



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

**Διαχωρισμός του δικτύου διανομής σε ζώνες και
αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Κ. Περιβολιώτης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

**Διαχωρισμός του δικτύου διανομής σε ζώνες και
αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Κ. Περιβολιώτης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

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

.....
Παύλος Γεωργιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....
Νικόλαος Κ. Περιβολιώτης

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

Copyright © Νικόλαος Κ. Περιβολιώτης, 2015

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

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία αύξηση της διείσδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (DG) στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας θέτοντας ένα πλήθος από προβλήματα αλλά και προκλήσεις. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει μια μέθοδο αποκεντρωμένου ελέγχου της τάσης σε περίπτωση παραβίασης των ορίων αξιοποιώντας την διεσπαρμένη παραγωγή.

Αρχικά, προτείνεται ο διαχωρισμός του δικτύου διανομής σε ζώνες με βάση τον πίνακα ευαισθησιών του δικτύου και έναν αριθμό κατώφλι «ε». Ο διαχωρισμός εφαρμόζεται σε ένα πρότυπο και ένα πραγματικό δίκτυο διανομής, όπου και δοκιμάζονται διάφορες τιμές του «ε» με στόχο να επιλεγθεί η τιμή που επιτυγχάνει τον καταλληλότερο διαχωρισμό.

Έπειτα, παρουσιάζεται μια μέθοδος ελέγχου της τάσης βασισμένη στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος που υπολογίζεται επιλύοντας ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Η μέθοδος εφαρμόζεται τόσο με κεντρικό όσο και με αποκεντρωμένο έλεγχο και εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα. Εξετάζεται, επίσης, και η περίπτωση που κρίνεται απαραίτητη η αποκοπή ενεργού παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση.

Ακολούθως, διατυπώνονται κανόνες που απορρέουν από την επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και μπορούν να εφαρμοστούν από ένα σύστημα έξυπνων πολυπρακτόρων (MAS). Εξετάζονται δύο παραλλαγές του αλγορίθμου μια με σύγχρονη και μια με ασύγχρονη ενημέρωση των τιμών των τάσεων. Στην σύγχρονη ολοκληρώνονται οι κινήσεις αντιστάθμισης σε μια ζώνη και λαμβάνονται νέες μετρήσεις προτού πραγματοποιηθεί έλεγχος σε άλλη ζώνη, ενώ στην ασύγχρονη γίνονται παράλληλα σε όλες τις ζώνες οι κινήσεις αντιστάθμισης και στο τέλος λαμβάνονται οι νέες μετρήσεις.

Για την εφαρμογή των μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν δύο δίκτυα διανομής. Το πρώτο είναι το πρότυπο δίκτυο διανομής 33 ζυγών της IEEE και το δεύτερο είναι το δίκτυο διανομής 101 ζυγών της αναχώρησης P25 της Σπερχειάδας. Η εφαρμογή των μεθόδων έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab με την βοήθεια του πακέτου matpower.

Λέξεις κλειδιά

δίκτυα διανομής, ε-διαχωρισμός, ζώνες, πίνακας ευαισθησίας, έλεγχος τάσης, αποκεντρωμένος έλεγχος, αντιστάθμιση, άεργος, γραμμικός προγραμματισμός, μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής (DG), αποκοπή ενεργού ισχύος, σύστημα πολυπρακτόρων (MAS), matlab

Abstract

Over the last years a rapid increase in distributed generation (DG) penetration in distribution networks is observed, posing numerous problems alongside with challenges. The goal of the current diploma thesis is to present and propose a method of decentralized voltage control in a case of a disturbance taking the advantages of distributed generation.

Initially, it is proposed the decomposition of a distribution network using the sensitivity matrix of the network and a number threshold « ϵ ». The decomposition is implemented in two different case study networks, where various values of « ϵ » are examined in order to find the value that achieves the optimum decomposition.

Afterwards, it is presented a method for voltage control based on reactive power compensation that is determined by the solution of a classic linear programming problem. The method is implemented both with centralized and decentralized control and qualitative conclusions are taken out. It is also examined the case where active power curtailment of distributed generation is needed in order to restore normal voltage levels.

Next, there are established rules that directly come from the solution of the linear programming problem and can be applied by a multi agent system (MAS). Two different approaches of the algorithm are examined, one with synchronous and another with asynchronous update of the voltage's values. In the first case the reactive power compensation procedure in a zone is completed and new measurements take place before a new control starts in another zone, whereas at the last one reactive power compensation procedure is carried out by all zones at the same time and at the end of the procedure new measurements take place.

All above are implemented in two different case study distribution networks, the first is the case study distribution network with 33 buses of IEEE and the second is the distribution network with 101 buses of the P25 departure of Sperxeiada. Matlab software equipped with matpower package is used to investigate the proposed methods in terms of their effectiveness.

Key words

distribution networks, ε decomposition, zones, sensitivity matrix, voltage regulation, decentralized control, compensation, reactive power, linear programming, distributed generation (DG), active power curtailment, multi – agent system (MAS), matlab

Ευχαριστίες

Κατά αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την δυνατότητα που μου έδωσε να εντρυφήσω και να αποκομίσω πολύτιμες γνώσεις σε ένα πάρα πολύ ενδιαφέρον για μένα αντικείμενο.

Ακόμη, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Τράκα για τη συνεχή υποστήριξη του σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα. Κυρίως, όμως θέλω να τον ευχαριστήσω για τον τρόπο επιστημονικής έρευνας που μου έμαθε, ένα πολύτιμο εφόδιο για την περαιτέρω επιστημονική και επαγγελματική μου εξέλιξη.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου και καθένα χωριστά από όσους με στήριξαν πολύπλευρα καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο – Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	13
1.1 Το δίκτυο διανομής ως μέρος ενός ΣΗΕ.....	13
1.2 Δομή δικτύων διανομής	15
1.2.1 Μέσα ζεύξεως και προστασίας.....	15
1.2.2 Εναέρια δίκτυα ΜΤ	16
1.2.3 Υπόγεια δίκτυα ΜΤ	17
1.2.4 Εναέρια δίκτυα ΧΤ	19
1.2.5 Υπόγεια δίκτυα ΧΤ.....	20
1.3 Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα δίκτυα διανομής	21
Κεφάλαιο 2^ο – Έλεγχος τάσης στα δίκτυα διανομής	25
2.1 Επιπτώσεις στην τάση από την σύνδεση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής..	25
2.2 Συμβατικά μέσα ρύθμισης της τάσης.....	26
2.2.1 Ρυθμιστές τάσεως υπό φορτίο	27
2.2.2 Πυκνωτές	29
2.2.3 Λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ	29
2.2.4 Θέση εγκατάστασης ρυθμιστών τάσης.....	29
2.3 Χρήση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στον έλεγχο τάσης	30
2.4 Κεντρικός και αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης.....	31
Κεφάλαιο 3^ο – Διαχωρισμός του δικτύου διανομής σε ζώνες με βάση τον ε-διαχωρισμό	35
3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Πίνακας ευαισθησιών δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.....	35
3.3 Ο ε-διαχωρισμός.....	35
3.4 Ο αλγόριθμος DFS (Deep First Search).....	37
3.5 Επιλογή του κατάλληλου αριθμού ε	38
3.6 Εφαρμογή του αλγορίθμου για τον ε-διαχωρισμό	39
3.6.1 Διαχωρισμός σε ζώνες του δικτύου 33 ζυγών της ΙΕΕΕ.....	40
3.6.2 Διαχωρισμός σε ζώνες του δικτύου διανομής 101 ζυγών της Σπερχειάδας	42

3.7 Συμπεράσματα	44
------------------------	----

Κεφάλαιο 4^ο – Έλεγχος τάσης με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού..... 45

4.1 Εισαγωγή.....	45
4.2 Γενικά για τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού.....	45
4.3 Διατύπωση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για έλεγχο τάσης με προσαρμογή άεργου ισχύος	46
4.4 Διατύπωση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού με αποκοπή ενεργού ισχύος σε περίπτωση υπέρτασης.....	48
4.5 Περιγραφή του αλγορίθμου για έλεγχο τάσης με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.....	49
4.6 Περίπτωση δικτύου 33 ζυγών της IEEE	53
4.6.1 Κεντρικός έλεγχος τάσης.....	54
4.6.2 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης	58
4.6.3 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης με αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος.....	63
4.7 Περίπτωση δικτύου διανομής 101 ζυγών Σπερχειάδας	65
4.7.1 Κεντρικός έλεγχος	66
4.7.2 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης	68
4.7.3 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης με αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος.....	71
4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	74

Κεφάλαιο 5^ο – Έλεγχος τάσης με χρήση συστήματος πολυπρακτόρων (Multi-Agent Systems – M.A.S) 75

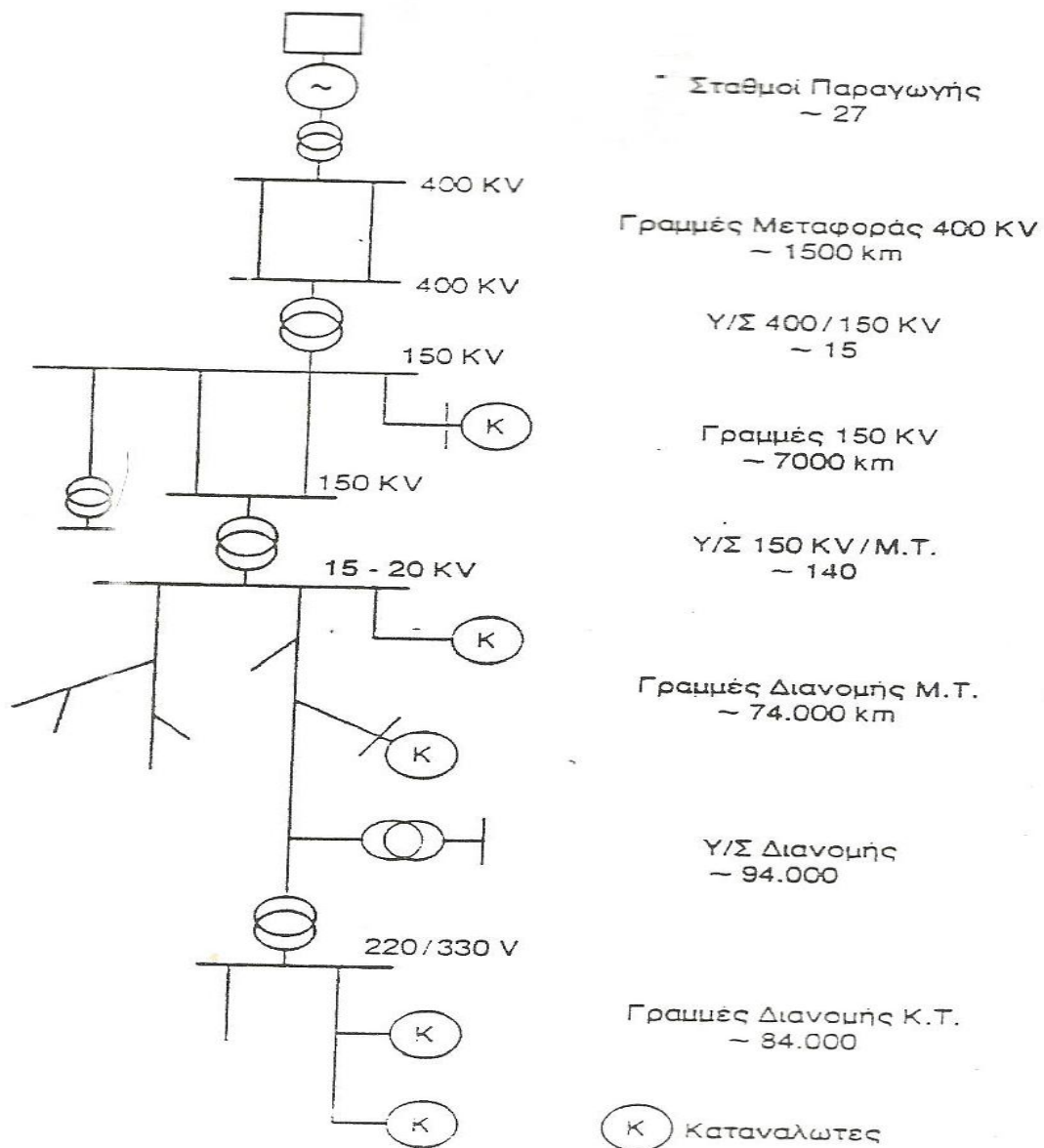
5.1 Εισαγωγή.....	75
5.2 Συστήματα πολυπρακτόρων (M.A.S) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας... ..	75
5.3 Ερμηνεία επίλυσης προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για τον έλεγχο τάσης	77
5.4 Συνεργασία συστήματος πολυπρακτόρων (MAS) για τον έλεγχο τάσης	78
5.5 Περιγραφή προτεινόμενης μεθόδου.....	79
5.6 Περίπτωση δικτύου 33 ζυγών της IEEE	84
5.6.1 Αλγόριθμος με ασύγχρονη ανανέωση των τάσεων	84
5.6.2 Αλγόριθμος με σύγχρονη ανανέωση των τάσεων	87
5.7 Περίπτωση δικτύου διανομής 101 ζυγών Σπερχειάδας	88

5.7.1 Αλγόριθμος με ασύγχρονη ενημέρωση των τάσεων	89
5.7.2 Αλγόριθμος με σύγχρονη ενημέρωση των τάσεων	92
5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	93
Κεφάλαιο 6^ο – Σύνοψη και προοπτικές επέκτασης	95
6.1 Σύνοψη	95
6.2 Προοπτικές επέκτασης	96
Παράρτημα	97
Παράρτημα Α - Στοιχεία φόρτισης πρότυπων δικτύων	97
Α.1 Δίκτυο διανομής 33 ζυγών της ΙΕΕΕ	97
Α.2 Δίκτυο διανομής 101 ζυγών της αναχώρησης Ρ25 της Σπερχειάδας	98
Παράρτημα Β – Ιακωβιανή μήτρα	101
Β.1 Εισαγωγικές έννοιες προβλήματος ροής φορτίου	101
Β.1.1 Κατηγοριοποίηση ζυγών	101
Β.1.2 Πίνακας αγωγιμοτήτων Ybus	101
Β.1.3 Μέθοδος Newton - Raphson	102
Β.2 Επίλυση ροής φορτίου και Ιακωβιανός πίνακας	103
Βιβλιογραφία	106

Κεφάλαιο 1^ο – Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

1.1 Το δίκτυο διανομής ως μέρος ενός ΣΗΕ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται η δομή του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση ελληνικού ΣΗΕ. [12]

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την παραγωγή, την 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 εύκολα, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που καταναλώνεται. [13]

Προκύπτει λοιπόν ότι τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) μπορούν να διακριθούν γενικά στα ακόλουθα τμήματα:

- Τους σταθμούς παραγωγής.
- Τα δίκτυα μεταφοράς, που διασυνδέουν τους σταθμούς παραγωγής μεταξύ τους και μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες ποσότητες κοντά στα μεγάλα κέντρα καταναλώσεως.
- Τα δίκτυα διανομής (ΔΔ), με τα οποία η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές (βιομηχανίες, κατοικίες, κλπ).

Τα ΣΗΕ ανήκουν, στο σύνολο ή κατά τμήματα, σε δημόσιες ή ιδιωτικές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού. Τα δίκτυα των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού φτάνουν κατά γενικό κανόνα μέχρι το όριο της ιδιοκτησίας των καταναλωτών τους, όπου και εγκαθίστανται οι διατάξεις μέτρησης της παρεχόμενης ενέργειας. Από το σημείο αυτό, για την τροφοδότηση των συσκευών κατανάλωσης υπάρχει ένα εσωτερικό δίκτυο διανομής (σε αντίθεση με τα 'εξωτερικά' ή 'δημόσια' δίκτυα διανομής που προαναφέρθηκαν). Το εσωτερικό δίκτυο διανομής μαζί με τις συσκευές κατανάλωσης αποτελεί την Εσωτερική Ηλεκτρική Εγκατάσταση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τα εξωτερικά δίκτυα διανομής που θα τα αποκαλούμε πιο απλά δίκτυα διανομής.

Η σύνδεση των καταναλωτών στο ΣΗΕ γίνεται ανάλογα με την μέγιστη απορροφώμενη ισχύ τους. Έτσι, για το σύστημα της ΔΕΗ, σχήμα 1.1, διακρίνουμε τρεις κατηγορίες καταναλωτών.

- Τους καταναλωτές Υψηλής Τάσεως – ΥΤ (150 kV) – για ισχείς άνω των 10 MW.
- Τους καταναλωτές Μέσης Τάσεως – ΜΤ – για ισχείς άνω των 200 kW (ή 100 kW σε κέντρα πόλεων).
- Τους καταναλωτές Χαμηλής Τάσεως – ΧΤ. [12]

Τα δίκτυα διανομής καλύπτουν όλη την εξυπηρετούμενη περιοχή και φθάνουν μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή. Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής:

- 1) Διανομή ΜΤ ή πρωτεύουσα διανομή
- 2) Διανομή ΧΤ ή δευτερεύουσα διανομή

Το δίκτυο διανομής ΜΤ τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής ΜΤ/ΧΤ και τους καταναλωτές ΜΤ. Η μέση τάση διανομής περιλαμβάνει σήμερα τιμές από 6.6 kV έως 20 kV.

Οι περιοχές καταναλώσεως ή φορτίου, είναι αστικές, βιομηχανικές, υπεραστικές, αγροτικές ή μικτές, αντίστοιχος δε προς το είδος της περιοχής είναι και ο τύπος του δικτύου ΜΤ. Έτσι, στα κέντρα των πόλεων, ή γενικά σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου, τα δίκτυα είναι κατά το πλείστο υπόγεια. Στις λοιπές περιοχές, τα δίκτυα είναι κατά κανόνα εναέρια.

Τα δίκτυα διανομής ΜΤ είναι συνήθως βροχοειδή αλλά λειτουργούν ακτινικά. Η βροχοειδής δομή επιτρέπει οικονομία γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησεως, ενώ η ακτινική λειτουργία επιβάλλεται από την απλότητα της προστασίας και της ροής ενέργειας στα δίκτυα αυτά.

Η χαμηλή τάση διανομής είναι εκείνη με την οποία τροφοδοτούνται οι οικιακοί καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής ΧΤ αναχωρούν από τους ζυγούς ΧΤ των υποσταθμών διανομής και τροφοδοτούν τις παροχές των καταναλωτών ΧΤ. Τα αστικά δίκτυα διανομής ΧΤ ιδίως των πυκνοκατοικημένων περιοχών είναι κατά κανόνα υπόγεια.

Η τεχνική των δικτύων διανομής καλύπτει τα προβλήματα των εναερίων και υπόγειων γραμμών και υποσταθμών διανομής, των παροχών και της μετρήσεως και της αποκαταστάσεως των βλαβών. Από οικονομική άποψη, η διανομή έχει μεγάλο ενδιαφέρον διότι απορροφά τις μισές περίπου επενδύσεις κεφαλαίου του όλου συστήματος. [14]

1.2 Δομή δικτύων διανομής

Στην παράγραφο αυτή θα δοθεί μια γενική εικόνα της δομής των δικτύων διανομής ΜΤ και ΧΤ, θα γίνει δηλαδή μια γενική περιγραφή και παρουσίαση του σχήματος αυτών και των διαφόρων επί μέρους στοιχείων τους. Αρχικά, δίνονται ορισμένοι ορισμοί που αφορούν τον εξοπλισμό τους.

1.2.1 Μέσα ζεύξεως και προστασίας

Τα *μέσα ζεύξεως* χρησιμεύουν στα δίκτυα για την εκτέλεση των διάφορων χειρισμών, δηλαδή την ζεύξη-απόζευξη τμημάτων του δικτύου. Οι κύριες κατηγορίες είναι:

- Οι *αποζεύκτες* (A/Z) – (Isolators ή Disconnectors)
- Οι *διακόπτες φορτίου* (A/Φ) – (Switches)
- Οι *διακόπτες ισχύος (βραχυκυκλώσεως)*, (A/I) – (Circuit Breakers)

Αποζεύκτες (A/Z) ονομάζονται οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για το άνοιγμα (ή το κλείσιμο) ενός κυκλώματος, είτε όταν το ρεύμα που διακόπτεται (ή αποκαθίσταται) είναι αμελητέο, είτε όταν δεν επέρχεται ουσιαστική μεταβολή στην τάση μεταξύ των πόλων όταν ανοίγει.

Διακόπτες φορτίου (A/Φ) ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν, ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του

κυκλώματος, καθώς και να αποκαθιστούν, αλλά όχι να διακόπτουν, εντάσεις ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Διακόπτες ισχύος (Δ/I) ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας αλλά κυρίως υπό ορισμένες μη κανονικές συνθήκες, όπως είναι η περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Όλα τα μέσα ζεύξεως που προαναφέρθηκαν, έχουν την ικανότητα να υφίστανται στην κλειστή θέση την δίοδο υπερεντάσεων που οφείλονται σε βραχυκυκλώματα, επί ορισμένο μικρό χρονικό διάστημα, εκτός βεβαίως της ικανότητας τους να διαρρέονται συνεχώς από το ονομαστικό τους ρεύμα.

Τα *μέσα προστασίας* χρησιμεύουν για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος ή στην πρόληψη βλάβης στοιχείων του δικτύου. Οι κύριες κατηγορίες είναι:

- Οι διακόπτες ισχύος (Δ/I), όταν δέχονται εντολές από τους ηλεκτρονόμους προστασίας.
- Οι ασφάλειες (ΑΣΦ).

Στην πράξη χρησιμοποιούνται πολύ συχνά οι συνδυασμοί των παραπάνω μέσων ζεύξεως και προστασίας, οι συνηθέστεροι των οποίων είναι:

- ✓ A/Z και Δ/I , δεδομένου ότι το άνοιγμα των επαφών του Δ/I μέσα στο θάλαμο σβέσεως του τόξου δεν εξασφαλίζει την βέβαιη απομόνωση του κυκλώματος
- ✓ Δ/Φ και ΑΣΦ, ώστε με τον Δ/Φ να υπάρχει η δυνατότητα χειρισμών ενώ με τις ΑΣΦ να εξασφαλίζεται η προστασία από βραχυκυκλώματα.

Η όλη κατασκευαστική διαμόρφωση των μέσων ζεύξεως και προστασίας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το αν προορίζονται για εγκατάσταση σε εξωτερικό ή εσωτερικό χώρο, και φυσικά ανάλογα με την τάση του δικτύου στο οποίο μπορεί να εγκαθίστανται. [12]

1.2.2 Εναέρια δίκτυα ΜΤ

Τα εναέρια δίκτυα ΜΤ ενδείκνυται να έχουν δενδροειδή μορφή. Αποτελούνται δηλαδή από τον κορμό (ή την κύρια γραμμή) που κατασκευάζεται με αγωγούς μεγάλης διατομής και τις διακλαδώσεις πάνω στις οποίες συνδέονται κατά κανόνα οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Οι διακλαδώσεις κατασκευάζονται με αγωγούς μικρότερης, από ότι ο κορμός διατομής. Η δενδροειδής μορφή επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα στις αγροτικές περιοχές, όχι όμως στις ημιαστικές, όπου οι υπάρχοντες περιορισμοί στην όδευση των γραμμών δεν το επιτρέπουν.

Οποσδήποτε τα εναέρια δίκτυα ΜΤ λειτουργούν σχεδόν πάντα ακτινικά (ή ανοικτά), δηλαδή όλες οι γραμμές, από τις οποίες αποτελείται το δίκτυο, τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους.

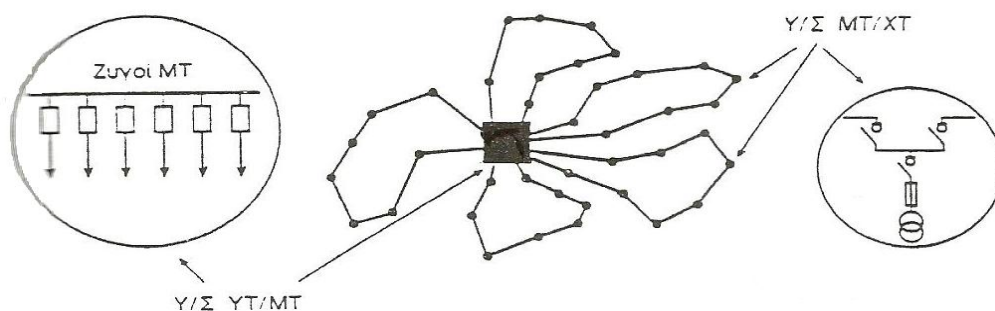
Σε πολλές χώρες (πχ ΗΠΑ, Μεγ. Βρετανία) γίνεται εκτεταμένη χρήση ασφαλειοαποζευκτών (A/Z) τόσο για την προστασία των μετασχηματιστών (Μ/Σ), όσο και για την προστασία-απομόνωση των διακλαδώσεων. Η πολιτική αυτή ακολουθείται και στην Ελλάδα. Στις ευρωπαϊκές χώρες, γενικά, οι γραμμές των εναέριων δικτύων διανομής ΜΤ, περιλαμβάνουν μόνο τους τρεις αγωγούς των φάσεων, δηλαδή δεν ακολουθεί ουδέτερος. [12]

1.2.3 Υπόγεια δίκτυα ΜΤ

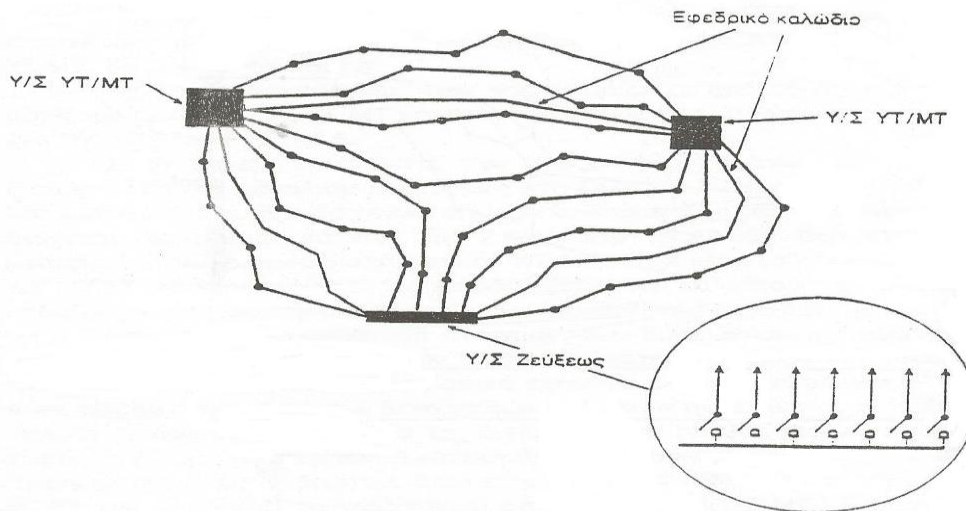
Ο εντοπισμός της θέσης μιας βλάβης και η αποκατάσταση της σε ένα εναέριο δίκτυο είναι γενικά εύκολη και απαιτεί χρόνο μερικών ωρών. Αντίθετα ο εντοπισμός της θέσης μιας βλάβης υπογείου καλωδίου και ακολούθως η αποκατάσταση της είναι πολύ πιο σύνθετη εργασία που μπορεί να διαρκέσει συνολικά και περισσότερο από 24 ώρες. Αν δε ληφθεί υπόψη ότι γενικά ένα υπόγειο δίκτυο ΜΤ τροφοδοτεί περιοχές με μεγάλη σχετικά πυκνότητα φορτίου αλλά και με αυξημένες απαιτήσεις συνεχούς τροφοδότησης, έπεται ότι το απλό και οικονομικό ακτινικό σχήμα δικτύου που εφαρμόζεται στα εναέρια δίκτυα ΜΤ δεν επαρκεί. Έτσι στα υπόγεια δίκτυα ΜΤ ακολουθείται συνήθως ο κανόνας του να υπάρχει η δυνατότητα, μετά από μια βλάβη, να επανατροφοδοτηθούν οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ από άλλη οδό, μετά την εκτέλεση ορισμένων χειρισμών ή και αυτόματα, χωρίς να προηγείται κατ ανάγκη η επισκευή της βλάβης.

Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται με τα παρακάτω τρία βασικά σχήματα, με τις αντίστοιχες παραλλαγές τους:

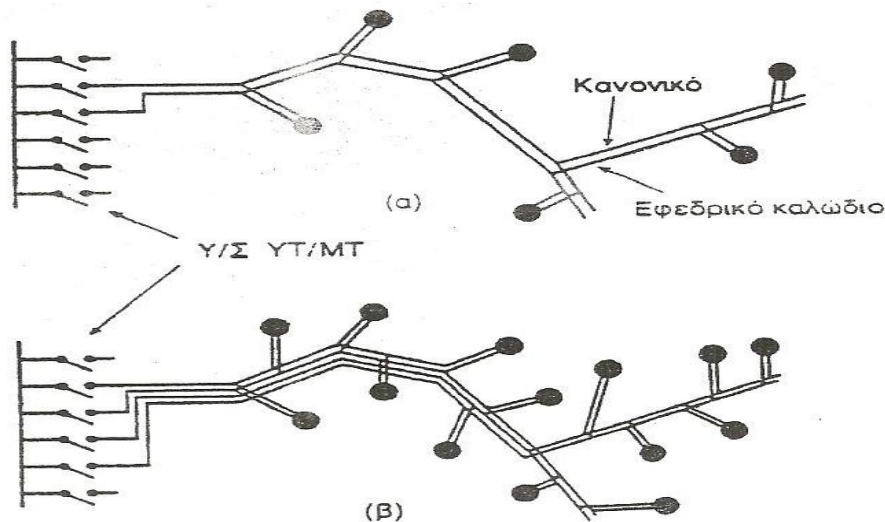
- Το *βροχοειδές* που χαρακτηρίζεται από ότι οι γραμμές αποτελούν τμήματα βρόγχου που αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ (σχήμα 1.2).
- Το *ατρακτοειδές* που χαρακτηρίζεται από το ότι οι γραμμές αρχίζουν από ένα υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και καταλήγουν σε ένα άλλο ή καταλήγουν σε ένα υποσταθμό ζεύξεως (σχήμα 1.3).
- Το *δίκτυο διπλής τροφοδότησης* το οποίο ουσιαστικά συνίσταται από παράλληλες ακτινικές γραμμές και σε κάθε υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ φέρονται τροφοδοτήσεις από δύο γραμμές. Από αυτές η μια χρησιμεύει ως 'κανονική' και η άλλη ως 'εφεδρική' (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.2: Βροχοειδές δίκτυο ΜΤ.



Σχήμα 1.3: Ατρακτοειδές δίκτυο ΜΤ.



Σχήμα 1.4: Σχήμα διπλής τροφοδότησης (α) σε αρχική, (β) σε επόμενη φάση ανάπτυξης.

Σημειώνεται ότι οι γραμμές υπό κανονικές συνθήκες λειτουργούν ακτινικά. Στα μεν βροχοειδή ένας από τους Δ/Φ, εισόδου εξόδου, σε ένα υποσταθμό (συνήθως περί το μέσο του δρόμου) παραμένει ανοικτός, ενώ στα δε ατρακτοειδή παραμένουν ανοικτοί συχνά οι διακόπτες των ζυγών ΜΤ των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ ή του υποσταθμού ζεύξεως.

Τα σχήματα υπογείων δικτύων ΜΤ που προαναφέρθηκαν παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συνοπτικά, το βροχοειδές παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απλότητας, αλλά δεν επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση της ικανότητας των καλωδίων. Πραγματικά η αναχώρηση κάθε βρόχου πρέπει να φορτίζεται, υπό κανονικές συνθήκες, μέχρι το 50% της ικανότητας του καλωδίου, ώστε σε περίπτωση βλάβης του πρώτου τμήματος (μεταξύ υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ και του πρώτου υποσταθμού ΜΤ/ΧΤ) να υπάρχει δυνατότητα τροφοδοτήσεως του

υπολοίπου. Το ατρακτοειδές σχήμα επιτρέπει μεγαλύτερη αξιοποίηση των καλωδίων, εφ' όσον υπάρχουν οι κατάλληλες γεωγραφικές συνθήκες, βέβαια το δίκτυο επιβαρύνεται με την δημιουργία του υποσταθμού ζεύξεως. Τέλος, το σχήμα διπλής τροφοδότησης πλεονεκτεί στην γρήγορη επανατροφοδότηση σε περίπτωση σφάλματος, αφού αρκεί η μεταγωγή στο εφεδρικό καλώδιο ενώ παρουσιάζει κατασκευαστικές δυσκολίες.

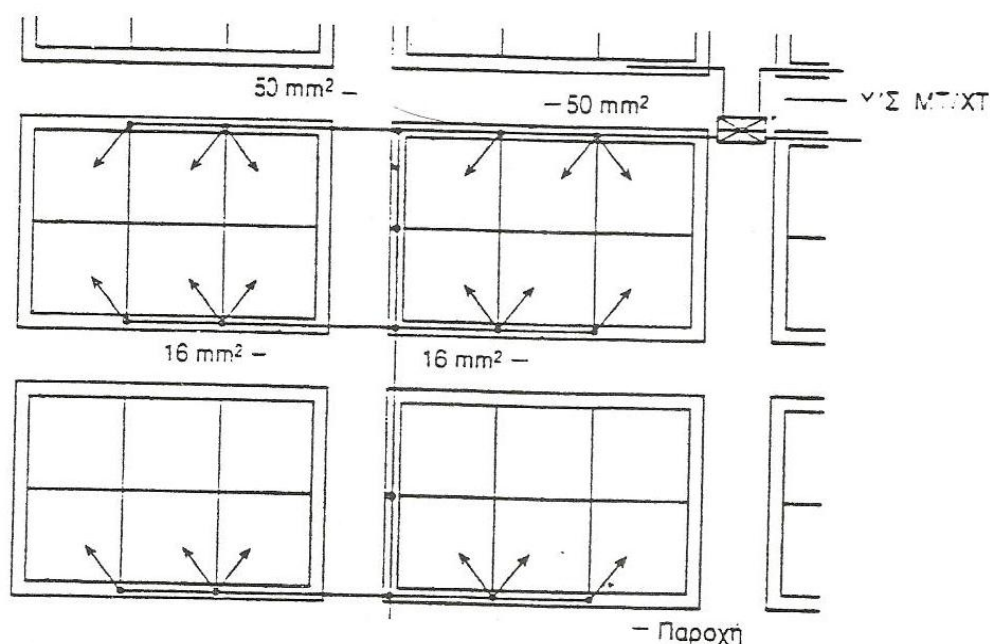
Συμπερασματικά, η καταλληλότητα ενός σχήματος επηρεάζεται άμεσα από τις γεωγραφικές συνθήκες της περιοχής και την κατανομή των φορτίων καθώς επίσης και από την προοπτική ανάπτυξης στο μέλλον. Στην Ελλάδα συγκεκριμένα εφαρμόζονται αποκλειστικά τα βροχοειδή σχήματα τα οποία είναι και τα συνηθέστερα διεθνώς.

Για να περιορίζεται ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος στα βροχοειδή δίκτυα εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια διάφορα συστήματα. Το απλούστερο συνίσταται στην εγκατάσταση 'ενδεικτικών ηλεκτρονόμων', οι οποίοι σημειώνουν αν η ένταση που προκάλεσε το βραχυκύκλωμα 'πέρασε' από την θέση εγκατάστασης του. Η ένδειξη αυτή μπορεί να μεταφέρεται σε ένα 'κέντρο ελέγχου' του ΔΔ. [12]

1.2.4 Εναέρια δίκτυα ΧΤ

Η διαμόρφωση των εναέριων δικτύων ΧΤ, είτε αυτά κατασκευάζονται με γυμνούς ή με μονωμένους αγωγούς, είναι απλούστερη των υπογείων, κατά γενικό δε κανόνα δεν προβλέπονται δυνατότητες διπλών τροφοδοτήσεων.

Χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερες της μιας διατομές αγωγών, συχνά δε, ιδίως στις αγροτικές περιοχές, οι γραμμές δεν είναι τριφασικές, αλλά μονοφασικές (ουδέτερος και μια φάση). [12]

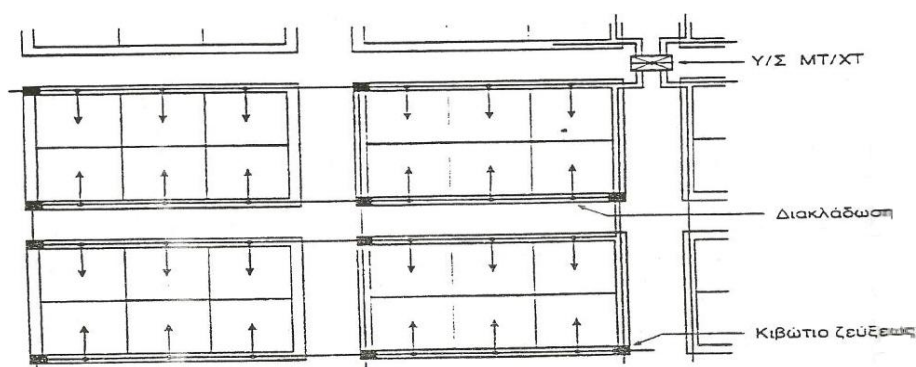


Σχήμα 1.5: Ενδεικτικό σχήμα εναερίου δικτύου ΧΤ, από Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ 4 αναχωρήσεων

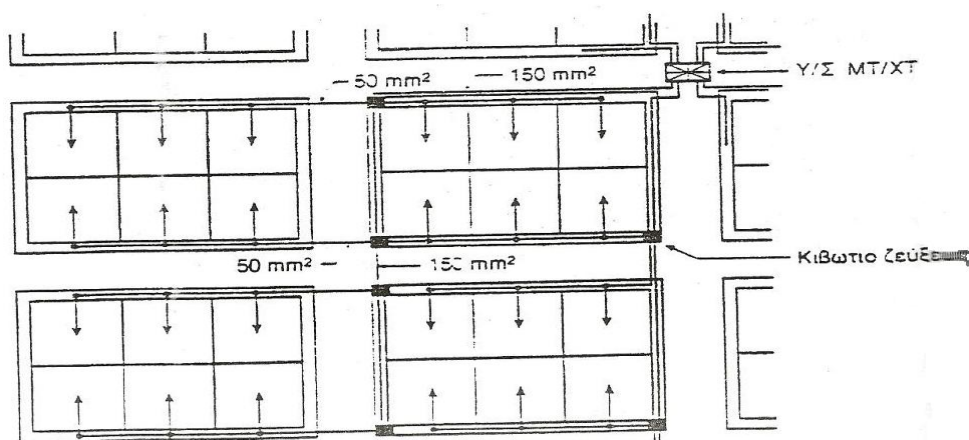
1.2.5 Υπόγεια δίκτυα ΧΤ

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να σχεδιαστεί ένα ακτινικό υπόγειο δίκτυο ΧΤ.

