



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

Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ε. Κότσαλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015



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

Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ε. Κότσαλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

.....
Κωνσταντίνος Ε. Κότσαλος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Ε. Κότσαλος, 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

Στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η πρόταση μιας αποκεντρωμένης μεθόδου για τη ρύθμιση τάσης ακτινικών δικτύων διανομής Μέσης Τάσης (MT) με υψηλή διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ). Ο λόγος για τον οποίο κρίνεται απαραίτητη η υλοποίηση ελέγχων μέσω εναλλακτικών μεθόδων ρύθμισης της τάσης είναι η ολοένα αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων ΔΠ, η οποία έχει σημαντικές επιπτώσεις στις τάσεις των ζυγών του δικτύου. Η υψηλή διείσδυση των μονάδων ΔΠ εισάγει ένα νέο τρόπο παραγωγής ενέργειας στα πλαίσια της MT, επιδρώντας σημαντικά στην ανάπτυξη των σύγχρονων δικτύων προς την κατεύθυνση των έξυπνων δικτύων. Αρχικά, πραγματοποιείται μια συνοπτική παρουσίαση των τεχνολογικών χαρακτηριστικών των μονάδων ΔΠ αλλά και των επιπτώσεων της εμφάνισής τους στα δίκτυα. Αποδίδονται οι τοπολογίες διάταξης καθώς τα τεχνικά μέσα που συναντώνται στα δίκτυα διανομής. Ακολούθως, πραγματοποιείται, μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνολογιών των έξυπνων δικτύων, καθώς και εφαρμογές των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων σε αυτά. Παρουσιάζονται επιπλέον, συμβατικοί τρόποι ρύθμισης των παθητικών δικτύων και σχολιάζονται περιπτώσεις στις οποίες αποτυγχάνουν να ανταπεξέλθουν στην υψηλή ενσωμάτωση της ΔΠ. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται μια μαθηματική ανάλυση των ευαισθησιών τάσης ως προς τις μεταβολές αέργου ισχύος, ενώ παρουσιάζονται απλοποιημένες προσεγγίσεις ευαισθησιών που μπορούν να εφαρμοστούν σε ακτινικά δίκτυα. Η προτεινόμενη τεχνική ρύθμισης στηρίζεται στη διαχείριση της διαθέσιμης άεργου ισχύος κάθε μονάδας ΔΠ για τη ρύθμιση της τάσης, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της συνολικής μεταβολής αέργου ισχύος. Βασιζόμενοι στις τοπολογικές ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα ακτινικά δίκτυα διανομής, υπολογίζεται μέσω του αποκεντρωμένου ελέγχου η άεργος ισχύς αντιστάθμισης. Σύμφωνα με τις θεωρήσεις που έχουν γίνει αναπτύχθηκε αλγόριθμος στο λογισμικό MATLAB και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε τρία διαφορετικά πρότυπα δίκτυα διανομής για διαφορετικά σενάρια. Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης τάσης συγκρίνεται με μια μέθοδο κεντρικού ελέγχου ρύθμισης τάσης με σκοπό την μελέτη των συνολικών μεταβολών αέργου ισχύος που αποφασίζονται κατά περίπτωση. Συμπερασματικά, η εξεταζόμενη μέθοδος ελέγχου που προτείνεται είναι δυνατό να ρυθμίσει τα ακτινικά δίκτυα διανομής στα οποία εφαρμόστηκε.

Λέξεις κλειδιά: ρύθμιση τάσης, δίκτυα διανομής, ακτινικά, μέση τάση, ανάλυση ευαισθησιών τάσης, αποκεντρωμένος, αποκεντρωμένη ρύθμιση, διεσπαρμένη παραγωγή.

Abstract

The goal of this diploma thesis is the development and evaluation of a decentralised voltage control method for a radial medium voltage (MV) distribution network with high penetration of distributed generation (DG). The main reason of developing alternative method of voltage regulation is the high presence of DG which impacts the nodal voltages of the network. The widespread use of DG influences the future development of modern electrical systems that must evolve towards smart grids. Initially, a brief summary of the basic characteristics of DG is done as well as their effect on large scale integration. Additionally, the properties of the topology of distribution networks are discussed. Afterwards, the smart grid concept is presented along with multiple-agent systems applications. Besides, the conventional voltage regulation of passive networks -without DG- is recalled, including the reasons of their failure on systems of high integration of DG. Further, the voltage sensitivity factors are established due to reactive power changes whereas they play an important role on the proposed method for voltage regulation. The suggested control scheme is based on the exploitation of high DG penetration, and especially by managing the available reactive power of each production unit for voltage regulation. Considering the topological specifications of radial networks, decisions are taken for the dispatch of reactive power. Taking into account the above considerations, a code for voltage regulation was developed in MATLAB and three different case studies were simulated. The configuration and power flow analysis of the networks is conducted using MATPOWER. The suggested method is compared with a centralised voltage control method, in order to examine the reactive power changes at each method. Conclusively, what we suggest was capable of adjusting the simulated networks.

Key words: voltage regulation, distribution networks, medium voltage, voltage sensitivity, decentralised control, distributed generation

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους υποψήφιους διδάκτορες Κλεφτάκη Βασίλη και Κουβελιώτη-Λυσικάτο Ιάσωνα, για τις υποδείξεις τους και την καθοδήγησή τους σε όλο το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμη, ιδιαίτερες ευχαριστίες στα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για το κλίμα συνεργασίας που δημιουργούν στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον καθηγητή του Ε.Μ.Π κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο -1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας & Διεσπαρμένη Παραγωγή	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ)	15
1.2.2 Τεχνολογίες παραγωγής ΗΕ.....	16
1.2.3 Διείσδυση ΔΠ & Τεχνικά ζητήματα.....	19
1.3 Περικοπή φορτίου (<i>Load Shedding</i>).....	20
1.4 Μικροδίκτυα	22
Κεφάλαιο 2 - Δίκτυα Διανομής.....	25
2.1 Εισαγωγή	25
2.1 Σύνθεση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	26
2.2.1 Περιγραφή λειτουργικών διατάξεων δίκτυα διανομής	27
2.2.2 Μέσα (διακόπτες) προστασίας & ζεύξεως.....	27
2.3.1 Τοπολογία Δικτύων Διανομής	29
2.3.1.1 Συμβατικές τοπολογίες Δικτύων Διανομής.....	29
2.3.1.2 Σύγχρονες Υβριδικές τοπολογίες (<i>Meshed Networks</i>)	30
2.3.2 Ακτινική τοπολογία Δικτύων Διανομής (<i>Topology Analysis</i>).....	33
2.4 Μοντελοποίηση στοιχείων Δικτύων Διανομής.....	34
2.4.1 Μετασχηματιστές	34
2.4.2 Γραμμές Μεταφοράς	37
2.4.3 Γεννήτριες και ΔΠ (<i>Generation & DG</i>)	37
2.4.4 Φορτία (<i>Loads</i>).....	38

2.5 Ανάλυση Ροών Φορτίου.....	41
2.5.1 Μέθοδος Newton-Raphson	43
2.5.3 Ανάλυση σχέσεων και αποσύμπλεξη Pθ - QU	45
2.5.4 Προβλήματα που εντοπίζονται στη διανομή με τη ροή φορτίου.....	48
2.6 Κυκλοφορία ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ δυο ζυγών με διαφορετικά μεγέθη	49
2.6.1 Κυκλοφορία άεργου ισχύος μεταξύ ζυγών με άνισα μεγέθη τάσεων.....	49
2.6.2 Κυκλοφορία ενεργού ισχύος μεταξύ ζυγών με διαφορετικές φασικές γωνίες τάσεων	50
Κεφάλαιο 3 - Διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ).....	53
3.1 Εισαγωγή.....	53
3.2 Επίδραση διείσδυσης ΔΠ	53
3.3 Προϋποθέσεις διασύνδεσης παραγωγών στο δίκτυο MT.....	60
Κεφάλαιο - 4 Σύστημα Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων(<i>Multi-Agent Systems</i>) & Ευφυή Δίκτυα (<i>Smart Grids</i>)	63
4.1 Εισαγωγή.....	63
4.2 Ευφυή δίκτυα (Smart Grids).....	63
4.2.1 Βασικές εφαρμογές των ευφυών δικτύων	64
4.3 Συστήματα Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων (<i>Multi-Agent System-MAS</i>)	65
4.3.1 Εισαγωγή.....	65
4.3.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία MAS	65
4.3.3 Έλεγχος μικροδικτύων με MAS.....	66
4.3.4 Προτυποποιήσεις συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων	68
Κεφάλαιο - 5 Ρύθμιση Τάσης (<i>Voltage Regulation</i>)	69

5.1 Εισαγωγή.....	69
5.2.1 Ρύθμιση τάσης σε παθητικά δίκτυα.....	69
5.2.2 Συμβατικά μέσα ρύθμισης τάσης.....	70
5.2.3 Σύγχρονες τεχνικές ρύθμισης τάσης (<i>Concept of FACTS</i>).....	74
5.2.4 Ρύθμιση Τάσης με τη βοήθεια μονάδων ΔΠ.....	77
5.2.5 Περιπτώσεις αστοχίας ρύθμισης τάσης μέσω συμβατικού εξοπλισμού.....	78
5.3 Τεχνικές ελέγχου τάσης	79
5.3.1 Στοιχεία Κεντρικού Ελέγχου	79
5.3.2 Τοπικός Έλεγχος.....	80
5.3.3 Αποκεντρωμένος Έλεγχος.....	81
Κεφάλαιο 6 - Ανάλυση Ευαισθησιών Τάσης.....	83
6.1 Εισαγωγή.....	83
6.2 Επισκόπηση Ευαισθησιών	83
6.3 Ανάλυση Ευαισθησιών Τάσης για Ακτινικό Δίκτυο Διανομής.....	88
6.3.1 Ανάδειξη χρησιμότητας μεθόδου	88
6.3.2 Ανάλυση ευαισθησιών τάσης ακτινικών δικτύων διανομής [19][34][35]	89
6.3.3 Επέκταση ευαισθησιών για δίκτυο Χαμηλής Τάσης.....	94
6.3.4 Μελέτη ακρίβειας ευαισθησιών	94
6.3.5 Σύγκριση με Ιακωβιανές Ευαισθησίες.....	95
6.3.6 Εκτίμηση τάσης μέσω ευαισθησίας για την μελέτη της ακρίβειας	95
Κεφάλαιο 7- Αποκεντρωμένη Ρύθμιση Τάσης	99
7.1 Εισαγωγή.....	99

7.2 Εισαγωγή στην προτεινόμενη αποκεντρωμένη μέθοδο ρύθμισης τάσης	99
7.3 Αναλυτική περιγραφή λειτουργίας αλγορίθμου σε γενικευμένο πρόβλημα	102
Επίδοση Προτεραιότητας.....	110
7.4 Διατύπωση κεντρικού προβλήματος ρύθμισης τάσης	110
Κεφάλαιο 8-Ανάλυση Προσομοιώσεων Προτεινόμενης Μεθόδου Ρύθμισης Τάσης	115
8.1 Εισαγωγή	115
8.1.2 Στόχος προσομοιώσεων	115
8.1.3 Σύγκριση με κεντρική μέθοδο	115
8.1.4 Θεωρήσεις-παραδοχές	116
8.2 Προσομοίωση Δικτύου 13 κόμβων	116
8.2.1 Ανάλυση δικτύου	117
8.2.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων	119
8.3 Δίκτυο 36 ζυγών	132
8.3.1 Ανάλυση δικτύου 36 κόμβων	132
8.3.2 Παρουσίαση προσομοιώσεων	134
8.4.1 Δίκτυο 50 ζυγών με 2 feeders	143
8.4.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων	146
Κεφάλαιο 9 - Συμπεράσματα	153
Βιβλιογραφία	155
Παράρτημα	158
Παράρτημα Α - Ανάλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού	158
Α.1 Πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού	158

A.2 Επίλυση προβλήματος.....	159
A.3 Εφαρμογή γραμμικού προγραμματισμού στον προτεινόμενο αλγόριθμο.....	160
Παράρτημα Β - Πίνακες Ευαισθησιών Τάσης - Αέργου.....	163
Παράρτημα Γ - Κώδικας σε MATLAB.....	167

Κεφάλαιο -1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας & Διεσπαρμένη Παραγωγή

1.1 Εισαγωγή

Ηλεκτρική ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια από τις πλέον χρήσιμες μορφές ενέργειας καθώς δύναται να μετατραπεί εύκολα και αποδοτικά σε άλλες μορφές ενέργειας, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τον σύγχρονο άνθρωπο. Δεν θα ήταν ακόμη και υπερβολή να αποδοθεί στην χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας η πορεία της ανθρωπότητας στον 20ο αιώνα, καθώς η κάλυψη μεγάλου πλήθους αναγκών βασίζεται σε αυτήν. Εξάλλου, η συνεχώς αυξανόμενη χρήση της είναι εμφανής αν αναλογιστούμε ότι στο τέλος του 20ου αιώνα η ηλεκτρική ενέργεια κάλυπτε σε παγκόσμιο επίπεδο το 15% των συνολικών αναγκών σε τελική κατανάλωση ενέργειας, όταν στη χώρα μας σήμερα καλύπτει το 19%. Η διεύθυνση της ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίζεται με σταθερούς ρυθμούς αύξησης (~1,7%). [1]

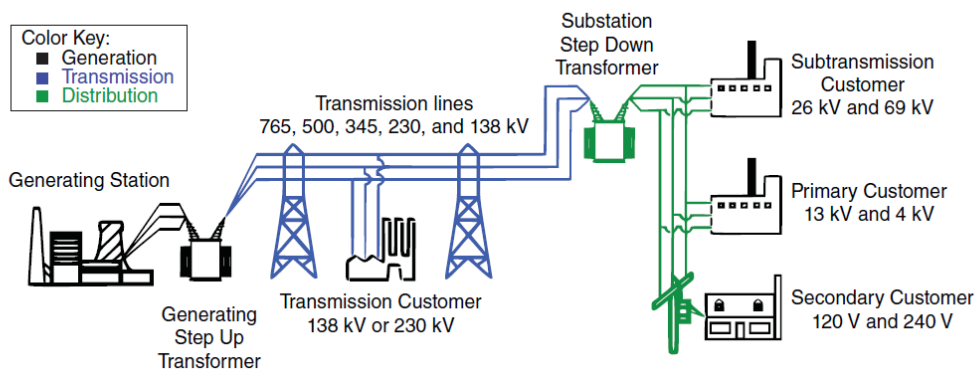
Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας(ΣΗΕ)

Η σύνθεση ενός ΣΗΕ έχει ως σκοπό την απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις εξυπηρετούμενες περιοχές καταναλώσεως. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να λειτουργεί ορθά αλλά και με ασφάλεια αλλά και να ικανοποιεί τις κάτωθεν απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια όπου υπάρχει ζήτηση, η οποία θα τηρεί πάντοτε ορισμένες προδιαγραφές(τάση, συχνότητα, υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης, αρμονική παραμόρφωση).
- Η ζήτηση πραγματικής και αέργου ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο, και επομένως το σύστημα καλείται να ικανοποιεί συνεχώς το ισοζύγιο παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος.
- Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να παράγεται και να διανέμεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Τα ηλεκτρικά συστήματα για πολλές δεκαετίες βασίζονταν σε ένα κεντρικό σύστημα παραγωγής το οποίο τροφοδοτούσε τις επιμέρους περιοχές που υπάγονταν σε αυτό. Μέχρι και τη δεκαετία του 60' οι μονάδες παραγωγής είχαν καθιερωθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της μετατροπής της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, πετρελαίου και πλέον φυσικού αερίου) καθώς και της αξιοποίησης της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων πόρων και υδατοπτώσεων. [2]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1, ένα συμβατικό ΣΗΕ αποτελούνταν από λίγους σε αριθμό σταθμούς παραγωγής -αλλά αναλογικά μεγάλης ισχύος για να υποστηρίξει τις ζητήσεις-. Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ΗΕ ορυκτών καυσίμων βρίσκονται κατά κύριο λόγο κοντά στην περιοχή ή την πηγή εξόρυξης αυτών κάτι που εξ' ορισμού αυξάνει το κόστος της ΗΕ αλλά ταυτόχρονα οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς είναι αναπόφευκτα μεγάλες εξαιτίας της μεταφοράς τέτοιων ποσών ισχύος μέσω του δικτύου μεταφοράς μέχρι τον τελικό καταναλωτή .Η ροή ενεργού ισχύος δηλαδή προς μια κατεύθυνση, από τις κεντρικές μονάδες παραγωγής προς τους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Ωστόσο, η τακτική αυτή έχει αλλάξει ριζικά τις τελευταίες δεκαετίες με την ολοένα αυξανόμενη διεύθυνση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(ΑΠΕ) αλλά και της Διεσπαρμένης Παραγωγής(ΔΠ). Η περίοδος μετά την ενεργειακή κρίση τη δεκαετία του 1970 οδήγησε πολλές χώρες να επιλέξουν δράσεις ενεργειακής διαχείρισης και εξοικονόμησης, που προέτρεπαν τη δυναμική ενσωμάτωση των ΑΠΕ αλλά και εναλλακτικών πρωτογενών ενεργειακών πόρων για την παραγωγή ΗΕ και όχι μόνο. Η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις για υψηλή ποιότητας ισχύος προτρέπουν τον καταναλωτή να εισάγει ο ίδιος, τοπική παραγωγή ενέργειας είτε στη μορφή της εφεδρείας είτε πλέον για την ιδιοκατάναλωση μέρους αυτής και την έγχυση του υπολοίπου ποσού στο δίκτυο. Η εγχώρια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώθηκε επίσημα το 1999 -στα πλαίσια της Ελλάδας-. Από τότε δημιουργήθηκε μια ανεξάρτητη αρχή, η ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας) επιφορτισμένη με το καθήκον να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία και επέκταση όλων των ενεργειακών αγορών και μια δεύτερη αρχή, ο ΔΕΣΜΗΕ (Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς). [3]



Εικόνα 1.1 Σύνθεση Συστήματος Ηλεκτρικής ενέργειας Σταθμός Παραγωγής, Δίκτυο Μεταφοράς και Δίκτυο Διανομής [4]

Η μετάβαση, επομένως, σε ένα νέο μοντέλο ΣΗΕ με κύριο χαρακτηριστικό την ενσωμάτωση της ΔΠ -συμπεριλαμβανομένων και των ΑΠΕ, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω-, δηλαδή την ενεργό συμμετοχή του καταναλωτή στην αγορά ενέργειας όπου δεν επικυριαρχούν μονοπώλια ή ολιγοπώλια με αποτέλεσμα η τιμή να διαμορφώνεται ελεύθερα. Μεταξύ

άλλων επισημαίνεται ότι η τακτική παραγωγής ΗΕ σε τοπικό επίπεδο, πλησίον δηλαδή του καταναλωτή βελτιώνει την αποδοτικότητα της λειτουργίας του δικτύου. Παρακάτω θα αναλύσουμε κάποια στοιχεία της Διεσπαρμένης Παραγωγής(ΔΠ) καθώς και των ΑΠΕ, διότι η ενσωμάτωση τους σε ένα συμβατικό ΣΗΕ αποτελεί το σημαντικό χαρακτηριστικό διαφοροποίησής τους.

1.2.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ)

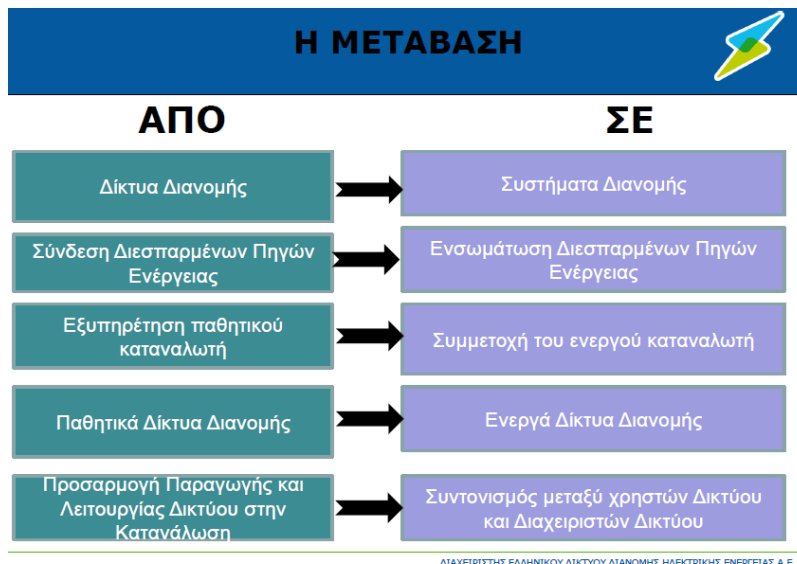
Με τον όρο Διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ) νοείται οποιαδήποτε αποκεντρωμένη μορφή παραγωγής ΗΕ, μπορεί να εντοπιστεί σε ένα ΣΗΕ. Τυπικά, περιλαμβάνονται οι τοπικές παραγωγές που μπορούν να ενυπάρξουν σε οποιοδήποτε επίπεδο τάσης. Σημαντικό να τονιστεί ότι η ΔΠ εμφανίζεται τόσο σε πλαίσια καταναλωτή όσο και του ίδιου του διαχειριστή του δικτύου (DNO-Distribution Network Operator-).

Γενικά, η έννοια της ΔΠ, στερείται ενός πλήρους και θεμελιώδους ορισμού καθώς τα μεγέθη των μονάδων(εγκατεστημένη ισχύς) αλλά και το επίπεδο εγκατάστασής τους ποικίλουν (από υψηλή μέχρι μέση και χαμηλή). Επίσης σημαντικός είναι ο αυστηρά καθορισμένος τρόπος λειτουργίας τους καθώς και η περιβαλλοντική τους επίδραση.[4]

Μια προσέγγιση προσδιορισμού της ΔΠ παραγωγής, αποτελεί η διερεύνηση των εξής διαστάσεων ΔΠ δηλαδή του σκοπού εγκατάστασής τους, της τοποθεσίας τους, η εγκατεστημένη ισχύς, το επίπεδο εγκατάστασής τους (ΥΤ, ΜΤ ή ΧΤ), η χρησιμοποιούμενη ανά περίπτωση τεχνολογία, η περιβαλλοντική επίδραση, τρόποι λειτουργίας, ο κάτοχος της μονάδας (πάροχος ή ιδιώτης) καθώς και βαθμός διείσδυσης. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το σκοπό τους σχετίζεται με την προσφορά της ενεργού αλλά και αέργου ισχύος για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Η τοποθεσία τους, η οποία είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς είναι δυνατή η εγκατάστασή τους είτε σε πλαίσια ενός ιδιώτη είτε του δικτύου. Το μέγεθος των μονάδων αυτών είναι τουλάχιστον μικρότερο από μια συμβατική κεντρική μονάδα παραγωγής κι αυτό για λόγους τόσο ευστάθειας όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, καθώς επίσης και στο ότι εγκαθίστανται για βοηθητική υποστήριξη του δικτύου [5]. Ως διαισθητική προσέγγιση, αναφερόμαστε σε μικρές μονάδες ΔΠ για μεγέθη 5kWέως 5MW, και ανωτέρας τάξης 5MWέως 50MW. Ιδιαίτερα σημαντικός δε, είναι και ο δείκτης έντασης του βαθμού διείσδυσης της ΔΠ:

$$\sigma_{pen} = \frac{P_{DG}}{P_{load} + P_{DG}} = \frac{P_{DG}}{P_{feed}} (\%)$$

αναφέρεται πρακτικά στην επί τοις εκατό εγκατεστημένη ισχύ ΔΠ προς τη συνολική εγκατεστημένη του τμήματος τροφοδότηση. Υπάρχουν στη βιβλιογραφία κι άλλοι ορισμοί για το μέγεθος όπως $\sigma_{pen} = \frac{P_{DG}}{P_{load}}$.



Εικόνα 1.2 Εξέλιξη των δικτύων [40]

1.2.2 Τεχνολογίες παραγωγής ΗΕ

Στις μονάδες παραγωγής ΔΠ εμφανίζονται διάφορες τεχνολογίες παραγωγής.

✓ **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)**

Η πιο συνηθισμένη μορφή στην οποία οφείλονται και τα υψηλά επίπεδα διείδυσης ΔΠ είναι οι ΑΠΕ. Τα τελευταία χρόνια, η κοινή περιβαλλοντική συνείδηση που έχει καλλιεργηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο έχει οδηγήσει σε μια τάση για την αύξηση του βαθμού αξιοποίησης των ΑΠΕ. Η πεπερασμένη δυναμική των αποθεμάτων των συμβατικών ορυκτών καυσίμων αλλά και η ανάγκη για τον περιορισμό των δυσμενών επιπτώσεων τους, οδηγούν στην περαιτέρω ενσωμάτωση των ΑΠΕ στην παραγωγή ΗΕ. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο στόχος -σύμφωνα με ευρωπαϊκή οδηγία 2009/28/ΕΚ- για τις ΑΠΕ είναι 20% με ορίζοντα υλοποίησης το 2020. Η πρόκληση της ικανοποίησης του στόχου σε συνδυασμό με την προσπάθεια για προσαρμογή στις δεσμεύσεις του Κιότο, έχουν επιταχύνει τη διείδυση των ΑΠΕ.

Αναφορικά με τις ΑΠΕ περιλαμβάνονται κατά κύριο λόγο οι ακόλουθες μορφές προς αξιοποίηση :

1. Την «Αιολική» Ενέργεια
2. Την «Ηλιακή» Ενέργεια
3. Τα Υδροηλεκτρικά
4. Τις «Κυψέλες καυσίμου»
5. Την ενέργεια των «Θαλασίων κυμάτων»

6. Τη «Γεωθερμική» ενέργεια
7. Την ενέργεια της «Βιομάζας»

Αξίζει να σημειωθούν στο σημείο αυτό κάποιο σημαντικά προτερήματα αλλά και μειονεκτήματα της χρήσης των ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των προτερημάτων χρησιμοποίησής τους αποτελούν:

- ✓ η φιλικότητα τους προς το περιβάλλον καθώς παραλαμβάνουμε την ενέργεια τους (η οποία είναι τυπικά ανεξάντλητη συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα) από αυτό και τη μετατρέπουμε σε ΗΕ. Από την μετατροπή αυτή δεν απορρέουν απόβλητα προς το περιβάλλον.
- ✓ η απλότητα κατασκευής τους επίσης δεν εξάγει σημαντικά ρυπαρά στοιχεία.
- ✓ Εύκολη και φθηνή συντήρηση καθώς και μεγάλος χρόνος ζωής.
- ✓ Η αξιοποίηση τους για την ηλεκτροδότηση των αναπτυσσόμενων χωρών ή απομακρυσμένων περιοχών όπου δεν προσεγγίζεται από το δίκτυο. Μπορεί δηλαδή να αυτονομηθούν σημαντικές περιοχές, παραμένοντας λειτουργικές σε off grid διασύνδεση.

Ωστόσο, οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα:

- ✓ Παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή απόδοσης, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η απόσβεση του κόστους εγκατάστασης, είναι μακροπρόθεσμη.
- ✓ Ο στοχαστικός χαρακτήρας των ΑΠΕ και κατά κύριο λόγο των φωτοβολταϊκών, των υδροηλεκτρικών καθώς και τον ανεμογεννητριών, αποδίδουν ασταθή παραγωγή ΗΕ, η οποία μάλιστα δεν είναι μακροπρόθεσμα προβλέψιμη. Με άλλα λόγια, η παραγωγή ενός ΦΒ έχει στενή σχέση με την ηλιοφάνεια, την εποχή αλλά και την τοποθεσία που βρίσκεται η εγκατάσταση, με αποτέλεσμα να καθίσταται ευμετάβλητη. Αντίστοιχα, η ροή των υδάτων επηρεάζεται από πρόσφατες βροχοπτώσεις ενώ οι ανεμογεννήτριες από τον άνεμο και την κατεύθυνση του. Για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εντελώς αυτόνομα-χωρίς δηλαδή συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ΗΕ- σε ένα δίκτυο το οποίο θα πληροί τις προϋποθέσεις σειράς προτύπων της IEC καθώς δεν είναι σε θέση να παρέχουν σταθερές τιμές τάσης και συχνότητας. Το τελευταίο προκύπτει από την αδυναμία ικανοποίησης του ισοζυγίου ενεργού και αέργου ισχύος. [2]

- Μικροτουρμπίνες

Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε τιμές ισχύος από 20 έως 500kW, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν βασίζονται στις βοηθητικές μονάδες ισχύος ενώ η μηχανολογική τους σύνθεση είναι ιδιαίτερα απλή με αποτέλεσμα την εύκολη συντήρησή τους αλλά και

αυξημένο χρόνο ζωής. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τη λειτουργία τους είναι το φυσικό αέριο και μερικές φορές πετρέλαιο ή προπάνιο.

- Αποθήκευση ενέργειας

Σημαντικό ζήτημα είναι η δυσκολία αποθήκευση της ΗΕ σε εκτεταμένη βάση. Τυπικά σε ένα ΣΗΕ θα πρέπει η παραγωγή της ΗΕ να είναι ίση με την κατανάλωση ΗΕ- οι ζητήσεις των καταναλωτών-, δηλαδή να ικανοποιεί το ισοζύγιο αυτό σε κάθε χρονική στιγμή. Η υψηλή διείσδυση, ωστόσο, των ΑΠΕ οδηγεί σε παραγόμενα υψηλά ποσά ενέργειας τα οποία δεν είναι εξ' ολοκλήρου προς άμεση κατανάλωση. Γενικά, διατίθενται διαφόρων τύπων διατάξεις ανάλογα με την εφαρμογή τους. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες είθισται να χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, όπου η αποθήκευση βρίσκεται πλησίον της παραγωγής, και η δυνατότητα απόκρισης είναι άμεση αλλά για περιορισμένα διαστήματα. Οι διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, στις οποίες αποθηκεύονται μεγάλα ποσά ενέργειας -κυρίως για κεντρικές εγκαταστάσεις- και δύναται να παρέχουν την ΗΕ για μεγάλες χρονικές περιόδους. Με βάση αυτήν την κατηγοριοποίηση παρουσιάζουμε τους εξής τρόπους:

Μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης

- η πλέον συνηθισμένη μέθοδος, μέσω της ηλεκτροχημικής μετατροπής και αποθήκευσης της ενέργειας σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές(μπαταρίες)
- με πεπιεσμένο αέρα (*Compressed Air Energy Storage, CAES*) όπου η περίσσεια ΗΕ χρησιμοποιείται για την συμπίεση αέρα η οποία αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή προκειμένου να στρέψει(κινητική ενέργεια) μελλοντικά κάποιο στρόβιλο, έτσι ώστε να μετατραπεί και πάλι σε ΗΕ

Βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης

- με σφονδύλους (flywheels), διάταξη στην οποία μέσω ενός κινητήρα αποθηκεύεται η ΗΕ με τη μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα
- μέσω της άντλησης νερού, όπου το πλεόνασμα ισχύος από τις ΑΠΕ χρησιμοποιείται για την άντληση νερού σε περιοχές με υψηλότερες υψομετρικές στάθμες, και έπειτα παράγεται ΗΕ αντίστροφα, με τη χρήση ενός υδροστροβίλου
- μέσω υπεραγώγιμων διατάξεων, είτε μέσω υπερ-πυκνωτών (υπό μορφή ηλεκτρικού πεδίου), είτε με υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα με την μορφή μαγνητικού πεδίου

Πιο αναλυτικά, οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης συναντώνται σε μικρής κλίμακας συστήματα ενώ είναι κατάλληλες για την βελτίωση της ποιότητας

παρεχόμενης ισχύος. Μέσω της αποθηκευμένης ενέργειας που διαθέτουν δύναται να διατηρήσουν την τάση σταθερή σε περιπτώσεις βυθίσεως τάσεις ή κυματισμών όπου πρακτικά αντιμετωπίζεται έλλειμμα ενεργού ισχύος του δικτύου.

Η κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης συναντάται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων. Το μέγεθος τους είναι τέτοιο που τους επιτρέπει να υποστηρίζουν το δίκτυο, για μερικές ώρες ή ακόμη και μέρες, προκειμένου να συνεισφέρουν στη ρύθμιση της συχνότητας, τη διαχείριση της ενέργειας αλλά και σε θέματα αποσυμφόρησης του δικτύου. [6]

- Μονάδες συμπαραγωγής

Μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια αναφέρεται στην ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και θερμότητας, στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερα οικονομικά και οικολογικά πλεονεκτήματα διότι πρακτικά αφορά την εκμετάλλευση των καυσαερίων του σταθμού παραγωγής. Μια συμβατική μηχανή αποβάλλει στο περιβάλλον τα τρία τέταρτα τις θερμικής ενέργειας των καυσίμων που χρησιμοποιεί. Κατά την τεχνολογία αυτή η θερμική ενέργεια των καυσαερίων αξιοποιείται για τη ικανοποίηση άλλων θερμικών φορτίων.

1.2.3 Διείσδυση ΔΠ & Τεχνικά ζητήματα

Η εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης στο επίπεδο της χαμηλής αλλά και της μέσης τάσης, εισάγει πολλά σημαντικά τεχνικά θέματα τα οποία επηρεάζουν τη λειτουργία του δικτύου. Αξίζει να τονιστεί ότι τα θέματα στα οποία θα αναφερθούμε, εξαρτώνται από τον βαθμό διείσδυσης της ΔΠ, καθώς δείχνει το βαθμό έντασής τους. Δεν θα πραγματοποιηθεί αναλυτική μελέτη όλων των τεχνικών θεμάτων σε αυτή τη διπλωματική παρά μόνο όσον αφορά τα φαινόμενα διακύμανσης της τάσης.

Αναλυτική περιγραφή των ζητημάτων που προκύπτουν από την υψηλή διείσδυση της ΔΠ, πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο, ωστόσο παρακάτω αναφέρουμε μια γενική εικόνα.

Ζητήματα που εντοπίζονται από την υψηλή διείσδυση σε ΔΠ

- Μεταβολές στην τάση εξαιτίας της κυμαινόμενης παραγωγής των εγκατεστημένων μονάδων ΔΠ.
- Αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης εξαιτίας της συνεισφοράς των πηγών που εγκαθίστανται.

- Η ποιότητα ισχύος των δικτύων επηρεάζεται, εξαιτίας δυο παραγόντων, των μεταβολών της τάσης σε συνδυασμό με τις επιπρόσθετες αρμονικές συνιστώσες που εισάγονται εξαιτίας της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος.
- Ευστάθεια του συστήματος, επηρεάζεται η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος και όπως θα εξηγηθεί, διαφοροποιείται σύμφωνα με το αν θα συνεισφέρουν ή όχι οι μονάδες στην προσπάθεια επαναφοράς της μόνιμης κατάστασης.
- Διακόπτες & Μέσα προστασίας του δικτύου, η αμφίδρομη ροή ισχύος επηρεάζει τη σωστή λειτουργία των διακοπών, ενώ ταυτόχρονα ενδέχεται να υπερφορτιστούν τα μέσα του (γραμμές και υποσταθμοί), αν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις διασύνδεσης του παρόχου.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι η υψηλή διείδυση σε ΔΠ σε ένα συμβατικό δίκτυο μπορεί να προκαλέσει πολλά σημαντικά λειτουργικά προβλήματα. Για το λόγο αυτό η διασύνδεση μιας μονάδας ΔΠ θα πρέπει να εναρμονίζεται με συγκεκριμένα πρότυπα και πλαίσια τα οποία επιβάλλει ο πάροχος. Αν οι εγκαταστάσεις ΔΠ ακολουθούν τα πρότυπα τότε μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην απομείωση των απωλειών του δικτύου, στην βελτίωση της ευστάθειας και αξιοπιστίας του, στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αλλά και σε οικονομικά συμφέροντα για τον πάροχο και τον καταναλωτή. Αντίθετα, αν δεν ακολουθηθούν τα κατάλληλα μέτρα για την ενσωμάτωση της ΔΠ τότε ο δείκτης βαθμού διείδυσης θα παραμείνει περιορισμένος.

