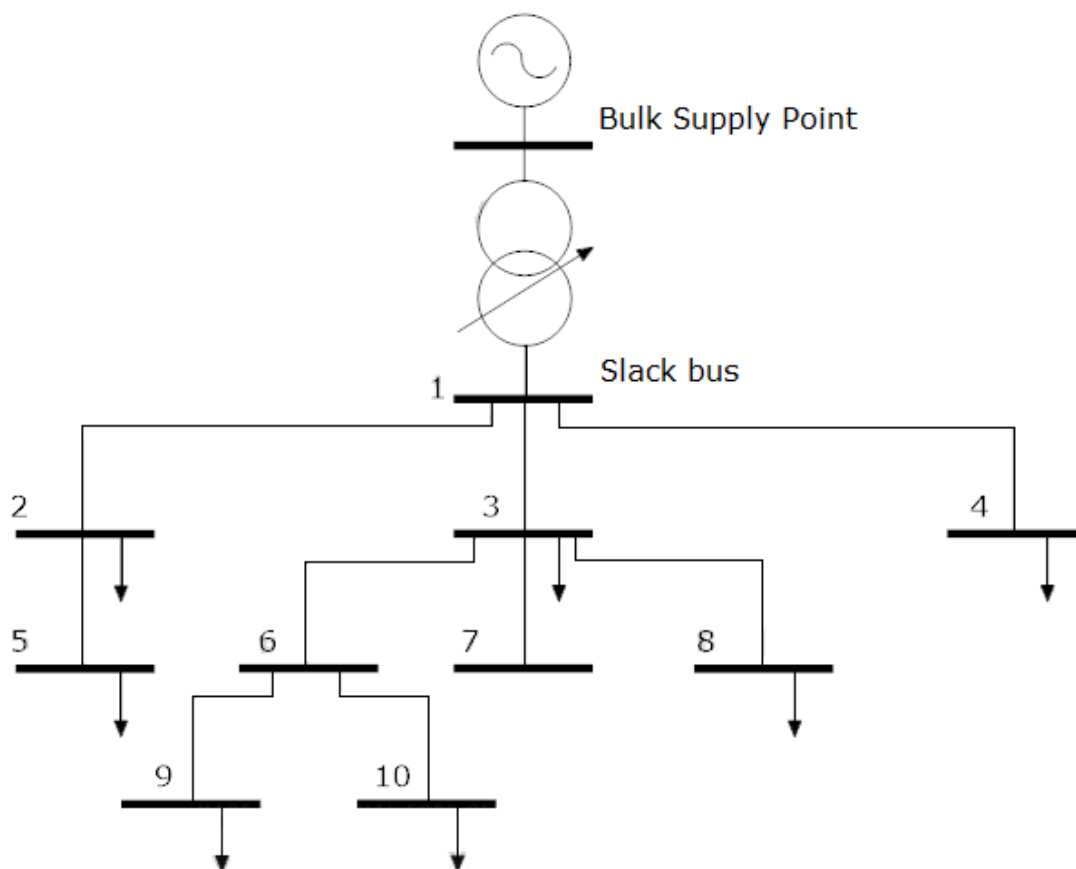
$$\frac{\partial V_n}{\partial P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sqrt{V_0^2 - 4 P_n \sum_{i=1}^n R_i}} \quad \text{και} \quad \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\sqrt{V_0^2 - 4 Q_n \sum_{i=1}^n X_i}} \quad (38\text{-μέθοδος } \delta)$$

Για να υλοποιηθεί η προσεγγιστική μέθοδος (β) από ένα σύστημα MAS απαιτείται ο υπολογισμός της πτώσης τάσης όλων των κλάδων με χρήση των τιμών τάσης του τοπικού κόμβου και τη δυνατότητα αποστολής αυτών των δεδομένων στους γειτονικούς κόμβους. Για την μέθοδο (γ) υποθέτουμε πως ο ανάντη κόμβος διατηρεί σταθερό μέτρο τάσης και για την (δ) ότι θα υπάρχει μεταβολή της τάσης στους ανάντη κόμβους.

Η μέθοδος (β) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τοπικών παραγόντων ευαισθησίας στην προτεινόμενη τεχνική ρύθμιση τάσης μέσω της περικοπή ενεργού ισχύος. Αναπτύχθηκε σε κώδικα για κάθε πράκτορα και παρουσιάζει το πλεονέκτημα πως η τιμή της ευαισθησίας μπορεί να προκύψει από τον εκάστοτε ευφυή πράκτορα (agent) που διαθέτει μία μονάδα παραγωγής, κάθε φορά που λαμβάνει μετρήσεις από το ηλεκτρικό δίκτυο και δεδομένα από τον ανάντη, άμεσα ηλεκτρικά συνδεδεμένο πράκτορα.

4.4 Σύγκριση με Ιακωβιανές ευαισθησίες

Οι συγκεκριμένες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για το παρακάτω ακτινικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης.



Σχήμα 4.4 Παράδειγμα ακτινικού δικτύου 4 κόμβων

Για να επαληθεύσουμε τους προσεγγιστικούς τύπους (α, β, γ, δ) έγινε σύγκριση με τις ευαισθησίες που προκύπτουν από την Ιακωβιανή μήτρα. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, συμπεραίνεται ότι οι τιμές των προσεγγιστικών μεθόδων -εκτός της (γ)- παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια με απόλυτο σχετικό σφάλμα κάτω από 1%. Οι τιμές που προκύπτουν από τη σχέση (37) δεν αποτελούν ικανοποιητικές προσεγγίσεις των παραγόντων ευαισθησίας για κόμβους που απέχουν κατά 2 ή περισσότερους κλάδους από τον κόμβο αναφοράς.

Για μεταβολή -20% στις φορτίσεις του δικτύου οι Ιακωβιανές ευαισθησίες υπολογίζονται ξανά και το ποσοστό μεταβολής τους είναι πολύ μικρό. Οι ευαισθησίες της Ιακωβιανής μήτρας εξαρτώνται άμεσα από το λόγο X/R. Οι τιμές από τους προσεγγιστικούς τύπους (α, β, δ) δε διαφέρουν σημαντικά με αυτές που προκύπτουν από την Ιακωβιανή μήτρα και στην περίπτωση μεγαλύτερου λόγου X/R.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάποιες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου.

Πίνακας 4.1 Ιακωβιανές ευαισθησίες μεταβολών αέργου ισχύος για κανονικές συνθήκες φόρτισης $Sq(i, j) = \partial U_i / \partial Q_j$ και $X/R \cong 1,3$.
 Εκφράζουν το μέτρο της επίδρασης του ζυγού i ως προς μεταβολές εγχύσεως αέργου στο ζυγό j .

No Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0,02443	0	0	0,02443	0	0	0	0	0
3	0	0	0,065414	0	0	0,065422	0,065414	0,065426	0,065434	0,065422
4	0	0	0	0,0208	0	0	0	0	0	0
5	0	0,02443	0	0	0,039088	0	0	0	0	0
6	0	0	0,065422	0	0	0,08009	0,065422	0,065434	0,080104	0,08009
7	0	0	0,065414	0	0	0,065422	0,098069	0,065426	0,065434	0,065422
8	0	0	0,065426	0	0	0,065434	0,065426	0,076798	0,065446	0,065434
9	0	0	0,065434	0	0	0,080104	0,065434	0,065446	0,102243	0,080104
10	0	0	0,065422	0	0	0,08009	0,065422	0,065434	0,080104	0,102521

Πίνακας 4.2 Ιακωβιανές ευαισθησίες μεταβολών ενεργού ισχύος για κανονικές συνθήκες φόρτισης $S_p(i, j) = \partial U_i / \partial P_j$ και $X/R \cong 1,3$.
 Εκφράζουν το μέτρο της επίδρασης του ζυγού i ως προς μεταβολές εγχύσεως ενεργού στο ζυγό j .

No Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0,030643	0	0	0,030643	0	0	0	0	0
3	0	0	0,020384	0	0	0,020394	0,020384	0,020398	0,020405	0,020394
4	0	0	0	0,016199	0	0	0	0	0	0
5	0	0,030643	0	0	0,049029	0	0	0	0	0
6	0	0	0,020387	0	0	0,038785	0,020387	0,0204	0,038799	0,038785
7	0	0	0,020384	0	0	0,020394	0,03056	0,020398	0,020405	0,020394
8	0	0	0,020388	0	0	0,020398	0,020388	0,033739	0,020409	0,020398
9	0	0	0,02039	0	0	0,038791	0,02039	0,020404	0,060629	0,038791
10	0	0	0,020386	0	0	0,038785	0,020387	0,0204	0,038799	0,097554

Πίνακας 4.3 Τιμές ενεργού ευαισθησίας ως προς τη ροή ισχύος σε κάθε κόμβο για ονομαστική φόρτιση και $X/R \cong 1,3$

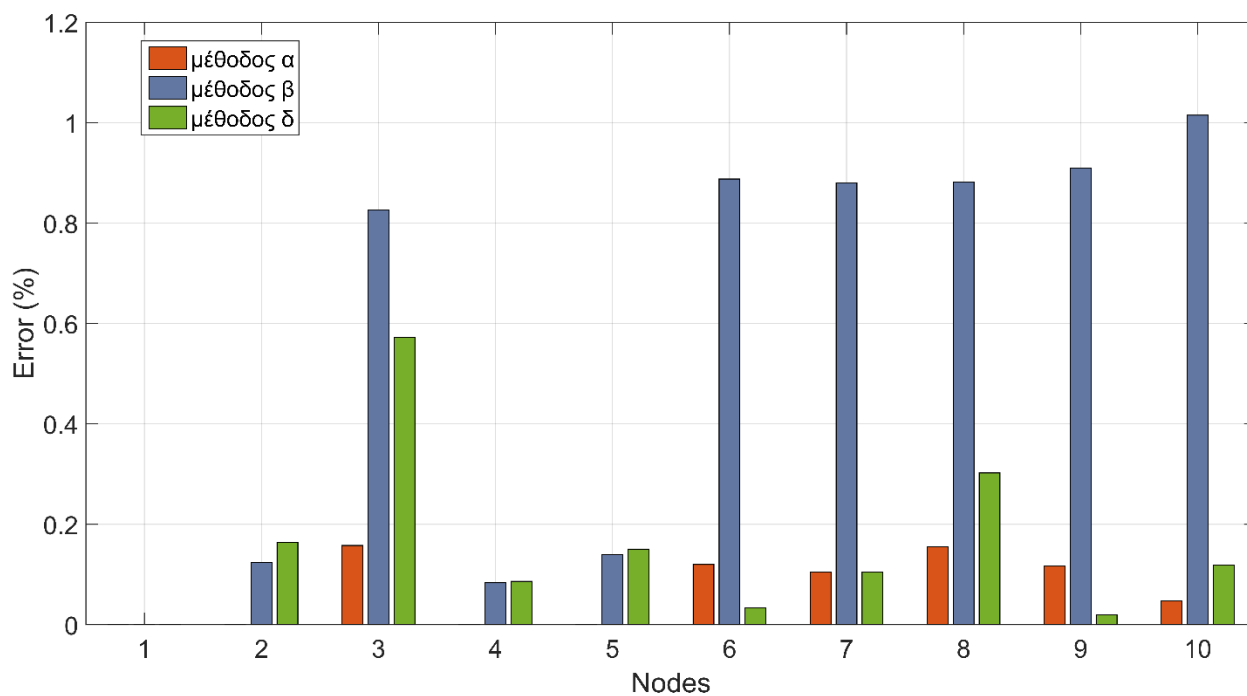
No Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ιακωβιανές	0	0,030643	0,020384	0,016199	0,049029	0,038785	0,03056	0,033739	0,060629	0,097555
Μέθοδος α	0	0,030643	0,020352	0,016199	0,049029	0,038738	0,030528	0,033687	0,060558	0,097508
Σφάλμα (%)	0	0	0,16	0	0	0,12	0,11	0,16	0,12	0,05
Μέθοδος β	0	0,030681	0,020553	0,016212	0,049097	0,039129	0,030829	0,034037	0,06118	0,098545
Σφάλμα (%)	0	0,13	0,83	0,08	0,14	0,89	0,88	0,88	0,91	1,02
Μέθοδος γ	0	0,030693	0,0205	0,016213	0,018419	0,018581	0,010276	0,013491	0,0220569	0,059439
Σφάλμα (%)	0	0,16	0,57	0,09	62,43	52,09	66,37	60,01	63,62	39,07
Μέθοδος δ	0	0,030693	0,0205	0,016213	0,049103	0,038798	0,030528	0,033841	0,060641	0,09767
Σφάλμα (%)	0	0,16	0,57	0,09	0,15	0,03	0,11	0,3	0,02	0,12

Πίνακας 4.4 Τιμές ενεργού ευαισθησίας ως προς τη ροή ισχύος σε κάθε κόμβο για φορτίο στο 80% του ονομαστικού και $X/R \cong 1,3$

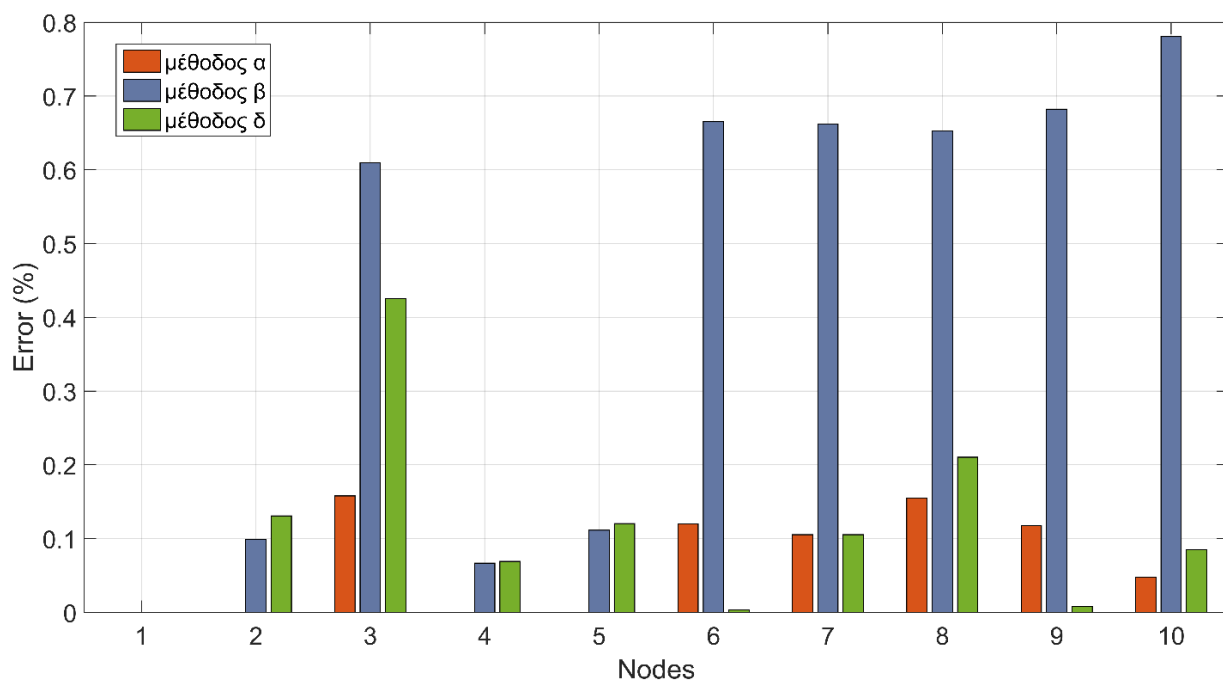
No Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ιακωβιανές	0	0,030643	0,020384	0,016199	0,049029	0,038785	0,030560	0,033739	0,060629	0,097555
Μέθοδος α	0	0,030643	0,020352	0,016199	0,049029	0,038738	0,030528	0,033687	0,060558	0,097508
Σφάλμα (%)	0	0	0,16	0	0	0,12	0,11	0,16	0,12	0,05
Μέθοδος β	0	0,03067	0,020508	0,016210	0,049084	0,039043	0,030763	0,033960	0,061043	0,098316
Σφάλμα (%)	0	0,1	0,61	0,07	0,11	0,67	0,66	0,65	0,682286	0,780579
Μέθοδος γ	0	0,030683	0,020471	0,016210	0,018413	0,018538	0,010254	0,013457	0,022005	0,059292
Σφάλμα (%)	0	0,13	0,43	0,07	62,45	52,2	66,45	60,11	63,71	39,22
Μέθοδος δ	0	0,030683	0,020471	0,016210	0,049088	0,038786	0,030528	0,033810	0,060625	0,097638
Σφάλμα (%)	0	0,13	0,43	0,07	0,12	0	0,16	0,21	0,01	0,09

Πίνακας 4.5 Τιμές ενεργού ευαισθησίας ως προς τη ροή ισχύος σε κάθε κόμβο για ονομαστική φόρτιση και $X/R \cong 3$

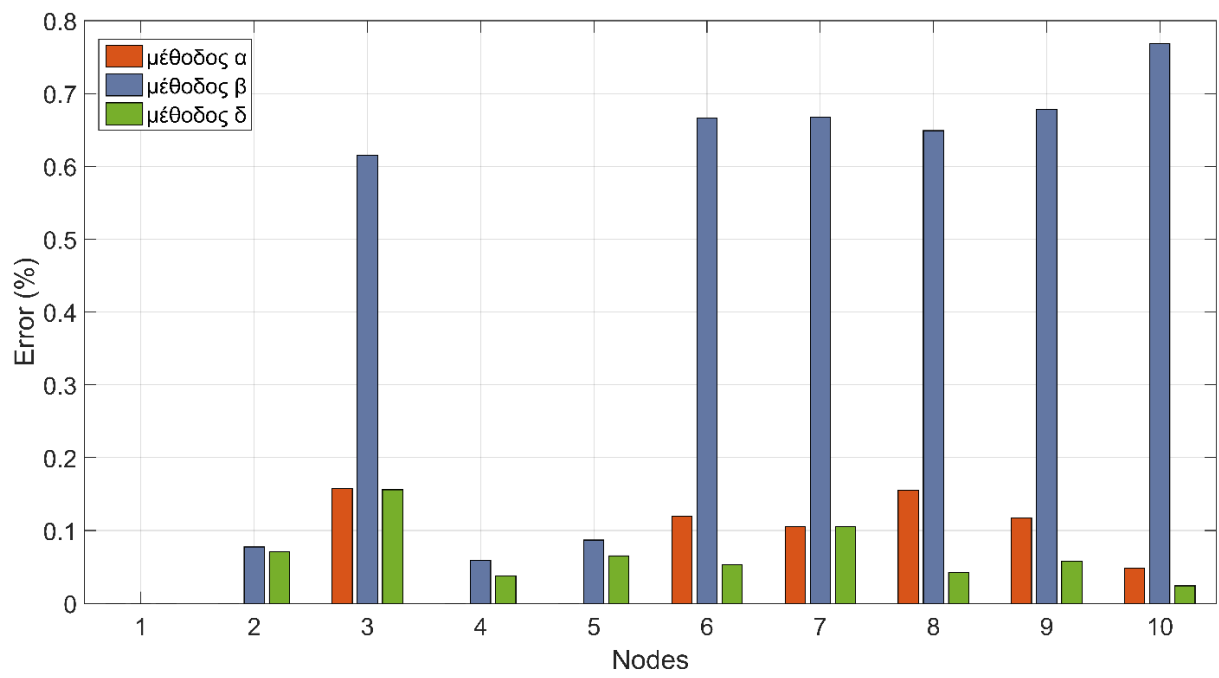
No Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ιακωβιανές	0	0,013300	0,008814	0,007	0,0213	0,01682	0,013214	0,014623	0,026231	0,04222
Μέθοδος α	0	0,0133	0,0088	0,007	0,0213	0,01680	0,0132	0,0146	0,0262	0,0422
Σφάλμα (%)	0	0	0,16	0	0	0,12	0,11	0,16	0,12	0,05
Μέθοδος β	0	0,01331	0,008868	0,007004	0,021319	0,016932	0,013302	0,014718	0,026409	0,042545
Σφάλμα (%)	0	0,08	0,61	0,06	0,087	0,67	0,67	0,65	0,68	0,77
Μέθοδος γ	0	0,013309	0,008828	0,007003	0,008008	0,008065	0,004434	0,005850	0,009477	0,025615
Σφάλμα (%)	0	0,07	0,16	0,04	62,4	52,05	66,44	59,99	63,87	39,33
Μέθοδος δ	0	0,013309	0,008828	0,007003	0,021314	0,016811	0,013200	0,014629	0,026216	0,042230
Σφάλμα (%)	0	0,07	0,16	0,04	0,07	0,05	0,11	0,04	0,06	0,02



Σχήμα 4.5 Απόλυτο σχετικό σφάλμα τιμών ενεργού εναισθησίας για πλήρες φορτίο και $X/R \cong 1,3$



Σχήμα 4.6 Απόλυτο σχετικό σφάλμα τιμών ενεργού εναισθησίας για φορτίο στο 80% του ονομαστικού και $X/R \cong 1,3$

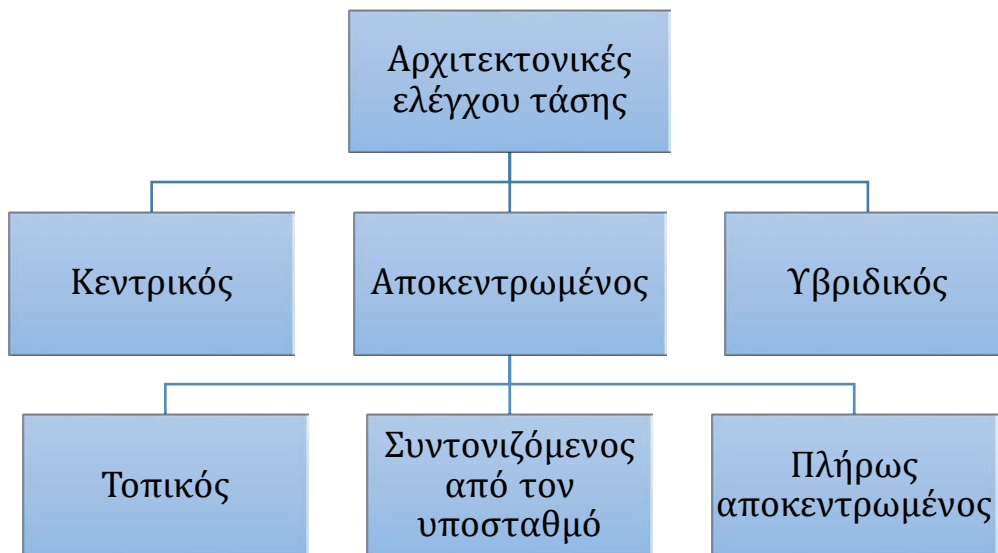


Σχήμα 4.7 Απόλυτο σχετικό σφάλμα τιμών ενεργού εναισθησίας για πλήρες φορτίο και $X/R \cong 3$

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός αποτελεσματικού σχήματος ελέγχου της τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικός, ειδικά σε περιπτώσεις εκδήλωσης κάποιας διαταραχής σε κάποιο σημείο του δικτύου. Πριν την εισχώρηση της διεσπαρμένης παραγωγής, ο έλεγχος της τάσης βασιζόταν στα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και στα μοντέλα πρόβλεψης ζήτησης φορτίου. Για τα σύγχρονα συστήματα διανομής, οι τρεις βασικές τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται (ή/και αποτελούν αντικείμενο έρευνας) είναι ο κεντρικός έλεγχος (*Centralized Control*), ο αποκεντρωμένος έλεγχος (*Decentralized/Distributed Control*) και ο υβριδικός (*Hybrid Control*). Ο αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί να διαιρεθεί σε 3 υποκατηγορίες, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1. Οι διάφορες μέθοδοι ελέγχου περιγράφονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 5.1 Αρχιτεκτονικές ελέγχου τάσης

5.2 Στοιχεία Κεντρικού Ελέγχου

Με την στρατηγική του κεντρικού ελέγχου και ρύθμισης της τάσης, το σύνολο του συστήματος αντιμετωπίζεται ως μια οντότητα. Για τη λειτουργία ενός συστήματος κεντρικού ελέγχου τάσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δικτύου επικοινωνίας μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των διάσπαρτων μέσων ρύθμισης του δικτύου διανομής (αντιστροφείς, πυκνωτές, μετασχηματιστές κλπ.). Μέσω του δικτύου επικοινωνίας, σε καθορισμένα χρονικά παράθυρα παρατήρησης (που ορίζει ο διαχειριστής του δικτύου) αποστέλλονται στον κεντρικό ελεγκτή τα δεδομένα των μετρήσεων από τα επιλεγμένα κρίσιμα σημεία του δικτύου. Αφού αυτός επιλύσει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για όλο το σύστημα, αποστέλλει τις κατάλληλες εντολές στις επιμέρους μονάδες (αλλαγή λήψης μετασχηματιστή, παραγωγή ή απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας αέργου ισχύος από αντιστροφέα, ζεύξη ή απόζευξη στατών πυκνωτών, κλπ.) ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ρύθμιση.