- (α) Χρησιμοποιούνται καλώδια ενιαίας διατομής. Το δίκτυο διαμορφώνεται ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διπλής τροφοδότησης (μετά από χειρισμούς) κάθε πλευράς οικοδομικού τετραγώνου, με το σχηματισμό βρόχων (κατασκευαστικά κλειστών αλλά λειτουργικά ανοιχτών), όπως ενδεικτικά δείχνεται στο σχήμα 1.6.
- (β) Διαμορφώνονται κύριοι βρόχοι, ανά δύο αναχωρήσεις από τον Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, αλλά η τροφοδότηση των καταναλωτών γίνεται ακτινικά με καλώδια μικρότερης διατομής (ή της ίδιας για λόγους ομοιομορφίας) όπως ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα 1.7.
- (γ) Δεν υπάρχουν (κατασκευαστικά) κλειστοί βρόχοι, χρησιμοποιούνται δε καλώδια πολλών διατομών, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί φορτίσεως και πτώσεως τάσεως, χωρίς όμως να υπάρχει δυνατότητα διπλής τροφοδότησης σε περίπτωση βλάβης (σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.6: Ενδεικτικό σχήμα υπογείου δικτύου ΧΤ με διπλή δυνατότητα τροφοδότησης.



Σχήμα 1.7: Ενδεικτικό σχήμα υπογείου δικτύου ΧΤ με απλή τροφοδότηση των καταναλωτών.



Σχήμα 1.8: Ενδεικτικό σχήμα υπογείου δικτύου ΧΤ με χρησιμοποίηση ‘κιβωτίων διανομής’.

Ο τρόπος (α) προσφέρει μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησεως απ ότι ο (γ), αλλά οδηγεί σε μεγαλύτερη δαπάνη κατασκευής, ενώ ο (β) βρίσκεται μεταξύ των δύο. Πλεονέκτημα επίσης του τρόπου (α) είναι ότι προσφέρεται για περιπτώσεις που προβλέπεται ταχεία και μεγάλη αύξηση φορτίων στο μέλλον, οπότε για την αντιμετώπιση τους αρκεί η πυκνωση των Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Γενικότερα ενδείκνυται για περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου και είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο παράδειγμα στις μεγάλες πόλεις.

Είναι φανερό ότι υπάρχει η δυνατότητα πολλών παραλλαγών των παραπάνω τύπων υπογείου δικτύου, κάθε μια των οποίων αποτελεί προσαρμογή στις υφιστάμενες συνθήκες δόμησης και την τεχνολογία του υλικού (κιβωτίων διακλάδωσης, σύνδεσης, διανομής κλπ) που χρησιμοποιείται. [12]

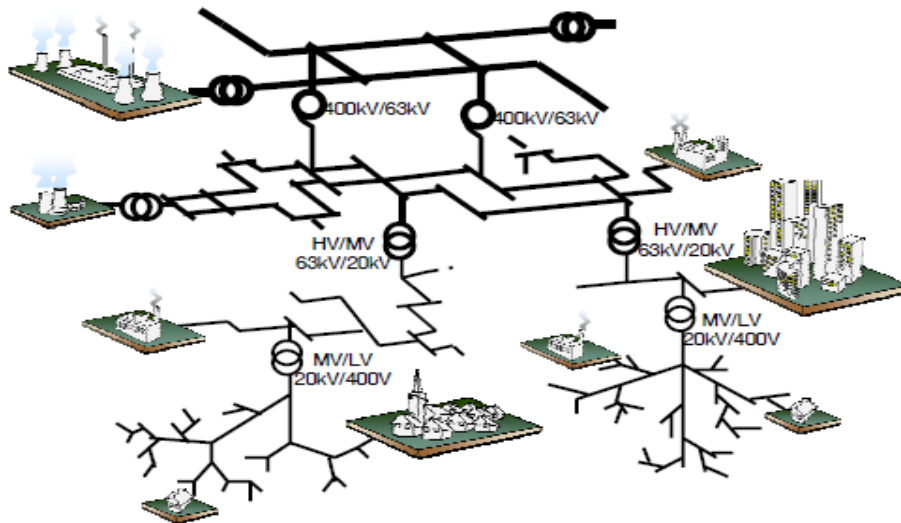
1.3 Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα δίκτυα διανομής

Η βιομηχανία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είχε ποτέ ξανά στην ιστορία της αντιμετωπίσει ένα τόσο μεγάλο πλήθος κινήτρων για επενδύσεις δοσμένων από τις κυβερνήσεις όσο σήμερα. Και αυτό για λόγους που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος και για ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας. Συνεπώς, μεγάλες ποσότητες νέας δυναμικότητας παραγωγής, προερχόμενη κυρίως από την αιολική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά, αναμένεται να συνδεθεί στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Τα δίκτυα διανομής, ωστόσο, είναι παραδοσιακά σχεδιασμένα ως παθητικά δίκτυα και η αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής θέτει ένα πλήθος από τεχνολογικές προκλήσεις. Αξιοποιήσιμες πηγές αιολικής ενέργειας αλλά και ηλιοφάνειας εντοπίζονται συνήθως σε αγροτικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλό φορτίο και μακρινή τροφοδοσία. Είναι συχνό λοιπόν να προκύπτουν προβλήματα υπερτάσεων που με την σειρά τους περιορίζουν την δυναμικότητα παραγωγής που μπορεί να συνδεθεί. [7]

Μερικά ακόμα θέματα τεχνολογικής φύσης παραθέτονται ονομαστικά παρακάτω:

- ✓ Θερμικά όρια εξοπλισμού
- ✓ Στάθμη βραχυκύκλωσης συστήματος
- ✓ Ευστάθεια
- ✓ Δυνατότητα αντίστροφης ροής ισχύος στους μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής τάσης (tap changers)
- ✓ Ποιότητα ισχύος (αρμονικές, flicker)
- ✓ Προστασία
- ✓ Προβλήματα υπερτάσεων στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
- ✓ Αντιστάθμιση ισχύος
- ✓ Απώλειες ισχύος

Καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας θα ασχοληθούμε όμως μόνο με τα προβλήματα παραβίασης των ορίων της τάσης και την ρύθμιση αυτής. [15]



Σχήμα 1.9: Δίκτυο μεταφοράς και διανομής με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ.

Όταν ένα δίκτυο διανομής λειτουργεί έχοντας διασυνδεδεμένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DG), μπορούμε να βασιζόμαστε στην λογική του 'τοποθέτησε και ξένοιασε' (*fit and forget*). Αυτό σημαίνει ότι όλα τα προβλήματα που ανακύπτουν πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την στιγμή της διασύνδεσης μιας μονάδας DG. Προκειμένου λοιπόν να βεβαιωθεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο ασφάλειας, ο διαχειριστής του δικτύου διανομής θεωρεί την χειρότερη περίπτωση λειτουργίας και προσαρμόζει το δίκτυο ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση της μονάδας DG ή αποφασίζει την απαγόρευση της μονάδας αν δεν γίνεται αλλιώς.

Στο μέλλον, τα δίκτυα διανομής προβλέπεται να λειτουργούν πιο δυναμικά, γεγονός που σημαίνει ότι θα πιστοποιείται ότι όλοι οι περιορισμοί και οι κανόνες ασφαλείας τηρούνται σε πραγματικό χρόνο μέσω κατάλληλης επιλογής σε πραγματικό χρόνο των μονάδων DG που θα λειτουργούν. Έτσι, θα περάσουμε από την λογική του *fit and forget* στην ιδέα των ενεργών δικτύων όπου ο διαχειριστής του δικτύου ελέγχει την παραγωγή και το φορτίο.

Μια ακόμη σημαντική εξέλιξη θα είναι το πέρασμα σε πιο ευέλικτα δίκτυα. Η πρόοδος της πληροφορικής και της τεχνολογίας επικοινωνιών επιτρέπει να έχουμε ολοένα και πιο απομακρυσμένες συσκευές ελέγχου.

Τέλος, οι διαφορές μεταξύ λειτουργίας δικτύου διανομής και μεταφοράς πρόκειται να μειωθούν. [16]

Κεφάλαιο 2^ο – Έλεγχος τάσης στα δίκτυα διανομής

2.1 Επιπτώσεις στην τάση από την σύνδεση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Η λειτουργία εγκαταστάσεων παραγωγής συνδεδεμένων στο δίκτυο διανομής προκαλεί μεταβολή των ροών ισχύος στις γραμμές του δικτύου και συνεπώς των τάσεων στα διάφορα σημεία του.

Για την ακριβή και αξιόπιστη εξέταση των επιπέδων της τάσης απαιτείται ο υπολογισμός ροής φορτίου στο δίκτυο διανομής λαμβάνοντας υπόψη τα υφιστάμενα και τα προβλεπόμενα φορτία των υποσταθμών διανομής, όπως επίσης και άλλες εγκαταστάσεις παραγωγής που ενδεχομένως συνδέονται ή πρόκειται να συνδεθούν, διότι οι τάσεις των κόμβων του δικτύου διαμορφώνονται από τις συνολικές ροές ισχύος των κλάδων.

Ο υπολογισμός ροών φορτίου αποσκοπεί στην ακριβέστερη εκτίμηση των επιπέδων τάσης στα διάφορα σημεία του δικτύου, σε όλες τις πιθανές ακραίες λειτουργικές καταστάσεις, συνεκτιμώντας την επίδραση φορτίων και παραγωγών. Συνίσταται η πραγματοποίηση τεσσάρων ροών φορτίου, για τις ακραίες λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος:

- (Α) Μέγιστο φορτίο – Ελάχιστη παραγωγή
- (Β) Μέγιστο φορτίο – Μέγιστη παραγωγή
- (Γ) Ελάχιστο φορτίο – Ελάχιστη παραγωγή
- (Δ) Ελάχιστο φορτίο – Μέγιστη παραγωγή

Γενικά οι καταστάσεις Α-Δ παρουσιάζουν μια πιθανότητα εμφάνισης, η οποία δεν είναι πάντα εύκολο να εκτιμηθεί. Χρειάζεται προσοχή λοιπόν ώστε να μην λαμβάνονται υπόψη απίθανες καταστάσεις. Παραδείγματος χάριν, αν θεωρηθεί γραμμή διανομής όπου το ελάχιστο φορτίο εμφανίζεται την νύχτα και σε αυτή συνδέεται εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, προφανώς η κατάσταση Δ δεν είναι εφικτή. Σε αυτή την περίπτωση, στο σενάριο λειτουργίας Δ θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ελάχιστο φορτίο κατά τις ώρες υψηλής ηλιοφάνειας.

Οι καταστάσεις «ελάχιστης παραγωγής» και «μέγιστης παραγωγής» αφορούν το σύνολο των εγκαταστάσεων παραγωγής που είναι συνδεδεμένες ή πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο. Οι χρησιμοποιούμενες ισχείς εξόδου των εγκαταστάσεων πρέπει να είναι οι μέγιστες τιμές ισχύος μόνιμης κατάστασης. Για την κατάσταση ελάχιστης παραγωγής μπορεί να θεωρηθεί ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής είναι εκτός λειτουργίας.

Στις καταστάσεις «μέγιστου φορτίου» και «ελάχιστου φορτίου» χρησιμοποιούνται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές 10 min του φορτίου του υπό εξέταση δικτύου κατά τη διάρκεια ενός έτους. (πχ το ετήσιο ελάχιστο φορτίο μπορεί να αντιστοιχεί στο

ημερήσιο ελάχιστο φορτίο κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου του χειμώνα, ενώ το ετήσιο μέγιστο φορτίο στο μέγιστο φορτίο κατά τη διάρκεια ενός θερινού 24ώρου).

Οι καταστάσεις Α και Δ δίνουν γενικά τα ελάχιστα και μέγιστα αναμενόμενα επίπεδα τάσεων στο δίκτυο. Η σύγκριση των υπολογιζόμενων τάσεων για τις καταστάσεις Α και Β, ή για τις Γ και Δ, δίνει τη μέγιστη μεταβολή των τάσεων στους κόμβους του δικτύου εξαιτίας μεταβολών της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής, για δεδομένο φορτίο.

Από τις ροές φορτίου για τις 4 καταστάσεις προκύπτουν η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της τάσης κάθε κόμβου j , $U_{min,j}$ και $U_{max,j}$:

$$U_{min,j} = \min (U_{A,j}, U_{B,j}, U_{\Gamma,j}, U_{\Delta,j}) \quad (2.1)$$

$$U_{max,j} = \max (U_{A,j}, U_{B,j}, U_{\Gamma,j}, U_{\Delta,j}) \quad (2.2)$$

όπου $U_{A,j}, U_{B,j}, U_{\Gamma,j}, U_{\Delta,j}$ είναι οι τιμές των τάσεων του κόμβου j , οι οποίες υπολογίστηκαν από τις ροές φορτίου των καταστάσεων Α, Β, Γ και Δ.

Από την παραπάνω ανάλυση μπορεί να διαπιστωθεί αν σε κάποια κατάσταση φόρτισης του δικτύου η τάση παραβιάζει τα τιθέμενα όρια. [17]

2.2 Συμβατικά μέσα ρύθμισης της τάσης

Συχνά, η σύνδεση μονάδων DG στο δίκτυο διανομής προκαλεί προβλήματα υπερτάσεων καθιστώντας αναγκαία την ρύθμιση της τάσης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου οι τάσεις του δικτύου μεταβάλλονται αργά, μειούμενες κατά τις ώρες μεγάλου φορτίου και αυξανόμενες κατά τις νυχτερινές ώρες. Και σε αυτήν την περίπτωση πολλές φορές είναι αναγκαία η ρύθμιση αυτής της διακύμανσης της. Η αναγκαία αυτή ρύθμιση μπορεί να πραγματοποιηθεί με αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού των μετασχηματιστών ισχύος, ή με ειδικούς μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης. Επίσης, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων τα οποία τροφοδοτούνται από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επαγωγικού χαρακτήρα, η έγχυση άεργου ισχύος από το σύστημα αναμένεται να συμβάλει στην αποκατάσταση της τάσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος της εγχύσεως άεργου ισχύος σε αυτό με πυκνωτές εν παραλλήλω για την βελτίωση της τάσης του δικτύου. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές είναι σύγχρονοι και στατοί. [14]

Τα μέσα (εξοπλισμός) που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης των δικτύων διανομής, είναι κυρίως τα ακόλουθα:

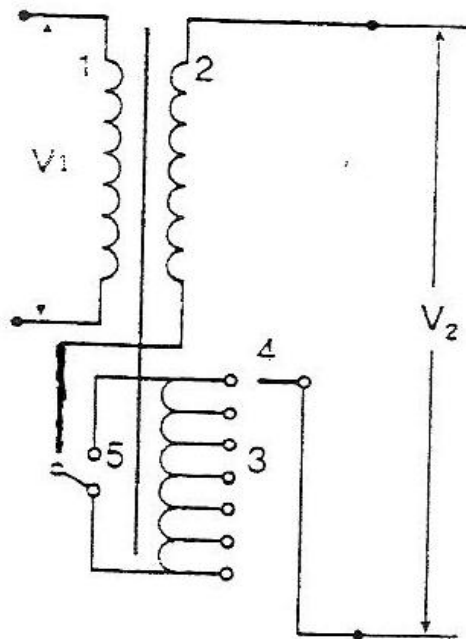
- 1) Οι «*Ρυθμιστές Τάσεως (PT) υπό φορτίο*», οι οποίοι μπορούν να διακριθούν:
 - Στους ενσωματωμένους στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ.
 - Στους ανεξάρτητους οι οποίοι εγκαθίστανται στην αρχή ή κατά μήκος των γραμμών ΜΤ.
- 2) Οι «*πυκνωτές*», οι οποίοι εγκαθίστανται:

- Στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (όταν πρόκειται να συμβάλλουν στη ρύθμιση της ροής φορτίων και τάσεων κυρίως του συστήματος μεταφοράς).
 - Επί των γραμμών ΜΤ ή (σπανιότερα) και επί των γραμμών ΧΤ.
- 3) Οι «λήψεις» των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ, οι οποίες μπορεί να μεταβάλλονται μόνον όταν ο Μ/Σ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο. [12]

2.2.1 Ρυθμιστές τάσεως υπό φορτίο

- Ρυθμιστές ενσωματωμένοι στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ

Στο σχήμα 2.1 δείχνεται σχηματικά η σύνδεση των τυλιγμάτων μιας φάσεως ενός Μ/Σ με ρυθμιστή τάσης υπό φορτίο. Σε σειρά προς ένα από τα δύο κύρια τυλίγματα του Μ/Σ (συνηθέστερα το πρωτεύον), συνδέεται το 'τύλιγμα ρυθμίσεως'. Το τύλιγμα ρυθμίσεως περιλαμβάνει πολλές λήψεις, η επαγόμενη δε σε αυτό τάση μπορεί να προστίθεται ή αφαιρείται στην τάση του κύριου τυλίγματος, μέσω του 'αναστροφέα'. Συνήθως, η τάση ρύθμισης κυμαίνεται σε ποσοστό $\pm 10\%$ της τάσεως του κύριου τυλίγματος (και σπανιότερα μέχρι $\pm 15\%$) σε σταθερά βήματα, μεγέθους περί το 1% της ονομαστικής τάσεως. Από τα μεγέθη αυτά προκύπτει εύκολα ο αριθμός των λήψεων. Πχ με $\pm 10\%$ και βήμα 1.25% θα έχει 16 λήψεις.



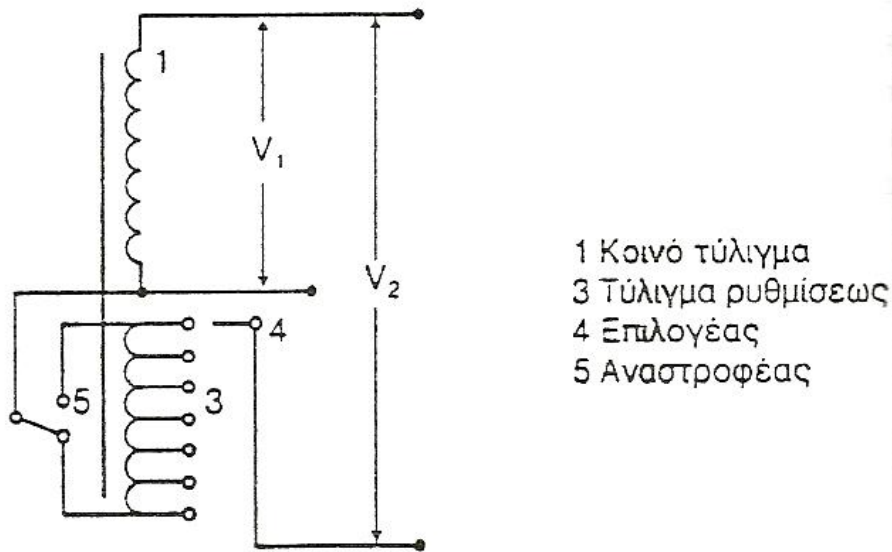
Σχήμα 2.1: Σύνδεση ρυθμιστή τάσης υπό φορτίο σε Μ/Σ (μια φάση).

- 1,2 Κύρια τυλίγματα του Μ/Σ
- 3 Τύλιγμα ρύθμισης με λήψεις
- 4 Επιλογέας
- 5 Αναστροφέας

ο Ανεξάρτητοι ρυθμιστές

Στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι ο λόγος μεταφοράς είναι μικρός (πχ 1 προς 1.1), λόγοι οικονομικότητας οδηγούν στη χρήση αυτομετασχηματιστή (ΑΜ/Σ) σε συνδυασμό βέβαια με το μηχανισμό αλλαγής τάσης υπό φορτίο.

Στο σχήμα 2.2 δείχνεται σχηματικά η σύνδεση μιας μόνο φάσης ενός ΑΜ/Σ με ρύθμιση τάσης υπό φορτίο, κατ αντιστοιχία του σχήματος 2.1 που αναφέρεται σε Μ/Σ.



Σχήμα 2.2: Σύνδεση ανεξάρτητου ρυθμιστή τάσης (μια φάση).

Η περιοχή ρύθμισης των ανεξαρτήτων ρυθμιστών τάσης είναι κατά κανόνα $\pm 10\%$, σε βήματα 0.5% έως 1.5%. Ειδικότερα, κατά τις αμερικάνικες τυποποιήσεις είναι 5/8% και 1 1/4%, οπότε έχουν 32 ή 16 βήματα αντίστοιχα. Με τα δεδομένα αυτά οι παραπάνω τύποι ΑΜ/Σ – ρυθμιστών χαρακτηρίζονται συχνά, με τη φαινόμενη ισχύ που ρυθμίζουν και όχι με την πολλαπλάσια που μπορεί κατά μέγιστο να διέλθει από τη γραμμή στην οποία εγκαθίστανται. Πχ ένας ΑΜ/Σ – ρυθμιστής ονομαστικής ισχύος 500 KVA, με περιοχή ρύθμισης $\pm 10\%$, μπορεί να εγκαθίστανται σε μια γραμμή και να διέρχεται διά αυτού ισχύς 500 KVA.

Οι μεγάλης ισχύος ρυθμιστές τάσεως είναι συνήθως τριφασικοί. Συχνά όμως, ιδίως για μικρές ισχύεις, χρησιμοποιούνται μονοφασικοί. Χαρακτηριστικό των μονοφασικών ρυθμιστών τάσης είναι ότι αρκούν δύο ρυθμιστές για να επιτευχθεί ρύθμιση τάσης.

Πλεονέκτημα των μονοφασικών ρυθμιστών είναι ότι αρχικά μπορούν να εγκαθίστανται δύο ρυθμιστές και αργότερα τρεις – όταν αυξηθούν τα φορτία και συνεπώς οι πτώσεις τάσης. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης ενός μπορεί να διατηρούνται οι άλλοι δύο. Μειονέκτημα των δύο ρυθμιστών είναι το ότι προκύπτει μια μετάθεση του ουδέτερου κόμβου. [12]

2.2.2 Πυκνωτές

Πυκνωτές με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης χρησιμοποιούνται κυρίως στα εναέρια δίκτυα ΜΤ. Σε μεγάλη έκταση χρησιμοποιούνται οι ‘παράλληλοι πυκνωτές’, ενώ οι ‘πυκνωτές σειράς’ που συνδέονται ώστε να διέρχεται δια μέσου αυτών η ένταση της γραμμής, έχουν χρησιμοποιηθεί διεθνώς σε πολύ περιορισμένη έκταση.

Οι πυκνωτές συχνά εγκαθίστανται στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Η χρησιμοποίηση όμως των πυκνωτών αυτών γίνεται συνηθέστερα με κριτήρια τις ανάγκες του δικτύου μεταφοράς. Αντίθετα όταν εγκαθίστανται επί των γραμμών ΜΤ, η εγκατάσταση τους αφορά σχεδόν αποκλειστικά τα δίκτυα διανομής.

Οι παράλληλοι πυκνωτές συνδέονται είτε μόνιμα «μόνιμοι πυκνωτές», είτε μέσω διακοπών και διάταξης αυτοματισμού «αποζεύξιμοι πυκνωτές». Η διάταξη αυτοματισμού συνίσταται βασικά από έναν Η/Ν τάσεως, ο οποίος προκαλεί τη ζεύξη των πυκνωτών, όταν η τάση μειωθεί κάτω από μια ορισμένη τιμή (οπότε προκαλείται ανύψωση τάσης) ή την απόζευξη, όταν η τάση υπερβεί μια άλλη ορισμένη τιμή. [12]

2.2.3 Λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ

Ο κύριος προορισμός ενός Μ/Σ ισχύος είναι ο μετασχηματισμός της ενέργειας μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης. Εντούτοις, κάθε μετασχηματιστής ή αυτομετασχηματιστής είναι εφοδιασμένος με λήψεις για την αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού, εκτελώντας με αυτό τον τρόπο το δευτερεύον καθήκον του ελέγχου της δευτερογενούς τάσης. Στους μεγάλους Μ/Σ και ΑΜ/Σ ΥΥΤ/ΥΤ ή ΥΤ/ΜΤ του δικτύου ο έλεγχος αυτός της τάσης γίνεται κατά κανόνα με αλλαγή της τάσης υπό φορτίο. Ωστόσο, στους μικρούς Μ/Σ διανομής ΜΤ/ΧΤ η αλλαγή των λήψεων μπορεί να γίνει μόνο με το μετασχηματιστή εκτός τάσεως. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασύνδεσης ή υποβιβασμού του δικτύου. Η περιοχή μεταβολής της τάσης στους μικρούς Μ/Σ διανομής είναι συνήθως $\pm 5\%$, ενώ τα βήματα αλλαγής της τάσης είναι 2.5% ή 1.25%.

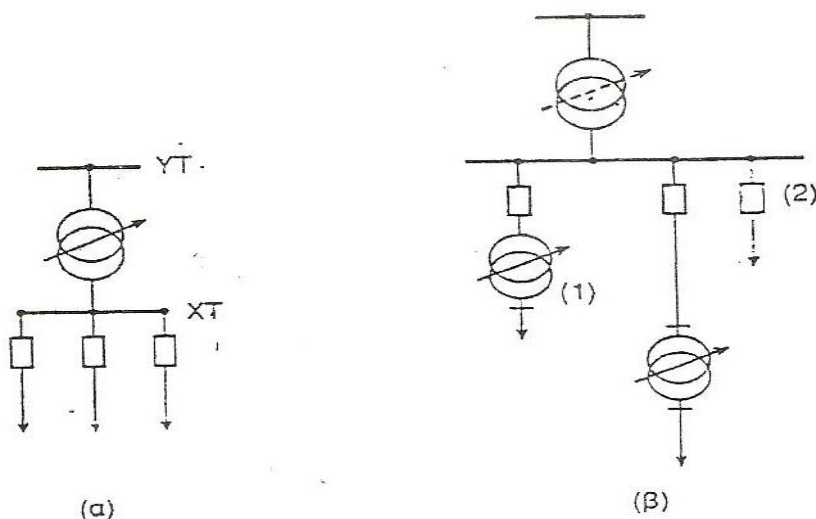
Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ 20kV/0.4kV, με λήψεις $\pm 2.5\%$ και $\pm 5\%$.

- Εάν ληφθεί η λήψη -5%, τότε η τάση γίνεται 0.95 φορές την ονομαστική, δηλαδή 0.95 αμ/1.0 αμ ή αλλιώς 19kV/0.4kV.
- Ομοίως, αν λάβουμε τη λήψη +2.5%, η τάση θα γίνει 1.025 της ονομαστικής, δηλαδή 1.025 αμ/1.0 αμ ή αλλιώς 20.5kV/0.4kV. [18]

2.2.4 Θέση εγκατάστασης ρυθμιστών τάσης

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι ρυθμιστές είναι ενσωματωμένοι στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Στις περιπτώσεις αυτές η προκαλούμενη ρύθμιση γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις γραμμές ΜΤ που αναχωρούν από τον ίδιο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, όπως δείχνεται στο σχήμα

2.3(α). Η ταυτόχρονη ρύθμιση δεν δημιουργεί προβλήματα όταν τα φορτία των γραμμών μεταβάλλονται περίπου ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια του 24ώρου, όπως συμβαίνει όταν είναι της ίδιας κατηγορίας (πχ οικιακά). Αν αυτό όμως δε συμβαίνει μπορεί να εγκαθίστανται είτε ανεξάρτητοι ρυθμιστές τάσεως ανά γραμμή, σχήμα 2.3(β), είτε ανά ομάδες γραμμών, ενώ ο ρυθμιστής τάσεως του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ καθορίζει τις ρυθμίσεις των λοιπών γραμμών, εφόσον βέβαια υπάρχει. Επιπλέον, γίνεται συχνά εγκατάσταση ανεξάρτητων ρυθμιστών τάσης κατά μήκος των γραμμών, στον κορμό ή και στις διακλαδώσεις. [12]



Σχήμα 2.3: Θέσεις εγκατάστασης ρυθμιστών τάσης.

2.3 Χρήση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στον έλεγχο τάσης

Η μεγάλη διεξόδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής τα τελευταία χρόνια παρέχει νέες δυνατότητες στην ρύθμιση της τάσης. Συγκεκριμένα, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, όπως τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, έχουν την δυνατότητα, μέσω του αντιστροφέα (*inverter*) με τον οποίο συνδέονται στο δίκτυο, να παράγουν ή να απορροφούν άεργο ισχύ. Πρόκειται για ένα σημαντικό πλεονέκτημα καθώς ανάλογα την περίπτωση, μπορούν να διορθώσουν τα επίπεδα τάσης σε άλλα σημεία του δικτύου και να ρυθμίσουν τα επίπεδα τάσης κατά μήκος της γραμμής.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να ελέγχουμε αυτόματα την συμπεριφορά των DG σχετικά με το πόσο χωρητικά ή επαγωγικά θα λειτουργούν. Μερικοί είναι οι εξής:

- *Σταθερός συντελεστής ισχύος (Fixed cosφ)*: Όπου ο ΣΙ διατηρείται σταθερός σε μια τιμή, και έτσι η άεργος ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με την ενεργό παραγωγή.
- *Ρυθμιζόμενος συντελεστής ισχύος (Power Factor Control – PFC)*: Ο ΣΙ μπορεί να μεταβάλλεται εντός ενός επιτρεπτού περιθωρίου, μεταβάλλοντας έτσι και την παραγόμενη ή καταναλισκόμενη άεργο ισχύ.

- *Μοναδιαίος συντελεστής ισχύος (Unity Power Factor – UPC):* Ο ΣΙ ορίζεται να είναι ίσος με την μονάδα και η άεργος είναι μηδενική. Έλεγχος τάσης μπορεί να γίνει μεταβάλλοντας μόνο την ενεργό ισχύ.
- *Καθορισμένη άεργος ισχύς (Fixed Q):* Επιβάλλεται σε όλους τους inverter του δικτύου να απορροφούν την ίδια ποσότητα άεργου, ανεξάρτητα με το αν υπάρχει ανεπιθύμητη ανύψωση τάσης ή όχι.
- *Q at night:* Αυτή η λειτουργία επιτρέπει στον αντιστροφέα να παρέχει άεργο ισχύ στο δίκτυο για την καλύτερη λειτουργία του, σε περιόδους μηδενικής ενεργού παραγωγής, όπως την νύχτα για τα φωτοβολταϊκά. Η λειτουργία αυτή του αντιστροφέα μπορεί να εφαρμόζεται αυτόματα όταν η παραγωγή είναι χαμηλή, και να επαναφέρεται η κανονική λειτουργία είτε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα είτε όταν τα επίπεδα παραγωγής ξεπεράσουν κάποιο όριο. Στα μεγάλα εργοστάσια όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και στα φωτοβολταϊκά πάρκα χρειάζεται άεργος ισχύς, και κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να αποκτηθεί μέσω του αντιστροφέα των μονάδων παραγωγής. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι ανάγκες για άεργο ισχύ μπορούσαν να αντισταθμιστούν με την χρήση πυκνωτών υψηλού όμως κόστους. Με την λειτουργία Q at night, γίνεται εφικτή η αντιστάθμιση της αναγκαίας άεργου ισχύος και την νύχτα.

Υπάρχουν πολλοί άλλοι τρόποι και συνδυασμοί τρόπων για τον έλεγχο της χωρητικής/επαγωγικής συμπεριφοράς των DG, και ο καθένας χρησιμοποιείται ανάλογα με την απαίτηση του εκάστοτε δικτύου. Συγκεκριμένα, πολλοί αντιστροφείς μονάδων παραγωγής, έχουν ενσωματωμένο κάθε πιθανό τρόπο ελέγχου (πχ. σταθερό ΣΙ, ρυθμιζόμενο, μοναδιαίο) και ο χρήστης επιλέγει τον τρόπο και τις παραμέτρους για κάθε περίπτωση. [1], [18], [19]

2.4 Κεντρικός και αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης

Ιστορικά, ο έλεγχος τάσης στα δίκτυα διανομής γίνονταν κυρίως με αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού (*tap*) των μετασχηματιστών διανομής. Επιπλέον, χρησιμοποιούντο και μέθοδοι αντιστάθμισης άεργου ισχύος όπως η εγκατάσταση συστοιχίας πυκνωτών. Σήμερα, η αυξανόμενη παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει καινούργιες δυνατότητες στην ρύθμιση της τάσης.

Οι σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου συμπεριλαμβάνουν την χρήση των μονάδων DG και μπορούν να διακριθούν στις εξής τρεις διαφορετικές κατηγορίες: τον κεντρικό (*centralized*), τον ημισυντονισμένο (*semi coordinated*) και τον αποκεντρωμένο (*decentralized*), όπως φαίνονται στο σχήμα 2.4. Αναλυτικότερα περιγράφονται ακολούθως:

- *Κεντρικός έλεγχος:* Σε ένα σύστημα κεντρικού ελέγχου επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για όλη την περιοχή από έναν κεντρικό ελεγκτή. Προκειμένου να είναι δυνατός ο συγχρονισμός, όλες οι περιοχές στέλνουν τα

δεδομένα τους στον κεντρικό ελεγκτή, και αφού αυτός υπολογίσει τη βέλτιστη λύση για όλο το σύστημα, αναδιανέμει τα υπολογισμένα αποτελέσματα σε κάθε περιοχή.

- *Αποκεντρωμένος έλεγχος:* Στον αποκεντρωμένο έλεγχο το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης διαιρείται σε υποπροβλήματα που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή-ζώνη. Σε αντίθεση με το σχεδιασμό κεντρικού ελέγχου, κάθε περιοχή διαθέτει ένα σύνολο πρακτόρων, που επιλύουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ξεχωριστά για την δική τους περιοχή. Για τη λήψη της συνολικής λύσης χρειάζεται ο συντονισμός μεταξύ των πρακτόρων κάθε περιοχής.
- *Ημισυντονισμένος έλεγχος:* Ο ημισυντονισμένος έλεγχος συνδυάζει λειτουργίες του κεντρικού και του αποκεντρωμένου ελέγχου. Επειδή αυτός ο τρόπος βασίζεται στον καλό συντονισμό μεταξύ των συσκευών, το σύστημα επικοινωνίας πρέπει να είναι πολύ αξιόπιστο και εύρωστο.



Σχήμα 2.4: Διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου τάσης.

Από τις παραπάνω μεθόδους, ο αποκεντρωμένος έλεγχος προτιμάται στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς όπως αναλύεται παρακάτω συγκεντρώνει ένα πλήθος συγκριτικών πλεονεκτημάτων.

- Αρχικά στον κεντρικό έλεγχο θα πρέπει να γίνει ανταλλαγή ενός μεγάλου πλήθους δεδομένων καθώς σε κάθε επαναληπτικό βήμα κάθε περιοχή θα πρέπει να στέλνει τα τρέχοντα δεδομένα της στον κεντρικό ελεγκτή και μετά τον υπολογισμό των βέλτιστων αποτελεσμάτων από τον ελεγκτή, αυτά θα πρέπει να μεταφέρονται ξανά στην αντίστοιχη περιοχή. Το γεγονός αυτό, μπορεί να εισάγει σημαντικές καθυστερήσεις λόγω τηλεπικοινωνιακού φόρτου του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Αντίθετα, στον αποκεντρωμένο έλεγχο, ανταλλαγή δεδομένων μπορεί να χρειαστεί μόνο σε γειτονικές περιοχές, με αποτέλεσμα η καθυστέρηση στο σύστημα ελέγχου να είναι σημαντικά μικρότερη. Συνεπώς γίνεται κατανοητό ότι ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολλαπλών διαταραχών, όπου πρέπει να παρέχεται μια γρήγορη ικανότητα λήψης αποφάσεων για την εύρεση της κατάλληλης λύσης με σκοπό τη διόρθωση της αστάθειας που προκαλείται στο σύστημα, είναι απαραίτητη η χρήση μιας αποκεντρωμένης στρατηγικής ελέγχου.
- Ο κεντρικός σχεδιασμός ελέγχου δεν είναι αρκετά στιβαρός, καθώς σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου μπορεί να υπάρχει αποτυχία στη λειτουργία

του κεντρικού ελεγκτή, προκαλείται απώλεια δυνατότητας ελέγχου σε όλες τις περιοχές. Η αδυναμία ελέγχου ενός μεγάλου μέρους του δικτύου μπορεί να οδηγήσει στη διάδοση των διαταραχών και σε μεγάλα προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος. 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 συχνά βασίζει την βελτιστοποίηση των προβλημάτων της σε διαφορετικά κριτήρια, με διαφορετικούς στόχους και περιορισμούς. 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 σε έναν κεντρικό σχεδιασμό.
- Τέλος, στον κεντρικό έλεγχο το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι αρκετά μεγάλο και σύνθετο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Αντίθετα στον αποκεντρωμένο έλεγχο το κύριο πρόβλημα βελτιστοποίησης αναλύεται σε επιμέρους υποπροβλήματα και συνεπώς η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης των απαραίτητων υπολογισμών μειώνεται σημαντικά. Έτσι στον αποκεντρωμένο σχεδιασμό ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα παράλληλων διαδικασιών ελέγχου, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της ταχύτητας των υπολογισμών και του ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. [10], [7]

Κεφάλαιο 3^ο – Διαχωρισμός του δικτύου διανομής σε ζώνες με βάση τον ε-διαχωρισμό

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει τον αλγόριθμο διαχωρισμού που βασίζεται στον πίνακα ευαισθησιών του δικτύου και έναν αριθμό-κατώφλι ε , τον εφεξής λεγόμενο ε-διαχωρισμό. Σε αυτά τα πλαίσια γίνεται αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου και εφαρμογή του στο πρότυπο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE και στην γραμμή P25 της Σπερχειάδας.