1.3 Περικοπή φορτίου (*Load Shedding*)

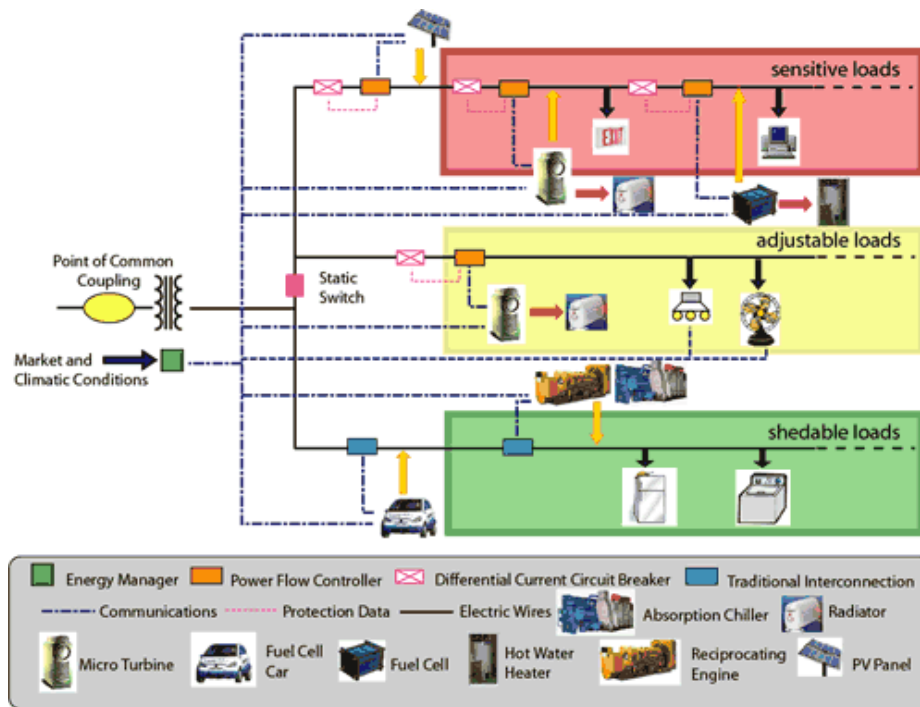
Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά που θα παρουσιάζει ο σύγχρονος καταναλωτής - αλλά και παραγωγός λόγω της ΔΠ- θα είναι και η παρουσία ευέλικτων και ευφυών φορτίων. Γενικότερα, όπως θα δούμε και στο Κεφάλαιο 4 για τα ευφυή δίκτυα, θα υπάρχει η δυνατότητα σε κάθε καταναλωτή να υπάρχει μια σειρά κατηγοριοποιημένων φορτίων τα οποία αναφέρονται σε :

- Ευαίσθητα (*Critical Loads*) φορτία, των οποίων πρέπει να διασφαλίζεται σε κάθε χρονική στιγμή η λειτουργία τους. Συνήθως, είναι διασυνδεδεμένα με ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ή μονάδες αδιάλειπτης παροχής προκειμένου να αυξάνεται ο βαθμός αξιοπιστίας τροφοδότησης τους.
- Ρυθμιζόμενα (*Adjustable Loads*) φορτία, τα οποία δύναται να προσαρμοστούν και να λειτουργήσουν μερικώς, καθώς και να λειτουργήσουν με ολίσθηση χρόνου (*Load Shifting*), δηλαδή να εξυπηρετηθούν σε επόμενη χρονική στιγμή.
- Ευέλικτα (*Shedable Loads*) φορτία τα οποία μπορεί να περικοπούν ανά πάσα στιγμή.

Η ανάγκη για την εφαρμογή τακτικών περικοπής φορτίου εγείρεται κυρίως από απρόβλεπτες καταστάσεις όπως έλλειμμα ενεργού ισχύος εξαιτίας μειωμένης παραγωγής

(είτε ΔΠ είτε κεντρικής). Οι συνθήκες κατά τις οποίες μπορεί να προκύψει το ελλειμματικό ισοζύγιο μπορεί να οφείλονται σε:

- Ασυνήθιστες κλιματικές -για την εποχή- αλλαγές (ηλιοφάνεια -συννεφιά- , άνεμος κ.α.)
- Ειδικές περιπτώσεις ταυτοχρονισμού καταναλώσεων (*Loss of diversity*)
- Σφάλματα ή υπερφορτίσεις εξοπλισμού που απαρτίζει το δίκτυο



Εικόνα 1.3 Κατηγοριοποίηση φορτίων στα ευφυή δίκτυα [41]

Μεταξύ άλλων απρόβλεπτων περιπτώσεων μπορεί να είναι η αύξηση του εγκατεστημένου φορτίου (σε τοπικό επίπεδο) χωρίς τη συνοδεία κάποιας εγκατεστημένης μονάδας ΔΠ. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις μια δυνατή λύση είναι η μείωση της ζητούμενης ενεργού ισχύος ώστε να προσαρμοστεί στα επίπεδα της παραγόμενης ισχύος.

Για σχετικά μικρές ελλείψεις ισχύος, μπορεί η λύση να είναι η μείωση της τάσης τροφοδοσίας στα επιτρεπτά όρια (κάτι το οποίο θα γίνει αναπόφευκτα αν δεν εφαρμοστεί κάποια τακτική ρύθμισης). Με την μείωση της τάσης τροφοδοσίας μειώνεται και η ζήτηση ισχύος ειδικότερα από τα φορτία με συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί θεμιτή λύση πάντα, για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκαθορισμένα πλάνα περιοδικής περικοπής φορτίου (*Predetermined Load Shedding Schedules-Brownouts*), προφανώς με την ανάλογη οικονομική αποζημίωση των καταναλωτών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμόζονται οι δυο παραπάνω μέθοδοι που αναφέρθηκαν. Συχνά όμως μπορεί η κατάσταση του ισοζυγίου να χειροτερέψει με κίνδυνο την απώλεια ολόκληρου υποσταθμού, πράγμα το οποίο μπορεί να διευρύνει το πρόβλημα και να επιφέρει αστάθεια σε ολόκληρο το δίκτυο.

Ο σχεδιασμός της τακτικής του load shedding συναντάται συχνά και στον έλεγχο των μικροδικτύων, ενώ συνδυάζεται με νησιδοποιημένη λειτουργία τμημάτων του δικτύου για την προστασία μέρους φορτίων που έχουν τη δυνατότητα να καλυφθούν από τοπικές μονάδες. [7]

1.4 Μικροδίκτυα

Από τις προηγούμενες ενότητες έγινε αντιληπτό ότι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν νέα στοιχεία λειτουργίας με την ολοένα και αυξανόμενη ενσωμάτωση της ΔΠ. Η εμφάνιση μονάδων παραγωγής σε πολλά σημεία του δικτύου αλλά και η ευελιξία που προσφέρουν το πλήθος των ελεγχόμενων φορτίων οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου και σύγχρονου όρου στα ΣΗΕ που αναφέρεται στα *μικροδίκτυα (microgrids)*. Η λειτουργία τους βασίζεται κατά κύριο λόγο στις μονάδες ΔΠ οι οποίες αποτελούν τις μικροπηγές, οι οποίες καλύπτουν συχνά τις ανάγκες αυτών. Ταυτόχρονα, όμως, είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο (συνήθως ΧΤ) και είναι δυνατή σε κάθε στιγμή όπως θα δούμε η απομονωμένη δηλαδή ανεξάρτητη λειτουργία τους.[8]



Εικόνα 1.4 Μικροδίκτυα με τη μορφή νησίδων

Τα μικροδίκτυα, παρουσιάζονται σε πολλά τμήματα του δικτύου δημιουργώντας νησίδες, και με τον τρόπο αυτό στοιχειοθετούν επιμέρους λειτουργικά δίκτυα, τα οποία προσομοιάζουν από κάθε άποψη με ένα κοινό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο έλεγχος της λειτουργίας όλων αυτών των επιμέρους μικροδικτύων εισάγει πολυπλοκότητα στη

συνολική εικόνα διαχείρισης του δικτύου, ενώ είναι εύκολα κατανοητό ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικούς κεντρικούς ελέγχους. Ένας από τους πλέον καθιερωμένους τρόπους είναι με τη χρήση των πολλαπλών ευφυών πρακτόρων(*multi-agent*) , το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, ενώ θα χρησιμοποιηθεί η τυπική μορφή της οντότητάς του για την επίλυση του ζητήματος της ρύθμισης τάσης στην παρούσα διπλωματική.

Κεφάλαιο 2 - Δίκτυα Διανομής

2.1 Εισαγωγή

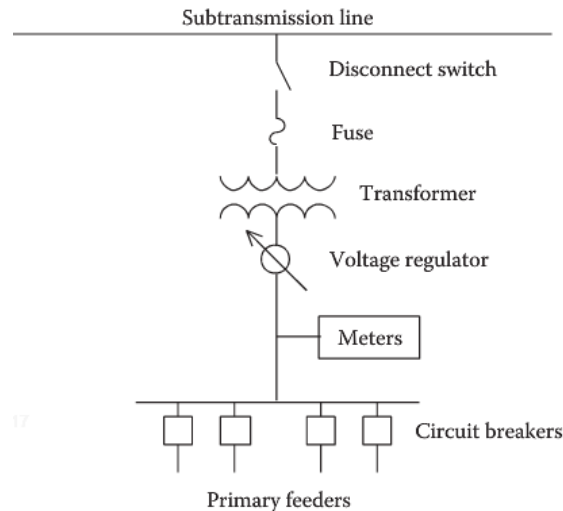
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η δομή καθώς και κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής, καθώς η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στη ρύθμιση της τάσης σε αυτό το επίπεδο του Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Παρακάτω περιγράφονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός συμβατικού ΔΔ, ενώ σε επόμενο κεφάλαιο θα περιγραφεί η εξέλιξη τους σε σύγχρονα ευφυή δίκτυα.

Γενικά ένα ΣΗΕ αποτελείται από τα εξής διακριτά επίπεδα:

- Συμβατικούς(κεντρικούς) σταθμούς παραγωγής ΗΕ.
- Τα δίκτυα μεταφοράς -είθισται να καλούνται υψηλής τάσης ΥΤ ή υπερυψηλής ΥΥΤ- μέσω των οποίων μεταφέρεται πρακτικά οι παραγόμενη από τους σταθμούς παραγωγής ΗΕ προς τις περιοχές των καταναλώσεων. Στην ίδια κατηγορία των δικτύων μεταφοράς, μπορούμε να θεωρήσουμε και τα δίκτυα υπομεταφοράς(sub-transmission), τα οποία παρουσιάζουν τυπικά τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η διαφορά τους είναι ότι τα δίκτυα υπομεταφοράς, μεταφέρουν ΗΕ σε μικρότερες αποστάσεις(χαμηλότερο επίπεδο τάσης) και ποσότητες, χρησιμοποιώντας υποσταθμούς ΥΤ/ΥΤ, όπου προορίζονται προς μικρότερα κέντρα καταναλώσεως στην ίδια περιοχή μείζονος φορτίου.
- Τα δίκτυα διανομής τα οποία διασυνδέονται με τα δίκτυα μεταφοράς μέσω υποσταθμών, και διανέμουν τη ΗΕ σε καταναλωτές αυξημένων ζητήσεων (άνω των 200MVAή100MVAεντός πόλεων)
- Δίκτυα χαμηλής τάσης ΧΤ αποτελούν το τμήμα που τροφοδοτεί τους πελάτες περιορισμένων/οικιακών απαιτήσεων.

Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μια μορφή ενός τυπικού υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ με τις κύριες διατάξεις που το απαρτίζουν. Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια περιγραφή των όσων απεικονίζονται. Συγκεκριμένα, σε ένα υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ εντοπίζονται:

1. Ζεύξη/επανάζευξη υψηλής και χαμηλής πλευράς
2. Μετασηματισμός τάσης, υποβιβασμός τάσης στο κατάλληλο επίπεδο για τη διανομή.
3. Αυτόματος Ρυθμιστής τάσης (AVR), θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 'Ρύθμισης τάσης' μαζί με τα υπόλοιπα συμβατικά μέσα ρύθμισης.
4. Μέσα προστασίας.
5. Μετρήσεις, λήψη μετρήσεων από το Μ/Σ, μεταξύ των μετρήσεων λαμβάνονται και καταγράφονται τα μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα.



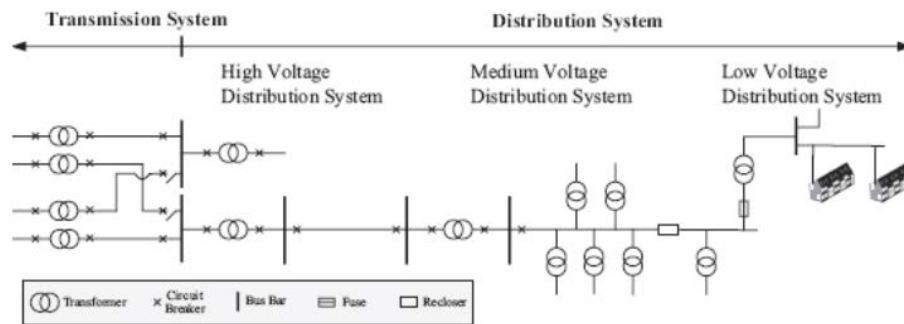
Εικόνα 2.1 Σύνθεση υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ [12]

2.1 Σύνθεση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω, η σύνθεση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται από μια ιεραρχία επιπέδων τάσεων εκκινώντας από τα δίκτυα μεταφοράς τα οποία παραλαμβάνουν από τα κέντρα των μονάδων παραγωγής την ΗΕ, η οποία μεταφέρεται για εκατοντάδες χιλιομέτρων μέσω υψηλών επιπέδων τάσης (τάξης 150kV)-για την μείωση των απωλειών μεταφοράς-. Αναφορικά με τη ροή της ισχύος, μπορεί να είναι προς οποιαδήποτε κατεύθυνση στα πλαίσια των διαφόρων γραμμών, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η κατά το δυνατό οικονομικότερη λειτουργία. Η διάταξη του δικτύου είναι βροχοειδής, πράγμα το οποίο επιτρέπει την καλύτερη κατανομή της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς συγκριτικά με την ακτινική. Το δίκτυο μεταφοράς και υπομεταφοράς απαρτίζεται από ένα πλήθος γεννητριών που συνδέονται απευθείας σε αυτό μέσω μετασχηματιστών, μετασχηματιστές ζεύξεως για την διασύνδεση των διαφορετικών γραμμών μεταφοράς (εφεδρικών ή μη) καθώς και διαφόρων διακοπών και μέσων προστασίας. [4]

Το επόμενο ιεραρχικά επίπεδο είναι τα δίκτυα διανομής -όπως φαίνεται και στην εικόνα-, τα οποία μέσω κατάλληλων υποσταθμών υποβιβάζουν την τάση στα 20kV (σπάνια και 6.6kV). Στο σημείο αυτό θα γίνει ο διαχωρισμός του όρου των δικτύων διανομής σε δυο κατηγορίες την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα. Αναφερόμαστε σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα διανομή, με την πρώτη να σχετίζεται με τους καταναλωτές ΜΤ ενώ τη δεύτερη αυτούς της ΧΤ.

Το τμήμα διαφοροποίησης του δικτύου μεταφοράς με αυτό της διανομής αποτελεί ο υποσταθμός υποβιβασμού τάσης. Από το σημείο αυτό αναχωρούν ένας ή περισσότεροι τροφοδότες (*feeders*) για το επίπεδο διανομής ισχύος. Πολλοί είναι οι βιομηχανικοί καταναλωτές οι οποίοι συνδέονται απευθείας στο δίκτυο υπομεταφοράς όπως φαίνεται και παρακάτω, απολαμβάνοντας παροχές ΗΕ υψηλής ισχύος. Ο διαχωρισμός των καταναλωτών αυτών των κατηγοριών επίσης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Πλήρης απεικόνιση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [4]

2.2.1 Περιγραφή λειτουργικών διατάξεων δικτύου διανομής

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν τα δίκτυα διανομής και είναι απαραίτητα και την ορθή και ασφαλή λειτουργία τους. Συγκεκριμένα αποτελούνται από :

- Υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ
- Συχνά στα συμβατικά δίκτυα συναντώνται και υποσταθμοί ζεύξεως και μετασχηματισμού
- Ζυγοί όπου διασυνδέονται οι διάφορες γραμμές
- Διακόπτες ζεύξεως και προστασίας

2.2.2 Μέσα (διακόπτες) προστασίας & ζεύξεως

Βασικό στοιχείο του σχεδιασμού κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης και επομένως και του ηλεκτρικού δικτύου είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής και του εξοπλισμού από αστοχίες ή σφάλματα. Στόχος των μέσων προστασίας για τα ΔΔ, είναι ο εντοπισμός του σφάλματος (*detect*), η απομόνωση (*isolation*) και επαναφορά του συστήματος σε κανονική λειτουργία (*Clear fault*). Προφανώς, ο σχεδιασμός γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκόπτονται κάθε φορά η λιγότεροι δυνατοί καταναλωτές.

Στο σημείο αυτό περιγράφονται σύντομα τα μέσα προστασίας των δικτύων διανομής. Γενικά, η φιλοσοφία σχεδιασμού των ΔΔ παρουσιάζει αρκετά κοινά στοιχεία με τα δίκτυα μεταφοράς, ωστόσο υπάρχει μια ειδοποιός διαφορά με αυτά.

Τα δίκτυα μεταφοράς ΗΕ είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν με αμφίδρομη ροή ισχύος, δηλαδή η κατεύθυνση δεν είναι απαραίτητα από την παραγωγή των μονάδων παραγωγής προς το επόμενο ιεραρχικό επίπεδο. Με άλλα λόγια, η ροή ποικίλει ανάλογα με τη ζήτηση των καταναλωτών αλλά και τη τρέχουσα διαθέσιμη ισχύ. Η διαφοροποίηση τώρα στα δίκτυα διανομής είναι ότι η σχεδίαση τους αφορά μονόδρομη ροή ισχύος κάτι που όπως θα δούμε παρακάτω έρχεται σε αντιπαράθεση με την διεύθυνση πηγών ΔΠ.

Τα μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για την ζεύξη/απόζευξη ορισμένων τμημάτων του δικτύου:

- Αποζεύκτες (Disconnectors), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον χειρισμό τμημάτων κυκλώματος. Σημαντικό να αναφερθεί ότι ο χειρισμός γίνεται χωρίς φορτίο.
- Διακόπτες Φορτίου (Switches), οι οποίοι δύναται να διακόψουν τη λειτουργία του φορτίου.
- Διακόπτες ισχύος (βραχυκυκλώσεως ή υπερεντάσεως-Circuit Breakers), χρησιμοποιούνται για την διακοπή της λειτουργίας τμήματος του δικτύου όταν οι τιμές του ρεύματος ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια (προστασία μονώσεων κτλ).

Μεταξύ άλλων προφανώς ανάλογα τον τύπο καταναλωτή υπάρχουν και πολλά άλλα είδη πέραν της προστασίας των διατάξεων έναντι βραχυκυκλωμάτων όπως προστασία υποτάσεως (για κινητήρες), προστασία υποσυχνότητας (γεννήτριες) κ.α.

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων σε περίπτωση βλάβης ή σφάλματος είναι:

- Οι ασφάλειες, (*Fuses*) οι οποίες μπορούν συνδυαστικά με τον μεν διακόπτη φορτίου να περιορίσει κάποιο τμήμα γραμμής, ενώ με τις ασφάλειες να διακόπτονται τα μη επιτρεπτά ρεύματα, διασφαλίζοντας την προστασία.
- Οι διακόπτες Ισχύος, οι οποίοι δέχονται εντολές μέσω τηλεχειρισμών, αποτελούνται δηλαδή από ηλεκτρικά κυκλώματα ελέγχου και τηλεχειρισμού. Επιλέγονται μέσω κατάλληλων καμπυλών (*Time Current Characteristic TCC*), μέσω των οποίων αποδίδεται ο χρόνος απόκρισης του διακόπτη ανάλογα με το ρεύμα που το διαπερνά. Σε αυτό τον τύπο κατατάσσονται και άλλα μέσα προστασίας όπως διαφορικοί ρελαί (*differential relay*), ή GFCI (*Ground Fault Circuit Interrupter*) και άλλα.

Ο σχεδιασμός των προστατευτικών μέσων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει συνεργατική λειτουργία αυτών. Τα *distance relays* αποτελούν μια κατηγορία μέσων προστασίας τα οποία μπορεί να συνεισφέρουν πολύ στη λειτουργία αυτή καθώς έχουν τη δυνατότητα να δρουν σε συγκεκριμένες αποστάσεις και τμήματα δικτυωμάτων από το σημείο εγκατάστασής τους.

Συνοπτικά η λειτουργία του βασίζεται στον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που βλέπει το ρελαί μέχρι πέρας του δικτυώματος που προβλέπεται να καλύπτει. Με δεδομένο ότι κάθε αγωγός παρουσιάζει μια ομοιογένεια στην τιμή της αντίστασής του ανά μονάδα απόστασης, μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί η εν λόγω αντίσταση από την αντισματική σχέση $Z = V/I$. Τυπικά σε περίπτωση σφάλματος θα μικραίνει πολύ το μέτρο της αντίστασης-ορίζεται κάποιο κατώφλι απόκρισης (*threshold impedance*), ενώ η φάση της θα λαμβάνει θετικές τιμές (προπορεία διανύσματος τάσης έναντι ρεύματος), καθώς το σφάλμα αποτελείται κατά κύριο λόγο από συνεισφορά άεργων ρευμάτων.

2.3.1 Τοπολογία Δικτύων Διανομής

Πριν παρουσιάσουμε την τοπολογική δομή των δικτύων διανομής, αξίζει να επισημανθεί ότι ποικίλουν οι συνθέσεις των ΔΔ ως προς την τοπολογία και τάση λειτουργίας, κάτι το οποίο οφείλεται στην ανάγκη προσαρμογής στις εκάστοτε περιοχές κάλυψης. Πιο συγκεκριμένα, περιοχές όπως η Βόρεια Αμερική εμφανίζει υψηλά επίπεδα εξαιτίας των μεγάλων αποστάσεων που προβλέπεται να καλύπτει το δίκτυο (αυξημένες απώλειες μεταφοράς εξαιτίας του μεγάλου μήκους), ενώ παράλληλα η πυκνότητα του πληθυσμού της είναι ιδιαίτερα αραιή. Εντελώς αντίθετα, τα Ευρωπαϊκά κράτη είναι σημαντικά πιο πυκνοκατοικημένα, με αποτέλεσμα το επίπεδο της τάσης να είναι χαμηλότερο εξαιτίας της πιο πυκνής εμφάνισης υποσταθμών ΜΤ.

2.3.1.1 Συμβατικές τοπολογίες Δικτύων Διανομής

Τα δίκτυα διανομής ΜΤ κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον σημείο τοποθέτησης τους ως εξής σε :

- Εναέρια δίκτυα ΜΤ, τα οποία είναι και τα συνηθέστερα. Τα δίκτυα διανομής αυτού του τύπου παρουσιάζουν κατά βάση βροχοειδή δομή αλλά λειτουργούν με δενδροειδή διάταξη-ακτινικά δίκτυα-. Αποτελούνται δηλαδή από έναν κύριο κορμό τροφοδότησης (ο οποίος προφανώς διαθέτει τη μεγαλύτερη διατομή), και μέσω διακλαδώσεων (*branches*) διασυνδέονται οι διάφοροι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ καθώς και οι καταναλωτές ΜΤ.
- Υπόγεια δίκτυα ΜΤ, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την τροφοδότηση πυκνοκατοικημένων περιοχών, επομένως εμφανίζουν υψηλή

πυκνότητα ισχύος. Πλεονεκτούν διότι παρουσιάζουν απλότητα και οικονομία λόγω του σχεδιασμού τους ωστόσο υστερούν στο χρόνο αποκατάστασης τυχούσης βλάβης. Βέβαια κάθε υπόγειο δίκτυο MT σχεδιάζεται κατάλληλα, ώστε, να επανατροφοδοτείται το τμήμα βλάβης από εναλλακτικό τμήμα διασύνδεσης μέσω ζεύξης με αυτό. Χρησιμοποιούνται πολλές εναλλακτικές σχεδίασης ενός τέτοιου δικτύου του οποία εντάσσονται στα πλαίσια της ύπαρξης κλειστού βρόχου(*closed loop*), όπως το ατρακτοειδές και το διπλή τροφοδότησης. [4]

2.3.1.2 Σύγχρονες Υβριδικές τοπολογίες (*Meshed Networks*)

Γενικότερα, η τοπολογική διάταξη που έχει καθιερωθεί, και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, είναι ο συνδυασμός βροχοειδούς διάταξης με την ακτινική λειτουργία. Η ακτινική διάταξη όπως είναι εύκολα αντιληπτό αποτελεί την οικονομικότερη επιλογή από την άποψη ότι απαιτείται το ελάχιστο μήκος γραμμών για την τροφοδότηση. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η απλότητα της αρχιτεκτονικής-ακτινικής- του δικτύου, που επιτρέπει την μείωση των μέσων προστασίας αλλά και των διακοπών απόζευξης καθώς και την ευκολία διαστασιολόγησης του. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα είναι ότι στερείται αξιοπιστίας παροχής ΗΕ, καθώς κάποιο σφάλμα μπορεί να διακόψει μεγάλο τμήμα καταναλωτών. Επιπρόσθετα, ένα θέμα που μας αφορά ιδιαίτερα στα πλαίσια της μελέτης για την ρύθμιση της τάσης των ακτινικών ΔΔ, είναι ότι παρουσιάζουν αυξημένη δυσκολία στη ρύθμιση της τάσης τους εξαιτίας της κατανομής της ισχύος με αποτέλεσμα να εμφανίζουν προβλήματα υπότασης τα πέρατα των γραμμών. Πιο αναλυτικά, η μετάβαση από το συμβατικό παθητικό στα σύγχρονα δίκτυα όπου ο καταναλωτής συμμετέχει στην-τοπική- παραγωγή ΗΕ, απαιτεί την σχεδίαση μιας νέας πιο ευέλικτης και ευφυούς αρχιτεκτονικής.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [13][14][15] υπάρχει η τάση να χρησιμοποιείται μια υβριδική διάταξης μορφή των ΔΔ αποκαλούμενη ως *meshed networks*. Μέσω των δικτύων αυτών πραγματοποιείται μια προσπάθεια στην κατεύθυνση της ενίσχυσης των ακτινικών δικτύων από εναλλακτικές διόδους τροφοδότησης. Μεταξύ άλλων ένα ακόμη ισχυρό κίνητρο για την ενσωμάτωση τέτοιου είδους αρχιτεκτονικής είναι ότι μπορεί να αξιοποιηθεί για την αύξηση του βαθμού διείσδυσης. Αναπόφευκτα, δηλαδή, η ενσωμάτωση της ΔΠ οδηγεί και στην δημιουργία τμημάτων δικτύου (μικροδικτύων) τα οποία δύναται να λειτουργήσουν αυτόνομα. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να διατίθεται τοπικός έλεγχος μέσω του οποίου θα είναι δυνατή -χωρίς ανωμαλίες στη μόνιμη λειτουργία του δικτύου- η αμφίδρομη ροή ισχύος.

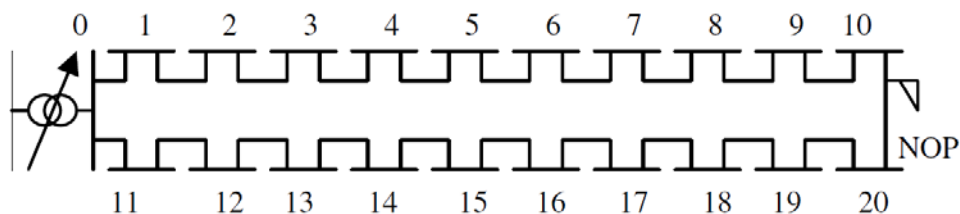
Η τοπολογία των *meshed networks* βρίσκει πολλές εναλλακτικές σχεδιασμού όπως την *closed loop trunk feeders*, *closed loop laterals interconnection feeders* και άλλες ακόμη. Γενικότερα, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να περιγραφεί η συνεισφορά που μπορεί να επιφέρει

η αξιοποίηση των meshed networks στην υψηλής κλίμακας ενσωμάτωση της ΔΠ, καθώς ζωτικής σημασίας δεδομένα όπως η τοποθεσία, το προφίλ των καταναλώσεων αλλά και η δόμηση-με την έννοια της διάταξης- του δικτύου επηρεάζουν δραστικά την επίδραση της ΔΠ.

Σύγκριση Ακτινικών παθητικών δικτύων με Υβριδικά(Meshed)

Βασικό να αναλογιστούμε ότι ακόμη και στα συμβατικά ακτινικά δίκτυα ,όπου ο βαθμός αξιοπιστίας του δικτύου είναι χαμηλός, ήταν εγκατεστημένες εφεδρικές γραμμές παροχή στις οποίες πραγματοποιούνταν μεταγωγή, προκειμένου να μην διακοπεί η παροχή των καταναλωτών της. Αυτή άλλωστε ήταν και η πρώτη μορφή εμφάνισης των meshed networks. Πριν την εμφάνιση της υψηλής διείσδυσης σε ΔΠ, χρησιμοποιούνταν για την απομείωση των απωλειών μεταφοράς, τη βελτίωση του προφίλ της τάσης (απομακρυσμένοι καταναλωτές). Αναμφισβήτητα η πολυπλοκότητα και το κόστος διαχείρισης του δικτύου αυξάνεται δραματικά, αν μεταξύ άλλων συνυπολογίσουμε ότι μεταβάλλονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης ως προς κάθε πλευρικό τμήμα του ακτινικού, πράγμα το οποίο σημαίνει και διευρυμένη διαστασιολόγηση στα μέσα προστασίας. Ωστόσο, η χρήση αυτών των δικτύων μπορεί να συνεισφέρει στην καταστολή των δυσμενών επιπτώσεων της υψηλής ενσωμάτωσης της ΔΠ ,όπως θα δούμε παρακάτω.

Όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο η υψηλής κλίμακας ενσωμάτωση ΔΠ, μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων, όπως σημαντικές διακυμάνσεις στην τάση. Το ζήτημα αυτό δεν είναι πάντοτε εύκολο να ρυθμιστεί με τη χρήση μονάχα των συμβατικών μέσων. Για το λόγο αυτό με τη χρήση τέτοιων διάταξης μπορεί να πραγματοποιηθεί αναδιαμόρφωση του δικτύου μέσω ειδικών διακοπών ζεύξης NOP(Normally-Open Point) και NOC(Normally-Closed Point) που προσφέρονται. Πρακτικά μέσω της ζεύξης κάποιου τμήματος του δικτύου αλλάζει η ροή ενεργού και άεργου ισχύος και μπορεί να επιφέρει ρύθμιση του συστήματος σε γενικότερο επίπεδο λειτουργίας (τάσης, απωλειών, σφαλμάτων, ευστάθειας κ.α.). Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ένα απλό ΔΔ με ζεύξη NOP.



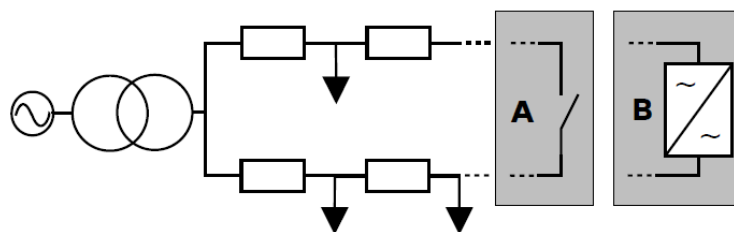
Εικόνα 2.3 Δίκτυο διανομής με διάταξη NOP [14]

Σύγκριση ενεργών ακτινικών δικτύων με ενεργά υβριδικά δίκτυα(Active Meshed Networks)

Η προσθήκη μονάδων ΔΠ ,σε ένα ακτινικό δίκτυο, μπορεί να έχει ποικίλες επιδράσεις, από αρνητικές μέχρι θετικές ,καθώς εξαρτάται από το μέγεθος αυτής αλλά και τη θέση εγκατάστασης στο δίκτυο. Επί παραδείγματι, η εγκατάσταση μιας μονάδας ΔΠ μεσαίου μεγέθους, σε ένα ασθενές πλευρικό τμήμα του δικτύου, θα προκαλέσει σημαντική αύξηση των απωλειών μεταφοράς. Αντίθετα, τα ίδια μπορούν να συμβούν και σε ένα meshed ενεργό δίκτυο, ακόμη κι αν όπως είπαμε δύναται να μειώσουν τη δυσμενή επίδραση της ΔΠ. Στην περίπτωση που έχει επιλεγθεί η βέλτιστη θέση(optimal allocation) για την τοποθέτηση της μονάδας DG, η θετική επίδραση θα εντοπίζεται και στους δυο τύπους με τη διαφορά ότι στα meshed θα είναι ακόμη πιο αισθητή, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Αν τέλος είναι επιτρεπτή η τεχνική ελεγχόμενης νησιδοποίησης ,τότε μπορεί να αξιοποιηθεί για τέτοιου είδους ζεύξης.

Η βασική λειτουργία των meshed networks μέχρι και τις προηγούμενες δεκαετίες εντάσσονταν την χρήση περιορισμένου αριθμού διατάξεων ζεύξης NOP και OP. Με την ενσωμάτωση της ΔΠ, μια ακόμη καινοτομία έχει εισαχθεί τυπικά παράλληλα με τα NOPs , τα *SNOPs(Soft Normally Open Point)*. Μέσω αυτών διασυνδέονται ρυθμιστικές διατάξεις όπως *back-to-back-converters(AC-AC)* ή *Voltage-sourced converters(VSCs)* ,οι οποίες θα αλληλεπιδρούν με το δίκτυο. Οι λόγοι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η διασφάλιση της καλύτερης και οικονομικότερης λειτουργίας του δικτύου, αφού εξυπηρετεί στην προσπάθεια βελτίωσης της κατανομής ροής ισχύος και κατ' επέκταση στην βελτίωση της τάσης
- Εξυπηρέτηση φορτίων που διακόπτονται εξαιτίας σφάλματος και τροφοδοτούνται μέσω του SNOP με την υποστήριξη της ρυθμιστικής διάταξης η οποία έχει άμεση απόκριση
- Περιορίζει την επίδραση στο βραχυκύκλωμα καθώς διατίθενται επιπλέον διακόπτες υπερέντασης, εν αντιθέσει με τα NOPs όπου πρέπει να έχει γίνει ανάλογος σχεδιασμός.