Το πλεονέκτημα του κεντρικού ελέγχου είναι ότι τις περισσότερες φορές, αξιοποιεί βέλτιστα τα δεδομένα μετρήσεων καταλήγοντας σε λύσεις που αφορούν την καλύτερη δυνατή διαχείριση και αξιοποίηση των μέσων ρύθμισης. Τα περισσότερα ΣΗΕ είναι εξοπλισμένα με συστήματα SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), μέσω των οποίων εποπτεύεται ένα μέρος του δικτύου. Λαμβάνουν πληροφορίες από μετρητικές διατάξεις όπως τα RTU (*Remote Terminal Unit*), στις οποίες μπορούν να αποστέλλουν εντολές λειτουργίας μέσω των MTU (*Master Terminal Unit*).

5.3 Διατύπωση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Σκοπός είναι να ρυθμιστεί το μέτρο τάσης του ζυγού που βγήκε εκτός ορίων, χωρίς να υπάρξει πρόβλημα στις τάσεις των υπολοίπων ζυγών του δικτύου. Η κεντρική μέθοδος λαμβάνει στοιχεία μετρήσεων τάσης από όλο τους ζυγούς του δικτύου προκειμένου να καταστρωθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η κεντρική επίλυση βρίσκει την λύση με τις ελάχιστες δυνατές μεταβολές που πρέπει να πραγματοποιηθούν στις γεννήτριες, ώστε να ρυθμιστούν όλες οι τάσεις των ζυγών. Με την κατάληξη σε λύση του προβλήματος, οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τις τιμές οι οποίες θα αποσταλούν στις μονάδες παραγωγής του δικτύου, ώστε να αλλάξουν το σημείο λειτουργίας τους.

Το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού έχει την κανονική μορφή:

$$\min_x \left(\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \mathbf{x} \right)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{A}_{eq} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq}$$

$$\mathbf{l}_b \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}_b$$

όπου:

\mathbf{x} : διάνυσμα στήλης ($n \times 1$) με τις μεταβλητές απόφασης x_1, x_2, \dots, x_n

\mathbf{f}^T : διάνυσμα σειράς ($1 \times n$)

$\mathbf{b}, \mathbf{l}_b, \mathbf{l}_v$: διανύσματα σειράς ($1 \times n$) σταθερών

A, A_{eq} : πίνακες συντελεστών ($m \times n$)

H : συμμετρικός τετραγωνικός πίνακας ($n \times n$)

Έστω n το πλήθος των γεννητριών που θα συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης του ζυγού j . Τότε το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού διατυπώνεται σε κανονική μορφή:

$$\min_{\Delta P} \sum_{i=1}^n \Delta P_i^2 = \min_x \left(\frac{1}{2} \mathbf{x}^T H \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \mathbf{x} \right)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει τη συνολική μεταβολή της ενεργού ισχύος που παράγεται ή καταναλώνεται (και πρέπει να ελαχιστοποιηθεί από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης) υπό τους περιορισμούς: να μην παραβιαστεί το όριο φαινόμενης ισχύος των γεννητριών και να παραμείνουν εντός των επιτρεπτών ορίων (τα οποία θεωρούμε $\pm 3\%$) οι τάσεις των υπόλοιπων κόμβων.

Οι μεταβλητές απόφασης είναι αυτές που εξάγει το πρόβλημα βελτιστοποίησης αν καταλήξει σε λύση:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \geq 0$$

Ο τετραγωνισμός των ποσοτήτων (ΔP_i) κάνει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης να είναι κυρτό (convex minimization problem), το οποίο σημαίνει ότι η αντικειμενική συνάρτηση, σε κάθε περιοχή του πεδίου ορισμού της, θα παρουσιάζει ένα και μόνο ένα ολικό ελάχιστο, κάνοντας τη λύση που θα παραχθεί από τη βελτιστοποίηση να είναι και η μοναδική ορθή λύση [38].

Η μέγιστη τιμή μεταβολής εξαρτάται από την τρέχουσα τιμή παραγωγής της γεννήτριας. Γενικά, η μέγιστη τιμή ενεργού ισχύος P_{max} θεωρείται σταθερή και προκύπτει από την παραγωγή με τον μέγιστο συντελεστή ισχύος που μπορεί να λειτουργήσει η κάθε ΜΔΠ.

Αν η γεννήτρια i παράγει P_c^i (MW), τότε τα όρια για την μεταβλητή απόφασης (μεταβολή ενεργού ΔP^i) είναι:

$$\begin{bmatrix} -P_c^1 \\ \vdots \\ -P_c^n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_{max}^1 - P_c^1 \\ \vdots \\ P_{max}^n - P_c^n \end{bmatrix}$$

Δηλαδή: $l_b = \begin{bmatrix} -P_c^1 \\ \vdots \\ -P_c^n \end{bmatrix}$ και $u_b = \begin{bmatrix} P_{max}^1 - P_c^1 \\ \vdots \\ P_{max}^n - P_c^n \end{bmatrix}$

Ο δεύτερος ανισωτικός περιορισμός που πρέπει να ικανοποιείται είναι:

$$V_{min} \leq \begin{bmatrix} V_1 + \Delta V_1 \\ \vdots \\ V_n + \Delta V_n \end{bmatrix} \leq V_{max} \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_1 \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_1 \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix}$$

Με χρήση των συντελεστών ευαισθησίας τάσης ως προς τη μεταβολή ενεργού ισχύος, οι μεταβολές στα μέτρα της τάσης κάθε ζυγού μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_1 \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} s_{11}\Delta P_1 + s_{12}\Delta P_2 + \dots + s_{1n}\Delta P_n \\ \vdots \\ s_{n1}\Delta P_1 + s_{n2}\Delta P_2 + \dots + s_{nn}\Delta P_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_1 \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_1 \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} s_{11}\Delta P_1 + s_{12}\Delta P_2 + \dots + s_{1n}\Delta P_n \\ \vdots \\ s_{n1}\Delta P_1 + s_{n2}\Delta P_2 + \dots + s_{nn}\Delta P_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_1 \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_1 \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} s_{11} & \dots & s_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & \dots & s_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_1 \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} [s] x \leq b_1 \\ [s] x \geq b_2 \end{cases}$$

όπου:

$$b_1 = \begin{bmatrix} V_{max} - V_1 \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix}, \quad b_2 = \begin{bmatrix} V_{min} - V_1 \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix}$$

Για την κανονική μορφή του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού πρέπει να έχουμε συνθήκη ανισότητας της μορφής:

$$[A] x \leq b$$

και γι' αυτό πολλαπλασιάζουμε τη δεύτερη ανίσωση με -1, καταλήγοντας στη συνθήκη:

$$\begin{cases} [s] x \leq b_1 \\ -[s] x \leq -b_2 \end{cases} \Rightarrow [S] x \leq b$$

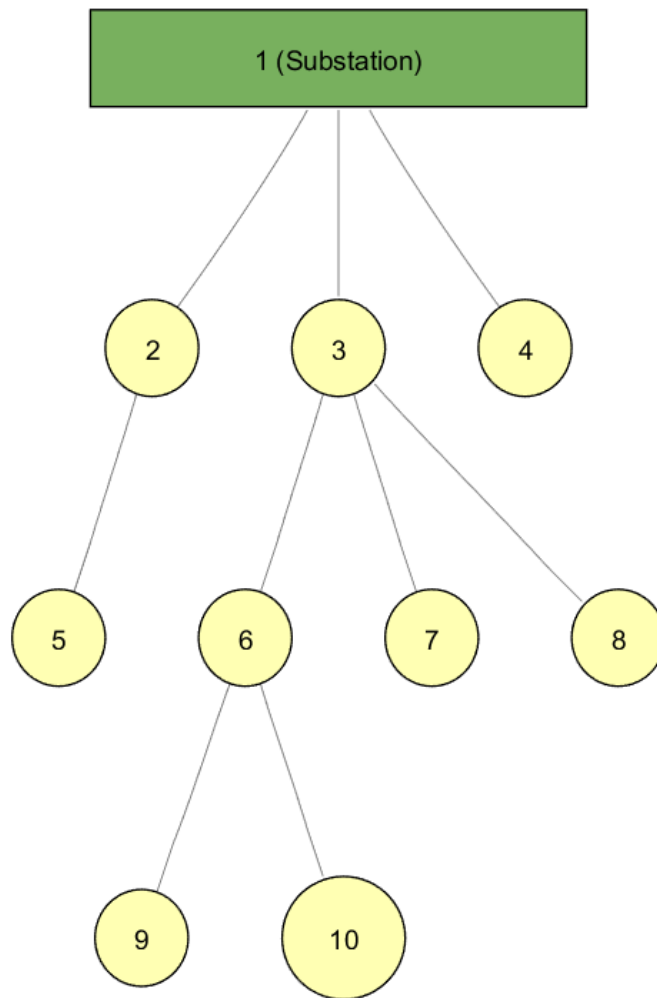
όπου:

$$[S] = \begin{bmatrix} [s] \\ -[s] \end{bmatrix} \equiv [A] \quad \text{και} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ -b_2 \end{bmatrix}$$

Για την υλοποίηση του κεντρικού ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί ο απαραίτητος αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης. Το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB διαθέτει έτοιμη στις βιβλιοθήκες του μια συνάρτηση επίλυσης προβλημάτων τετραγωνικού προγραμματισμού, την *quadprog*. Η συνάρτηση αυτή επιλύει προβλήματα της παραπάνω μορφής, με τα ακόλουθα ορίσματα:

$$x = \text{quadprog}(H, f, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$$

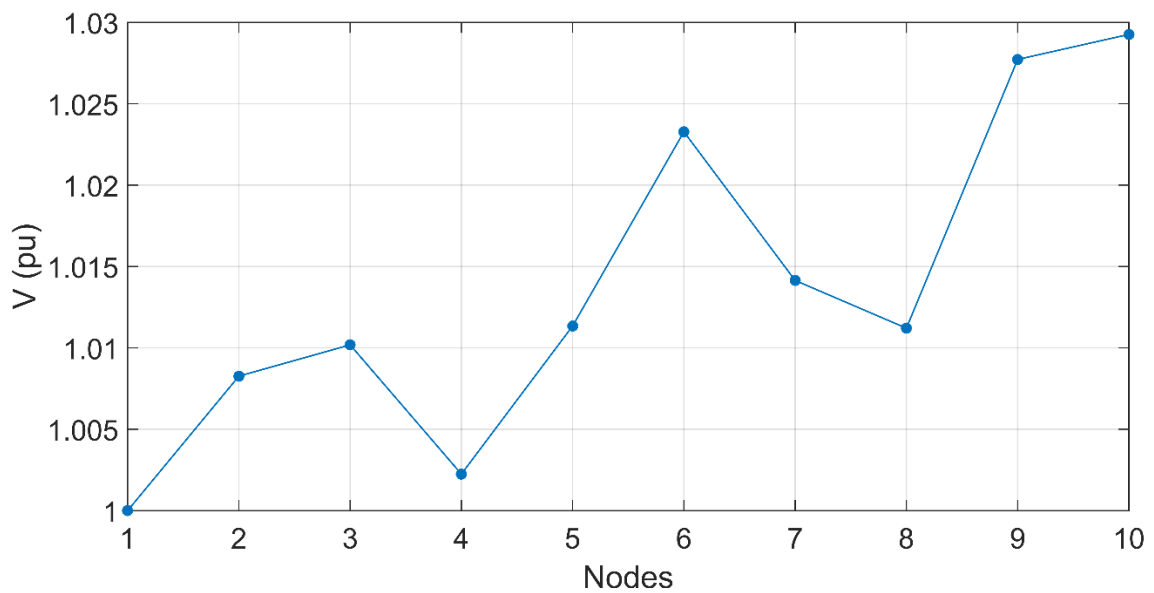
Η συνάρτηση επιστρέφει ως αποτέλεσμα το διάνυσμα x που περιέχει τις τιμές των μεταβλητών για τις οποίες ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση και ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί. Αν το πρόβλημα που επιθυμούμε να λύσουμε δεν έχει περιορισμούς κάποιου συγκεκριμένου είδους, τότε οι αντίστοιχοι πίνακες είναι κενοί. Π.χ. στο δικό μας πρόβλημα δεν υπάρχουν ισοτικοί περιορισμοί, επομένως οι πίνακες Aeq και beq ορίζονται στο MATLAB ως: $Aeq=[]$ και $beq=[]$. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε το δίκτυο με την τοπολογία του σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2 Γράφος δικτύου διανομής 10 κόμβων

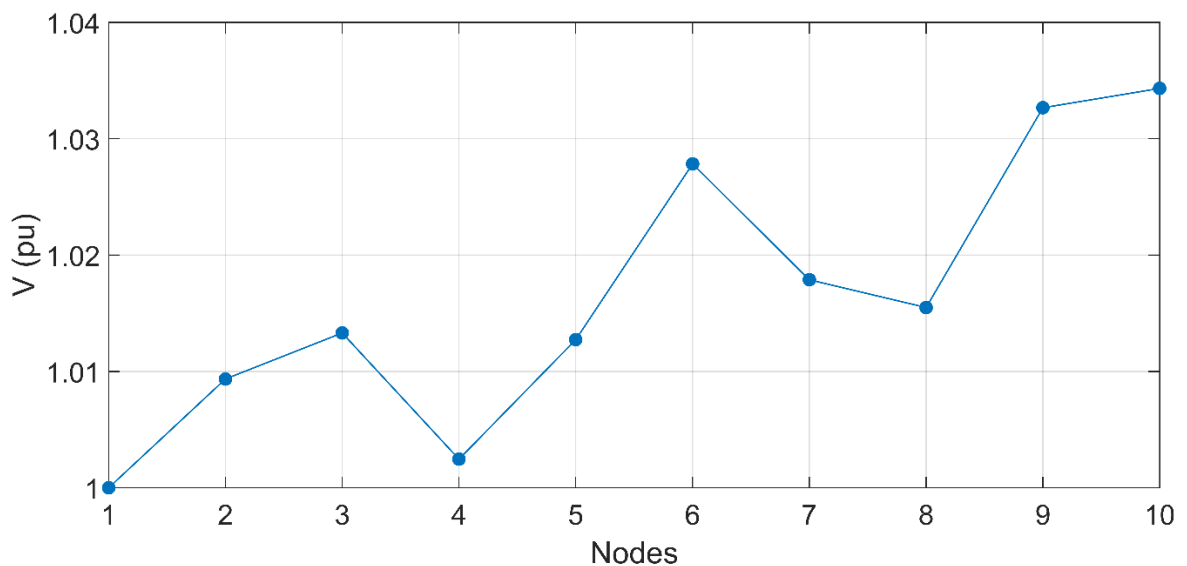
Οι ζυγοί 2-10 είναι ζυγοί φορτίου και σε κάθε έναν από αυτούς συνδέονται φορτία καταναλωτών και 9 Φ/Β συστοιχίες (ΜΔΠ) με μέγιστη δυνατότητα παραγωγής η καθεμία (σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή) 500 kW.

Για πλήρη φόρτιση και μέγιστη παραγωγή σε όλους τους κόμβους, το προφίλ τάσης του δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3. Όλοι οι ζυγοί βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων που θέτουμε ως $\pm 3\%$.



Σχήμα 5.3 Προφίλ τάσης για 100% παραγωγή και φορτίο

Στην περίπτωση που έχουμε συνθήκες φόρτισης στο 60% του ονομαστικού φορτίου για κάθε ζυγό και πλήρη παραγωγή ενεργού ισχύος, οι τάσεις των ζυγών 9 και 10 παραβιάζουν το ανώτατο όριο 1,03 p.u., όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Προφίλ τάσης για 100% παραγωγή και 60% φορτίο

Για την διόρθωση των τάσεων μέσω περικοπής της παραγόμενης ενεργού ισχύος, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τετραγωνικού προγραμματισμού και τη συνάρτηση quadprog στο MATLAB. Η μεταβλητή x του προβλήματος

ελαχιστοποίησης θα είναι το διάνυσμα $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{10} \end{bmatrix}$, για τις ΜΔΠ που συνδέονται στους ζυγούς 2-10.

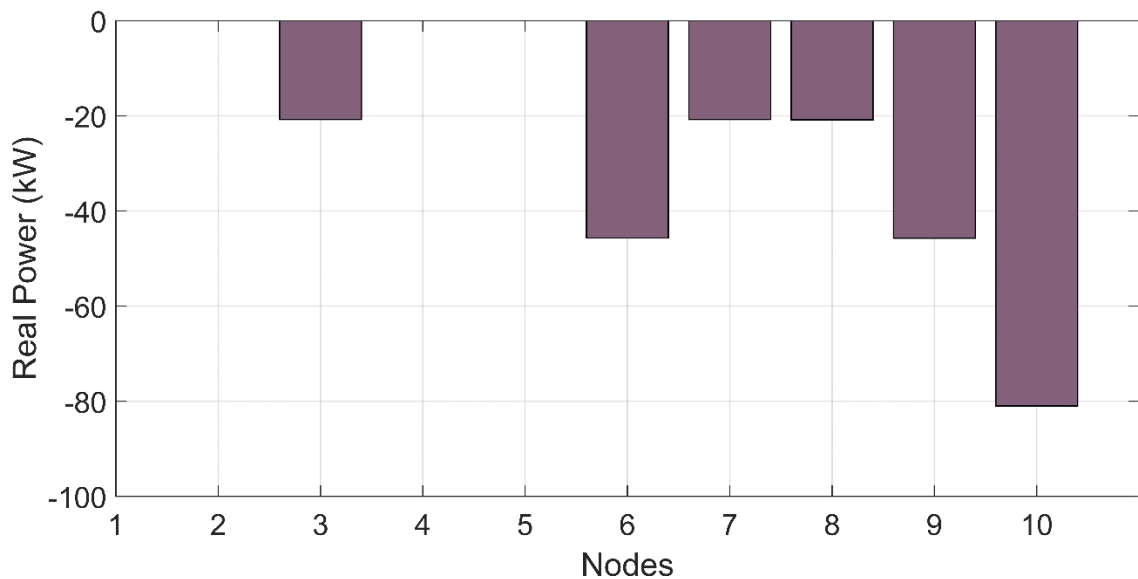
Η κανονική μορφή του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta P_i^2 &= \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} = \\ &= \frac{1}{2} [\Delta P_2 \quad \dots \quad \Delta P_{10}] \cdot \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{10} \end{bmatrix} + \mathbf{f}^T \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{10} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Συνεπώς οι πίνακες \mathbf{H} και \mathbf{f} προκύπτουν:

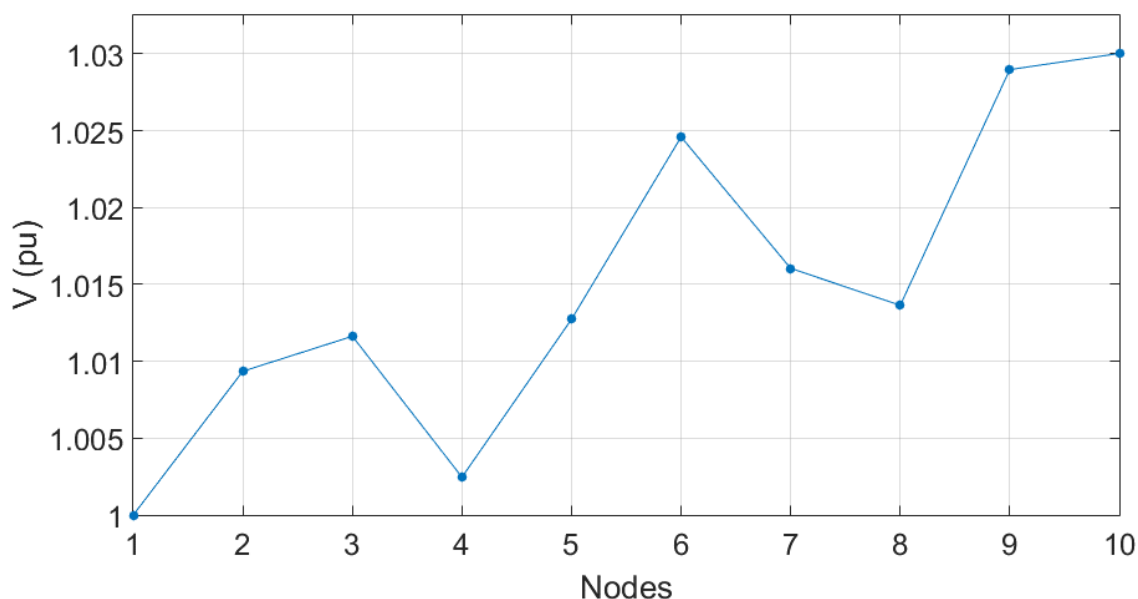
$$[\mathbf{H}] = 2 \cdot [\mathbf{I}_9] \quad \text{και} \quad \mathbf{f} = \mathbf{0}_{9 \times 1}$$

Η βέλτιστη ποσότητα ενεργού ισχύος που απαιτείται να περικοπεί από κάθε μονάδα που συνδέεται στους ζυγούς 2-10, ώστε να επανέλθουν οι τάσεις εντός ορίων, φαίνεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5 Βέλτιστη περικοπή παραγωγής ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό

Τελικά, αν εφαρμοστεί η προτεινόμενη ρύθμιση της παραγωγής kW, οι τάσεις των ζυγών επανέρχονται εντός ορίων και παρουσιάζονται στο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Προφίλ τάσης μετά από την προτεινόμενη περικοπή ενεργού ισχύος

5.4 Αποκεντρωμένος Έλεγχος

Η έννοια του αποκεντρωμένου ελέγχου έγκειται στην διάσπαση του αντίστοιχου κεντρικού προβλήματος βελτιστοποίησης, σε επιμέρους υποπροβλήματα τα οποία είναι δυνατό να επιλυθούν με κατανομημένο τρόπο. Η κατανομημένη επίλυση θα πρέπει να συντονίζεται και να υλοποιείται από συστήματα κατανομημένης νοημοσύνης, όπως αυτό των πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Όπως περιγράφεται και στην προτεινόμενη αποκεντρωμένη μέθοδο ρύθμισης τάσης, το πρόβλημα της παραβίασης των ορίων τάσης σε έναν ζυγό επιλύεται σε συνεργασία με τους γειτονικούς κόμβους του εκάστοτε προβληματικού ζυγού. Ο βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να δώσει ένα μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού το οποίο θα μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς την πολυπλοκότητα των προβλημάτων. Οι πράκτορες λοιπόν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου είτε να ικανοποιήσουν τους εσωτερικούς τους στόχους είτε τους στόχους του συστήματος συνολικά. Στην περίπτωση που ο κάθε πράκτορας λαμβάνει και υλοποιεί αποφάσεις σε συνεργασία μόνο με τους γείτονές του, έχουμε *πλήρως αποκεντρωμένο έλεγχο*.