3.2 Πίνακας ευαισθησιών δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Η τιμή της ευαισθησίας κάθε ζυγού προσδιορίζεται από την τιμή της σύνθετης αντίστασης γραμμής του δικτύου την τοπολογία του και την εκάστοτε φόρτιση. Ο πίνακας ευαισθησιών Λ , πρακτικά, προκύπτει με αντιστροφή του Ιακωβιανού πίνακα του δικτύου (βλέπε Παράρτημα Β) και περιγράφει την γραμμική σχέση που συνδέει τις μεταβολές ενεργού και άεργου ισχύος κάθε ζυγού με την μεταβολή της τάσης των ζυγών που προκαλείται από αυτήν την αλλαγή ισχύος. Μαθηματικά διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\begin{pmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_{\theta P} & \Lambda_{\theta Q} \\ \Lambda_{VP} & \Lambda_{VQ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}, \text{ με } \Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_{\theta P} & \Lambda_{\theta Q} \\ \Lambda_{VP} & \Lambda_{VQ} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Καθένας από τους υποπίνακες του Λ έχει διαστάσεις $n \times n$, όπου n ο αριθμός των κόμβων του δικτύου εκτός του ζυγού αναφοράς. Είναι γνωστό ότι $P \sim \theta$ και $Q \sim V$ οπότε αναμένουμε οι εξαρτήσεις Λ_{VQ} και $\Lambda_{\theta P}$ να είναι ισχυρότερες των άλλων δύο. Επιπλέον, στον πίνακα Λ όσο και στον $(\Delta P \ \Delta Q)'$ κρατούνται οι στήλες και γραμμές που αντιστοιχούν σε ζυγούς του δικτύου που έχουν εγκατεστημένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DGs) γιατί εκεί μόνο έχει νόημα η μεταβολή άεργου ισχύος πρωτίστως και ενεργού δευτερευόντως.

Αναπτύσσοντας την δεύτερη γραμμή της (3.1) και θεωρώντας μια αρχική τιμή της τάσης V_0 και μια επιθυμητή τιμή V_r για την τάση υπολογίζεται η απαιτούμενη προσαρμογή ενεργού ισχύος x_P και άεργου x_Q των DGs από την επόμενη σχέση.

$$V_r = V_0 + \Lambda_{VQ} \cdot x_Q + \Lambda_{VP} \cdot x_P \quad (3.2)$$

όπου $x_P = P_r - P_0$ με P_r και P_0 την παραγόμενη ενεργό ισχύ μετά και πριν την ρύθμιση τάσης αντίστοιχα και $x_Q = Q_r - Q_0$ με Q_r και Q_0 την παραγόμενη άεργο ισχύ μετά και πριν την ρύθμιση τάσης. [1]

3.3 Ο ε-διαχωρισμός

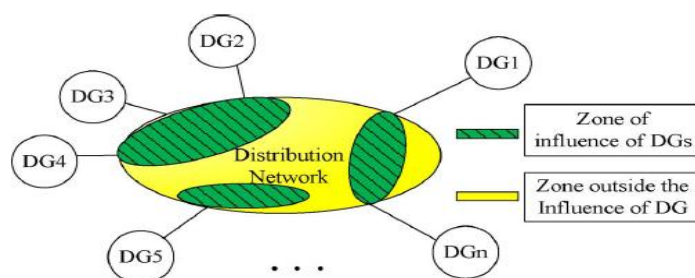
Ο ε-διαχωρισμός χρησιμοποιεί τον πίνακα ευαισθησιών προκειμένου να κρατήσει τους ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των κόμβων του δικτύου και κατά επέκταση και των

DGs και να αγνοήσει τις ασθενείς διασυνδέσεις. Έτσι, το δίκτυο χωρίζεται σε αρκετά μικρότερα υποδίκτυα που καλούνται και ζώνες του δικτύου. Κάθε ζώνη αντιμετωπίζει με ανεξάρτητο τρόπο από τις άλλες τις τυχόν παραβιάσεις τάσης.

Εφαρμόζουμε λοιπόν αυτή την μέθοδο για τον ε-διαχωρισμό του πίνακα ευαισθησιών Λ λαμβάνοντας έναν υποπίνακα, έστω τον Λ_{VP} και κρατώντας τα στοιχεία του πίνακα που είναι μεγαλύτερα από έναν κατάλληλα επιλεγμένο αριθμό ε . Σε επόμενη παράγραφο αναλύεται ο τρόπος επιλογής του ε . Η ως άνω μέθοδος καταλήγει στην επόμενη σχέση.

$$\Lambda_{VP} = \Lambda'_{VP} + \varepsilon \cdot R \quad (3.3)$$

όπου Λ'_{VP} είναι ο πίνακας ευαισθησιών με στοιχεία μεγαλύτερα από το ε , που σημαίνει ότι κρατούνται μόνο οι ισχυροί δεσμοί, και $\varepsilon \cdot R$ είναι το υπόλοιπο του αρχικού πίνακα που υποδεικνύει τις ασθενείς συνδέσεις. Προφανώς όλα τα στοιχεία του R είναι μικρότερα ή ίσα του ένα. Ο πίνακας Λ'_{VP} πέραν της ποσοτικής περιγραφής της σύνδεσης μεταξύ των κόμβων και των DGs των ζωνών υποδεικνύει και το εύρος επιρροής κάθε μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής και εν τέλει προσδιορίζει επακριβώς και την νέα τοπολογία του δικτύου που τώρα αποτελείται από ζώνες.



Σχήμα 3.1: Ζώνες επιρροής των DGs σε ένα ε-διαχωρισμένο δίκτυο.

Είναι βαρύνουσας σημασίας η υπόδειξη ενός τρόπου για την απόκτηση της τοπολογίας των προκυπτουσών υποδικτύων (ζωνών) από τον πίνακα Λ'_{VP} . Προτείνεται λοιπόν ο αλγόριθμος διάσχισης γράφων κατά βάθος γνωστός και στην αγγλική βιβλιογραφία ως DFS (Deep First Search).

Σημειώνεται ότι με τον ίδιο τρόπο μπορεί να εφαρμοστεί ο ε-διαχωρισμός και στον υποπίνακα Λ_{VQ} . Συνυπολογίζοντας ότι $Q \sim V$ βγαίνει το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται σε αυτόν τον υποπίνακα ο διαχωρισμός προκειμένου να λαμβάνονται και οι επιμέρους ζώνες του αρχικού δικτύου. Αυτό παρουσιάζεται στο δίκτυο του σχήματος 3.1 όπου λαμβάνονται οι ζώνες επιρροής των DGs (ζώνες). Είναι φανερό ότι σε μια ζώνη μπορεί να υπάρχουν πολλά DGs ενώ υπάρχουν και ζώνες χωρίς κανένα DG. Οι ζώνες επίσης μπορούν να επεκτείνονται ή να συρρικνώνονται με την αλλαγή του κατωφλίου του ε . Στις ζώνες όπου δεν υπάρχουν DG η ρύθμιση της τάσης μπορεί να επιτευχθεί με άλλους ελέγχους, οι οποίοι αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Επειδή ο διαχωρισμός ε σπάει το δίκτυο σε επιμέρους ζώνες, επιτρέπει και στο σύστημα επικοινωνίας να χωριστεί σε επιμέρους υποσυστήματα. [1]

3.4 Ο αλγόριθμος DFS (Deep First Search)

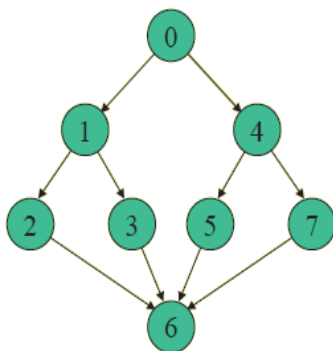
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο ο αλγόριθμος DFS χρησιμοποιείται ώστε να εξαχθεί η τοπολογία του δικτύου από τον ε-διαχωρισμένο του πίνακα ευαισθησιών A'_{VQ} . Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται ως πίνακας γειτνίασης. Εδώ είναι χρήσιμο να γίνει μια μικρή αναφορά στους πίνακες γειτνίασης.

Ένας πίνακας γειτνίασης A έχει διαστάσεις $n \times n$, όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων του υπό εξέταση γράφου. Κάθε στοιχείο a_{ij} που δεν ανήκει στην διαγώνιο εκφράζει τον αριθμό των ακμών μεταξύ των κόμβων i και j , οπότε αν ο γράφος δεν είναι κατευθυνόμενος ο πίνακας είναι συμμετρικός. Τα στοιχεία της διαγωνίου a_{ii} εκφράζουν τον αριθμό των ακμών που εκκινούν και καταλήγουν στον κόμβο i , σε μη κατευθυνόμενους γράφους συνήθως ο αριθμός των ακμών διπλασιάζεται ενώ σε κατευθυνόμενους μένει όπως έχει. [3]

Θέλοντας να δούμε τον πίνακα A'_{VQ} ως πίνακα γειτνίασης με βάση τα προηγούμενα και θεωρώντας ότι περιγράφει έναν κατευθυνόμενο γράφο που υπάρχει το πολύ μια ακμή ανά κατεύθυνση, απλά αντικαθιστούμε όλα τα μη μηδενικά στοιχεία με 1. Ο προκύπτων πίνακας περιγράφει λοιπόν τον γράφο του δικτύου. Η ανάγνωση του πίνακα γίνεται με τον αλγόριθμο DFS όπως περιγράφεται ακολούθως.

Η διάσχιση του γράφου ξεκινά από μια κορυφή, η επιλογή της οποίας είναι τυχαία, και προχωρά στον αριστερότερο κόμβο που συνδέεται με την κορυφή κρατώντας στην μνήμη και τους υπόλοιπους κόμβους που έχουν κάποια σύνδεση με την κορυφή. Ο νέος κόμβος γίνεται κορυφή πλέον και συνεχίζεται η διάσχιση μέχρις ότου να μην υπάρχει κάποια σύνδεση με την κορυφή. Τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στον πιο πρόσφατα αποθηκευμένο στην μνήμη κόμβο και προχωρά την διάσχιση μέχρι να αδειάσει τελείως η μνήμη. [2]

Ακολουθεί ένα παράδειγμα διάσχισης γράφου με τον αλγόριθμο DFS.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα διάσχισης γράφου με τον αλγόριθμο DFS.

Η σειρά προσπέλασης των κόμβων του σχήματος 3.2 ξεκινώντας από την κορυφή 0 έχει ως ακολούθως: 0, 1, 2, 6, 3, 4, 5, 7.

Επανερχόμενοι τώρα στον διαχωρισμένο πίνακα A'_{VQ} και τον πίνακα γειννίαςης A που προκύπτει από αυτόν, εκλέγουμε τυχαία έναν κόμβο κορυφή και ελέγχουμε όλες τις συνδέσεις του από τον πίνακα A και πηγαίνουμε στον αριστερότερο κόμβο κάθε φορά ακολουθώντας πιστά την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Εδώ επειδή το αριστερότερο πολλές φορές απαιτεί κάποια επιπλέον τοπολογικής φύσεως πληροφορία, θεωρούμε αριστερότερο τον κόμβο με τον μικρότερο αύξοντα αριθμό δίχως να έχουμε κάποια βλάβη στη γενικότητα του προβλήματος. Επειδή όμως ο πίνακας υποκρύπτει συνήθως περισσότερους από έναν γράφους καθότι ο αρχικός έχει χωριστεί σε πολλούς υπογράφους όταν τελειώσει η προσπέλαση ενός υπογράφου πρέπει να συνεχιστεί η ίδια διαδικασία έως ότου όλοι οι κόμβοι του αρχικού γράφου έχουν επισκεφτεί μια τουλάχιστον φορά. Με αυτόν τον τρόπο εξάγονται όλοι οι υπογράφοι-ζώνες του αρχικού δικτύου.

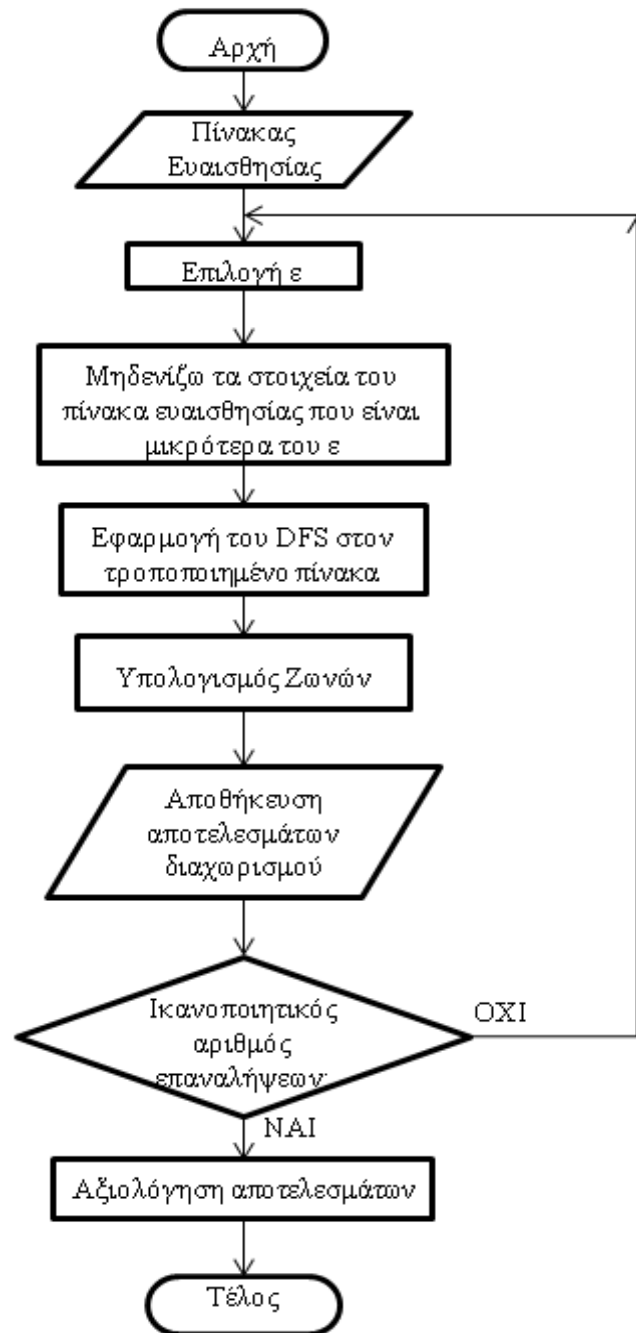
3.5 Επιλογή του κατάλληλου αριθμού ϵ

Έχει τονιστεί ιδιαίτερα ήδη από την παράγραφο 3.3 ότι η επιλογή του ϵ παίζει καθοριστικό ρόλο στον διαχωρισμό καθώς είναι αυτό που στην ουσία καθορίζει ποια σύνδεση είναι αρκετά αδύναμη ώστε να «αφαιρεθεί» και ποια αρκετά ισχυρή ώστε να «κρατηθεί». Έτσι οι ζώνες μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με το ϵ .

Όσο αφορά την επιλογή της παραμέτρου ϵ υπάρχει ένας απλός κανόνας σύμφωνα με τον οποίο μεγαλύτερη τιμή του ϵ καταλήγει σε περισσότερα τον αριθμό δίκτυα με λιγότερους κόμβους όμως το καθένα. Η τιμή του ϵ προφανώς πρέπει να έχει κάποια σχέση με τον προς διαχωρισμό πίνακα, δηλαδή είτε πρέπει να είναι κάποιο στοιχείο του είτε να βρίσκεται στο εύρος τιμών των στοιχείων του. Είναι φανερό ότι επιλέγοντας το μικρότερο στοιχείο του πίνακα ως ϵ ο πίνακας μένει ως έχει και το δίκτυο έχει μια ζώνη που περιέχει όλους τους κόμβους, ενώ με επιλογή του μεγαλύτερου στοιχείου ο πίνακας μηδενίζεται και οι ζώνες εκφυλίζονται περιέχοντας ένα μόνο κόμβο η καθεμία.

Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επιλογή του ϵ εξαρτάται από τον επιθυμητό αριθμό ζωνών και το πλήθος κόμβων που θα περιέχει η κάθε ζώνη. Βρίσκεται λοιπόν στην ευχέρεια του προγραμματιστή να επιλέξει το ϵ . [4]

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής που συνοψίζει τόσο τον αλγόριθμο για τον ϵ -διαχωρισμό όσο και τον τρόπο εκλογής του ϵ .



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής για την εκλογή του ϵ .

3.6 Εφαρμογή του αλγορίθμου για τον ϵ -διαχωρισμό

Τα όσα περιγράφηκαν στις παραγράφους 3.2-3.5 εφαρμόζονται στο δίκτυο διανομής 33 ζυγών της IEEE και στο δίκτυο 101 ζυγών της Σπερχειάδας. Τα στοιχεία που αφορούν το φορτίο κάθε ζυγού και την παραγωγή ενέργειας από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής των δύο δικτύων καθώς επίσης και η τοπολογία τους δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού σε κάθε δίκτυο ξεχωριστά παρουσιάζονται στις υποπαραγράφους 3.6.1 και 3.6.2.

Στα όσα ακολουθούν ισχύουν οι παραδοχές:

- ✓ Κάθε ζώνη περιέχει παραπάνω από έναν κόμβο δηλαδή ζώνες που αποτελούνταν από έναν και μόνο κόμβο αγνοήθηκαν.
- ✓ Η φόρτιση των δικτύων υπό την οποία πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός είναι με ονομαστικό φορτίο και παραγωγή μονάδων DG ίση με την εγκατεστημένη (βλέπε Παράρτημα Α). Οι μονάδες DG δεν παράγουν ούτε καταναλώνουν άεργο ισχύ, δηλαδή λειτουργούν σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

3.6.1 Διαχωρισμός σε ζώνες του δικτύου 33 ζυγών της IEEE

Αρχικά, για το δίκτυο 33 ζυγών δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές για το ϵ και αποφασίζεται ποια είναι η προτιμότερη. Επειδή οι τιμές του ϵ πρέπει να έχουν κάποια σχέση με τον πίνακα ευαισθησιών (παράγραφος 3.5), εντοπίζεται η μεγαλύτερη και η μικρότερη τιμή του πίνακα και εκλέγονται ϵ εντός αυτού του εύρους. Έπειτα για το επιλεγμένο ϵ παρουσιάζονται ποσοτικά χαρακτηριστικά του διαχωρισμού.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των στοιχείων του πίνακα ευαισθησιών είναι 2.1126 και 0.011 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα διαχωρισμού για διαφορετικές τιμές του ϵ στο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE.

Τιμή ϵ	Αριθμός ζωνών	Ποσοστό κάλυψης κόμβων (%)	Ποσοστό κάλυψης κόμβων από DGs (%)	Μέγιστος αριθμός κόμβων σε ζώνη
0.01	1	100	100	32
0.05	2	93.8	93.8	27
0.15	3	84.4	84.4	22
0.35	3	71.9	71.9	12
0.45	3	62.5	62.5	12
0.55	2	50.0	50.0	10

Στην πρώτη στήλη του πίνακα 3.1 εκθέτονται οι διαφορετικές τιμές του ϵ , στην δεύτερη σημειώνεται ο προκύπτων αριθμός ζωνών, στην τρίτη το ποσοστό των κόμβων που καλύπτονται από κάποια ζώνη, στην τέταρτη το ποσοστό των κόμβων που καλύπτονται από κάποια ζώνη που έχει τουλάχιστον ένα DG και στην τελευταία στήλη αναφέρεται ο μέγιστος αριθμός κόμβων που υπάρχει σε ομάδα.

Όσο αφορά τον αριθμό των ζωνών παρατηρούμε ότι με αύξηση της τιμής του ϵ έχουμε και αύξηση του αριθμού των ζωνών. Παρατηρούμε ωστόσο ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει μεταξύ των τιμών $\epsilon=0.45$ και $\epsilon=0.55$. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη μας την παραδοχή που έγινε σύμφωνα με την οποία ζώνες με έναν και μόνο κόμβο αγνοούνται. Αναλυτικότερα, αυτό που συμβαίνει είναι ότι αυξανόμενου του ϵ αυξάνονται μεν οι ζώνες περιέχοντας όμως λιγότερα στοιχεία η

καθεμία έτσι καταλήγουμε κάποια στιγμή σε ζώνες με ένα μόνο στοιχείο οι οποίες και διαγράφονται. Έτσι αιτιολογείται η μείωση από 3 σε 2 ζώνες που παρατηρήθηκε. Επίσης είναι προφανές ότι προκειμένου ο τυχόν έλεγχος ή και άλλες ενέργειες που σχετίζονται με ένα δίκτυο διανομής να διευκολύνονται οι ζώνες πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερες.

Το ποσοστό κάλυψης κόμβων από κάποια ζώνη καθώς επίσης και το ποσοστό κάλυψης από ζώνη με DG είναι πολύ σημαντικές παράμετροι στην αξιολόγηση καθώς ειδικά ο δεύτερος δείχνει κατά πόσο είναι δυνατή παρέμβαση, σε περίπτωση ρύθμισης τάσης για παράδειγμα, σε ένα σύνολο από κόμβους. Για παράδειγμα, αν το ποσοστό κάλυψης είναι μικρό υπάρχει περίπτωση να χρειάζεται ρύθμιση τάσης ένας κόμβος ο οποίος βρίσκεται εκτός ζώνης επιρροής κάποιου DG, έτσι καθίστανται αδύνατος ο έλεγχος γεγονός που δεν είναι επιθυμητό. Έτσι είναι επιδιωκόμενο ένα υψηλό ποσοστό κάλυψης κόμβων από DGs. Στο παρόν δίκτυο παρατηρείται ότι η αύξηση του ϵ οδηγεί σε μικρότερα ποσοστά κάλυψης. Άρα το ϵ δεν μπορεί να είναι οσοδήποτε μεγάλο.

Τέλος, ο μέγιστος αριθμός κόμβων σε ζώνη είναι ένα μέγεθος που δείχνει την έκταση σε κόμβους της μεγαλύτερης ζώνης και μας απασχολεί σε ζητήματα που αφορούν έλεγχο τάσης καθώς προσδιορίζει το μέγεθος του προβλήματος. Αν και ο παράγοντας αυτός αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε πολύ μεγάλα σε κόμβους δίκτυα, αποτελεί ένδειξη καλής κατανομής κόμβων στις ζώνες. Επιδιώκεται λοιπόν να υπάρχει ούτε πολύ μεγάλος αριθμός κόμβων αλλά ούτε και πολύ μικρός αριθμός κόμβων στην μεγαλύτερη σε έκταση ζώνη. Παρατηρείται εμπειρικά ότι ένα ποσοστό γύρω στο 40% επί του συνόλου των κόμβων παρουσιάζει επιθυμητά αποτελέσματα.

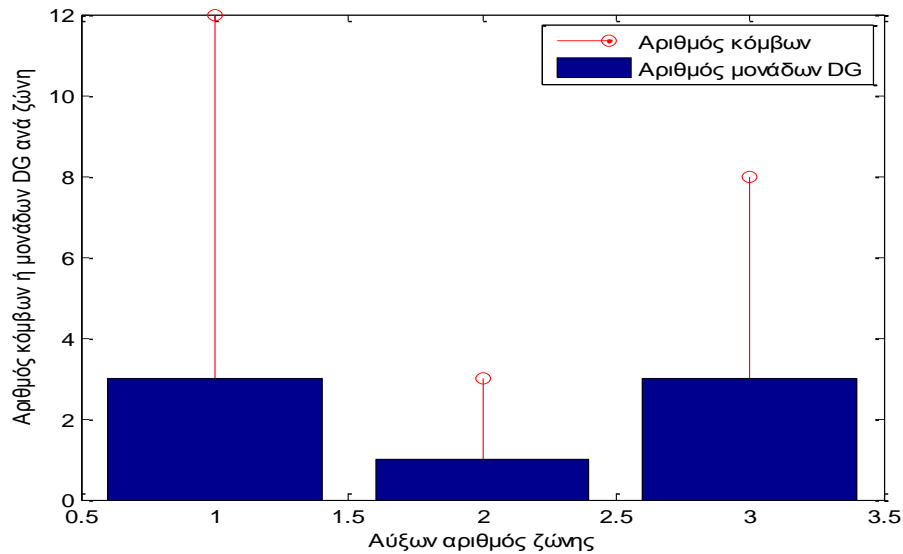
Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η καλύτερη επιλογή για το ϵ θα ήταν αυτή που συνδυάζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό ζωνών και υψηλότερο ποσοστό κάλυψης από DGs καθώς επίσης και ικανοποιητικό μέγιστο αριθμό κόμβων σε ζώνη. Παρατηρώντας τον πίνακα 3.1 φαίνεται ότι το ποσοστό κάλυψης των κόμβων από κάποια ζώνη και το αντίστοιχο ποσοστό κάλυψης από ζώνη με DG είναι το ίδιο, γεγονός που φανερώνει ότι το δίκτυο έχει αρκετά DG ώστε να μην μείνει κάποια ζώνη δίχως DG.

Ο μέγιστος αριθμός ζωνών για αυτό το δίκτυο είναι 3 και συνοδεύεται από ικανοποιητικό ποσοστό κάλυψης (71.9%) και ικανοποιητικό μέγιστο αριθμό κόμβων σε ζώνη (12) για $\epsilon=0.35$. Άξιο παρατήρησης είναι το γεγονός ότι υπάρχει μια μονάδα DG που δεν ανήκει σε καμία ζώνη.

Για αυτή την τιμή του ϵ παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 τα αποτελέσματα του διαχωρισμού.

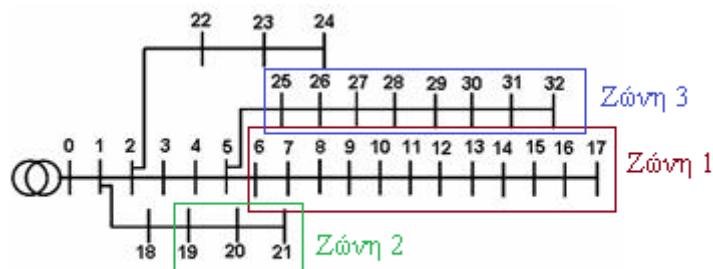
Πίνακας 3.2: Αναλυτική παρουσίαση των ζυγών και των DG που περιέχονται σε κάθε ζώνη για $\epsilon=0.35$.

Ζώνη 1						Ζώνη 2			Ζώνη 3						
Αριθμός ζυγών						Αριθμός ζυγών			Αριθμός ζυγών						
6	7	8	9	10	11	12	19	20	21	25	26	27	28	29	30
13	14	15	16	17				31	32						
Θέση μονάδων DG						Θέση μονάδων DG			Θέση μονάδων DG						
7	11	13	21	25	29	32									



Σχήμα 3.4: Αποτέλεσμα διαχωρισμού δικτύου 33 ζυγών για $\epsilon=0.35$.

Και γραφικά:



Σχήμα 3.5: Η τοπολογία του διαχωρισμένου δικτύου.

3.6.2 Διαχωρισμός σε ζώνες του δικτύου διανομής 101 ζυγών της Σπερχειάδας

Όσο αφορά το δίκτυο της Σπερχειάδας ακολουθείται ακριβώς η ίδια προσέγγιση με την παράγραφο 3.6.1, δοκιμάζοντας διαφορετικές τιμές για το ϵ και προκρίνοντας την καταλληλότερη. Τέλος, για το επιλεγμένο ϵ του δικτύου της Σπερχειάδας παρουσιάζονται τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του διαχωρισμού.

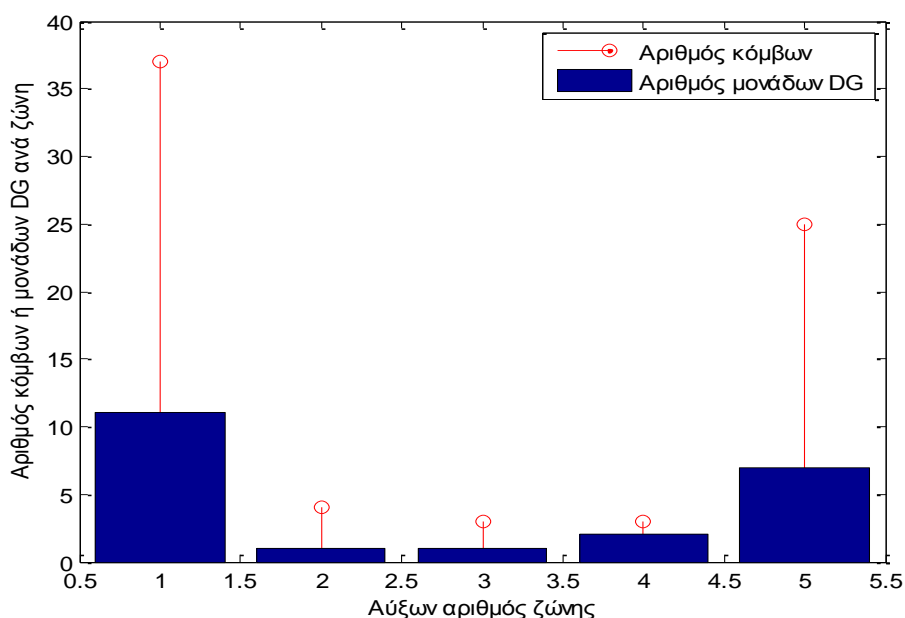
Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των στοιχείων του πίνακα ευαισθησιών είναι 2.0172 και 0.00008 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα διαχωρισμού για διαφορετικές τιμές του ϵ στο δίκτυο της Σπερχειάδας.

Τιμή ϵ	Αριθμός ζωνών	Ποσοστό κάλυψης κόμβων (%)	Ποσοστό κάλυψης κόμβων από DGs (%)	Μέγιστος αριθμός κόμβων σε ζώνη
0.00008	1	100	100	100
0.40	2	89	89	85
0.45	3	84	84	41
0.50	5	72	72	37
0.55	4	64	64	36
0.60	3	47	47	26

Για τον πίνακα 3.3 ισχύουν οι αντίστοιχες παρατηρήσεις που έγιναν και στον πίνακα 3.1. Όσο αφορά την επιλογή του ϵ , ο μέγιστος αριθμός ζωνών είναι 5 και αντιστοιχεί σε ικανοποιητικό ποσοστό κάλυψης (72%) και ικανοποιητικό μέγιστο αριθμό κόμβων σε ζώνη (37). Οπότε καλύτερη επιλογή φαίνεται η τιμή του $\epsilon=0.5$ που παρουσιάζει αυτά τα χαρακτηριστικά.

Για την τιμή του ϵ που υπολογίσαμε παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διαχωρισμού.



Σχήμα 3.6: Αποτέλεσμα διαχωρισμού δικτύου 101 ζυγών Σπερχειάδας για $\epsilon=0.5$.

Πίνακας 3.4: Αναλυτική παρουσίαση των ζυγών και των DG που περιέχονται σε κάθε ζώνη για $\varepsilon=0.5$.

Ζώνη 1			Ζώνη 2			Ζώνη 3			Ζώνη 4			Ζώνη 5		
Αριθμός ζυγών			Αριθμός ζυγών			Αριθμός ζυγών			Αριθμός ζυγών			Αριθμός ζυγών		
10	11	12	17	18	19	27	95	96	60	61	62	67	68	69
13	14	15	20									70	71	72
28	29	30										73	74	75
31	32	33										76	77	78
34	35	36										79	80	81
37	38	39										82	83	84
40	41	42										85	86	87
43	44	45										88	89	90
46	47	48										91		
49	50	51												
52	92	93												
97	98	99												
100														
Θέση μονάδων DG			Θέση μονάδων DG			Θέση μονάδων DG			Θέση μονάδων DG			Θέση μονάδων DG		
29	33	35	20			96			61	62		69	70	72
40	42	43										81	85	90
92	93	97										91		
99	100													

3.7 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται φανερό ότι ο προσδιορισμός των επιμέρους ζωνών με τον ε -διαχωρισμό είναι στατικός και εξαρτάται από την φόρτιση του δικτύου που θεωρήσαμε δεδομένη κατά την επιλογή του ε . Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι εύκολο να προσαρμόζονται οι ζώνες δυναμικά στα νέα δεδομένα που συνεπάγεται η αλλαγή της κατάστασης φόρτισης του δικτύου. Και αυτό συμβαίνει γιατί το ε παίρνει μια σταθερή τιμή που προσδιορίζεται από το εύρος των τιμών των στοιχείων του πίνακα ευαισθησιών, ο οποίος αλλάζει τις τιμές του ανάλογα με την φόρτιση. Οπότε η τιμή του ε που επιλέχθηκε σε μια κατάσταση φόρτισης σε κάποια άλλη είναι πιθανό να μην δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα διαχωρισμού.

Κεφάλαιο 4^ο – Έλεγχος τάσης με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος ελέγχου τάσης που στηρίζεται στην αντιστάθμιση άεργου ισχύος από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DGs) και διατυπώνεται ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Αρχικά, περιγράφεται μαθηματικά ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού ενώ ακολούθως ορίζεται το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο τάσης ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια και για τα δύο πρότυπα δίκτυα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εφαρμογή αυτού του τρόπου ελέγχου τάσης. Το δίκτυο διανομής χωρίζεται σε ζώνες με βάση τον ε-διαχωρισμό και πραγματοποιείται έλεγχος τάσης για την περίπτωση κεντρικού ελέγχου, αποκεντρωμένου για την τιμή του ϵ που επιλέχθηκε στις υποπαραγράφους 3.6.1 και 3.6.2 για το δίκτυο 33 ζυγών και για το δίκτυο της Σπερχειάδας αντίστοιχα. Τέλος, εξετάζεται και η περίπτωση όπου δεν επαρκεί η άεργος ισχύς για να επιτευχθεί ένα επιθυμητό αποτέλεσμα και πραγματοποιείται και περικοπή ενεργού ισχύος.

4.2 Γενικά για τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μια μαθηματική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων απόφασης με εξαιρετικά ευρύ πεδίο εφαρμογών από την οικονομία και την παραγωγή μέχρι την διοίκηση και την μεταφορά προϊόντων από τα σημεία παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης (*logistics*). Το μοντέλο του γενικού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού έχει την ακόλουθη μορφή:

Να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης x_1, x_2, \dots, x_n που μεγιστοποιούν (ή ελαχιστοποιούν) τη γραμμική συνάρτηση:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

και συγχρόνως ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n (\leq, =, \geq) b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n (\leq, =, \geq) b_2$$

$$\cdot \quad \quad \quad (4.1)$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n (\leq, =, \geq) b_m$$

και $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$

όπου: a_{ij}, b_i, c_j ($i = 1, 2, \dots, m$ και $j = 1, 2, \dots, n$) είναι δοσμένες σταθερές.

Η γραμμική συνάρτηση Z που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε λέγεται αντικειμενική συνάρτηση. Οι μεταβλητές x_i είναι οι μεταβλητές της απόφασης και παριστάνουν τις στάθμες των δραστηριοτήτων. Ο συντελεστής c_j της αντικειμενικής συνάρτησης ονομάζεται μοναδιαία αξία της δραστηριότητας j , γιατί όταν αυξάνεται κατά μια μονάδα η στάθμη της δραστηριότητας τότε η αντικειμενική συνάρτηση αυξάνεται κατά c_j . Οι συντελεστές b_i εκφράζουν την ποσότητα του μέσου i που μπορεί να διατεθεί για τις n δραστηριότητες. Οι συντελεστές a_{ij} εκφράζουν την ποσότητα του μέσου i που καταναλώνεται για κάθε μονάδα της δραστηριότητας j και λέγονται τεχνολογικοί συντελεστές.

Το παραπάνω σύστημα μπορεί να εκφραστεί και με την μορφή μητρικών εξισώσεων ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_x(\max_x) : Z &= C^T X \\ \text{υπό τον όρο: } AX(\leq, =, \geq) &B \\ \text{και } X &\geq 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

όπου $C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}$, $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$ και $B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$. Προκειμένου

να υπάρχει μια και μοναδική λύση του ως άνω συστήματος πρέπει ο αριθμός των αγνώστων να ισούται με τον αριθμό των εξισώσεων δηλαδή $m = n$. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις ισχύει $m \leq n$. [5], [6]

4.3 Διατύπωση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για έλεγχο τάσης με προσαρμογή άεργου ισχύος

Στην περίπτωση παραβίασης των ορίων για την τιμή της τάσης (διακυμάνσεις μεγαλύτερες από $\pm 5\%$) πρέπει να υπολογιστεί η βέλτιστη ποσότητα προσαρμογής άεργου ισχύος ώστε η τάση να επανέλθει εντός αποδεκτών ορίων. Με την βοήθεια της πληροφορίας του πίνακα ευαισθησιών που υπολογίσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορούμε να ορίσουμε το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που υπολογίζει την απαιτούμενη προσαρμογή.