Εικόνα 2.4 Διάταξη SNOP σε δίκτυο διανομής

Η χρήση μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής διάταξης σε διευρυμένο επίπεδο, δύναται να πραγματοποιηθεί μόνο υπό την προϋπόθεση ότι διατίθενται ευφυή συστήματα επιτήρησης και διαχείρισης του δικτύου. Εξάλλου, οιαδήποτε ζεύξη δημιουργείται θα πρέπει να διασφαλίζεται και να προβλέπεται από τα μέσα προστασίας του δικτύου. [13]

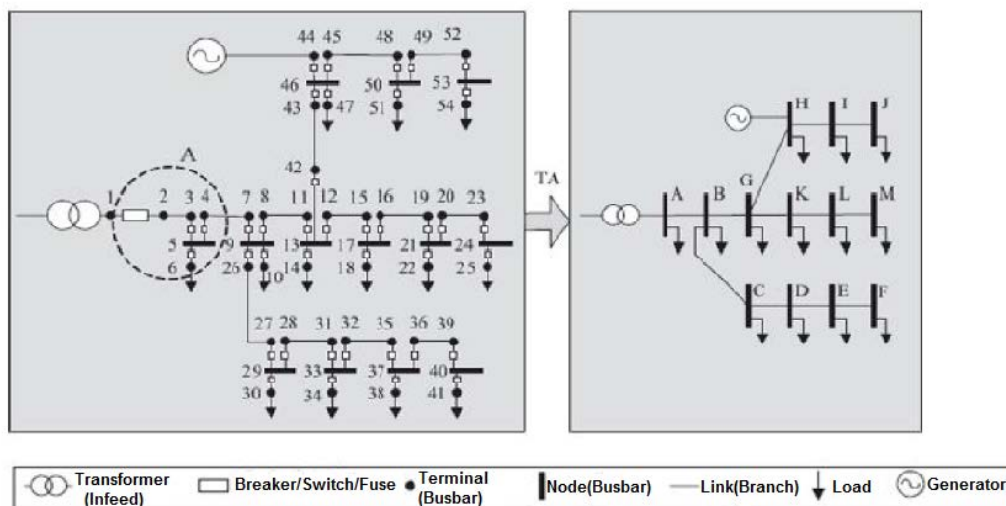
2.3.2 Ακτινική τοπολογία Δικτύων Διανομής (*Topology Analysis*)

Στην παράγραφο αυτή αναλύουμε την τυπική δομή και τις χαρακτηριστικές ονοματολογίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της τοπολογίας (*Topology Analysis-TA*) της ακτινικής δομής, η οποία άλλωστε θα μας απασχολήσει στα επόμενα κεφάλαια για το ζήτημα της ρύθμισης της τάσης.

Ένα ηλεκτρικό δίκτυο διανομής αποτελείται από διάφορα τμήματα όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Στις επόμενες θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή των μέσων ζεύξης και προστασίας, ενώ εν συνεχεία ακολουθεί η απόδοση μοντελοποίησης των βασικών τμημάτων του δικτύου.

Η ανάλυση της τοπολογίας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της ανάγνωσης και χαρτογράφησης του δικτύου, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ψηφιοποίηση αυτού. Η απλότητα των ακτινικών δικτύων, έγκειται στο ότι κατ' ουσίαν αποτελεί μια δενδροειδή τοπολογία. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αναπαράστασή τους από ένα γράφο, όπου κάθε κορυφή του γράφου θα αποτελεί ένα ζυγό. Μια συμπυκνωμένη μορφή απεικόνισης καθώς δεν παρουσιάζονται αναλυτικά τα φορτία και οι γεννήτριες, παρά μόνο ο τρόπος διασύνδεσης των ζυγών. Ένας δέντρο αποτελεί μια απλουστευμένη μορφή γράφου η οποία μπορεί να χωριστεί σε τμήματα, ρίζας (*Root*), Φύλλων (*Leaves*) και γονέων (*Parents*). Στη διπλωματική εργασία η ρίζα θα αποτελεί τον εκάστοτε υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Με τον τρόπο αυτό με την χρήση μιας απλής δομής δεδομένων ή ακόμη κι ενός πίνακα συνδέσεων (*connectivity matrix*) μπορεί να απεικονιστεί πλήρως το δίκτυο. Επίσης υπάρχουν αλγόριθμοι διάσχισης δένδρων είναι οι εξής: *Breadth First Search(BFS)*, *Depth First Search (DFS)* ή εύρεσης του *Spanning Tree*. [16][17]

Στο εικονιζόμενο παρατηρούμε ένα κύριο τροφοδότη (*Feeder*), ο οποίος διασυνδέεται με την ΥΤ με κατάλληλο ΜΤ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ. Παρατηρούμε τον κύριο κορμό του δικτύου ο οποίος αποκαλείται *trunk feeder*, μέσω του οποίου τροφοδοτούνται οι επιμέρους πλευρικούς τροφοδότες (*lateral feeders*). Η διασύνδεση των πλευρικών τμημάτων με τον κύριο τροφοδότη πραγματοποιείται μέσω των διακλαδώσεων (*branches*).



Εικόνα 2.5 Απλοποιημένη απεικόνιση δικτύου διανομής [16]

Στην εικόνα 2.5 αποδίδεται το δίκτυο όπως προκύπτει από την ανάλυση της τοπολογίας, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις.

2.4 Μοντελοποίηση στοιχείων Δικτύων Διανομής

2.4.1 Μετασηματιστές

Γενικά διατίθενται διαφόρων ειδών Μ/Σ όπως:

- ο μετασηματιστές μετρήσεων (έντασης και τάσης), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη λήψη των τιμών των αντίστοιχων μεγεθών, και δεν συνηθίζεται να έχουν κάποια άλλη λειτουργική αξία
- ο μετασηματιστές ρυθμίσεως ή ελέγχου τάσεως ή της ροής ισχύος, οι οποίοι μεταβάλλουν πρακτικά τα μεγέθη του δικτύου, μέσω της αλλαγής του αριθμού των σπειρών τους.
- ο μετασηματιστές γειώσεως, οι οποίοι σκοπό έχουν την παροχή ουδέτερων κόμβων για τη γείωση του συστήματος σε ορισμένα σημεία.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μετασηματιστών (Μ/Σ) ΜΤ, ειδικότερα οι ΜΣ ισχύος, είναι εξοπλισμένοι με σύστημα αλλαγής λήψεων, πράγμα το οποίο όπως θα δούμε και σε επόμενη παράγραφο ότι εξυπηρετεί στην ρύθμιση της τάσης. Γενικά, διατίθενται δυο κατηγορίες Μ/Σ που δύναται να πραγματοποιηθεί αλλαγή λήψεων:

- ο Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) (*On Load Tap-Changer [OLTC]*), στους οποίους επιτρέπεται αλλαγή των λήψεων σε οποιαδήποτε κατάσταση

φόρτισης. Όπως θα δούμε διαθέτουν αυτόματο ρυθμιστή τάσης, ο οποίος εξάγει κάθε φορά την ανάγκη για μεταβολή των λήψεων.

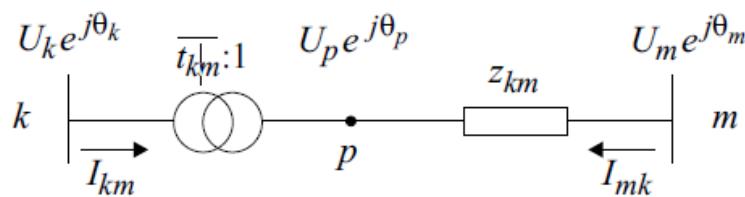
- ο Στον άλλο τύπο Μ/Σ *off circuit tap changer* (*No Load Tap-Changer [NLTC]*) επιτρέπεται η αλλαγή των λήψεων μονάχα όταν είναι αφόρτιστος. Συνήθως συναντάται σε μικρότερης ισχύος Μ/Σ

Συχνά εντοπίζονται και η Μ/Σ στροφής φάσης οι οποίοι είτε έχουν λόγο 1:1, είτε συνδυάζουν τη λειτουργία τους *OLTC*. Αυτοί οι Μ/Σ έχουν την ιδιότητα μέσω της στροφής που εισάγουν στην τάση εξόδου του Μ/Σ, να ελέγχουν να ελέγχουν την ροή ενεργού ισχύος

Γενικά ένας μετασχηματιστής ισχύος αναλύεται με τα μεγέθη ανηγμένα ως προς την πλευρά είτε του πρωτεύοντος είτε του δευτερεύοντος. Αντιστοίχως, η ανάλυση σε ένα Μ/Σ με μεταβλητό λόγο λήψεων γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο με τη διαφορά ότι εμφανίζεται ο μεταβλητός λόγος ο οποίος επηρεάζει την φαινόμενη αντίδραση των λήψεων καθώς και τον κλάδο μαγνητίσεως.

Η ανάλυση διευκολύνεται ιδιαίτερα στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το ανά μονάδα σύστημα. Η θεώρηση που κάνουμε κατά την ανάλυση των προσομοιώσεων, είναι η μοντελοποίηση του Μ/Σ με μια ισοδύναμη αντίδραση (αφού πράγματι μπορεί να αμεληθούν οι παράγοντες απωλειών χαλκού).

Θεωρώντας για αρχή την παρακάτω απλοποιημένη μορφή του μετασχηματιστή, όπου μοντελοποιείται με αντίσταση σειράς ισοδύναμου κυκλώματος (αμελώντας το ρεύμα μαγνήτισης και το ρεύμα απωλειών σιδήρου), η οποία αντιστοιχεί στη ροή σκέδασης αλλά και στις απώλειες φόρτισης των πηνίων του ΜΣ. Αν θεωρήσουμε ότι εισάγει και μια στροφή φάσης φ_{km} ο ΜΣ: [19]



Εικόνα 2.6 Μετασχηματιστής με μιγαδικό λόγο μετασχηματισμού

Ο μιγαδικός λόγος μετασχηματισμού είναι $\bar{t}_{km} = a_{km}^{-1} e^{-j\varphi_{km}}$

Η γωνία στην έξοδο του Μ/Σ με την στροφή φάσης θα είναι

$$\theta_p = \theta_k + \varphi_{km}$$

$$U_p = a_{km} U_k$$

$$\frac{E_p}{E_k} = \bar{t}_{km} = a_{km} e^{j\varphi_{km}}$$

$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = -\frac{|I_{km}|}{|I_{mk}|} = -a_{km}$$

I_{km} , I_{mk} τα ρεύματα της γραμμής όπως φαίνονται στην εικόνα 2.6

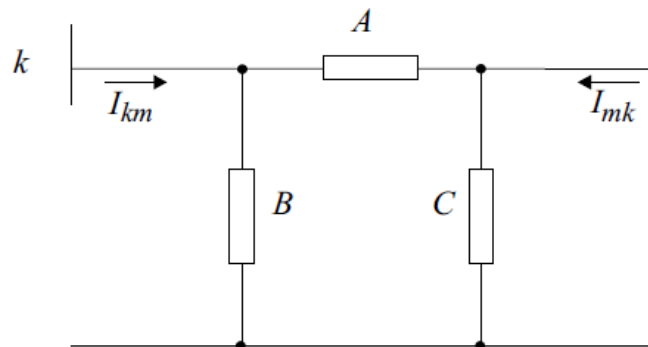
Στην εικόνα 2.7 πραγματοποιείται ανάλυση του Μ/Σ θεωρώντας το αντίστοιχο πλήρες ισοδύναμο του, του οποίου θα εξάγουμε τις παραμέτρους που απεικονίζονται:

Θεωρούμε ότι y_{km} η αγωγιμότητα της αντίστασης σειράς του ΜΣ, ενώ E_k & E_m οι τάσεις αντίστοιχα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Τότε αναλύοντας

Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη των ρευμάτων είναι:

$$I_{km} = -t_{km}^* y_{km} (E_m - E_p) = (a_{km}^2 y_{km}) E_k + (-t_{km}^* y_{km}) E_m$$

$$I_{mk} = y_{km} (E_m - E_p) = (-t_{km} y_{km}) E_k + y_{km} E_m$$



Εικόνα 2.7 Ισοδύναμο π-μοντέλο μετασχηματιστή [19]

Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι παράμετροι

$$A = a_{km} y_{km}$$

$$B = a_{km} (a_{km} - 1) y_{km}$$

$$C = (1 - a_{km}) y_{km}$$

2.4.2 Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν παρασταθούν με ένα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα ως σύνθετες αντιστάσεις σειράς. Σε επίπεδα ΥΤ και ΥΥΤ(πάνω από τα 220kV) επειδή οι γραμμές μεταφοράς(μεγάλο μήκος), παρουσιάζουν υπολογίσιμες τιμές χωρητικότητας ως προς γη. Επομένως, σε υψηλές τάσεις για ακρίβεια υπολογισμών θα πρέπει να αντικαθίστανται με το ισοδύναμο μοντέλο-π.

Το ισοδύναμο- π είναι αντίστοιχο του παραπάνω ισοδυνάμου π για τον μετασχηματιστή. Η τιμή της εγκάρσιας αγωγιμότητας είναι:

$$y_{km} = \frac{jB}{2}$$

Η χωρητική αγωγιμότητα B , παρουσιάζει εξάρτηση από την τριφασική παραγόμενη άεργο ισχύ.

$$B = \frac{Q_c}{V_N^2}$$

Στην παρούσα διπλωματική αμελείται η επίδραση των εγκάρσιων χωρητικοτήτων ως προς γη για απλότητα, ενώ στην ανάλυση ευαισθησιών πραγματοποιούνται ορισμένες παραδοχές επί τούτου.

2.4.3 Γεννήτριες και ΔΠ (*Generation & DG*)

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα με το οποίο ασχολούμαστε εκτενώς στην παρούσα διπλωματική είναι η ΔΠ. Στο σημείο αυτό θα μοντελοποιήσουμε κάθε μορφή εγκατεστημένης μονάδας.

Για την ανάλυση ροής φορτίου, διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες (slack bus, P-U & PQ), οι κόμβους του δικτύου, εκ των οποίων τυπικά οι DGs μπορούν να λάβουν το ρόλο είτε PQ είτε PU καθώς ως ζυγό ταλάντωσης ορίζεται κατά προτίμηση ο ισχυρότερος ζυγός. Εν προκειμένω ως ζυγό ταλάντωσης θα λαμβάνουμε τη δευτερεύουσα λήψη του υποσταθμού (*sending end feeder*).

Οι DGs έχουν δυνατότητα διασύνδεσης με το δίκτυο με τέσσερις τεχνικές. Αυτές είναι :

- Απευθείας διασύνδεση ως σύγχρονη γεννήτρια (*synchronous generator*)
- Απευθείας διασύνδεση ως κινητήρας επαγωγής(*induction generator*)
- Ανεμογεννήτριες με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης *Doubly fed induction Generator*

- ο Πλήρως διασυνδεδεμένες με μετατροπείς ισχύος

Σε κάθε περίπτωση θεωρούμε μια απλοποιημένη μορφή των γεννητριών, λαμβάνοντας τις μονάδες DGs ως πηγές παροχής σταθερής ενεργού και αέργου ισχύος, -για τη δεδομένη στιγμή της ανάλυσης-.

Μια θεώρηση που πραγματοποιείται και για την περιγραφή των φορτίων είναι ότι θεωρούνται τριφασικά συμμετρικά. Αντίστοιχα, θεωρούμε ότι και οι πηγές δηλαδή οι γεννήτριες (-και οι DGs-) θεωρούνται τριφασικές συμμετρικές. Αυτό μας εξυπηρετεί στην διευκόλυνση ανάπτυξης των ευαισθησιών όπου αμελείται η επίδραση από τον ουδέτερο αγωγό λόγω συμμετρίας.

2.4.4 Φορτία (Loads)

Από ηλεκτρικής άποψης τα φορτία παρουσιάζουν τεράστιες διαφορές μεταξύ καθώς είναι σύνηθες να γίνεται διάκριση αυτών ανάλογα με το μέγεθός τους, τη συμμετρία, τη σταθερότητα αλλά και την περίοδο λειτουργίας τους. Ένα νέο χαρακτηριστικό αυτών αποτελεί το αν είναι κρίσιμο φορτίο -όπως αναφέρθηκε- του οποίου πρέπει να εξασφαλίζεται σε κάθε στιγμή η λειτουργία. Ως προς τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αν και παρατηρείται τυχαιότητα και ανομοιογένεια των φορτίων, στα πλαίσια της πρωτογενούς διανομής ένας στατιστικός μέσος όρος είναι δυνατόν να προβλέψει και να εκτιμήσει το συνολικό φορτίο για δεδομένη στιγμή.

Σημαντική είναι όμως η μοντελοποίηση αυτών. Για το λόγο αυτό αν θεωρήσουμε ότι το εικονιζόμενο φορτίο έχει σύνθετη αντίσταση $Z = R + jX$ δηλαδή έχει ωμικό και επαγωγικό χαρακτήρα τότε:

$$Z = R + j\omega L$$

Η αγωγιμότητά του θα είναι:

$$Y = \frac{1}{R + j\omega L} = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Έστω S η μιγαδική ισχύς που απορροφάει, τότε

$$S = P + jQ = |V|^2 Y^*$$

Καταλήγοντας έχουμε:

$$P = \frac{R|V|^2}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{R|V|^2}{R^2 + (2\pi f)^2 L^2}$$

$$Q = \frac{\omega L |V|^2}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{2\pi f L |V|^2}{R^2 + (2\pi f)^2 L^2}$$

Οι παραπάνω σχέσεις παρουσιάζουν την εξάρτηση του φορτίου (της ενεργού και άεργου απορροφήσεως) με την τάση και τη συχνότητα.

$$P = P(f, |V|)$$

$$Q = Q(f, |V|)$$

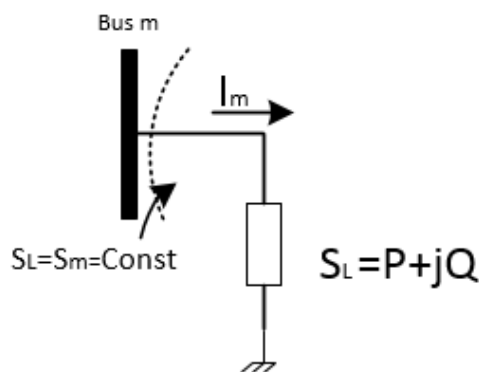
Αν και διατίθεται αυτή η συναρτησιακή σχέση, ο αναλυτικός προσδιορισμός αυτής για μεμονωμένα φορτία είναι πρακτικά αδύνατος. Για το λόγο αυτό καταφεύγουμε στο να απλουστεύουμε το πρόβλημα προβλέποντας τις μεταβολές των P και Q.

Με τον τρόπο αυτό έχουμε τις εξής σχέσεις [10]

$$\Delta P \cong \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial P}{\partial |V|} \Delta |V|$$

$$\Delta Q \cong \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial Q}{\partial |V|} \Delta |V|$$

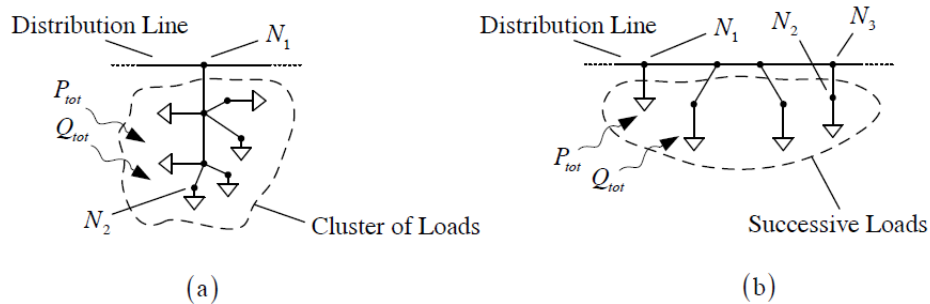
Στις περισσότερες περιπτώσεις τα φορτία στην μέση τάση θεωρούνται σταθερής ενεργού και αέργου ισχύος για ορισμένα πεπερασμένα χρονικά διαστήματα -όπου επισυμβαίνουν αλλαγές ίσως για λόγους ρύθμισης-. Τα παραπάνω ισχύουν προφανώς σε μόνιμη κατάσταση μόνο.



Εικόνα 2. 8 Μοντέλο φορτίου

Γενικά, μπορεί να γίνει η παραδοχή τα φορτία MT να είναι συμμετρικά (*Balanced Load*), κάτι το οποίο διευκολύνει στην ανάλυση ευαισθησιών στην πορεία.

Συχνά για την μείωση των κόμβων ενός δικτύου διανομής ακτινικής διάταξης χρησιμοποιείται η προτεινόμενη απλοποίηση.



Εικόνα 2.9 (α) Συστάδα φορτίων, (β) Διαδοχικά φορτία [19]

Αν στο ακτινικό δίκτυο εντοπίζονται αυτές οι δυο κατηγορίες πολλών γειτνιαζόντων φορτίων μπορεί να πραγματοποιηθεί απλοποίηση αυτών αντικαθιστώντας τα με ένα συγκεντρωμένο φορτίο. [19]

Οι δυο εικονιζόμενες περιπτώσεις φορτίων είναι:

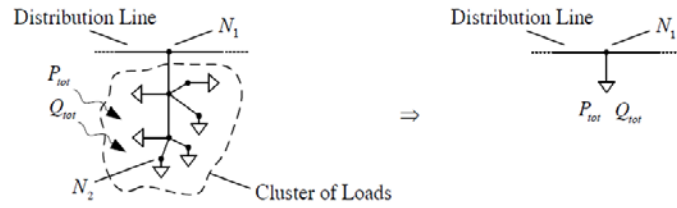
- Οι συστάδες φορτίων (Ομαδοποιημένα) (*Cluster of Loads*), που αναφέρονται σε φορτία τα οποία εμφανίζονται σε περιορισμένου μήκους κλάδους(*branches*).
- Τα διαδοχικά φορτία (*Successive Loads*), τα οποία αποτελούν εγκάρσια φορτία που γειτνιάζουν επί μιας γραμμής

Απλοποίηση των *Cluster Loads*

Υποθέτοντας ότι η συνολική τους απορρόφηση σε ενεργό και άεργο είναι P_{tot} και Q_{tot} αντίστοιχα, στις οποίες περιλαμβάνονται οι ενεργές και άεργες απώλειες. Είναι δυνατό να αντικατασταθούν με ένα ολικό ισοδύναμο αν υπολογιστούν οι παραπάνω τιμές. Σημαντικό ωστόσο να σημειωθεί ότι οι απώλειες P_{losses} & Q_{losses} των επιμέρους τμημάτων γραμμών, παρουσιάζουν άμεση εξάρτηση από τις τάσεις των επικείμενων κόμβων, κάτι το οποίο παύει να ισχύει κατά την απλοποίηση, θεωρώντας αυτές σταθερές τιμές ανεξαρτήτως φορτίσεως. Η διαδικασία αυτή της προσέγγισης, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μόνο αν το σφάλμα μεταξύ της τάσης του εγγύτερου κόμβου στην κύρια γραμμή και του τελευταίου προς απλοποίηση κόμβου είναι μικρότερη από τα μέγιστο αποδεκτό σφάλμα: [19]

$$\frac{|V_{N_1} - V_{N_2}|}{V_{N_2}} \leq \maxError = 0.25\%$$

Το μέγιστο επιτρεπτό όριο προκύπτει από το ήμισυ του σφάλματος που προκύπτει από τυπική μετρητική διάταξη τάσης.



Εικόνα 2. 10 Απλοποίηση συστάδας φορτίων[19]

Απλοποίηση των *Successive Loads*

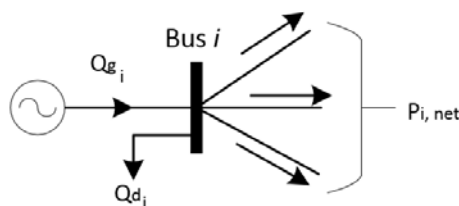
Αυτή η κατηγορία απλοποίησης είναι αρκετά πιο σύνθετη καθώς η ομαδική απλοποίηση των φορτίων πρέπει να γίνει με κατάλληλη προσοχή ώστε μεταξύ των προς απλοποίηση φορτίων να μην εμφανίζεται μεγάλη διακύμανση στην τάση. Επίσης το ισοδύναμο φορτίο δεν θα πρέπει να επηρεάσει τις αρχικές τάσεις των φορτίων που θα απλοποιηθούν. Με άλλα λόγια, δεν θα πρέπει να επηρεασθεί καθόλου το επίπεδο των τάσεων των κόμβων που θα απλοποιηθούν, αλλά ούτε και του γειτονικού κόμβου.

2.5 Ανάλυση Ροών Φορτίου

Στο χωρίο αυτό παρουσιάζεται το πρόβλημα ανάλυσης ροής φορτίο και συγκεκριμένα ο αλγόριθμος σύγκλισης Newton-Raphson (NR) ο οποίος καλείται, σε κάθε μεταβολή που αποφασίζει ο αλγόριθμος που θα παρουσιάσουμε για την εύρεση τόσο των μεταβλητών κατάστασης του δικτύου -γωνία και τάση κάθε ζυγού- αλλά και των ροών ισχύος του δικτύου. Σε κάθε δίκτυο είναι χρήσιμος ο σχεδιασμός της μήτρας αγωγιμοτήτων όπου περιλαμβάνει όλες τις αγωγιμότητες διασύνδεσης μεταξύ όλων των ζυγών. Έστω το στοιχείο y_{ij} της μήτρας Y_{bus} ($N \times N$) του δικτύου συνόλου N ζυγών.

Η τάση σε ένα κόμβο είναι $V_i = |V_i|(\cos(\delta_i) + j \sin(\delta_i))$, ενώ το ρεύμα που εγχέεται από τον κόμβο i θα είναι

$$I_i = \sum_{j=1}^N y_{ij} V_j$$



Εικόνα 2.11 Ανάλυση μεγεθών ανά ζυγό

Η σχέση που αποδίδει τη ροή ισχύος του κόμβου i προς τους υπόλοιπους προς αυτόν διασυνδεδεμένους

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} V_j$$

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^N |y_{ij} V_j V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j - \delta_i$$

$$P_i = \sum_{j=1}^N |y_{ij} V_j V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^N |y_{ij} V_j V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

Επομένως, τα τοπικά μεγέθη (παραγωγή και ζήτηση $P_{i,net} = P_{g_i} - P_{d_i}$) του ζυγού σχετίζονται με τα εγχεόμενα (P_f & Q_f) στο δίκτυο με τις εξής σχέσεις -μέσω των οποίων ορίζεται και το μέγεθος των τιμών προσαρμογής (mismatches)-:

$$\Delta P_i = P_{i,net} - P_i = (P_{g_i} - P_{d_i}) - P_i$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,net} - Q_i = (Q_{g_i} - Q_{d_i}) - Q_i$$

Τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν στην περίπτωση της επίλυσης των ροών φορτίου όταν οι υπολογιζόμενες τιμές των P_i & Q_i δεν συμπίπτουν με τις τοπικές τιμές των $P_{i,net}$.

Για κάθε ζυγό του δικτύου τα τέσσερα άγνωστα μεγέθη είναι P_i , Q_i καθώς επίσης το μέτρο $|V_i|$ και η γωνία της τάσης δ_i . Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει (ισοζύγιο ισχύος)

$$f_{i'} = P_i - P_{i,net} = P_i - (P_{g_i} - P_{d_i}) = 0$$

$$f_{i''} = Q_i - Q_{i,net} = Q_i - (Q_{g_i} - Q_{d_i}) = 0$$

Ροή ισχύος ζυγού i (μη γραμμική σχέση):

$$S_i = P_i - jQ_i = |V_i|^2 y_{ii} + \sum_i^N y_{ij} V_i^* \dot{V}_j$$

2.5.1 Μέθοδος Newton-Raphson

Η μέθοδος ανάλυσης ροών ισχύος με τη μέθοδο Newton-Raphson συγκλίνει στις περισσότερες περιπτώσεις με ασφάλεια αλλά και καλή ταχύτητα. Αναλύουμε σε τέτοιο βαθμό την παρούσα μέθοδο διότι μέσω αυτής προκύπτουν τα κλασσικά μεγέθη ευαισθησιών τάσης, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση με τις ευαισθησίες που εντάσσονται στην προτεινόμενη αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στην μαθηματική ανάλυση της επίλυσης των φορτίου με την μέθοδο Newton-Raphson. Η ουσιαστική ιδέα της μεθόδου αυτής βρίσκεται πίσω από την επέκταση των σειρών Taylor για περισσότερες από δυο μεταβλητές. Με τον τρόπο αυτό οι κλασσικές εξισώσεις ροής φορτίου από μη γραμμικές σχέσεις, τροποποιούνται σε γραμμικές προσεγγίσεις, με αποτέλεσμα να καταλήγουμε σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων. Όπως έχει αναφερθεί κάθε ζυγός έχει 4 τυπικά μεγέθη εκ των οποίων ανάλογα με τον τύπο του κάθε ζυγού διαθέτουμε δυο μεταβλητές και δυο εξισώσεις. Έστω το διάνυσμα $[x]$ το διάνυσμα μεταβλητών των αγνώστων [20]

$$[x] = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Θα πρέπει σύμφωνα με τα παραπάνω να ισχύουν τα εξής

$$\begin{aligned} f_{1'}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_{2'}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_{n'}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned}$$

Οι αντίστοιχες εξισώσεις ισχύουν και για τις αέργους των ζυγών $f_{i'}$

Έστω η αρχική τιμή του διανύσματος κατάστασης είναι $x_i(0)$, ενώ $\Delta x_i(0)$ οι διαφορές διόρθωσης που προστίθενται σε κάθε ανακύκλωση στο αρχικό διάνυσμα εκκίνησης προκειμένου να προκύψει η τελική τιμή. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση μέσω του αναπτύγματος Taylor

$$f_{i'}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = f_{i'}\left(\sum_{i=1}^n x_i(0)\right) + \Delta x_1(0) \left(\frac{\partial f_{i'}}{\partial x_1}\right)^{(0)} + \dots + \Delta x_n(0) \left(\frac{\partial f_{i'}}{\partial x_n}\right)^{(0)}, i = 1, \dots, n$$

Στην τελευταία σχέση οι τιμές x_i^* , αποτελούν τις πρώτες εκτιμήσεις των αγνώστων μεταβλητών. Όπως φαίνεται απεικονίζονται μονάχα οι πρώτοι όροι του αναπτύγματος Taylor και οι επιμέρους όροι $\partial f_{i'}/\partial x_1|^{(0)}$ επιδεικνύουν τους μερικούς όρους αποτίμησης

των τιμών για τη βαθμίδα της συνάρτησης. Οι υπόλοιποι όροι της σειράς αμελούνται για μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Σε μητρική μορφή καταλήγουμε:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ 0 - f_n(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix}$$

$$J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_n \end{bmatrix}^{(0)}$$

$$[\Delta f] = [J]^{-1} [\Delta x]$$

$$\text{όπου } [\Delta f] = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

$$\Delta f_1 = f_1 \left(\sum x_i(0) + \Delta x_i(0) \right) - f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Προσαρμογή για την επίλυση ρών φορτίου

Οι γενικευμένες εξισώσεις ρής ισχύος όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, εκφρασμένες ως προς τα μεγέθη της μήτρας αγωγιμοτήτων προκύπτουν:

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{j=1}^N |y_{ij} V_j V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$Q_i = |V_i|^2 B_{ii} + \sum_{j=1}^N |y_{ij} V_j V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

Για την επίλυση των ρών φορτίου το διάνυσμα Δf είναι $\begin{bmatrix} \Delta P_{si} \\ \Delta Q_{si} \end{bmatrix}$, $[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix}$ καθώς και οι πρωτοβάθμιοι συντελεστές του αναπτύγματος Taylor είναι:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{Pv} \\ J_{Q\theta} & J_{Qv} \end{bmatrix}$$

Οι διαστάσεις της Ιακωβιανής μήτρας για ένα σύστημα N ζυγών είναι $2N \times 2N$, ωστόσο στην πράξη δεν είναι απαραίτητο να υπολογιστούν όλοι οι επιμέρους παράγοντες διότι στο ζυγό ταλάντωσης τα μεγέθη κατάστασης είναι καθορισμένα και σταθερά, ενώ στους ζυγούς παραγωγής PV το μέτρο της τάσης είναι γνωστό αλλά δεν είναι γνωστό το Q_{net} . Θεωρώντας ότι από 2 έως m είναι οι ζυγοί παραγωγής και από $m+1$ έως N οι ζυγοί φορτίου

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_N \\ \Delta Q_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_{m+1}|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_N|} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_N}{\partial |V_{m+1}|} & & \frac{\partial P_N}{\partial |V_N|} \\ \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial |V_{m+1}|} & \dots & \frac{\partial Q_{m+1}}{\partial |V_N|} \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_N}{\partial |V_{m+1}|} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial |V_N|} \end{bmatrix}$$

Πιο συνοπτικά η παραπάνω μορφή

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \delta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix}$$

2.5.3 Ανάλυση σχέσεων και αποσύμπλεξη Pθ - QV

Όπως αναφέρθηκε και στο παραπάνω χωρίο η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson για την ανάλυση των ροών φορτίου εκκινεί με το διάνυσμα κατάστασης x που περιλαμβάνει τις άγνωστες γωνίες και τάσεις καθώς και τη μη γραμμική συνάρτηση στην οποία συνδέονται τα παραπάνω μεγέθη με τα μεγέθη ενεργού και αέργου ισχύος ως εξής. Αντίστοιχα σημασιολογικά αναφερόμαστε και στους όρους αέργου ισχύος. Οι επαναληπτικές εξισώσεις ροής φορτίου διατυπώνονται ως:

$$f(x) = \begin{pmatrix} \Delta P(x) \\ \dots \\ \Delta Q(x) \end{pmatrix} = 0$$

Οι τιμές σε κάθε νέα επανάληψη για τα διανύσματα κατάστασης λαμβάνονται από την εξίσωση

$$J(x^{(n)}) \begin{pmatrix} \Delta\theta^{(n)} \\ \Delta U^{(n)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta P(x^{(n)}) \\ - - - \\ \Delta Q(x^{(n)}) \end{pmatrix} = 0$$

Όπου J η Ιακωβιανή μήτρα η οποία αναλύθηκε νωρίτερα

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix}$$

Στην πιο τυπική μορφή της η παρούσα μέθοδος επίλυσης, η μήτρα απλοποιείται σε άνω τριγωνική προκειμένου σε κάθε επανάληψη να είναι εφικτό να ενημερώνεται. Ωστόσο, στην πράξη για μεγάλα συστήματα μεταφοράς, δύναται να εφαρμοστεί μια διαφορετική τεχνική ανάλυσης η οποία μπορεί να απομειώσει το φόρτο του μεγέθους που προκαλεί τόσο η Ιακωβιανή μήτρα όσο και η αντίστροφη της. Με άλλα λόγια, σε συστήματα ΥΤ - δηλαδή σε γραμμές μεταφοράς- όπου η επαγωγική αντίδραση των γραμμών είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίσταση αυτών $x_l \gg r_l$, παρατηρείται στενή σύμπλεξη των μεγεθών P και θ καθώς και μεταξύ των Q και U. Η ιδιότητα αυτή πολλές φορές χρησιμοποιείται, με σκοπό την επιτάχυνση της ανάλυσης ροών φορτίου. Το γραμμικό αυτό μοντέλο στην ουσία συνδέει αποκλειστικά τη ροή ενεργού ισχύος με το μέγεθος της γωνίας της τάσης του επικείμενου ζυγού. Το μοντέλο της αποσύμπλεξης βασίζεται δηλαδή στις εξής δυο παρατηρήσεις: [21]

- Οι αλλαγές στη γωνία της τάσης σε ένα ζυγό επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τη ροή ενεργού ισχύος, αφήνοντας ουσιαστικά -ειδικότερα σε σύστημα μεταφοράς- την ροή αέργου ανεπηρέαστη
- Αντίστοιχα το μέτρο της τάσης ενός ζυγού επηρεάζει τη ροή αέργου ισχύος χωρίς να επηρεάζει την ενεργό ροή αυτού.