Εάν για έναν αριθμό γραμμών και φορτίων η ευθύνη του ελέγχου βρίσκεται στον υποσταθμό αυτού του τομέα, ή αν υπάρχουν ανώτεροι ιεραρχικά ευφυείς πράκτορες που λαμβάνουν τις τελικές αποφάσεις και δίνουν εντολές στους υπόλοιπους, έχουμε την περίπτωση του *ελέγχου με συντονιστή τον υποσταθμό*.

Ο τοπικός έλεγχος τάσης έχει τα χαρακτηριστικά της αυτόνομης λειτουργίας. Κάθε μονάδα ρύθμισης τάσης αναλαμβάνει να μετρά και να ελέγχει την τάση μόνο στο σημείο κοινής σύνδεσής της με το δίκτυο διανομής, χωρίς επικοινωνία ή συνεργασία με άλλες εγκατεστημένες μονάδες ρύθμισης τάσης σε άλλα σημεία του δικτύου. Δύο συνηθισμένες τεχνικές τοπικού ελέγχου τάσης είναι ο Έλεγχος Συντελεστή Ισχύος (Power Factor Control - PFC) και η Περικοπή Ενεργού Ισχύος (Active Power Curtailment - APC), οι οποίες αξιοποιούν τις δυνατότητες των αντιστροφέων των μονάδων ΔΠ για τον έλεγχο της αέργου και ενεργού ισχύος. Λειτουργώντας με επαγωγικό ΣΙ, ο αντιστροφέας έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει άεργο ισχύ, ενώ με χωρητικό ΣΙ μπορεί να αποδώσει άεργο ισχύ στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό συνεισφέρει στη ρύθμιση των τάσεων, απορροφώντας άεργο όταν παρατηρείται ανύψωση της τάσης και παράγοντας άεργο όταν παρατηρείται βύθιση τάσης στα προκαθορισμένα σημεία κοινής σύνδεσης των ΜΔΠ με το δίκτυο. Για τη μέθοδο APC, ο τρόπος υπολογισμού της απαραίτητης ποσότητας ενεργού ισχύος που πρέπει να περικοπεί από τον αντιστροφέα μπορεί να γίνει με τη χρήση μιας απλής γραμμικής συνάρτησης. Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των τεχνικών τοπικής ρύθμισης είναι ότι δεν απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός πέρα από τους αντιστροφέες που έχουν τις συγκεκριμένες δυνατότητες.

5.5 Υβριδικός Έλεγχος

Αυτή η τεχνική αποτελεί μια ενδιάμεση λογική ελέγχου ανάμεσα στον κεντρικό και τον πλήρως διανεμημένο σχεδιασμό. Το κεντρικό σύστημα είναι ευάλωτο στην περίπτωση κάποιας αστοχίας, ενώ το αποκεντρωμένο ενδέχεται εφαρμόσει κάποια ρύθμιση που δεν εξυπηρετεί το υπόλοιπο σύστημα, λόγω των περιορισμένων δεδομένων που έχει στη διάθεσή του. Για τους λόγους αυτούς, στο υβριδικό σχήμα ελέγχου το κεντρικό σύστημα είναι υπεύθυνο για το συντονισμό, την ασφάλεια και τη σωστή λειτουργία του δικτύου, εγκρίνοντας ή απορρίπτοντας τις ρυθμίσεις που προτείνονται από τις αποκεντρωμένες τεχνικές ελέγχου των επιμέρους περιοχών του συστήματος διανομής [35].

5.6 Σύγκριση των διαφόρων τεχνικών

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η χρήση ενός αποκεντρωμένου σχεδιασμού δίνοντας στις μονάδες τοπική ευφύια μέσω των τοπικών ελεγκτών και των πρακτόρων ελέγχου διότι ο κεντρικός έλεγχος παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Ο εκσυγχρονισμός της τεχνικής ελέγχου του δικτύου πρέπει να υλοποιηθεί είτε με την χρήση υβριδικών συστημάτων που θα ενσωματωθούν στον κεντρικό έλεγχο, είτε με την εισαγωγή αποκεντρωμένου ελέγχου ρύθμισης τάσης, όπως προτείνεται στην παρούσα διπλωματική, είτε με τοπικό έλεγχο μέσω συντονισμένης επικοινωνίας με τα συμβατικά μέσα ρύθμισης.

Σημαντικά μειονεκτήματα των κεντρικών συστημάτων ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι [29], [33]:

- Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που λαμβάνει ο κεντρικός ελεγκτής από τις μετρήσεις, τα οποία καλείται να διαχειριστεί επιλύοντας σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, και αφετέρου η διανομή των εντολών προς τα συστήματα ρύθμισης του δικτύου σύμφωνα με τις μεταβλητές απόφασης που εξάγονται από το πρόβλημα. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα για συστήματα πολυάριθμων ζυγών, ενώ κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ορισμένων προδιαγραφών. Αντίθετα, στον αποκεντρωμένο έλεγχο, ανταλλαγή δεδομένων μπορεί να χρειαστεί μόνο σε γειτονικές περιοχές, με αποτέλεσμα η καθυστέρηση στο σύστημα ελέγχου να είναι σημαντικά μικρότερη.
- Η ενδεχόμενη αστοχία στη λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή μπορεί να προκαλέσει μερική ή ολική απώλεια ελέγχου του συστήματος. Με άλλα λόγια, ένας ελεγκτής κεντρικού τύπου δεν είναι δυνατό να εξασφαλίζει την επιθυμητή στιβαρότητα και αξιοπιστία. Στον αποκεντρωμένο έλεγχο, η διακοπή δυνατότητας ελέγχου σε μια περιοχή, δεν καθιστά αδύνατο τον έλεγχο στις υπόλοιπες περιοχές.
- Κάθε περιοχή σε ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίκτυο, ενδέχεται να βασίζει την βελτιστοποίηση των προβλημάτων της σε διαφορετικά κριτήρια, στόχους και περιορισμούς (π.χ. ασφάλεια, ταχύτητα διόρθωσης, πολυπλοκότητα, κόστος). Σε ένα σύστημα με αποκεντρωμένο έλεγχο οι στόχοι κάθε περιοχής μπορούν να επιτευχθούν ξεχωριστά από τους αντίστοιχους πράκτορες ελέγχου, γεγονός που δεν μπορεί να υλοποιηθεί με κεντρικό σχεδιασμό.
- Τέλος, στον κεντρικό έλεγχο το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι πιο πολύπλοκο σε σχέση με αυτά που επιλύονται σε αποκεντρωμένο επίπεδο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης και διόρθωσης. Αντίθετα, στον αποκεντρωμένο έλεγχο το κύριο πρόβλημα βελτιστοποίησης αναλύεται σε επιμέρους υποπροβλήματα και οι διαδικασίες για διαφορετικές περιοχές εκτελούνται παράλληλα. Συνεπώς η πολυπλοκότητα και ο χρόνος των απαραίτητων υπολογισμών μειώνεται σημαντικά, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινου προσωπικού που χειρίζεται και επιβλέπει διαρκώς κάποιο σύνθετο λογισμικό διανομής ισχύος.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί μία πλήρως αποκεντρωμένη τεχνική ελέγχου και ρύθμισης της τάσης των δικτύων διανομής, που μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενός συστήματος πολλαπλών ευφυών πρακτόρων (MAS). Πρόκειται για μία διαδικασία στην οποία ο κάθε πράκτορας λαμβάνει τοπικά αποφάσεις, με σκοπό να ικανοποιηθούν οι ανισωτικοί περιορισμοί για την τάση στον ζυγό όπου συνδέεται ο ίδιος, και τελικά σε όλο το δίκτυο. Οι πράκτορες μπορούν να ελέγχουν το σημείο λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και να προσφέρουν αυτή την υπηρεσία μετά από αίτημα των γειτονικών τους πρακτόρων, ώστε να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί στον ίδιο ζυγό ή σε κάποιο άλλο σημείο του συστήματος όταν παραστεί ανάγκη. Η συγκεκριμένη τεχνική συνεργασίας αναπτύχθηκε με βάση τον αλγόριθμο μεγίστου αθροίσματος (max-sum algorithm) για τη λύση προβλημάτων DCOP (Distributed Constraint Optimization Problem). Συγκεκριμένα, αποτελεί τροποποίηση της τεχνικής DYDOP (DYnamic programming Decentralised OPTimal dispatch) [48], η οποία ως αντικειμενικό σκοπό είχε να βρεθεί η βέλτιστη κατανομή της παραγωγής ενεργού ισχύος από τις συμμετέχουσες μονάδες, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές CO₂.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικά δίκτυα βασίζεται στον προσεγγιστικό υπολογισμό των παραγόντων ευαισθησίας της τάσης ως προς τη μεταβολή ροής ενεργού/αέργου ισχύος σε κάθε κόμβο από το ανάντη σύστημα. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται μόνο τοπικά διαθέσιμα δεδομένα και επίσης δεδομένα που παρέχονται από τους γειτονικούς πράκτορες.

6.2 Περιγραφή προβλημάτων DCOP

Ένα πρόβλημα DCOP ορίζεται μέσω μιας τετράδας (n -πλειάδα, tuple) $\langle \mathcal{X}, \mathcal{D}, \mathcal{F}, \mathcal{A} \rangle$, η οποία αποτελείται από ένα σύνολο μεταβλητών $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_h\}$ που μπορούν να λάβουν διακριτές τιμές στο πεπερασμένο σύνολο των πεδίων τιμών $\mathcal{D} = \{\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_h\}$ αντίστοιχα, και $\mathcal{F} = \{F_1, \dots, F_k\}$ είναι το σύνολο των συναρτήσεων οι οποίες $F_i: \mathbf{d}_{i_1} \times \dots \times \mathbf{d}_{i_j} \rightarrow \mathbb{R}^+$ εκφράζουν το κόστος κάθε πιθανού συνδυασμού των μεταβλητών. Ως $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_k\}$ συμβολίζεται το σύνολο k πρακτόρων και κάθε μεταβλητή x_i ανατίθεται σε έναν πράκτορα. Μόνο ο σχετικός πράκτορας της κάθε μεταβλητής έχει τη δυνατότητα ανάθεσης τιμών σε αυτήν. Για παράδειγμα, στην

περίπτωση του ηλεκτρικού δικτύου, κάθε πράκτορας ελέγχει την παραγωγή κάθε γεννήτριας.

Ο σκοπός των πρακτόρων είναι να βρουν μία διάταξη \mathcal{X}^* για όλες τις μεταβλητές στο \mathcal{X} , που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των συναρτήσεων:

$$\arg \min_{\mathcal{X}^*} \sum_{i=0}^k F_i$$

Ένα πρόβλημα DCOP μπορεί να αναπαρασταθεί με έναν γράφο, του οποίου οι κορυφές αντιστοιχούν σε μεταβλητές και οι ακμές στις εξαρτήσεις (συναρτήσεις) μεταξύ των μεταβλητών. Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, τις μεταβλητές μπορούν να αποτελούν κάποια μεγέθη σχετικά με τις γραμμές ή τις μονάδες παραγωγής (ροή ισχύος σε γραμμή, εγχύσεις ισχύος σε ζυγούς, τάση λειτουργίας κλπ.) και οι συναρτήσεις να εκφράζουν τις εκπομπές ρύπων, κόστος λειτουργίας των μονάδων κλπ.

Ο αλγόριθμος μεγίστου αθροίσματος (max-sum algorithm) βασίζεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ γειτονικών κόμβων για τη μεγιστοποίηση (ή ελαχιστοποίηση ανάλογα με τη φύση του προβλήματος) του αθροίσματος των συναρτήσεων όλων των πρακτόρων σε ένα δίκτυο. Κάθε μεταβλητή μπορεί να λάβει ένα συγκεκριμένο πλήθος διακριτών τιμών, οι οποίες επηρεάζουν τις τιμές της συνάρτησης με την οποία γειτνιάζουν. Κάθε πράκτορας, μετά την ανταλλαγή μηνυμάτων, παίρνει αποφάσεις ώστε να μεγιστοποιήσει την τοπική του συνάρτηση και τελικά τη συνολική συνάρτηση όλου του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους αποστέλλοντας μηνύματα από μεταβλητή σε συνάρτηση και από συνάρτηση σε μεταβλητή, ως εξής:

από μεταβλητή σε συνάρτηση:

$$Q_{b \rightarrow a}(x_b) = \sum_{a' \in A(b) \setminus a} R_{a' \rightarrow b}(x_b)$$

από συνάρτηση σε μεταβλητή:

$$R_{a \rightarrow b}(x_b) = \min_{\mathcal{X}_a \setminus b} \left[F_a(\mathcal{X}_a) + \sum_{b' \in B(a) \setminus b} Q_{b' \rightarrow a}(x_{b'}) \right]$$

Έστω $B(a)$ το σύνολο των μεταβλητών που συνδέονται με τη συνάρτηση a , $A(b)$ το σύνολο των συναρτήσεων που συνδέονται με τη συνάρτηση x_b , $F_a(\mathcal{X}_a)$ η συνάρτηση του πράκτορα a όταν κάθε μεταβλητή του συνόλου $B(a)$ έχει λάβει μία συγκεκριμένη τιμή και $\mathcal{X}_a \setminus b \equiv \{x_{b'} : b' \in B(a) \setminus b\}$. Για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή κάθε μεταβλητής x_b , ο πράκτορας χρησιμοποιεί την εξίσωση:

$$\arg \max_{x_b} Z_b(x_b)$$

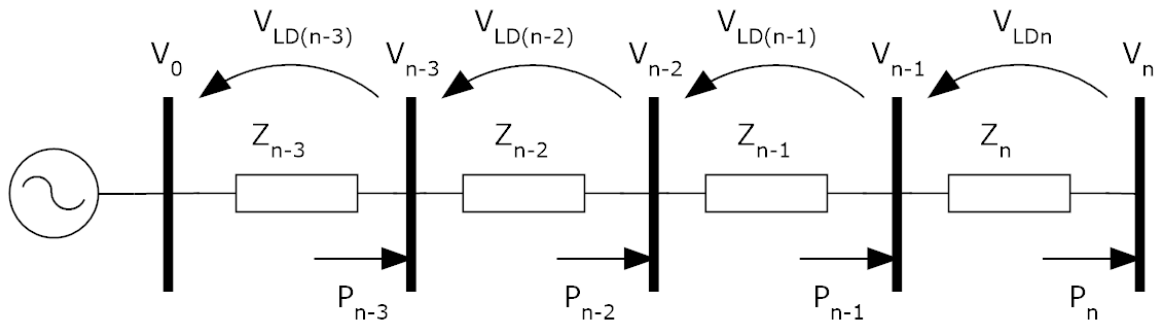
όπου $Z_b(x_b)$ είναι το άθροισμα των R μηνυμάτων που δέχεται η συνάρτηση x_b :

$$Z_b(x_b) = \sum_{a \in A(b)} R_{a \rightarrow b}(x_b)$$

6.3 Ανάπτυξη του μοντέλου πράκτορα

Για να υλοποιηθεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα ρύθμισης τάσης πολλαπλών πρακτόρων και να λειτουργεί σε μεγάλα δίκτυα χωρίς την ανάγκη κάποιου κεντρικού μοντέλου, πρέπει να είναι εφικτός ο υπολογισμός των πιθανών μεταβολών της τάσης σε κάθε κόμβο, ως συνάρτηση κάποιων τοπικών μεγεθών και δεδομένων που μεταδίδονται μεταξύ γειτονικών κόμβων.

Για το παράδειγμα της γραμμής του σχήματος 6.1, συμβολίζουμε με V_n το μέτρο τάσης του ζυγού n , $Z_n = R_n + jX_n$ τη σύνθετη αντίσταση του κλάδου μεταξύ του n και $n-1$, V_{LDn} την αντίστοιχη πτώση τάσης και P_n την ενεργό ισχύ που ρέει στον n από το ανάντη δίκτυο. v συνδέεται μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Generator - DG) ή/και φορτίο στο ζυγό n , συμβολίζονται αντίστοιχα με P_{Gn} και P_{Ln} .



Σχήμα 6.1 Γραμμή ακτινικού δικτύου διανομής

Το μέτρο τάσης στο ζυγό n μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$V_n = V_0 - \sum_{i=1}^n V_{LDi} \quad (1)$$

όπου $V_0=1$ p.u. και $V_{LDn} = V_{n-1} - V_n$.

Για να βρούμε την αυτοευαισθησία της τάσης σε έναν κόμβο, δηλαδή το ρυθμό μεταβολής της τάσης ως προς τη ροή ισχύος από ανάντη, υπολογίζουμε την μερική παράγωγο:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_n}{\partial P_n} &= - \left[\frac{\partial(V_{n-1} - V_n)}{\partial P_n} + \frac{\partial(V_{n-2} - V_{n-1})}{\partial P_n} + \dots + \frac{\partial(V_0 - V_1)}{\partial P_n} \right] = \\ &= - \left[\frac{\partial(V_{LDn})}{\partial P_n} + \frac{\partial(V_{LDn-1})}{\partial P_{n-1}} \cdot \frac{\partial P_{n-1}}{\partial P_n} + \dots + \frac{\partial(V_{LD1})}{\partial P_1} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial P_n} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Αν αγνοήσουμε τις ωμικές απώλειες, τότε $P_n \cong P_{n-1}$ και η σχέση (2) μπορεί να γραφεί:

$$\frac{\partial V_n}{\partial P_n} = - \left[\frac{\partial(V_{LDn})}{\partial P_n} + \frac{\partial(V_{LDn-1})}{\partial P_{n-1}} + \dots + \frac{\partial(V_{LD1})}{\partial P_1} \right] \quad (3)$$

Η πτώση τάση $V_{LDn} = V_{n-1} - V_n$ είναι περίπου ίση με:

$$V_{LDn} \cong \frac{R_n P_n + X_n Q_n}{V_n} \quad (4)$$

συνεπώς:

$$\frac{\partial(V_{LDn})}{\partial P_n} \cong \frac{R_n}{V_n} \quad (5)$$

Άρα για την ευαισθησία της τάσης του ζυγού n ως προς τη μεταβολή ροής ενεργού ισχύος σε αυτόν, προκύπτει από τις (3), (5):

$$\frac{\partial V_n}{\partial P_n} \cong - \left(\frac{R_n}{V_n} + \frac{R_{n-1}}{V_{n-1}} + \dots + \frac{R_1}{V_1} \right) = - \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{V_i} \quad (6)$$

και αντίστοιχα ως προς την άεργο:

$$\frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \cong - \left(\frac{X_n}{V_n} + \frac{X_{n-1}}{V_{n-1}} + \dots + \frac{X_1}{V_1} \right) = - \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{V_i} \quad (7)$$

Οι παράγοντες ευαισθησίας τάσης σε έναν ζυγό ισούνται με το άθροισμα των παραγόντων ευαισθησίας όλων των ανάντη ζυγών και ο κάθε πράκτορας μπορεί να τους υπολογίσει λαμβάνοντας μόνο στοιχεία από τον ανάντη συνδεδεμένο ζυγό και τις μετρήσεις τοπικής τάσης και ροής ισχύος. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει πως με την αύξηση της ροής ισχύος στον n , δηλαδή με αύξηση της κατανάλωσης του ίδιου και των κατάντη ζυγών, παρατηρείται μείωση του μέτρου τάσης V_n , ενώ για μείωση της ποσότητας P_n , δηλαδή μείωση της κατανάλωσης ή αύξηση της παραγωγής στον ίδιο και τους κατάντη ζυγούς παρατηρείται αύξηση του μέτρου τάσης.