Θεωρούμε ότι όλες οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DGs) λειτουργούν σε πρόγραμμα ελέγχου συντελεστή ισχύος (Power Factor Control mode-PFC) που σημαίνει ότι για δεδομένη παραγωγή ενεργού ισχύος μπορούν να μεταβάλλουν την παραγωγή ή κατανάλωση άεργου ισχύος αλλάζοντας τον συντελεστή ισχύος. Έτσι μπορούμε να επιτύχουμε έλεγχο τάσης μειώνοντας ή αυξάνοντας με βέλτιστο τρόπο την παραγωγή άεργου ισχύος. Η αντικειμενική συνάρτηση επομένως θα είναι:

για περίπτωση υπέρτασης (τάση μεγαλύτερη από 1.05 ανά μονάδα)

$$\max: x \quad (4.3)$$

για περίπτωση υπότασης (τάση μικρότερη από 0.95 ανά μονάδα)

$$\min: x \quad (4.4)$$

υποκείμενες και οι δύο τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$V_l \leq V_0 + \Lambda_{VQ}x \leq V_u \quad (4.5)$$

$$-Q_{max} - Q_{DG} \leq x \leq Q_{max} - Q_{DG} \quad (4.6)$$

όπου $x = [\Delta Q_{DG1}, \Delta Q_{DG2}, \dots, \Delta Q_{DGn}]'$ η μεταβολή στην παραγωγή έργου ισχύος των μονάδων DG, Λ_{VQ} ο υποπίνακας διαστάσεων $m \times n$ (m ο αριθμός των κόμβων και n ο αριθμός των DG) του πίνακα ευαισθησιών όπως λέχθηκε στην παράγραφο 3.2, V_l το κάτω όριο της τάσης (0.95 α.μ), V_u το άνω όριο της τάσης (1.05 α.μ), V_0 η αρχική τιμή της τάσης των m κόμβων του δικτύου, $Q_{DG} = [Q_{DG1}, Q_{DG2}, \dots, Q_{DGn}]'$ η αρχική έργος παραγωγή κάθε DG και Q_{max} η μέγιστη έργος ισχύς που δύναται να παράγει ή να καταναλώσει κάθε DG. Η διαφορά μέγιστης έργος και αρχικής παραγωγής ονομάζεται εφεδρεία έργος ισχύος, πιο συγκεκριμένα εφεδρεία παραγωγής είναι η $Q_{surplus,production} = Q_{max} - Q_{DG}$ ενώ εφεδρεία κατανάλωσης η $Q_{surplus,consumption} = -Q_{max} - Q_{DG}$. Η μέγιστη έργος καθορίζεται από το επίπεδο παραγωγής ενεργού ισχύος των DG καθώς επίσης και από τη γωνία του ελάχιστου επιτρεπτού επαγωγικού συντελεστή ισχύος πιο συγκεκριμένα $Q_{max} = P_{DG} \tan(\cos^{-1} \Sigma I_{min})$.

Όταν ελέγχουμε μια υπέρταση τα στοιχεία του πίνακα x είναι αρνητικοί αριθμοί που σημαίνει μείωση της παραγωγής (απορρόφηση) έργος ισχύος. Από την άλλη όταν ελέγχουμε μια υπόταση τα στοιχεία του πίνακα x είναι θετικοί αριθμοί που σημαίνει αύξηση της παραγωγής έργος ισχύος.

Με βάση τον ορισμό της σχέσης 4.1 θα πρέπει $x \geq 0$, οπότε στην περίπτωση της υπέρτασης όπου και $x < 0$ θέτουμε $x' = -x \geq 0$ και οι σχέσεις 4.3 και 4.5 μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\min: x' \quad (4.7)$$

$$\text{υπό τον όρο: } V_l \leq V_0 - \Lambda_{VQ}x' \leq V_u \quad (4.8)$$

$$-Q_{max} + Q_{DG} \leq x' \leq Q_{max} + Q_{DG} \quad (4.9)$$

Στη συνέχεια λύνεται το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού των 4.7, 4.8 και 4.9 και η πραγματική λύση είναι $x = -x'$.

Οι περιορισμοί στο αριστερό μέλος των εξισώσεων 4.6 και 4.9 που αφορούν την περίπτωση υπότασης και υπέρτασης αντίστοιχα υπερκαλύπτονται από την απαίτηση $x \geq 0$ η οποία ουσιαστικά αποτελεί και το κάτω όριο.

Προκειμένου οι εξισώσεις 4.5 και 4.8 να έρθουν στην μορφή της αντίστοιχης των σχέσεων της 4.2 γίνονται οι ακόλουθες απλές μαθηματικές πράξεις.

Για την 4.5:

$$\begin{aligned}
 V_l &\leq V_0 + \Lambda_{VQ}x \leq V_u \quad \rightarrow \\
 V_0 + \Lambda_{VQ}x &\leq V_u \quad \text{και} \quad V_l \leq V_0 + \Lambda_{VQ}x \quad \rightarrow \\
 \Lambda_{VQ}x &\leq V_u - V_0 \quad \text{και} \quad V_l - V_0 \leq \Lambda_{VQ}x \quad \rightarrow \\
 \Lambda_{VQ}x &\leq V_u - V_0 \quad \text{και} \quad -\Lambda_{VQ}x \leq V_0 - V_l \quad \rightarrow \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Ορίζω $A = \begin{bmatrix} \Lambda_{VQ} \\ -\Lambda_{VQ} \end{bmatrix}$ και $B = \begin{bmatrix} V_u - V_0 \\ V_0 - V_l \end{bmatrix}$ οπότε αναδιατάσσοντας την 4.10 η 4.5 αποκτά την επιθυμητή μορφή της 2.2 $Ax \leq B$.

Για την 4.8:

$$\begin{aligned}
 V_l &\leq V_0 - \Lambda_{VQ}x' \leq V_u \quad \rightarrow \\
 V_0 - \Lambda_{VQ}x' &\leq V_u \quad \text{και} \quad V_l \leq V_0 - \Lambda_{VQ}x' \quad \rightarrow \\
 -\Lambda_{VQ}x' &\leq V_u - V_0 \quad \text{και} \quad V_l - V_0 \leq -\Lambda_{VQ}x' \quad \rightarrow \\
 -\Lambda_{VQ}x' &\leq V_u - V_0 \quad \text{και} \quad \Lambda_{VQ}x' \leq V_0 - V_l \quad \rightarrow \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

Ορίζω $A = \begin{bmatrix} -\Lambda_{VQ} \\ \Lambda_{VQ} \end{bmatrix}$ και $B = \begin{bmatrix} V_u - V_0 \\ V_0 - V_l \end{bmatrix}$ οπότε αναδιατάσσοντας την 4.11 η 4.8 αποκτά την επιθυμητή μορφή της 4.2 $Ax' \leq B$.

Συνεπώς τόσο στην περίπτωση υπέρτασης όσο και στην περίπτωση υπότασης έχουμε ένα τυπικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού της μορφής 4.2 που λύνεται με τη βοήθεια κάποιου υπολογιστικού πακέτου. [1]

4.4 Διατύπωση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού με αποκοπή ενεργού ισχύος σε περίπτωση υπέρτασης

Υπάρχει η περίπτωση η εφεδρεία έργου ισχύος που παρέχεται από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής να μην είναι επαρκής ώστε να επαναφέρει την τάση στα αποδεκτά όρια (0.95-1.05 α.μ). Τότε ένας πιθανός έλεγχος για την περίπτωση υπέρτασης είναι η μείωση της παραγωγής ενεργού ισχύος. Μια μείωση της παραγωγής πρωτίστως δεν συμφέρει οικονομικά τον παραγωγό. Παρόλα αυτά, υποκρύπτεται κάποιο όφελος για τον παραγωγό υπό την έννοια ότι δίνουμε την δυνατότητα μεγαλύτερης διείσδυσης από DGs υπό την αίρεση πιθανής βραχυχρόνιας μείωσης της ενεργού ισχύος.

Εφόσον λοιπόν το πρόγραμμα γραμμικού προγραμματισμού με έλεγχο της άεργου αποτυγχάνει στο να εντοπίσει μια εφικτή λύση, οι μονάδες DG του προβλήματος καταναλώνουν όλη την άεργο ισχύ που δύνανται και ακολούθως καταστρώνεται πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με έλεγχο της ενεργού ισχύος. Το πρόβλημα λοιπόν διατυπώνεται ως ακολούθως:

για περίπτωση υπέρτασης (τάση μεγαλύτερη από 1.05 ανά μονάδα)

$$\max: x \quad (4.12)$$

υποκείμενες στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$V_l \leq V_0 + \Lambda_{VP} x \leq V_u \quad (4.13)$$

$$-P_{DG} \leq x \leq P_{max} - P_{DG} \quad (4.14)$$

όπου $x = [\Delta P_{DG1}, \Delta P_{DG2}, \dots, \Delta P_{DGn}]'$ οι μεταβολές στην παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων DG, Λ_{VP} ο υποπίνακας διαστάσεων $m \times n$ (m ο αριθμός των κόμβων και n ο αριθμός των DG) του πίνακα ευαισθησιών όπως λέχθηκε στην παράγραφο 3.2, $P_{DG} = [P_{DG1}, P_{DG2}, \dots, P_{DGn}]'$ η αρχική ενεργός παραγωγή κάθε DG και P_{max} η μέγιστη παραγόμενη ενεργός ισχύς κάθε DG. Τα υπόλοιπα μεγέθη είναι όπως ορίστηκαν στις εξισώσεις 4.3 έως 4.6.

Ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό με τις εξισώσεις για την υπέρταση στην περίπτωση ελέγχου άεργου ισχύος και θέτοντας $x' = -x$ καταλήγουμε στο τυποποιημένο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που ακολουθεί:

$$\min: x' \quad (4.15)$$

$$\text{υπό τον όρο: } Ax' \leq B \quad (4.16)$$

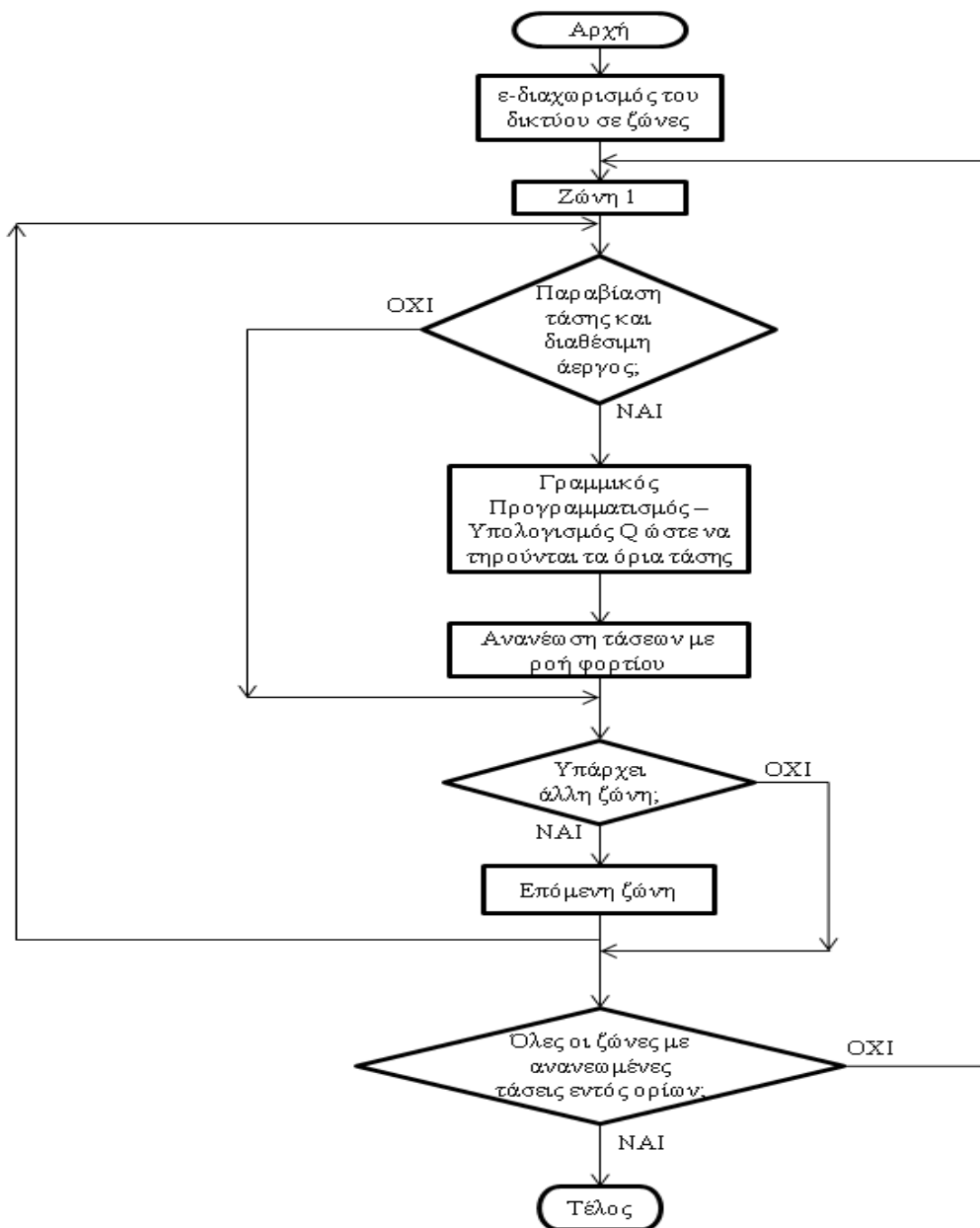
$$-P_{max} + P_{DG} \leq x' \leq P_{DG} \quad (4.17)$$

όπου $A = \begin{bmatrix} -\Lambda_{VP} \\ \Lambda_{VP} \end{bmatrix}$ και $B = \begin{bmatrix} V_u - V_0 \\ V_0 - V_l \end{bmatrix}$. Το όριο στο αριστερό μέλος της ανίσωσης 4.17 ουσιαστικά υπερκαλύπτεται από την απαίτηση $x' \geq 0$ που αποτελεί και το ουσιαστικό κάτω όριο. Η πραγματική λύση προκύπτει ως $x = -x'$. [7], [1]

4.5 Περιγραφή του αλγορίθμου για έλεγχο τάσης με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού

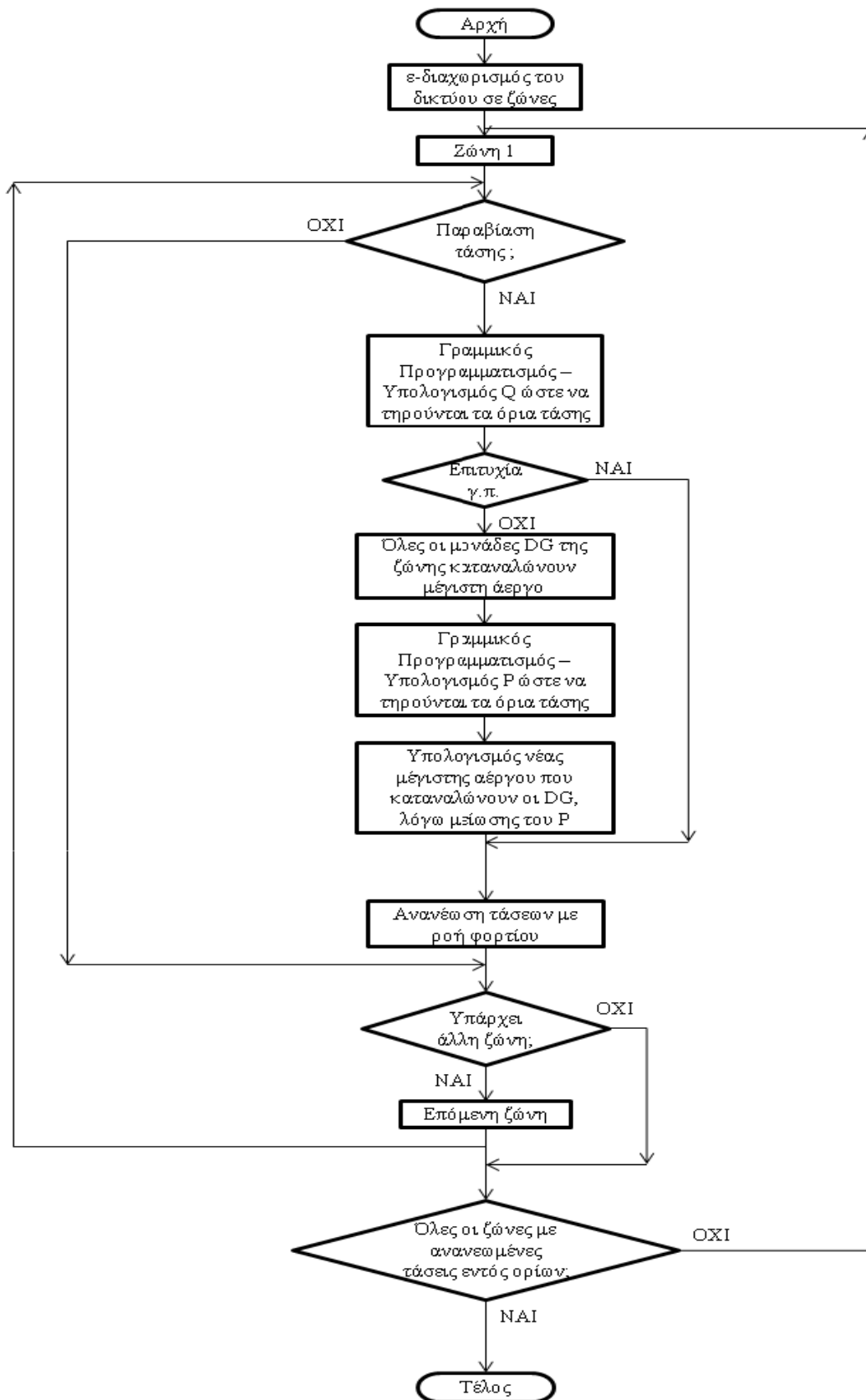
Αρχικά, το δίκτυο διανομής χωρίζεται σε ζώνες με βάση τον αλγόριθμο για τον ε-διαχωρισμό. Έπειτα εξετάζεται κάθε ζώνη χωριστά και διαπιστώνεται αν υπάρχει παραβίαση των ορίων για την τάση. Σε περίπτωση που υπάρχει παραβίαση και υπάρχει διαθέσιμη άεργος στη ζώνη, αναλόγως για τον αν πρόκειται για υπέρταση ή υπόταση διατυπώνεται και επιλύεται το αντίστοιχο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με έλεγχο άεργου ισχύος (παράγραφος 4.3). Με την επίλυση του γραμμικού προγραμματισμού προσδιορίζεται η βέλτιστη ποσότητα άεργου ισχύος

αντιστάθμισης που χρειάζεται για να επανέλθουν εντός των ορίων οι τιμές της τάσης. Είναι σκόπιμο μετά από κάθε αντιστάθμιση να γίνεται ανανέωση των τιμών των τάσεων μέσω επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου και αυτό γιατί ο πίνακας ευαισθησιών του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι υπολογισμένος για την φόρτιση του δικτύου πριν την αντιστάθμιση. Οπότε είναι πιθανόν με την νέα φόρτιση του δικτύου να μην τηρούνται τα επιβεβλημένα όρια. Για αυτό όταν προσπελαστούν όλες οι ζώνες γίνεται έλεγχος πάλι για όλες τις ζώνες και αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου η τάση επανέλθει εντός ορίων σε όλους τους κόμβους που καλύπτονται από κάποια ζώνη. Τα παραπάνω φαίνονται και στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής ελέγχου τάσης με αντιστάθμιση άεργου ισχύος χρησιμοποιώντας την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.

Στην περίπτωση που η αντιστάθμιση άεργου ισχύος δεν επαρκεί για τον έλεγχο μιας υπέρτασης σε κάποια ζώνη, δίνεται η εντολή σε όλες της μονάδες DG της ζώνης να καταναλώσουν μέγιστη άεργο ισχύ και εφαρμόζεται έλεγχος ενεργού ισχύος με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Αφού υπολογιστεί λοιπόν η απαιτούμενη αποκοπή ενεργού ισχύος πρέπει να υπολογιστεί και η νέα άεργος ισχύς που καταναλώνουν οι μονάδες DG καθώς η μέγιστη άεργος μιας μονάδας εξαρτάται από επίπεδο παραγωγής ενεργού ισχύος. Με τα νέα δεδομένα για την ενεργό και άεργο ισχύ υπολογίζονται με την μέθοδο της ροής φορτίου οι νέες τάσεις. Οι τιμές των τάσεων υπολογίζονται πάλι καθώς το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού επιλύθηκε με τους πίνακες ευαισθησιών υπολογισμένους στην προηγούμενη φόρτιση του δικτύου αλλά επίσης οι μονάδες DG όπως εξηγήθηκε καταναλώνουν λιγότερη άεργο. Αν οι νέες τάσεις είναι εκτός ορίων επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία αλλιώς ο αλγόριθμος τερματίζει για την εν λόγω ζώνη. Ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις υπόλοιπες ζώνες. Αν επαρκεί η άεργος ισχύς μιας ζώνης γίνεται έλεγχος άεργου όπως στο σχήμα 4.1. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.2.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής ελέγχου υπέρτασης με αντιστάθμιση άεργου ισχύος και αποκοπή ενεργού ισχύος χρησιμοποιώντας την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.

Οι αλγόριθμοι των διαγραμμάτων ροής των σχημάτων 4.1 και 4.2 εφαρμόζονται στα δίκτυα διανομής του παραρτήματος Α. Για την εφαρμογή των αλγορίθμων έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DGs) λειτουργούν αρχικά σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή δεν παράγουν καθόλου άεργο.
- ✓ Έχει υποθεθεί συντελεστής ισχύος για τις μονάδες DG στο διάστημα 0.707 επαγωγικός/χωρητικός. [22] Από την θεώρηση αυτή και με δεδομένο επίπεδο παραγωγής ενεργού ισχύος προκύπτει η μέγιστη αποδιδόμενη άεργος ισχύς.
- ✓ Η μέγιστη ενεργός ισχύς των μονάδων DG είναι η εγκατεστημένη των πινάκων Α.2 και Α.4. Ωστόσο προκειμένου να προκύψει υπέρταση στα υπό εξέταση δίκτυα υποτίθεται κατάλληλη αύξηση της εγκαταστημένης ισχύος.
- ✓ Το ονομαστικό φορτίο των πινάκων Α.1 και Α.3 είναι και το μέγιστο, ωστόσο για να προκύψει υπόταση απαιτείται κατάλληλη αύξηση του ονομαστικού φορτίου.
- ✓ Όλα τα φορτία των δύο δικτύων διανομής είναι σταθερού συντελεστή ισχύος, δηλαδή μια αύξηση της ενεργού ισχύος συνεπάγεται την ίδια ποσοστιαία αύξηση της άεργου.
- ✓ Όλες οι μονάδες DG και των δύο δικτύων διανομής είναι φωτοβολταϊκά, υπόθεση σχετικά ρεαλιστική ειδικά για το αγροτικό δίκτυο της Σπερχειάδας.
- ✓ Κάθε μονάδα DG έχει την δυνατότητα αποκοπής παραγωγής ενεργού ισχύος αλλά όχι την κατά απαίτηση αύξηση της ενεργού παραγωγής. Ως εκ τούτου, δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί μια υπόταση παράγοντας περισσότερη ενεργό ισχύ.
- ✓ Οι αντιστροφείς (*inverters*) των μονάδων DG είναι διαστασιολογημένοι στην μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ, ώστε να μπορούν να παρέχουν άεργο σε κάθε περίπτωση.
- ✓ Η τάση δεν πρέπει σε κανένα κόμβο του δικτύου να υπερβαίνει την τιμή 1.05 αμ. και να υπολείπεται της 0.95 αμ. σε καμία κατάσταση φόρτισης του δικτύου.
- ✓ Ο έλεγχος τάσης διασφαλίζει ότι σε κανέναν κόμβο που βρίσκεται εντός κάποιας ζώνης δεν υπάρχει παραβίαση των ως άνω τιμών. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίπτωση να υπάρχει κόμβος εκτός ζώνης που να είναι εκτός ορίων, εντούτοις με κατάλληλη επιλογή του ϵ και μεγάλο ποσοστό κάλυψης κόμβων συνακόλουθα δεν παρατηρείται τέτοιο φαινόμενο.

4.6 Περίπτωση δικτύου 33 ζυγών της IEEE

Στο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE εφαρμόζεται αρχικά κεντρικός έλεγχος τάσης με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού και ακολούθως αποκεντρωμένος έλεγχος με την ίδια μέθοδο. Τέλος, εξετάζεται και η περίπτωση αποκοπής παραγόμενης ενεργού ισχύος για τον έλεγχο υπερτάσεων.

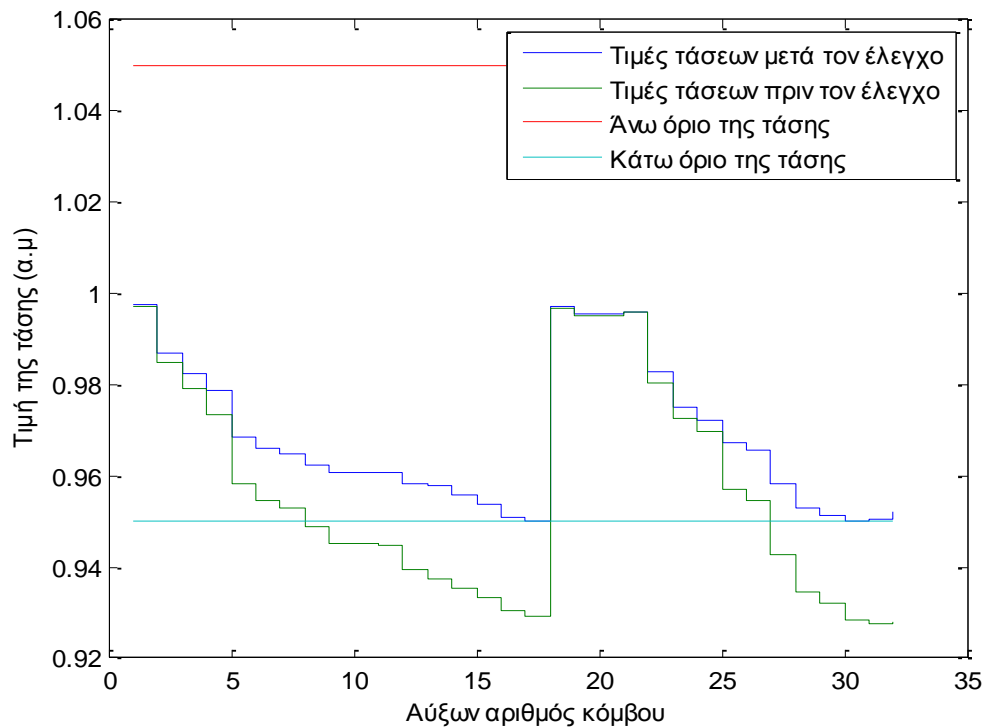
Σε κάθε περίπτωση ελέγχου εφαρμόζεται και παρουσιάζεται ως διαταραχή τάσης μια υπόταση και μια υπέρταση. Υπόταση προκύπτει σε περίπτωση ελάχιστης παραγωγής

και μέγιστου φορτίου. Επειδή οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θεωρούνται στην πλειοψηφία τους φωτοβολταϊκά, μέγιστο φορτίο και ελάχιστη παραγωγή δεν συμπίπτουν καθώς μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται κατά τις ώρες αιχμής το μεσημέρι ενώ ελάχιστη παραγωγή την νύχτα. Προκειμένου να πετύχουμε ένα ρεαλιστικό σενάριο υποθέτουμε ότι η παραγωγή είναι ίση με το 50% της εγκατεστημένης και το φορτίο ονομαστικό. Εντούτοις, σε αυτή την περίπτωση δεν εμφανίζεται υπόταση. Ύστερα από αυτά και μετά από δοκιμές προτείνεται η παραγόμενη ισχύς να είναι ίση με την εγκατεστημένη και το ονομαστικό φορτίο να πολλαπλασιαστεί επί 4. Αντίστοιχα, υπέρταση προκύπτει σε περίπτωση ελαχίστου φορτίου και μέγιστης παραγωγής. Και αυτό το σενάριο δεν είναι ρεαλιστικό γιατί μέγιστη παραγωγή τα φωτοβολταϊκά έχουν το μεσημέρι όπου και το φορτίο είναι μέγιστο. Και εδώ σε κανένα πιθανό ρεαλιστικό σενάριο δεν προκύπτει υπέρταση, οπότε μετά από δοκιμές επιλέχθηκε η περίπτωση όπου το φορτίο παρουσιάζει μείωση κατά 30% και η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται κατά 70%.

4.6.1 Κεντρικός έλεγχος τάσης

Ο κεντρικός έλεγχος τάσης προκύπτει όταν δεν υπάρχει διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες και όλοι οι κόμβοι ανήκουν ουσιαστικά σε μια 'ζώνη'. Σύμφωνα με την παράγραφο 3.5 αυτό προκύπτει όταν επιλέξουμε ως ϵ το μικρότερο στοιχείο του πίνακα ευαισθησιών. Από τα συμπεράσματα της παραγράφου 3.6.1 κεντρικό έλεγχο στο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE έχουμε για $\epsilon=0.01$.

- Υπόταση (παραγωγή ονομαστική, φορτίο τετραπλασιασμένο)



Σχήμα 4.3: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον κεντρικό έλεγχο σε περίπτωση υπότασης.

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπότασης και μετά τον κεντρικό έλεγχο με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται πληροφορίες που σχετίζονται με το μέγεθος του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού καθώς επίσης και τις απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος του δικτύου για τον κεντρικό έλεγχο. Στον πίνακα 4.2 φαίνεται για κάθε γεννήτρια ξεχωριστά η ενεργός παραγωγή της καθώς και η απαιτούμενη ποσότητα άεργου ισχύος αντιστάθμισης όπως αυτή υπολογίστηκε. Επίσης υπολογίζεται και ο συντελεστής ισχύος κάθε γεννήτριας μετά την αντιστάθμιση. Επειδή έχουμε παραγωγή άεργου ισχύος ο συντελεστής ισχύος είναι χωρητικός.

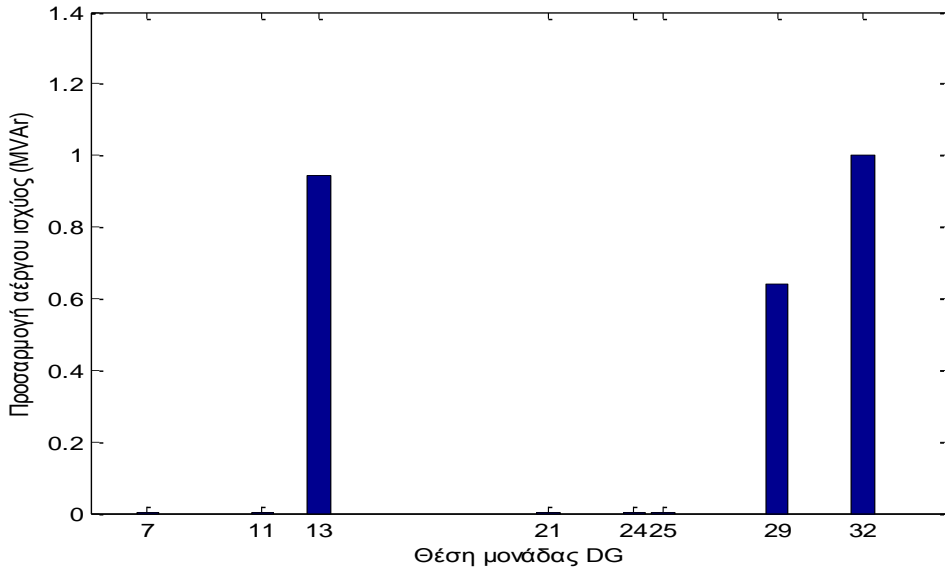
Πίνακας 4.1: Στοιχεία προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και απώλειες ισχύος για κεντρικό έλεγχο.

Αριθμός ζωνών που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων με υπόταση	Αριθμός μονάδων DG που συμμετείχαν στον έλεγχο	P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
1	32	16	8	0.264754	0.173978

Πίνακας 4.2: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή κεντρικού ελέγχου τάσης για υπόταση.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \varphi$ (χωρητικός)
DG_7	1	0	1
DG_{11}	1	0	1
DG_{13}	1	0.9423	0.728
DG_{21}	1	0	1
DG_{24}	1	0	1
DG_{25}	1	0	1
DG_{29}	1	0.6409	0.842
DG_{32}	1	1.0003	0.707
Σύνολο	8	2.5835	-

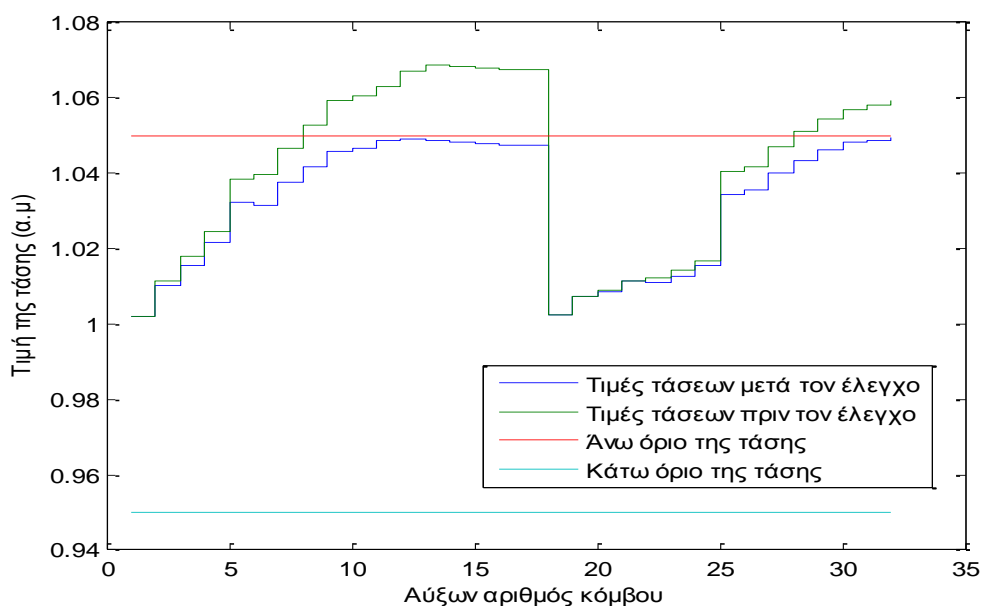
Στο σχήμα 4.4 φαίνεται και γραφικά η προσαρμογή άεργου ισχύος των μονάδων DG.



Σχήμα 4.4: Παρουσίαση προσαρμογής αέργου ισχύος κάθε μονάδας DG του δικτύου.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση κεντρικού ελέγχου όλοι οι κόμβοι και οι μονάδες DG συμμετέχουν στην κατάστροψη του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Επίσης, για την εξεταζόμενη υπόταση 16 από τους συνολικά 32 κόμβους παρουσιάζουν παραβίαση της τάσης και σε 3 από τις 8 μονάδες DG δίνεται εντολή να παράγουν άεργο ισχύ προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση εντός των ορίων. Πιο συγκεκριμένα η DG_{32} εξαντλεί όλη την διαθέσιμη άεργο ισχύ φτάνοντας στον κατώτερο χωρητικό συντελεστή ισχύος (0.707), ενώ οι άλλες 2 δίνουν μέρος της διαθέσιμης.

- Υπέρταση (αύξηση παραγωγής κατά 70%, φορτίο μειωμένο κατά 30%)



Σχήμα 4.5: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον κεντρικό έλεγχο σε περίπτωση υπέρτασης.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον κεντρικό έλεγχο με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται πληροφορίες που σχετίζονται με το μέγεθος του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού καθώς επίσης και τις απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος του δικτύου για τον κεντρικό έλεγχο. Στον πίνακα 4.4 φαίνεται για κάθε γεννήτρια ξεχωριστά η ενεργός παραγωγή της καθώς και η απαιτούμενη ποσότητα άεργου ισχύος αντιστάθμισης όπως αυτή υπολογίστηκε. Επίσης υπολογίζεται και ο συντελεστής ισχύος κάθε γεννήτριας μετά την αντιστάθμιση. Επειδή έχουμε κατανάλωση άεργου ισχύος ο συντελεστής ισχύος είναι επαγωγικός.

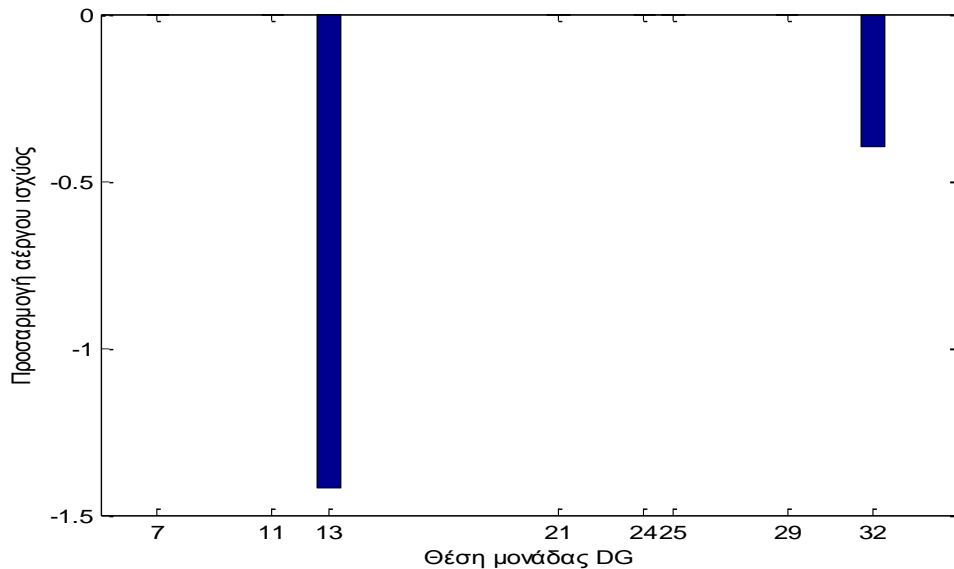
Πίνακας 4.3: Στοιχεία προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και απώλειες ισχύος για κεντρικό έλεγχο.