Έστω το π-μοντέλο για μια γραμμή μεταφοράς όπου μπορεί να αμεληθεί η αντίσταση σειράς της γραμμής όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα ενώ ταυτόχρονα θεωρήσουμε τις εγκάρσιες εμπεδήσεις επίσης μηδενικές. Στην περίπτωση αυτή οι ροές ισχύος μεταξύ των γραμμών -έστω k m οι δυο κόμβοι - θα είναι

$$P_{km} = \frac{U_k U_m \sin \theta_{km}}{x_{km}}$$

$$Q_{km} = \frac{U_k^2 - U_k U_m \cos \theta_{km}}{x_{km}}$$

όπου x_{km} η αντίδραση της γραμμής που συνδέει τους δυο ζυγούς.

Οι ευαισθησίες μεταξύ των ρών φορτίων P_{km} και Q_{km} για την προσέγγιση των μεταβλητών U και θ που έγινε παραπάνω αποδίδονται ως

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = \frac{U_k U_m \cos \theta_{km}}{x_{km}} \quad \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} = \frac{U_m \sin \theta_{km}}{x_{km}}$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = \frac{U_k U_m \sin \theta_{km}}{x_{km}} \quad \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_k} = \frac{2U_k - U_m \cos \theta_{km}}{x_{km}}$$

Όπου αν θεωρήσουμε $\theta_{km} = 0$, παρατηρούμε την πλήρη αποσύμπλεξη των μεταβλητών, δηλαδή έχουμε

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = \frac{U_k U_m}{x_{km}} \quad \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} = 0$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = 0 \quad \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_k} = \frac{2U_k - U_m}{x_{km}}$$

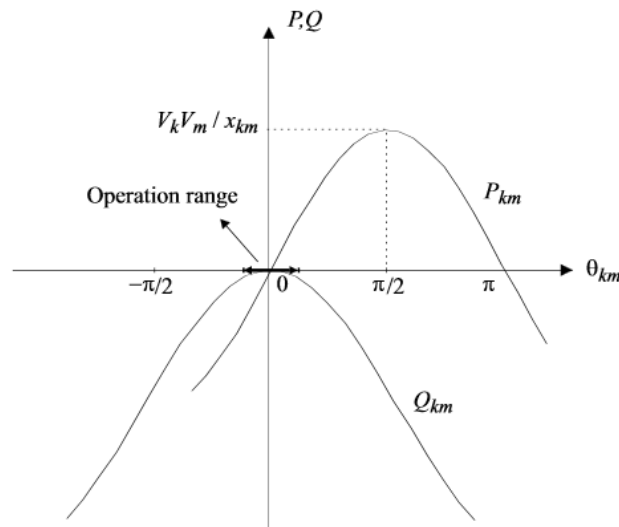
Όπως παρατηρούμε και από το παρακάτω σχήμα, για συνηθισμένες λειτουργίες όπου οι γωνίες μεταξύ των δυο ζυγών παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές $\theta_k \cong \theta_m \Leftrightarrow \theta_{km} \cong 0$, εντοπίζεται ισχυρή σύμπλεξη του μεγέθους της τάσης με την γωνία της τάσης, ενώ ασθενής η σύμπλεξη μεταξύ Q με V . Είναι εμφανές εντελώς αντίστοιχα ότι για γωνία $\theta_{km} = 90^\circ$, εντοπίζεται ισχυρή σύζευξη P με U καθώς επίσης και Q με θ . [18]

Σύμφωνα με τα παραπάνω δηλαδή, αν εφαρμοστεί το σχήμα της απλοποίησης δηλαδή αποσυμπλέξουμε τα ζεύγη Q - θ και P - U -εξαιτίας χαμηλών τιμών ευαισθησιών ως προς τη γωνία- καταλήγουμε στην αποσυμπλεγμένη μορφή της Ιακωβιανής μήτρας

$$J_{decoupled} = \begin{pmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] & 0 \\ 0 & \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta^v + \Delta P(\theta^v, U^v) = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U^v + \Delta Q(\theta^{v+1}, U^v) = 0$$



Εικόνα 2.12 Προσέγγιση αποσύμπλεξης Pθ-QV[18]

Η παραπάνω προσέγγιση προσφέρει ένα πιο γρήγορο τρόπο αποτίμησης των μεταβλητών της επόμενης επανάληψης.

2.5.4 Προβλήματα που εντοπίζονται στη διανομή με τη ροή φορτίου

Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική περιγραφή της ροής φορτίου με τη μέθοδο N-R έγκειται κατά βάση στο γεγονός ότι η ίδια μέθοδος γραμμικοποιήσεων των ροών φορτίου χρησιμοποιείται για την κλασική ανάλυση ευαισθησιών που συνηθίζεται στη μοντελοποίηση των δικτύων μεταφοράς τόσο για θέματα ρύθμισης τάσης όσο και ανάλυσης της ευστάθειας του δικτύου (στατικής και δυναμικής).

Ζητήματα που εντοπίζονται στα περισσότερα δίκτυα διανομής που δυσχεραίνουν τη σύγκλιση των κλασικών αλγορίθμων (N-R, Gauss-Seidel), με αποτέλεσμα να αυξάνουν τον αριθμό των επαναλήψεων (time consuming), ενώ σε δυσμενείς περιπτώσεις αδυνατούν να καταλήξουν στη λύση οφείλονται σε: [22][23]

- η δομή των δικτύων διανομής είτε ακτινική είτε "ασθενώς βροχοειδής" weakly meshed
- η μεταβλητότητα του λόγου X/R
- οι ασύμμετρες φορτίσεις του δικτύου εξαιτίας των ασύμμετρων φορτίων
- η διασύνδεση μικρών τμημάτων δικτύου με χαμηλή αντίδραση με μακροσκελή
- η αυξανόμενη διείσδυση της ΔΠ

2.6 Κυκλοφορία ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ δυο ζυγών με διαφορετικά μεγέθη

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη ανάλυση για τον τρόπο κυκλοφορίας της ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ δυο ζυγών συναρτήσει των διανυσμάτων των τάσεων.

2.6.1 Κυκλοφορία αέργου ισχύος μεταξύ ζυγών με άνισα μεγέθη τάσεων

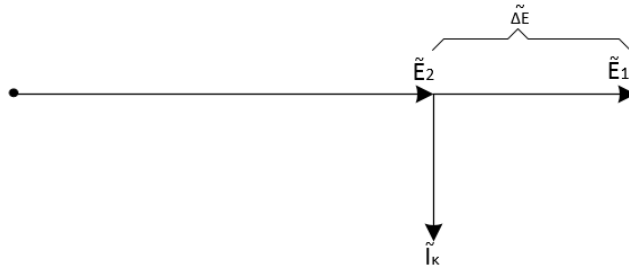
Θεωρούμε το παρακάτω τμήμα δικτύου το οποίο παρουσιάζει δυο ζυγούς με διαφορετικές τάσεις \widetilde{E}_1 και \widetilde{E}_2 δηλαδή διαφορετικά κατά μέτρο -έστω $|\widetilde{E}_1| > |\widetilde{E}_2|$ - αλλά με ίσες γωνίες. Όπως φαίνεται και στην πρώτη εικόνα 2.14α, μεταξύ των ζυγών οι γραμμές τροφοδοτούν τα φορτία (L_1, L_2). Αντικαθιστώντας την πηγή ισοδυναμώς με την $|\widetilde{\Delta E}|$ ως υπέρθεση δεδομένου ότι $|\widetilde{\Delta E}| = |\widetilde{E}_2| - |\widetilde{E}_1|$. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση του παραπάνω τμήματος δικτύου με υπέρθεση σε δυο στάδια. Συγκεκριμένα, με υπέρθεση των συνιστωσών του ρεύματος κυκλοφορίας που προκύπτει από την πηγή ΔΕ στο σχήμα (ε) στα ρεύματα του φορτίου που υπολογίζονται από την ανάλυση στο σχήμα (δ).

Στον υπολογισμό του ρεύματος \widetilde{I}_k οι σύνθετες αντιστάσεις των φορτίων θεωρούνται πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των γραμμών (z_l) κάτι που διευκολύνει τον υπολογισμό. Επομένως η διαδρομή του ρεύματος κυκλοφορίας θα είναι αυτή που εικονίζεται στο σχήμα (ε) δηλαδή από το ζυγό με τη μεγαλύτερη τάση (ζυγός 1) και θα καταλήξει στον 2. Η τιμή του θα είναι σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση:

$$\widetilde{I}_k = \frac{\widetilde{\Delta E}}{\widetilde{z}_l}$$

Εν τούτοις αν θεωρήσουμε ότι η γραμμή είναι κατά κύριο λόγο επαγωγική (μικρό λόγο R/X) τότε το ρεύμα κυκλοφορίας θα είναι επαγωγικού χαρακτήρα, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και στο παρακάτω :

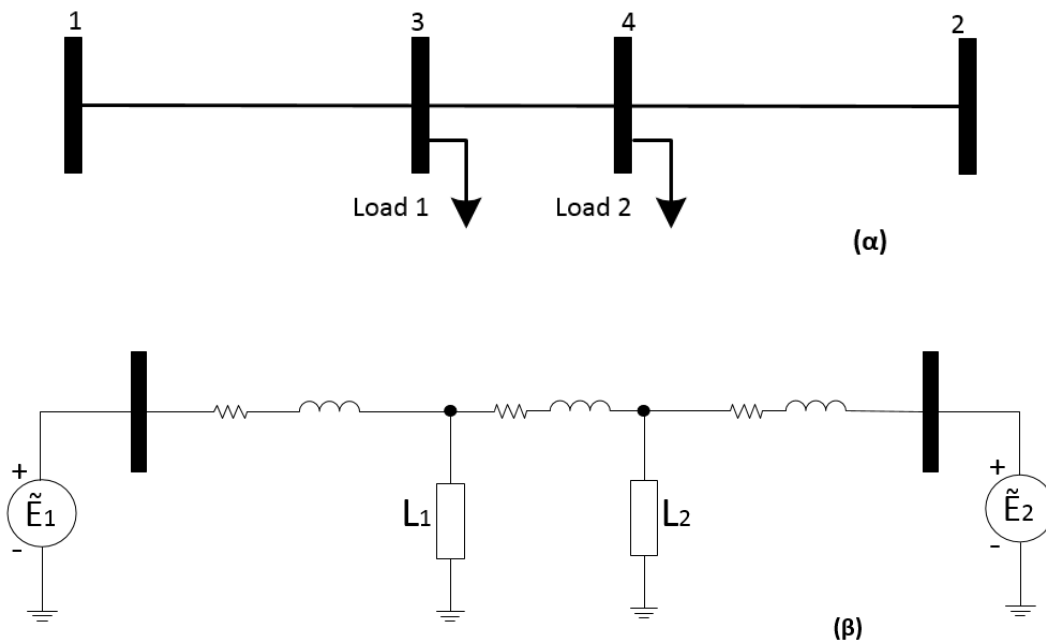
$$\widetilde{I}_k = -j \widetilde{\Delta E}$$

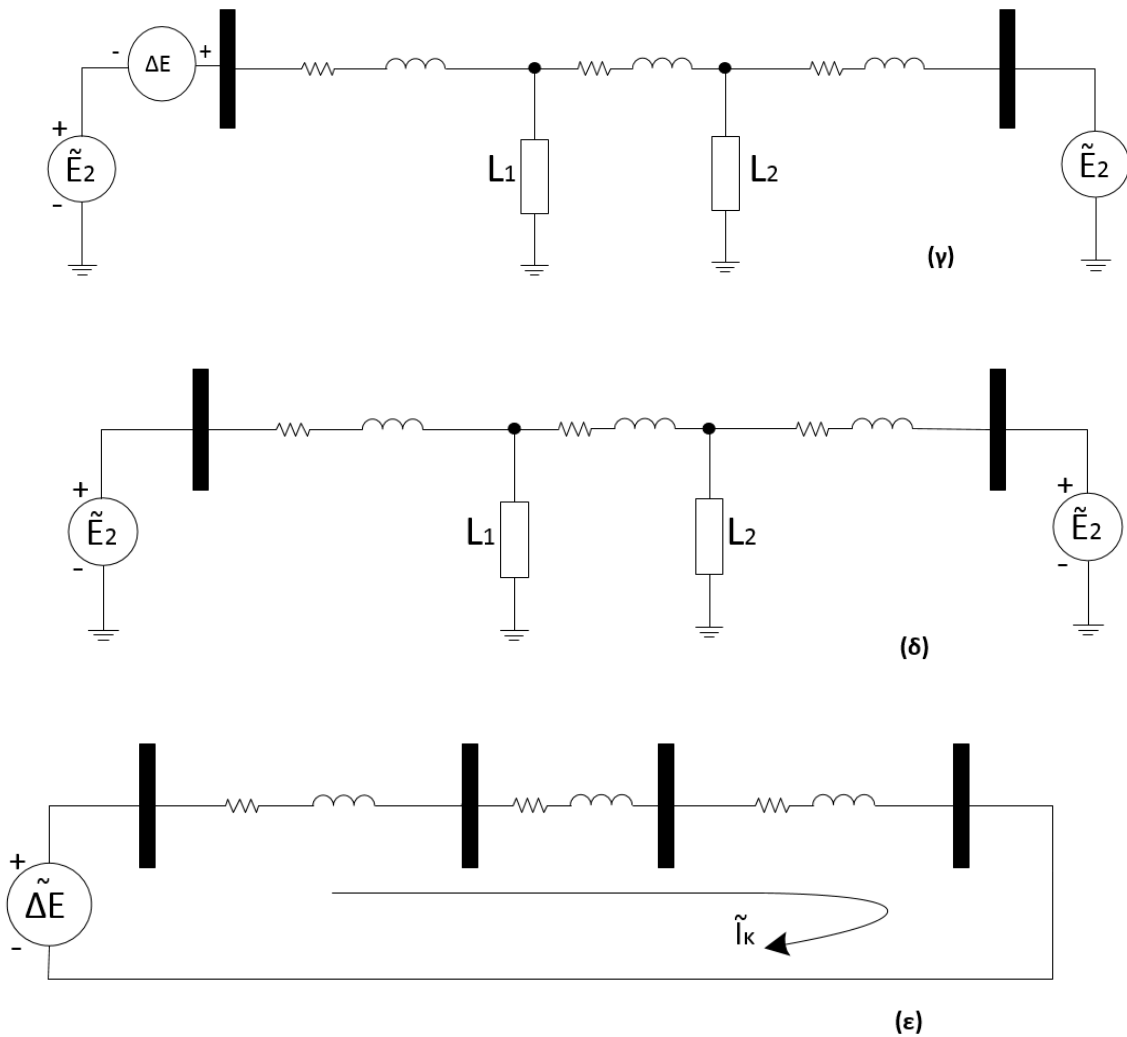


Εικόνα 2.13 Τάση και ρεύμα κυκλοφορίας μεταξύ δυο ζυγών με άνισα μεγέθη τάσεων

2.6.2 Κυκλοφορία ενεργού ισχύος μεταξύ ζυγών με διαφορετικές φασικές γωνίες τάσεων

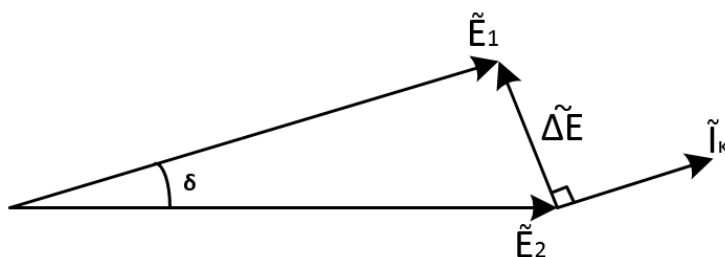
Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε πάλι το ίδιο σύστημα ζυγών του σχήματος 2.14(α) όπου οι τάσεις των ζυγών 1 και 2 έχουν ίδια μέτρα αλλά διαφορετικές γωνίες. Έστω ότι η \tilde{E}_1 προηγείται της \tilde{E}_2 κατά γωνία δ , όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 2.15





Εικόνα 2.14 Κυκλοφορία αέργου ισχύος μεταξύ ζυγών με άνισα μεγέθη τάσεων. (α) Διάταξη κυκλώματος, (β-ε) Ανάλυση κυκλώματος

Εντελώς ανάλογα η θεωρούμενη διαφορά μεταξύ των δυο διανυσμάτων τάσεων προκαλεί ροή ρεύματος από το ζυγό 1 στο ζυγό 2. Με τις ίδιες παραδοχές αμελούνται οι σύνθετες αντιστάσεις των φορτίων σχήμα (ε), επομένως το ρεύμα κυκλοφορίας σχηματίζει γωνία 90° με το διάνυσμα διαφοράς $\widetilde{\Delta E}$ αλλά στην ανάλυση του παρόντος σχήματος είναι σε φάση με τις τάσεις \widetilde{E}_1 και \widetilde{E}_2 . πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η ενεργός ισχύς κυκλοφορεί από το ζυγό 1 μέσω των γραμμών και καταλήγει στο ζυγό 2.



Εικόνα 2.15 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων ζυγών και ρεύματος κυκλοφορίας

Από το ανυσματικό διάγραμμα μπορούμε να λάβουμε

$$|\widetilde{\Delta E}| \cong |\widetilde{E}| \sin \delta$$

Επομένως το ρεύμα κυκλοφορίας θα είναι

$$\widetilde{I}_k = \frac{\widetilde{\Delta E}}{j x_l}$$

Λαμβάνοντας τα μέτρα αυτών

$$|\widetilde{I}_k| = \frac{|\widetilde{E}| \sin \delta}{x_l}$$

Καταλήγουμε επομένως ότι ενεργός ισχύς που κυκλοφορεί μεταξύ των ζυγών είναι:

$$P_k \cong |\widetilde{E}| \cdot |\widetilde{I}_k| \cong |\widetilde{E}| \frac{|\widetilde{E}| \sin \delta}{x_l}$$

$$P_k \cong \frac{|\widetilde{E}|^2 \sin \delta}{x_l}$$

Συμπερασματικά, από την παραπάνω ανάλυση καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

- Μεταξύ δυο ζυγών η οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ των διανυσμάτων τάσεων (είτε σε μέτρο είτε σε γωνία) προκαλεί κυκλοφορία ισχύος.
- Η ροή της αέργου ισχύος μεταξύ δυο ζυγών αλλά και του συστήματος μπορεί να ελεγχθεί μέσω μεταβολών των μέτρων των τάσεων των επικείμενων ζυγών.
- Αντιστοίχως η ροή της ενεργού ισχύος του συστήματος μπορεί να ελεγχθεί μέσω της μεταβολής των φασικών γωνιών των τάσεων των εκάστοτε ζυγών.

Κεφάλαιο 3 - Διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ)

3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή αποδίδονται συνοπτικά οι επιδράσεις της υψηλής διείσδυσης μονάδων ΔΠ στο δίκτυο. Παρατίθενται επίσης, και οι προϋποθέσεις τις οποίες πρέπει να πληρούν οι μονάδες ΔΠ προκειμένου να διασυνδέονται σε ένα δίκτυο ΜΤ.

3.2 Επίδραση διείσδυσης ΔΠ

Η εγκατάσταση μονάδων ΔΠ μπορεί να επιφέρει μια πλειάδα επιπτώσεων στο δίκτυο, οι οποίες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Τις επιδράσεις μόνιμης κατάστασης οι οποίες παρατηρούνται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.
- Μεταβατικές (δυναμικές) επιπτώσεις οι οποίες αναφέρονται σε ταχέως μεταβαλλόμενα φαινόμενα.

Οι επιδράσεις που θα περιγραφούν παρακάτω αν παρατηρηθούν σε έντονο βαθμό τότε υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης σοβαρών προβλημάτων (ποιότητα ισχύος, αξιοπιστία τροφοδότησης) στους λοιπούς καταναλωτές του δικτύου. Επομένως, αφενός οι μονάδες ΔΠ θα πρέπει να εναρμονίζονται με τις γενικές αρχές για το λόγο αυτό και αφετέρου θα πρέπει να πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις διασύνδεσης με τις υφιστάμενες υποδομές του δικτύου.

Ανεξάρτητα από το επίπεδο διασύνδεσης των μονάδων (ΧΤ ή ΜΤ, σπανιότερα ΥΤ), θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να ικανοποιούνται οι παρακάτω τεχνικές προδιαγραφές: [24]

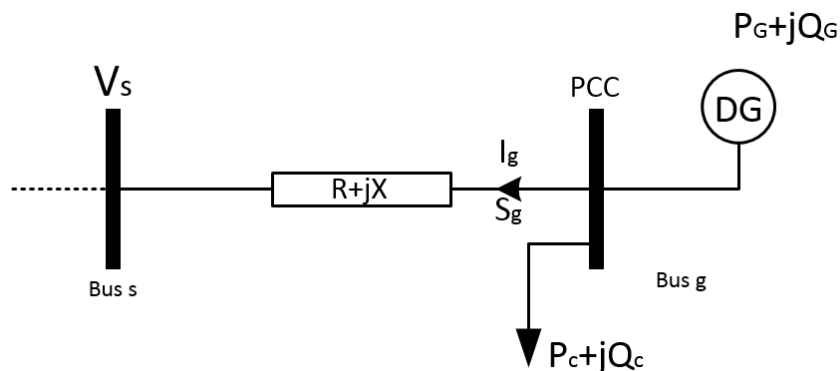
- Επάρκεια του δικτύου
- Συμβολή στη στάθμη βραχυκυκλώματος
- Αργές μεταβολές της τάσης(μόνιμης κατάστασης)
- Ταχείες μεταβολές της τάσης(συνήθως από επανασυνδέσεις DGs)
- Μεταβολές συχνότητας
- Εκπομπές *flicker*
- Εκπομπές αρμονικών
- Διαμόρφωση προστασιών διασύνδεσης μονάδων ΔΠ-δικτύου
- Επιπτώσεις στη λειτουργία συστημάτων Τηλεχειρισμού Ακουστικής Συχνότητας

Μεταβολές της τάσης

Η τοποθέτηση μονάδων ΔΠ προκαλεί μεταβολές στις τιμές της τάσης, η οποία κάθε φορά θα πρέπει να βρίσκεται αυστηρά στα πλαίσια τήρησης του EN 50160 [24] στο δίκτυο ΜΤ και ΧΤ. Ο στοχαστικός χαρακτήρας των ΑΠΕ(κλιματολογικές συνθήκες), προκαλεί μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τα επίπεδα της τάσης. Αναλυτική περιγραφή του ζητήματος θα δοθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Γενικά, όταν αναφερόμαστε στις μεταβολές της τάσης εξαιτίας της εγκατάστασης μονάδων ΔΠ, θα πρέπει να διαχωριστούν οι αργές μεταβολές από τις δυναμικές. Τα προβλεπόμενα όρια σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN -τα οποία έχουν υιοθετηθεί (ΕΛΟΤ)-, εν προκειμένω το EN 50160. Οι αργές μεταβολές παρουσιάζονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και λαμβάνονται ως οι μέσες τιμές ανά δεκάλεπτο.

Ενδεικτικά παραθέτουμε μια ανάλυση για το πως η αμφίδρομη ροή συντελεί στην ανύψωση της τάσης.



Εικόνα 3.1 Σύστημα δυο ζυγών

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο τμήμα δικτύου(γραμμή μεταφοράς ως αντίσταση σειράς), το οποίο αποτελείται από δυο ζυγούς. Ο ένας ζυγός διαθέτει προσαρτημένη γεννήτρια ΔΠ(DG) η οποία τη δεδομένη στιγμή παράγει $P_G + jQ_G$. Στον ίδιο ζυγό g συνδέεται και κατανάλωση μεγέθους $P_C + jQ_C$.

Μπορούμε άμεσα να αποφανθούμε ότι η φαινόμενη ισχύς στο ζυγό g είναι ίση με:

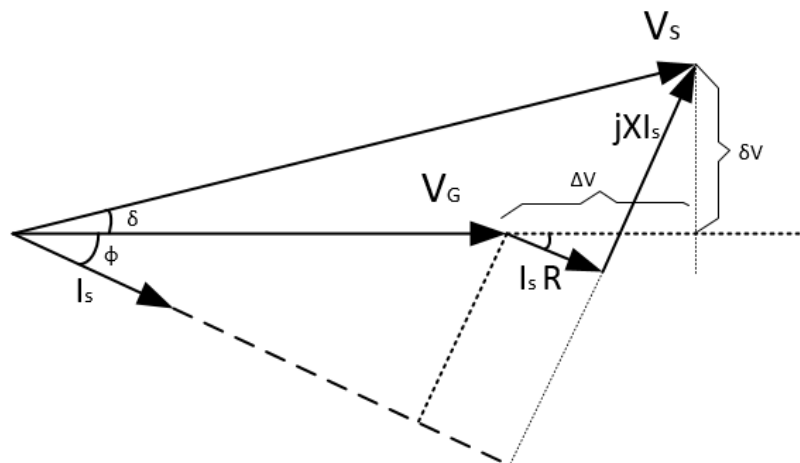
$$S_g = P_g + jQ_g = (P_G - P_C) + j(Q_G - Q_C)$$

$$S_g = V_g I_g^*, I_g = \frac{(P_g - jQ_g)}{V_g^*}$$

Για την τάση του ζυγού g έχουμε :

$$\begin{aligned}
 V_g &= V_s + I_g Z \\
 &= V_s + \frac{(R + jX)(P_g - jQ_g)}{V_g^*} \\
 &= V_s + \frac{P_g R + X Q_g}{V_g^*} + \frac{P_g X - R Q_g}{V_g^*}
 \end{aligned}$$

Στην εικόνα 3.2 αποδίδεται το διανυσματικό διάγραμμα, στο οποίο φαίνεται η ανύψωση της τάσης στο ζυγό s .



Εικόνα 3.2 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρεύματος κυκλώματος

Από το διάγραμμα λαμβάνουμε επίσης ότι

$$V_g \sin \delta = \frac{P_g X - Q_g R}{V_s}$$

Ωστόσο, η γωνία ισχύος είναι γενικά μικρή, και επομένως ο δεξιός όρος της εξίσωσης. Η σχέση αυτή μπορεί να μας αποδώσει έναν εύκολο προσεγγιστικό τρόπο για τον υπολογισμό της ανύψωσης τάσης. Ο τύπος που καταλήγουμε είναι :

$$\Delta V = \frac{P_g R + Q_g X}{V_g}$$

Για το ίδιο διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος μπορεί να δοθεί η εξής ανάλυση από τα προκύπτοντα ορθογώνια τρίγωνα

$$V_s^2 = (V_G + \Delta V)^2 + \delta V^2 = \\ = (V_G + R \cdot I \cdot \cos\varphi + I \cdot X \cdot \sin\varphi)^2 + (X \cdot I \cdot \cos\varphi - R \cdot I \cdot \sin\varphi)^2$$

$$V_s^2 = \left(V_G + \frac{RP}{V_G} + \frac{XQ}{V_G} \right)^2 + \left(\frac{XP}{V_G} - \frac{RQ}{V_G} \right)^2 \quad (1)$$

Καταλήγουμε στις εξής δυο σχέσεις για τις μεταβολές

$$\Delta V = \frac{PR+XQ}{V_G} \text{ και } \delta V = \frac{(PX-RQ)}{V_G}$$

- Αν όμως $\delta V \ll V_G + \Delta V$ τότε $V_s^2 = \left(V_G + \frac{PR+XQ}{V_G} \right)^2$

δηλαδή $V_s - V_G = \frac{PR+XQ}{V_G} = \Delta V$

- Αν $R = 0 \Rightarrow V_s - V_G = \Delta V = \frac{XQ}{V_G}$ τότε από την εξίσωση (1) ισχύει αν

$$PX \ll V^2 + QX$$

Αύξηση ισχύος βραχυκύκλωσης

Ένας πολύ σημαντικός και χαρακτηριστικός δείκτης για την διαστασιολόγηση -και όχι μόνο- των δικτύων διανομής, είναι η στάθμη βραχυκυκλώσεως. Μέσω αυτού του μεγέθους πρακτικά πραγματοποιείται μια ανάλυση για την ανεύρεση του πλάτους του μεγέθους του ρεύματος βραχυκύκλωσης, προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος εξοπλισμός που θα εκκαθαρίζει το σφάλμα. Σημαντικό να τονιστεί ότι η ισχύς βραχυκύκλωσης αποτελείται κατά κύριο λόγο από άεργα ρεύματα, καθώς αποτελεί μεταβατικό φαινόμενο με αποτέλεσμα να αμελούνται οι ωμικές αντιστάσεις. Τυπικά όσο μεγαλύτερη η τιμή της στάθμης βραχυκύκλωσης τόσο ισχυρότερο είναι το δίκτυο από λειτουργικής άποψης, πράγμα το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερη σταθερότητα του δικτύου σε μεταβολές.

Με την εγκατάσταση μονάδων ΔΠ συνηθίζεται να παρατηρείται αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης, καθώς συνεισφέρουν στα βραχυκυκλώματα. Σημαντικό να συμπεριληφθεί ότι με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, οι διασύνδεση των πηγών ΔΠ πραγματοποιείται μέσω αντιστροφέν πράγμα το οποίο περιορίζει τη συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Ωστόσο, αν είναι θεμιτό υπ' όψιν των ρυθμιστικών πλαισίων υπάρχει δυνατότητα κατά το βραχυκύκλωμα να συνεισφέρουν στο μέγιστο δυνατό τους, παρέχοντας το μέγιστο άεργο ρεύμα τους στην έξοδο του αντιστροφέα.

Πιο αναλυτικά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω συχνά χρησιμοποιούνται *distance relays* ως προστατευτικά μέσα, τα οποία προστατεύουν ένα ορισμένο τμήμα του δικτύου. Σε περίπτωση σφάλματος η φαινόμενη αντίσταση που διαβάζουν -βάσει τάσης και ρεύματος- μειώνεται σημαντικά εξαιτίας της αύξησης του ρεύματος (ρεύμα βραχυκυκλώσεως). Με τον τρόπο αυτό, συγκρίνεται η τιμή της αντίστασης (ως διάνυσμα, συμπεριλαμβανομένης δηλαδή και της γωνίας) και εντοπίζεται το σφάλμα με την απόκριση του ρελαί.

Αν θεωρήσουμε ότι κατά μήκος αυτής της γραμμής (έστω ακτινικό ΔΔ) είναι εγκατεστημένες μονάδες DGs, τότε παρατηρείται συνεισφορά αυτών στο ρεύμα βραχυκύκλωσης που συμβαίνει στο κατάντη δίκτυο. Με άλλα λόγια, η έγχυση ρεύματος στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ -PCC) θα διατηρεί την τάση του ζυγού σύνδεσης σε ψηλό επίπεδο συγκριτικά με την αναμενόμενη τιμή του επικείμενου ρελαί προστασίας. Συγκεκριμένα, το ρελαί αναμένει βαθμιαία πτώση τάσης κατά το μήκος της γραμμής κάτι που έρχεται σε αντιπαράθεση με την εγκατάσταση μονάδων ΔΠ. Το αποτέλεσμα από τα παραπάνω είναι ότι σημαντικός βαθμός ενσωμάτωσης ΔΠ πιθανώς να προξενήσει λανθασμένες αποκρίσεις των ρελαί με κίνδυνο το ενδεχόμενο να μην εντοπίζονται τα σφάλματα. Απαιτείται, επομένως, ιδιαίτερη προσοχή στην εγκατάσταση των μονάδων ΔΠ, διότι παρά το ότι κατά γενική ομολογία δύναται να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του δικτύου και μεταξύ άλλων την βελτίωση της αξιοπιστίας του. Ωστόσο, η μη τήρηση συμφωνημένων προϋποθέσεων διασύνδεσης μια μονάδας ΔΠ με το δίκτυο, ενδέχεται να μειώσει ακόμη και την αξιοπιστία λειτουργίας του, όπως είδαμε παραπάνω.

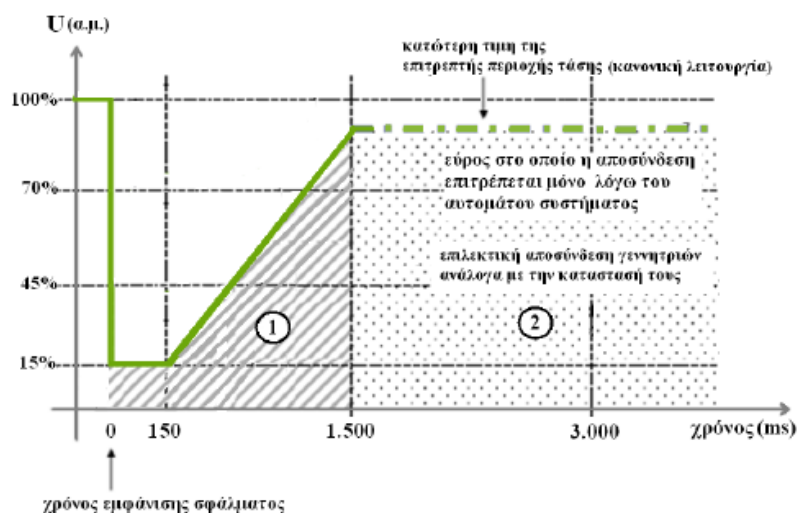
Μια λύση η οποία είναι πλέον σε εφαρμογή αναφέρεται στην αποσύνδεση των μονάδων ΔΠ, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στον συμβατικό εξοπλισμό να διασφαλίσει την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Η αποσύνδεση της ΔΠ αποτρέπει την εμφάνιση αμφίδρομης ροής στο τμήμα του δικτύου που συμβαίνει το σφάλμα επιτρέποντας τη σωστή λειτουργία του συμβατικού εξοπλισμού προστασίας βραχυκυκλωμάτων. Η τακτική αυτή προβλέπει την επανασύνδεση των μονάδων όταν έχει αποκατασταθεί το σφάλμα. Κατά κάποιο τρόπο η τακτική που περιγράφηκε μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να αποβεί ιδιαίτερα αποτελεσματική εν τούτοις υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες η αποσύνδεση μονάδων ΔΠ μεγάλου μεγέθους ή τυπικά η μαζική αποσύνδεση πολλών μικρών μονάδων μπορεί να επιφέρει σημαντική αστάθεια στο σύστημα. Αναλυτικότερα, η αποσύνδεση των μονάδων ΔΠ κατά το σφάλμα θα δημιουργήσει προβλήματα υποσυχνότητας εξαιτίας του ελλειμματικού ισοζυγίου ενεργού ισχύος. Αποτέλεσμα της αποσύνδεσης των μονάδων είναι η αδυναμία επαναφοράς του δικτύου σε κανονική λειτουργία αφού η επανασύνδεση αναμένεται με την επαναφορά της τάσης σε φυσιολογικά επίπεδα κάτι που είναι σε μερικές περιπτώσεις αδύνατο για το λόγο που αναφέρθηκε.