Ας υποθέσουμε ότι στον τυχαίο ζυγό n και σε όλους τους κατάντη ζυγούς ως προς αυτόν ($n+1, n+2, \dots, k-1, k$) συνδέονται ΜΔΠ που παράγουν P_{Gi} (MW) και φορτία σταθερής ισχύος P_{Li} (MW) ($i=n \dots k$). Επίσης, το δίκτυο μεταφοράς με το οποίο συνδέεται η γραμμή διανομής αποτελεί άπειρο ζυγό ή άπειρο δίκτυο, δηλαδή απορροφά την επιπλέον ισχύ σαν φορτίο και παρέχει την απαιτούμενη ισχύ όπως μια γεννήτρια. Για την ισχύ που ρέει σε κάθε κόμβο από ανάντη ισχύει (με σύμβαση φορτίου, $P_{Gi} < 0$):

$$P_k = P_{Lk} + P_{Gk}$$

$$P_{k-1} = P_{L(k-1)} + P_{G(k-1)} + P_k = P_{L(k-1)} + P_{G(k-1)} + P_{Lk} + P_{Gk}$$

⋮

$$P_n = P_{Ln} + P_{Gn} + P_{n+1} = \sum_{i=n}^k (P_{Li} + P_{Gi}) \quad (8)$$

Αν, για παράδειγμα, όλες οι γεννήτριες (DG_i) έχουν τα ίδια ονομαστικά μεγέθη και η καθεμία είναι δυνατόν να λειτουργεί σε q διακριτές στάθμες παραγωγής, $\{s_1 = 0, \dots, s_q = P_{Gmax}\}$, τότε οι δυνατές μεταβολές παραγωγής ενεργού ισχύος τοπικά είναι:

$$\Delta P_{Gn} = \begin{bmatrix} -P_{Gn} \\ \vdots \\ P_{Gmax} - P_{Gn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Το πρώτο στοιχείο του διανύσματος αντιστοιχεί σε μηδενική παραγωγή και το τελευταίο σε μέγιστη (P_{Gmax}). Ο εγκατεστημένος πράκτορας του συστήματος MAS στο ζυγό μιας γεννήτριας μπορεί να δώσει εντολή για αλλαγή του σημείου λειτουργίας της, ενώ τα φορτία θεωρούνται σταθερά και μη ελεγχόμενα με $\Delta P_{Ln} = 0$.

Το διάνυσμα με τις δυνατές μεταβολές εισερχόμενης ενεργού ισχύος στον κόμβο n από ανάντη, σύμφωνα με τη σχέση (8), είναι:

$$\Delta \mathbf{P}_n = \Delta \mathbf{P}_{Gn} + \Delta \mathbf{P}_{n+1} \quad (10)$$

το οποίο αποτελείται από τα αθροίσματα όλων των συνδυασμών κάθε στοιχείου τοπικών καταστάσεων $\Delta \mathbf{P}_{Gn}$ με κάθε στοιχείο των καταστάσεων της ροής ισχύος στον κατάντη συνδεδεμένο κόμβο $\Delta \mathbf{P}_{n+1}$ (και όχι κανονική άθροιση πινάκων).

Για τον πιο απομακρυσμένο κατάντη κόμβο, έστω k , στον οποίο υπάρχει συνδεδεμένη DG_k , ισχύει:

$$\Delta \mathbf{P}_k = \Delta \mathbf{P}_{Gk} = \begin{bmatrix} -P_{Gk} \\ \vdots \\ P_{Gk,max} - P_{Gk} \end{bmatrix} \quad (11)$$

και για τον ανάντη κόμβο ως προς τον k , έστω l , στον οποίο υπάρχει συνδεδεμένη DG_l :

$$\Delta \mathbf{P}_l = \Delta \mathbf{P}_{Gl} + \Delta \mathbf{P}_{l+1} = \Delta \mathbf{P}_{Gl} + \Delta \mathbf{P}_{Gk} = \begin{bmatrix} -P_{Gk} - P_{Gl} \\ \vdots \\ P_{Gk,max} - P_{Gk} + P_{Gl,max} - P_{Gl} \end{bmatrix} \quad (12)$$

και ούτω καθεξής. Δηλαδή το διάνυσμα $\Delta \mathbf{P}_n$ περιέχει όλες τις πιθανές ποσότητες περικοπής ή αύξησης της παραγωγής ενεργού ισχύος (ανάλογα με το παρόν σημείο λειτουργίας), συνολικά για τις όλες γεννήτριες που συνδέονται στον κόμβο n και κατάντη αυτού.

Τελικά, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του διανύσματος $\Delta \mathbf{P}_n$ και την ανάλυση για τους παράγοντες αυτοευαισθησίας, η σχέση από την οποία προκύπτουν οι δυνατές μεταβολές της τιμής του μέτρου τάσης στον κόμβο n , είναι:

$$\Delta V_n = - \left(\Delta \mathbf{P}_n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{V_i} \right) - \left(\Delta \mathbf{Q}_n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{V_i} \right) \quad (13)$$

Με την εξεταζόμενη αποκεντρωμένη μέθοδο ρύθμισης τάσης μπορεί, με βάση την εξίσωση (13), να ρυθμιστεί το μέτρο τάσης μέσω της διαχείρισης της διαθέσιμης ενεργού ή/και αέργου ισχύος των μονάδων παραγωγής. Στην παρακάτω υλοποίηση του αλγορίθμου δεν περιλαμβάνεται η δυνατότητα για μεταβολές της αέργου.

Η μεταβολή της τάσης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Delta V_n = V_n^{new} - V_n^{old} \quad (14), \quad \text{όπου: } V_n^{old} = V_{n-1} - V_{LDn} \quad (15)$$

Οπότε, συνδυάζοντας κατάλληλα όλες τις τιμές μεταβολής της παραγωγής ενεργού ΔP_n και τις καταστάσεις τάσης του ανάντη κόμβου V_{n-1} , οι καταστάσεις τάσης του κόμβου n υπολογίζονται ως εξής:

$$V_n^{new} = V_{n-1} - V_{LDn} - \left(\Delta P_n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{V_i} \right) \quad (16)$$

Ο σκοπός είναι να επιλεγούν οι κατάλληλες τιμές από το διάνυσμα V_n^{new} κάθε κόμβου του δικτύου, οι οποίες εξαρτώνται από την τάση του ανάντη ζυγού και την παραγωγή των γεννητριών που συνδέονται στον ίδιο και σε όλους τους κατάντη ζυγούς. Επομένως, όλοι οι πράκτορες πρέπει να ανταλλάξουν μεταξύ τους τα απαιτούμενα δεδομένα και τελικά να επιλέξουν τον κατάλληλο συνδυασμό τιμών παραγωγής των γεννητριών ώστε να επανέλθει η τάση εντός ορίων.

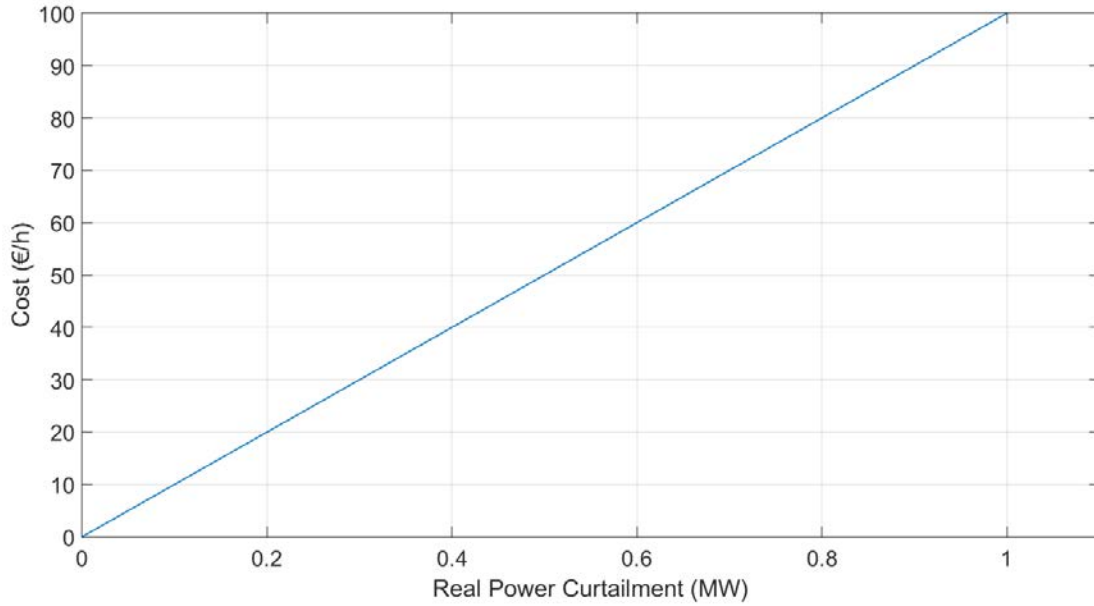
6.4 Συναρτήσεις κόστους ισχύος και τάσης

Ο σκοπός του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι να διατηρήσει το μέτρο της τάσης των ζυγών εντός των επιτρεπτών ορίων, επιλέγοντας μία ρύθμιση της παραγωγής ενεργού ισχύος που θα ελαχιστοποιεί το κόστος για τις συμμετέχουσες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Συμβολίζουμε με M_p την τιμή της ενέργειας (€/MWh), P_G την επιθυμητή στάθμη παραγωγής ενεργού και P_{Gmax} τη μέγιστη δυνατή παραγωγή της μονάδας αναλόγως των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών κάθε χρονική στιγμή. Το κόστος εξαιτίας της απαιτούμενης περικοπής στην παραγωγή εκφράζεται σε (€/h) ως εξής:

$$C^{\Delta P_G}(P_G) = M_p(P_{Gmax} - P_G) \quad (17)$$

Η ποσότητα $P_{Gmax} - P_G$ αντιστοιχεί στην περικοπή της παραγωγής και για $M_p = 100$ €/MWh, $P_{Gmax} = 1$ MW η γραφική παράσταση του κόστους ισχύος φαίνεται στο σχήμα 6.2.

Στα περισσότερα ισχύοντα ρυθμιστικά πλαίσια επιβάλλεται η καταβολή αντιτίμου από τους διαχειριστές των δικτύων διανομής στους ιδιοκτήτες των μονάδων ΔΠ ακόμη και για την ενέργεια που αν και ήταν διαθέσιμη έπρεπε να απορριφθεί. Κατά συνέπεια, είναι προς όφελος των διαχειριστών των δικτύων διανομής να γίνεται περικοπή του ελάχιστου δυνατού ποσού της παραγόμενης ενέργειας από τις εγκατεστημένες μονάδες ΔΠ. Εάν δε θεωρήσουμε την ύπαρξη εγγυημένων τιμών, τότε το αντίστοιχο κόστος επιβαρύνει τους ιδιοκτήτες εκείνων των μονάδων για τις οποίες ζητείται να περικόψουν την ενεργό ισχύ τους.



Σχήμα 6.2 Γραφική παράσταση κόστους περικοπής παραγόμενης ενεργού ισχύος

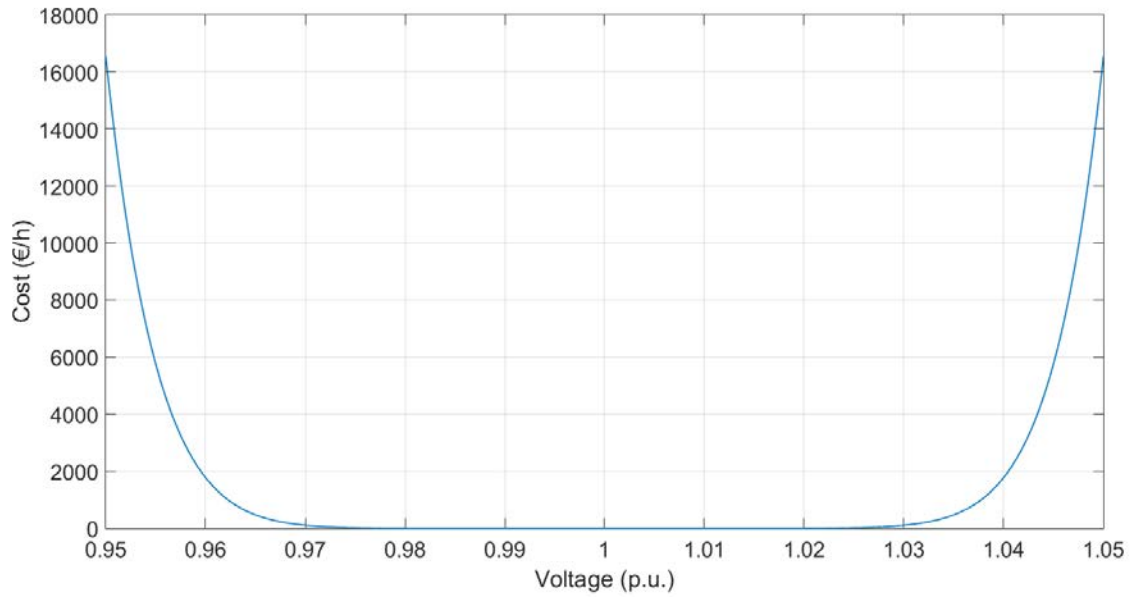
Για να μπορέσουμε να εκφράσουμε την απαίτηση για τα μέτρα των τάσεων, εισάγουμε επιπλέον μία συνάρτηση κόστους τάσης (penalty function/voltage damage), με την οποία θεωρητικά η παραβίαση των ορίων αντιστοιχεί σε μεγάλο χρηματικό κόστος (€/h). Η συνάρτηση κόστους τάσης για κάποιον ζυγό n ορίζεται ως:

$$C^{V_n^{new}}(V_n^{new}) = [d_1 (V_{nom} - V_n^{new})]^{10} \quad (18)$$

όπου V_n^{new} είναι η τάση λειτουργίας, V_{nom} η ονομαστική τιμή (1 p.u.) και d_1 η παράμετρος των περιορισμών που καθορίζει τα επιτρεπόμενα όρια. Η γραφική της παράσταση (bathtub curve) είναι συμμετρική καμπύλη γύρω από την ονομαστική τάση V_{nom} , όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3. Η τιμή της παραμένει κοντά στο μηδέν όταν η τάση δεν ξεπερνά τα όρια $\pm 3\%$ που έχουμε επιλέξει. Η παράμετρος d_1 επιλέγεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι σε περίπτωση που οι τάσεις βρίσκονται εντός ορίων ($V_{min}=0.97$, $V_{max}=1.03$), δεν απαιτείται κάποια ενέργεια ρύθμισης από τους πράκτορες που ελέγχουν τις μονάδες. Η συνάρτηση εφαρμόζεται σε όλους τους ζυγούς του δικτύου.

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου d_1 , χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$d_1 = \frac{\sqrt[10]{M_p}}{V_{nom} - V_{min}} \quad (19)$$



Σχήμα 6.3 Γραφική παράσταση κόστους τάσης

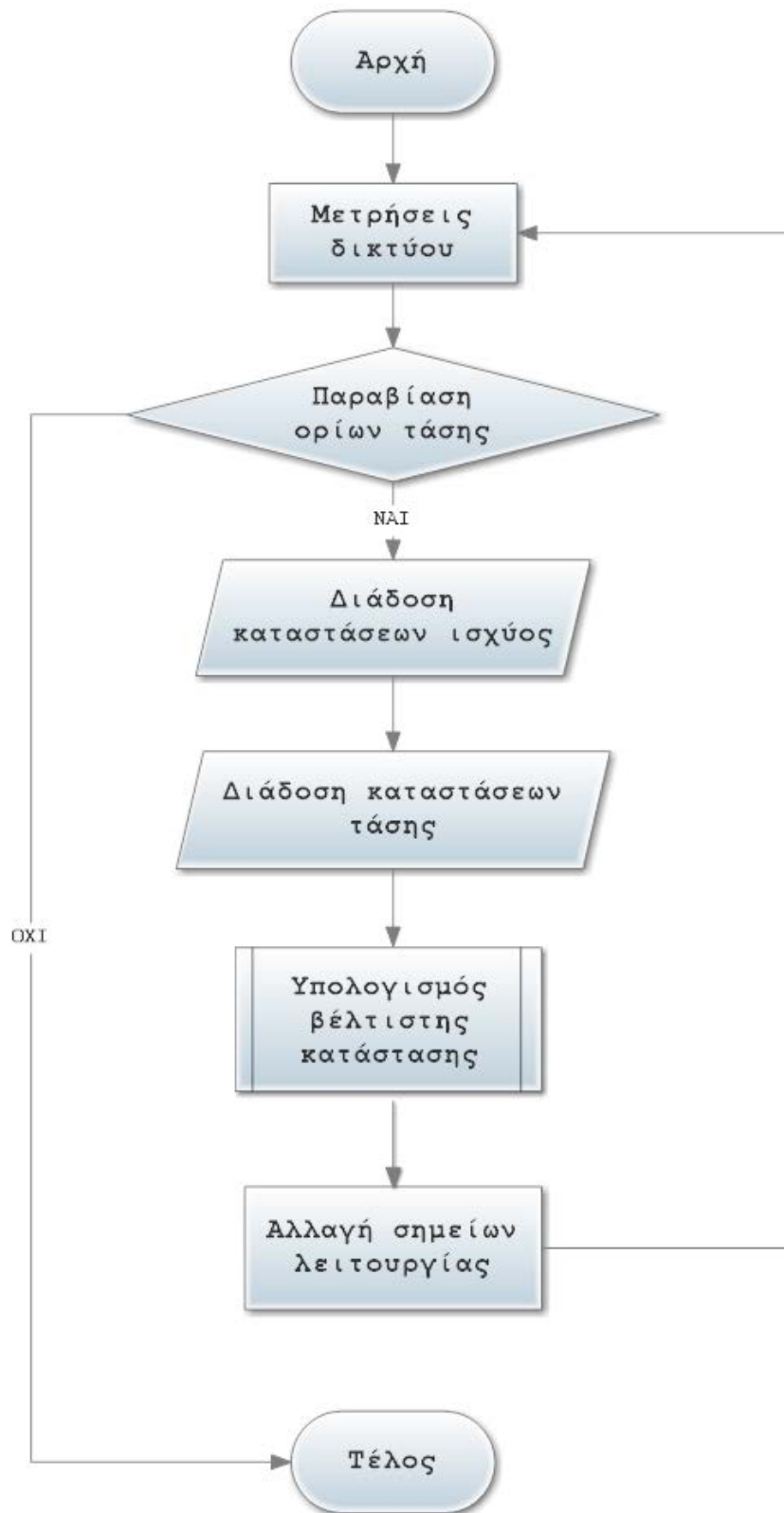
Στην αρχική υλοποίηση της τεχνικής DYDOP [48], το κόστος εκπομπών CO₂ υπολογίζεται για όλους τους συνδυασμούς στάθμεων παραγωγής κάθε κόμβου και των κατώτερων του. Αυτά τα στοιχεία τελικά αποστέλλονται στον ανώτερο κόμβο (ρίζα του δένδρου αναπαράστασης του δικτύου). Εκεί γίνεται ο υπολογισμός της βέλτιστης κατανομής παραγωγής ισχύος, και στη συνέχεια οι επιλεγμένες καταστάσεις λειτουργίας διαδίδονται προς τα φύλλα του δένδρου.

Για να προσαρμόσουμε το πρόβλημα στις ανάγκες ρύθμισης της τάσης, πρέπει να οριστεί μία συνολική συνάρτηση κόστους για κάθε κόμβο ($C_{nodal}^{V_n^{new}}$), η οποία θα περιλαμβάνει το εικονικό κόστος τάσης λειτουργίας του και το απαιτούμενο κόστος ισχύος ώστε η τάση να διατηρείται σε αυτό το επίπεδο. Επίσης, όπως φαίνεται από την εξίσωση (16), στον υπολογισμό του συνολικού κόστους κόμβου θα περιλαμβάνεται το κόστος των καταστάσεων ($C^{V_n^{new}}$), το κόστος του ανάντη κόμβου ($C^{V_{n-1}}$) που απαιτείται από τον n-1 ώστε να διατηρηθεί η τιμή V_n^{new} και το κόστος της συνολικής περικοπής ισχύος ($C^{\Delta P_n}$). Δηλαδή μπορούμε να γράψουμε:

$$C_{nodal}^{V_n^{new}} = C^{V_n^{new}} + C^{\Delta P_n} + C^{V_{n-1}} \quad (20)$$

6.5 Στάδια εκτέλεσης του αλγορίθμου

Η διαδικασία εκτέλεσης του αλγορίθμου περιγράφεται με το διάγραμμα ροής στο σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης

A) Αρχικές μετρήσεις συστήματος:

Κατά την αρχικοποίηση καθορίζονται τα ηλεκτρικά μεγέθη από το δίκτυο που απαιτούνται για τους παρακάτω υπολογισμούς. Αυτά είναι η ενεργός ισχύς που ρέει σε κάθε κόμβο από τον ανάντη συνδεδεμένο κλάδο P_n , η ανά μονάδα τιμή της τάσης λειτουργίας V_n , ενώ δεδομένη θεωρείται η αντίσταση R_n .

B) Διάδοση μηνύματος καταστάσεων ισχύος:

Ξεκινώντας από τον πιο απομακρυσμένο ζυγό και με κατεύθυνση προς τους ανάντη ζυγούς, αποστέλλεται το διάνυσμα ΔP_{n+1} (ο δείκτης $n+1$ δηλώνει τον αποστολέα, με παραλήπτη τον πράκτορα του κόμβου n). Αυτό περιέχει όλες τις πιθανές μεταβολές ροής ισχύος και ισούνται με τις μεταβολές ισχύος (περικοπή ή αύξηση της παραγωγής ενεργού ισχύος) που είναι διαθέσιμες συνολικά από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες συνδέονται στον κόμβο $n+1$ και σε όλο το κατάντη δίκτυο (σχέσεις 10-12). Αφού υπολογιστούν τα στοιχεία του $\Delta P_n = \Delta P_{Gn} + \Delta P_{n+1}$, αυτά στη συνέχεια αποστέλλονται στον $n-1$ κ.ο.κ. Το μέγεθος του μηνύματος αυξάνεται εκθετικά καθώς διαδίδεται προς τα πάνω, και εξαρτάται από το πλήθος των δυνατών στάθμεων λειτουργίας παραγωγής των μονάδων.

Αποστέλλεται επίσης το διάνυσμα $C^{\Delta P_{n+1}}$ (ο δείκτης $n+1$ δηλώνει τον αποστολέα, με παραλήπτη τον πράκτορα του κόμβου n). Κάθε μεταβολή στην παραγωγή μιας γεννήτριας, με τελικό σημείο λειτουργίας P_{Gn} , συνεπάγεται κόστος περικοπής ισχύος, σύμφωνα με τη (17), ίσο με:

$$C^{\Delta P_{Gn}}(P_{Gn}) = M_p(P_{Gmax} - P_{Gn})$$

Άρα για κάθε συνδυασμό σημείων λειτουργίας των γεννητριών που συνδέονται στον ίδιο κόμβο και το κατάντη δίκτυο αντιστοιχεί το διάνυσμα καταστάσεων ΔP_n , όπως δείξαμε προηγουμένως, και επίσης το διάνυσμα καταστάσεων κόστους ισχύος $C^{\Delta P_n}$ (ίδιου μεγέθους με το ΔP_n).

Στην περίπτωση που δύο ή περισσότερες καταστάσεις ταυτίζονται, δηλαδή προκύπτει το ίδιο άθροισμα επιμέρους μεταβολών από διαφορετικούς συνδυασμούς περικοπής, επιλέγεται να σταλλεί μόνο το στοιχείο με το μικρότερο κόστος.