Αριθμός ζωνών που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων με υπέρταση	Αριθμός μονάδων DG που συμμετείχαν στον έλεγχο	P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
1	32	15	8	0.637601	0.440765

Πίνακας 4.4: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή κεντρικού ελέγχου τάσης για υπέρταση.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \phi$ (επαγωγικός)
DG_7	1.7	0	1
DG_{11}	1.7	0	1
DG_{13}	1.7	-1.4171	0.77
DG_{21}	1.7	0	1
DG_{24}	1.7	0	1
DG_{25}	1.7	0	1
DG_{29}	1.7	0	1
DG_{32}	1.7	-0.3987	0.97
Σύνολο	13.6	-1.8158	-

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται και γραφικά η προσαρμογή άεργου ισχύος των μονάδων DG.



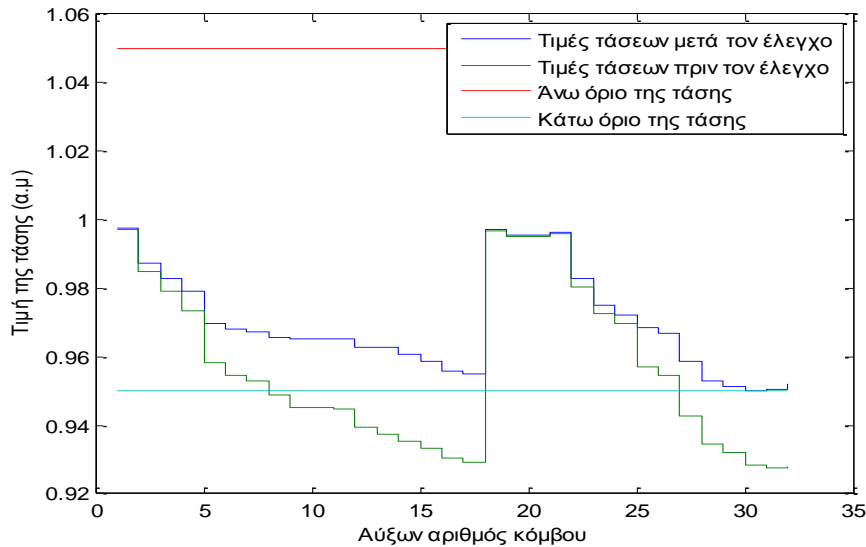
Σχήμα 4.6: Παρουσίαση προσαρμογής αέργου ισχύος κάθε μονάδας DG του δικτύου.

Δεδομένου ότι πρόκειται για κεντρικό έλεγχο στην επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού λαμβάνουν μέρος όλοι οι κόμβοι και όλες οι μονάδες DG. Παρατηρούμε επίσης, ότι στην εξεταζόμενη υπέρταση 15 από τους συνολικά 32 κόμβους παρουσιάζουν παραβίαση της τάσης και σε 2 από τις 8 μονάδες DG δίνεται εντολή να παράγουν άεργο ισχύ προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση εντός των ορίων. Καμία μονάδα DG δεν εξαντλεί όλη την διαθέσιμη άεργο.

4.6.2 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης

Ο αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης προκύπτει όταν το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες και οι αποφάσεις που λαμβάνονται για αντιστάθμιση άεργου ισχύος γίνονται μόνο από τις μονάδες DG της ζώνης. Βάσει των συμπερασμάτων της παραγράφου 3.6.1 βέλτιστη επιλογή για το ϵ στην περίπτωση αποκεντρωμένου ελέγχου είναι το $\epsilon=0.35$. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας ευαισθησιών μεταβάλλεται ανάλογα με την φόρτιση του δικτύου, οπότε χρειάζεται νέα εκτίμηση για την τιμή του ϵ (παράγραφος 3.7) σε κάθε νέα κατάσταση του δικτύου. Ωστόσο κάτι τέτοιο κρίνεται χρονοβόρο, οπότε οι ζώνες προσδιορίζονται με βάση την βασική κατάσταση του δικτύου που εξετάστηκε στην παράγραφο 3.6.

- Υπόταση (παραγωγή ονομαστική, φορτίο τετραπλασιασμένο)



Σχήμα 4.7: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο ($\epsilon=0.35$) σε περίπτωση υπότασης.

Στο σχήμα 4.7 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπότασης και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων. Πρόβλημα υπότασης παρουσιάζεται στις ζώνες 1 και 3.

Στους πίνακες 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του αποκεντρωμένου ελέγχου όπως αυτά παρουσιάστηκαν και για τον κεντρικό έλεγχο.

Πίνακας 4.5: Στοιχεία προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και απώλειες ισχύος για αποκεντρωμένο έλεγχο ($\epsilon=0.35$).

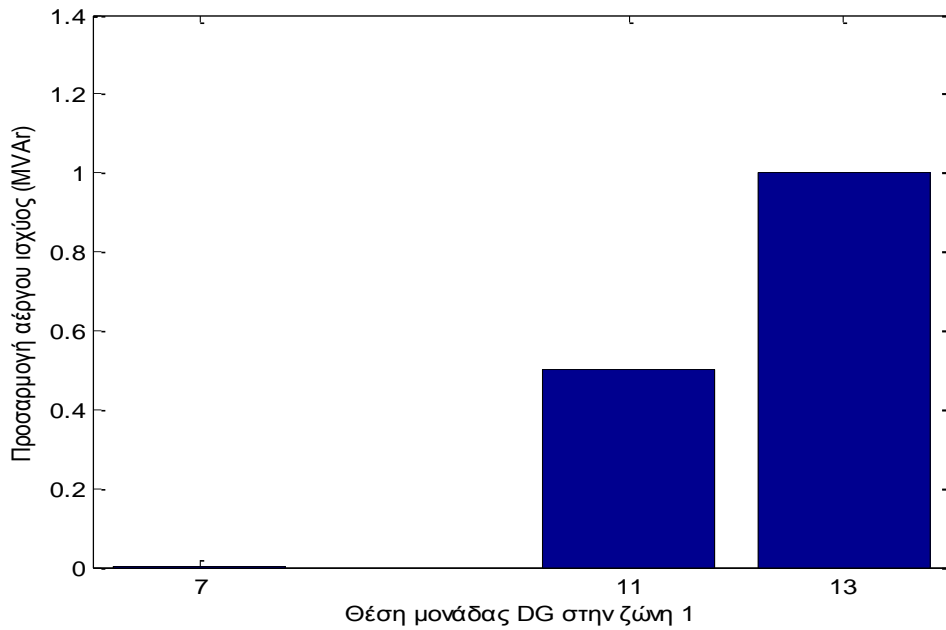
Αριθμός ζωνών που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων με υπόταση	Αριθμός μονάδων DG που συμμετείχαν στον έλεγχο	P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
2	20	16	6	0.255424	0.168066

Πίνακας 4.6: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου τάσης για υπόταση.

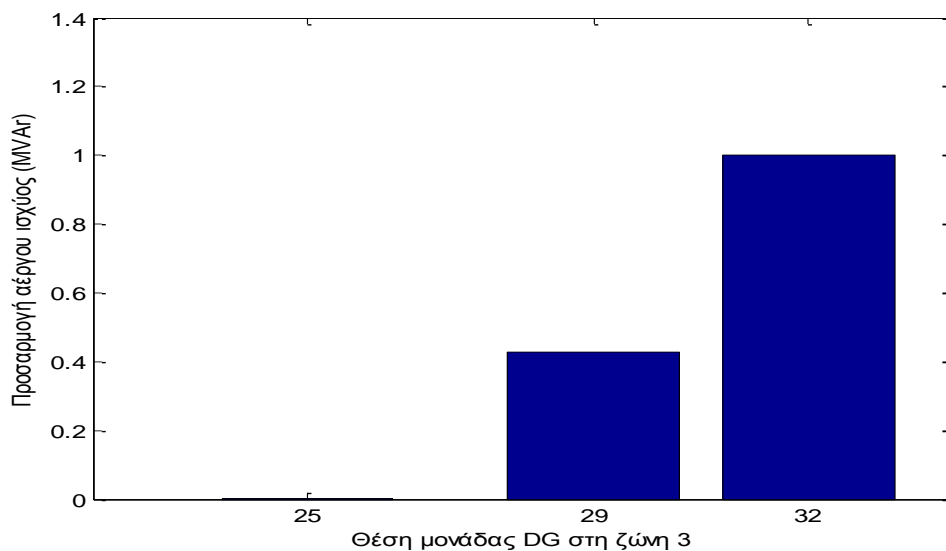
Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \phi$ (χωρητικός)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_7	1	0	1
DG_{11}	1	0.5033	0.895
DG_{13}	1	1.0003	0.707
<i>Ζώνη 3</i>			
DG_{25}	1	0	1

DG_{29}	1	0.4259	0.92
DG_{32}	1	1.0003	0.707
Σύνολο	6	2.9298	-

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται και γραφικά η προσαρμογή άεργου ισχύος των μονάδων DG.



Σχήμα 4.8: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος μονάδων DG της ζώνης 1.



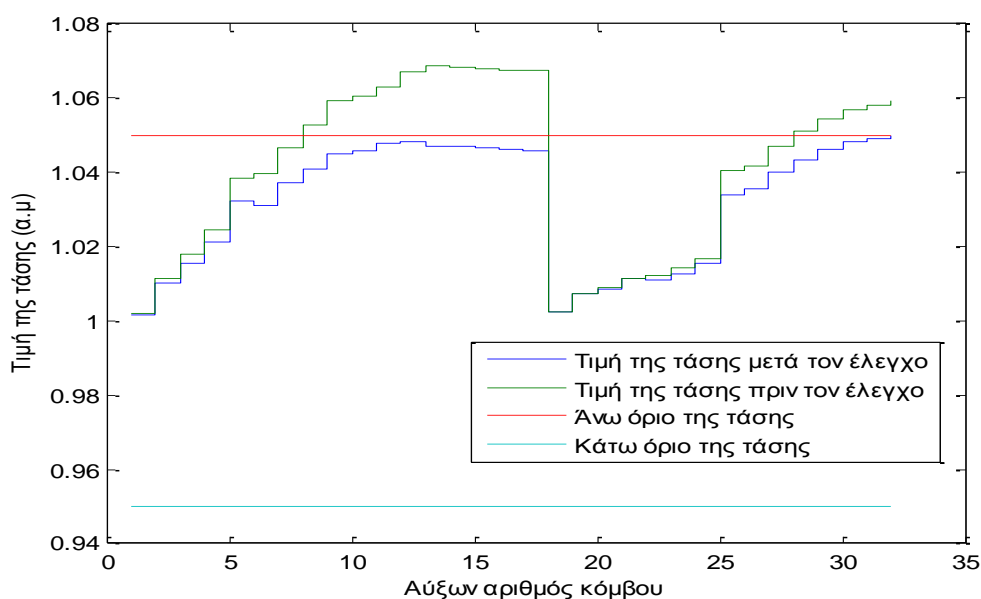
Σχήμα 4.9: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος μονάδων DG της ζώνης 3.

Για την ίδια υπόταση με αυτή του κεντρικού ελέγχου, στον αποκεντρωμένο έλεγχο συμμετέχουν δύο ζώνες (σύνολο 20 κόμβοι) στον έλεγχο και 4 μονάδες DG δίνουν

άεργο ισχύ αντιστάθμισης έναντι μιας ζώνης (σύνολο 32 κόμβοι) και 3 μονάδων DG του κεντρικού ελέγχου. Δύο μονάδες DG εξαντλούν όλη την διαθέσιμη άεργο φτάνοντας στον κατώτερο επιτρεπτό χωρητικό συντελεστή ισχύος έναντι μιας του κεντρικού.

Οι απώλειες ισχύος είναι μειωμένες σε σχέση με τον κεντρικό έλεγχο η συνολική όμως άεργος ισχύς αντιστάθμισης είναι αυξημένη (2.9298 από 2.5835 MVar). Είναι φανερό ότι η αυξημένη τοπική παραγωγή άεργου ισχύος φέρνει μείωση στις απώλειες.

- Υπέρταση (αύξηση παραγωγής κατά 70%, φορτίο μειωμένο κατά 30%)



Σχήμα 4.10: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο σε περίπτωση υπέρτασης.

Στο σχήμα 4.10 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων. Πρόβλημα υπότασης παρουσιάζεται στις ζώνες 1 και 3.

Στους πίνακες 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του αποκεντρωμένου ελέγχου όπως αυτά παρουσιάστηκαν και για τον κεντρικό έλεγχο.

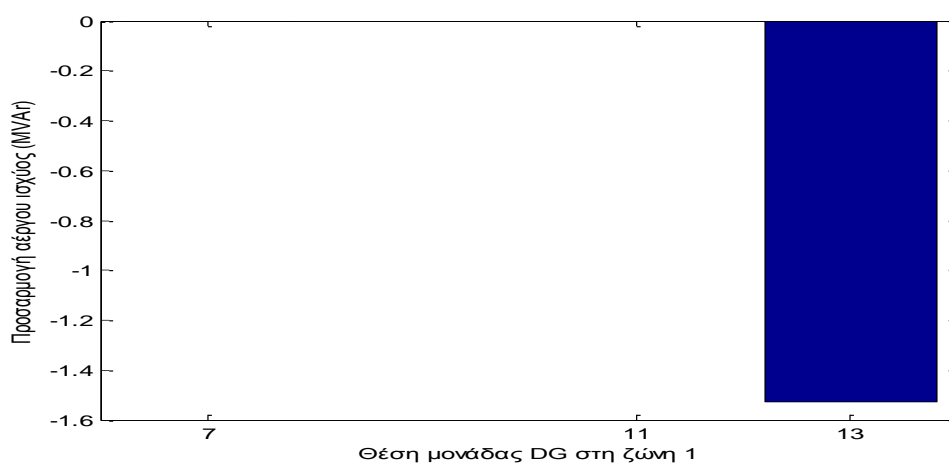
Πίνακας 4.7: Στοιχεία προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και απώλειες ισχύος για αποκεντρωμένο έλεγχο.

Αριθμός ζωνών που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων με υπέρταση	Αριθμός μονάδων DG που συμμετείχαν στον έλεγχο	P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
2	20	15	6	0.643268	0.444945

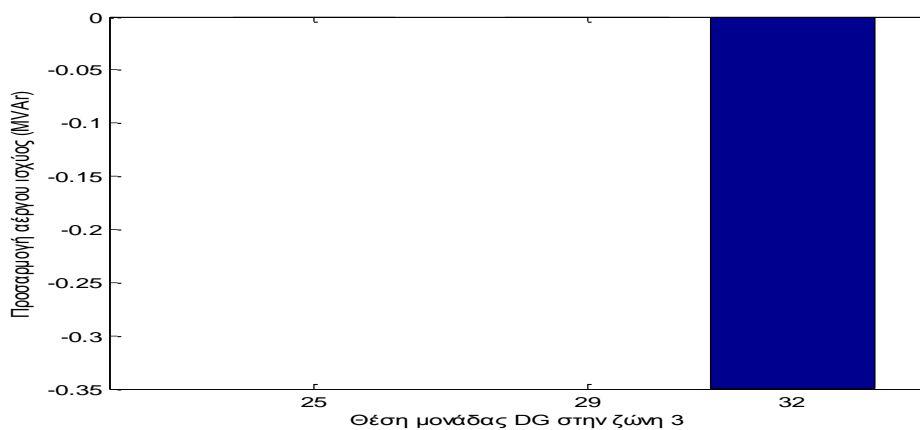
Πίνακας 4.8: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου τάσης για υπέρταση.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \phi$ (επαγωγικός)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_7	1.7	0	1
DG_{11}	1.7	0	1
DG_{13}	1.7	-1.5290	0.744
<i>Ζώνη 3</i>			
DG_{25}	1.7	0	1
DG_{29}	1.7	0	1
DG_{32}	1.7	-0.3492	0.98
Σύνολο	10.2	-1.8782	-

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται και γραφικά η προσαρμογή άεργου ισχύος των μονάδων DG.



Σχήμα 4.11: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος μονάδων DG της ζώνης 1.



Σχήμα 4.12: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος μονάδων DG της ζώνης 3.

Για την ίδια υπέρταση με αυτή του κεντρικού ελέγχου, στον αποκεντρωμένο έλεγχο συμμετέχουν δύο ζώνες (σύνολο 20 κόμβοι) στον έλεγχο και 2 μονάδες DG δίνουν άεργο ισχύ αντιστάθμισης έναντι μιας ζώνης (σύνολο 32 κόμβοι) και 2 μονάδων DG του κεντρικού ελέγχου. Καμία μονάδα DG δεν εξαντλεί όλη την διαθέσιμη άεργο όπως και στον κεντρικό.

Οι απώλειες ισχύος είναι αυξημένες σε σχέση με τον κεντρικό έλεγχο και η κατανάλωση άεργου ισχύος των μονάδων DG είναι και αυτή αυξημένη (-1.8782 από -1.8158 MVar). Είναι φανερό ότι η αυξημένη κατανάλωση άεργου ισχύος φέρνει αύξηση στις απώλειες.

4.6.3 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης με αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος

Έστω τώρα ότι υπάρχει η απαίτηση οι μονάδες DG να λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό/χωρητικό τότε διαπιστώνεται ότι η μέγιστη άεργος που δύνανται να καταναλώσουν οι μονάδες DG σε κάθε ζώνη δεν αρκεί για τον έλεγχο της εξεταζόμενης υπέρτασης. Τότε αναγκάζομαστε να αποκόψουμε ενεργό ισχύ όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.5. Για την περίπτωση της υπότασης δεν γίνεται αναφορά καθώς δεν μπορούμε να αυξάνουμε κατά απαίτηση την ενεργό παραγωγή.

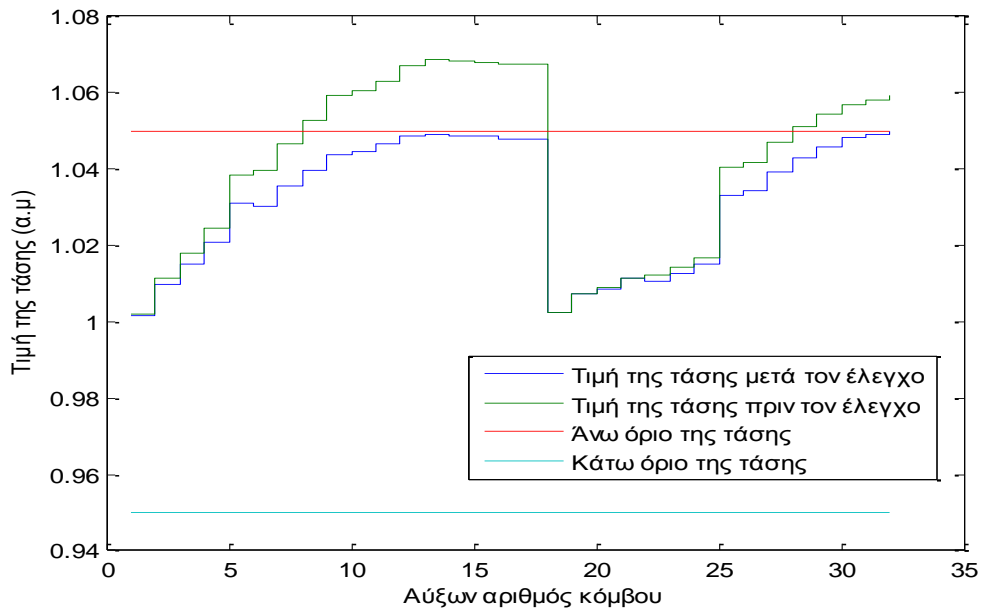
Για την περίπτωση του αποκεντρωμένου ελέγχου και με τις ζώνες προσδιορισμένες όπως στην παράγραφο 3.6.1 για $\epsilon=0.35$ αυξάνω την εγκατεστημένη παραγωγή κατά 70% και το φορτίο μειώνεται κατά 30% και προκύπτει υπέρταση.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του ελέγχου.

Πίνακας 4.9: Τύπος ελέγχου κάθε ζώνης και απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος.

Ζώνη 1		Ζώνη 2		Ζώνη 3		P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
Υπέρταση	Έλεγχος	Υπέρταση	Έλεγχος	Υπέρταση	Έλεγχος		
NAI	P	OXI	-	NAI	Q	0.582143	0.400544

Παρατηρούμε ότι η τάση υπερβαίνει το όριο του 1.05 αμ. σε δύο ζώνες, στην ζώνη 1 και ζώνη 3 συγκεκριμένα. Από τις δύο αυτές ζώνες μόνο στη ζώνη 1 επιβάλλεται έλεγχος με αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος. Οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος είναι μικρότερες σε σχέση με τον αποκεντρωμένο έλεγχο υπέρτασης (παράγραφος 4.6.2) γεγονός που οφείλεται στην μειωμένη κατανάλωση άεργου (λόγω βελτιωμένου συντελεστή ισχύος).



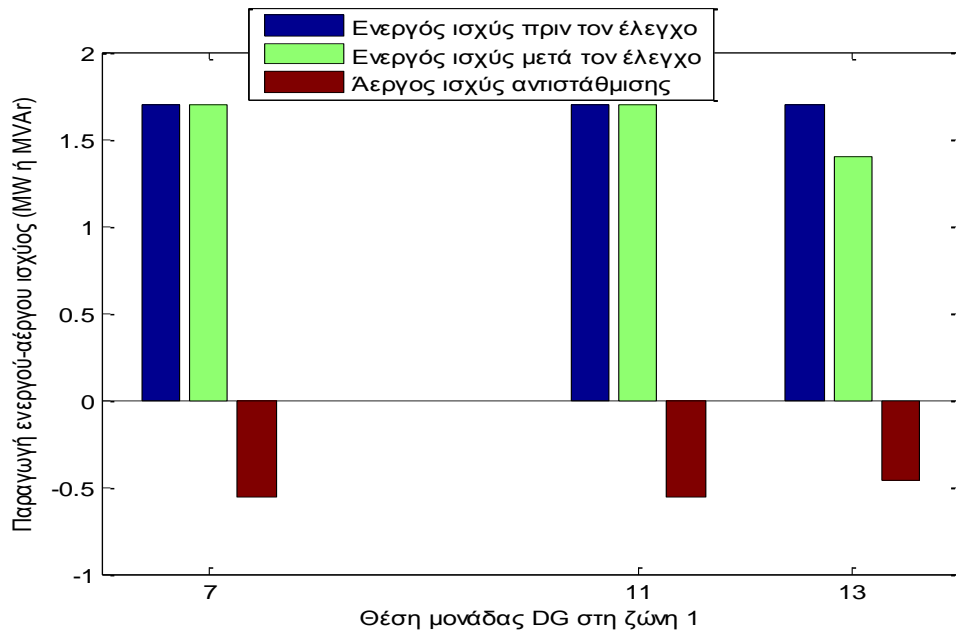
Σχήμα 4.13: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με αποκοπή ενεργού ισχύος για έλεγχο υπέρτασης.

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με αντιστάθμιση άεργου ισχύος και αποκοπή ενεργού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων.

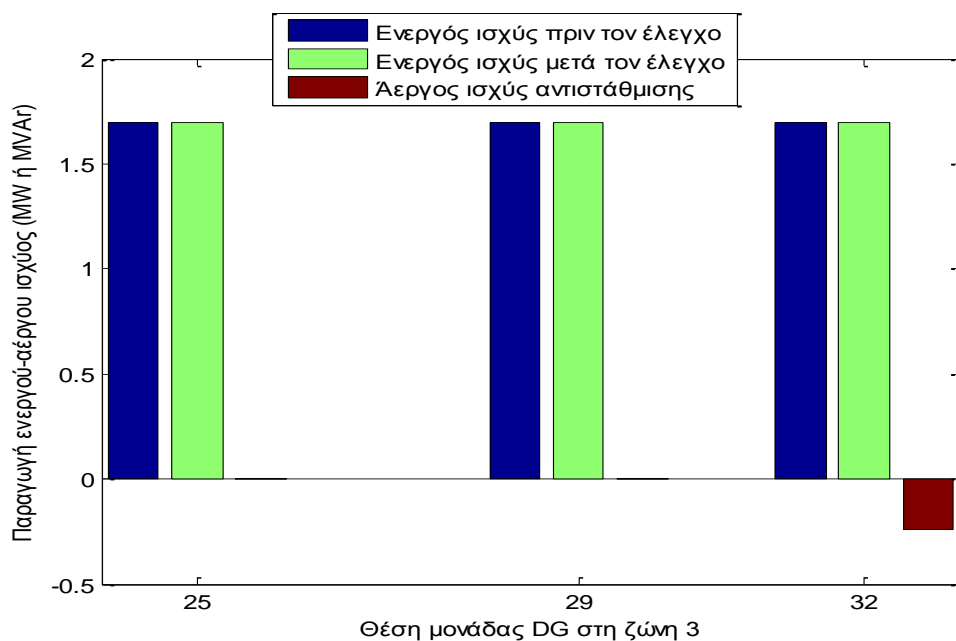
Πίνακας 4.10: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου τάσης με αποκοπή ενεργού ισχύος για υπέρταση.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \phi$ (επαγωγικός)	$P_{DG,adjustment}$ (%)
<i>Ζώνη 1</i>				
DG_7	1.7	-0.5588	0.95	0
DG_{11}	1.7	-0.5588	0.95	0
DG_{13}	1.3957	-0.4587	0.95	-17.9
<i>Ζώνη 3</i>				
DG_{25}	1.7	0	1	0
DG_{29}	1.7	0	1	0
DG_{32}	1.7	-0.2432	0.99	0
Σύνολο	9.8957	-1.8195	-	-

Στον πίνακα 4.10 φαίνεται ότι στην ζώνη 1 όλες οι μονάδες DG καταναλώνουν την μέγιστη επιτρεπτή άεργο φτάνοντας τον συντελεστή ισχύος στο 0.95. Απαιτείται επιπλέον και μείωση κατά 17% της ενεργού ισχύος της μονάδας DG του κόμβου υπ αριθμόν 13. Για την ζώνη 3 επαρκεί η άεργος αντιστάθμιση της μονάδας DG του κόμβου 32. Τα παραπάνω απεικονίζονται και γραφικά στα σχήματα 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.14: Προσαρμογή ενεργού και άεργου ισχύος στη ζώνη 1.



Σχήμα 4.15: Προσαρμογή ενεργού και άεργου ισχύος στη ζώνη 3.

4.7 Περίπτωση δικτύου διανομής 101 ζυγών Σπερχειάδας

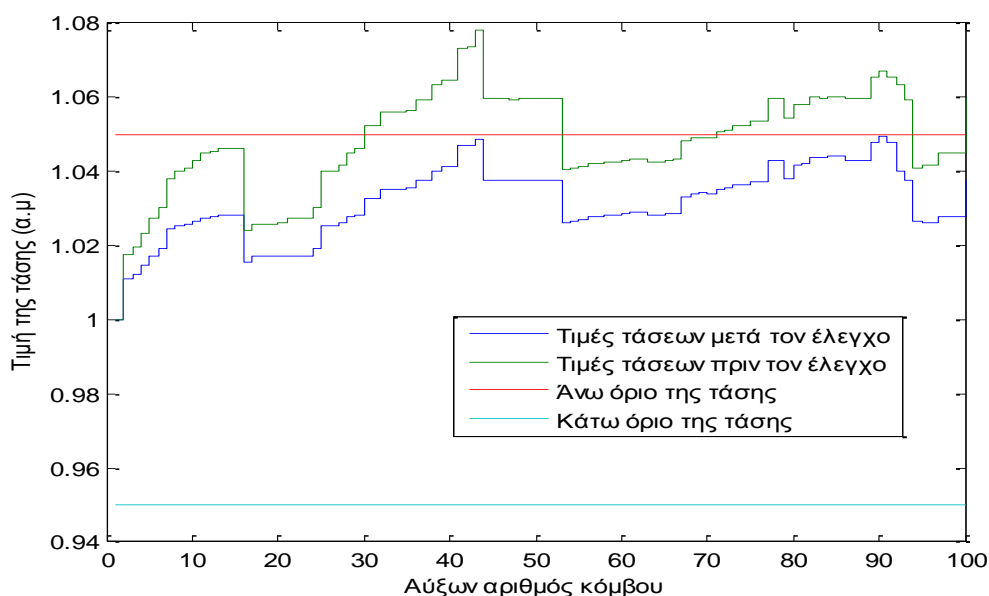
Στο δίκτυο της Σπερχειάδας όπως ακριβώς έγινε και στο δίκτυο 33 ζυγών εφαρμόζεται κεντρικός, αποκεντρωμένος έλεγχος και αποκεντρωμένος έλεγχος με αποκοπή ενεργού ισχύος για τον έλεγχο υπέρτασης. Για το συγκεκριμένο δίκτυο όπως φαίνεται στα στοιχεία φόρτισης του στην παράγραφο Α.2 υπάρχει μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εγκατεστημένη τους ισχύ είναι πολύ μεγαλύτερη

από το φορτίο (σενάριο εξέτασης) οπότε είναι αναμενόμενο να έχει ενδιαφέρον η μελέτη υπέρτασης. Η περίπτωση υπότασης, συνεπώς κρίνεται μη ρεαλιστική και για αυτό δεν εξετάζεται.

Υπέρταση δύναται να παρουσιαστεί όταν υπάρχει μέγιστη παραγωγή και ελάχιστο φορτίο. Επειδή και στην Σπερχειάδα οι μονάδες DG θεωρούνται ότι είναι φωτοβολταϊκά, όταν το φορτίο είναι μέγιστο είναι και η παραγωγή μέγιστη. Σε όλα τα πιθανά ρεαλιστικά σενάρια δεν προκύπτει παραβίαση του άνω ορίου της τάσης. Για αυτό επιλέχθηκε η περίπτωση που το φορτίο είναι μειωμένο κατά 30% και η παραγωγή από μονάδες DG πενταπλασιάζεται για τις μονάδες που βρίσκονται στις ζώνες 2, 3, 4 και 5 ενώ αυξάνεται κατά 50% στην ζώνη 1. Οι ζώνες είναι όπως προέκυψαν από τον ε-διαχωρισμό της παραγράφου 1.6.2 για $\epsilon=0.5$. Επιλέγουμε να αυξήσουμε λιγότερο την παραγωγή στην ζώνη 1 καθώς περιέχει μονάδες DG με μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με αυτή των υπολοίπων ζωνών.

4.7.1 Κεντρικός έλεγχος

Ο κεντρικός έλεγχος στο δίκτυο της Σπερχειάδας για φόρτιση όπως στην παράγραφο Α.2 του παραρτήματος Α προκύπτει για $\epsilon=0.00008$ όπου και υπάρχει μια ζώνη που περιέχει το σύνολο των κόμβων (βλέπε παράγραφος 3.6.2). Χρησιμοποιώντας αυτά τα αποτελέσματα διαχωρισμού και για λόγους που εξηγήθηκαν στην υποπαράγραφο 3.6.2 θα εφαρμοστεί το σενάριο που μόλις περιγράφηκε.



Σχήμα 4.16: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον κεντρικό έλεγχο σε περίπτωση υπέρτασης.

Στο σχήμα 4.16 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον κεντρικό έλεγχο με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων.

Στους πίνακες 4.11 και 4.12 φαίνονται τα αποτελέσματα του γραμμικού προγραμματισμού.

Πίνακας 4.11: Στοιχεία προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και απώλειες ισχύος για κεντρικό έλεγχο.

Αριθμός ζωνών που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων με υπέρταση	Αριθμός μονάδων DG που συμμετείχαν στον έλεγχο	P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
1	100	47	24	1.200649	1.587730

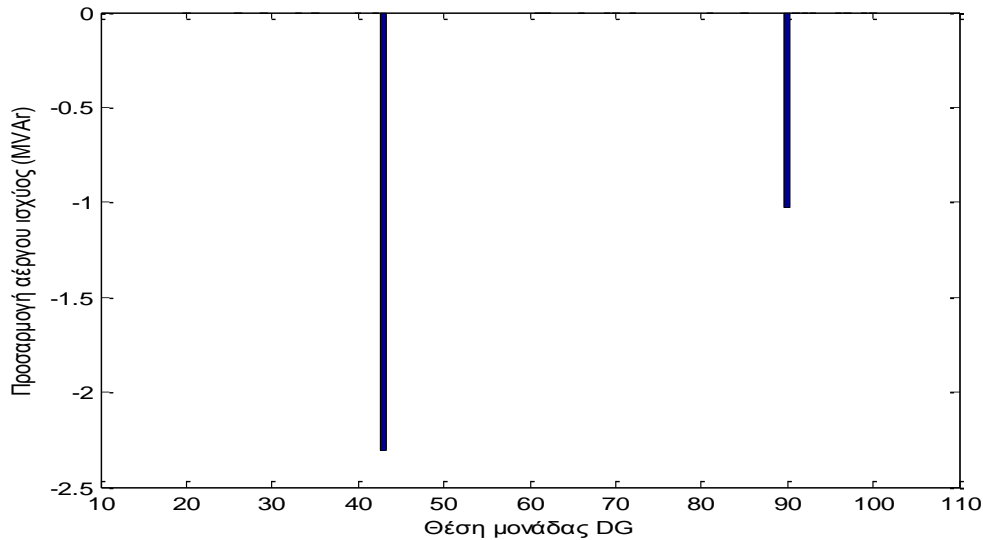
Πίνακας 4.12: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή κεντρικού ελέγχου τάσης για υπέρταση.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \varphi$ (επαγωγικός)
DG_{20}	0.5	0	1
DG_{26}	0.1	0	1
DG_{29}	0.75	0	1
DG_{33}	0.15	0	1
DG_{35}	0.75	0	1
DG_{40}	0.15	0	1
DG_{42}	1.911	0	1
DG_{43}	2.7225	-2.3068	0.763
DG_{61}	0.5	0	1
DG_{62}	0.5	0	1
DG_{66}	0.1	0	1
DG_{69}	0.5	0	1
DG_{70}	0.5	0	1
DG_{72}	0.5	0	1
DG_{81}	0.5	0	1
DG_{85}	0.5	0	1
DG_{90}	3.5	-1.0278	0.959
DG_{91}	2.35	0	1
DG_{92}	0.15	0	1
DG_{93}	0.03	0	1
DG_{96}	0.5000	0	1
DG_{97}	0.1500	0	1
DG_{99}	0.1500	0	1
DG_{100}	0.0750	0	1
Σύνολο	17.5385	-3.3346	-

Πρόκειται για κεντρικό έλεγχο οπότε όλοι οι κόμβοι και οι μονάδες DG που συναποτελούν την μια και μοναδική ζώνη του δικτύου συμμετέχουν στην επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Παραβίαση της τάσης παρουσιάζεται σε 47 από τους 100 κόμβους δείχνοντας έτσι και το εύρος της υπέρτασης. Προκειμένου να επέλθει ρύθμιση της τάσης καλούνται να καταναλώσουν άεργο ισχύ

2 από τις 24 συνολικά μονάδες DG μη εξαντλώντας όλη την ικανότητα τους προς απορρόφηση ($\Sigma I > 0.707$).

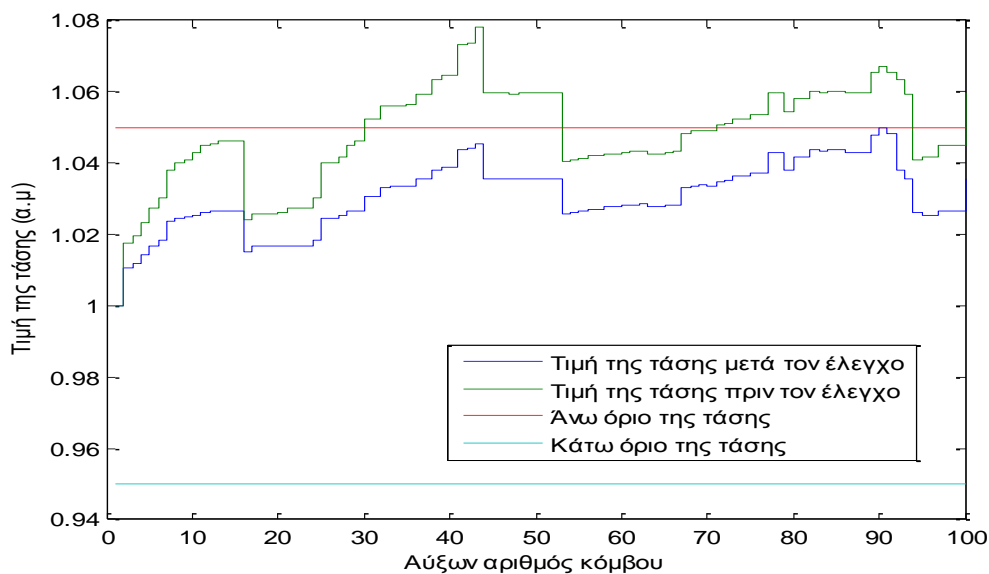
Στο σχήμα 4.17 φαίνεται και γραφικά η προσαρμογή άεργου ισχύος των μονάδων DG.



Σχήμα 4.17: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος κάθε μονάδας DG του δικτύου.

4.7.2 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης

Ανατρέχοντας στα συμπεράσματα της παραγράφου 3.6.2 για τον ε-διαχωρισμό του δικτύου της Σπερχειάδας προκύπτει ότι καλύτερος διαχωρισμός προκύπτει για $\epsilon=0.5$. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτού του διαχωρισμού εφαρμόζουμε αποκεντρωμένο έλεγχο τάσης για την υπό εξέταση υπέρταση.



Σχήμα 4.18: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο υπέρτασης.

Στο σχήμα 4.18 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων. Πρόβλημα παραβίασης των ορίων της τάσης παρουσιάζεται στις ζώνες 1 και 5.

Στους πίνακες 4.13 και 4.14 φαίνονται τα αποτελέσματα του γραμμικού προγραμματισμού.

Πίνακας 4.13: Στοιχεία προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και απώλειες ισχύος για αποκεντρωμένο έλεγχο.