Σε πολλές τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η συνεισφορά των DGs στο σφάλμα, προκειμένου να διατηρείται η τάση. Η λειτουργία αυτή πρωτοεμφανίστηκε και

καθιερώθηκε από τις γερμανικές αρχές ηλεκτροδότησης και αποκαλείται ως *Fault Ride Through (FRT)* ή *Low Voltage Ride Through (LVRT)*. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι χάρη στην ύπαρξη των προστατευτικών διατάξεων των DG συνεισφέρουν με τα ονομαστικά τους μεγέθη και εν συνεχεία αποσυνδέονται.

Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη δράσης FRT όπου προτείνεται κυρίως για ανεμογεννήτριες (*DFIG*), οι οποίες είναι ευρέως διαδεδομένες εξαιτίας πλήθους πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν -όπως υψηλή ενεργειακή απόδοση, μεταβλητές ταχύτητες λειτουργίας, περιορισμένες μηχανικές καταπονήσεις στην τουρμπίνα καθώς και εξελιγμένα ηλεκτρονικά ισχύος-.

Όταν συμβεί κάποιο σφάλμα, επόμενο είναι να υπάρξει έντονη πτώση τάσης. Αν η πτώση τάσης εντοπιστεί από την *DFIG* τότε αυτή τυπικά πρέπει να επανασυνδεθεί προκειμένου να μην έχει αρνητική επίδραση στο υπόλοιπο αιολικό πάρκο. Η αποσύνδεση ωστόσο αποφέρει μη επιθυμητά αποτελέσματα στις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής όπως χαμηλές τάσεις κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



Εικόνα 3.3 Αδιάλειπτη παροχή ισχύος[46]

Μπορεί, επίσης, να προκαλέσει αστάθεια στην τάση, καθώς η μαγνητική ροή του στάτη μιας Α/Γ δεν είναι δυνατό να ακολουθήσει την απότομη μεταβολή της τάσης του στάτη εξαιτίας της πτώσης τάσης. Αυτό έχει ως επόμενο η ροή του στάτη να μένει σχεδόν στάσιμη με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλη ολίσθηση μεταξύ στάτη και δρομέα, πράγμα που αυξάνει επικίνδυνα την επαγόμενη τάση και το ρεύμα του δρομέα. Έτσι ενδεικτικά στην εικόνα 3.3 προτείνεται ένας τρόπος επιτρεπτών ορίων συνεισφοράς της ΔΠ κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος.

Ποιότητα ισχύος

Η ποιότητα ισχύος αποτελεί ένα πολύ χαρακτηριστικό μέγεθος του δικτύου το οποίο παρουσιάζει εξάρτηση από τους εξής παράγοντες:

- Μεταβολή της τάση(*Voltage variation*)
- Απότομη μεταβολή της τάση(*Rapid Voltage change*)
- Διακύμανση της τάσης(*Voltage fluctuation*)
- *Flicker*
- Προσωρινή υπέρταση (*Temporary power frequency overvoltage or swell*)
- Αρμονικές στην τάση (*Harmonic Voltage*)
- Ασυμμετρία στην τάση (*Voltage unbalance*)

Τα περισσότερα από τα παραπάνω εμφανίζονται συνήθως από την παρουσία στρεφόμενων μηχανών, την υψηλή ενσωμάτωση ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και την απότομη ζεύξη και απόζευξη μονάδων ΔΠ.

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα της εισαγωγής, η ΔΠ μπορεί να έχει θετικές ή αρνητικές επιδράσεις στο δίκτυο και κατ' επέκταση στην ποιότητα ισχύος του. Συγκεκριμένα, από τους παραπάνω παράγοντες που ορίζουν την ποιότητα ισχύος, οι πιο σημαντικές που έχουν άμεση επίπτωση η ενσωμάτωση ΔΠ είναι οι ταχείες μεταβολές της τάσης (διάρκειας μέχρι μερικών δευτερολέπτων) αλλά και η αρμονική παραμόρφωση που εισάγεται στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος.

Η έντονη εμφάνιση των αρμονικών συνιστωσών οφείλεται στο γεγονός ότι η διασύνδεση των μονάδων ΔΠ πραγματοποιείται μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι υψηλές διακοπτικές συχνότητες των IGBTs (μη γραμμικές λειτουργία), -παρά την ύπαρξη υψίσυχνων φίλτρων-, εισάγονται πολλές φορές στο ΣΚΣ και κυκλοφορούν στο δίκτυο. Αναλύοντας τις κυματομορφές τάσης ή ρεύματος κατά Fourier μπορούμε να λάβουμε το σύνολο των αρμονικών συνιστωσών που τις απαρτίζουν. Με βάση την θεμελιώδη συνιστώσα (κύριο φασματικό περιεχόμενο στα 50Hz), οι αρμονικές συνιστώσες εντοπίζονται σε ακέραια πολλαπλάσια αυτής.

Για κάθε αρμονική συνιστώσα λαμβάνεται το πλάτος και η φασική της γωνία προκειμένου να υπολογιστεί το χαρακτηριστικό μέγεθος του Συντελεστή Αρμονικής Παραμόρφωσης (*THD*), το οποίο αποτελεί μέτρο της συνολικής παραμόρφωσης που εμφανίζεται. Για τον υπολογισμό του THD λαμβάνονται όλες οι αρμονικές συνιστώσες μέχρι την ανώτερη τάξη όπου κατά IEC είναι η 40η ($f_{max}=2kHz$) και η 50η κατά IEEE. Η σχέση υπολογισμού επί τοις εκατό είναι

$$THD(\%) = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2}$$

Στην παραπάνω σχέση το U_h αποτελεί την rms τιμή της αρμονικής συνιστώσας τάξης h (συχνότητας hf_1). Η αντίστοιχη σχέση χρησιμοποιείται για τον απολογισμό του THD της κυματομορφής του ρεύματος. Ο δείκτης αυτός αποτελεί ένα από τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης της δυνατότητας σύνδεσης διασύνδεσης μονάδας ΔΠ στην ΜΤ και ΧΤ.[24]

Ο όρος των εκπομπών *flicker* αναφέρεται στις μεταβολές τάσης που επάγουν οι εγκαταστάσεις των μονάδων παραγωγής στο σημείο κοινής σύνδεσης καθώς επίσης και σε παρενοχλήσεις σε άλλους κοντινούς καταναλωτές. Το φλίκερ εκτιμάται με τους δείκτες βραχείας και μακράς διάρκειας, ενώ τα επιτρεπτά τους όρια υπάγονται στα πρότυπα IEC 61000-3-7 και IEC 61400-21.

Ενεργές απώλειες

Σημαντική είναι η επίδραση των μονάδων ΔΠ στις ενεργές απώλειες του δικτύου. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι οι μεταβολές μόνιμης κατάστασης που επισυμβαίνουν αφενός στο ΣΚΣ και αφετέρου στους πλησίον ζυγούς του δικτύου, λόγω αυξημένης διείσδυσης της ΔΠ, επηρεάζει τη στάθμη των ενεργών απωλειών. Τούτη η επίδραση, λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν για τον τρόπο διασύνδεσης της μονάδας παραγωγής στο δίκτυο, δηλαδή του επιπέδου τάσης αλλά και του σημείου τοποθέτησης. Όπως θα δούμε παρακάτω, συχνά μελετάται η αντιστάθμιση του κόστους μιας πιθανής ενίσχυσης ή επέκτασης του δικτύου με την επικείμενη μείωση των απωλειών.

3.3 Προϋποθέσεις διασύνδεσης παραγωγών στο δίκτυο ΜΤ

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μια αναφορά με τους παράγοντες επίδρασης της εγκατάστασης μονάδων ΔΠ στο δίκτυο. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι προϋποθέσεις οι οποίες εξετάζονται πριν την έγκριση και τη διασύνδεση της εγκατάστασης της μονάδας προκειμένου να μην διαταράσσεται η ορθή λειτουργία του δικτύου καθώς και η ποιότητα ισχύος των υπόλοιπων καταναλωτών.[24]

Πιστοποιητικά μετρήσεων και δεδομένων εγκατάστασης

Για την έγκριση μιας εγκατάστασης απαιτείται η καταγραφή των χαρακτηριστικών των μονάδων που θα περιλαμβάνονται. Για το λόγο αυτό κατατίθεται αναλυτική μελέτη προς το φορέα ενέργειας.

Επάρκεια Δικτύου και Επιλογή τρόπου σύνδεσης

Στην ενότητα θα περιγραφούν οι προϋποθέσεις αλλά και τα μέσα τα οποία θα πρέπει να εντοπίζονται σε μια εγκεκριμένη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής στη ΜΤ. Κατ' αρχάς αξίζει να αναφερθούν οι πιθανές περιπτώσεις στις οποίες μια εγκατάσταση ΔΠ διασυνδέεται στη ΜΤ. Γενικά δεν αποτελεί πάντα κριτήριο η ονομαστική αποδιδόμενη ισχύς αυτής όπως με την κατάταξη των καταναλωτών. Ωστόσο, υπάρχουν δυο όρια τα οποία τηρούνται:

- Δεν είναι δυνατή η διασύνδεση μονάδων ΔΠ στη ΧΤ ,με συμφωνημένη ισχύ άνω των 100kW
- Δεν είναι δυνατή η διασύνδεση μονάδων ΔΠ στη ΜΤ ,με συμφωνημένη ισχύ άνω των 20MW

Η επιλογή επομένως του τρόπου σύνδεσης χρήζει τεχνοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπ όψιν το κόστος των επεκτάσεων γραμμών με την ταυτόχρονη επίδραση του εκάστοτε τρόπου στις απώλειες ενεργού ισχύος. Επιλέγεται δηλαδή βάσει του κόστους επένδυσης αναθεώρησης του δικτύου συγκριτικά με το χρόνο απόσβεσης . Υπάρχει ένας ακόμη ενδεικτικός πίνακας κατανομής, ανάλογα με την προς εγκατάσταση συμφωνημένη ισχύ :

Ενδεικτική Συμφωνημένη Ισχύς[MW]	Πιθανός τρόπος σύνδεσης στο δίκτυο
Έως 0.1	Δίκτυο ΧΤ
Έως 4	Δίκτυο ΜΤ, σε υφιστάμενη γραμμή (με πιθανή ενίσχυσή της)
Έως 6	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής απλού κυκλώματος
Έως 20	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
Άνω των 20	Δίκτυο ΥΤ, με ανεξάρτητο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ

Πίνακας 3.4 Πίνακας κατανομής σύνδεσης

Επιλογή σημείου εξέτασης των επιπτώσεων στην ποιότητα της τάσης του δικτύου

Ο έλεγχος για την επίδραση της μονάδας στο δίκτυο πραγματοποιείται στο ΣΚΣ, το οποίο δεν αποτελεί κατ' ανάγκη το ΣΣΔ. Ωστόσο, θα πρέπει οι απαιτήσεις που τίθενται από τα πρότυπα EN 501060 να ικανοποιούνται σε κάθε σημείο του δικτύου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι με επιβάρυνση το κόστος κεφαλαίου επένδυσης να διασφαλίζονται οι βασικές απαιτήσεις για την ποιότητα ισχύος στα γειτνιάζοντα τουλάχιστον σημεία της μονάδας.

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν ικανοποιούνται τα επιτρεπτά όρια οχλήσεων τότε θα πρέπει η μονάδα να εγκαθίσταται σε σημεία όπου η στάθμη βραχυκύκλωσης είναι μεγαλύτερη. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να ευνοηθεί η εγκατάσταση εν όψει ισχυρών συνθηκών τάσης που επιβάλλονται πλησίον του Μ/Σ. Εναλλακτικά μπορούν να ενισχυθούν ορισμένες γραμμές ή να επεκταθεί τμήμα του δικτύου ή ακόμη να τοποθετηθούν σύγχρονοι μηχανισμοί διατήρησης τάσης και βελτίωσης ποιότητας ισχύος.

Μέσα προστασίας και ζεύξης

Απαραίτητα για την διασφάλιση της συνεργασίας με τις διατάξεις προστασίας του δικτύου και την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων για το τεχνικό προσωπικό. Στα πλαίσια θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα άμεσης ζεύξης και απόζευξης(με φορτίο) των μονάδων από το προσωπικό του παρόχου. Σε εγκαταστάσεις ΜΤ τίθεται ένας ΑΔΔ (Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης) ο οποίος επενεργεί ως διακόπτης όλης της εγκατάστασης ή των εγκαταστάσεων παραγωγής. Γενικά, οι θέσεις στις οποίες μπορεί να τοποθετηθεί ποικίλουν καθώς μπορεί να εγκατασταθεί στη πλευρά της ΜΤ ή της ΧΤ, ενώ σε περιπτώσεις απομονωμένης λειτουργίας της μονάδας το ρόλο του ΑΔΔ λαμβάνουν οι διακόπτες των γεννητριών. Για απομονωμένη λειτουργία της μονάδας θα πρέπει επίσης να διατίθεται σύστημα συγχρονισμού ακριβείας για τον παραλληλισμό κατά την επανασύνδεση.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην περίπτωση όπου η εγκατάσταση παραγωγής συνδέεται σε γραμμή ΜΤ μέσω συστήματος επανάζευξης(ΔΑΕ), όπου θα πρέπει να αποσυνδέονται οι μονάδες παραγωγής πριν από τη λειτουργία επαναφοράς του διακόπτη (λόγω μεταβατικών ταλαντώσεων ροπής).

Τα σφάλματα θα πρέπει να εντοπίζονται από τα συστήματα προστασίας του παραγωγού και να εκκαθαρίζονται συνεργατικά με τα μέσα του δικτύου. Οι ρυθμίσεις απόκρισης των μονάδων ΔΠ θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να αποτρέπονται υψηλές υπερεντάσεις ή και απρόβλεπτη απομονωμένη λειτουργία της μονάδας παραγωγής.

Διατάξεις μέτρησης

Θα πρέπει να περιλαμβάνονται διατάξεις μέτρησης διπλής ροής, για την καταγραφή τόσο της αποδιδόμενης όσο και της καταναλισκόμενης ισχύος. Η τοποθέτηση των μετρητικών διατάξεων γίνεται στο σημείο ΣΚΣ, το σημείο στο οποίο πραγματοποιείται και οι επιπτώσεις της μονάδας στο δίκτυο.

Κεφάλαιο - 4 Σύστημα Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων(*Multi-Agent Systems*) & Ευφυή Δίκτυα (*Smart Grids*)

4.1 Εισαγωγή

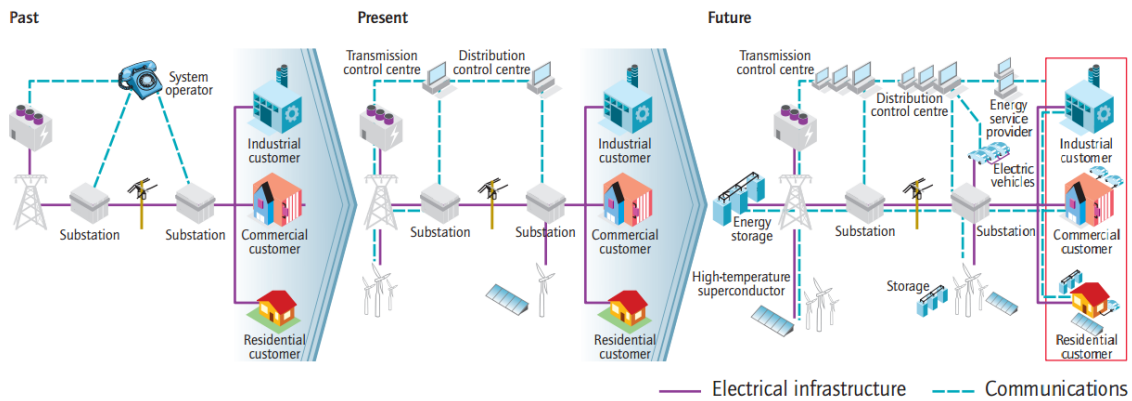
Η ολοένα και αυξανόμενη ενσωμάτωση των μονάδων ΔΠ -όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο- επιφέρει πλήθος επιπτώσεων στα ΣΗΕ, μεταξύ αυτών και οι μεταβολές στην τάση. Ταυτόχρονα, οι νέες προκλήσεις των δικτύων που αφορούν την καλύτερη και πιο ευέλικτη διαχείριση τους, τη βελτιστοποίηση του επιπέδου λειτουργίας τους (μείωση κόστους λειτουργίας, μείωση απωλειών σε γραμμές (μείωση ρύπων) κ.α.) καθώς και η επιτακτική ανάγκη για απελευθέρωση της αγοράς ΗΕ, προωθούν τη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η έννοια των σύγχρονων ευφυών δικτύων, οι δομές και τα χαρακτηριστικά που το συνθέτουν. Στη συνέχεια περιγράφονται τα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων καθώς θα χρησιμοποιηθεί η τυπική τους δομή στην επίλυση του ζητήματος της ρύθμισης τάσης.

4.2 Ευφυή δίκτυα (*Smart Grids*)

Τα σημερινά ΣΗΕ χρησιμοποιούν τεχνολογίες που αποτέλεσαν την αιχμή της εξέλιξης για περισσότερο από έναν αιώνα. Τα συμβατικά ΣΗΕ όπως είδαμε χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα και η ροή ισχύος ήταν μονόδρομη (από τους σταθμούς κεντρικής παραγωγής έως τους τελικούς καταναλωτές). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια νέες προκλήσεις παρουσιάστηκαν με την αυξανόμενη ζήτηση φορτίου, την ενσωμάτωση των ΑΠΕ, τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας αλλά και αυξημένη σε απαίτηση ποιότητα παρεχόμενης ισχύος.

Τα σύγχρονα ευφυή δίκτυα είναι ευφυή για δυο λόγους. Ο πρώτος αφορά την δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος (ΔΠ και αποθήκευση ενέργειας) και πληροφορίας (μέσω διαφόρων διεπαφών), προκειμένου να βελτιστοποιείται η ζήτηση και η κατανάλωση, εν αντιθέσει με τα συμβατικά που η ροή ισχύος και πληροφορίας ήταν μονόδρομη. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω τεχνολογιών ευφυούς καταγραφής τηλε-μετρήσεων (*smart metering*) και αισθητηρίων μέτρησης (*sensors*) τα οποία είναι εγκατεστημένα στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής, και βρίσκονται σε συνεχή ανταλλαγή δεδομένων για τη συγκέντρωση και την αξιολόγηση μετρήσεων μέσω ενός ενσωματωμένου συστήματος επικοινωνίας. Επί παραδείγματι, οι καταναλωτές έχουν τη δυνατότητα να επιτηρούν και να διαχειρίζονται την καταναλισκόμενη ΗΕ και να πουλάνε πίσω τυχόν παραγόμενη ΗΕ από τοπική παραγωγή.



Εικόνα 4.1 Σύνθεση Ευφυών Δικτύων [47]

Τα σύγχρονα δίκτυα είναι ακόμη ευφυή υπό την έννοια ότι έχουν δυνατότητα υψηλής ενσωμάτωσης ενός φάσματος ενεργειακών πόρων και πελατών ενεργειακών υπηρεσιών. Στα ευφυή δίκτυα είναι επίσης ενσωματωμένα πλήθος διεπαφών (Interface) όπως συστήματα διαχείρισης οικιακής ενέργειας (*Building energy management-BMS*), αναπτυγμένες υποδομές μετρήσεων (*AMI-advanced metering infrastructure*). Τα ευφυή δίκτυα διαθέτουν την ικανότητα να συντονίζουν τις ανάγκες και τις δυνατότητες πολλών διαφορετικών παραγωγών(ΔΠ), διαχειριστών των διαφορετικών δικτύων, των τελικών καταναλωτών και των διαφορετικών αγορών ενέργειας που προκύπτουν προκειμένου να λειτουργούν αποδοτικά.

4.2.1 Βασικές εφαρμογές των ευφυών δικτύων

- *Τα ευφυή συστήματα (smart systems)*. Τα ευφυή δίκτυα, παρουσιάζουν εξαιρετική ανθεκτικότητα σε διαταραχές, επιθέσεις (κακόβουλες) καθώς και σε φυσικές καταστροφές. Αυτό γίνεται δυνατό με τη χρήση εξελιγμένων αισθητήρων μέτρησης, υψηλής ασφάλειας τρόπων επικοινωνίας αλλά και υπολογιστικών συστημάτων απομακρυσμένου ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό, η συνεισφορά αφενός μεν στην μείωση των σφαλμάτων ή στην έγκαιρη αποκατάσταση αυτών και αφετέρου δε στην προστασία του εξοπλισμού.
- *Ευφυής αξιοποίηση ΑΠΕ (smart renewable)*. Τα σημερινά δίκτυα ήταν σχεδιασμένα κυρίως για κεντρικές μονάδες παραγωγής και για το λόγο αυτό η προσαρμογή των ΑΠΕ παρουσιάζει δυσκολίες υποδοχής λόγω του διεσπαρμένου και της μη σταθερής παραγωγής που αποδίδουν. Τα ευφυή δίκτυα εξαιτίας μηχανισμών που διαθέτουν εργαλεία πρόβλεψης και λήψης αποφάσεων (ανάλυση δεδομένων και μετρήσεων), αλλά και αναγνώρισης σφαλμάτων ή αστοχιών, διευκολύνουν την υψηλή διείσδυση των μονάδων ΔΠ.
- *Ευφυής καταναλωτές (Smart consumers)*. Στα ευφυή δίκτυα εμφανίζεται εντονότερα ο χαρακτήρας του καταναλωτή στην διαδικασία παραγωγής. Στις εγκαταστάσεις του

καταναλωτή ενσωματώνονται έξυπνοι μετρητές, οι οποίοι πρακτικά λειτουργούν σαν κεντρικοί μικρο-ελεγκτές αφού αλληλεπιδρούν με το δίκτυο. Συγκεκριμένα, ενημερώνονται από το δίκτυο αν υπάρχει ανάγκη για την εφαρμογή κάποιας τακτικής load shedding.

- *Ευφυής μεταφορές (Smart transport)*. Στα έξυπνα δίκτυα, επίσης, ενσωματώνεται η χρήση των αμιγώς ηλεκτρικών ή υβριδικών οχημάτων. Η ευφυΐα έγκειται στην βελτιστοποίηση της φόρτισης των οχημάτων ώστε να πραγματοποιείται τις κατάλληλες χρονικές περιόδους όπου για παράδειγμα παρατηρείται αυξημένη παραγωγή των ΑΠΕ. Εξάλλου, τα ηλεκτρικά οχήματα λαμβάνουν το ρόλο της αποθήκευσης της ενέργειας για μετέπειτα χρήση.
- *Ευφυής πάροχοι υπηρεσιών (smart electricity service providers)*. Στα σύγχρονα ευφυή δίκτυα οι πάροχοι υπηρεσιών (εταιρείες κοινής ωφέλειας) παύουν να έχουν τον πλήρη έλεγχο στην αγορά της ΗΕ. Συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση όλων των παραπάνω τεχνολογιών(αισθητήριων, επικοινωνιών, ΔΠ κ.α.) εισάγουν νέα προϊόντα και υπηρεσίες, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι απελευθερώνεται και επί της ουσίας η αγορά ΗΕ. Οι πάροχοι υπηρεσιών ΗΕ θα έχουν τη δυνατότητα να επιτηρούν και να αναλύουν και να ικανοποιούν με απόλυτη ασφάλεια τις ανάγκες των καταναλωτών. [27]

4.3 Συστήματα Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων (Multi-Agent System-MAS)

4.3.1 Εισαγωγή

Όπως είδαμε οι απαιτήσεις του σύγχρονου δικτύου για την ορθή και αποτελεσματική λειτουργία του, εμπεριέχουν ιδιαίτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα, το δίκτυο πλέον αποτελεί ένα δυναμικό περιβάλλον μέσα στο οποίο θα καλείται κάθε ευφυής διάταξη που είναι διασυνδεδεμένη με αυτό(μετρητές, αισθητήρες κ.α.) να αλληλεπιδρούν, δηλαδή να επικοινωνούν, να προσαρμόζονται και να προσφέρουν τις υπηρεσίες. Τα συστήματα ευφυών πρακτόρων πραγματεύονται όλη τη διαδικασία της ανάληψης αυτών των καθηκόντων.

4.3.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία MAS

Ένας ευφυής πράκτορας αποτελεί τυπικά μια οντότητα λογισμικού η οποία είναι σε θέση να περιλαμβάνει στα χαρακτηριστικά της ευφυΐας και τις αλληλεπίδρασης με το υπόλοιπο σύστημα. Οι ευφυείς πράκτορες εντάσσονται στην κατηγορία της τεχνητής νοημοσύνης, αφού διαθέτουν χαρακτηριστικά αναγνώρισης, μάθησης (πολυεπίπεδης) και προσαρμογής στο περιβάλλον ενώ αλληλεπιδρούν με αυτό δυναμικά. Η δυναμική τους αλληλεπίδραση με το περιβάλλον σχετίζεται με τις άμεσες αποφάσεις του, δηλαδή μια τακτική θα ήταν για την προσφορά στην ευστάθεια του συστήματος προκειμένου να μην καταρρεύσει. Ένα άλλος

τρόπος λήψης αποφάσεων θα ήταν με την επικοινωνία του με γειτονικούς πράκτορες -του ίδιου ιεραρχικά επιπέδου-, επηρεάζοντας τις αποφάσεις τους αλλάζει έμμεσα η κατάσταση του περιβάλλοντος. Σημαντικό να αναφερθεί ότι επικοινωνία των πρακτόρων δεν αποτελείται από την απλή ανταλλαγή δεδομένων αλλά γνώσης. [8]

Συγκεντρωτικά τα στοιχεία αυτόνομη λειτουργίας ενός ευφυούς πράκτορα:

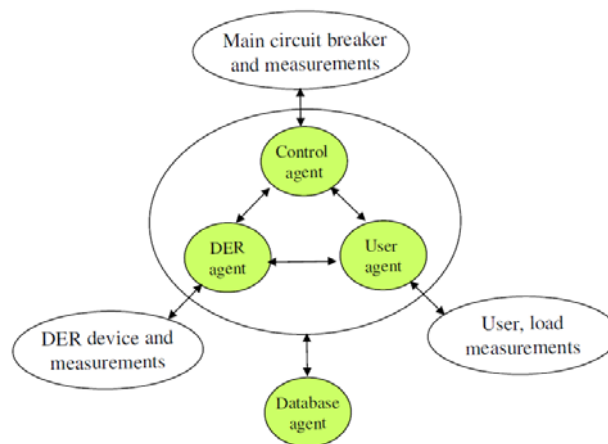
- Κοινωνικοποίηση, με την έννοια ότι έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με άλλους προκειμένου να πετύχουν τους στόχους τους. Η έννοια του όρου κοινωνικοποίηση σχετίζεται επίσης και με το ότι οι ευφυής πράκτορες δεν έχουν πάντα πλήρη γνώση για τα στοιχεία του περιβάλλοντος τους, αλλά επικοινωνούν για να ενημερωθούν.
- Αντιδραστικότητα. Οι πράκτορες μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα σε αλλαγές. Επί παραδείγματι αν αποσυνδεθούν κάποιοι πράκτορες που επιτηρούν μονάδες ΔΠ, τότε θα ενημερωθούν άμεσα και θα προβούν σε σημαντικές λειτουργικές αλλαγές προκειμένου να αυτορυθμίσουν το δίκτυο ή το μικροδίκτυο.
- Προνοητικότητα. Είναι προγραμματισμένοι ώστε να παρουσιάζουν μεταβλητές συμπεριφορές επίτευξης των στόχων τους. Αυτό σημαίνει ότι επιδιώκουν με κάθε τρόπο να τους επιτύχουν, είτε με την συνεργατική επικοινωνία με άλλους είτε με ανταγωνιστική.
- Αξιοπιστία, με την έννοια ότι δεν πρέπει σκόπιμα να παρέχουν εσφαλμένες ή ψευδής πληροφορίες σε άλλους προς όφελός τους.
- Κινητικότητα. Οι ευφυής πράκτορες θα πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα να μετακινούνται σε άλλες πλατφόρμες συστημάτων κατά τη διάρκεια συντηρήσεων. [28]

4.3.3 Έλεγχος μικροδικτύων με MAS

Τα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς εκτός των ΣΗΕ. Η κυριότερη εφαρμογή των MAS στα πλαίσια των ΣΗΕ αφορά τον έλεγχο των μικροδικτύων. Η βασική ιδέα της αξιοποίησης της τεχνολογίας των MAS στον έλεγχο των μικροδικτύων -αλλά και ευρύτερα- είναι η διάσπαση και η κατανομημένη επίλυση των προβλημάτων σε επιμέρους πιο εύκολα επιλύσιμα.

Στα πλαίσια των μικροδικτύων τα δεδομένα και οι πληροφορίες για κάθε τερματική διάταξη είναι πλήρως αποκεντρωμένα πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η δεν συλλέγονται απαραίτητα σε κάποιο κεντρικό υπολογιστικό σύστημα. Με τον τρόπο αυτό η αστοχία λειτουργία οιασδήποτε συσκευής ελέγχου δεν θα επηρεάσει τη λειτουργία ολόκληρου του μικροδικτύου.

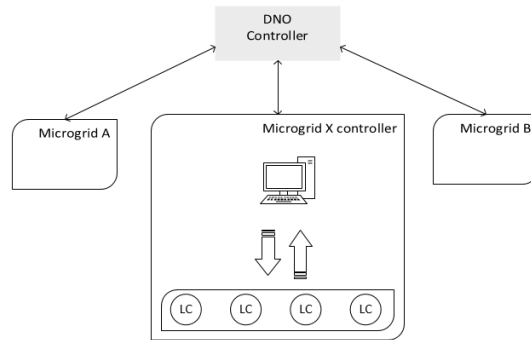
Ανάλογα με την τακτική ελέγχου που εφαρμόζεται γίνεται και ο κατάλληλος σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής των ευφυών πρακτόρων. Η γενική φιλοσοφία είναι ότι υπάρχουν επιμέρους τοπικοί ελεγκτές στους καταναλωτές (χαμηλότερου επιπέδου) -οι οποίοι μπορεί να ελέγχουν την τοπική παραγωγή-. Πολλές φορές όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2 χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι τοπικών καταναλωτών όπως πράκτορες ΔΠ (*DER/DG agents*), για κοινούς καταναλωτές(*User agents*),ενώ στην προκείμενη αρχιτεκτονική ευφυών πρακτόρων σε προτυποποιημένα συστήματα *multi-agent* κατά *IDAPS (Intelligent Distributed Autonomous Systems)* διατίθεται και ένας Control Agent που επιτηρεί και διαχειρίζεται την ασφάλεια και τον εντοπισμό των σφαλμάτων. Αυτή η κατηγορία των χαμηλού επιπέδου agent απεικονίζεται στην εικόνα 4.2 ως τοπικοί πράκτορες (*Local Agents*).



Εικόνα 4.2 Κατηγορίες πρακτόρων[28]

Σε κάθε μικροδίκτυο διατίθεται κάποιος κεντρικός ελεγκτής που αναφέρεται στον έλεγχο συνολικά της λειτουργίας του μικροδικτύου. Τέλος, ο διαχειριστής ή οι διαχειριστές του δικτύου διαθέτουν επίσης ευφυής πράκτορες ώστε να επικοινωνούν με όλους τους κεντρικούς πράκτορες των μικροδικτύων. Η γενική φιλοσοφία πάντως έγκειται στο διαχωρισμό αυτών των τριών ιεραρχικών επιπέδων δηλαδή:

- Χαμηλού επιπέδου πράκτορες (Τοπικοί πράκτορες), εδώ συνηθίζεται να εμφανίζονται περαιτέρω διαχωρισμοί
- Μεσαίου επιπέδου (Κεντρικός πράκτορας μικροδικτύου)
- Υψηλού επιπέδου (Πράκτορας διαχειριστή δικτύου -μπορεί να είναι και περισσότεροι από ένας-)



Εικόνα 4.3 Ευφυείς πράκτορες σε μικροδίκτυα

4.3.4 Προτυποποιήσεις συστημάτων πολλαπλών ευφύων πρακτόρων

Η διαδεδομένη χρήση των συστημάτων πολλαπλών ευφύων πρακτόρων έχει οδηγήσει αφενός στην προτυποποίηση αρχιτεκτονικών λειτουργίας τους και αφετέρου στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων πλατφόρμας. Στα πλαίσια της διεπικοινωνίας των agents έχει δημιουργηθεί ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός (*Foundation for Intelligent Physical Agent*), μέσω του οποίου έχουν θεσπιστεί ένα σύνολο κανόνων που θα πρέπει να ακολουθεί κάθε μορφή σχεδίασης των πρακτόρων. Αναφορικά, με την εφαρμογή των ευφύων πρακτόρων στον έλεγχο των μικροδικτύων έχουν προταθεί στη διάφοροι τύποι δόμησης των MAS, ωστόσο πλέον ακολουθείται η προτυποποίηση κατά *IDAPS*.

Πλατφόρμες προσομοίωσης της λειτουργίας των MAS, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ των διαφόρων agents. Ένα βασικό πακέτο λογισμικού που βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού JAVA είναι η JADE (ενώ υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτής όπως η Zeus, η Voyager ,Excalibur Agent, FIPA-OS, Agents Tool, Agent Builder, Grasshopper-2 και RETSINA), η οποία περιλαμβάνει και γραφικό περιβάλλον προσομοίωσης.

Κεφάλαιο - 5 Ρύθμιση Τάσης (*Voltage Regulation*)

5.1 Εισαγωγή

Σε ένα ΣΗΕ θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ορθή και ασφαλής λειτουργία του. Κατά βάση με τον όρο ορθή αναφερόμαστε στην απρόσκοπτη παροχή υπηρεσιών στον καταναλωτή καθώς και τη διατήρηση των μεγεθών τάσης και συχνότητας εντός ονομαστικών ορίων. Η ασφαλής λειτουργία αναφέρεται στις ακίνδυνες λειτουργικές καταπονήσεις που θα πρέπει να είναι ανεκτές από τον εξοπλισμό του δικτύου.