C) Διάδοση μηνύματος τάσης:

Ξεκινώντας από τον ζυγό του υποσταθμού διανομής (ζυγός αναφοράς) και με κατεύθυνση προς το κατάντη σύστημα, αποστέλλεται το μήνυμα τάσης που περιέχει 3 στοιχεία: το διάνυσμα V_{n-1} με καταστάσεις τάσεως του ανάντη

κόμβου, το διάνυσμα $\mathbf{C}^{V_{n-1}}$ με το αντίστοιχο εικονικό κόστος τάσης για κάθε στοιχείο του $\mathbf{C}^{V_{n-1}}$ και τον παράγοντα αυτοευαισθησίας $\frac{\partial V_{n-1}}{\partial P_{n-1}}$.

Λαμβάνοντας αυτά τα δεδομένα από τον ανάντη γειτονικό κόμβο, ο κάθε πράκτορας υπολογίζει αρχικά την τιμή του δικού του παράγοντα ευαισθησίας, σύμφωνα με τη σχέση (6):

$$\frac{\partial V_n}{\partial P_n} = \frac{\partial V_{n-1}}{\partial P_{n-1}} - \frac{R_n}{V_n}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το διάνυσμα καταστάσεων του κόμβου n, το οποίο περιέχει όλες τις πιθανές τιμές τάσης ως συνάρτηση των συνδυασμών μεταβολών σημειών λειτουργίας των μονάδων που συνδέονται στον ίδιο και στους κατάντη κόμβους (ΔP_n) και των αντίστοιχων τάσεων του ανάντη κόμβου:

$$\mathbf{V}_n^{new} = \mathbf{V}_{n-1} - V_{LDn} - \left(\Delta \mathbf{P}_n \cdot \frac{\partial V_n}{\partial P_n} \right) \quad (21)$$

Τα στοιχεία του μηνύματος τάσης του ζυγού αναφοράς περιέχουν μόνο την τιμή 1 p.u. και μηδενικό κόστος τάσης.

D) Υπολογισμός βέλτιστης κατάστασης:

Έχοντας πλέον διαθέσιμες όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τα κόστη τάσεως και ισχύος, ο κάθε κόμβος μπορεί να υπολογίσει τη συνολική συνάρτηση κόστους λειτουργίας του:

$$\mathbf{C}_{nodal}^{V_n^{new}} = \mathbf{C}^{V_n^{new}} + \mathbf{C}^{\Delta P_n} + \mathbf{C}^{V_{n-1}}$$

Κάθε στοιχείο του \mathbf{V}_n^{new} συνδέεται μία τιμή τάσης του ανάντη ζυγού και μία τιμή μεταβολής ισχύος. Επίσης, κάθε στοιχείο του $\mathbf{C}^{\Delta P_n}$, $\mathbf{C}^{\Delta P_n}(i, 1)$ αντιστοιχεί στην τιμή μεταβολής $\Delta P_n(i, 1)$. Συνεπώς πρέπει να προσθέσουμε όλες τις τιμές κόστους και τάσεως που σχετίζονται κατ' αυτόν τον τρόπο, δημιουργώντας το παραπάνω διάνυσμα $\mathbf{C}_{nodal}^{V_n^{new}}$.

Η ζητούμενη επιλογή που πρέπει να υλοποιήσει ο πράκτορας είναι:

$$\min_{\mathbf{V}_n^{new}} \{ \mathbf{C}_{nodal}^{V_n^{new}} \}$$

δηλαδή να βρεθεί η βέλτιστη τιμή τάσης για την οποία ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του κόμβου n. Αυτή σχετίζεται με ένα μοναδικό στοιχείο του διανύσματος ΔP_n από τη σχέση (16), έστω ΔP_n^{bid} , το οποίο

παριστάνει το απαιτούμενο άθροισμα των μεταβολών παραγωγής στον κόμβο n και σε όλους τους κατάντη ως προς τον n , ώστε να ελαχιστοποιείται η τοπική ποσότητα κόστους λειτουργίας.

E) Εφαρμογή νέων σημείων λειτουργίας:

Αφού έχουν υπολογιστεί οι απαιτήσεις ΔP^{bid} όλων των κόμβων, κάθε πράκτορας που ελέγχει μια γεννήτρια υπολογίζει την τοπική περικοπή ή αύξηση της παραγωγής από τη σχέση $\Delta P_{opt} = \Delta P_n^{bid} - \Delta P_{n+1}^{bid}$.

Μετά την αλλαγή του σημείου λειτουργίας σε όσες μονάδες απαιτείται, ελέγχεται αν οι τάσεις έχουν επανέλθει εντός ορίων. Εάν έχουμε ακόμα παραβίαση των ορίων σε κάποιον κόμβο, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, διαφορετικά η εκτέλεση του αλγορίθμου τερματίζεται.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής για τη ρύθμιση τάσης ακτινικών δικτύων διανομής ΜΤ. Όλα τα δίκτυα που περιγράφονται, αναπτύχθηκαν και προσομοιώθηκαν μέσω του πακέτου MATPOWER του MATLAB. Σύμφωνα με τον υπολογισμό των ροών φορτίου προκύπτουν οι τιμές των τάσεων σε κάθε ζυγό οι οποίες θεωρούμε ότι αντιστοιχούν στις τιμές μέσου όρου δεκαλέπτου.

7.1.1 Στόχος προσομοιώσεων

Στόχος της παρούσης ενότητας, είναι η ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου ρύθμισης τάσης, για κάποια σενάρια λειτουργίας μίας γραμμής τροφοδότησης ΜΤ. Η προτεινόμενη μέθοδος, προϋποθέτει υψηλή διείσδυση μονάδων ΔΠ, και βασιζόμενοι στη διαθέσιμη ενεργό ισχύ των μονάδων, είναι δυνατή η εφαρμογή της για τη ρύθμιση της τάσης σε περιπτώσεις υπέρτασης ή βύθισης. Στην περίπτωση εμφάνισης τέτοιου προβλήματος, επιχειρείται η επίλυση του με διαδοχικές αλλαγές του σημείου λειτουργίας των μονάδων.

7.1.2 Σύγκριση με την κεντρική μέθοδο ελέγχου

Τα αποτελέσματα από την προτεινόμενη μέθοδο αποκεντρωμένου ελέγχου συγκρίνονται με αυτά της κεντρικής ρύθμισης (όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5). Η κεντρική μέθοδος επιλύει το ίδιο πρόβλημα, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί πληροφορίες για τις τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου. Στη συγκεκριμένη θεώρηση, η αντικειμενική συνάρτηση που καταστρώνεται έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος, ενώ με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να απαιτήσουμε ελαχιστοποίηση της μεταβολής αέργου. Η σύγκριση των δυο μεθόδων έγκειται στην αντιπαραβολή της συνολικής μεταβολής ισχύος και τις προκύπτουσες τάσεις λειτουργίας στους ζυγούς μετά την εφαρμογή της ρύθμισης.

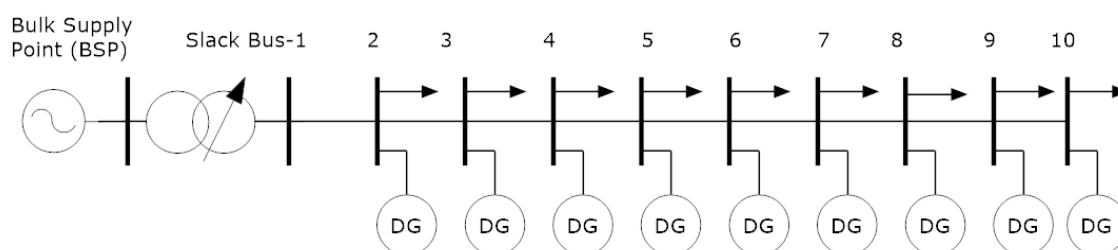
7.1.3 Θεωρήσεις-παραδοχές

Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων για την εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής ρύθμισης τάσης, πραγματοποιήθηκαν οι εξής θεωρήσεις:

- ο Το δίκτυο είναι συμμετρικό τόσο ως προς το σύστημα τροφοδοσίας όσο και των καταναλώσεων, προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή από την ανάλυση των ευαισθησιών τάσης.
- ο Κάθε ζυγός φορτίου περιλαμβάνει πράκτορα φορτίου (Load Agent) , ενώ στις μονάδες ΔΠ είναι εγκατεστημένοι πράκτορες ΔΠ (DG agent) οι οποίοι μπορούν να ελέγχουν τη μονάδα και να λαμβάνουν τοπικές μετρήσεις και μηνύματα από τους γειτονικούς πράκτορες.
- ο Τα φορτία μοντελοποιούνται ως σταθερής μιγαδικής ισχύος και δεν είναι ελεγχόμενα από τους πράκτορες φορτίου.
- ο Οι μονάδες ΔΠ συνδέονται σε ζυγούς φορτίου και η έγχυση ισχύος σε κάθε ζυγό ισούται με τη διαφορά της καταναλισκόμενης από την παραγόμενη ισχύ.
- ο Ο ζυγός ταλάντωσης (ζυγός υποσταθμού-MV Busbar) εμφανίζει σταθερή μοναδιαία τάση.
- ο Οι μονάδες ΔΠ (DGs) έχουν συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

7.2 Προσομοίωση δικτύου 10 κόμβων

Το δίκτυο στο οποίο θα εφαρμοσθεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης, αποτελεί μία γραμμή τροφοδότησης MT με 10 ζυγούς (σχήμα 7.1). Περιλαμβάνει 9 φορτία καταναλωτών και πλήρη διεξοδική διεσπαρμένη παραγωγή σε όλους τους ζυγούς φορτίου. Ο μετασχηματιστής του υποσταθμού ΥΤ/MT (115 /4,16 kV) είναι της τάξης των 5 MVA.



Σχήμα 7.1 Εξεταζόμενο δίκτυο MT 10 κόμβων

Πίνακας 7.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών

Κλάδος	Ωμική αντίσταση r (pu)	Επαγωγική αντίδραση x (pu)
1-2	0.030643	0.02443
2-3	0.018386	0.014658
3-4	0.018386	0.014658
4-5	0.010176	0.032655
5-6	0.013335	0.011358
6-7	0.02182	0.022121
7-8	0.05877	0.022431
8-9	0.05877	0.022431
9-10	0.05877	0.022431

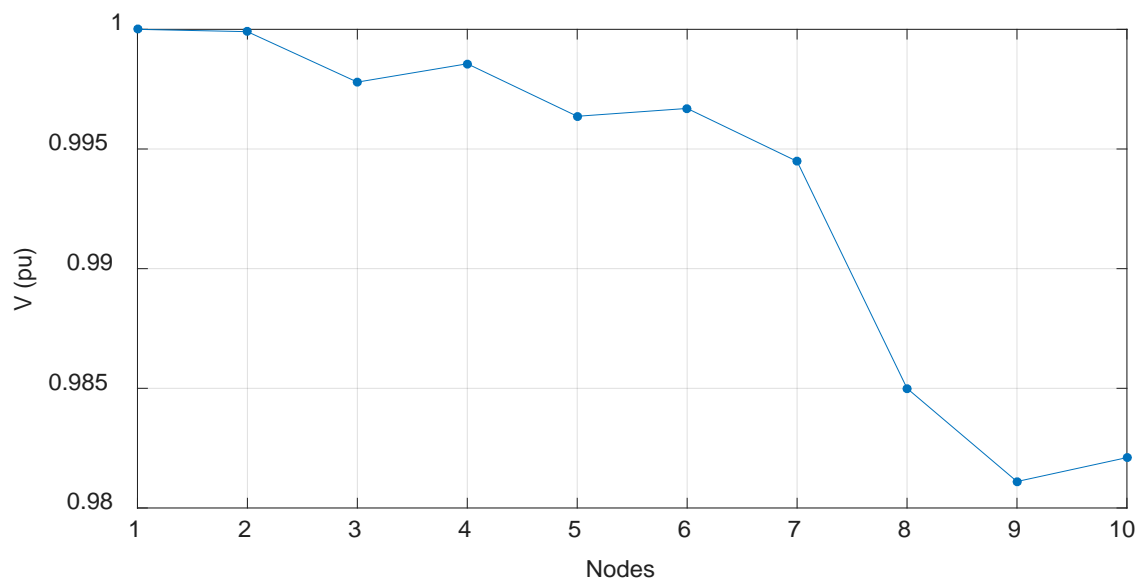
Όλες οι γεννήτριες (DGs) που συνδέονται στους ζυγούς 2-10, λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ($Q_G = 0$) και παράγουν μέγιστη ισχύ ίση με 1MW. Οι δυνατές καταστάσεις λειτουργίας τους, στις οποίες μπορεί να καταλήξουν σύμφωνα με την εντολή του πράκτορα που ελέγχει την καθεμία, είναι $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ MW. Για τις τιμές των τάσεων, απαιτούμε να βρίσκονται στο διάστημα $[0.97, 1.03]$ p.u. Στη συνέχεια επίσης, θεωρούμε 8 στάθμες λειτουργίας στο διάστημα $[0, 1]$ MW, δηλαδή τις δυνατές τιμές παραγωγής στο σύνολο $\{0, 0.1429, 0.2857, 0.4286, 0.5714, 0.7143, 0.8571, 1\}$ MW και εξετάζουμε τα ίδια σενάρια φόρτισης.

Θεωρώντας σύμβαση φορτίου, στην κατανάλωση ισχύος (P_L) αντιστοιχεί θετικό πρόσημο και στην παραγωγή (P_G) αρνητικό. Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζεται η ονομαστική κατανάλωση των φορτίων σε κάθε ζυγό.

Πίνακας 7.2 Δεδομένα φορτίων και συνολικής κατανάλωσης ζυγών

Ζυγός	Ενεργός κατανάλωση φορτίου P_L (MW)	Άεργος κατανάλωση φορτίου Q_L (MVar)	Συνολική κατανάλωση $P_L - P_G$ (MW)
1	-	-	-
2	0.4056	0.0417	-0.5944
3	1.5722	0.2587	0.5722
4	0.2389	0.0967	-0.7611
5	1.5722	0.0440	0.5722
6	0.4056	0	-0.5944
7	0.5722	0	-0.4278
8	1.4056	0.2043	0.4056
9	1.4056	0.0267	0.4056
10	0.9056	0.0287	-0.0944

Τυπικά, αποδίδεται το προφίλ τάσης του δικτύου στις συνθήκες μέγιστης παραγωγής και μέγιστου φορτίου, στο σχήμα 7.2. Όπως είναι αναμενόμενο, το επίπεδο τάσεων είναι κανονικό.

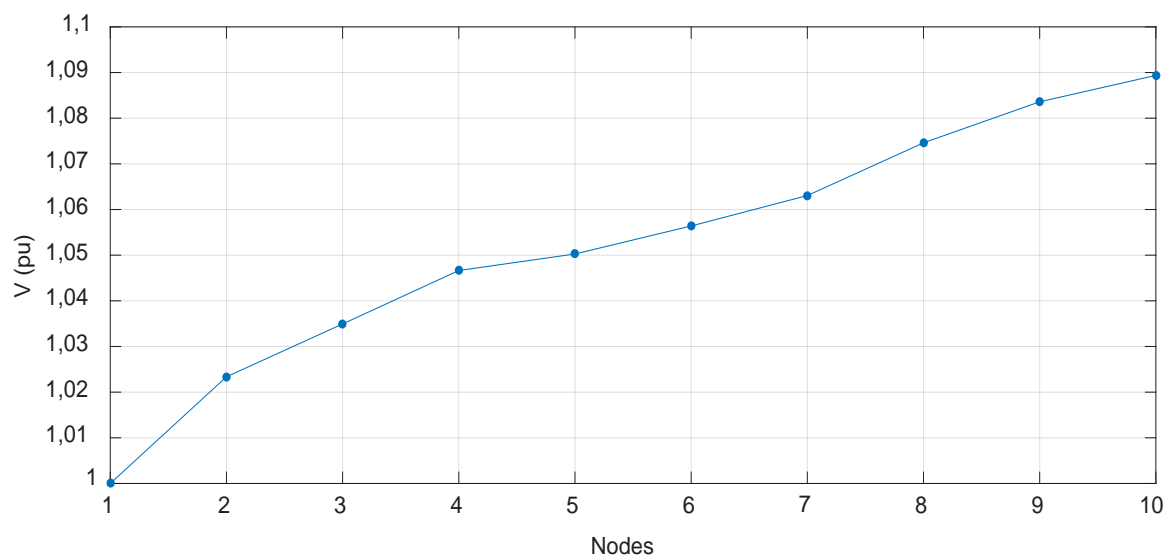


Σχήμα 7.2 Προφίλ τάσης γραμμής τροφοδότησης σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Για τα 3 διαφορετικά επίπεδα φόρτισης στα οποία εξετάζεται η λειτουργία του δικτύου, παρατηρείται πρόβλημα ανύψωσης της τάσης πάνω από το όριο του 3% σε διάφορους ζυγούς. Παρατίθενται επίσης προς σύγκριση τα ποσά περικοπής ενεργού ισχύος που προέκυψαν από τη μέθοδο του κεντρικού ελέγχου (επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης τετραγωνικού προγραμματισμού) και τον εξεταζόμενο αλγόριθμο αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης.

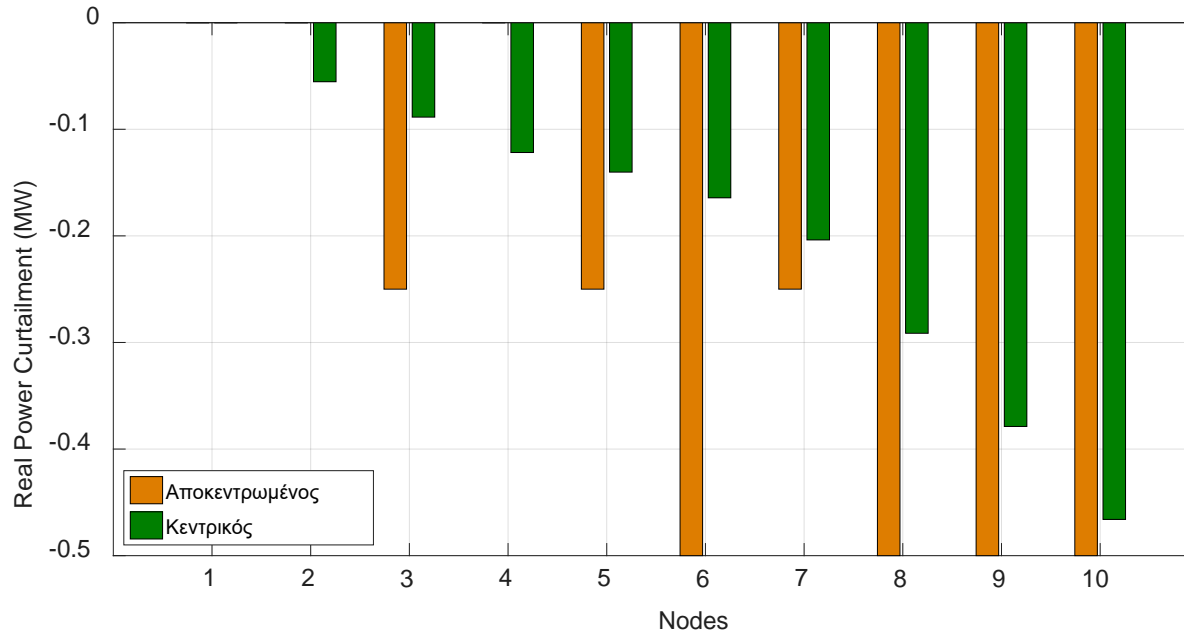
► **50% Φορτίο – 100% Παραγωγή, 5 στάθμες παραγωγής**

Θεωρούμε 50% του ονομαστικού φορτίου και 100% της ονομαστικής ισχύος των μονάδων ΔΠ. Σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3, παρατηρείται πρόβλημα ανύψωσης τάσης των ζυγών φορτίου 2-10.



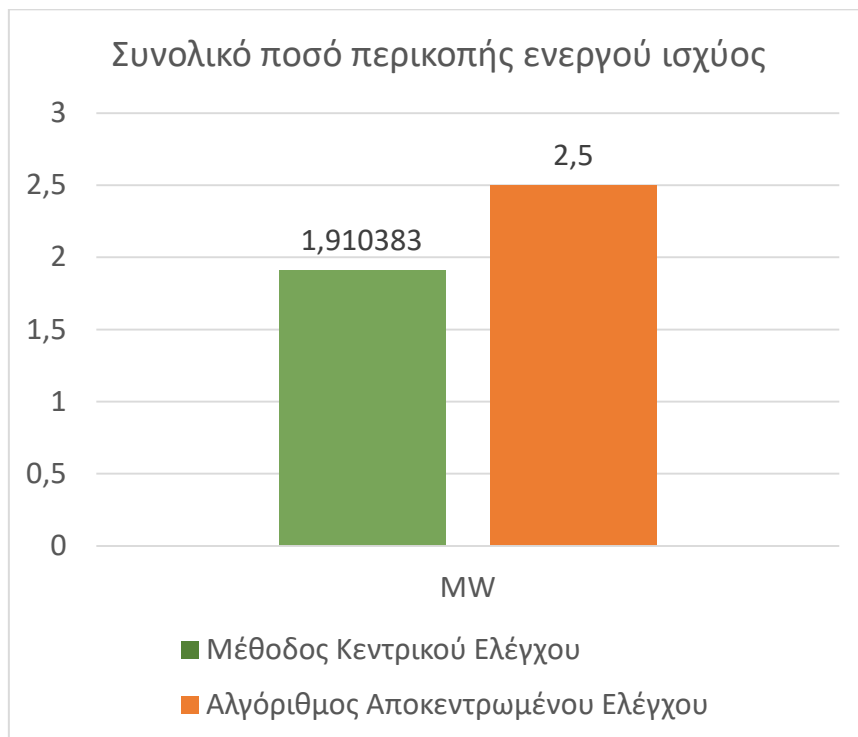
Σχήμα 7.3 Προφίλ τάσης γραμμής τροφοδότησης 10 κόμβων με 50% ονομαστικό φορτίο και 100% παραγωγή

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης σε αυτή την περίπτωση ήταν 22.88 seconds. Στο σχήμα 7.4 φαίνονται τα ποσά περικοπής παραγωγής ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο, όπως προκύπτουν από τις δύο μεθόδους ρύθμισης.