Αριθμός ζωνών που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων που συμμετείχαν στον έλεγχο	Αριθμός κόμβων με υπέρταση	Αριθμός μονάδων DG που συμμετείχαν στον έλεγχο	P_{losses} (MW)	Q_{losses} (MVar)
2	62	47	18	1.217884	1.603586

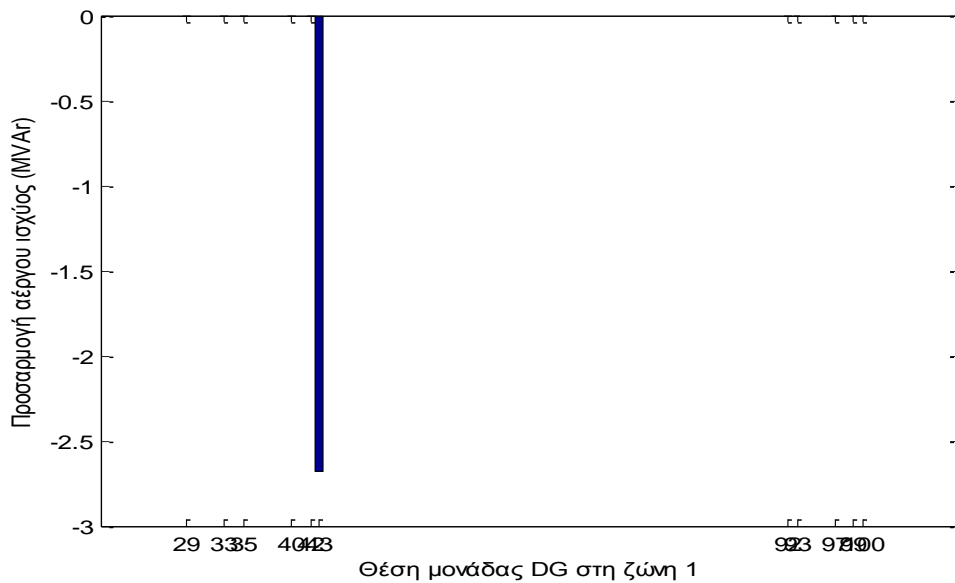
Πίνακας 4.14: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου τάσης για υπέρταση.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \phi$ (επαγωγικός)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_{29}	0.75	0	1
DG_{33}	0.15	0	1
DG_{35}	0.75	0	1
DG_{40}	0.15	0	1
DG_{42}	1.911	0	1
DG_{43}	2.7225	-2.6829	0.712
DG_{92}	0.15	0	1
DG_{93}	0.03	0	1
DG_{97}	0.1500	0	1
DG_{99}	0.1500	0	1
DG_{100}	0.0750	0	1
<i>Ζώνη 5</i>			
DG_{69}	0.5	0	1
DG_{70}	0.5	0	1
DG_{72}	0.5	0	1
DG_{81}	0.5	0	1
DG_{85}	0.5	0	1
DG_{90}	3.5	-0.7945	0.975
DG_{91}	2.35	0	1
Σύνολο	15.3385	-3.4774	-

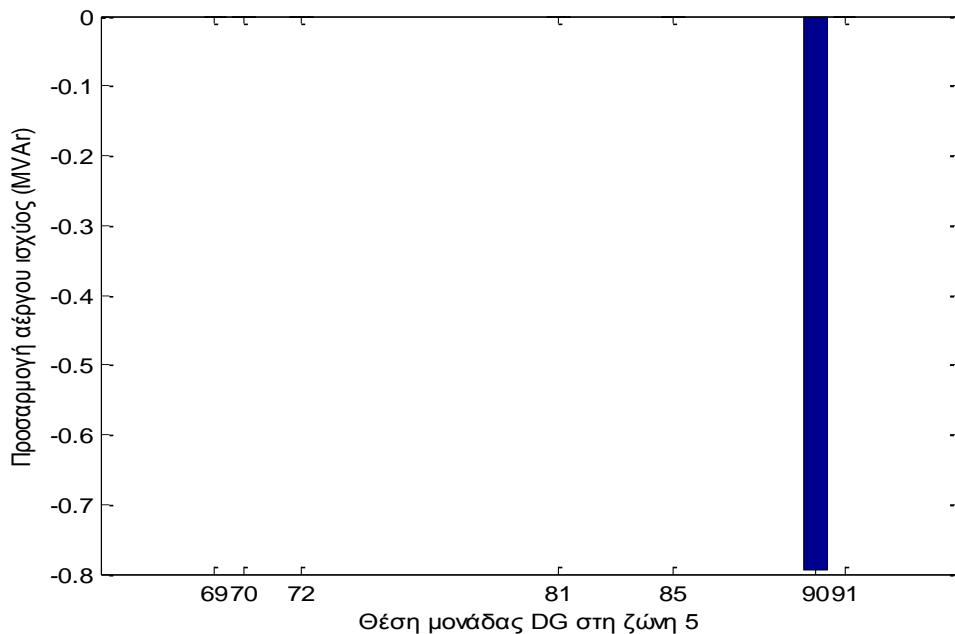
Πρόκειται για αποκεντρωμένο έλεγχο στον οποίο συμμετέχουν 2 από τις 5 συνολικά ζώνες του δικτύου με 18 DG σύνολο. Προκειμένου να επέλθει ρύθμιση της τάσης καλούνται να καταναλώσουν άεργο ισχύ 1 από τις 11 μονάδες DG της ζώνης 1 και 1

από τις 7 μονάδες DG της ζώνης 5 με καμία να μην εξαντλεί όλη την ικανότητα της προς απορρόφηση ισχύος ($\Sigma I > 0.707$). Οι απώλειες ισχύος όπως και στο δίκτυο 33 ζυγών είναι αυξημένες σε σχέση με τον κεντρικό έλεγχο και η κατανάλωση άεργου ισχύος των μονάδων DG είναι και αυτή αυξημένη (-3.4774 από -3.3346 MVar).

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται και γραφικά η προσαρμογή άεργου ισχύος των μονάδων DG.



Σχήμα 4.19: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος μονάδων DG της ζώνης 1.



Σχήμα 4.20: Παρουσίαση προσαρμογής άεργου ισχύος μονάδων DG της ζώνης 5.

4.7.3 Αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης με αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος

Έστω τώρα ότι υπάρχει η απαίτηση οι μονάδες DG να λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό/χωρητικό τότε διαπιστώνεται ότι η μέγιστη άεργος που δύνανται να καταναλώσουν οι μονάδες DG σε κάθε ζώνη δεν αρκεί για τον έλεγχο της εξεταζόμενης υπέρτασης. Για τον έλεγχο της τάσης καταφεύγουμε λοιπόν στην αποκοπή ενεργού ισχύος.

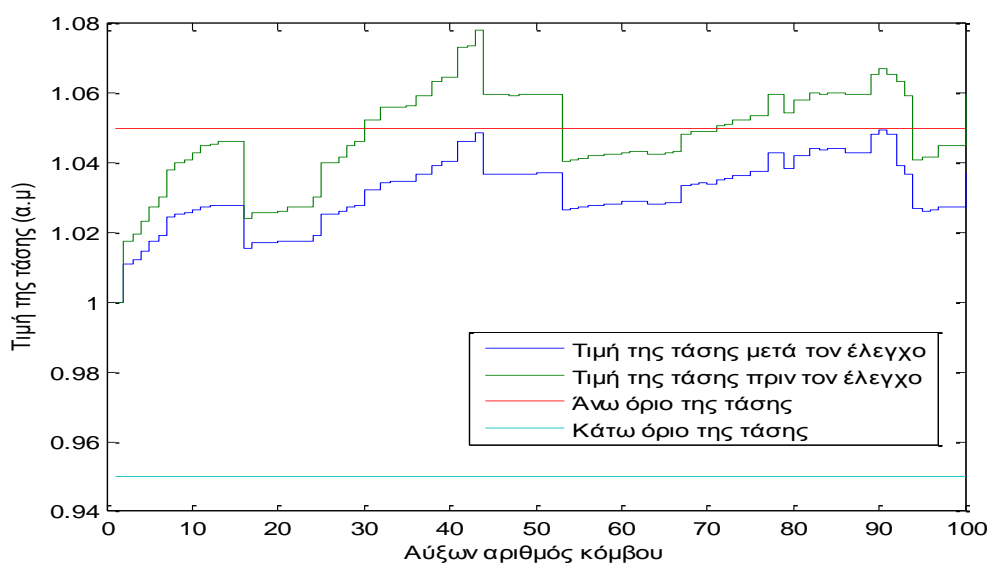
Για την περίπτωση του αποκεντρωμένου ελέγχου και με τις ζώνες προσδιορισμένες όπως στην παράγραφο 3.6.2 για $\varepsilon=0.5$ εφαρμόζω τις συνθήκες φόρτισης που επιφέρουν την εξεταζόμενη υπέρταση.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του ελέγχου.

Πίνακας 4.15: Τύπος ελέγχου κάθε ζώνης και απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος.

Ζώνη 1		Ζώνη 2		Ζώνη 3		Ζώνη 4		Ζώνη 5	
Υπέρταση	Έλεγχος	Υπέρταση	Έλεγχος	Υπέρταση	Έλεγχος	Υπέρταση	Έλεγχος	Υπέρταση	Έλεγχος
ΝΑΙ	P	ΟΧΙ	-	ΟΧΙ	-	ΟΧΙ		ΝΑΙ	Q
P_{losses} (MW)					Q_{losses} (MVar)				
1.055934					1.422268				

Παρατηρούμε ότι η τάση υπερβαίνει το όριο του 1.05 αμ. σε δύο ζώνες, στην ζώνη 1 και ζώνη 5 συγκεκριμένα. Από τις δύο αυτές ζώνες μόνο στη ζώνη 1 επιβάλλεται έλεγχος με αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος. Οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος είναι μικρότερες σε σχέση με τον αποκεντρωμένο έλεγχο υπέρτασης (παράγραφος 4.7.2) λόγω του βελτιωμένου συντελεστή ισχύος των μονάδων DG.



Σχήμα 4.21: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με αποκοπή ενεργού ισχύος για έλεγχο υπέρτασης.

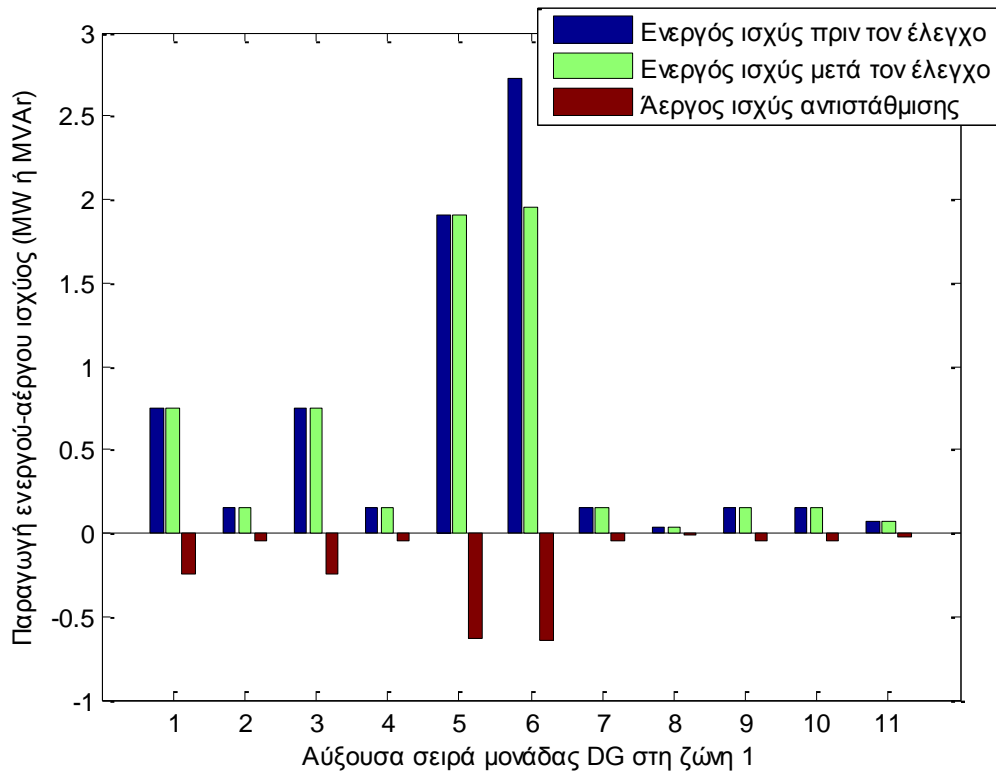
Στο σχήμα 4.21 φαίνεται το προφίλ των τάσεων κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με αντιστάθμιση άεργου ισχύος και αποκοπή ενεργού. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 4.16: Τιμές παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος για τις μονάδες DG μετά την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου τάσης με αποκοπή ενεργού ισχύος για υπέρταση.

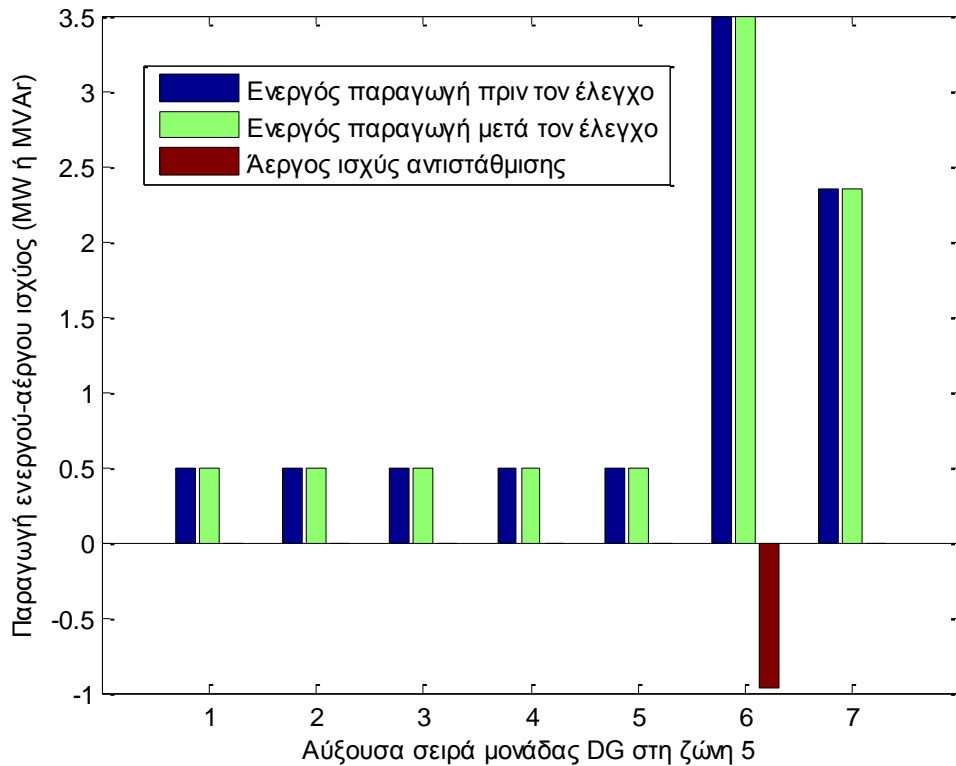
Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)	$\cos \varphi$ (επαγωγικός)	$P_{DG,adjustment}$ (%)
<i>Ζώνη 1</i>				
DG_{29}	0.75	-0.2465	0.95	0
DG_{33}	0.15	-0.0493	0.95	0
DG_{35}	0.75	-0.2465	0.95	0
DG_{40}	0.15	-0.0493	0.95	0
DG_{42}	1.911	-0.6281	0.95	0
DG_{43}	1.9573	-0.6433	0.95	-28.1
DG_{92}	0.15	-0.0493	0.95	0
DG_{93}	0.03	-0.0099	0.95	0
DG_{97}	0.1500	-0.0493	0.95	0
DG_{99}	0.1500	-0.0493	0.95	0
DG_{100}	0.0750	-0.0247	0.95	0
<i>Ζώνη 5</i>				
DG_{69}	0.5	0	1	0
DG_{70}	0.5	0	1	0
DG_{72}	0.5	0	1	0
DG_{81}	0.5	0	1	0
DG_{85}	0.5	0	1	0
DG_{90}	3.5	-0.9651	0.964	0
DG_{91}	2.35	0		0
Σύνολο	14.5733	-3.0106	-	-

Στον πίνακα 4.16 φαίνεται ότι στην ζώνη 1 όλες οι μονάδες DG καταναλώνουν την μέγιστη επιτρεπτή άεργο φτάνοντας τον συντελεστή ισχύος στο 0.95. Απαιτείται επιπλέον και μείωση κατά 28.1% της ενεργού ισχύος της μονάδας DG του κόμβου υπ' αριθμόν 43. Για την ζώνη 5 επαρκεί η άεργος αντιστάθμιση της μονάδας DG του κόμβου 90.

Τα παραπάνω απεικονίζονται και γραφικά στα σχήματα 4.22 και 4.23. Σε αυτά τα σχήματα ακολουθείται η εξής σύμβαση για την αρίθμηση των μονάδων DG: για την ζώνη 1 για παράδειγμα η μονάδα DG του κόμβου 29 αντιστοιχεί στη θέση 1 του κόμβου 33 στη θέση 2 κ.ο.κ.



Σχήμα 4.22: Προσαρμογή ενεργού και άεργου ισχύος στη ζώνη 1.



Σχήμα 4.23: Προσαρμογή ενεργού και άεργου ισχύος στη ζώνη 5.

4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Τόσο στο δίκτυο των 33 ζυγών όσο και στο δίκτυο της Σπερχειάδας τα ποιοτικά στοιχεία των αποτελεσμάτων είναι ίδια. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση υπότασης ο αποκεντρωμένος έλεγχος απαιτεί περισσότερη παραγωγή έργου ισχύος από τις μονάδες DG προκειμένου να επανέλθει εντός ορίων η τάση ενώ παράλληλα μειώνει τις απώλειες ισχύος. Για την περίπτωση υπέρτασης απαιτείται μεγαλύτερη ικανότητα κατανάλωσης έργου ισχύος στον αποκεντρωμένο έλεγχο, οι απώλειες ισχύος όμως εδώ αυξάνονται. Ενώ οι απώλειες ισχύος ανάλογα με τον αν πρόκειται για υπέρταση ή υπόταση καθιστούν ευνοϊκότερο τον κεντρικό ή τον αποκεντρωμένο έλεγχο αντίστοιχα, η προσαρμογή έργου ισχύος καθιστά καλύτερο τον κεντρικό έλεγχο σε όλες τις περιπτώσεις καθώς απαιτεί μικρότερη σε απόλυτη τιμή προσαρμογή έργου. Φαίνεται λοιπόν προτιμότερος ο κεντρικός έλεγχος καθώς βελτιστοποιεί την παραγωγή όλων των διαθέσιμων μονάδων DG πετυχαίνοντας καλύτερα αποτελέσματα, ενώ ο αποκεντρωμένος βελτιστοποιεί την παραγωγή κάθε ζώνης χωριστά πετυχαίνοντας συνολικά χειρότερα αποτελέσματα. Ο λόγος όμως που προτείνεται ο αποκεντρωμένος έλεγχος είναι άλλος και αναλύεται στην παράγραφο 2.4.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί με την χρήση ενός συστήματος πολυπρακτόρων (Multi-agent system – MAS). Αρχικά, πράκτορες που έχουν την δυνατότητα ελέγχου και πράκτορες που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις τοποθετούνται στο δίκτυο και χωρίζονται σε ομάδες βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του ε-διαχωρισμού. Έπειτα, τίθενται κανόνες επικοινωνίας μεταξύ πρακτόρων ελέγχου και μέτρησης. Αναλυτικότερη εξέταση του συστήματος αυτού αποτελεί αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.

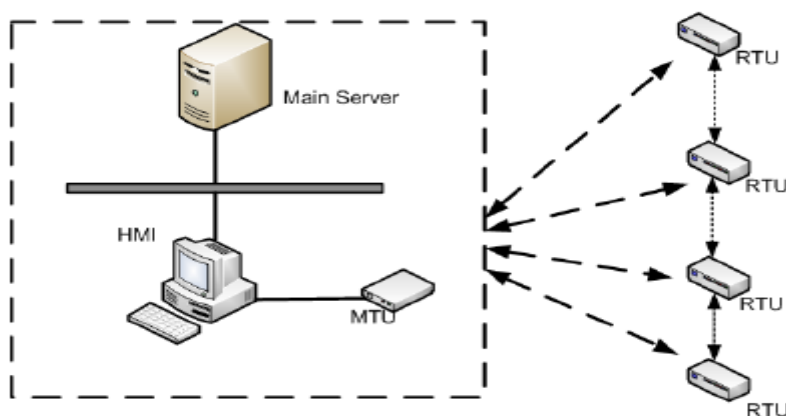
Κεφάλαιο 5^ο – Έλεγχος τάσης με χρήση συστήματος πολυπρακτόρων (Multi-Agent Systems – M.A.S)

5.1 Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει και έπειτα να εφαρμόσει μια μέθοδο ελέγχου τάσεως που στηρίζεται στην αντιστάθμιση άεργου ισχύος από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DG) και πραγματοποιείται με χρήση ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ πολυπρακτόρων. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά χρήση πολυπρακτόρων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και έπειτα περιγράφεται ο τρόπος που συμμετέχουν στον έλεγχο τάσης. Εξετάζονται δύο εκδοχές του αλγορίθμου ελέγχου τάσεως, μια με ασύγχρονη ενημέρωση των τιμών των τάσεων και μια σύγχρονη ενημέρωση. Οι αλγόριθμοι αυτοί εφαρμόζονται στο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE και στο δίκτυο της Σπερχειάδας και εξάγονται συμπεράσματα.

5.2 Συστήματα πολυπρακτόρων (M.A.S) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξοπλισμένα με SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) που παρακολουθούν και ελέγχουν μεγάλες περιοχές του συστήματος. Το σύστημα SCADA αποτελείται από ένα σύνολο από διαφορετικές συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους, τέτοιες είναι η HMI (Human Machine Interface), η MTU (Master Terminal Unit) και η RTU (Remote Terminal Unit). Μια κεντρική συσκευή MTU τοποθετείται στο κέντρο της περιοχής ελέγχου και επιφορτίζεται με την επικοινωνία με τις συσκευές RTU. Η RTU είναι μια σύνθετη συσκευή που συλλέγει σήματα από έναν αισθητήρα και τα μετατρέπει σε ψηφιακά για να τα στείλει μετά στην συσκευή MTU. Είναι επίσης υπεύθυνη για την εκτέλεση εντολών που προέρχονται από την MTU. Η πρόσβαση στις πληροφορίες των RTU από άλλες RTU είναι δυνατή μέσω απευθείας επικοινωνίας. Μια τυπική αρχιτεκτονική ενός συστήματος SCADA φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Αρχιτεκτονική συστήματος SCADA.

Ο κύριος περιορισμός στο σύστημα ελέγχου με SCADA είναι ότι οι μονάδες RTU είναι συνήθως τοποθετημένες αρκετά μακριά από το κέντρο ελέγχου. Έτσι, σε περίπτωση ανάγκης η απάντηση από το κέντρο ελέγχου έρχεται αρκετά αργά ώστε να καθίσταται αδύνατη η έγκαιρη ανταπόκριση που είναι αναγκαία για να διατηρηθεί η σταθερότητα της τάσης. Για αυτό τον λόγο, οι περισσότερες σύγχρονες συσκευές RTU είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να μπορούν να δρουν ως ευφυείς πράκτορες ελέγχοντας μόνες τους τις παραμέτρους του δικτύου, επικοινωνώντας με άλλες μονάδες RTU και λαμβάνοντας αποφάσεις χωρίς να εμπλέκουν τους κεντρικούς υπολογιστές του SCADA.

Ο όρος «ευφυής πράκτορας» υποδηλώνει μια οντότητα εφοδιασμένη με λογισμικό που μπορεί αυτόματα να φέρνει εις πέρας κάποιες εργασίες που της ανατίθενται και μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις αυτόνομα βασιζόμενη στην διαπραγματεύση και σε κάποιο αλγόριθμο λήψης απόφασης. Ένας ευφυής πράκτορας είναι ο πράκτορας ο οποίος επιδεικνύει προνοητικότητα (συμπεριφορά συνδεδεμένη με κάποιο στόχο), κοινωνικότητα (ικανότητα να επιδρά με άλλους πράκτορας) και αντιδραστικότητα (αντίληψη του περιβάλλοντος και δράση σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια). [9]

Συνήθως, δεν συναντάμε τους ευφυείς πράκτορες μεμονωμένα, αλλά οργανωμένους σε μια κοινωνία πρακτόρων, τα πολυπρακτορικά συστήματα (Multi-Agent Systems – M.A.S). Η καινοτομία που εισάγουν οι πράκτορες εστιάζεται κυρίως στο γεγονός ότι η αλληλεπίδραση στα συστήματα αυτά είναι δυναμική και όχι στατικά καθορισμένη. Το σύστημα αποκτά με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα να συμπεριφερθεί με σωστό τρόπο ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν είχαν αρχικά προβλεφθεί.

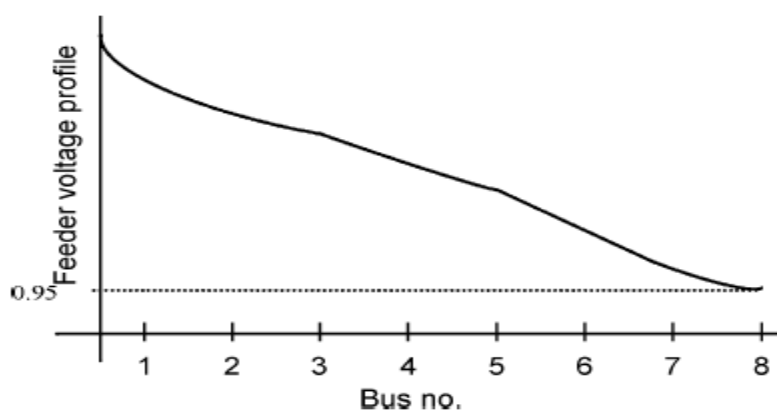
Γενικότερα, ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι ένα σύστημα που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ως ένα σύνολο πρακτόρων που αλληλεπιδρούν, δηλαδή συνεργάζονται, συντονίζονται, διαπραγματεύονται κλπ. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ένα δίκτυο από «χαλαρά συνδεδεμένους» πράκτορες, οι οποίοι δρουν μαζί για να επιλύσουν προβλήματα που είναι πέραν των δυνατοτήτων και της γνώσης ενός μόνο πράκτορα. Η συνεργασία μεταξύ τους είναι δυναμική με την έννοια ότι οι οντότητες που αλληλεπιδρούν είναι αυτόνομες και άρα αποφασίζουν οι ίδιες για το πότε και το πώς θα συνεργαστούν. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι πράκτορες να επιλέγουν είτε να εργαστούν αυτόνομα ανταλλάσσοντας υπηρεσίες ή/και πληροφορίες προσπαθώντας να επιτύχουν τους δικούς τους ανεξάρτητους στόχους, είτε να συνεργάζονται επιλύοντας υποπροβλήματα ώστε ο συνδυασμός των επιμέρους λύσεων που θα προκύψουν να αποτελέσουν την τελική λύση. [10]

Από τα παραπάνω είναι φανερό ένα σύστημα M.A.S σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από συσκευές RTU που λειτουργούν ως ευφυείς πράκτορες και είναι χαλαρά συνδεδεμένες μεταξύ τους.

5.3 Ερμηνεία επίλυσης προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για τον έλεγχο τάσης

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται να παρουσιαστεί μια μέθοδος ελέγχου της τάσης που είναι εφικτό να υλοποιηθεί μέσω ενός συστήματος πολυπρακτόρων (M.A.S). Προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη κατανομή στις μονάδες DG της άεργου ισχύος αντιστάθμισης επιλέγεται η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Σε αυτή την παράγραφο για το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού όπως ορίστηκε στις σχέσεις 4.3 έως 4.9 της παραγράφου 4.3 επιδιώκεται να προσδιοριστούν υποπροβλήματα επιλύσιμα από κάθε πράκτορα, ώστε η επίλυση τους χωριστά να οδηγεί στην επίλυση του αρχικού προβλήματος. Αυτό αποτελεί και την πρόκληση για την σχεδίαση του συστήματος πολυπρακτόρων MAS καθώς δεν υπάρχουν καλά ορισμένοι κανόνες. Η προσέγγιση που ακολουθείται εδώ λοιπόν είναι στη βάση του καθορισμού των χαρακτηριστικών της βέλτιστης λύσης εξετάζοντας/επιλύοντας το αρχικό πρόβλημα και ακολούθως αναπτύσσοντας μια μέθοδο για MAS βασισμένη σε αυτά τα χαρακτηριστικά. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζεται παρακάτω για περίπτωση υπότασης.

Αρχικά, γνωρίζουμε ποιοί από τους περιορισμούς της ανισότητας για την τάση (σχέση 4.5) παραβιάζονται καθώς αντιστοιχούν στους κόμβους που έχουν τάση μικρότερη από το κάτω όριο 0.95 αμ. Επιπρόσθετα, αν επιλύσουμε το αρχικό πρόβλημα, παρατηρούμε ότι η βέλτιστη αντιστάθμιση θα δώσει ένα φθίνον προφίλ τάσεων καθώς κινούμαστε προς τους κατάντη ζυγούς, όπως φαίνεται κιόλας στο σχήμα 5.2.¹ Οπότε, η βέλτιστη αντιστάθμιση είναι τέτοια ώστε η τάση στον κόμβο του οποίου η τάση ήταν χαμηλότερη να φτάνει ακριβώς στο κάτω όριο, γεγονός που φανερώνει ότι θα υπάρχει μόνο ένας μόνο περιορισμός της ανισότητας των τάσεων που να είναι δεσμευτικός για την επίλυση του και αντιστοιχεί στον πιο απομακρυσμένο από τον ζυγό τροφοδοσίας κόμβο.



Σχήμα 5.2: Προφίλ τάσεων ζυγού τροφοδοσίας με βέλτιστη αντιστάθμιση ισχύος από μονάδες DG για υπόταση.

¹ Η παρατήρηση αυτή ισχύει όταν η διείσδυση μονάδων DG δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να προκαλέσει αντιστροφή στην ροή ισχύος.

Σημειώνεται εδώ ότι το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού όπως ορίστηκε για τον έλεγχο τάσης αποτελεί ένα κλασσικό πρόβλημα κατανομής πόρων με έναν περιορισμό ισότητας, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο κλασσικό πρόβλημα οικονομικής παροχής ισχύος από γεννήτριες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η ισχύς που πρέπει να κατανεμηθεί είναι η άεργος και η εξίσωση ισοζυγίου ισχύος αντικαθίσταται με τον περιορισμό της τάσης. Οι βέλτιστες συνθήκες για αυτό το πρόβλημα θα είναι ίδιες ακριβώς με αυτές της οικονομικής παροχής ενεργού ισχύος από τις γεννήτριες, πράγμα που σημαίνει ότι το μοναδιαίο κόστος θα ισούται με: $\lambda = \min_j(1/l_{ij})$, όπου l_{ij} στοιχεία του πίνακα ευαισθησιών A_{VQ} . Το μοναδιαίο κόστος είναι το παραπάνω όταν τα όρια της άεργου Q αγνοούνται. Τα όρια του Q επομένως, καθορίζουν την σειρά αντιστάθμισης κάθε μονάδας DG. Αναλυτικότερα, η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία l_{ij} ως προς τον ζυγό με το μεγαλύτερο πρόβλημα, θα αποδώσει πρώτη άεργο μέχρι τα όρια της, αν αυτή η κίνηση δεν παρέχει αρκετή ανύψωση στην τιμή της τάσης, τότε η μονάδα DG με την δεύτερη μεγαλύτερη ευαισθησία (δεύτερο μικρότερο κόστος) θα αποδώσει όση ισχύ διαθέτει. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πηγαίνοντας προς τις γεννήτριες με μεγαλύτερο κόστος μέχρι η συνολική αντιστάθμιση να ικανοποιεί τον περιορισμό της τάσεως.

Η παραπάνω συνθήκη βελτιστοποίησης δείχνει ότι η σειρά ένταξης κάθε μονάδας DG μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας απλώς την σειρά που καθορίζεται από την τιμή της ευαισθησίας l_{ij} των ζυγών DG ως προς τον κόμβο με την μεγαλύτερη απόκλιση τάσης. Συνεπώς, αυτή η σειρά ένταξης μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα από ένα σύστημα MAS. Η υλοποίηση αυτή αποτελεί και το αντικείμενο της επόμενης παραγράφου. Επισημαίνεται, ότι εντελώς αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν στην περίπτωση υπέρτασης.

Επειδή η παραπάνω διαδικασία αποτελεί μια προσέγγιση της επίλυσης του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού ενδείκνυται η σύγκριση με τα αποτελέσματα από την επίλυση του γραμμικού προγραμματισμού που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να ελεγχθεί αν υπάρχει σύγκλιση. [11]

5.4 Συνεργασία συστήματος πολυπρακτόρων (MAS) για τον έλεγχο τάσης

Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος MAS, το κεντρικό πρόβλημα είναι ο τρόπος συνεργασίας και συντονισμού των πρακτόρων. Το πρόβλημα αυτό προσπερνάτε συνήθως δημιουργώντας ένα πλάνο που προσδιορίζει όλες τις κινήσεις που πρέπει να επιτελέσουν οι πράκτορες προκειμένου να επιτευχθεί ο τελικός στόχος. Ένα πολύ δημοφιλές πλάνο που χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη είναι το πρωτόκολλο CNP. Σε αυτό το πρωτόκολλο, οι πράκτορες μπορούν να έχουν δύο ρόλους: αυτόν του διαχειριστή (*manager*) και αυτόν του αναδόχου (*contractor*). Δοθέντος ενός έργου για διεκπεραίωση, ένας πράκτορας αποφασίζει κατά πόσον το έργο αυτό μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους υποέργα τα οποία μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα. Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο για να ανακοινώσει τα έργα που μπορούν να

μεταφερθούν και ζητά προσφορές από πράκτορες που μπορούν να εκτελέσουν κάποιο από αυτά. Ο πράκτορας που λαμβάνει μια αίτηση για ανάληψη έργου απαντά με μια προσφορά που δείχνει πόσο καλά πιστεύει ότι μπορεί να διεκπεραιώσει το έργο. Ο πράκτορας διαχειριστής συλλέγει όλες τις προσφορές και αποδίδει το έργο στον πράκτορα με την καλύτερη προσφορά (ανάδοχος). Το πρωτόκολλο CNP επιτρέπει σε όλους τους πράκτορες να στέλνουν αιτήματα για προσφορές σε όλους τους υπόλοιπους.

Για τον έλεγχο τάσης, κάθε μονάδα DG εφοδιάζεται με έναν πράκτορα και κάθε τέτοιος πράκτορας είναι υπεύθυνος για την αποστολή αιτήσεων και για τις κινήσεις που αφορούν τον έλεγχο της τάσης. Επίσης, για να γίνει η αποστολή των αιτήσεων με καταναμημένο τρόπο, κάθε πράκτορας υποθέτουμε ότι μπορεί να έχει τον ρόλο του διαχειριστή. Επομένως, τα κύρια καθήκοντα των μονάδων DG θα είναι ως ακολούθως.

- ✓ **Διαχειριστής (*moderator*):** Ο ρόλος του διαχειριστή είναι να διαχειρίζεται την διαδικασία προσφορών εκδίδοντας τις αιτήσεις για υποβολή προσφορών (requests for proposals – RFPs) και αποδίδοντας το έργο στην νικήτρια προσφορά.
- ✓ **Αποστολέας (*dispatching*):** Ο πράκτορας απαντά στην RFP που στάλθηκε από τον διαχειριστή στέλνοντας πρόταση που περιλαμβάνει το κόστος και την μέγιστη ικανότητα του. Όταν, ένας πράκτορας επιφορτιστεί με ένα έργο, το φέρνει εις πέρας με τη βοήθεια της συνδεδεμένης με αυτόν μονάδας DG.
- ✓ **Ελεγκτής (*monitoring*):** Ο πράκτορας αυτός ελέγχει την τάση του κόμβου στον οποίο είναι συνδεδεμένος και όταν η τάση βρίσκεται εκτός των φυσιολογικών ορίων, αποστέλλει αίτημα στον διαχειριστή για έκτακτη υποστήριξη στη ρύθμιση της τάσης με το μέγεθος της ανύψωσης που χρειάζεται.

Είναι φανερό ότι υπό αυτές τις συνθήκες κάθε πράκτορας είναι δυνατόν να επιτελέσει την λειτουργία του διαχειριστή. Πράκτορες ελεγκτές είναι συνδεδεμένοι και σε κάθε ζυγό φορτίου εκτός αυτούς των μονάδων DG. Προκειμένου να διευκολυνθεί η κατάσταση χρειαζόμαστε έναν κανόνα που να ορίζει εκ των προτέρων ποιος πράκτορας θα είναι ο διαχειριστής. Ένας τέτοιος απλός κανόνας ορίζει ότι ο πιο απομακρυσμένος διαθέσιμος κόμβος με πράκτορα γίνεται διαχειριστής από προεπιλογή. [11]

5.5 Περιγραφή προτεινόμενης μεθόδου

Σύμφωνα με τις παραγράφους 3.3 και 3.4 είναι δυνατόν να αναπτυχθεί μια μέθοδος που να επιλύει το πρόβλημα της αντιστάθμισης άεργου ισχύος για τον έλεγχο τάσης με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού και να είναι σύμφωνη με τα πρωτόκολλα επικοινωνίας ενός συστήματος πολυπρακτόρων. Προτείνονται και

αναλύονται ακολούθως δύο τέτοιοι μέθοδοι, ένας με ασύγχρονη ενημέρωση των τιμών των τάσεων και ένας με σύγχρονη.