Το ζήτημα ρυθμίσεως ή διατηρήσεως της τάσης στα ΣΗΕ, είναι ιδιαίτερα πολυσύνθετο από τη στιγμή που τροφοδοτείται από πολλές πηγές και τροφοδοτεί πολλά φορτία. Με άλλα λόγια, η διατήρηση της τάσης δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με μόνο τον έλεγχο μιας γεννήτριας (μέσω της διεγέρσεώς της), καθώς αφορά το σύνολο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός για κάθε επίπεδο τάσης που θα αναλαμβάνει να την επιτηρεί και ρυθμίζει.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα που εγκαθίστανται για την αντιμετώπιση του ζητήματος της ρύθμισης τάσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια αναφορά και σύντομη περιγραφή σε αυτά. Ωστόσο, θα επιμείνουμε στην κατεύθυνση ρύθμισης τάσης για τα σύγχρονα ενεργητικά δίκτυα, δηλαδή δίκτυα με υψηλή διείσδυση σε ΔΠ, καθώς και στους λόγους για τους οποίους ο συμβατικός εξοπλισμός ρύθμισης τάσης δεν είναι σε θέση να φέρει εις πέρας το έργο του. Επιπρόσθετα, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση στα είδη των ελέγχων (κεντρικού-αποκεντρωμένου- τοπικού).

5.2.1 Ρύθμιση τάσης σε παθητικά δίκτυα

Το ζήτημα της ρύθμισης τάσης στα ΣΗΕ παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με αυτό του ελέγχου της συχνότητας. Συγκεκριμένα, η συχνότητα θα πρέπει να βρίσκεται σε στενά όρια διακύμανσης στα πλαίσια της καλής λειτουργίας του δικτύου. Ο έλεγχος της συχνότητας σχετίζεται με το ισοζύγιο της πραγματικής (ενεργού) ισχύος στο συνολικό δίκτυο. Εντελώς αντίστοιχα θα πρέπει να διατηρούνται και τα όρια λειτουργίας της τάσης του ΣΗΕ, πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται στο ισοζύγιο αέργου ισχύος. Γενικά, η συχνότητα αποτελεί δείκτη ενεργειακής ισορροπίας του συστήματος, ενώ η τάση δείκτης καλής λειτουργίας αυτού. Εξάλλου, η συχνότητα τυπικά πρέπει να είναι ενιαία σε όλο το ΣΗΕ (ευστάθεια), σε αντίθεση με την τάση που διαφέρει από ζυγό σε ζυγό.

Τα επίπεδα επιτρεπτών τιμών και των δυο μεγεθών θα πρέπει να βρίσκονται αυστηρά στα πλαίσια των κανονισμών και των προτύπων όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι επιπτώσεις σε μεταβολές φορτίου επί της τάσης είναι μεγαλύτερες από αυτές

στην συχνότητα για το λόγο αυτό οι ανοχές στη ρύθμιση όπως και στη διακύμανση της τάσης είναι πολύ μεγαλύτερες. Με άλλα λόγια, η τάση αποτελεί μέγεθος πιο ευαίσθητο στις μεταβολές του φορτίου και επομένως τα όρια ακρίβειας της ρύθμισης τάσης είναι $\pm 1\%$ ενώ για τη συχνότητα $\pm 0,03\%$. Επιπρόσθετα, για τη συχνότητα εφαρμόζονται πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση, για την τάση είναι επιτρεπτά μόνιμα σφάλματα και για αυτό δεν εφαρμόζεται δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα ρύθμιση αφορά τη συνεχή παρακολούθηση του μεγέθους ενώ η δευτερεύουσα την επαναφορά στην κανονική τιμή. Ενδεικτικά για τη συχνότητα η πρωτεύουσα πραγματοποιείται μέσω συστημάτων ελέγχου των κινητήριων ζευγών των μηχανών οι οποίες είναι εφοδιασμένες με μηχανισμούς ρυθμίσεως στροφών ενώ η δευτερεύουσα από μηχανισμό αλλαγής στροφών. [10]

Ο βασικός λόγος για τον οποίο παρουσιάζονται διακυμάνσεις στα μεγέθη της τάσης και της συχνότητας είναι οι μεταβολές των φορτίων δηλαδή των καταναλώσεων. Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, εμφανίζονται διάφορες μεταβολές στα φορτία, ενώ γενικά είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι μια ημερήσια καμπύλη φορτίου μπορεί να αποτελέσει χαρακτηριστικό μέγεθος ως "παράθυρο" παρατήρησης. Η γενική εικόνα είναι ότι τις ώρες αιχμής (μέγιστης ημερήσιας ζήτησεως) παρατηρούνται σημαντικές πτώσεις τάσεις στους ζυγούς. Στις περιπτώσεις αυτές πραγματοποιείται επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης για την καλύτερη κατανομή της αέργου πράγμα το οποίο αφενός μειώνει τις απώλειες και αφετέρου βελτιστοποιείται η οικονομική λειτουργία του ΣΗΕ. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια διαστημάτων ελαχίστου ζήτησεως δημιουργείται περίσσειμα στο ισοζύγιο ισχύος με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υπερτάσεις στους ζυγούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις η λύση έγκειται στην απορρόφηση αέργου ισχύος πράγμα το οποίο πολλές φορές επιτυγχάνεται με την υποδιέγερση των σύγχρονων κινητήριων μηχανών. Το μειονέκτημα της υποδιέγερσης οδηγεί σε μείωση του περιθωρίου ευστάθειας, για αυτό όπως θα δούμε προτείνονται κι άλλοι πιο σύγχρονοι τρόποι.

5.2.2 Συμβατικά μέσα ρύθμισης τάσης

Παρακάτω παρατίθενται οι συμβατικοί τρόποι ρύθμισης της τάσης σε ένα συμβατικό δίκτυο ενώ στη συνέχεια θα αποδοθούν και πιο σύγχρονα μέσα .

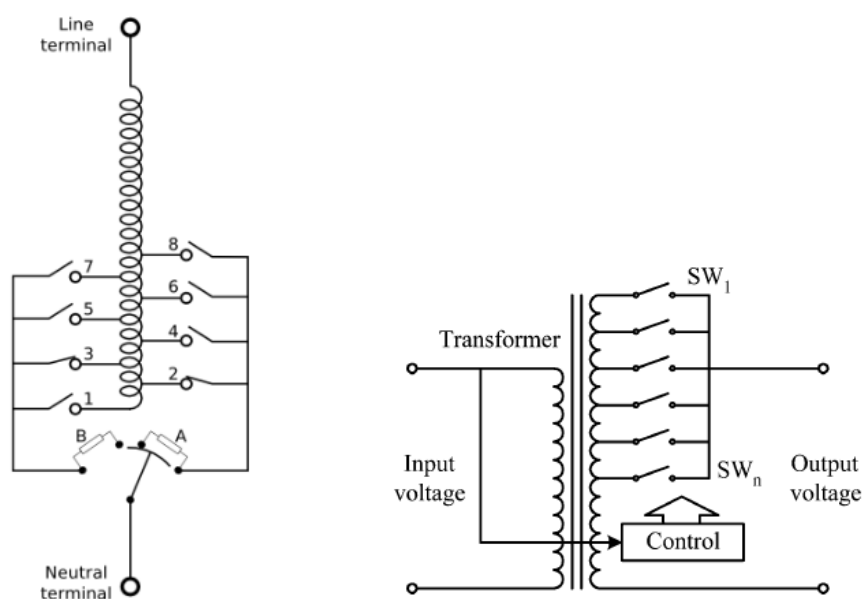
- Συστήματα διεγέρσεως των γεννητριών

Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε δίκτυα μεταφοράς για αυτό δεν θα γίνει εκτενής αναφορά. Οι ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως μπορεί να πραγματοποιηθεί με πλήθος τεχνικών. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι περιλαμβάνουν αυτόματους ρυθμιστές τάσης οι οποίοι ρυθμίζουν το ρεύμα διεγέρσεως ώστε να διατηρείται η τάση.

- Συστήματα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο των μετασχηματιστών ισχύος

Σε πολλές περιπτώσεις οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος είναι εφοδιασμένοι με μηχανισμούς αλλαγής λήψεων με απώτερο σκοπό τη μεταβολή της τάσεως εξόδου. Αν και ο κύριος λόγος για τη χρήση μετασχηματιστών ισχύος είναι για την μεταφορά ισχύος σε διαφορετικές βαθμίδες τάσης. Ωστόσο, συχνά συναντάται ο παραπάνω μηχανισμός που αναφέρεται σε αλλαγή της σχέσεως μετασχηματισμού, επιτελώντας κατ' αυτόν τρόπο και το δευτερεύον καθήκον του ελέγχου της δευτερογενούς τάσης. Σε περιπτώσεις μετασχηματιστών διανομής χαμηλής ισχύος ή και σε περιπτώσεις δευτερογενούς διανομής υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής λήψεων αν τεθεί ο μετασχηματιστής εκτός τάσης. Η τακτική βέβαια συνίσταται στην τοποθέτηση συστημάτων μηχανισμών ΣΑΤΥΦ (αλλαγής της τάσης υπό φορτίο - *On Load Tap Changer* [OLTC ή LTC] στους μεγαλύτερους μετασχηματιστές ΥΥΤ/ΥΤ καθώς και ΥΤ/ΜΤ. Η χρήση αυτών μηχανισμών δύναται να διατηρήσει την τάση του ζυγού πρωτογενούς διασύνδεσης σταθερή παρά τις μεταβολές.

Το εύρος μεταβολής για μετασχηματιστές διανομής μικρής βάσης ισχύος είναι της τάξης του $\pm 5\%$, ενώ για μεγαλύτερους που διαθέτουν ΣΑΤΥΦ είναι της τάξης $\pm 10-15\%$ με βήματα μεταβολής 2,5 ή 1,5 %.



Εικόνα 5.1 α) Μεταγωγή μέσω αντίδρασης β) Tap Changer με ελεγκτή

Τα συστήματα αλλαγής τάσεως βασίζονται σε λειτουργία με ηλεκτροκινητήρες όπου πραγματοποιείται η μεταγωγή έτσι ώστε να είναι ταχεία η μετάβαση ενώ στο κύκλωμα αλλαγής λήψεων χρησιμοποιούνται αντιστάσεις ή αντιδράσεις (γεφύρωσης) για να μειώνεται το ρεύμα κυκλοφορίας και να περιορίζονται οι σπινθηρισμοί. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχουν προταθεί και λύσεις για την

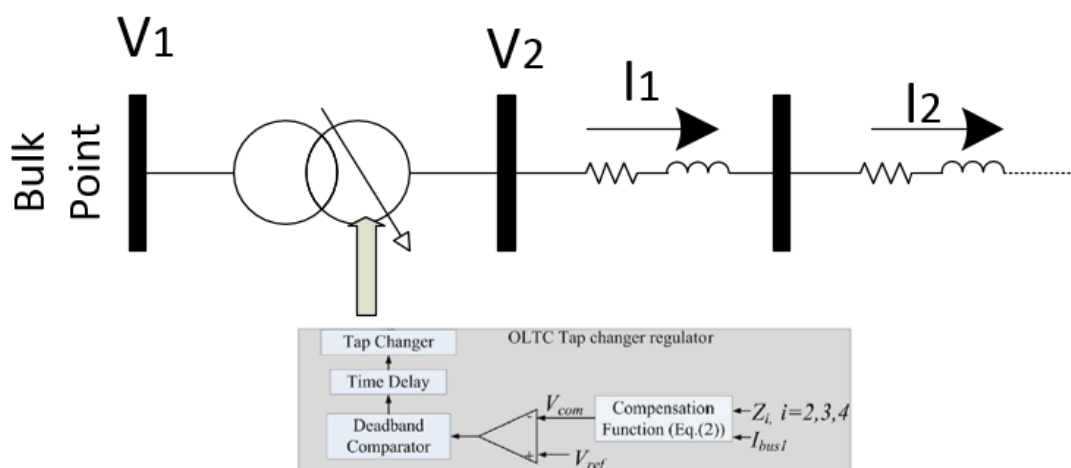
μεταγωγή μέσω αυτών όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1α. Η εντολή για την πραγματοποίηση χειρισμού του μετασχηματιστή γίνεται είτε με τηλεχειρισμό είτε σε άλλες περιπτώσεις μέσω αυτόματου συστήματος ελέγχου μέσω συγκριτή κλειστού βρόχου με δεδομένη τάση αναφοράς όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1β.

Λαμβάνονται μετρήσεις στην έξοδο του μετασχηματιστή, μέσω μετασχηματιστή ρεύματος για να ευρεθεί η τιμή του ρεύματος της γραμμής καθώς και μετασχηματιστή τάσης για την τιμή της τάσης, προκειμένου να υπολογιστεί δια της μεθόδου *LDC (Line Drop Compensation)* η ανάγκη για μεταβολή των λήψεων. Το σύνολο αυτής της βαθμίδας συχνά αποκαλείται αυτόματος ρυθμιστής τάσης *AVR (Automatic Voltage Regulator)*.

Για τον υπολογισμό αλλαγής λήψεων, η πιο συνηθισμένη και απλή περίπτωση που χρησιμοποιείται είναι ο υπολογισμός της πτώσης τάσης ως εξής:

Η συνάρτηση αντιστάθμισης κατά μήκος των γραμμών -η οποία αποτελεί είσοδο του συγκριτή- είναι:

$$V_{com} = V_2 - I_1 z_1 - I_2 z_2 - \dots$$



Εικόνα 5.2 Υλοποίηση LDC

- Μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης

Όπως αναφέρθηκε στους περισσότερους μετασχηματιστές ισχύος εμφανίζονται μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ για τη ρύθμιση της τάσης. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις μετασχηματιστών χαμηλότερης ισχύος οι οποίοι έχουν σχέση μετασχηματισμού 1:1, διότι δεν χρησιμοποιούνται για τον μετασχηματισμό της τάσης αλλά αποκλειστικά για τη ρύθμιση της τάσης όπως θα εξηγηθεί. Οι μετασχηματιστές αυτοί ονομάζονται *ρυθμιστές τάσης*. Πιο αναλυτικά, έχουν δυνατότητα αλλαγής λήψεων με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε και για τους Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ. Διατίθενται σε δυο κατηγορίες ρύθμισης η μια αφορά αποκλειστικά τη

ρύθμιση τάσης και η άλλη που προσθέτει φασική γωνία στο δευτερεύον πηνίο. Η συνδεσμολογία αυτού του είδους των μετασχηματιστών έχουν τα τυλίγματα τους στα ίδια σκέλη πυρήνων.

- Χωρητική αντιστάθμιση σειράς ή εγκάρσια επαγωγική αντιστάθμιση των γραμμών

Καθώς το μεγαλύτερο μέρος των τροφοδοτούμενων φορτίων σε οποιοδήποτε επίπεδο τάσης είναι επαγωγικού χαρακτήρα, απαιτείται και κατανάλωση αέργου ισχύος για τη λειτουργία τους. Η άεργος η οποία ζητείται από την κατανάλωση παρέχεται από το σύστημα, το οποίο παρέχει επιπλέον και τις απώλειες τις οποίες προϋποθέτει η ροή της ισχύος δια μέσου των δικτύων. Πρόσθετη ροή αέργου ισχύος καταναλίσκεται στις γραμμές του δικτύου ως επιπλέον απώλειες φορτίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις γραμμές και μειώνοντας την μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ των αγωγών αλλά αυξάνοντας και τις πτώσεις τάσεις επ' αυτών. Ταυτόχρονα, όμως, όπως έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο η ροή αέργου ισχύος έχει άμεση επιρροή στην τάση. Για τους λόγους αυτούς η παραγωγή της αέργου ισχύος στο σύστημα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενεργού ισχύος. Αυτό το είναι δυνατό να επιτευχθεί με τοπική έγχυση άεργου στα σημεία όπου ζητείται αντιστάθμιση. Οι μέθοδοι επομένως που χρησιμοποιούνται είναι δια της εγχύσεως άεργου ισχύος με πυκνωτές εν παραλλήλω για την ταυτόχρονη βελτίωση της τάσης αλλά και της οικονομικής λειτουργίας του συστήματος. Παρακάτω αναφέρονται οι δυο κατηγορίες πυκνωτών αντιστάθμισης.

Στατοί Πυκνωτές

Οι στατοί πυκνωτές πρακτικά αποτελούν συστοιχίες πυκνωτών οι οποίοι μέσω χειρισμών πραγματοποιούν εύκολα ζεύξη και απόζευξη με το δίκτυο, ενώ η δυνατότητα έγχυσης άεργου τους μπορεί να μεταβληθεί με συγκεκριμένα βήματα. Πλεονεκτούν έναντι των σύγχρονων πυκνωτών στο ότι παρουσιάζουν ελάχιστες απώλειες λειτουργίας και ότι είναι τυπικά φορητοί. Οι στατοί πυκνωτές είθισται να χρησιμοποιούνται-εξαιτίας του χαμηλού κόστους τους -σε μικρές μονάδες και στις θέσεις ακριβώς που απαιτείται η παροχή αέργου ισχύος στα δίκτυα μέσης τάσης αλλά και χαμηλής-. Παρουσιάζονται ωστόσο και σημαντικά μειονεκτήματα όπως κατά τη απόζευξή τους όπου συνοδεύεται πολλές φορές από υπερτάσεις ενώ η ζεύξη τους από μεγάλα κρουστικά ρεύματα. Ακόμη, οι στατοί πυκνωτές δεν μπορούν να υπερφορτιστούν καθώς αποτελούν ευπαθή παθητικά στοιχεία αλλά και για το λόγο ότι η άεργος ισχύς του καθορίζεται από την χωρητικότητα και την τάση εφαρμογής:

$$Q_c = \frac{|E_r|^2}{X_c}$$

Σύγχρονοι πυκνωτές

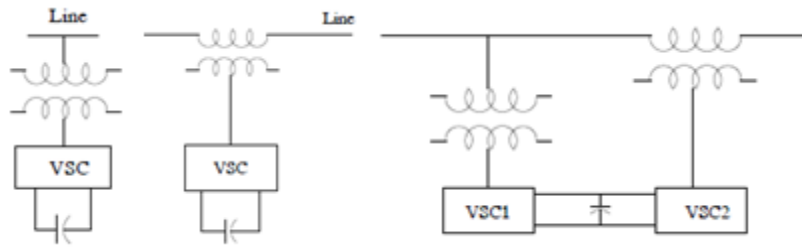
Όταν κάποιος σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται για να κινεί ένα φορτίο, είναι δυνατό να λειτουργεί με υπερδιέγερση και να βελτιώνει ταυτόχρονα το συντελεστή ισχύος του συστήματος, παρέχοντας άεργο ισχύ σε αυτό. Συχνά, όμως, σύγχρονοι κινητήρες προορίζονται για αποκλειστική χρήση με μοναδικό σκοπό τη βελτίωση του ΣΙ, χωρίς δηλαδή να αξιοποιείται η κινητήρια δύναμη του άξονα. Σημαντικό πλεονέκτημα του σύγχρονου πυκνωτή είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει σε δυο καταστάσεις είτε σε υπερδιέγερση όπου παράγει άεργο ισχύ είτε σε υποδιέγερση όπου μπορεί να απορροφήσει άεργο προσομοιώνοντας διασύνδεση ως εγκάρσια αντίδραση. Τούτο σημαίνει ότι ο σύγχρονος πυκνωτής δύναται να λειτουργήσει σε ένα εύρος τιμών έναντι των διακριτών επιλογών των στατών πυκνωτών. Αποτελεί επομένως μια ευέλικτη πηγή αέργου ισχύος η οποία μπορεί να ρυθμιστεί άμεσα από το ρεύμα διέγερσης του κινητήρα, ενώ εξίσου σημαντικό είναι το χαρακτηριστικό της δυνατότητας λειτουργίας του σε υπερφόρτιση για ορισμένα μικρά διαστήματα. [10]

Μειονεκτεί έναντι του στατού πυκνωτή τόσο στο κόστος επένδυσης όσο και στο κόστος λειτουργίας καθώς οι απώλειες λειτουργίας του δεν είναι μικρές. Οι απώλειες λειτουργίας του μεταβάλλονται με τις αλλαγές των ρευμάτων διέγερσης καθώς κατά τις αλλαγές υπάρχει επίδραση και στο ρεύμα οπλισμού. Η χρήση του είναι προτιμητέα σε δίκτυα μεταφοράς λόγω του αυξημένου κόστους αλλά και της ευστάθειας (εξαιτίας της αδράνειας) που μπορούν να αποδώσουν στο ΣΗΕ.

5.2.3 Σύγχρονες τεχνικές ρύθμισης τάσης (*Concept of FACTS*)

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος (*GTO-Gate Turn Off-, IGBTs-Insulated Gate Thyristors*) έχουν αναπτυχθεί πιο σύγχρονα και πιο ευέλικτα συστήματα ρύθμισης τάσης. Τα συστήματα αυτά πλεονεκτούν έναντι των περισσότερων συμβατικών μέσων ρύθμισης τάσης καθώς συνδυάζουν πολλά χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτών, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν ευκολία χειρισμού και επικοινωνίας με τα υπόλοιπα μέσα. Τα μέσα αυτά εντάσσονται στην πρότυπη κατηγορία των *FACTS(Flexible Alternating Current Transmission System)*. Οι τρεις κατηγορίες σύγχρονων συστημάτων διατήρησης και βελτίωσης ποιότητας τάσεως είναι [30]

- Εγκάρσια σύνδεση μέσω διανομής *STATCOM* ή *DSTATCOM*
- Σύνδεση δυναμικών μέσω επαναφοράς τάσης (*DVR-Dynamic Voltage Restorer*)
- Συνδυασμένη σύνδεση (εγκάρσια και σειράς), *UPQC (Unified Power Quality Conditioner)*

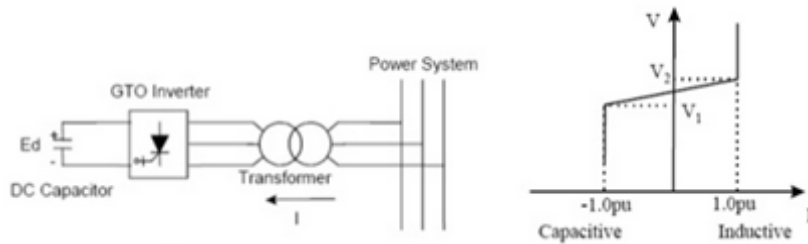


Εικόνα 5.3 Τρόποι διασύνδεσης VSI [30]

Βέβαια στα πλαίσια της ΥΤ και ΥΥΤ χρησιμοποιούνται και άλλη τέτοιοι μηχανισμοί ρύθμισης τάσης όπως *TSSC (Thyristor Switched Series Capacitors)*, *TCSC (Thyristor Controlled SC)* και *GCSC (GTO-Controlled SC)*.

STATCOM (Static COMPensator) ή STACON (Static condenser)

Η λειτουργία τους βασίζεται σε ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία ενσωματώνουν μια μεταβλητή πηγή τάσεως *VSI (Voltage Source Inverter)*, ενώ η διασύνδεση πραγματοποιείται μέσω ενός Μ/Σ όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.4 Λειτουργικό διάγραμμα VSI[30]

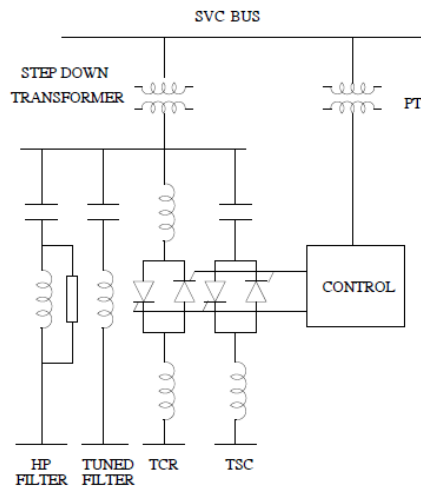
Χρησιμοποιούνται ως καταβόθρες ή πηγές αέργου ισχύος μέσω του ελέγχου του πλάτους της DC ή AC τάσης της πηγής διασύνδεσης ρυθμίζοντας την τάση του ΣΚΣ, διατηρώντας ταυτόχρονα τη γωνία του διανύσματος τάσης αρκετά μικρή, προκειμένου να διευκολύνεται η ροή ενεργού ισχύος αντισταθμίζοντας τις διακοπτικές απώλειες αλλά και τις απώλειες του μετασχηματιστή ζεύξης. Με άλλα λόγια, η γωνία μεταξύ της πηγής VSI και του ζυγού διασύνδεσης είναι αυτή που καθορίζει προφανώς τη ροή ενεργού ισχύος, ενώ η άεργος εγχεόμενη ή απορροφώμενη ισχύς εξαρτάται από τα μέτρα των τάσεων όπως έχει εξηγηθεί για τη ροή μεταξύ δυο ζυγών.

SVC (Static Var Compensator)

Η λειτουργία τους βασίζεται στη μεταβολή μιας αντίδρασης, το ρεύμα της οποίας ελέγχεται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος (Back to back Thyristor Converter). Τα SVC βρίσκουν εφαρμογή σε εγκαταστάσεις ταχέων μεταβολών φορτίου. Υπάρχουν δυο εκδοχές των SVC ανάλογα με

τη σύνθεσή τους τα *FC-TCR (Fixed Capacity-Thyristor Controlled Reactor)* και τα *TSC-TCR (Thyristor Switched Capacitor)*.

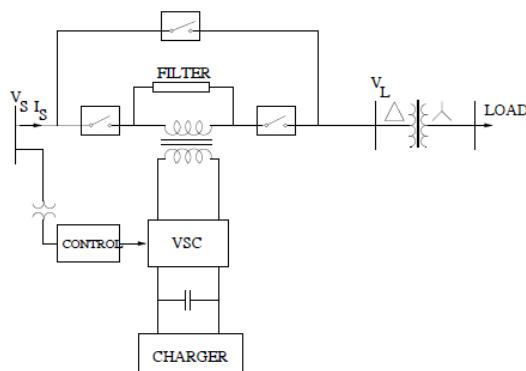
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.5 το συγκεκριμένο SVC είναι διασυνδεδεμένο στην πλευρά ενός step down μετασχηματιστή. Παρουσιάζονται επίσης τα παθητικά φίλτρα καταστολής αρμονικών λόγων των ηλεκτρονικών ισχύος.



Εικόνα 5.5 Σύμβαση SVC

DVR(Dynamic Voltage Restorer)

Τα DVR προσδιορίζονται κατά κύριο λόγο για την παροχή ενέργειας αλλά και την προστασία των ευαίσθητων φορτίων σε περιόδους βυθίσεων τάσης. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η συχνή εμφάνιση σφαλμάτων, με αποτέλεσμα την ηλεκτρικτρομηχανική κόπωση των υλικών του.



Εικόνα 5.6 Τριφασική πηγή VSC

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 5.6 αποτελείται από μια τριφασική πηγή VSC συνήθως με την ύπαρξη ουδετέρου κόμβου για την έγχυση των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας -για τις ασύμμετρες φορτίσεις. Ο μετασχηματιστής διασύνδεσης του οποίου η συνδεσμολογία λαμβάνει χώρα για το αν θα χρειαστεί να αντισταθμιστούν οι πτώσεις τάσεις που εισάγουν τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας. Η συνδεσμολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα δεν απαιτεί την αντιστάθμιση καθώς δεν επάγονται ρεύματα μηδενικής ακολουθίας εξαιτίας του αγείωτου αστέρα. Τα ρεύματα έγχυσης τηρούν ορισμένα όρια ώστε να μην έρχεται σε κορεσμό ο πυρήνας του Μ/Σ. Τα παθητικά φίλτρα τα οποία τοποθετούνται είτε στην πλευρά του δικτύου -όπως στην απεικόνιση-, είτε στην πλευρά του VSC. Τα πλεονεκτήματα της τοποθέτησης στην πλευρά του VSC είναι ότι δεν ρέουν αρμονικές ανώτερης τάξης στο Μ/Σ και τα παθητικά στοιχεία διαστασιολογούνται για χαμηλή τάση. Από την άλλη πλευρά, το μειονέκτημα είναι ότι προκαλείται πτώση τάσης και ολίσθηση φάση στην τάση που εισάγεται στο δίκτυο. Η τοποθέτηση στην πλευρά της υψηλής έχει το πλεονέκτημα ότι εκμεταλλεύεται την αντίδραση σκέδασης ως επιπλέον φίλτρο υψηλών συχνοτήτων. Τέλος, απεικονίζονται τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας σε διατάξεις μπαταριών για την στήριξη των ευαίσθητων φορτίων.

5.2.4 Ρύθμιση Τάσης με τη βοήθεια μονάδων ΔΠ

Όπως έχει αναφερθεί, η υψηλή ενσωμάτωση μονάδων ΔΠ μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ανυψώσεις τάσεις. Για το λόγο αυτό σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τοπικές μέθοδοι ρύθμισης τάσης, προκειμένου να ρυθμίζεται η τάση ΣΚΣ. Τέτοιες τακτικές ελέγχου είναι οι εξής:

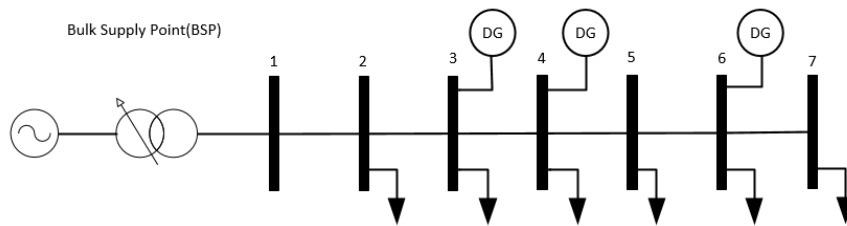
- Περικοπή ενεργού ισχύος (*Active Power Curtailment*). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανύψωσης τάσης, μπορεί να περιοριστεί η περίσσεια ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο. Για την υλοποίηση αυτής της μεθόδου ο αντιστροφέας της μονάδας παραγωγής παρακολουθεί την τάση του ΣΚΣ, και την τρέχουσα ενεργό ισχύ και ανάλογα πραγματοποιείται η απαιτούμενη κάθε φορά κίνηση. Μια άλλη δυνατότητα επιλογή, είναι η αποθήκευση της περίσσειας ενεργού ισχύος σε διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας.
- Μέσω της δυνατότητας ρύθμισης αέργου ισχύος. Βασιζόμενοι σε αυτή την επιλογή ρύθμισης τάσης μέσω της διαχείρισης της άεργου ισχύος, προτείνεται ο αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης. Συγκεκριμένα, η ενδεχόμενη μεταβολή αέργου ισχύος σε κάποιο σημείο του δικτύου επιδρά στο πλάτος της τάσης όχι μόνο του ζυγού του τοπικά. Όπως έχει εξηγηθεί η μεταβολή της τάσης μεταξύ ζυγών προκαλεί ροή αέργου ισχύος και έτσι είναι επόμενο να αλλάζει και το επίπεδο τάσης και στους υπόλοιπους ζυγούς. Ειδικότερα, στα δίκτυα ΥΤ και ΜΤ όπου ο λόγος R/X είναι σχετικά μικρός -κάτω από τη μονάδα, ενώ στη ΥΤ συχνά αμελείται η αντίσταση γραμμής- οι άεργες μεταβολές παρουσιάζουν εντονότερη επίδραση στο μέγεθος της

τάσης. Με άλλα λόγια, ορισμένη έγχυση άεργου ισχύος θα προκαλέσει μεγαλύτερη ανύψωση τάσης συγκριτικά με την ίδια ποσότητα έγχυσης ενεργού ισχύος. [11]

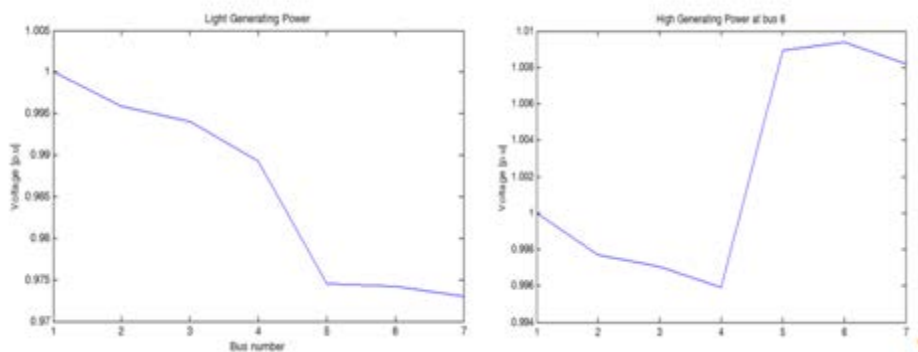
5.2.5 Περιπτώσεις αστοχίας ρύθμισης τάσης μέσω συμβατικού εξοπλισμού

Η υψηλή ενσωμάτωση της ΔΠ, δημιουργεί ανυψώσεις τάσης σε πολλά σημεία του δικτύου, πράγμα το οποίο αλλάζει τα δεδομένα για ένα ακτινικό δίκτυο διανομής, στο οποίο η κατανομή της τάσης κατά μήκος της γραμμής για τις διάφορες συνθήκες φόρτισης είναι γνωστή. Η λειτουργία των περισσότερων μέσων ρύθμισης εκμεταλλεύονται ακριβώς αυτό το χαρακτηριστικό. Ως αποτέλεσμα προκαλείται αστοχία στη ρύθμιση της τάσης, ενώ συχνά συμβαίνουν άσκοπες μεταβολές στις λήψεις των Μ/Σ.

Από μια προσομοίωση ενός ακτινικού δικτύου διανομής 7 ζυγών, παρατηρούμε τις τιμές της τάσης. Στην πρώτη περίπτωση, οι μονάδες ΔΠ παράγουν ελάχιστη παραγόμενη ισχύ (20% της ονομαστικής ισχύος), όπου είναι εμφανής κατά μήκος της γραμμής η πτώση τάσης. Στην δεύτερη περίπτωση αποδίδουν τη μέγιστη ονομαστική τους ισχύ τους για το ίδιο φορτίο.



Εικόνα 5.7 Δίκτυο προσομοίωσης



Εικόνα 5.8 Γράφημα τάσεων α)Χαμηλή παραγωγή μονάδων ΔΠ β)Υψηλή Παραγωγή

Παρατηρούμε στη μεν πρώτη περίπτωση ότι η κατανομή της τάσης επί των γραμμών είναι μονοτονικά φθίνουσα σε αντίθεση με την περίπτωση όπου οι μονάδες ΔΠ έχουν ως

επίπτωση την ανύψωση τάσης. Μια επικίνδυνη για το παρόν σύστημα κατάσταση θα ήταν χαμηλές καταναλώσεις και υψηλή παραγόμενη από τις ΔΠ.