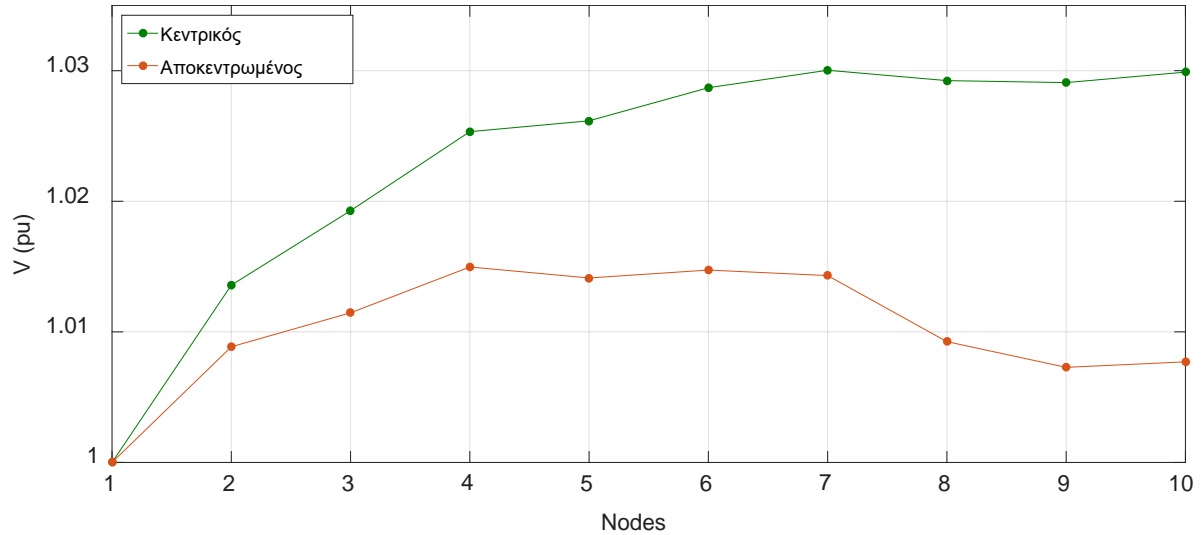
Σχήμα 7.4 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ (5 στάθμες)

Η συνολική μείωση της παραγωγής προκύπτει ίση με -1,910387 MW από την μέθοδο κεντρικού ελέγχου και -2,5 MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα είναι ίσο με 30,86%.



Σχήμα 7.5 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ

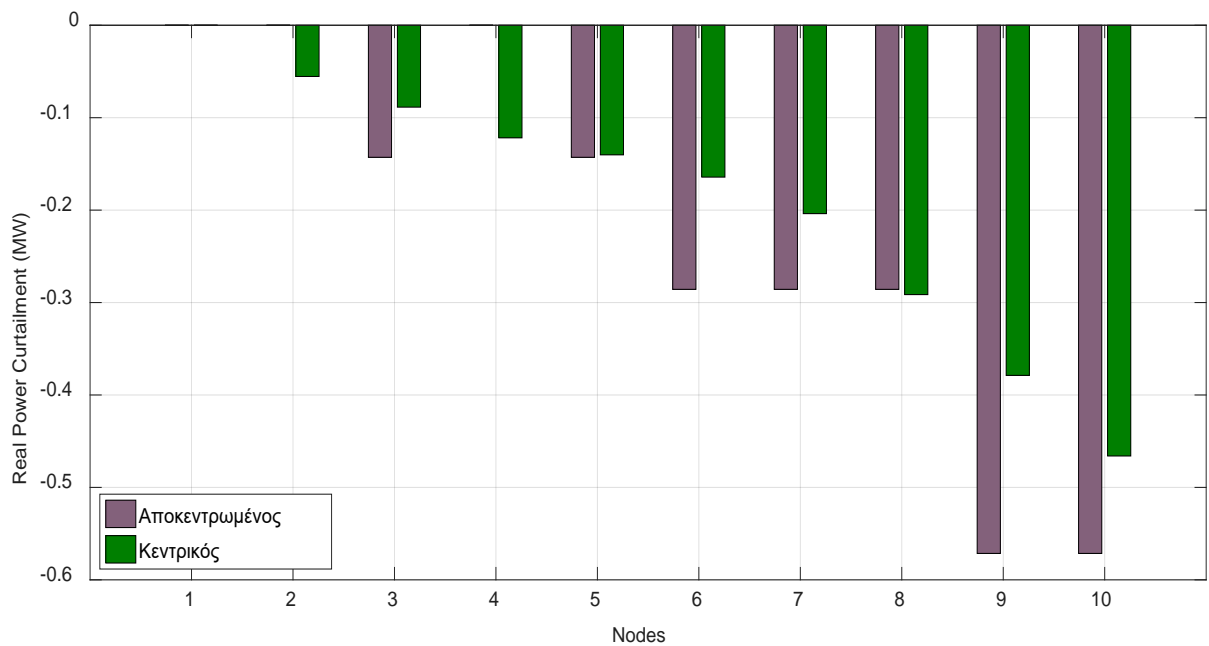
Οι τιμές των τάσεων σε κάθε περίπτωση επανέρχονται μέσα στα όρια και για τους δύο τρόπους επίλυσης. Ωστόσο με τον αποκεντρωμένο έλεγχο προκύπτει μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής των μονάδων και τιμές τάσης πιο κοντά στη μονάδα.



Σχήμα 7.6 Προφίλ τάσης μετά τη διόρθωση του προβλήματος αύξησης τάσης

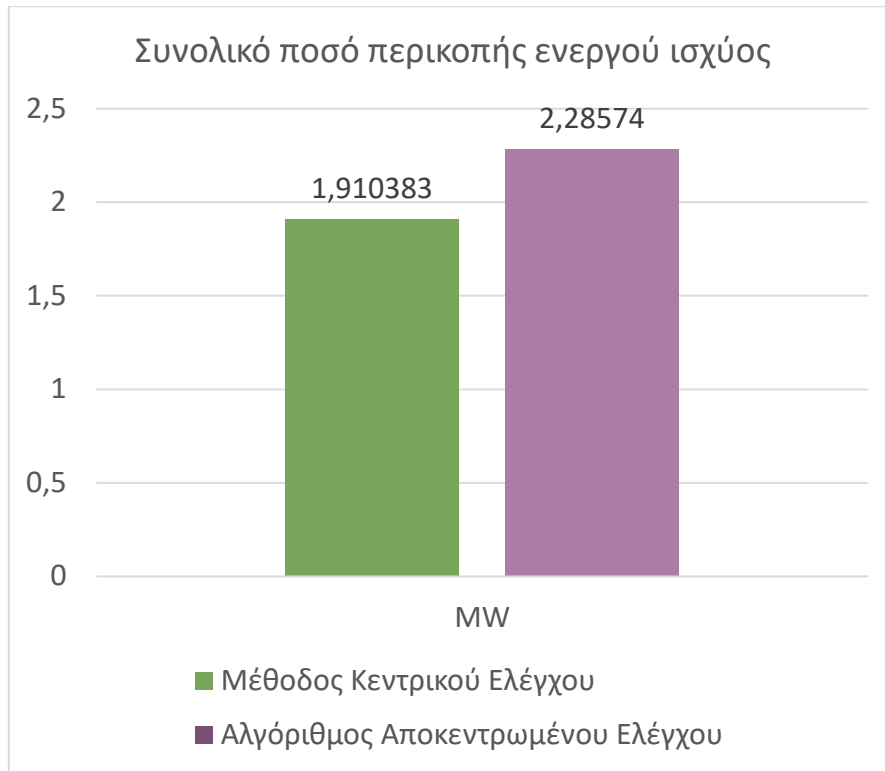
► **50% Φορτίο – 100% Παραγωγή, 8 στάθμες παραγωγής**

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης σε αυτή την περίπτωση ήταν 135.11 seconds. Στο σχήμα 7.7 παρουσιάζεται η αναγκαία ποσότητα περικοπής ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο, που προκύπτει ως λύση από τις δύο μεθόδους ρύθμισης τάσης.

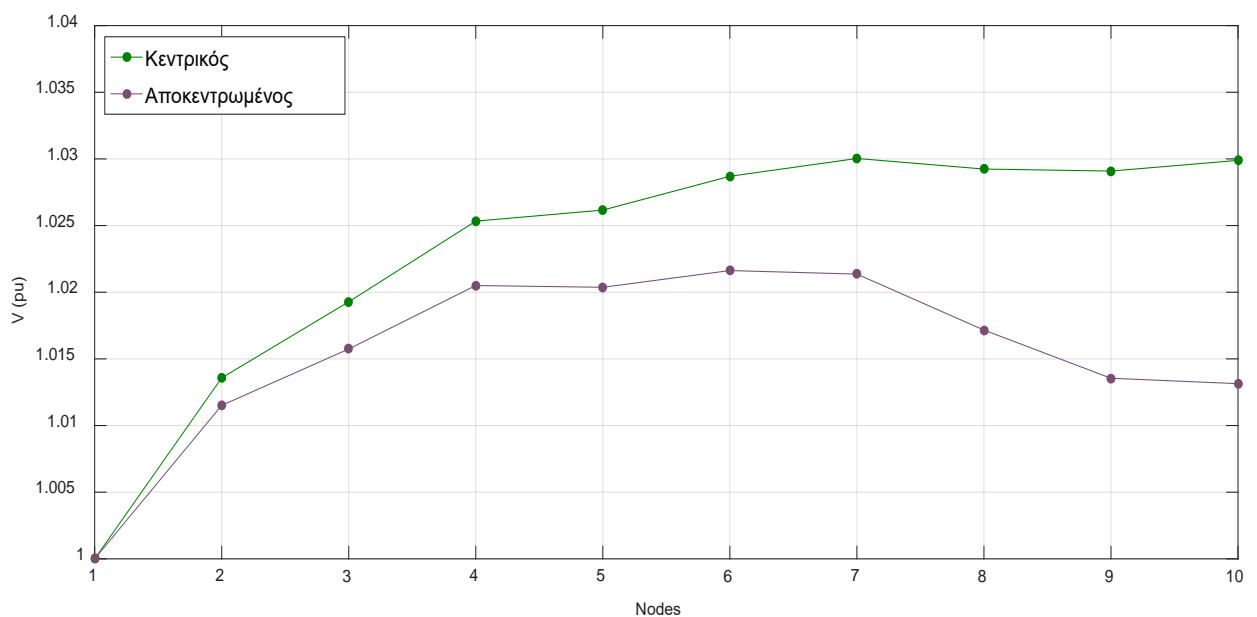


Σχήμα 7.7 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ (8 στάθμες)

Η συνολική μείωση της παραγωγής ισούται με $-2,28574$ MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο στην περίπτωση μονάδων με 8 σημεία λειτουργίας. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα ως προς τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης του κεντρικού ελεγκτή είναι ίσο με 19,65%.



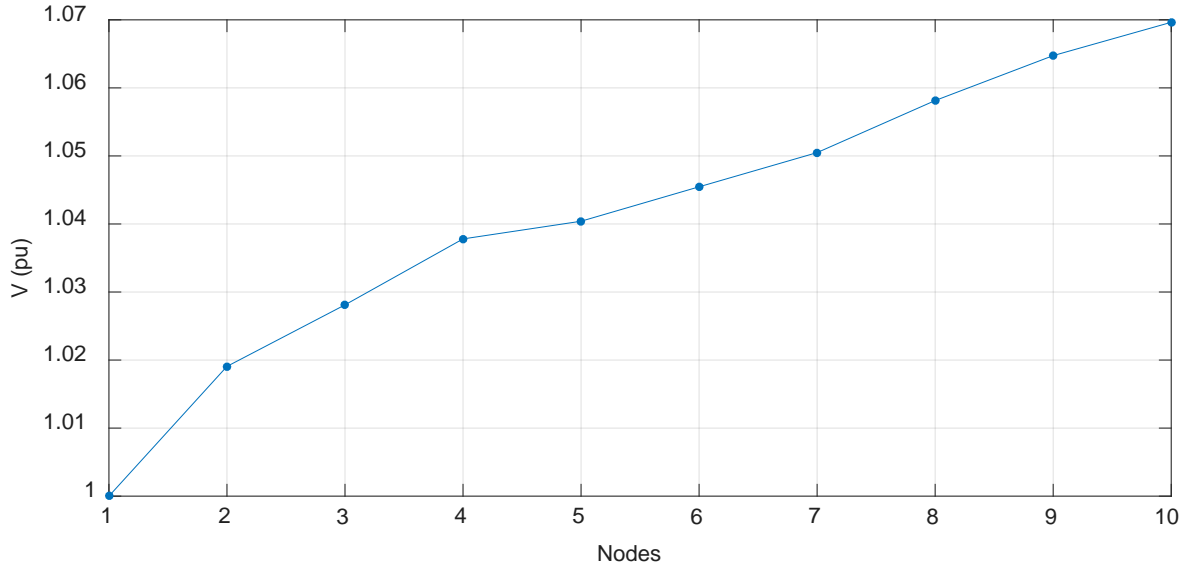
Σχήμα 7.8 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ



Σχήμα 7.9 Προφίλ τάσης μετά τη διόρθωση του προβλήματος

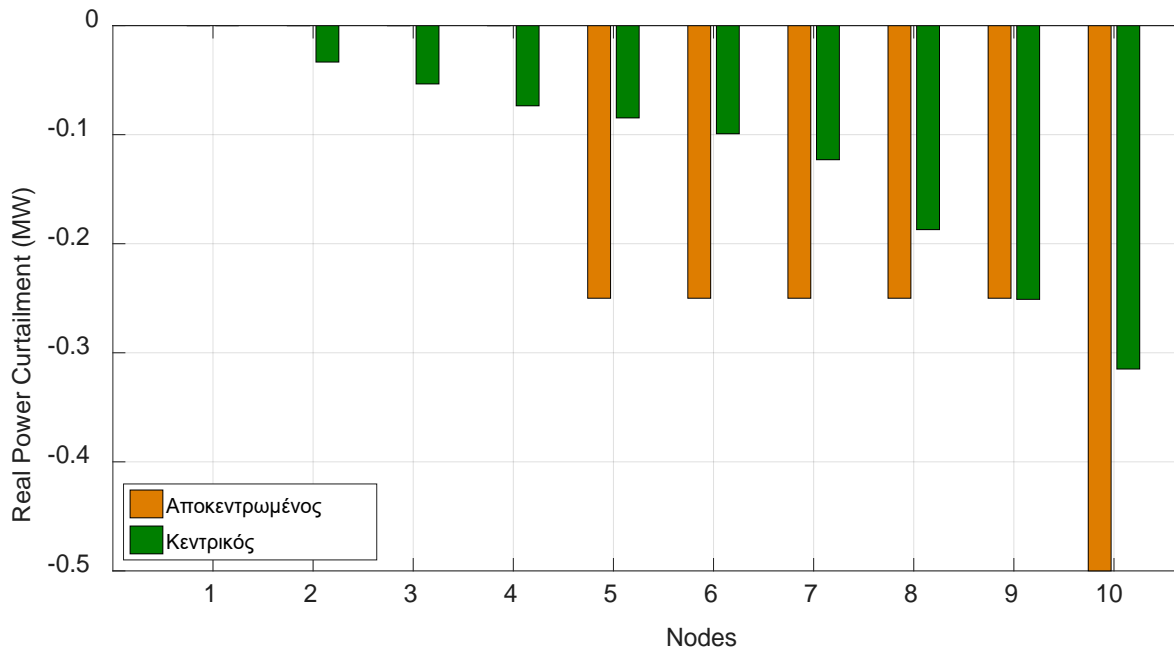
► **60% Φορτίο – 100% Παραγωγή, 5 στάθμες παραγωγής**

Θεωρούμε 50% του ονομαστικού φορτίου και 100% της ονομαστικής ισχύος των μονάδων ΔΠ. Σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10, παρατηρείται πρόβλημα ανύψωσης τάσης των ζυγών φορτίου 4-10.



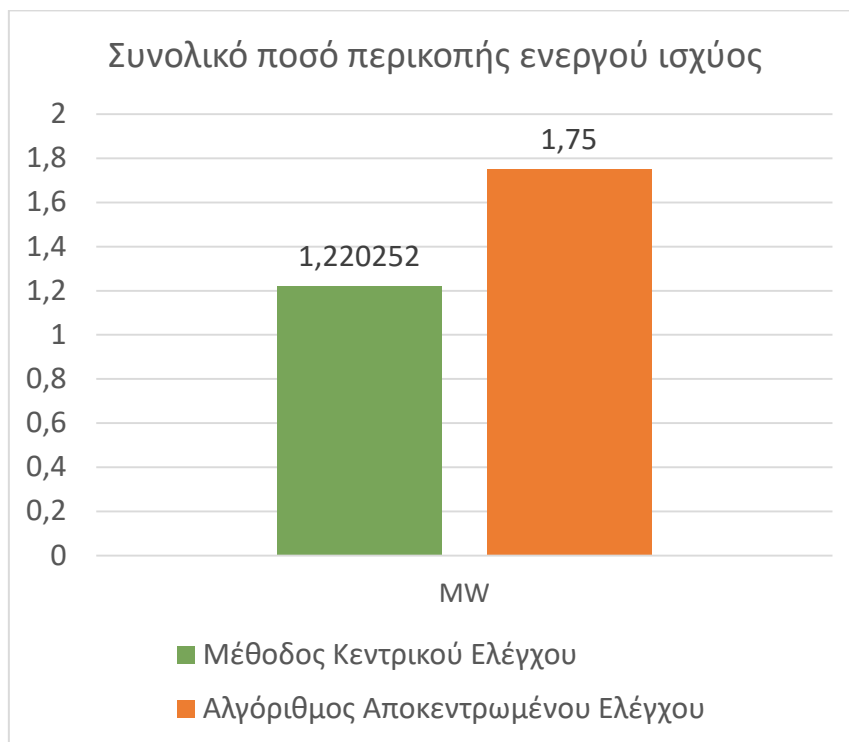
Σχήμα 7.10 Προφίλ τάσης γραμμής τροφοδότησης 10 κόμβων με 60% ονομαστικό φορτίο και 100% παραγωγή

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης σε αυτή την περίπτωση ήταν 24.54 seconds. Στο σχήμα 7.11 φαίνονται τα ποσά περικοπής παραγωγής ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο, όπως προκύπτουν από τις δύο μεθόδους ρύθμισης.

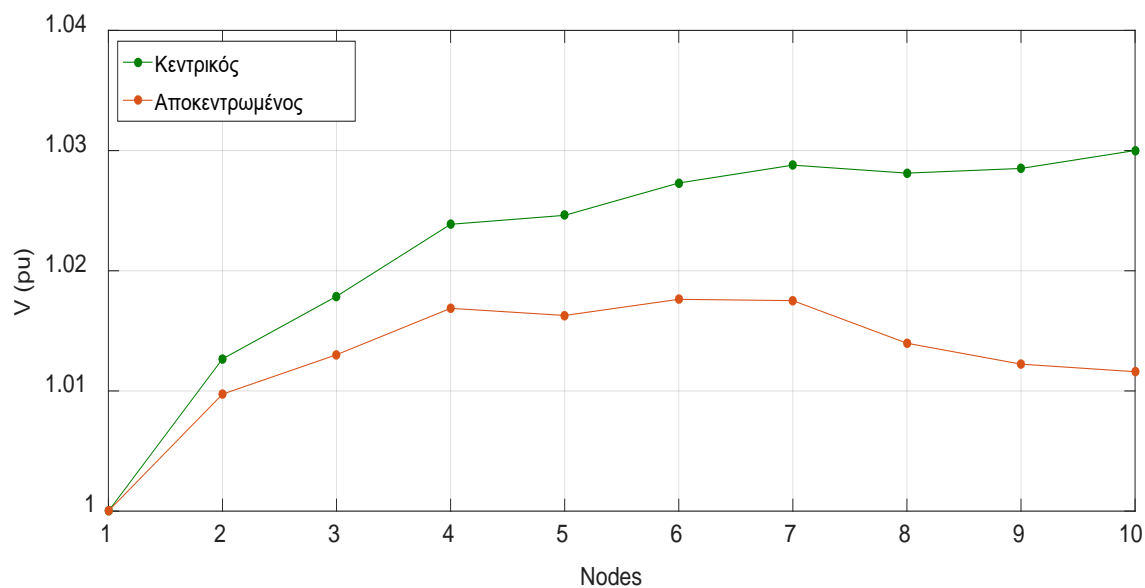


Σχήμα 7.11 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ (5 στάθμες)

Η συνολική μείωση της παραγωγής προκύπτει ίση με -1.220252 MW από την μέθοδο κεντρικού ελέγχου και -1,75 MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα είναι ίσο με 43,41%.



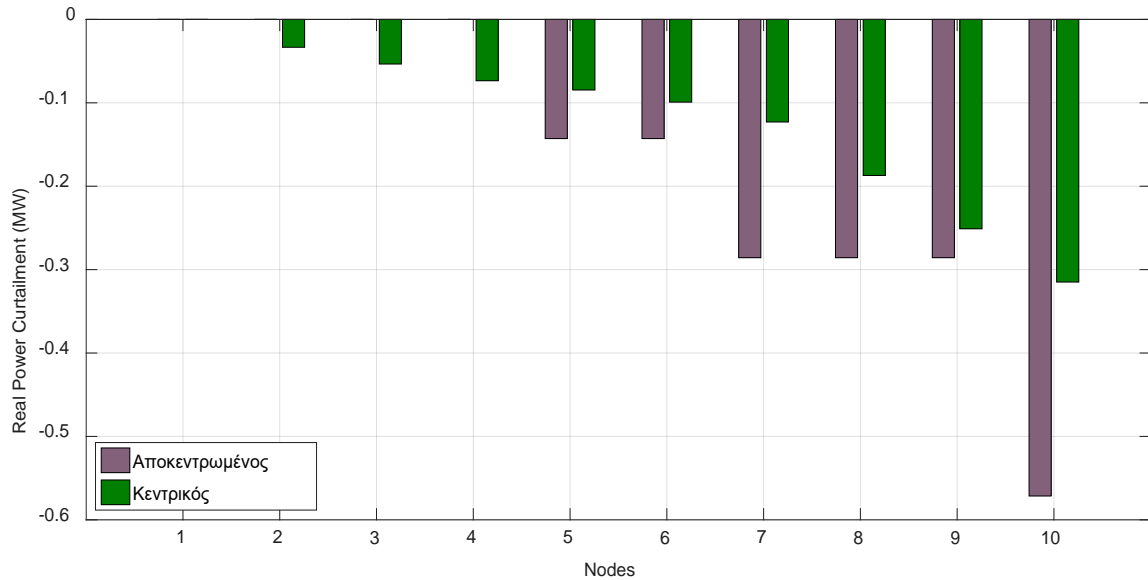
Σχήμα 7.12 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ



Σχήμα 7.13 Προφίλ τάσης μετά τη διόρθωση του προβλήματος ανύψωσης τάσης

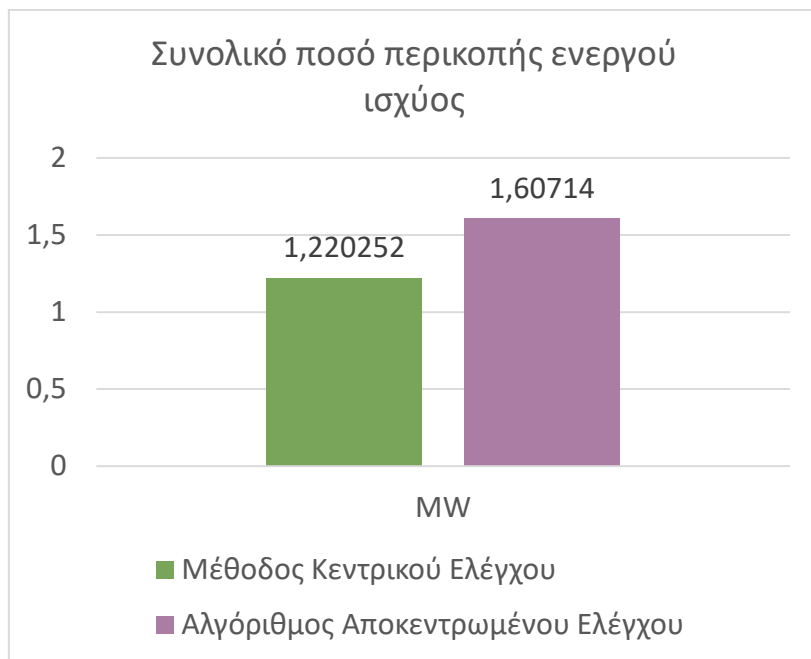
► **60% Φορτίο – 100% Παραγωγή, 8 στάθμες παραγωγής**

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης σε αυτή την περίπτωση ήταν 133.16 seconds. Στο σχήμα 7.14 φαίνονται τα ποσά περικοπής παραγωγής ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο, όπως προκύπτουν από τις δύο μεθόδους ρύθμισης.