ο **Αλγόριθμος ασύγχρονης ενημέρωσης των τιμών των τάσεων**

Το δίκτυο διανομής είναι διαχωρισμένο σε ζώνες με βάση κάποιον αλγόριθμο διαχωρισμού και εδώ συγκεκριμένα με βάση τον ε-διαχωρισμό. Αρχικά, όλοι οι πράκτορες που βρίσκονται εντός κάποιας ζώνης μετρούν την τάση και αν διαπιστώσουν παραβίαση του ορίου αποστέλλουν στον προεπιλεγμένο διαχειριστή της ζώνης αίτημα για υποστήριξη. Ο διαχειριστής κάθε ζώνης επιλέγει τον κόμβο με την μεγαλύτερη ανάγκη ρύθμισης και ζητά προσφορές από όλους τους υποψήφιους πράκτορες αναδόχους (βρίσκονται σε κόμβο με μονάδα DG). Έπειτα συλλέγει όλες τις προσφορές (αν δεν υπάρχει καθόλου διαθέσιμη άεργος, ο έλεγχος αποχωρεί από την συγκεκριμένη ζώνη) και εξουσιοδοτεί τον πράκτορα με την καλύτερη προσφορά. Συγκεκριμένα αν διαπιστωθεί υπόταση βρίσκεται ο κόμβος, έστω $targetNode$, με την μικρότερη τάση, έστω V_{min} . Ανάδοχος μονάδα είναι η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία $l_{targetNodej} = l_{max}$ ως προς τον $targetNode$. Ακολούθως υπολογίζεται η απαιτούμενη ανύψωση τάσεως ως $\Delta V = 0.95 - V_{min}$ (α.μ) και η απαιτούμενη παραγωγή άεργου ισχύος από την επιλεγμένη μονάδα DG ως $Q_{adjustment} = \frac{\Delta V}{l_{max}}$ (α.μ). Αν η τιμή αντιστάθμισης που υπολογίστηκε είναι διαθέσιμη από την εφεδρεία άεργου της μονάδας DG τότε αυτή παρέχεται, η εφεδρεία άεργου της μονάδας μειώνεται και οι τάσεις της ζώνης επανέρχονται εντός ορίων. Σε περίπτωση που η εφεδρεία της μονάδας δεν επαρκεί για την αντιστάθμιση, παρέχεται όλη η διαθέσιμη άεργος μηδενίζοντας έτσι την εφεδρεία της, αλλά αυτή τη φορά συνεχίζει να παρουσιάζεται παραβίαση των ορίων της τάσεως. Εφόσον ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία σε κάθε ζώνη γίνονται νέες μετρήσεις των τάσεων του δικτύου (ασύγχρονη ενημέρωση) και ελέγχεται πάλι αν υπάρχει κάπου παραβίαση των ορίων της τάσεως. Ο τελευταίος έλεγχος είναι απαραίτητος καθώς από την μια οι κινήσεις για αντιστάθμιση που προηγήθηκαν χρησιμοποιούν τις τιμές του πίνακα ευαισθησιών που είναι γραμμικοποιημένες για την προηγούμενη φόρτιση του δικτύου και από την άλλη ενδεχομένως σε κάποια ζώνη με πρόβλημα να μην επαρκούσε η άεργος οπότε η τάση να μην ρυθμίστηκε. Για την τελευταία περίπτωση, όταν επανέλθει ο έλεγχος υπολογίζονται πάλι τα ίδια μεγέθη τώρα όμως επιλέγοντας την μονάδα DG με την δεύτερη μεγαλύτερη ευαισθησία. Όταν όλες οι ζώνες αποκτήσουν τάσεις εντός ορίων σταματά ο έλεγχος.

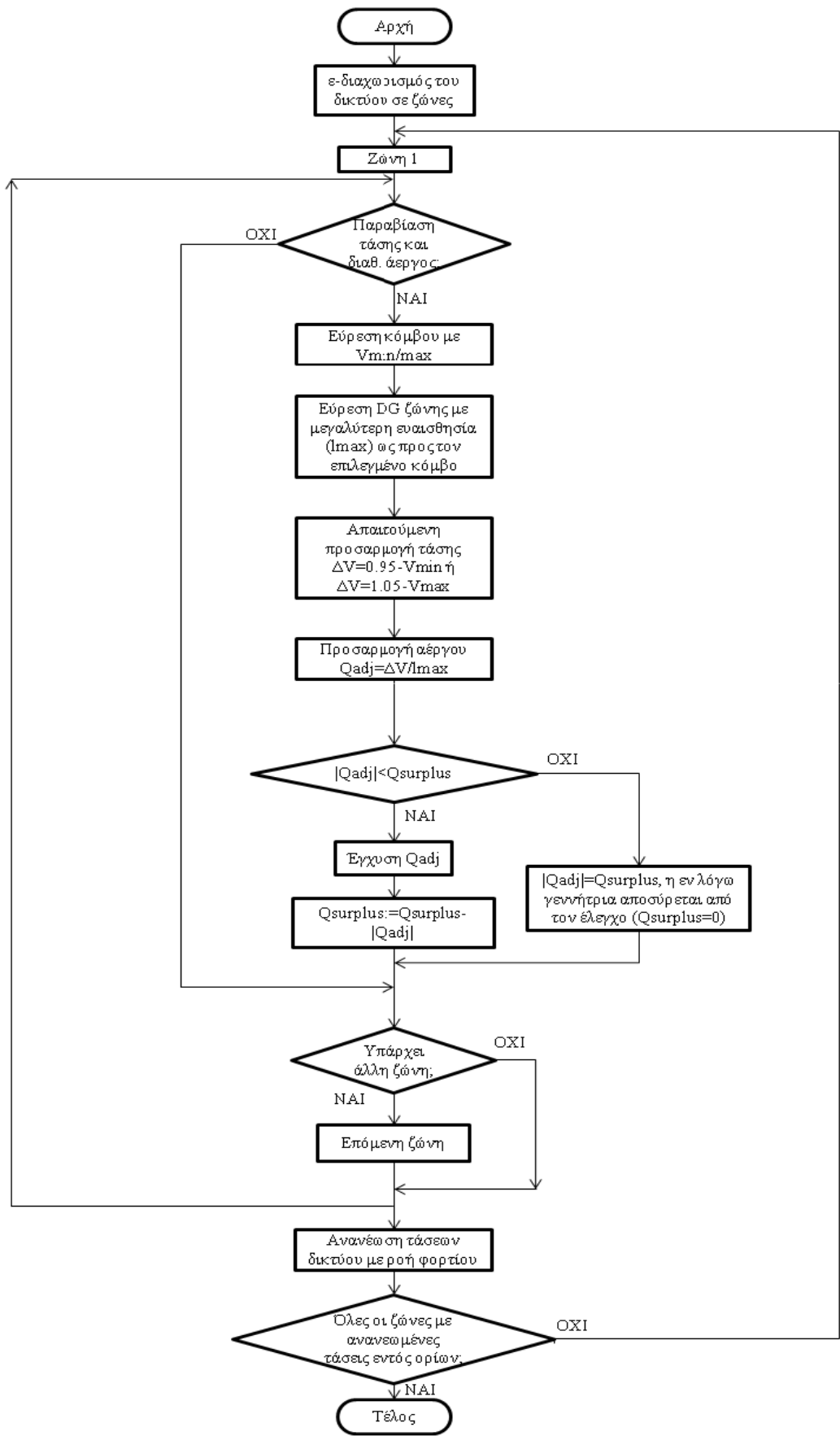
Σε περίπτωση υπέρτασης η διαδικασία είναι πανομοιότυπη με την διαφορά ότι ο διαχειριστής κάθε ζώνης επιλέγει τον κόμβο με την μεγαλύτερη τάση, έστω V_{max} . Η απαιτούμενη προσαρμογή της τάσης είναι αρνητική και υπολογίζεται ως $\Delta V = 1.05 - V_{max}$ (α.μ) και η προσαρμογή άεργου $Q_{adjustment} = \frac{\Delta V}{l_{max}}$ (α.μ). Η προσαρμογή είναι αρνητική που ως αναμενόμενο καταδεικνύει κατανάλωση άεργου.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται με μορφή αλγορίθμου στο διάγραμμα του σχήματος 5.3.

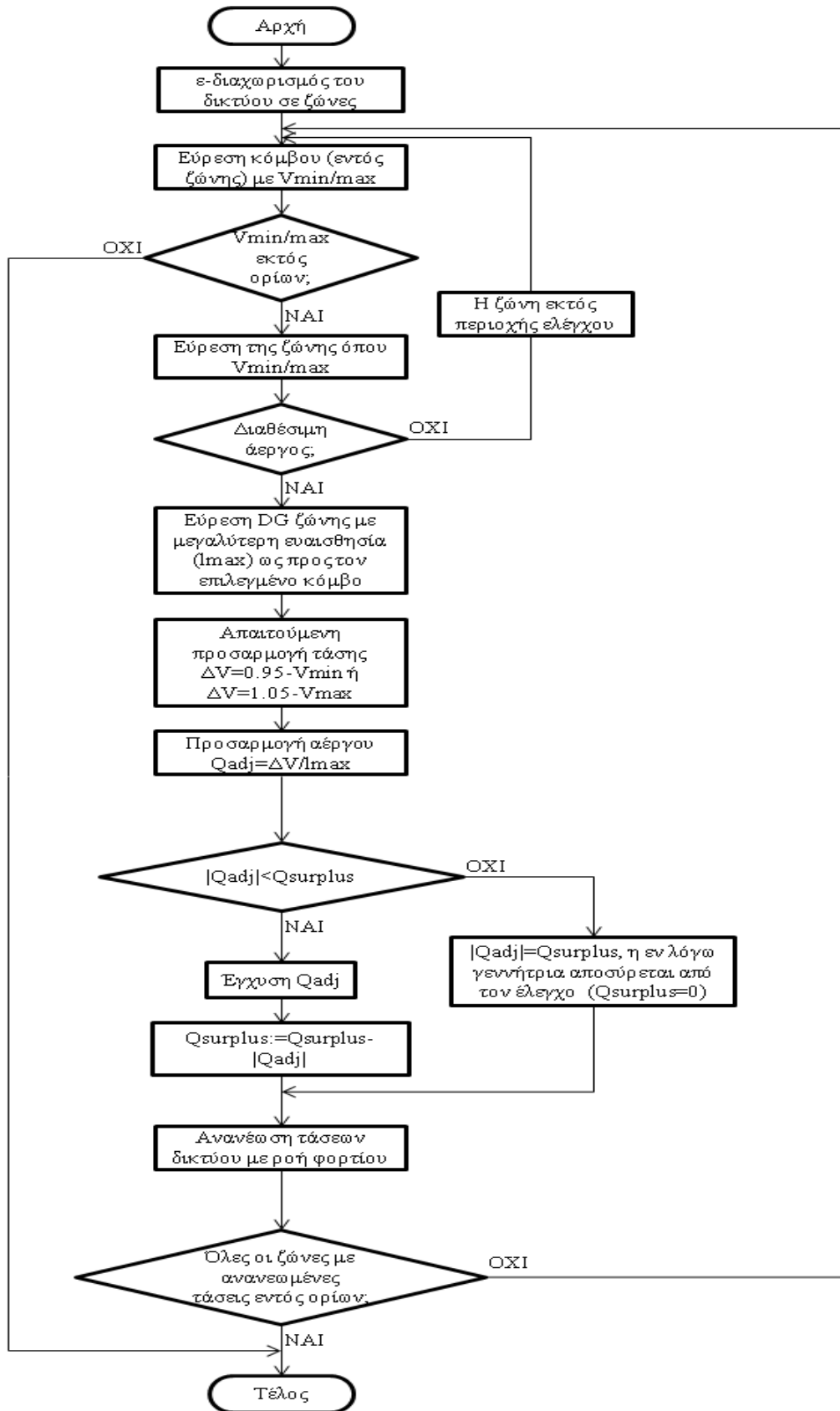
ο *Αλγόριθμος σύγχρονης ενημέρωσης των τιμών των τάσεων*

Το δίκτυο διανομής διαχωρίζεται σε ζώνες σύμφωνα με τον αλγόριθμο για τον ε-διαχωρισμό. Αμέσως, λαμβάνονται μετρήσεις από όλους τους πράκτορες που βρίσκονται σε κάποια ζώνη και αποστέλλονται στον πράκτορα διαχειριστή κάθε ζώνης. Οι διαχειριστές κάθε ζώνης επικοινωνούν μεταξύ τους και εντοπίζουν την μικρότερη και την μεγαλύτερη τιμή της τάσης και αν ξεπερνά μια από τις δύο τα όρια της τάσεως διαπιστώνεται υπόταση ή υπέρταση αντίστοιχα. Έπειτα για την ζώνη στην οποία αντιστοιχεί ο κόμβος με την τάση εκτός ορίων ζητούνται προσφορές από τους πράκτορες των μονάδων DG (αν δεν υπάρχει καθόλου διαθέσιμη άεργος, ο έλεγχος αποχωρεί από την συγκεκριμένη ζώνη) και αποδίδεται το έργο στον πράκτορα ανάδοχο με την καλύτερη προσφορά όπως και στον ασύγχρονο αλγόριθμο. Υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο με τον ασύγχρονο αλγόριθμο η μέγιστη ευαισθησία l_{max} , η απαιτούμενη προσαρμογή της τάσης ΔV και η άεργος αντιστάθμισης $Q_{adjustment}$. Και εδώ αν η εφεδρεία της επιλεγμένης μονάδας DG επαρκεί για την απαιτούμενη προσαρμογή τότε η τάση ρυθμίζεται και η εφεδρεία άεργου μειώνεται, ενώ αν δεν επαρκεί η τάση δεν ρυθμίζεται και η εφεδρεία της μονάδας μηδενίζεται. Μετά από κάθε κίνηση αντιστάθμισης γίνονται νέες μετρήσεις των τάσεων του δικτύου (σύγχρονη ανανέωση) και ο έλεγχος επανέρχεται εντοπίζοντας πάλι την μικρότερη και την μεγαλύτερη τάση σε ζώνη. Αν χρειαστεί να επανέλθει ο έλεγχος και μια μονάδα δεν έχει καθόλου διαθέσιμη εφεδρεία, θα δώσει έργο η μονάδα DG με την αμέσως μεγαλύτερη ευαισθησία. Ο έλεγχος σταματά όταν όλες οι τάσεις σε όλες τις ζώνες είναι εντός ορίων.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται με μορφή αλγορίθμου στο διάγραμμα του σχήματος 5.4.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο ασύγχρονης ενημέρωσης των τάσεων.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο σύγχρονης ενημέρωσης των τάσεων.

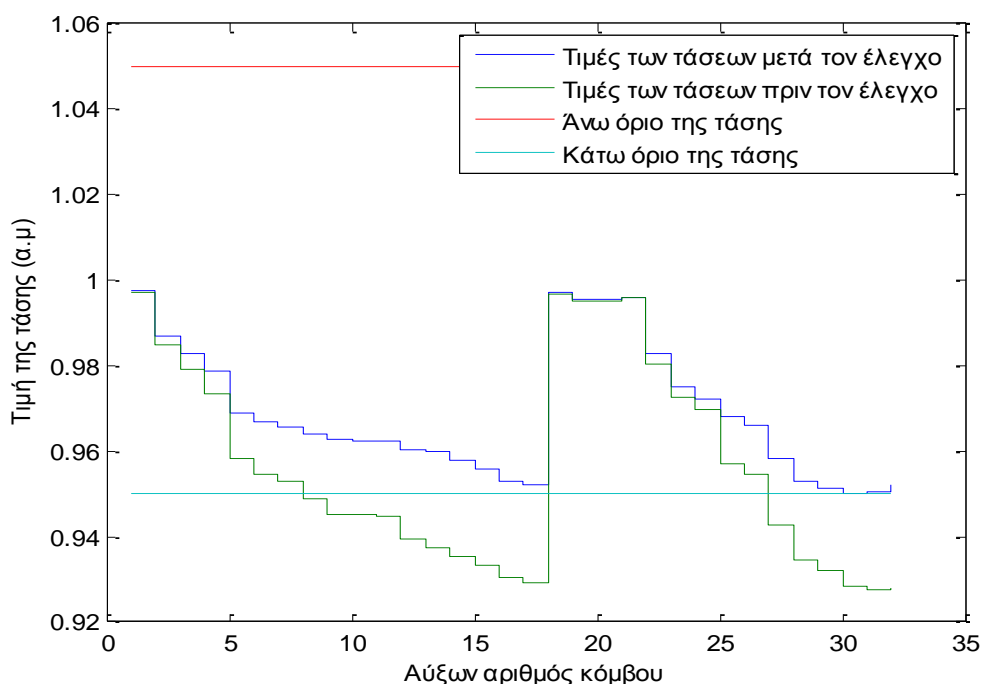
Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ σύγχρονου και ασύγχρονου αλγορίθμου είναι ότι στον σύγχρονο μια κίνηση αντιστάθμισης σε μια ζώνη, μέσω ανανέωσης των μετρήσεων, επηρεάζει τις τιμές των τάσεων σε όλες τις ζώνες καθώς οι υπόλοιπες ζώνες αναμένουν τις κινήσεις ελέγχου που πραγματοποιεί η κάθε ζώνη ξεχωριστά και λαμβάνουν τις ανανεωμένες τιμές τάσης των ζυγών τους. Από την άλλη, στον ασύγχρονο οι έλεγχοι γίνονται παράλληλα και οι κινήσεις μιας ζώνης θεωρείται ότι δεν επηρεάζουν τις τάσεις στις υπόλοιπες ζώνες. Συνεπώς, ο ασύγχρονος τρόπος αναμένεται να έχει ταχύτερα αποτελέσματα καθώς δεν απαιτεί επικοινωνία μεταξύ των ζωνών σε κάθε βήμα ελέγχου αλλά αναμένεται να απαιτεί περισσότερη άεργο αντιστάθμισης σε σχέση με τον σύγχρονο.

Τα παραπάνω αναμένεται να επαληθευτούν με την εφαρμογή τους στο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE και το δίκτυο 101 ζυγών της Σπερχειάδας. Ισχύουν όλες οι παραδοχές που έγιναν στην παράγραφο 4.5.

5.6 Περίπτωση δικτύου 33 ζυγών της IEEE

Στο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE επιλέξαμε να παρουσιάσουμε την επίλυση του σύγχρονου και ασύγχρονου αλγορίθμου για την εξεταζόμενη υπόταση της παραγράφου 4.6 (ονομαστική παραγωγή, φορτίο τετραπλασιασμένο). Σημειώνεται ότι εξετάζεται μόνο η περίπτωση αποκεντρωμένου ελέγχου για τις τιμές του ϵ που επιλέχθηκαν στην υποπαράγραφο 3.6.1.

5.6.1 Αλγόριθμος με ασύγχρονη ανανέωση των τάσεων



Σχήμα 5.5: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με ασύγχρονη ενημέρωση των τάσεων.

Στο σχήμα 5.5 φαίνεται το προφίλ της τάσης κατά την εκδήλωση της υπότασης και μετά τον έλεγχο. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός ορίων. Συγκρίνοντάς το με το αντίστοιχο γράφημα για γραμμικό προγραμματισμό (σχήμα 4.7) δεν παρουσιάζεται κάποια σημαντική ποιοτική διαφορά, γεγονός εν πολλοίς αναμενόμενο καθότι και στα δύο εφαρμόζεται η λογική του γραμμικού προγραμματισμού. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων του αλγορίθμου.

Οι πράκτορες σε όλες τις ζώνες πραγματοποιούν μετρήσεις των τάσεων τους και αυτοί που διαπιστώνουν παραβίαση των ορίων στέλνουν αίτημα ενίσχυσης στον διαχειριστή της ζώνης που ανήκουν.

Ξεκινώντας από την ζώνη 1, ο προεπιλεγμένος πράκτορας διαχειριστής της ζώνης εντοπίζει τον κόμβο 17 που έχει την μικρότερη τάση $V_{17} = 0.9293$ α.μ. Καθώς $V_{17} < 0.95$ διαγιγνώσκεται πρόβλημα υπότασης και ζητείται από όλους τους πράκτορες των μονάδων DG της ζώνης να καταθέσουν προσφορές, την προσφορά κερδίζει η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Συγκεκριμένα η μονάδα DG στον κόμβο 13 γίνεται ανάδοχος του έργου με τιμή ευαισθησίας $l_{17,13} = 1.5459$ α.μ. Η απαιτούμενη ανύψωση τάσης είναι $\Delta V = 0.95 - V_{17} = 0.0207$ (α.μ) και απαιτεί έγχυση άεργου $Q_{adjustment,13} = \frac{\Delta V}{l_{max}} = \frac{0.0207}{1.5459} = 0.0134$ (α.μ). Βάση ισχύος είναι τα 100 MVA οπότε $Q_{adjustment,13} = 1.34$ MVar. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1 η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη διαθέσιμη προς παραγωγή, συνεπώς $Q_{adjustment,13} = 1.0003$ MVar και η μονάδα αποσύρεται από τον έλεγχο.

Συνεχίζοντας στην ζώνη 2 δεν εντοπίζεται πρόβλημα υπότασης.

Τέλος φτάνοντας στη ζώνη 3, ο προεπιλεγμένος πράκτορας διαχειριστής της ζώνης εντοπίζει τον κόμβο 31 που έχει την μικρότερη τάση $V_{31} = 0.9277$ α.μ. Καθώς $V_{31} < 0.95$ διαγιγνώσκεται πρόβλημα υπότασης και ζητείται από όλους τους πράκτορες των μονάδων DG της ζώνης να καταθέσουν προσφορές, την προσφορά κερδίζει η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Συγκεκριμένα η μονάδα DG στον κόμβο 32 γίνεται ανάδοχος του έργου με τιμή ευαισθησίας $l_{31,32} = 1.3474$ α.μ. Η απαιτούμενη ανύψωση τάσης είναι $\Delta V = 0.95 - V_{31} = 0.0223$ (α.μ) και απαιτεί έγχυση άεργου $Q_{adjustment,32} = \frac{\Delta V}{l_{max}} = \frac{0.0223}{1.3474} = 0.0166$ (α.μ). Βάση ισχύος είναι τα 100 MVA οπότε $Q_{adjustment,32} = 1.66$ MVar. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1 η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη διαθέσιμη προς παραγωγή, συνεπώς $Q_{adjustment,32} = 1.0003$ MVar και η μονάδα αποσύρεται από τον έλεγχο.

Στο σημείο αυτό πραγματοποιούνται νέες μετρήσεις της τάσης από όλους τους πράκτορες των ζωνών. Παρατηρούμε ότι υπάρχει ακόμα πρόβλημα υπότασης οπότε επαναλαμβάνεται ο ζώνη προς ζώνη έλεγχος.

Συνοπτικότερα, στη ζώνη 1 ο κόμβος 17 έχει την μικρότερη τιμή της τάσης $V_{17} = 0.9484$ α.μ. Η μονάδα ανάδοχος είναι τώρα η υπ αριθμόν 11 με ευαισθησία $l_{17,11} = 1.0504$ α.μ και πρέπει να ανυψώσει την τάση κατά $\Delta V = 0.0016$ (α.μ), οπότε η

απαιτούμενη παραγωγή έργου είναι $Q_{adjustment,11} = 0.1527 \text{ MVar}$ η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας. Η ζώνη 2 δεν παρουσιάζει πρόβλημα υπότασης. Τέλος, στη ζώνη 3 ο κόμβος 30 έχει την μικρότερη τιμή της τάσης $V_{30} = 0.9442 \text{ α.μ}$. Η μονάδα ανάδοχος είναι τώρα η υπ αριθμόν 29 με ευαισθησία $l_{30,29} = 0.9967 \text{ α.μ}$ και πρέπει να ανυψώσει την τάση κατά $\Delta V = 0.0058 \text{ (α.μ)}$, οπότε η απαιτούμενη παραγωγή έργου είναι $Q_{adjustment,29} = 0.5769 \text{ MVar}$ η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας.

Πραγματοποιούνται πάλι μετρήσεις από τους πράκτορες όπου και δεν διαπιστώνεται υπόταση σε κάποια ζώνη και ο έλεγχος τερματίζει.

Στον πίνακα 5.1 φαίνεται η προσαρμογή έργου ισχύος και το τεχνικό όριο έργου για όλες τις μονάδες στις ζώνες που παρουσιάζεται υπόταση. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται οι τιμές ευαισθησίας των κόμβων με την μικρότερη τάση σε κάθε ζώνη με υπόταση ως προς τις μονάδες DG της ζώνης. Με κόκκινο σημειώνονται οι ευαισθησίες μονάδων που έχουν εξαντλήσει την εφεδρεία έργου σε κάποιο βήμα του αλγορίθμου.

Πίνακας 5.1: Τεχνικές προδιαγραφές μονάδων DG στις ζώνες που συμμετέχουν στον έλεγχο τάσης και αντιστάθμιση έργου κάθε μονάδας.

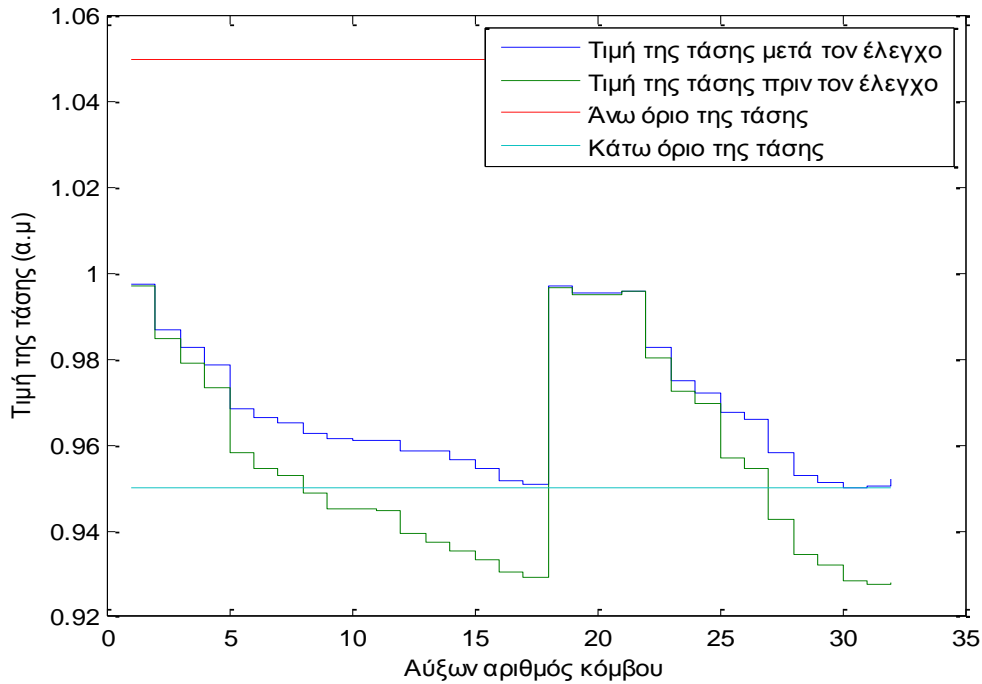
Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{technical}$ (MVar)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_7	1	± 1.0003	0
DG_{11}	1	± 1.0003	0.1527
DG_{13}	1	± 1.0003	1.0003
<i>Ζώνη 3</i>			
DG_{25}	1	± 1.0003	0
DG_{29}	1	± 1.0003	0.5769
DG_{32}	1	± 1.0003	1.0003
Σύνολο	6	± 6.0018	2.7302

Πίνακας 5.2: Τιμές ευαισθησίας κόμβων με υπόταση ως προς τις μονάδες DG των ζυγών της ζώνης που ανήκουν.

Κόμβος\Μονάδα DG	Ζώνη 1			Ζώνη 3		
	7	11	13	25	29	32
17	0.6028	1.0504	1.5459	-	-	-
31	-	-	-	0.4080	0.9974	1.3474
30	-	-	-	0.4077	0.9967	1.2550

Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με την επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό για την αντίστοιχη υπόταση (υποπαράγραφος 2.6.2) εδώ απαιτείται λιγότερη έργος ισχύς (2.7302 από 2.9298 MVar).

5.6.2 Αλγόριθμος με σύγχρονη ανανέωση των τάσεων



Σχήμα 5.6: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με σύγχρονη ενημέρωση των τάσεων.

Στο σχήμα 5.6 φαίνεται το προφίλ της τάσης κατά την εκδήλωση της υπότασης και μετά τον έλεγχο. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός ορίων. Συγκρίνοντάς το με το αντίστοιχο γράφημα για ασύγχρονη ενημέρωση (σχήμα 5.5) δεν παρουσιάζεται κάποια σημαντική ποιοτική διαφορά. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων του αλγορίθμου.

Αρχικά οι προεπιλεγμένοι πράκτορες διαχειριστές της κάθε ζώνης λαμβάνουν από τους πράκτορες της ζώνης τους τις μετρήσεις για τις τιμές των τάσεων και εντοπίζουν την μεγαλύτερη και μικρότερη τιμή τάσης της ζώνης τους. Διαπιστώνεται ότι στη ζώνη 1 και 3 παρουσιάζεται παραβίαση του κάτω ορίου της τάσης. Μετά από επικοινωνία των διαχειριστών μεταξύ τους βρίσκεται η μικρότερη τιμή τάσης να είναι στη ζώνη 3 και συγκεκριμένα στον κόμβο 31 με $V_{31} = 0.9277$ α.μ. Ακολούθως, ζητείται από όλους τους πράκτορες των μονάδων DG της ζώνης να καταθέσουν προσφορές, την προσφορά κερδίζει η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Συγκεκριμένα η μονάδα DG στον κόμβο 32 γίνεται ανάδοχος του έργου με τιμή ευαισθησίας $l_{31,32} = 1.3474$ α.μ. Η απαιτούμενη ανύψωση τάσης είναι $\Delta V = 0.95 - V_{31} = 0.0224$ (α.μ) και απαιτεί έγχυση άεργου $Q_{adjustment,32} = \frac{\Delta V}{l_{max}} = \frac{0.0224}{1.3474} = 0.0166$ (α.μ). Βάση ισχύος είναι τα 100 MVA οπότε $Q_{adjustment,32} = 1.66$ MVar. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3 η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη διαθέσιμη προς παραγωγή, συνεπώς $Q_{adjustment,32} = 1.0003$ MVar και η μονάδα αποσύρεται από τον έλεγχο.

Σε αυτό το σημείο γίνονται νέες μετρήσεις των τιμών των τάσεων του δικτύου και επαναλαμβάνεται η ως άνω διαδικασία.

Αυτή τη φορά ο κόμβος 17 της ζώνης 1 παρουσιάζει την μικρότερη τάση σε ζώνη με $V_{17} = 0.9335$ α.μ. . Η μονάδα ανάδοχος είναι τώρα η υπ' αριθμόν 13 με ευαισθησία $l_{17,13} = 1.5459$ α.μ και πρέπει να ανυψώσει την τάση κατά $\Delta V = 0.0166$ (α.μ), οπότε η απαιτούμενη παραγωγή άεργου είναι $Q_{adjustment,13} = 1.0738$ MVar. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3 η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη διαθέσιμη προς παραγωγή, συνεπώς $Q_{adjustment,13} = 1.0003$ MVar και η μονάδα αποσύρεται από τον έλεγχο.

Ακολουθεί νέα μέτρηση των τιμών των τάσεων και εντοπίζεται ο κόμβος 30 της ζώνης 3 να έχει την μικρότερη τάση με $V_{30} = 0.9442$ α.μ. Η μονάδα ανάδοχος είναι τώρα η υπ αριθμόν 29 με ευαισθησία $l_{30,29} = 0.9967$ α.μ και πρέπει να ανυψώσει την τάση κατά $\Delta V = 0.0059$ (α.μ), οπότε η απαιτούμενη παραγωγή άεργου είναι $Q_{adjustment,29} = 0.5869$ MVar η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας. Μετά την επόμενη ανανέωση τάσεων εντοπίζεται πάλι το ίδιο ζευγάρι κόμβου – μονάδας DG να συμμετέχει στον έλεγχο εγχέοντας επιπλέον άεργο. Αθροιζόμενης και της προηγούμενης έγχυσης προκύπτει $Q_{adjustment,29} = 0.6232$ MVar.

Μετά το σημείο αυτό η ανανέωση των τιμών των τάσεων δείχνει ότι δεν υπάρχει πουθενά παραβίαση των ορίων της τάσεως και ο έλεγχος τερματίζει.

Στον πίνακα 5.3 φαίνεται η προσαρμογή άεργου ισχύος και το τεχνικό όριο άεργου για όλες τις μονάδες στις ζώνες που παρουσιάζεται υπόταση.

Πίνακας 5.3: Τεχνικές προδιαγραφές μονάδων DG στις ζώνες που συμμετέχουν στον έλεγχο τάσης και αντιστάθμιση άεργου κάθε μονάδας.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{technical}$ (MVar)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_7	1	± 1.0003	0
DG_{11}	1	± 1.0003	0
DG_{13}	1	± 1.0003	1.0003
<i>Ζώνη 3</i>			
DG_{25}	1	± 1.0003	0
DG_{29}	1	± 1.0003	0.6232
DG_{32}	1	± 1.0003	1.0003
Σύνολο	6	± 6.0018	2.6238

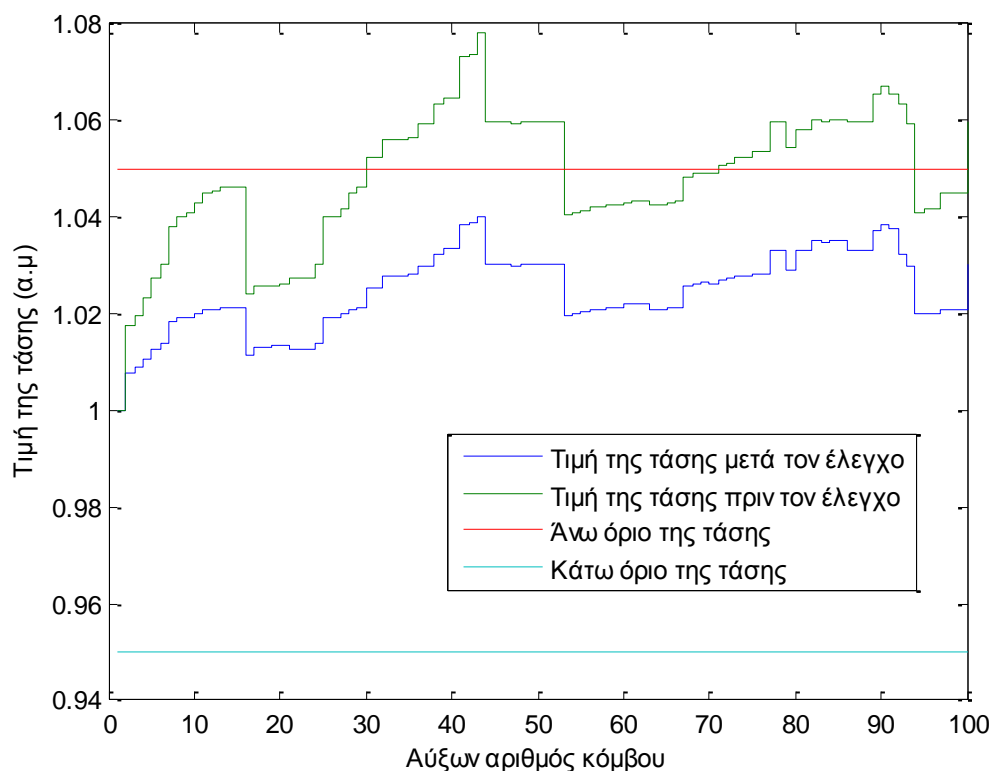
Παρατηρούμε ότι η απαιτούμενη αντιστάθμιση ισχύος είναι μικρότερη στον σύγχρονο τρόπο από ότι στον ασύγχρονο (2.6238 από 2.7302 MVar).

5.7 Περίπτωση δικτύου διανομής 101 ζυγών Σπερχειάδας

Όπως και στο δίκτυο 33 ζυγών εφαρμόσαμε τον αλγόριθμο με ασύγχρονη και σύγχρονη ενημέρωση των τάσεων θα πράξουμε το ίδιο και για το δίκτυο της

Σπερχειάδας. Για την Σπερχειάδα θα εξετάσουμε την περίπτωση της υπέρτασης που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.7 (φορτίο μειωμένο κατά 30% και παραγωγή πενταπλασιασμένη στις ζώνες 2, 3, 4 και 5 και αυξημένη κατά 50% στην ζώνη 1). Σημειώνεται ότι και εδώ εξετάζεται μόνο η περίπτωση αποκεντρωμένου ελέγχου για τις τιμές του ε που επιλέχθηκαν στην υποπαράγραφο 3.6.2.

5.7.1 Αλγόριθμος με ασύγχρονη ενημέρωση των τάσεων



Σχήμα 5.7: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με ασύγχρονη ενημέρωση των τάσεων.

Στο σχήμα 5.7 φαίνεται το προφίλ της τάσης κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον έλεγχο. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός ορίων. Συγκρίνοντάς το με το αντίστοιχο γράφημα για γραμμικό προγραμματισμό (σχήμα 4.18) παρατηρούμε μια ποιοτική διαφορά. Η ανώτερη τιμή της τάσης είναι αρκετά μικρότερη από το όριο 1.05 αμ. Αυτή η διαφορά ουσιαστικά οφείλεται στο γεγονός ότι οι υπολογισμοί γίνονται σε κάθε ζώνη ασύγχρονα και δεν λαμβάνουν υπόψη την επιρροή της μιας ζώνης στην άλλη, συνέπεια αυτού είναι να καταναλώνεται τελικά περισσότερη άεργος από ότι χρειάζεται ώστε να ρυθμιστεί η τάση εντός ορίων. Σημειώνεται ότι ο αλγόριθμος γραμμικού προγραμματισμού του Κεφαλαίου 4 ακολουθεί την σύγχρονη λογική.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων του αλγορίθμου.

Οι πράκτορες σε όλες τις ζώνες πραγματοποιούν μετρήσεις των τάσεων τους και αυτοί που διαπιστώνουν παραβίαση των ορίων στέλνουν αίτημα ενίσχυσης στον διαχειριστή της ζώνης που ανήκουν.