Σε πολλές περιπτώσεις με υψηλή ενσωμάτωση, είναι αδύνατη η ρύθμιση τάσης με τη χρήση μετασχηματιστή μεταβλητών λήψεων καθώς ενδέχεται να οξύνει το πρόβλημα της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, κατά την χρήση ρυθμιστών τάσης (*SVR*) επιλέγεται κάποιο σημείο (*target point*) για το οποίο υπολογίζεται η πτώση τάσης κάθε φορά. Αν είναι εγκατεστημένη μονάδα ΔΠ σε κάποια ενδιάμεση θέση του δικτύου, η ενδεχόμενη τάση της στο δίκτυο δεν θα είναι ορατή από τον ρυθμιστή, πράγμα το οποίο μπορεί να επιφέρει λανθασμένη επιλογή ρύθμισης.[31]

5.3 Τεχνικές ελέγχου τάσης

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια συνοπτική ανάλυση των προβλημάτων που εμφανίζουν τα συμβατικά κεντρικά συστήματα ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια καταδεικνύεται η ανάγκη εκσυγχρονισμού του και η μετάβαση σε νέους ελέγχους που αναφέρονται σε συστήματα ρύθμισης τάσης μέσω:

- Αποκεντρωμένου ελέγχου (*Decentralized/Distributed Control*)
- Τοπικού συντονισμένου ελέγχου (*Local Coordinated Control*)

5.3.1 Στοιχεία Κεντρικού Ελέγχου

Στα συμβατικά δίκτυα διανομής, ο έλεγχος της τάσης αλλά και της συνολικής ρύθμισης του πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος κεντρικού ελέγχου, όπου το σύνολο του συστήματος αντιμετωπίζεται ως μια οντότητα. Συγκεκριμένα, η ρύθμιση μιας διαταραχής της τάσης ανάγεται στην επίλυση ενός ολικού προβλήματος βελτιστοποίηση. Σε ορισμένα, χρονικά παράθυρα παρατήρησης -που ορίζει ο διαχειριστής του δικτύου- αποστέλλονται στον κεντρικό ελεγκτή δεδομένα των μετρήσεων από τους ζυγούς που λαμβάνονται μετρήσεις. Μέσω κατάλληλων υπολογισμών προκύπτουν τα νέα σημεία λειτουργίας των επιμέρους μονάδων (πυκνωτών, γεννητριών και των FACTS), τα οποία αναδιανέμονται πίσω. Το πλεονέκτημα του κεντρικού ελέγχου είναι ότι τις περισσότερες φορές, αξιοποιεί βέλτιστα τα δεδομένα μετρήσεων καταλήγοντας σε λύσεις που αφορούν την καλύτερη δυνατή διαχείριση και αξιοποίηση των μέσων ρύθμισης. Τα περισσότερα ΣΗΕ είναι εξοπλισμένα με συστήματα SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), μέσω των οποίων επιτηρούν μια έκταση δικτύου. Λαμβάνουν όπως αναφέρθηκε πληροφορίες μέσω επικοινωνίας από διάφορες μετρητικές διατάξεις τα RTU (*Remote Terminal Unit*), στις οποίες μπορούν να αποστέλλουν εντολές λειτουργίας μέσω των MTU (*Master Terminal Unit*).

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν συστήματα αυξημένης ευφυΐας με τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνικών ρύθμισης που συναντώνται στα άλλα συστήματα ρύθμισης. Σημαντικά μειονεκτήματα των κεντρικών συστημάτων ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- Ο μεγάλος όγκος, αφενός των δεδομένων που λαμβάνει ο κεντρικός ελεγκτής από τα μετρητικά, τα οποία καλείται να διαχειριστεί επιλύοντας σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, και αφετέρου η διανομή των εντολών προς τα συστήματα ρύθμισης του δικτύου σύμφωνα με τις μεταβλητές απόφασης που εξάγονται από το πρόβλημα. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα για συστήματα πολυάριθμων ζυγών, ενώ κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ορισμένης ταχύτητας.
- Η ενδεχόμενη αποτυχία ή αστοχία ικανοποίησης μεταβλητών ελέγχου του κεντρικού ελεγκτή μπορεί να αποφέρει μερική ή ολική απώλεια ελέγχου του συστήματος. Με άλλα λόγια, ένας ελεγκτής κεντρικού τύπου δεν είναι δυνατό να εξασφαλίζει την επιθυμητή στιβαρότητα και αξιοπιστία.
- Μειωμένη ευφυΐα ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχει αναφερθεί στα σύγχρονα δίκτυα παρουσιάζεται η έννοια των μικροδικτύων, τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις λειτουργούν σε απομονωμένη κατάσταση. Προφανώς, δεν είναι δυνατός έλεγχος αυτός μέσω ενός αμιγούς κεντρικού ελέγχου. Επιπρόσθετα, η εμφάνιση της τοπικής παραγωγής πέραν των επιδράσεων που επιφέρει στη λειτουργία του δικτύου, συχνά απαιτείται διαφορετικών κριτηρίων και στόχων τα οποία θα είναι προς όφελος του καταναλωτή παραγωγού.

Για τους παραπάνω λόγους γίνεται αντιληπτό ότι είναι απαραίτητος ο εκσυγχρονισμός της τεχνικής ελέγχου του δικτύου, είτε με την χρήση υβριδικών συστημάτων που θα ενσωματωθούν στον κεντρικό έλεγχο, είτε με την εισαγωγή αποκεντρωμένου ελέγχου ρύθμισης τάσης, όπως προτείνεται στην παρούσα διπλωματική, είτε με τοπικό έλεγχο μέσω συντονισμένης επικοινωνίας με τα συμβατικά μέσα ρύθμισης.

5.3.2 Τοπικός Έλεγχος

Ο τοπικός έλεγχος τάσης βασίζεται πρακτικά σε μια μορφή αποκεντρωμένου ελέγχου, καθώς έχει όλα τα χαρακτηριστικά της αυτόνομης λειτουργίας. Βασίζεται στην επίλυση του προβλήματος σε επιμέρους τοπικά προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, σε επίπεδο ρύθμισης τάσης, κάθε μονάδα ελέγχου αναλαμβάνει να επιλύσει τυχόν πρόβλημα, μόνο του ζυγού που προβλέπεται χωρίς να επικοινωνεί με τους υπόλοιπους ελεγκτές. Το επόμενο βήμα εξέλιξης αυτής της τεχνικής είναι διαχείριση όλων αυτών των μέσων από σύγχρονο (ως προς την επικοινωνία) και συντονισμένο έλεγχο, με την ύπαρξη κεντρικών ελεγκτών ανά περιοχές δικτύου.

5.3.3 Αποκεντρωμένος Έλεγχος

Η έννοια του αποκεντρωμένου ελέγχου έγκειται στην κατάτμηση του αντίστοιχου κεντρικού προβλήματος βελτιστοποίησης, σε επιμέρους υποπροβλήματα τα οποία είναι δυνατό να επιλυθούν κατανεμημένα. Η κατανεμημένη επίλυση των προβλημάτων θα πρέπει να συντονίζεται μέσω συστημάτων ορισμένης νοημοσύνης όπως αυτό των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Όπως περιγράφεται και στην προτεινόμενη αποκεντρωμένη μέθοδο ρύθμισης τάσης, το πρόβλημα της τάσης σε έναν ζυγό επιλύεται τοπικά με τους γειτονικούς κόμβους του εκάστοτε προβληματικού ζυγού, και μονάχα όταν απαιτείται ζητείται περαιτέρω υποστήριξη.

Τα σύγχρονα δίκτυα καλούνται να διαχειριστούν τεράστιο όγκο δεδομένων με αυξημένη πολυπλοκότητα ειδικότερα με την εισαγωγή μονάδων ΔΠ, όπου θα πρέπει να ικανοποιούνται επιπλέον αντικειμενικοί στόχοι. Προτείνεται επομένως, η εφαρμογή τέτοιων αποκεντρωμένων σχημάτων ρύθμισης τάσης, με σκοπό την προώθηση της ορθής και ευφυούς λειτουργία του δικτύου.

Κεφάλαιο 6 - Ανάλυση Ευαισθησιών Τάσης

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια των ευαισθησιών τάσης ως προς τη μεταβολή αέργου ισχύος. Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης τάσης βασίζεται στην αξιοποίηση της υψηλής ενσωμάτωσης μονάδων ΔΠ, μέσω της διαχείρισης της διαθέσιμης άεργου αυτών. Σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής όταν μια γεννήτρια εγχέει/απορροφά ισχύ (ενεργό ή άεργο), τότε οι τάσεις όλων των ζυγών αυξάνονται/μειώνονται, με τη διαφορά ότι κάποιες επηρεάζονται περισσότερο. Η επίδραση αυτή μελετάται μέσω των ευαισθησιών τάσης. Με τον τρόπο αυτό αποτιμώντας τις τιμές των ευαισθησιών τάσης ρυθμίζεται η τάση με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μεταβολών άεργου ισχύος των γεννητριών ή μονάδων ΔΠ. Στην προτεινόμενη μέθοδο θα χρησιμοποιηθούν οι μεταβολές αέργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης καθώς σε ένα δίκτυο διανομής εξαιτίας του χαμηλού λόγω R/X, η επίδραση των αέργων μεταβολών στην τάση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των ενεργών μεταβολών.

6.2 Επισκόπηση Ευαισθησιών

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται μια προτεινόμενη από τη βιβλιογραφία [33] ανάλυση ευαισθησιών τάσης ως προς άεργες μεταβολές, η οποία εξετάστηκε στα πλαίσια της ρύθμισης τάσης. Όπως θα αναφερθεί, οι ευαισθησίες αυτές δεν χρησιμοποιήθηκαν τελικά στην ανάπτυξη του τελικού σχήματος ρύθμισης τάσης, καθώς αποτελούν μια προσέγγιση η οποία δεν εξυπηρετούσε τις απαιτούμενες ανάγκες.

Στην προκείμενη περίπτωση προτείνεται μια υλοποίηση για τη ρύθμιση τάσης με καταναμημένο τρόπο με τη βοήθεια της υποστήριξης των MAS. Για κάθε πρόβλημα τάσης σε κάποιο ζυγό, πραγματοποιείται η προσπάθεια ρύθμιση με την βοήθεια των μονάδων ΔΠ, με την έγχυση ή απορρόφηση άεργου ισχύος. Για να είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος με καταναμημένο τρόπο θα πρέπει ο κάθε agent που θα περιλαμβάνει μονάδα παραγωγής να είναι σε θέση να εκτιμά την απαιτούμενη ποσότητα αέργου αντιστάθμισης για τη ρύθμιση της τάσης του ζυγού με το πρόβλημα. Η δυνατότητα εκτίμησης της απαιτούμενης άεργου ισχύος, αποδίδεται με την έννοια της ευαισθησίας (β_j) τάσης ως προς μεταβολές άεργου:

$$\beta_j = \frac{\Delta V_n}{\Delta Q_j}$$

όπου ΔV_n είναι η μεταβολή της τάσης σε έναν ζυγό n εξαιτίας της μεταβολής αέργου ισχύος από την γεννήτρια στον κόμβο j .

Το ζήτημα είναι πως μπορούν να αποτιμηθούν οι τιμές αυτές των ευαισθησιών τάσης β_j . Ο υπολογισμός αυτός πρακτικά μπορεί να βασιστεί στην Ιακωβιανή μήτρα καθώς περιλαμβάνονται σε αυτήν -οι όροι ευαισθησίας- -όπως φαίνεται κατά την ανάλυση ρών φορτίου. Ωστόσο, ο υπολογισμός αυτών για την δομή ενός ακτινικού δικτύου μπορεί να απλοποιηθεί ιδιαίτερα. Συγκεκριμένα, ορισμένη έγχυση/απορρόφηση ΔQ σε ένα κόμβο του δικτύου i προκαλεί αύξηση τάσης κατά ΔV_i στον κόμβο i αλλά και σε όλους τους κατάντη κόμβους ($\Delta V_i = \Delta V_{i+1}$), αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει κάποια άλλη μεταβολή φορτίων ή παραγωγών. Αυτό προκύπτει από το ότι οι γραμμικοποιημένες σχέσεις τάσης - ισχύος τυπικά αποτελούν περιγραφικές σχέσεις για δίκτυο dc, όπου η μεταβολή της ισχύος σε ένα κόμβο προκαλεί την ίδια μεταβολή στην τάση στους κατάντη κόμβους. Συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε ότι $f(v) = Q$ ως γραμμική προσέγγιση τότε η μεταβολή που θα προκαλεί πιθανή έγχυση ή απορρόφηση αέργου (ΔQ) συνεπάγεται και μια μεταβολή στο ρεύμα του κυκλώματος, που δημιουργεί ανάλογη μεταβολή σε όλους τους κατάντη κόμβους.

Μέσω της ανάλυσης των γραμματικοποιημένων μεγεθών έχουμε σε γενική περίπτωση μεταβολών αέργου ισχύος στους κόμβους κατά ΔQ :

$$[\Delta Q] = [J_{qv} - J_{q\delta} J_{p\delta}^{-1} J_{pv}] [\Delta |V|] \Leftrightarrow \Delta |V| = K_Q \Delta Q$$

Με άλλα λόγια, η θεώρηση ότι για δεδομένη μεταβολή κατά ΔQ_i διατηρώντας τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά θα είναι ($\Delta P=0$):

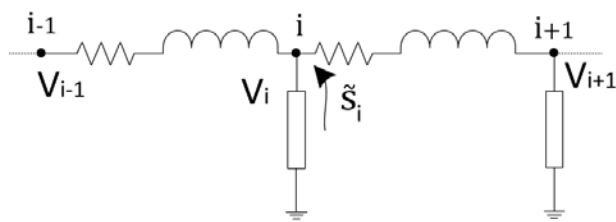
$$\begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \vdots \\ \Delta |V_i| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1i} & \dots & K_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1} & \dots & K_{ii} & \dots & K_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \dots & K_{ni} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \vdots \\ \Delta |V_i| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1i} \\ \vdots \\ K_{ii} \\ \vdots \\ K_{ni} \end{bmatrix} \Delta Q_i$$

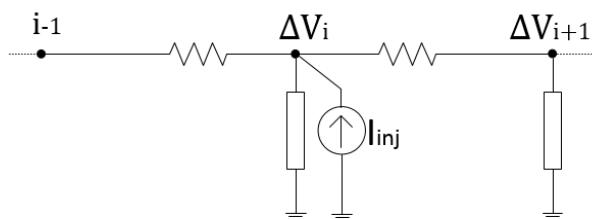
Γενικά, οι εξισώσεις ρών ισχύος για ένα ακτινικό δίκτυο δίνονται από την εξίσωση:

$$\vec{S}_i = P_i + jQ_i = \vec{V}_i^2 [y_{(i,i+1)} + y_{(i,i-1)}] - \vec{V}_i [\vec{V}_{i+1} \cdot y_{(i,i+1)} + \vec{V}_{i-1} \cdot y_{(i,i-1)}]$$

όπου $y_{(i,j)}$ το εκάστοτε στοιχείο της μήτρας του δικτύου Y_{bus} , ενώ τα υπόλοιπα διανύσματα είναι τάσης.



Εικόνα 6.1 Τμήμα ακτινικού δικτύου



Εικόνα 6.2 DC ισοδύναμο, μεταβολή αέργου στον i

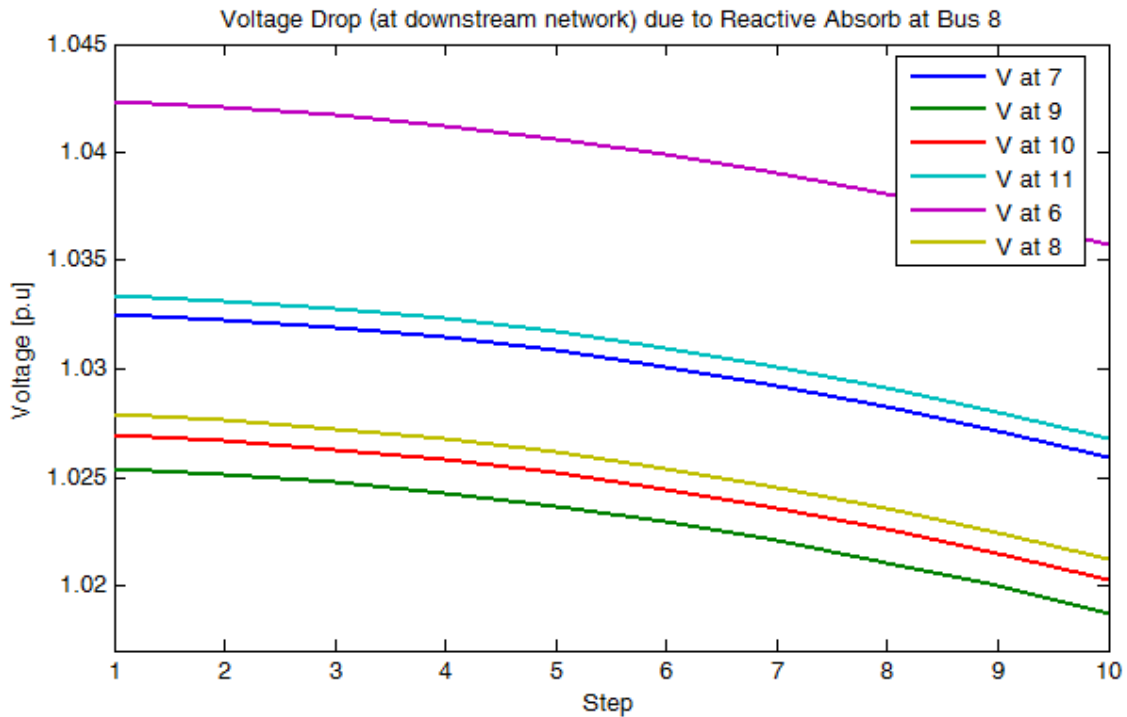
Η τελευταία απλοποίηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τιμή της ευαισθησίας τάσης μπορεί να προκύψει από τον εκάστοτε agent που διαθέτει μονάδα παραγωγής, κάθε φορά που εγχέει ή απορροφά άεργο ισχύ στο δίκτυο. Η λογική αυτή αναπτύχθηκε σε κώδικα για κάθε agent προκειμένου να αποτιμάται η τιμή της ευαισθησίας τους.

Οι συγκεκριμένες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για το δίκτυο 13 κόμβων που αναλύεται στο κεφάλαιο των προσομοιώσεων. Παραθέτουμε δυο γραφήματα για τη μεταβολή της τάσης ως προς εγχύσεις και απορροφήσεις σταθερών βημάτων άεργων μεταβολών. Συγκεκριμένα για την γεννήτρια του κόμβου 8 θεωρούμε ότι σε κάθε επαναληπτικό βήμα (συνολικά 11 βήματα) εγχέονται 35 kVAr.

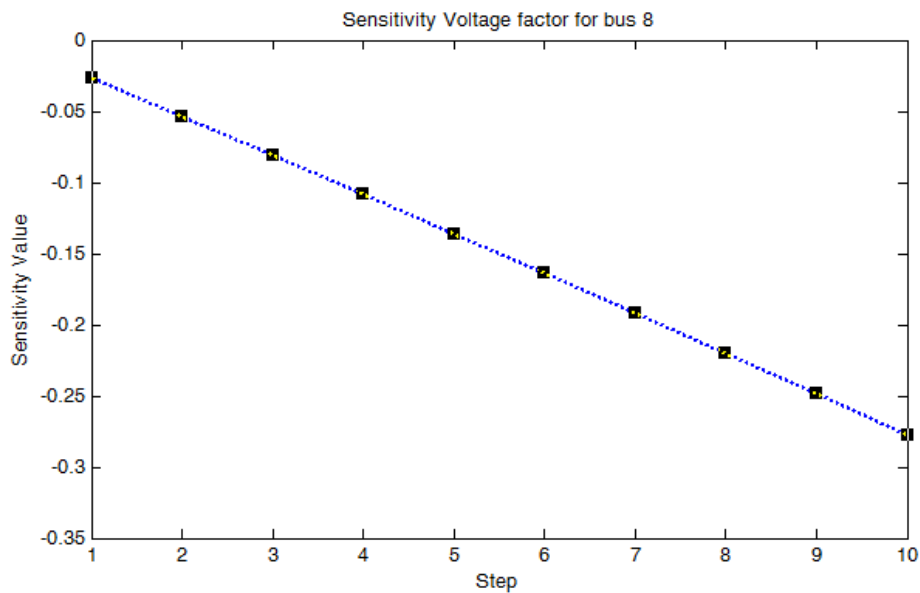
Όπως παρατηρούμε και από την εικόνα 6.3 η μεταβολή της τάσης σε κάθε κατάντη ζυγό (6,7,9,10 και 11) είναι ίδια με τη μεταβολή της τάσης που επισυμβαίνει στο ζυγό 8, στον οποίο πραγματοποιείται και κάθε φορά η μεταβολή αέργου ισχύος.

Προφανώς οι τιμές των ευαισθησιών εν προκειμένω είναι αρνητικές αφού αποτελούν τις κλίσεις των καμπυλών τάσεις, καθώς η απορρόφηση αέργου προκαλεί πτώση τάσης. Η διακύμανση των τιμών της ευαισθησίας οφείλεται στο διαφορετικό σημείο προσέγγισής τους, δηλαδή αν υπάρχει ανοχή από τα όρια της γραμμικοποίησης των σχέσεων τάσεις ισχύος.

Παρατηρούμε επίσης τη διακύμανση της κλίσης κατά την καμπύλωση της τάσης στην εικόνα 6.3.



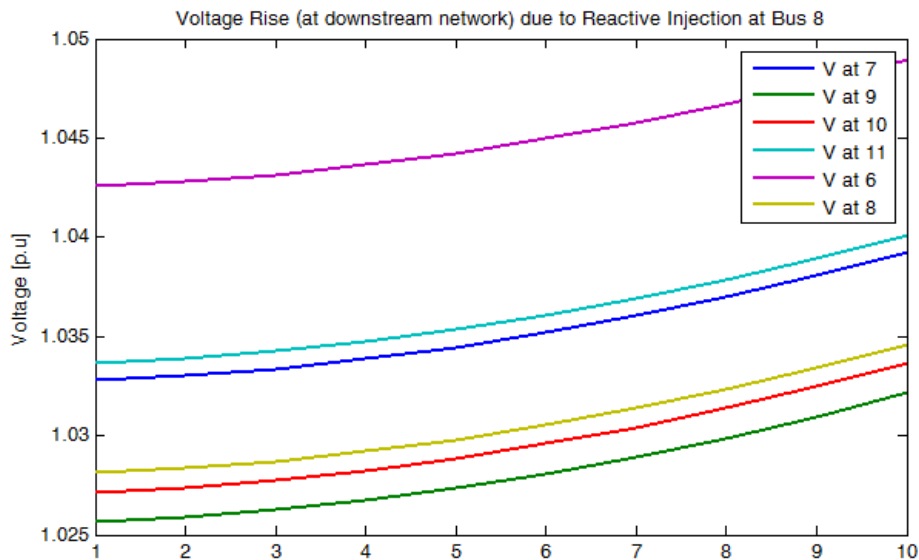
Εικόνα 6.3 Καμπύλες τάσεων για κάθε βήμα απορρόφησης αέργου ισχύος στον 8, για το δίκτυο -εικόνα 6.7-



Εικόνα 6.4 Τιμές ευαισθησίας τάσης(κλίσης καμπύλης τάσης) σε κάθε βήμα

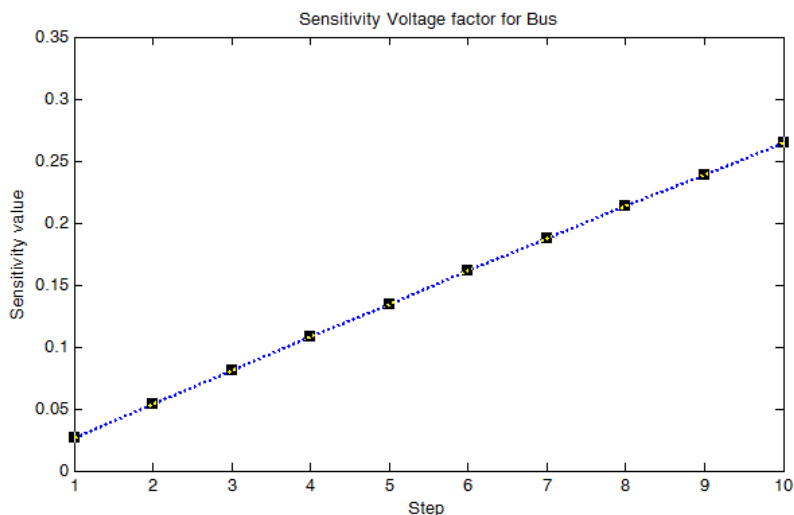
Η τιμή της ευαισθησίας τάσης μπορεί επομένως να υπολογιστεί στον ίδιο το ζυγό έγχυσης - εν προκειμένω του 8- από την κλίση της καμπύλης τάσης. Οι τιμές αυτές για τα διάφορα σημεία της καμπύλης έχουν αποτυπωθεί στην εικόνα 6.4.

Τα ίδια αποτελέσματα, μπορούν να προκύψουν και για την έγχυση ισχύος από το ζυγό της μονάδας παραγωγής 8. Οι αντίστοιχες τιμές των ευαισθησιών θα πρέπει να είναι ίδιες και για την έγχυση άεργου.



Εικόνα 6.5 Καμπύλες τάσεων για κάθε βήμα έγχυσης αέργου ισχύος στον 8, για το δίκτυο -εικόνα 6.9-

Η ανύψωση της τάσης εξαιτίας της έγχυσης ισχύος έχει την ίδια επίδραση στη μεταβολή της τάσης σε όλους τους κατάντη ζυγούς. Οι τιμές των ευαισθησιών τάσης στην περίπτωση αυτή παρουσιάζουν θετικές τιμές εξαιτίας της έγχυσης άεργου ισχύος που προκαλεί ανύψωση τάσης.



Εικόνα 6.6 Τιμές ευαισθησίας τάσης(κλίσης καμπύλης τάσης) σε κάθε βήμα

Καταλήγοντας οι ευαισθησίες που αποδόθηκαν σε αυτή την ενότητα δεν αξιοποιήθηκαν στην προτεινόμενη τεχνική αποκεντρωμένης ρύθμισης τάσης, καθώς αποδίδουν σχέση

εξάρτησης τάσης μόνο για τους κατάντη ζυγούς. Πιο συγκεκριμένα, η παραπάνω μέθοδος αποτίμησης ευαισθησιών τάσης για μεταβολές αέργου αποδίδουν την ευαισθησία τάσης ως προς τον ίδιο ζυγό έγχυσης ή απορρόφησης αέργου ισχύος και τους κατάντη αυτού. Το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα υπολογισμού της ευαισθησίας σε κάθε ελεγκτή, χωρίς τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Επίσης είναι εφικτή η ενημέρωση της ευαισθησίας αυτής για τις διάφορες καταστάσεις φόρτισης του δικτύου. Στον προτεινόμενο έλεγχο χρειάζονται οι ευαισθησίες και προς τους ανάντη ζυγούς, όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι τιμές αυτών των ευαισθησιών αποδίδονται από την επόμενη μέθοδο ανάλυσης ευαισθησιών για ακτινικά δίκτυα.

6.3 Ανάλυση Ευαισθησιών Τάσης για Ακτινικό Δίκτυο Διανομής

6.3.1 Ανάδειξη χρησιμότητας μεθόδου

Η κλασική θεωρία ανάλυσης ευαισθησιών τάσης προκύπτει από τις γραμμικές προσεγγίσεις της Ιακωβιανής μήτρας, η οποία αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2. Η Ιακωβιανή μήτρα αποδίδει τις σχέσεις των διανυσμάτων κατάστασης (μέτρο και γωνία της τάσης) του δικτύου ανάλογα με τις ενεργές και άεργες μεταβολές σε κάθε ζυγό, μέσω των οποίων καταστρώνεται και το πρόβλημα ροής φορτίου. Όπως έχει αναφερθεί στα πλαίσια της ΥΤ είναι εύκολο να αξιοποιηθεί το χαρακτηριστικό του χαμηλού λόγου R/X (συχνά η αντίσταση αμελείται), όπου μπορεί η μήτρα Ιακωβιανών ευαισθησιών να απλοποιηθεί (*Pθ-QV decoupling*).

$$\begin{bmatrix} [\Delta V] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial \Delta P}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \right] \\ \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \right] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ασθενείς σχέσεις (Pθ-QV), τροποποιούνται με την προσθήκη του μοναδιαίου πίνακος στο γινόμενο

$$\begin{bmatrix} [\Delta V] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial \Delta P}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \right] \\ \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \right] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Οι παραπάνω ευαισθησίες χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε θέματα πρωτογενούς και δευτερογενούς τεχνικών ρύθμισης τάσης στα δίκτυα μεταφοράς. Για τον έλεγχο της τάσης στα δίκτυα διανομής δεν θα μπορούσε να εφαρμοσθεί η τελευταία αποζευγμένη σχέση καθώς οι αυξημένες τιμές του λόγου R/X, ενισχύει τις συζεύξεις των σχέσεων μεταξύ μεταβολών ΔP , ΔQ και ΔV , $\Delta \theta$.

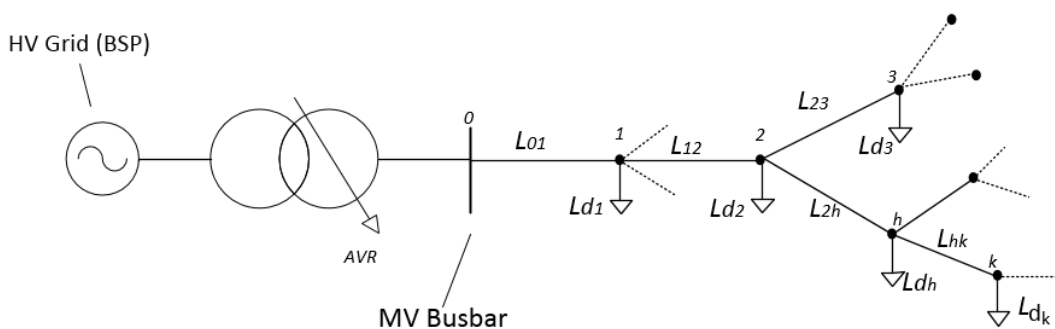
Η υπολογιστική πολυπλοκότητα της παραπάνω μεθόδου καθώς και η ανάγκη γνώσης όλων των δεδομένων τάσης και γωνίας του δικτύου, είναι περιττό να εφαρμοσθούν για τον έλεγχο της τάσης ενός ακτινικού δικτύου διανομής. Για το λόγο αυτό αποδίδεται η μέθοδος αυτή, η οποία αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά το ακτινικού δικτύου προς όφελος της αποφυγής περιττών υπολογισμών σε περίπτωση εφαρμογής της (6.1).

Σε ένα ακτινικό δίκτυο, απαιτούνται μονάχα τα μέτρα των τάσεων για τον έλεγχο της τάσης. Ο κυμαινόμενος λόγος των ακτινικών δικτύων -όπου στις περισσότερες περιπτώσεις το R έχει αξιοσημείωτη τιμή δεν είναι δυνατό να παραληφθεί-, σημαίνει ότι μεταβολές ενεργού ισχύος συνεπάγονται μεταβολές στην τάση των ζυγών. Σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής όταν μια γεννήτρια εγχέει ισχύ (ενεργό ή άεργο), τότε οι τάσεις όλων των ζυγών αυξάνονται, με τη διαφορά ότι κάποιοι επηρεάζονται περισσότερο.

6.3.2 Ανάλυση ευαισθησιών τάσης ακτινικών δικτύων διανομής [19][34][35]

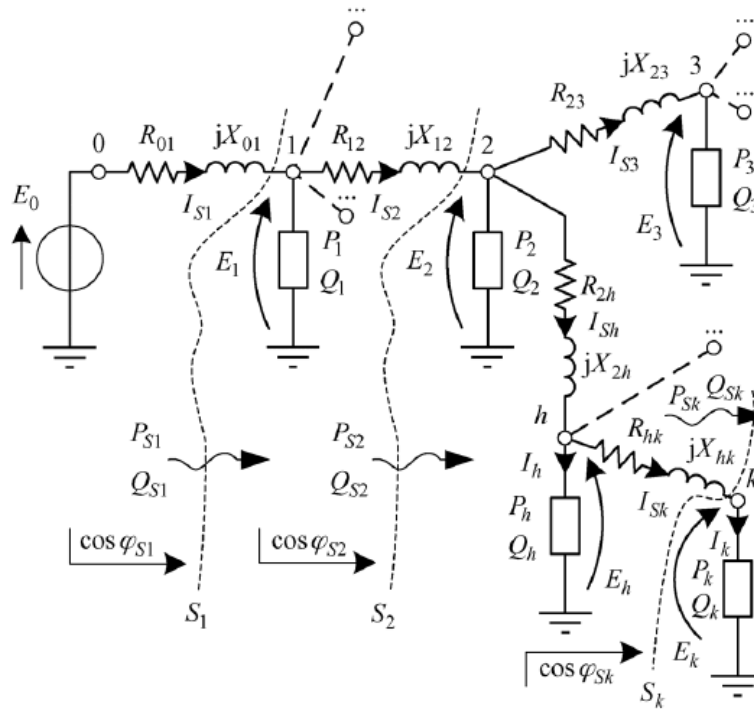
Έστω το δίκτυο διανομής της εικόνας 6.7, όπου θεωρούμε ότι τα φορτία L_{d_i} είναι ζυγοί PQ. Στην εικόνα αποδίδεται το μονοφασικό ισοδύναμο του δικτύου, στο οποίο αμελούνται οι εγκάρσιες χωρητικότητες των γραμμών. Επίσης, γίνονται οι εξής δυο παραδοχές για την προτεινόμενη μέθοδο ανάλυσης ευαισθησιών:

- Το θεωρούμενο δίκτυο τροφοδοτείται από ένα αμιγώς συμμετρικό σύστημα (BSP) τάσεων με την έννοια ότι οι εμφανιζόμενες τάσεις είναι θετικές ακολουθίας.
- Τα φορτία που είναι εγκατεστημένα θεωρούνται συμμετρικά.



Εικόνα 6.7 Δίκτυο διανομής

Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να αναπαραστήσουμε τις γραμμές (L_{ij}) του δικτύου από τις ισοδύναμες R L θετικής ακολουθίας. Ο εικονιζόμενος ζυγός 0, απεικονίζει τον ζυγό του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ ο οποίος εμφανίζει σταθερή τάσης. Η αναφερόμενη σταθερή τάση σε φασική ονομαστική τιμή είναι $E_o = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = \frac{20}{\sqrt{3}} kV = 11.547 kV$. Στην επόμενη εικόνα αποδίδεται το μονοφασικό ισοδύναμο με τις παραπάνω αντικαταστάσεις.



Εικόνα 6.8 Μονοφασικό ισοδύναμο δικτύου [35]

Καθώς ο ζυγός ταλάντωσης είναι ρυθμισμένος σε τάση E_0 , μπορούμε να λάβουμε ως V_{0i} την τάση οποιουδήποτε ζυγού(E_i) ως προς τον ζυγό αναφοράς, δηλαδή

$$V_{0i} = E_0 - E_1$$

Σε ένα ακτινικό δίκτυο όπως το εικονιζόμενο, υπολογίζεται η τάση ως το άθροισμα τάσεων από τον ζυγό MT μέχρι τον i κόμβο. Επί παραδείγματι,

$$V_{03} = E_0 - E_3$$

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

$$\begin{aligned} V_{03} &= (E_0 - E_1) + (E_1 - E_2) + (E_2 + E_3) = \\ &= V_{01} + V_{12} + V_{23} \end{aligned}$$

Γενικεύοντας το παραπάνω καταλήγουμε:

$$V_{0i} = E_0 - E_1 + E_1 + \dots + E_{i-1} - E_{i-1} + E_i = \sum V_{ad} \quad (a, d) \in P$$

όπου ως P θεωρείται το μονοπάτι που περιλαμβάνει τους επιμέρους ζυγούς από τον 0 έως τον i .