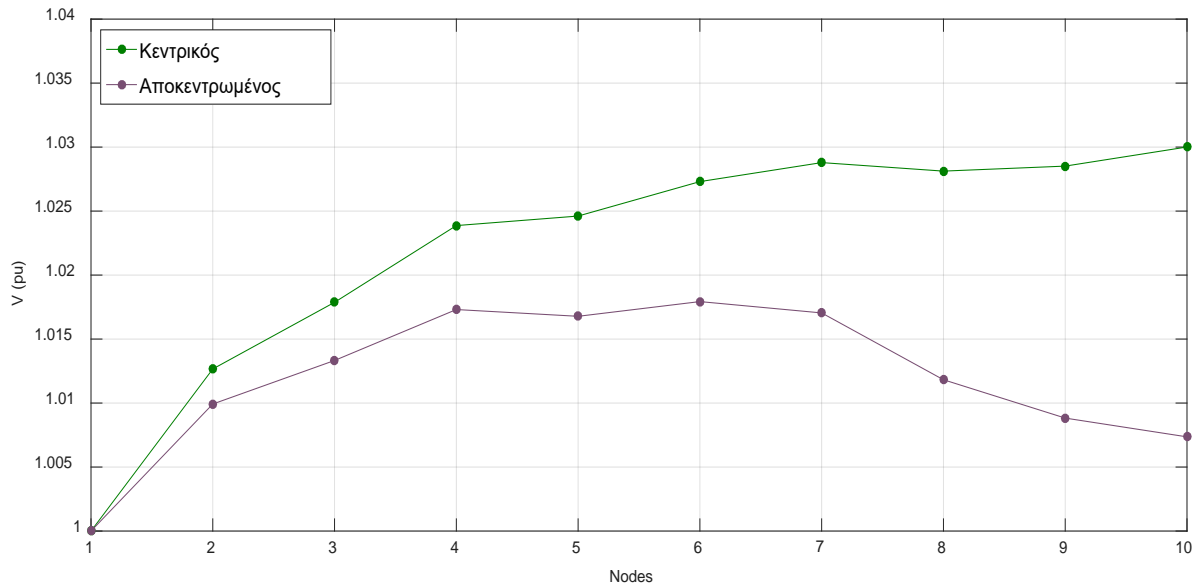


Σχήμα 7.14 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ (8 στάθμες)

Η συνολική μείωση της παραγωγής ισούται με -1,60714 MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο στην περίπτωση μονάδων με 8 σημεία λειτουργίας. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα ως προς τη λύση του κεντρικού ελέγχου ισούται με 31,71%.



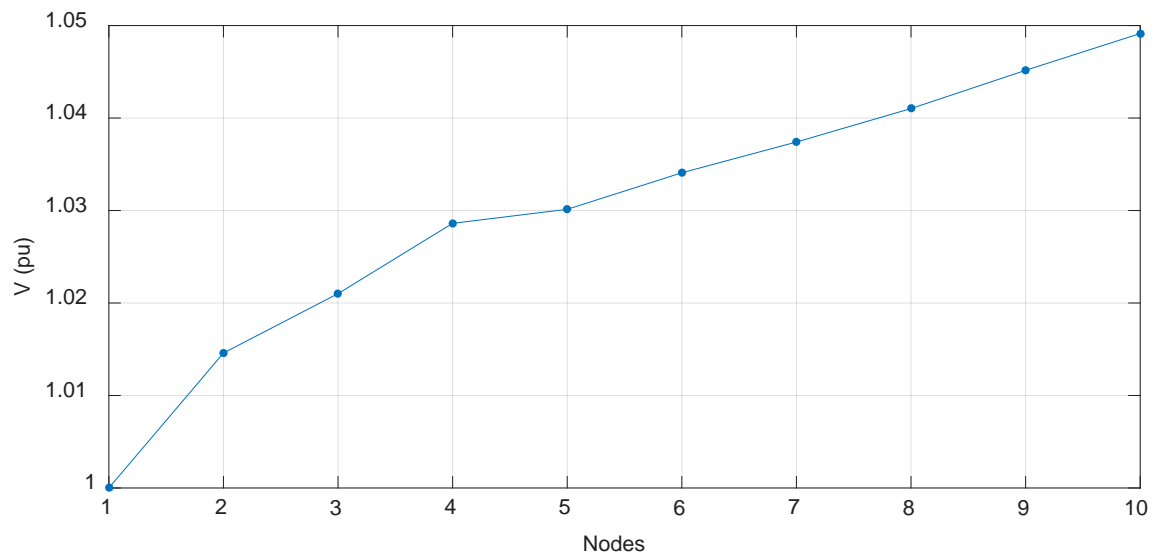
Σχήμα 7.15 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ



Σχήμα 7.16 Προφίλ τάσης μετά τη διόρθωση του προβλήματος ανύψωσης τάσης

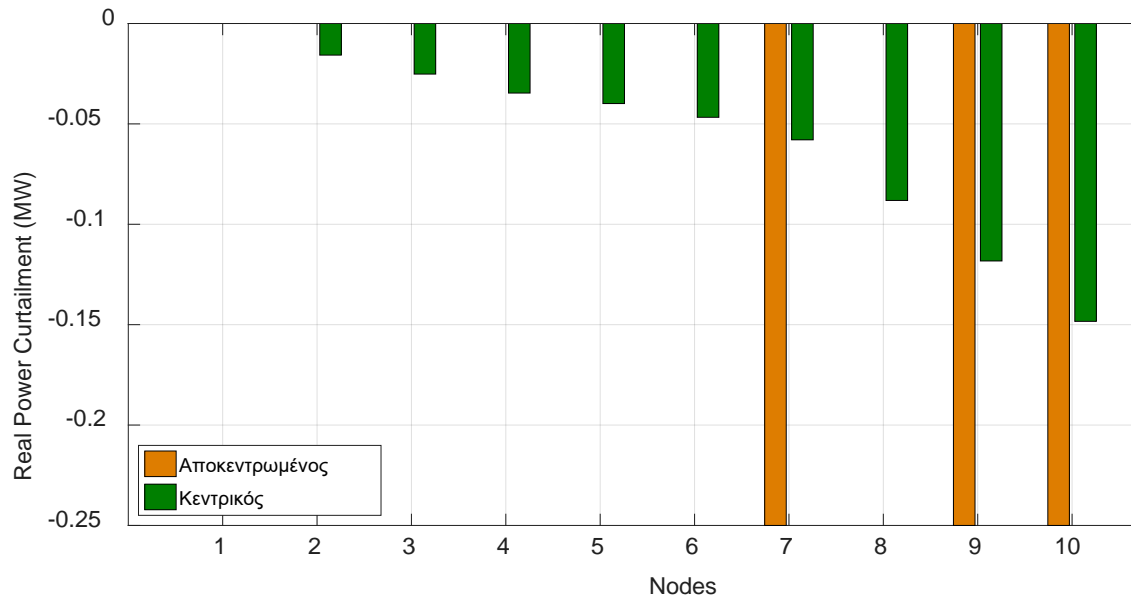
► **70% Φορτίο – 100% Παραγωγή, 5 στάθμες παραγωγής**

Επιπλέον, εξετάζουμε την περίπτωση 70% του ονομαστικού φορτίου και 100% της ονομαστικής ισχύος των μονάδων ΔΠ. Για αυτές τις συνθήκες, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.17, παρατηρείται πρόβλημα ανύψωσης τάσης των ζυγών φορτίου 6-10.



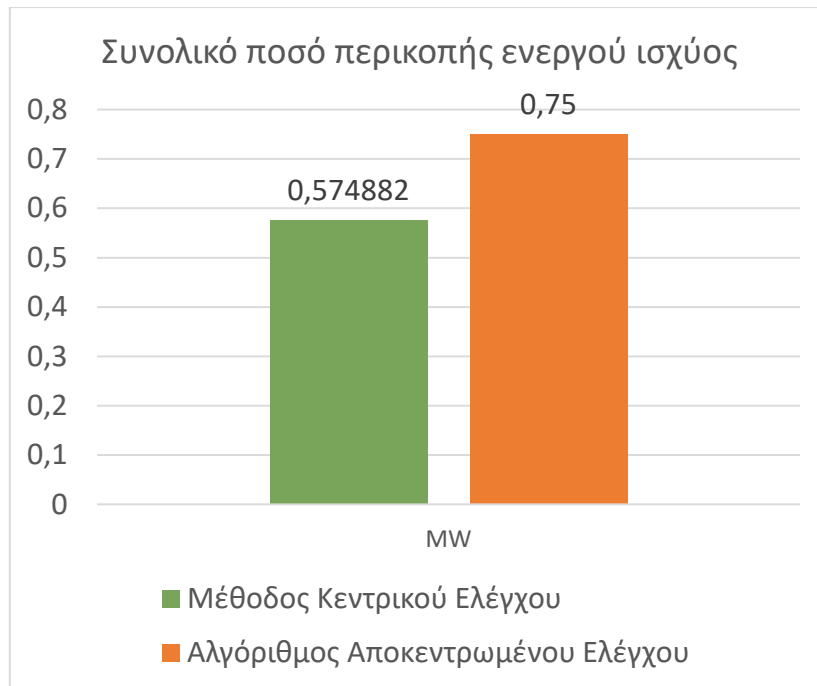
Σχήμα 7.17 Προφίλ τάσης γραμμής τροφοδότησης 10 κόμβων με 70% ονομαστικό φορτίο και 100% παραγωγή

Ο χρόνος εκτέλεσης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου ήταν 131.95 seconds. Στο σχήμα 7.18 φαίνονται οι απαιτούμενες τιμές περικοπής ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο, για καθεμιά από τις δύο μεθόδους ρύθμισης.

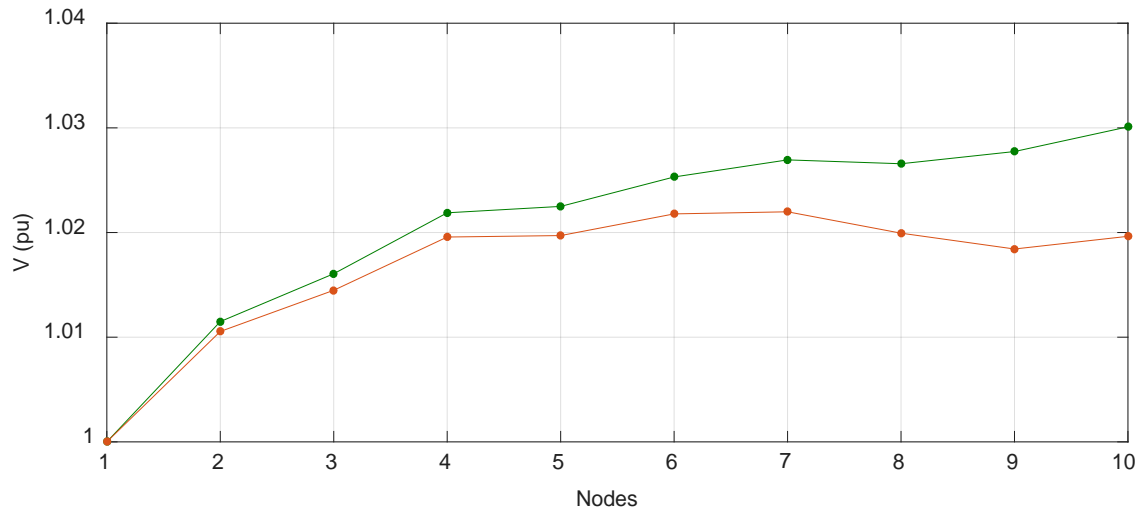


Σχήμα 7.18 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ (5 στάθμες)

Η συνολική μείωση της παραγωγής προκύπτει ίση με -0,574882 MW από την μέθοδο κεντρικού ελέγχου και -0,75 MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα είναι ίσο με 30,46%.



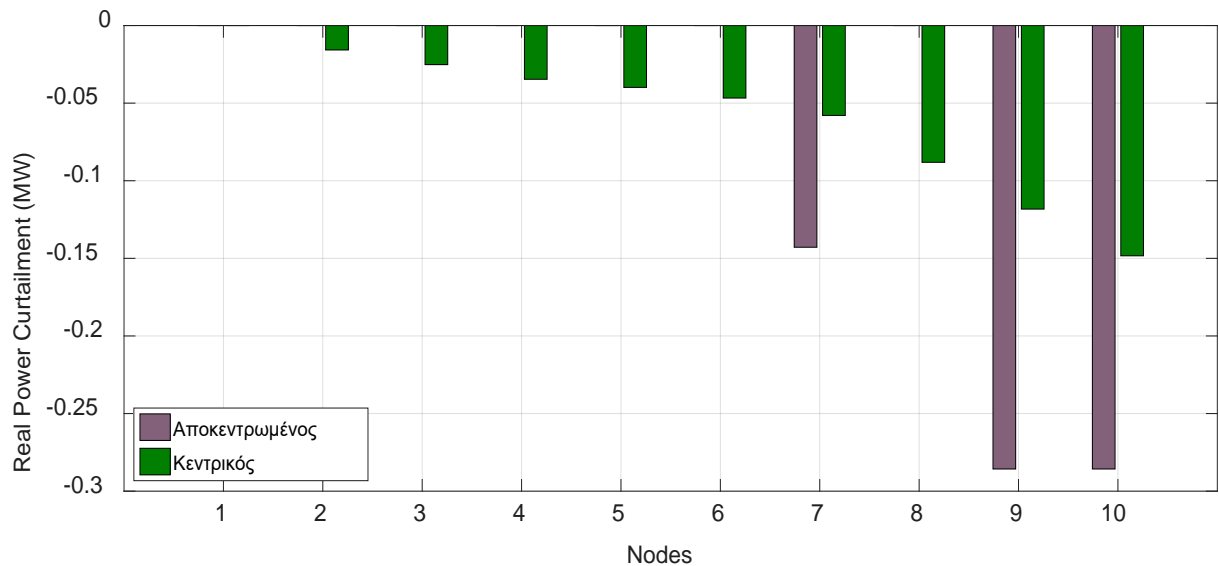
Σχήμα 7.19 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ



Σχήμα 7.20 Προφίλ τάσης μετά τη διόρθωση του προβλήματος

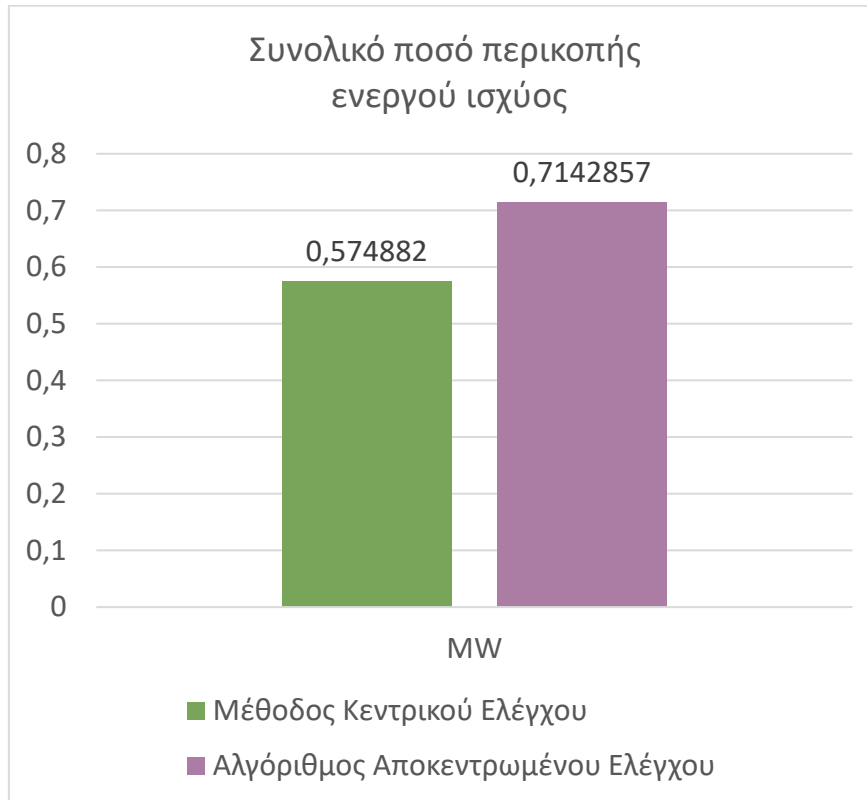
► **70% Φορτίο – 100% Παραγωγή, 8 στάθμες παραγωγής**

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης σε αυτή την περίπτωση ήταν 117.78 seconds. Στο σχήμα 7.21 φαίνονται τα ποσά περικοπής παραγωγής ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο, για τον αποκεντρωμένο αλγόριθμο και τον κεντρικό έλεγχο της τάσης.



Σχήμα 7.21 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ (8 στάθμες)

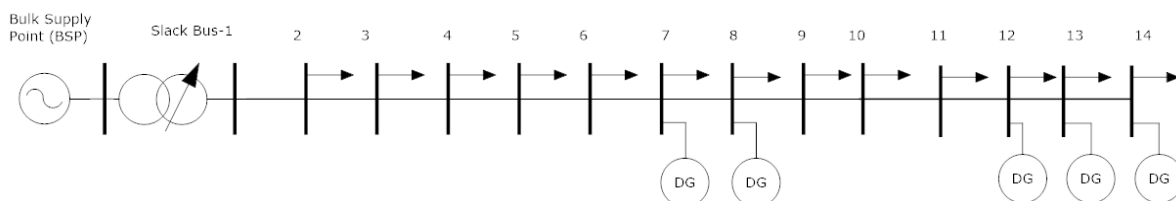
Η συνολική περικοπή στην περίπτωση $-0,7142857$ MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο στην περίπτωση μονάδων με 8 σημεία λειτουργίας. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα ως προς τη λύση του κεντρικού ελέγχου ισούται με 24,24%.



Σχήμα 7.22 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ

7.3 Προσομοίωση δικτύου 14 κόμβων

Ένα άλλο παράδειγμα γραμμής τροφοδότησης ΜΤ στην οποία θα εφαρμοσθεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποκεντρωμένης ρύθμισης, αποτελείται από 14 ζυγούς (σχήμα 7.23). Περιλαμβάνει 13 φορτία καταναλωτών και 5 συνδεδεμένες μονάδες ΔΠ στους ζυγούς 7,8,12,13,14. Η βάση τάσεως είναι τα 12,66 kV και η βάση ισχύος τα 5 MVA.



Σχήμα 7.23 Παράδειγμα δικτύου ΜΤ 14 κόμβων

Όλες οι γεννήτριες (DGs) και παράγουν μέγιστη ισχύ ίση με 2 MW. Οι δυνατές καταστάσεις λειτουργίας τους, στις οποίες μπορεί να καταλήξουν σύμφωνα με την εντολή του πράκτορα που ελέγχει την καθεμία, είναι $\{0, 0.5, 1, 1.5, 2\}$ MW. Για τις τιμές των τάσεων, απαιτούμε να βρίσκονται στο διάστημα $[0.97, 1.03]$ p.u.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα στοιχεία των γραμμών και της κατανάλωσης των φορτίων σε κάθε ζυγό.