Ξεκινώντας από την ζώνη 1, ο προεπιλεγμένος πράκτορας διαχειριστής της ζώνης εντοπίζει τον κόμβο 43 που έχει την μεγαλύτερη τάση $V_{43} = 1.0781$ α.μ. Καθώς $V_{43} > 1.05$ διαγιγνώσκεται πρόβλημα υπέρτασης και ζητείται από όλους τους πράκτορες των μονάδων DG της ζώνης να καταθέσουν προσφορές, την προσφορά κερδίζει η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Συγκεκριμένα η μονάδα DG στον κόμβο 43 γίνεται ανάδοχος του έργου με τιμή ευαισθησίας $l_{43,43} = 1.0504$ α.μ. Ο απαιτούμενος υποβιβασμός τάσης είναι $\Delta V = 1.05 - V_{43} = -0.0281$ (α.μ) και απαιτεί κατανάλωση άεργου $Q_{adj,43} = \frac{\Delta V}{l_{max}} = -\frac{0.0281}{1.0504} = -0.0267$ (α.μ). Βάση ισχύος είναι τα 100 MVA οπότε $Q_{adj,43} = -2.6734$ MVar η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας.

Συνεχίζοντας στις ζώνες 2, 3 και 4 δεν παρουσιάζεται πρόβλημα υπέρτασης.

Τέλος φτάνοντας στη ζώνη 5, ο προεπιλεγμένος πράκτορας διαχειριστής της ζώνης εντοπίζει τον κόμβο 90 που έχει την μεγαλύτερη τάση $V_{90} = 1.0672$ α.μ. Καθώς $V_{90} > 1.05$ διαγιγνώσκεται πρόβλημα υπέρτασης και ζητείται από όλους τους πράκτορες των μονάδων DG της ζώνης να καταθέσουν προσφορές, την προσφορά κερδίζει η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Συγκεκριμένα η μονάδα DG στον κόμβο 90 γίνεται ανάδοχος του έργου με τιμή ευαισθησίας $l_{90,90} = 0.8152$ α.μ. Ο απαιτούμενος υποβιβασμός τάσης είναι $\Delta V = 1.05 - V_{90} = -0.0172$ (α.μ) και απαιτεί έγχυση άεργου $Q_{adj,90} = \frac{\Delta V}{l_{max}} = -\frac{0.0172}{0.8152} = -0.0211$ (α.μ). Βάση ισχύος είναι τα 100 MVA οπότε $Q_{adj,90} = -2.1146$ MVar η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας.

Στο σημείο αυτό πραγματοποιούνται νέες μετρήσεις της τάσης από όλους τους πράκτορες των ζωνών. Παρατηρούμε ότι δεν διαπιστώνεται υπέρταση σε κάποια ζώνη και ο έλεγχος τερματίζει.

Στον πίνακα 5.4 φαίνεται η προσαρμογή άεργου ισχύος και το τεχνικό όριο άεργου για όλες τις μονάδες στις ζώνες που παρουσιάζεται υπέρταση. Στον πίνακα 5.5 φαίνονται οι τιμές ευαισθησίας των κόμβων με την μεγαλύτερη τάση σε κάθε ζώνη με υπέρταση ως προς τις μονάδες DG της ζώνης.

Πίνακας 5.4: Τεχνικές προδιαγραφές μονάδων DG στις ζώνες που συμμετέχουν στον έλεγχο τάσης και αντιστάθμιση άεργου κάθε μονάδας.

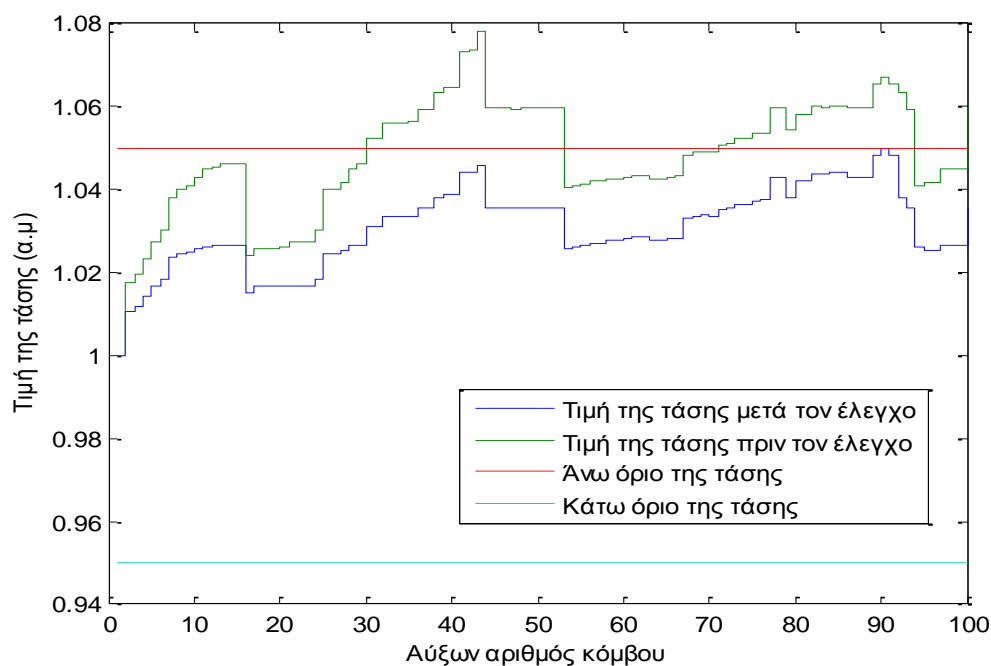
Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{technical}$ (MVar)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_{29}	0.75	± 0.7502	0
DG_{33}	0.15	± 0.15	0
DG_{35}	0.75	± 0.7502	0
DG_{40}	0.15	± 0.15	0
DG_{42}	1.911	± 1.9116	0
DG_{43}	2.7225	± 2.7233	-2.6734
DG_{92}	0.15	± 0.15	0
DG_{93}	0.03	± 0.03	0
DG_{97}	0.1500	± 0.15	0
DG_{99}	0.1500	± 0.15	0
DG_{100}	0.0750	± 0.075	0
<i>Ζώνη 5</i>			
DG_{69}	0.5	± 0.5002	0
DG_{70}	0.5	± 0.5002	0
DG_{72}	0.5	± 0.5002	0
DG_{81}	0.5	± 0.5002	0
DG_{85}	0.5	± 0.5002	0
DG_{90}	3.5	± 3.5011	-2.1146
DG_{91}	2.35	± 2.3507	0
Σύνολο	15.3385	± 15.3431	-4.7880

Πίνακας 5.5: Τιμές ευαισθησίας κόμβων με υπέρταση ως προς τις μονάδες DG των ζυγών της ζώνης που ανήκουν.

<i>Ζώνη 1</i>		<i>Ζώνη 5</i>	
Μονάδες DG	Κόμβος 43	Μονάδες DG	Κόμβος 90
29	0.5642	69	0.5186
33	0.6790	70	0.5186
35	0.6830	72	0.5705
40	0.8034	81	0.6326
42	0.9310	85	0.6326
43	1.0504	90	0.8152
92	0.7809	91	0.7767
93	0.7272	-	-
97	0.5327	-	-
99	0.5327	-	-
100	0.7282	-	-

Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με την επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό για την αντίστοιχη υπέρταση (υποπαράγραφος 4.7.2) εδώ καταναλώνεται περισσότερη άεργος ισχύς (-4.7880 από -3.4774 MVar), για λόγους που εξηγήθηκαν στην αρχή της υποπαραγράφου.

5.7.2 Αλγόριθμος με σύγχρονη ενημέρωση των τάσεων



Σχήμα 5.8: Γράφημα τάσεως πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο με σύγχρονη ενημέρωση των τάσεων.

Στο σχήμα 5.8 φαίνεται το προφίλ της τάσης κατά την εκδήλωση της υπέρτασης και μετά τον έλεγχο. Παρατηρούμε ότι η τάση επανέρχεται εντός ορίων. Συγκρίνοντάς το με το αντίστοιχο γράφημα για ασύγχρονη ενημέρωση (σχήμα 5.7) διακρίνεται ότι εδώ η μεγαλύτερη τιμή της τάσης ισούται με το άνω όριο ως αναμενόταν.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων του αλγορίθμου.

Αρχικά οι προεπιλεγμένοι πράκτορες διαχειριστές της κάθε ζώνης λαμβάνουν από τους πράκτορες της ζώνης τους τις μετρήσεις για τις τιμές των τάσεων και εντοπίζουν την μεγαλύτερη και μικρότερη τιμή τάσης της ζώνης τους. Διαπιστώνεται ότι στη ζώνη 1 και 5 παρουσιάζεται παραβίαση του άνω ορίου της τάσης. Μετά από επικοινωνία των διαχειριστών μεταξύ τους βρίσκεται η μεγαλύτερη τιμή τάσης να είναι στη ζώνη 1 και συγκεκριμένα στον κόμβο 43 με $V_{43} = 1.0781$ α.μ. Ακολούθως, ζητείται από όλους τους πράκτορες των μονάδων DG της ζώνης να καταθέσουν προσφορές, την προσφορά κερδίζει η μονάδα DG με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Συγκεκριμένα η μονάδα DG στον κόμβο 43 γίνεται ανάδοχος του έργου με τιμή ευαισθησίας $l_{43,43} = 1.0504$ α.μ. Ο απαιτούμενος υποβιβασμός τάσης είναι $\Delta V = 1.05 - V_{43} = -0.0281$ (α.μ) και απαιτεί κατανάλωση άεργου $Q_{adj,43} = \frac{\Delta V}{l_{max}} = -\frac{0.0281}{1.0504} = -0.0267$ (α.μ). Βάση ισχύος είναι τα 100 MVA οπότε $Q_{adj,43} = -2.6734$ MVar η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας.

Σε αυτό το σημείο γίνεται νέα μέτρηση των τιμών των τάσεων από τους πράκτορες για ανανέωση των τιμών των τάσεων του δικτύου και επαναλαμβάνεται η ως άνω διαδικασία.

Αυτή τη φορά ο κόμβος 90 της ζώνης 5 παρουσιάζει την μεγαλύτερη τάση σε ζώνη με $V_{90} = 1.0564$ α.μ. Η μονάδα ανάδοχος είναι τώρα η υπ αριθμόν 90 με ευαισθησία $l_{90,90} = 0.8152$ α.μ και πρέπει να υποβιβάσει την τάση κατά $\Delta V = -0.0064$ (α.μ), οπότε η απαιτούμενη κατανάλωση άεργου είναι $Q_{adj,90} = -0.7871$ MVar η οποία είναι εντός της εφεδρείας της μονάδας.

Ακολουθεί ανανέωση των τιμών των τάσεων που δείχνει ότι δεν υπάρχει πουθενά παραβίαση των ορίων της τάσεως και ο έλεγχος σταματά.

Στον πίνακα 5.6 φαίνεται η προσαρμογή άεργου ισχύος και το τεχνικό όριο άεργου για όλες τις μονάδες στις ζώνες που παρουσιάζεται υπέρταση.

Πίνακας 5.6: Τεχνικές προδιαγραφές μονάδων DG στις ζώνες που συμμετέχουν στον έλεγχο τάσης και αντιστάθμιση άεργου κάθε μονάδας.

Μονάδα DG	$P_{DG,production}$ (MW)	$Q_{technical}$ (MVar)	$Q_{DG,adjustment}$ (MVar)
<i>Ζώνη 1</i>			
DG_{29}	0.75	± 0.7502	0
DG_{33}	0.15	± 0.15	0
DG_{35}	0.75	± 0.7502	0
DG_{40}	0.15	± 0.15	0
DG_{42}	1.911	± 1.9116	0
DG_{43}	2.7225	± 2.7233	-2.6734
DG_{92}	0.15	± 0.15	0
DG_{93}	0.03	± 0.03	0
DG_{97}	0.1500	± 0.15	0
DG_{99}	0.1500	± 0.15	0
DG_{100}	0.0750	± 0.075	0
<i>Ζώνη 5</i>			
DG_{69}	0.5	± 0.5002	0
DG_{70}	0.5	± 0.5002	0
DG_{72}	0.5	± 0.5002	0
DG_{81}	0.5	± 0.5002	0
DG_{85}	0.5	± 0.5002	0
DG_{90}	3.5	± 3.5011	-0.7871
DG_{91}	2.35	± 2.3507	0
Σύνολο	15.3385	± 15.3431	-3.4606

Παρατηρούμε ότι η απαιτούμενη αντιστάθμιση ισχύος είναι μικρότερη στον σύγχρονο τρόπο από ότι στον ασύγχρονο (-3.4606 από -4.7880 MVar).

5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Τόσο στο δίκτυο 33 ζυγών όσο και στο δίκτυο της Σπερχειάδας τα αποτελέσματα των προτεινόμενων μεθόδων είναι ποιοτικά ίδια. Πιο συγκεκριμένα, η σύγχρονη μέθοδος

υπερτερεί της ασύγχρονης καθώς απαιτεί λιγότερη προσαρμογή άεργου ισχύος για την ίδια διαταραχή της τάσης και σε κάθε περίπτωση ο κόμβος με την μεγαλύτερη απόκλιση από το όριο της τάσης μετά την ρύθμιση είναι ακριβώς πάνω στο όριο. Εντούτοις, η σύγχρονη μέθοδος αναμένεται να είναι πιο αργή στην υλοποίηση γιατί απαιτεί μετά από κάθε κίνηση αντιστάθμισης να λαμβάνονται από τους πράκτορες τα νέα δεδομένα για την τάση. Οπότε σε περίπτωση που απαιτείται ταχεία αντίδραση η ασύγχρονη μέθοδος κερδίζει έδαφος.

Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σύγκλιση με αυτά της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού γεγονός που φανερώνει την επιτυχία της προτεινόμενης μεθόδου συνεργασίας πολυπρακτόρων.

Κεφάλαιο 6^ο – Σύνοψη και προοπτικές επέκτασης

6.1 Σύνοψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση ενός αποκεντρωμένου μοντέλου ελέγχου τάσης και η εφαρμογή του μέσω ενός συστήματος πολυπρακτόρων. Η ανάγκη για την παρουσίαση ενός τέτοιου μοντέλου γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική όσο αυξάνεται η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και αυτά μετατρέπονται από παθητικά δίκτυα σε ενεργητικά.

Αρχικά, προτείνεται τρόπος για τον διαχωρισμό του δικτύου διανομής σε ζώνες με χρήση του πίνακα ευαισθησιών του δικτύου. Ο πίνακας ευαισθησιών προκύπτει με αντιστροφή του Ιακωβιανού πίνακα του δικτύου. Στη συνέχεια, με τρόπο που περιγράφηκε επιλέχθηκε ένας αριθμός – κατώφλι ϵ που καθορίζει ποιές συνδέσεις του δικτύου παραμένουν και ποιες απαλείφονται. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ζώνες με ισχυρή διασύνδεση μεταξύ των συμμετεχόντων κόμβων. Μειονέκτημα του ε-διαχωρισμού αποτελεί το γεγονός ότι οι ζώνες καθορίζονται στατικά για μια κατάσταση φόρτισης του δικτύου και αδυνατούν να ανταπεξέλθουν αποτελεσματικά στις δυναμικές αλλαγές της φόρτισης.

Ακολούθως για το διαχωρισμένο δίκτυο προτείνεται έλεγχος τάσης μέσω επίλυσης γραμμικού προγραμματισμού. Εδώ αποσκοπούμε στην βελτιστοποίηση της αντιστάθμισης άεργου ισχύος που απαιτείται για την επαναφορά της τάσης εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για περίπτωση κεντρικού και αποκεντρωμένου ελέγχου για τα δίκτυα των 33 ζυγών και της Σπερχειάδας προκειμένου να καταδειχτούν οι μεταξύ τους διαφορές. Όπως, ελέχθη και στο Κεφάλαιο 2 παρότι ο κεντρικός έλεγχος απαιτεί μικρότερα ποσά αντιστάθμισης άεργου ισχύος για την ρύθμιση της τάσης, έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί συστήματα καθολικής επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων.

Επιπλέον, εξετάζεται και η δυσμενής εκείνη περίπτωση που απαιτείται η αποκοπή παραγωγής ενεργού ισχύος προκειμένου να ρυθμιστεί μια υπέρταση. Εδώ αφού οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συμμετέχουν στον έλεγχο δίνουν όλη την διαθέσιμη άεργο ισχύ τους προς κατανάλωση, υπολογίζεται πάλι με γραμμικό προγραμματισμό η αποκοπή ενεργού παραγωγής.

Τέλος, περιγράφεται ένα μοντέλο για την αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης που απορρέει από την μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού και είναι διατυπωμένο έτσι ώστε να βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα πολυπρακτόρων. Προτείνονται δύο τέτοιες μέθοδοι, μια με ασύγχρονη εφαρμογή ελέγχων και μία με ασύγχρονη. Προκύπτει λοιπόν με εφαρμογή των δύο αλγορίθμων στα δύο πρότυπα δίκτυα, ότι η σύγχρονη μέθοδος δίνει σε κάθε περίπτωση ακριβέστερα αποτελέσματα με μικρότερη απαιτούμενη αντιστάθμιση άεργου. Τα αποτελέσματα της σύγχρονης μεθόδου είναι σχεδόν ταυτόσημα με αυτά του γραμμικού προγραμματισμού επιβεβαιώνοντας έτσι

ότι οι κανόνες που θεσπίστηκαν μεταξύ των πολυπρακτόρων επιλύουν εν τέλει το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

Συνεπώς είναι δυνατόν με την σύγχρονη μέθοδο και τους κανόνες που απορρέουν από την μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού να διατυπωθεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τον αποκεντρωμένο έλεγχο τάσης.

Στον ασύγχρονο έλεγχο απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά έργου αντιστάθμισης σε σχέση με τον σύγχρονο, αλλά απαιτείται μικρότερος χρόνος για την εφαρμογή των ελέγχων καθώς οι έλεγχοι σε κάθε ζώνη πραγματοποιούνται παράλληλα.

6.2 Προοπτικές επέκτασης

Ενδεχόμενες επεκτάσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στην παρούσα μελέτη είναι η εξέταση της περικοπής φορτίου για την ρύθμιση υποτάσεων που δεν ρυθμίζονται με χρήση της εφεδρείας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η περικοπή φορτίου μπορεί να γίνει και αυτή χρησιμοποιώντας την λογική του γραμμικού προγραμματισμού.

Επιπλέον εξαιρετικά χρήσιμη θα ήταν η ύπαρξη πιθανού κανόνα που να συσχετίζει την βέλτιστη επιλογή για τον αριθμό κατώφλι ϵ με κάποιο στατιστικό στοιχείο του πίνακα ευαισθησιών ώστε να μπορούν να προσδιορίζονται εύκολα δυναμικά οι ζώνες.

Τέλος όλες οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν για τον έλεγχο τάσης θα μπορούσαν να επεκταθούν και να ενταχθούν στο πλαίσιο δυναμικής μελέτης.

Παράρτημα

Παράρτημα Α - Στοιχεία φόρτισης πρότυπων δικτύων

Α.1 Δίκτυο διανομής 33 ζυγών της ΙΕΕΕ

Το δίκτυο διανομής 33 ζυγών είναι τυποποιημένο από την ΙΕΕΕ και μοντελοποιημένο στο πακέτο matpower της matlab. Τα στοιχεία της φόρτισης (ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος) φαίνονται στον πίνακα Α.1 ενώ η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Generation-DGs) που θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις φαίνεται στον πίνακα Α.2. [8]

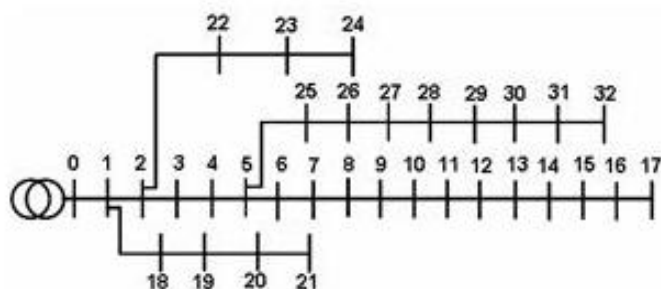
Πίνακας Α.1: Ονομαστικό φορτίο δικτύου 33 ζυγών.

Ζυγός	$P_{Demanded}$ (MW)	$Q_{Demanded}$ (MVar)	Συντελεστής Ισχύος
2	0.1	0.06	0.86
3	0.09	0.04	0.91
4	0.12	0.08	0.83
5	0.06	0.03	0.89
6	0.06	0.02	0.95
7	0.2	0.1	0.89
8	0.2	0.1	0.89
9	0.06	0.02	0.95
10	0.06	0.02	0.95
11	0.045	0.03	0.83
12	0.06	0.035	0.86
13	0.06	0.035	0.86
14	0.12	0.08	0.83
15	0.06	0.01	0.99
16	0.06	0.02	0.95
17	0.06	0.02	0.95
18	0.09	0.04	0.91
19	0.09	0.04	0.91
20	0.09	0.04	0.91
21	0.09	0.04	0.91
22	0.09	0.04	0.91
23	0.09	0.05	0.87
24	0.42	0.2	0.90
25	0.42	0.2	0.90
26	0.06	0.025	0.92
27	0.06	0.025	0.92
28	0.06	0.02	0.95
29	0.12	0.07	0.86
30	0.2	0.6	0.32
31	0.15	0.07	0.91
32	0.21	0.1	0.90
33	0.06	0.04	0.83
Σύνολο	3.715	2.3	0.85

Πίνακας Α.2: Εγκατεστημένη ισχύς DGs δικτύου 33 ζυγών.

Αύξων αριθμός	Ισχύς (kW)	Ζυγός
1	1000	8
2	1000	12
3	1000	14
4	1000	22
5	1000	25
6	1000	26
7	1000	30
8	1000	33
Σύνολο	8000	

Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο σχήμα Α.1 στο οποίο η αρίθμηση ξεκινά από το μηδέν που αντιστοιχεί στον ζυγό αναφοράς και φτάνει ως το 32 σε αντίθεση με τους πίνακες Α.1 και Α.2 που ο ζυγός αναφοράς αριθμείται με 1. Σε όλη την διάρκεια της εργασίας ακολουθείται η αρίθμηση του σχήματος.



Σχήμα Α.1: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 33 ζυγών της IEEE.

Α.2 Δίκτυο διανομής 101 ζυγών της αναχώρησης Ρ25 της Σπερχειάδας

Το πρότυπο δίκτυο 101 ζυγών είναι μέρος του ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και ανήκει στην αγροτική περιοχή της Σπερχειάδας. Το συγκεκριμένο δίκτυο τροφοδοτεί αγροτικά φορτία και χαρακτηρίζεται από υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών. Η αποσύνδεση βιομηχανικών φορτίων στην περιοχή της Σπερχειάδας τα τελευταία χρόνια και η υψηλή διείσδυση των φωτοβολταϊκών συχνά προκαλούν αντίστροφη ροή και προβλήματα υπερτάσεων συνακόλουθα. Το ως άνω δίκτυο έχει μοντελοποιηθεί στο πακέτο matpower της matlab. Τα στοιχεία της φόρτισης όπως λαμβάνονται από το matpower φαίνονται στον πίνακα Α.3 ενώ η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Generation-DGs) που θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις φαίνεται στον πίνακα Α.4.

Πίνακας Α.3: Ονομαστικό φορτίο δικτύου Σπερχειάδας.

Ζυγός	$P_{Demanded}$ (MW)	$Q_{Demanded}$ (MVar)	Συντελεστής Ισχύος
3	0.001207	0.000748	0.85
4	0.01171	0.00726	0.85

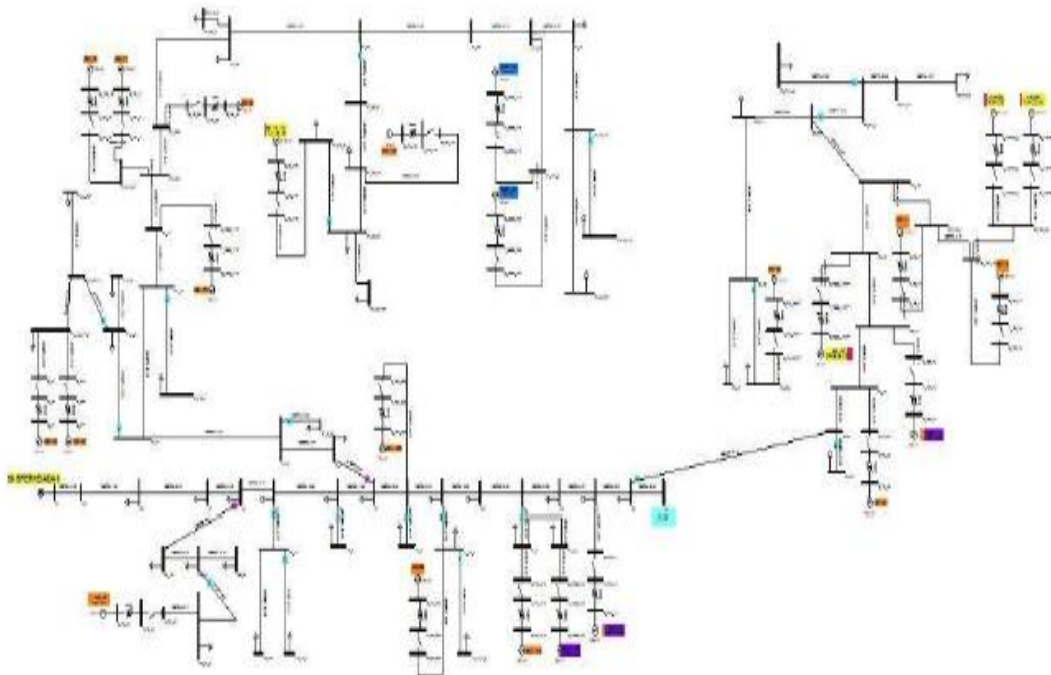
5	0.017384	0.010778	0.85
6	0.002414	0.001497	0.85
7	0.007726	0.00479	0.85
8	0.022213	0.013772	0.85
10	0.003622	0.002245	0.85
11	0.015935	0.00988	0.85
13	0.001811	0.001123	0.85
14	0.002414	0.001497	0.85
15	0.006036	0.003742	0.85
17	0.035975	0.022305	0.85
18	0.002414	0.001497	0.85
19	0.008692	0.005389	0.85
20	0.001207	0.000748	0.85
23	0.019557	0.012125	0.85
24	0.002414	0.001497	0.85
25	0.009899	0.006137	0.85
26	0.003863	0.002395	0.85
28	0.002414	0.001497	0.85
29	0.003863	0.002395	0.85
32	0.001207	0.000748	0.85
48	0.006036	0.003742	0.85
49	0.003863	0.002395	0.85
50	0.002414	0.001497	0.85
52	0.003863	0.002395	0.85
53	0.003863	0.002395	0.85
54	0.001811	0.001123	0.85
57	0.006036	0.003742	0.85
58	0.004225	0.00262	0.85
60	0.006036	0.003742	0.85
61	0.009899	0.006137	0.85
65	0.002414	0.001497	0.85
74	0.002414	0.001497	0.85
75	0.003863	0.002395	0.85
79	0.00507	0.003144	0.85
81	0.001207	0.000748	0.85
83	0.004829	0.002994	0.85
84	0.013159	0.008158	0.85
85	0.002414	0.001497	0.85
88	0.002414	0.001497	0.85
89	0.001207	0.000748	0.85
95	0.013521	0.008383	0.85
96	0.003863	0.002395	0.85
99	0.006036	0.003742	0.85
Σύνολο	0.29444	0.182553	0.85

Πίνακας Α.4: Εγκατεστημένη ισχύς DGs δικτύου Σπαρχειάδας.

Αύξων αριθμός	Ισχύς (kW)	Ζυγός
1	1815	44
2	1274	43
3	700	91
4	500	30

5	500	36
6	470	92
7	100	21
8	100	27
9	100	34
10	100	41
11	100	62
12	100	63
13	100	67
14	100	70
15	100	71
16	100	73
17	100	82
18	100	86
19	100	93
20	100	97
21	100	98
22	100	100
23	50	101
24	20	94
Σύνολο	6929	

Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο σχήμα Α.3 στο οποίο η αρίθμηση ξεκινά από το μηδέν που αντιστοιχεί στον ζυγό αναφοράς και φτάνει ως το 100 σε αντίθεση με τους πίνακες Α.3 και Α.4 που ο ζυγός αναφοράς αριθμείται με 1. Σε όλη την διάρκεια της εργασίας ακολουθείται η αρίθμηση του σχήματος.



Σχήμα Α.4: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 101 ζυγών της Σπερχειάδας.

Παράρτημα Β – Ιακωβιανή μήτρα

Β.1 Εισαγωγικές έννοιες προβλήματος ροής φορτίου

Η μελέτη της ροής φορτίου κατέχει σημαντική θέση στην μελέτη και στον σχεδιασμό της μελλοντικής επέκτασης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και στον προσδιορισμό της καλύτερης λειτουργίας των υπαρχόντων συστημάτων. Η βασική πληροφορία που λαμβάνουμε από την ροή φορτίου είναι το μέτρο και η φάση της τάσης σε κάθε κόμβο του δικτύου καθώς επίσης και η ροή ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε γραμμή.

Καθώς η επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου αποτελεί μη γραμμικό πρόβλημα, υπάρχουν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης. Εδώ, θα εξετάσουμε μόνο την μέθοδο Newton – Raphson. Συνίσταται δε η χρήση κάποιου υπολογιστικού πακέτου για την εύκολη επίλυση της. Αρκετά εύκολα επιλύεται η ροή φορτίου στο πακέτο matpower της Matlab. [20]

Β.1.1 Κατηγοριοποίηση ζυγών

Κάθε ζυγός συνοδεύεται από τέσσερα μεγέθη: την εγχεόμενη ενεργό ισχύ P , την εγχεόμενη άεργο ισχύ Q , το μέτρο της τάσης V και την γωνία της θ .

Στους ακόλουθους τύπους ζυγών δύο από τα παραπάνω τέσσερα μεγέθη είναι γνωστά. Αναλυτικότερα:

- *Ζυγοί παραγωγής (PV buses):* Η εγχεόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης του ζυγού είναι γνωστά. Επίσης, τα όρια της άεργου ισχύος προσδιορίζονται από τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε συσκευής. Οι ζυγοί παραγωγής συνήθως διαθέτουν γεννήτριες, σύγχρονους πυκνωτές και στατούς πυκνωτές αντιστάθμισης.
- *Ζυγοί φορτίου (PQ buses):* Η εγχεόμενη ενεργός και άεργος ισχύς είναι προσδιορισμένη. Συνήθως, υποθέτουμε ότι τα φορτία έχουν σταθερή ισχύ που μεταβάλλεται με την τάση του κόμβου.
- *Ζυγός αναφοράς (slack bus):* Εδώ είναι γνωστό το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού. Επειδή δεν είναι δυνατόν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις απώλειες ισχύος, πρέπει τουλάχιστον ένας ζυγός να έχει απροσδιόριστα τα P , Q . Συνήθως, ο ζυγός αναφοράς είναι ένας και είναι και ο μοναδικός με γνωστή την τάση κατά μέτρο και γωνία.

Β.1.2 Πίνακας αγωγιμοτήτων Y_{bus}

Οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων των κόμβων του δικτύου και των ρευμάτων που διέρχονται από αυτούς μπορούν να εκφραστούν μέσω εξισώσεων είτε από την μέθοδο των βρόχων είτε από την μέθοδο των κόμβων. Συνήθως, προτιμάται η μέθοδος των

$$\dots\dots\dots (B.3)$$

$$f_n(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) = b_n$$

Κάθε μια από τις εξισώσεις B.3 μπορούν να αναπτυχθούν με βάση το θεώρημα Taylor. Η ανεπτυγμένη μορφή της i -οστής εξίσωσης είναι:

$$\begin{aligned} & f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) \\ &= f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \left(\frac{df_i}{dx_1}\right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{df_i}{dx_2}\right)_0 \Delta x_2 + \dots + \left(\frac{df_i}{dx_n}\right)_0 \Delta x_n \\ & \quad + \text{ανώτερης τάξης όροι} = b_i \end{aligned}$$

Οι όροι ανώτερης τάξης μπορούν να αγνοηθούν όταν η αρχική εκτίμηση είναι πολύ κοντά στην πραγματική λύση.

Το προκύπτον γραμμικό σύνολο εξισώσεων σε μορφή πίνακα είναι:

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ b_2 - f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \dots\dots\dots \\ b_n - f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{df_1}{dx_1}\right)_0 & \left(\frac{df_1}{dx_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{df_1}{dx_n}\right)_0 \\ \left(\frac{df_2}{dx_1}\right)_0 & \left(\frac{df_2}{dx_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{df_2}{dx_n}\right)_0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\frac{df_n}{dx_1}\right)_0 & \left(\frac{df_n}{dx_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{df_n}{dx_n}\right)_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (B.4)$$

$$\text{αλλιώς, } \Delta \mathbf{f} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{x} \quad (B.5)$$

όπου ο πίνακας \mathbf{J} αναφέρεται ως ιακωβιανός πίνακας. Εάν οι εκτιμήσεις $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ ήταν ακριβείς, τότε τα $\Delta \mathbf{f}$ και $\Delta \mathbf{x}$ είναι μηδέν. Ωστόσο, καθώς τα $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ είναι μόνο εκτιμήσεις και όχι η λύση, το σφάλμα $\Delta \mathbf{f}$ είναι πεπερασμένο. Η εξίσωση B.4 παρέχει μια γραμμική σχέση μεταξύ του σφάλματος $\Delta \mathbf{f}$ και της διόρθωσης $\Delta \mathbf{x}$ μέσω της ιακωβιανής μήτρας του συστήματος. Λύση για το $\Delta \mathbf{x}$ μπορεί να προέλθει επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων B.4. Οι ανανεωμένες τιμές του x υπολογίζονται ως ακολούθως: $x_i^1 = x_i^0 + \Delta x_i$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τα σφάλματα Δf_i γίνουν μικρότερα από ένα ανεκτό όριο. Οι εξισώσεις έχουν τετραγωνική σύγκλιση. Η ιακωβιανή υπολογίζεται από την αρχή σε κάθε βήμα.

B.2 Επίλυση ροής φορτίου και Ιακωβιανός πίνακας

Στην παράγραφο αυτή θα καταστρωθούν οι εξισώσεις ροής φορτίου για ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και θα διατυπωθεί η επίλυση τους με την μέθοδο Newton – Raphson όπου και θα δοθεί ο ορισμός του Ιακωβιανού πίνακα για ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

$$\begin{bmatrix} P_1^{sp} - P_1(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \\ \dots \\ P_n^{sp} - P_n(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \\ \dots \\ Q_1^{sp} - Q_1(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \\ \dots \\ Q_n^{sp} - Q_n(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \dots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

ή απλούστερα,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

Ο πίνακας $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}$ όπως αναμενόταν είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά τον σχηματισμό της εξίσωσης B.12, έχουμε υποθέσει ότι όλοι οι ζυγοί του δικτύου είναι ζυγοί φορτίου. Για έναν ζυγό παραγωγής, μόνο το P είναι γνωστό όπως επίσης και το μέτρο της τάσης V . Οπότε οι όροι που αντιστοιχούν στο ΔQ και ΔV θα είναι απόντες για καθέναν από τους ζυγούς παραγωγής. Έτσι, η Ιακωβιανή θα έχει μόνο μια γραμμή και μια στήλη για κάθε ζυγό παραγωγής. [21]

Βιβλιογραφία

[1] Li Yu, Dariusz Czarkowski and Francisco de Leon, “Optimal distributed voltage regulation for secondary networks with DGs”, IEEE Transactions on smart grid, vol. 3, no. 2, June 2012.

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Depth-first_search.

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Adjacency_matrix.

[4] M. Amano, A. I. Zecevic and D. D. Siljak, “An improved block-parallel Newton method via epsilon decompositions for load-flow calculations”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 3, pp. 1519–1527, Aug. 1996.

[5] Μ. Σαμουηλίδης, Κ. Βλάχος, Γ. Ψαρράς, “Βοηθήματα για το μάθημα Συστήματα Αποφάσεων”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Ακαδ. Έτος 1986-87.

[6] Κ.Ε. Κότσαλος, “Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διεξόδωση Διεσπαρμένης Παραγωγής”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2015.

[7] Thipnatee Sansawatt, Luis F. Ochoa and Gareth P. Harrison, “Integrating distributed generation using decentralised voltage regulation”, Power and Energy Society General Meeting, IEEE 2010.

[8] W. Chun and C. Hao Zhong, “Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, pp.119-126, 2008.

[9] S. R. Islam, K. M. Muttaqi and D. Sutanto, “A decentralized multi-agent based voltage control for catastrophic disturbances in a power system”, Australian power Quality and Reliability Center.

[10] Ο.Α. Βλαχοκυριάκου, “Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες και αποκεντρωμένος έλεγχος για ρύθμιση τάσης σε περίπτωση διαταραχών”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2014.

[11] Mesut E. Baran and Ismail M. El-Markabi, “A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distributed feeders”, IEEE Transactions on power systems, vol. 22, no. 1, February 2007.

[12] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1984.

[13] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.

[14] Β.Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: Τόμος Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1985.

- [15] C.L. Masters, “Voltage rise: the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines”, IEE Power Eng. J., vol. 16, no. 1, pp. 5-12, Feb. 2012.
- [16] Ch. Kieny, N. Hadjsaid, B. Raison, Y. Besanger, R. Caire, D. Roye, T. Tran-Quoc, O. Devaux, G. Malarange, “Distribution grid security management with high DG penetration rate: situation in France and some future trends”, Power and energy society general meeting – Conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, IEEE, July 2008.
- [17] Σταύρος Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Σημειώσεις Παραδόσεων”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [18] Θ.Κ. Κορλός, “Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2012.
- [19] Θ.Δ. Μπαμπαρούτσης, “Βέλτιστη λειτουργία γραμμών διανομής με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2015.
- [20] John J. Grainger, William D. Stevenson, “Power System Analysis”, McGraw-Hill, 1994.
- [21] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, EPRI, 1994.
- [22] Piyadanai Pachanapan, Olimpo Anaya – Lara, Adam Dysko and Kwok L. Lo, “Adaptive Zone Identification for Voltage Level Control in Distribution Networks With DG”, IEEE transactions on smart grid, vol. 3, no. 4, December 2012.