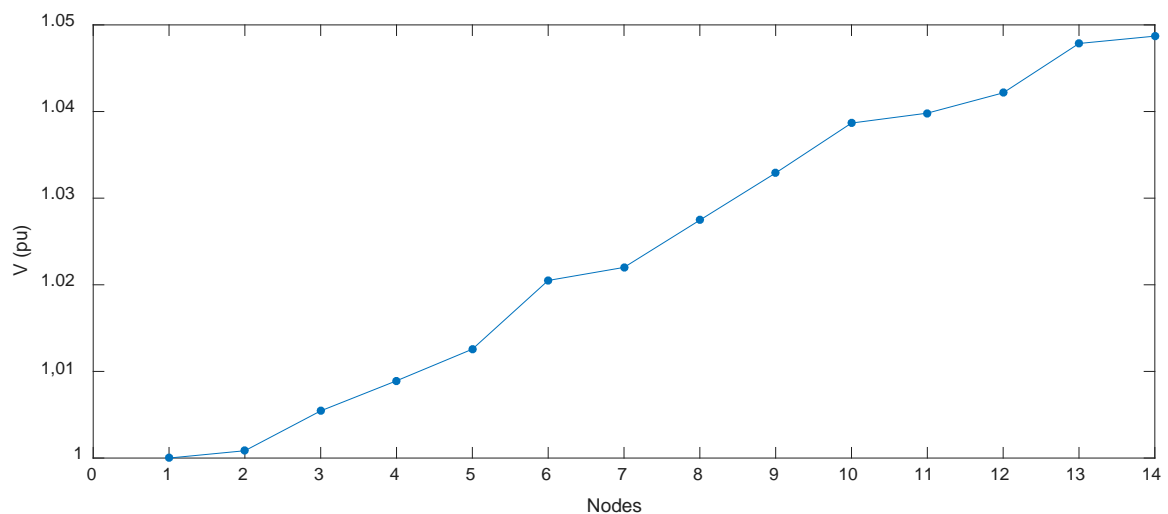
Πίνακας 7.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών

Κλάδος	Ωμική αντίσταση r (pu)	Επαγωγική αντίδραση x (pu)
1-2	0.0922	0.0470
2-3	0.4930	0.2511
3-4	0.3660	0.1864
4-5	0.3811	0.1941
5-6	0.8190	0.7070
6-7	0.1872	0.6188
7-8	0.7114	0.2351
8-9	1.0300	0.7400
9-10	1.0440	0.7400
10-11	0.1966	0.0650
11-12	0.3744	0.1238
12-13	1.4680	1.1550
13-14	0.5416	0.7129

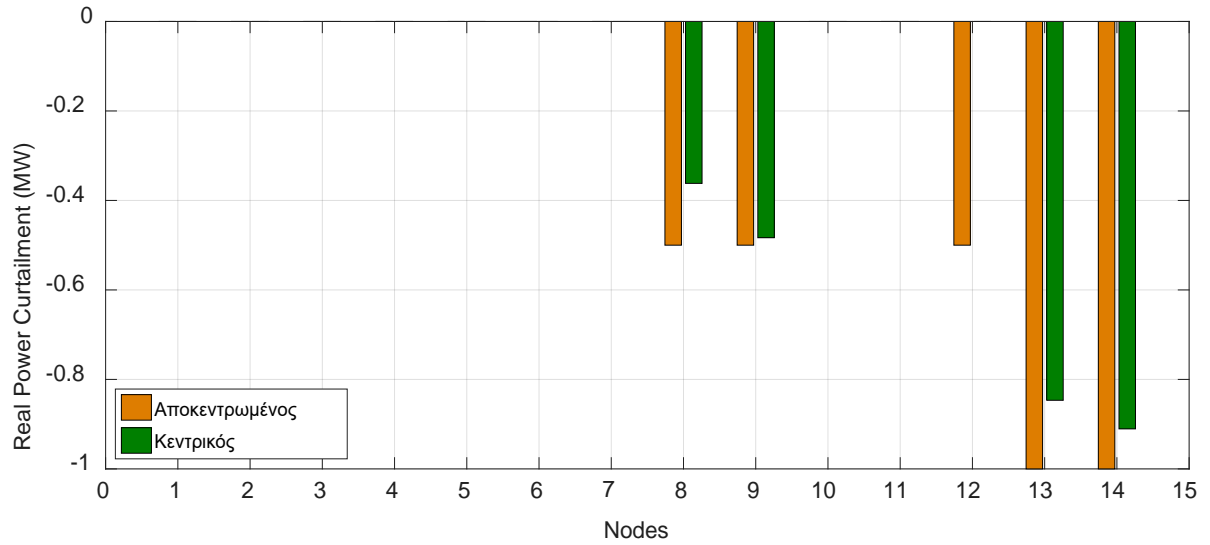
Πίνακας 7.4 Δεδομένα φορτίων και συνολικής κατανάλωσης ζυγών

Ζυγός	κατανάλωση φορτίου P_L (MW)	Συνολική κατανάλωση P_L-P_G (MW)
1	-	-
2	0.1	0.1
3	0.09	0.09
4	0.02	0.02
5	0.06	0.06
6	0.06	0.06
7	0.1	-1.9
8	0.1	-1.9
9	0.16	0.16
10	0.16	0.16
11	0.345	0.345
12	0.06	-1.94
13	0.06	-1.94
14	0.58	-1.42

Το προφίλ τάσης του δικτύου στις συνθήκες μέγιστης παραγωγής και μέγιστου φορτίου, φαίνεται στο σχήμα 7.24. Επειδή τα μεγέθη της παραγωγής είναι σχετικά μεγαλύτερα από τα τοπικά φορτία και έχουμε αντίστροφη ροή ισχύος (προς το ανάντη δίκτυο), παρατηρούμε τιμές τάσης άνω του 1,03 p.u.

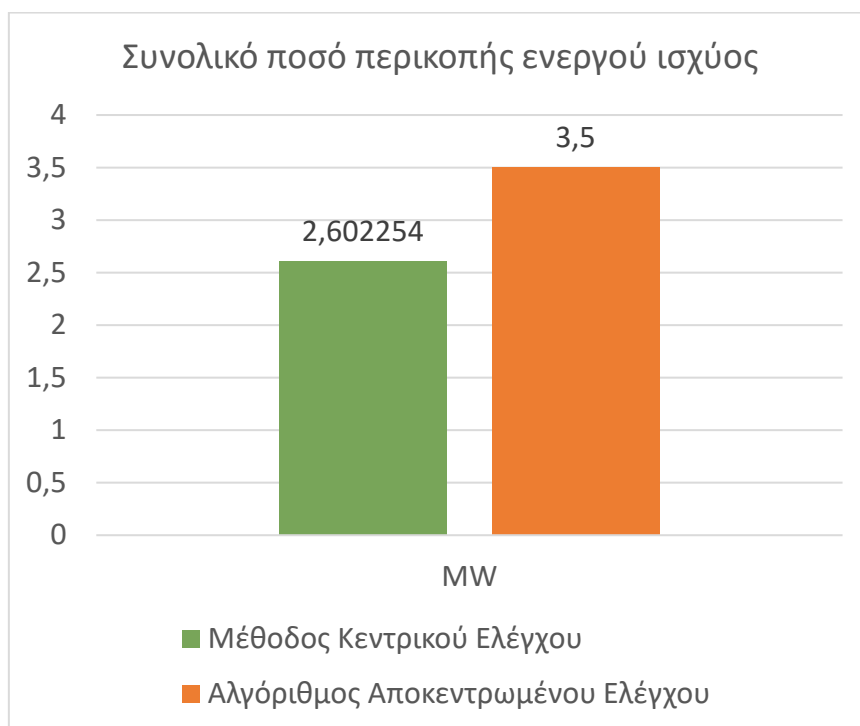


Σχήμα 7.24 Προφίλ τάσης γραμμής τροφοδότησης σε ονομαστικές συνθήκες

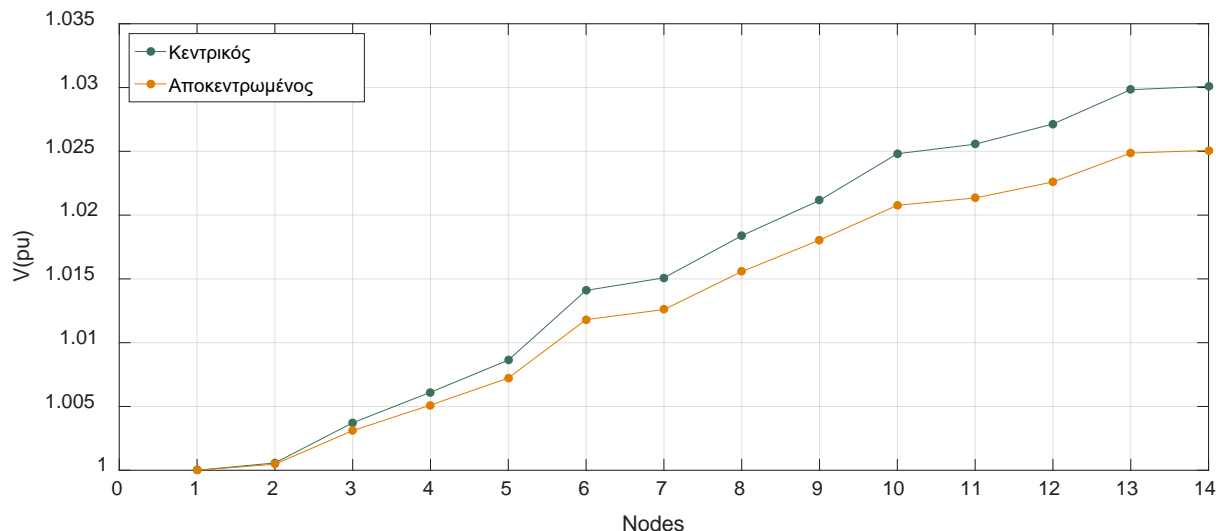


Σχήμα 7.25 Απαιτούμενη ποσότητα περικοπής ισχύος μονάδων ΔΠ

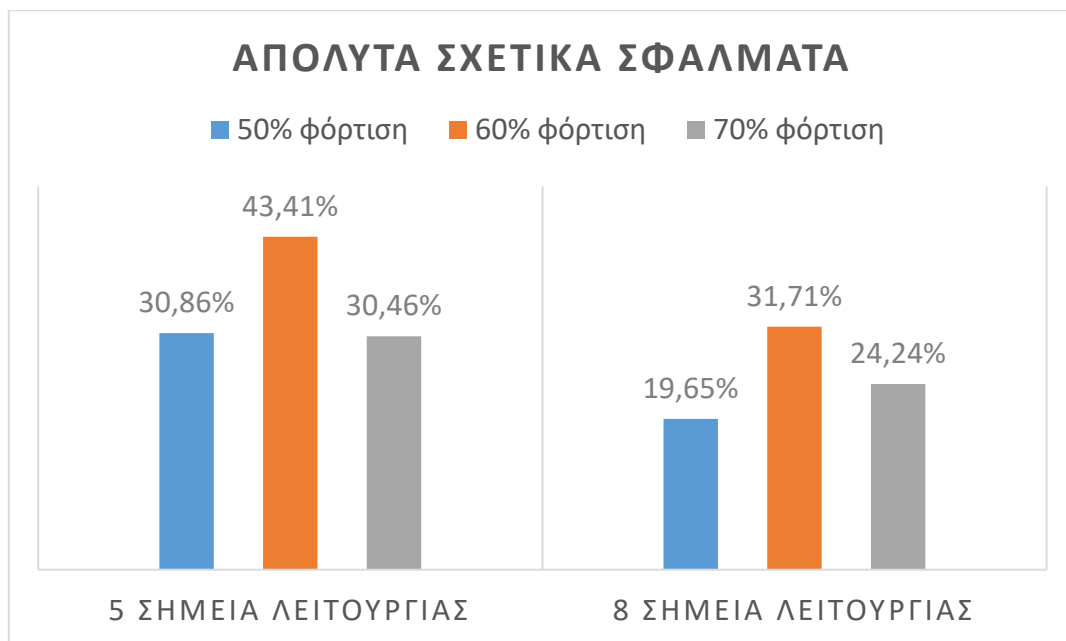
Η συνολική μείωση της παραγωγής προκύπτει ίση με -2,602254 MW από την μέθοδο κεντρικού ελέγχου και -3,5 MW από τον αποκεντρωμένο έλεγχο. Το απόλυτο σχετικό σφάλμα είναι ίσο με 34,5%.



Σχήμα 7.26 Σύγκριση συνολικής περικοπής μονάδων ΔΠ



Σχήμα 7.27 Προφίλ τάσης μετά τη διόρθωση του προβλήματος ανύψωσης τάσης



Σχήμα 7.28 Σύγκριση σφαλμάτων στις διάφορες περιπτώσεις για το δίκτυο 10 κόμβων

7.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αποκεντρωμένου αλγορίθμου, σε όλες τις περιπτώσεις πετυχαίνουμε διόρθωση των τάσεων κάθε προηγούμενος προβληματικού κόμβου, αλλά με επιπλέον περικοπή παραγωγής ενεργού σε ποσοστά από 20-40%.

Η αύξηση των δυνατών σημείων λειτουργίας (πλήθος στάθμεων παραγωγής των DG) φαίνεται πως επιφέρει βελτιωμένα αποτελέσματα. Ωστόσο, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος αυξάνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με την αύξηση του αριθμού των σημείων λειτουργίας των γεννητριών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Σύνοψη της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου (τροποποίηση του αλγορίθμου DYDOP όπως αναφέρεται στο Κεφ. 6) με σκοπό την αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της μεγάλης διείσδυσης μονάδων ΔΠ στα δίκτυα διανομής. Η συγκεκριμένη αποκεντρωμένη μέθοδος ρύθμισης βασίζεται στη θεωρία των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων (MAS) και την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των πρακτόρων, τους παράγοντες ευαισθησίας της τάσης ως προς τη ροή ισχύος και τις συναρτήσεις κόστους ισχύος και τάσης μέσω των οποίων εκφράζονται οι ανισωτικοί περιορισμοί για τα μέτρα των τάσεων.

Αρχικά περιγράφηκαν τα χαρακτηριστικά των διαφόρων μονάδων ΔΠ που συνδέονται στη ΜΤ και ΧΤ, τα πλεονεκτήματα από τη διείσδυσή τους στο δίκτυο αλλά και τα προβλήματα που προκαλούν. Αναφέρθηκε επίσης η ανάγκη για μεταβολή του χαρακτήρα των δικτύων σε «ευφυή» δίκτυα με τη χρήση ψηφιακής τεχνολογίας, όπως π.χ. τα συστήματα MAS.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε η θεωρία ανάλυσης των παραγόντων ευαισθησίας τάσης ως προς τις μεταβολές ισχύος των ζυγών του συστήματος. Παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού των παραγόντων από την Ιακωβιανή μήτρα και επίσης 4 προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογισμού που μπορούν να εφαρμοσθούν σε δίκτυα ΜΤ ακτινικής τοπολογίας. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB και το πακέτο MATPOWER, υπολογίστηκαν όλοι οι πίνακες ευαισθησίας για το τροποποιημένο δίκτυο IEEE 13-node test feeder, ώστε να επαληθεύσουμε τους προσεγγιστικούς τύπους. Από τα σχετικά αποτελέσματα (που παρατίθενται στο Κεφ. 4) προέκυψε ότι οι τιμές των 3 από τις 4 προσεγγιστικών μεθόδων παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια με απόλυτο σχετικό σφάλμα κάτω από 1%.

Έπειτα παρουσιάστηκαν και έγινε σύγκριση μεταξύ τριών αρχιτεκτονικών ελέγχου που εφαρμόζονται ήδη στα δίκτυα διανομής ή αποτελούν ερευνητικό αντικείμενο. Συγκεκριμένα, αυτοί είναι ο κεντρικός έλεγχος (Centralized Control), ο αποκεντρωμένος έλεγχος (Decentralized/ Distributed Control) και ο υβριδικός (Hybrid Control). Επίσης, εφαρμόστηκε ο κεντρικός έλεγχος τάσης σε ένα παράδειγμα ακτινικού δικτύου, επιλύοντας το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με στόχο την ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των DG, υπό ανισωτικούς περιορισμούς για τα μέτρα τάσεων.

Ακολουθως, ορίστηκαν οι συναρτήσεις κόστους ισχύος και τάσεως που χρησιμοποιούνται στον προτεινόμενο αλγόριθμο, με σκοπό τη συσχέτιση των μεγεθών της περικοπόμενης ισχύος και του μέτρου τάσης ενός ζυγού. Για την υλοποίηση του αλγορίθμου θεωρούμε την ύπαρξη ευφών πρακτόρων σε κάθε κόμβο, με δυνατότητα αποστολής μηνυμάτων στους γείτονές τους και τη λήψη ηλεκτρικών μετρήσεων από το δίκτυο. Για κάθε δυνατό συνδυασμό ποσοτήτων περικοπής ενεργού ισχύος σε έναν κόμβο, που προκύπτουν από τον ίδιο και όλες τις κατάντη συνδεδεμένες DG, υπολογίσθηκαν όλες οι καταστάσεις του μέτρου τάσης του ίδιου κόμβου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε μία από τις προαναφερθείσες προσεγγιστικές μεθόδους υπολογισμού ευαισθησιών. Μία τιμή κόστους αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις καταστάσεις τάσης και έτσι πρέπει να επιλεγεί το ελάχιστο από αυτά. Αυτή η ιδανική τιμή κόστους σχετίζεται με ένα συνολικό ποσό περικοπής ενεργού ισχύος και αυτό αποτελεί την απαίτηση (κατάντη και του ίδιου περικοπής) του παρόντος κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα ιδανικά σημεία λειτουργίας της παραγόμενης ενεργού ισχύος από κάθε DG.

Για συνθήκες χαμηλής φόρτισης σε 2 γραμμές τροφοδότησης με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και την εφαρμογή ελέγχου με τη χρήση του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου, μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου σε σχέση με τη λύση που προκύπτει από τον κεντρικό έλεγχο. Συγκεκριμένα, επιτεύχθηκε επαναφορά των τάσεων όλων των ζυγών εντός των επιβληθέντων ορίων $\pm 3\%$, ωστόσο τα απαιτούμενα ποσά περικοπής ήταν αυξημένα σε ποσοστά της τάξης του 30%.

Το σφάλμα εν μέρει οφείλεται στη μορφή της συνάρτησης κόστους τάσης, η οποία δεν είναι ακριβώς μηδενική για λειτουργία εντός ορίων και απαιτεί τιμές πολύ κοντά στη μονάδα. Επιπλέον, η αύξηση της ακρίβειας μπορεί να επιτευχθεί με τη δυνατότητα μικρότερων μεταβολών του σημείου λειτουργίας παραγωγής ενεργού ισχύος των DG.

8.2 Προοπτικές συνέχισης

Το πρόβλημα της πολυπλοκότητας και του μεγάλου χρόνου εκτέλεσης που προκύπτει από αυτή την αλλαγή, πρέπει να εξετασθεί και να διερευνηθεί σε ποιες περιπτώσεις μπορούμε να διαγράψουμε περιττά στοιχεία από τα διανύσματα που μεταδίδονται ως στοιχεία των μηνυμάτων κόστους και ισχύος.

Μια προοπτική για τη βελτίωση θα ήταν η διερεύνηση μιας πιο αποδοτικής ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των πρακτόρων. Επίσης αξίζει να μελετηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου σε ασύμμετρη τριφασική μοντελοποίηση του δικτύου διανομής.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εισαγωγή της μεταβλητής της αέργου ισχύος ως δεύτερου παράγοντα ρύθμισης της τάσης. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με παρόμοια διαδικασία, κάνοντας χρήση των παραγόντων ευαισθησίας. Η ακρίβεια του αλγορίθμου σε αυτή την περίπτωση αναμένεται να βελτιωθεί σημαντικά.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2006
- [2] T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder, “Distributed Generation: a definition,” Electric Power Systems Research, 2001
- [3] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., D’haeseleer W., Belmans R., “Distributed generation: definition, benefits and issues”, Energy Policy In Press, 2003
- [4] ΔΕΗ Ανανεώσιμες <http://www.ppcr.gr>
- [5] W. El-Khattam, M.M.A. Salama “Distributed generation technologies, definitions and benefits”, Electric Power Systems Research, 2004
- [6] “Assessment of Distributed Generation Technology Applications”, Resource Dynamics Corporation, 2001
- [7] Rob van Gerwent, “Distributed Generation and Renewables”, 8.1 Introduction, Power Quality and Utilisation Guide, November 2006
- [8] G. P. Harrison, A. Piccolo, P. Siano, A. R. Wallace, “Hybrid GA and OPF evaluation of networks capacity for distributed generation connections”, Electric Power System Research
- [9] <http://www.sher-tech.com>
- [10] <http://www.dg.history.vt.edu/ch1>
- [11] <http://www.usaoilandgasmonitor.com>
- [12] Ι. Κλ. Καλδέλλης, “Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας”, 2005
- [13] Μ. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1997
- [14] Κ. Δέρβος, “Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2009
- [15] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) <http://www.cres.gr>
- [16] Γ. Πιερή, “Η επίδραση των διαφορετικών πολιτικών λειτουργίας στα μεγέθη ενός μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π, Αθήνα, Ιούλιος 2012
- [17] Α. Ζίγκηρη, “Βέλτιστη διαστασιολόγηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με τη χρήση υβριδικής PSO και βέλτιστης ροής φορτίου”, Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π, Αθήνα, Ιούλιος 2012
- [18] Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) <http://www.deddie.gr>
- [19] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, H. R. Pota, “Analysis of Voltage Rise Effect on Distribution Network with Distributed Generation”
- [20] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2008
- [21] Π. Γεωργιλάκης, “Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας” Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015

- [22] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1994
- [23] “Radial Distribution Test Feeders, Distribution System Analysis Subcommittee Report”
- [24] Β. Παπαδιάς, “Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος ΙΙ Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1993
- [25] Α. Ojeda, “A Load Shedding Scheme for Inverter Based Microgrids”, MIT 2010
- [26] “Radial Distribution Test Feeders”, IEEE Distribution Planning Working Group Report
- [27] G. Andersson, “Modelling and Analysis of Electric Power Systems”, ETH Zurich, 2008
- [28] Β.Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1985
- [29] Κ. Κότσαλος, “Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση ΔΠ”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015
- [30] P. H. Nguyen, J. M. A. Myrzik, W. L. Kling, “Coordination of Voltage Regulation in Active Networks”
- [31] M. Brenna, E. De Berardinis, L. D. Carpinì, F. Foiadelli, P. Paulon, P. Petroni, G. Sapienza, G. Scrosati, D. Zaninelli, “Automatic Distributed Voltage Control Algorithm in Smart Grids Applications”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 2, June 2013
- [32] M.E. Collins, R.W. Silversides, T.H. Green, “Control and Coordination of a Distribution Network via Decentralised Decision Making”
- [33] Όλγα Βλαχοκυριάκου, “Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση ΔΠ”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015
- [34] M.E. Collins, “Multi-Agent System Control and Coordination of Distributed Energy Resources in Electrical Power Networks”, Imperial College London, May 2014
- [35] S. Grenard, O. Devaux, O. Carre and O. Huet, “Power Steering,” Power and Energy Magazine, IEEE, vol.9, no.5, pp.42,51, Sept.-Oct. 2011
- [36] M. Horoufiany, A. Kazemi, V. Maleki, “The management of Distributed Energy Resources for voltage control in smart grids”, Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference, pp.462,466, 15-17 May 2012
- [37] F.A. Viawan, D. Karlsson, “Coordinated Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Distributed Generation”
- [38] Convex Optimization (Wikipedia)
http://en.wikipedia.org/wiki/Convex_optimization
- [39] Quadratic Programming (Wikipedia)
http://en.wikipedia.org/wiki/Quadratic_programming
- [40] <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/quadprog.html>

- [41] Α. Γκιάτης, “Ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ σε δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, Ιούλιος 2015
- [42] “Smart Grids in Distribution Networks, Roadmap Development and Implementation”, International Energy Agency (IEA), 2015
- [43] Smart Grid (Wikipedia) http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid
- [44] N. R. Jennings and S. Bussmann, “Agent-based control systems”, IEEE Control Systems Magazine, vol. 23, pp. 61-74, 2003
- [45] S. Franklin, A. Graesser, “Is it an agent, or just a program? A taxonomy for autonomous agents”, Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, pp. 1-10, 1996
- [46] <http://www.fipa.org/>
- [47] Άρης Ε. Δημέας, “Συμβολή στον κατακεκομημένο έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στην χαμηλή τάση”, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006
- [48] S. Miller, S. D. Ramchurn, A. Rogers, “Optimal Decentralised Dispatch of Embedded Generation in the Smart Grid”
- [49] M. E. Baran, I. M. El-Markabi, “A Multiagent-Based Dispatching Scheme for Distributed Generators for Voltage Support on Distribution Feeders”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 52–59, 2007
- [50] J. Grainger, W. Stevenson, “Power System Analysis”, McGraw-Hill International Editions, 1994
- [51] Multi-agent system (Wikipedia) https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent_system
- [52] <http://www.pserc.cornell.edu//matpower/>