Στο προκείμενο σχήμα η διαφορά τάσης μπορεί να καθοριστεί από την σχέση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο (3.2), βάση των δεδομένων των γραμμών ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{hk} &= E_h - E_k = R_{hk}I_{sk} \cos \varphi_{Sk} + X_{hk}I_{sk} \sin \varphi_{Sk} \\ &= \frac{E_k R_{hk} I_{sk} \cos \varphi_{Sk} + E_k X_{hk} I_{sk} \sin \varphi_{Sk}}{E_k} \\ &= \frac{P_{Sk} R_{hk} + Q_{Sk} X_{hk}}{E_k} \\ &\cong \frac{P_{Sk} R_{hk} + Q_{Sk} X_{hk}}{E_n} \end{aligned}$$

Η τάση στον παρονομαστή E_k με E_n μπορεί αν αντικατασταθεί με την τάση αναφοράς η οποία στο ανά μονάδα σύστημα είναι 1p.u.

Στη σχέση της μεταβολής της τάσης (V_{hk}) τα P_{Sk}, Q_{Sk} αναφέρονται στις ισχύς που καταναλώνονται από το τον ζυγό h και κάτω. Έστω T το σύνολο των κλάδων κατάντη του ζυγού k . Επομένως, αναφέρονται στις κατάντη του ζυγού k καταναλώσεις φορτίων καθώς και στις ωμικές και άεργες απώλειες των γραμμών.

$$\begin{aligned} P_{Sk} &= \sum_{m \in T} P_m + \sum_{m \in T} P_{ft} \cong \sum_{m \in T} P_m \\ Q_{Sk} &= \sum_{m \in T} Q_m + \sum_{m \in T} Q_{ft} \cong \sum_{m \in T} Q_m \end{aligned}$$

Στις παραπάνω σχέσεις τα P_m και Q_m αποτελούν τις ενεργές άεργες καταναλώσεις ή παραγωγές κατάντη του ζυγού k . Οι δεύτεροι όροι αποτελούν τις ενεργές και άεργων απώλειες επί της γραμμής που εφαρμόζεται η σχέση μεταβολής τάσης. Ωστόσο, οι ενεργές και οι άεργες απώλειες επί των γραμμών αμελούνται λόγω του ότι είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ενεργές και άεργες καταναλώσεις και παραγωγές. Η παρούσα παραδοχή, εξυπηρετεί προκειμένου να ανεξαρτητοποιούνται οι ενεργές και άεργες απώλειες από την πτώση των αντίστοιχων ζυγών, εν προκειμένω τις E_h και E_k . Με την παραδοχή αυτή χάνεται η εξάρτηση της τάσης με τις ενεργές απώλειες πράγμα το οποίο επιφέρει ορισμένο σφάλμα το οποίο θα μελετήσουμε σε επόμενη ενότητα.

Από τις παραπάνω σχέσεις για την μεταβολή της τάσης μεταξύ δυο ζυγών προέκυψε συναρτησιακή σχέση που εμπλέκει τις ενεργές καταναλώσεις ή παραγωγές (P_1, P_2, \dots) και τις άεργες (Q_1, Q_2, \dots).

Επομένως, αν επιλυθεί ως προς την τάση του ζυγού i , λαμβάνουμε

$$\begin{aligned} E_i &= E_o - V_{oi} = E_o - \sum_{ad \in P} V_{ad} \\ &\cong E_o - \sum_{ad} \frac{P_{sk} R_{hk} + Q_{sk} X_{hk}}{E_k} = \\ &= E_o - \sum_{ad} \frac{R_{hk} (\sum_{m \in T} P_m) + X_{hk} (\sum_{m \in T} Q_d)}{E_n} \end{aligned}$$

Λαμβάνουμε έτσι μια πεπλεγμένη έκφραση της τάσης συναρτήσει ενεργού και αέργου ισχύος

$$E_i = f(P_1, P_2, \dots, P_N, Q_1, Q_2, \dots, Q_N) \quad (1)$$

Για τη συνάρτηση αυτή για μεταβολές ενεργού ισχύος είτε αφορά έγχυση είτε απορρόφηση, έστω στον κόμβο j ($\Delta P_j = P_j^f - P_j^0$) και αέργου ($\Delta Q_j = Q_j^f - Q_j^0$) αντίστοιχα, η μεταβολή που προκαλείται στην τάση του κόμβου i θα είναι ΔE_i . Λαμβάνοντας μέσω του ολικού διαφορικού της σχέσης (1):

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \frac{\partial E_i}{\partial P_1} \Delta P_1 + \frac{\partial E_i}{\partial P_2} \Delta P_2 + \dots + \frac{\partial E_i}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial E_i}{\partial Q_1} \Delta Q_1 + \frac{\partial E_i}{\partial Q_2} \Delta Q_2 + \dots + \frac{\partial E_i}{\partial Q_n} \Delta Q_n \\ &= \sum_j^n \frac{\partial E_i}{\partial P_j} \Delta P_j + \sum_j^n \frac{\partial E_i}{\partial Q_j} \Delta Q_j \end{aligned}$$

Στην τελευταία σχέση οι παράγοντες $\partial E_i / \partial P_j$ και $\partial E_i / \partial Q_j$, πρακτικά δείχνουν το μέγεθος της δράσης στη μεταβολή της τάσης του ζυγού i , από τη μεταβολή που επισυνέβη στο ζυγό j ($\Delta P_j, \Delta Q_j$). Οι επιμέρους όροι των μερικών παραγώγων αποτελούν δηλαδή τους όρους ευαισθησιών της ενεργού και αέργου ισχύος.

$$\begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \\ \vdots \\ \Delta E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial P_1} & \frac{\partial E_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial P_N} \\ \frac{\partial E_2}{\partial P_1} & \frac{\partial E_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial E_2}{\partial P_N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial E_N}{\partial P_1} & \dots & \dots & \frac{\partial E_N}{\partial P_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial Q_N} \\ \frac{\partial E_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial E_2}{\partial Q_N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial E_N}{\partial Q_1} & \dots & \dots & \frac{\partial E_N}{\partial Q_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix}$$

σε πιο συμπαγή μορφή είναι:

$$[s_Q][\Delta Q] + [s_P][\Delta P]$$

όπου $[s_P]$ και $[s_Q]$ αποτελούν τις μήτρες ενεργών και άεργων ευαισθησιών, για μεταβολές $[\Delta P]$ και $[\Delta Q]$, μεταβάλλοντας την τάση σε κάθε κόμβο κατά το διάνυσμα $[\Delta E]$.

Πρακτικά, μέσω αυτής της σχέσης μπορούμε να εκτιμήσουμε για μεταβολή της τάσης. Η αποτίμηση των ευαισθησιών συνίσταται σε μια ιδιαίτερα απλή διαδικασία όπως θα φανεί παρακάτω καθώς οι μερικοί παράγωγοι λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

Αναλυτικά, οι όροι ενεργών ευαισθησιών:

$$[s_P] = \left[\frac{\partial E_i}{\partial P_i} \right] = -\frac{1}{E_n} \left[\sum_{ad \in P_i} R_{ad} \left(\sum_{m \in T} \frac{\partial P_m}{\partial P_j} \right) + \sum_{ad \in P_i} X_{ad} \left(\sum_{m \in T} \frac{\partial Q_m}{\partial Q_j} \right) \right]$$

όπου προφανώς ο δεύτερος είναι $\frac{\partial Q_m}{\partial Q_j}$ είναι μηδενικός καθώς τα P και Q δεν παρουσιάζουν εν προκειμένω εξάρτηση. Ο πρώτος όρος είναι:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_m}{\partial P_j} = 1, m = j \\ \frac{\partial P_m}{\partial P_j} = 0, m \neq j \end{cases}$$

Καταλήγουμε επομένως ότι

$$[s_P] = -\frac{1}{E_n} \sum_{ad \in P_i} R_{ad}$$

Υπενθυμίζουμε ότι το σύνολο P_i περιλαμβάνει το σύνολο των κλάδων από τον ζυγό αναφοράς μέχρι τον i .

Αντίστοιχα, προκύπτουν και τιμές των άεργων ευαισθησιών, καταλήγοντας στη σχέση

$$[s_Q] = -\frac{1}{E_n} \sum_{ad \in P_i} X_{ad}$$

Συμπερασματικά, μέσω αυτής της ανάλυσης ευαισθησιών καταλήγουμε ότι η ευαισθησία που παρουσιάζει η τάση του ζυγού i ως προς τις μεταβολές ισχύος ενεργού(αέργου) ισχύος που επισυμβαίνουν στον κόμβο j , αποτελείται από το άθροισμα των αντιστάσεων (αντιδράσεων) των κοινών γραμμών.

Για την παρούσα ανάλυση που θα πραγματοποιήσουμε θα θεωρούμε μονάχα μεταβολές (απορρόφηση ή έγχυση) αέργου ισχύος από τις μονάδες παραγωγής, οι οποίες θα συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης. Με τον τρόπο αυτό στη μήτρα άεργων ευαισθησιών θα υπάρχουν μηδενικά στις στήλες των ζυγών που δεν μεταβάλουν την άεργό τους. Συχνά θα δίνεται συμπυκνωμένη μορφή για ευκολία χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι στήλες μηδενικών.

6.3.3 Επέκταση ευαισθησιών για δίκτυο Χαμηλής Τάσης

Η βασική προϋπόθεση ότι η εφαρμογή των προτεινόμενων ευαισθησιών αφορά δίκτυο MT που εμφανίζει συμμετρία στα μεγέθη του δικτύου αφενός επειδή τροφοδοτείται από συμμετρικές πηγές και αφετέρου λόγω της παρουσίας συμμετρικών φορτίων τροφοδοσίας, είναι γενικά αποδεκτά σε ένα δίκτυο MT.

Η εφαρμογή των ευαισθησιών αυτών είναι δυνατό να εφαρμοσθεί σε ένα δίκτυο XT με ορισμένες τροποποιήσεις.

6.3.4 Μελέτη ακρίβειας ευαισθησιών

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ανάλυσης ευαισθησιών για ακτινικό δίκτυο είναι η μελέτη του σφάλματος που ενσωματώνουν. Γενικά, στο στάδιο της ανάλυσης οι βασικές παραδοχές που αναφέρονται:

- την συμμετρία τάσεων και ρευμάτων που εκρέουν στο δίκτυο, προκειμένου να αμελείται η επίδραση του ουδετέρου σε περίπτωση ύπαρξης του.
- την προσέγγιση της σχέσης που αφορά την πτώση τάσης μεταξύ δυο ζυγών.
- την παράλειψη των ενεργών και άεργων απωλειών σε κάθε γραμμή, αποσυνδέοντας την εξάρτηση απωλειών με το επίπεδο της τάσης.

6.3.5 Σύγκριση με Ιακωβιανές Ευαισθησίες

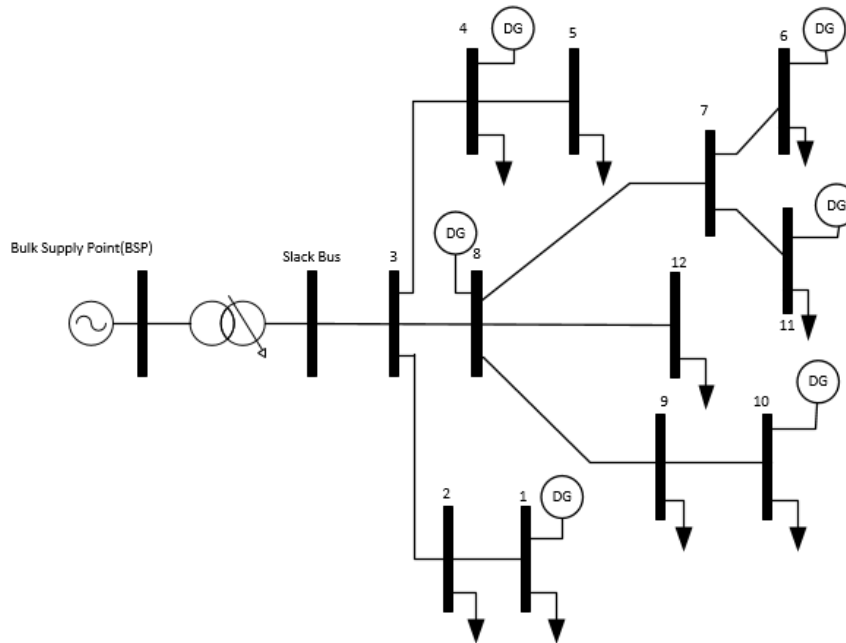
Ένας τρόπος για να επαληθεύσουμε τις προτεινόμενες ευαισθησίες είναι να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τις ευαισθησίες που λαμβάνονται από την Ιακωβιανή μήτρα. Πράγματι στα δίκτυα για τα οποία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις έγινε αυτή η σύγκριση και οι τιμές τους συνέπιπταν. Για μεταβολές στις φορτίσεις του δικτύου οι Ιακωβιανές υπολογίζονται ξανά και το ποσοστό μεταβολής τους είναι πολύ μικρό. Επομένως, αυτό αποτελεί ένα ισχυρό επιχείρημα ότι οι προτεινόμενες ευαισθησίες παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια αν και σταθερής τιμής. Οι ευαισθησίες της Ιακωβιανής μήτρας εμφανίζουν κυμαινόμενη ακρίβεια η οποία συνδέεται άμεσα με το λόγο R/X.

Στο κεφάλαιο των προσομοιώσεων αποδίδονται οι σχετικές μήτρες των δικτύων που προσομοιώνονται, όπου γίνεται αντιληπτή η ομοιότητα των τιμών ευαισθησιών των δυο αυτών κατηγοριών.

6.3.6 Εκτίμηση τάσης μέσω ευαισθησίας για την μελέτη της ακρίβειας

Προκειμένου να εξεταστεί η ακρίβεια των ευαισθησιών που παρουσιάστηκαν, προσομοιώθηκε δίκτυο στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB στο οποίο κάποιος ζυγός j που περιλαμβάνει μονάδας ΔΠ ή γεννήτρια, πραγματοποιεί μια άεργο έγχυση ισχύος προκειμένου να προκαλέσει μια ανύψωση τάσης τόσο στον ίδιο κόμβο και στους υπόλοιπους κόμβους. Γενικά, αν ΔQ_j , ΔQ_m & ΔQ_p , το ποσό έγχυσης σε τυχαίους ζυγούς, τότε στο ζυγό i προκαλείται ανύψωση τάσης κατά $\Delta E_i = s_{ij}\Delta Q_j + s_{im}\Delta Q_m + s_{ip}\Delta Q_p$, όπου s οι επιμέρους ευαισθησίες ως προς τον ζυγό i . Εκτιμώντας την τάση σε κάθε ζυγό μέσω της αντίστοιχής σχέσης εξάγουμε κάθε φορά τα σφάλματα που προκύπτουν, συγκρίνοντας την εκτιμώμενη τάση με την πραγματική τιμή τάσης, η οποία προκύπτει από την ανάλυση ροής φορτίου. Ιδιαίτερα σημαντική αυτή η διαδικασία αποτίμησης των σφαλμάτων που εμπεριέχονται στις ευαισθησίες. Βέβαια όπως θα δούμε οι ακρίβειες των ευαισθησιών είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές.

Τα αναλυτικά στοιχεία του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση θα αποδοθούν αναλυτικά στο κεφάλαιο των προσομοιώσεων. Εν προκειμένω δυο ειδών προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για την αποτίμηση του σφάλματος των ευαισθησιών τάσης.



Εικόνα 6.9 Εξεταζόμενο δίκτυο διανομής 13 ζυγών

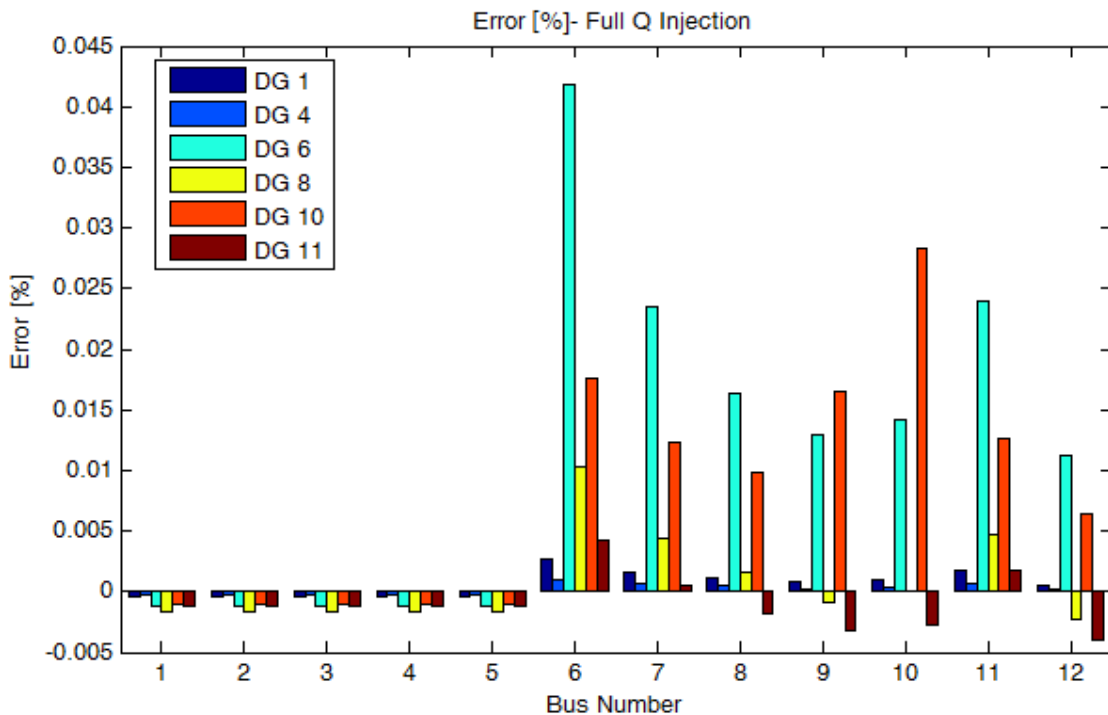
Στην πρώτη προσομοίωση πραγματοποιείται εκτίμηση όλων των τάσεων για την έγχυση όλης της διαθέσιμης άεργου ισχύος μιας εκ των μονάδων ΔΠ κάθε φορά. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά καθώς παρά το μέγεθος του ποσού έγχυσης η εκτίμηση των τάσεων μέσω των ευαισθησιών είναι επαρκής.

Το σφάλμα σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται ως εξής

$$e[\%] = \left(\frac{V_{est} - V_{real}}{V_{real}} \right) 100\%$$

όπου V_{real} είναι η τιμή της πραγματικής τάσης η οποία λαμβάνεται από την ανάλυση ροής ισχύος στο Matpower. Η $V_{est_i} = V_i + \Delta E_i$ αποτελεί την εκτιμώμενη τάση. Ως ΔE_i νοείται η μεταβολή της τάσης στο ζυγό i , για την εκάστοτε μεταβολή άεργου ισχύος.

Όπως παρατηρείται (εικόνα 6.10) το μέγιστο σφάλμα φτάνει το 0,042% πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η μεταβολή στην τάση κάθε ζυγού του δικτύου μπορεί να εκτιμηθεί με εξαιρετική ακρίβεια μέσω της χρήσης των προτεινόμενων ευαισθησιών. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το την εικόνα 6.10, για την περίπτωση έγχυσης της DG_6 εντοπίζεται το μεγαλύτερο σφάλμα. Αυτό συμβαίνει διότι αυτή παρουσιάζει την μεγαλύτερη διαθέσιμη ισχύ εν προκειμένω, και επομένως εισάγει μεγαλύτερο σφάλμα στην ακρίβεια της ευαισθησίας.

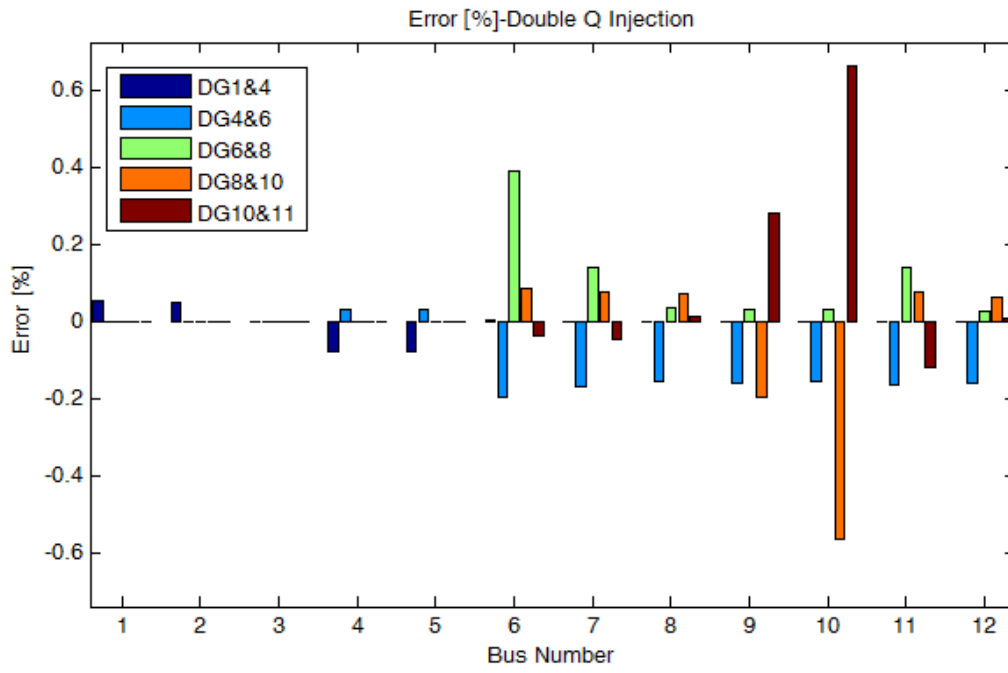


Εικόνα 6.10 Σφάλματα εκτιμώμενων τιμών τάσης

Στη δεύτερη περίπτωση πραγματοποιούμε ταυτόχρονη έγχυση της συνολικής διαθέσιμης αέργου ισχύος δυο μονάδων ΔΠ κάθε φορά. Όπως είναι αναμενόμενο το σφάλμα αυξάνεται σημαντικά. Παρά ταύτα η ευαισθησία αποδίδει με ορισμένη ακρίβεια χιλιοστού την εκτιμώμενη τάση, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.11 το σφάλμα παρουσιάζει μέγιστη τιμή 0.66%. Καταλήγουμε ότι εφόσον υπολογίζεται με ικανοποιητική ασφάλεια η μεταβολή της τάσης μέσω των προτεινόμενων ευαισθησιών, ακόμη και με την πλήρη έγχυση 2 μονάδων DG. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, λαμβάνονται υπ' όψιν τα σφάλματα και χρησιμοποιούνται τιμές υστέρησης στα όρια των τάσεων προκειμένου να μην εμφανίζονται προβλήματα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Συμπερασματικά, για την τοπολογία των ακτινικών δικτύων διανομής περιγράφηκαν δυο μέθοδοι υπολογισμού ευαισθησιών τάσης. Όπως αναδείχτηκε η σχέση εξάρτησης της τάσης ζυγού του δικτύου με μεταβολές αέργου ισχύος εξαρτώνται από την τοπολογική θέση του ζυγού που μελετάται η επίδραση στην τάση ως προς τη πηγή αέργου μεταβολών. Και στις δυο μεθόδους αναδείχτηκε ότι η μεταβολή στους κατάντη κόμβους του ζυγού που πραγματοποιούνται οι μεταβολές η επίδραση στην τάση είναι ισόποση. Αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά αυτά στο επόμενο κεφάλαιο αποδίδεται η προτεινόμενη αποκεντρωμένη τεχνική ρύθμισης τάσης του δικτύου.



Εικόνα 6.11 Σφάλματα ευαισθησιών τάσης για διπλές εγχύσεις αέργου ισχύος

Κεφάλαιο 7- Αποκεντρωμένη Ρύθμιση Τάσης

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η αναλυτική περιγραφή της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου ρύθμισης τάσης.

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στην αξιοποίηση της απλής διάταξης των ακτινικών δικτύων και της υψηλής διείσδυσης της ΔΠ προκειμένου να ρυθμίζει την τάση με τη χρήση peer-to-peer (P2P) επικοινωνίας. Το επίπεδο της επικοινωνίας μεταξύ των ελεγκτών δεν θα εξεταστεί, καθώς για ευκολία θα υποθέσουμε ότι στα εξεταζόμενα δίκτυα είναι ενσωματωμένοι ευφυής πράκτορες μέσω των οποίων είναι δυνατή η μεταξύ τους επικοινωνία -επικοινωνία γειτονικών κόμβων-.

Η αποκεντρωμένη μέθοδος ρύθμισης τάσης αναλαμβάνει εν προκειμένω την διαχείριση της διαθέσιμης αέργου ισχύος των μονάδων παραγωγής με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης. Όπως θα δειχθεί η επίλυση του προβλήματος της τάσης επικεντρώνεται στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης των συνολικών μεταβολών αέργου ισχύος. Απώτερος σκοπός είναι η ορθή διαχείριση της αέργου ισχύος των μονάδων ΔΠ προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα της τάσης.

7.2 Εισαγωγή στην προτεινόμενη αποκεντρωμένη μέθοδο ρύθμισης τάσης

Στην ανάλυση της προτεινόμενης μεθόδου θα χρησιμοποιηθεί η έννοια του ισοδυνάμου γράφου (ή δέντρου) του εξεταζόμενου κάθε φορά δικτύου.

Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης βασίζεται στα εξής επιμέρους επίπεδα:

- Τοπική ρύθμιση τάσης (Local Regulation) (1ο επίπεδο)
- Ρύθμιση τάσης σε συνεργασία με γειτονικούς κόμβους (Adjacent Regulation) (2ο επίπεδο)
- Ρύθμιση τάσης σε συνεργασία με τους κατάντη ζυγούς (Downstream Support) (3ο επίπεδο)
- Ρύθμιση τάσης σε συνεργασία με ανάντη και κατάντη ζυγούς (Downstream & Upstream Support) (4ο επίπεδο)

Εύρεση πιο απομακρυσμένων ζυγών

Πριν αναλυθούν τα επιμέρους επίπεδα επίλυσης, να αναφερθεί ότι κάθε πράκτορας που εντοπίζει πρόβλημα τάσης στο ζυγό του, ενημερώνεται για τυχόν κατάντη κόμβους με τάση

εκτός ορίων. Κάθε ένας πράκτορας ενημερώνει και ενημερώνεται. Σκοπός είναι να ευρεθεί ο πιο απομακρυσμένος ζυγός ο οποίος παρουσιάζει πρόβλημα στην τάση. Με το πέρας αυτής της αναζήτησης, θα πρέπει να ενημερώνεται ο εκάστοτε πράκτορας αν υπάρχει κατάντη πρόβλημα και σε ποιον ζυγό. Αν κάποιος ζυγός έχει περισσότερα φύλλα -έστω 2-, τότε αν και στους δυο κλάδους εμφανίζει πρόβλημα τότε οφείλει να επιδώσει προτεραιότητα εκκίνησης ρύθμισης τάσης στον πιο απομακρυσμένο. Κατά το προτεινόμενο σχήμα επίλυσης, εκτός από το πρώτο στάδιο όπου όλοι οι πράκτορες ΔΠ που εμφανίζουν πρόβλημα να το επιλύσουν-, στα υπόλοιπα ένας μόνο κόμβος θα επιχειρεί τη ρύθμιση της τάσης με τα επίπεδα (2-4). Με άλλα λόγια, με το πρώτο επίπεδο της τοπικής ρύθμισης, επιχειρούν όλες οι μονάδες ΔΠ που παρουσιάζουν πρόβλημα τάσης να το επιλύσουν, σύμφωνα βέβαια με την προτεραιότητα που εξηγήθηκε.

Αν το πρόβλημα τάσης δεν επιλυθεί με το επίπεδο 1, τότε ακολουθώντας ξανά την προτεραιότητα, επιχειρείται από τον πιο απομακρυσμένο η ρύθμιση βάση των επιπέδων 2-4. Στην περίπτωση, που δεν ρυθμιστεί η τάση με κάποιο από τα επίπεδα αυτά τότε επιχειρεί ο αμέσως επόμενος ζυγός που έχει προτεραιότητα, δηλαδή αυτός που είναι αμέσως πιο απομακρυσμένος μετά τον αναφερόμενο.

Τοπική ρύθμιση τάσης

Το πρώτο επίπεδο ρύθμισης τάσης βασίζεται στην προσπάθεια ρύθμισης τάσης με τις γεννήτριες ή DG οι οποίες εμφανίζουν πρόβλημα στην τάση του ζυγού τους. Η κάθε γεννήτρια εκτιμά την απαιτούμενη άεργο αντιστάθμιση με τη χρήση του παράγοντα ευαισθησίας τάσης ως προς το ζυγό του. Πιο συγκεκριμένα, αν ο ζυγός j του δικτύου περιλαμβάνει μονάδα παραγωγής τότε η απαιτούμενη άεργος μεταβολή προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση του:

$$\Delta Q_j = \frac{\Delta E_j \pm E_{hysteric}}{s_{jj}} [p.u]$$

όπου ως $\Delta E_j = |E_j - E_{limit}|$ E_j είναι η τρέχουσα τιμή της τάσης του και E_{limit} η μέγιστη ή ελάχιστη τιμή επιτρεπόμενης τάσης. και s_{jj} της ευαισθησίας τάσης αποτελείται από το συνολικό άθροισμα των αντιδράσεων των γραμμών που διασυνδέουν τον κόμβο j από το ζυγό αναφοράς.

Στη παρούσα ρύθμιση τάσης τα όρια αυτά θα θεωρούνται $0,97p.u$ και $1,03p.u$, για να προλαμβάνονται τα προβλήματα στη χαμηλή τάση σε περίπτωση όπου δεν καταλήξει σε λύση η προτεινόμενη μέθοδος. Ο όρος $E_{hysteric}$, η τιμή υστέρησης που τίθεται εξαιτίας πιθανής ανακρίβειας της ευαισθησίας σε περίπτωση έγχυσης ή απορρόφησης μεγάλου ποσού ισχύος. Η ακρίβεια των ευαισθησιών τάσης έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 6. Καθώς οι ευαισθησίες αποτελούν παράγοντες εκτίμησης δεν είναι δυνατό να τοποθετηθεί

χωρίς την προσθήκη αυτής της τιμής υστέρησης. Η τιμή της ανοχής αυτής τοποθετείται ως 0,001 p.u και σύμφωνα με τις προσομοιώσεις θα δούμε ότι επαρκεί. Με άλλα λόγια, στα πλαίσια υλοποίησης του κώδικα στη MATLAB αν δεν τοποθετηθεί αυτό το όριο τότε ενδέχεται να αποφασίζεται λανθασμένα η τοπική ρύθμιση. Το όριο του 0.001 είναι παραπάνω από επαρκές καθώς προτιμήθηκε η αυτή προκειμένου μέσω της τοπικής ρύθμισης τάσης να επωφελούνται και προβλήματα τάσης στους γειτονικούς κόμβους. Με άλλα λόγια η τιμή του ορίου μπορούσε να τοποθετηθεί στο 0.005p.u, δηλαδή λίγο μεγαλύτερο από το μέγιστο σφάλμα που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 6.

$$E_{hysteric} = 1.03 * 0.045\% = 0.0004635p.u$$

Σημειωτέον από το επίπεδο αυτό περνούν όλοι οι ζυγοί που παρουσιάζουν πρόβλημα τάσης και διαθέτουν μονάδα παραγωγής. Το λεπτό σημείο στην προτεινόμενη μέθοδο είναι ότι ο πιο ανάντη ζυγός που παρουσιάζει πρόβλημα τάσης αποδίδει προτεραιότητα επίλυσης στους κατάντη πιο απομακρυσμένους προβληματικούς ζυγούς. Συγκεκριμένα, επίλυση εκκινεί από τον πιο απομακρυσμένο ζυγό και συνεχίζει με τον επόμενο εφόσον δεν έχει επιλυθεί το πρόβλημα. Η υλοποίηση αυτή πραγματοποιείται από τον πιο ανάντη ζυγό ο οποίος λαμβάνει στοιχεία από τους κατάντη ζυγούς για τυχόν προβλήματα τάσης και αν πράγματι υπάρχει τότε δίνει προτεραιότητα στον πιο απομακρυσμένο. Η προτεραιότητα αυτή επιδίδεται για το λόγο ότι οι κατάντη ζυγοί σε ένα ακτινικό δίκτυο παρουσιάζουν ίση ευαισθησία ως προς τους ανάντη με την ευαισθησία τάσης τους ως προς τους εαυτούς τους. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ως q ένα ανάντη ζυγό του j τότε $s_{qj} = s_{jq}$ (ευαισθησία τάσης ζυγού q ως μεταβολές άεργου στον j). Με άλλα λόγια, μια μεταβολή άεργου ισχύος στο κατάντη δίκτυο θα προκαλέσει την ίδια πτώση τάσης σε κάποιον ανάντη ζυγό, με αυτή που θα προκαλούσε η ίδια τοπική μεταβολή άεργου σε αυτόν. Με τον τρόπο αυτό, εκκινώντας τη ρύθμιση από τον πιο απομακρυσμένο θα επηρεαστούν και οι ανάντη ζυγοί με αντίστοιχες μεταβολές στην τάση, όπως θα εξηγηθεί πιο αναλυτικά παρακάτω.

Ρύθμιση τάσης σε συνεργασία με γειτονικούς κόμβους(Adjacent Regulation)

Η ρύθμιση με γειτονικούς κόμβους αποτελεί το επόμενο επίπεδο της προτεινόμενης αποκεντρωμένης τεχνικής. Με τον ίδιο τρόπο, αν δεν έχουν επιλυθεί όλοι οι ζυγοί με την τοπική τακτική τότε επιχειρούν να επιλύσουν το πρόβλημα με τα υπόλοιπα επίπεδα.

Ο πιο απομακρυσμένος αιτείται υποστήριξης από την άμεση γειτονιά. Στην περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμη μονάδα παραγωγής γειτονικά του ζυγού τότε αποστέλλεται αίτημα υποστήριξης. Η έννοια της γειτονικής υποστήριξης αναφέρεται στο άμεσα διασυνδεδεμένους κόμβους με τον προκείμενο που παρουσιάζει πρόβλημα τάσης. Εν συνεχεία αν υπάρχει διαθέσιμη μονάδα ΔΠ, άμεσα συνδεδεμένη μαζί του τότε κατασκευάζεται το γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης όπως θα εξηγηθεί στην επόμενη ενότητα. Αν το πρόβλημα καταλήξει σε λύση αποστέλλονται στις γειτονικές μονάδες τα νέα σημεία λειτουργίας

σύμφωνα με τις μεταβλητές απόφασης της βελτιστοποίησης. Η αναλυτική εξήγηση των γραμμικών προβλημάτων προγραμματισμού παρατίθενται στο παράρτημα Α. Σημαντικό να αναφερθεί ότι και στο πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται η ως υστερική τιμή το -0.0005 , προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή σύγκλιση του προβλήματος. Η τιμή αυτή όπως θα αποδειχθεί και στις προσομοιώσεις επαρκεί για τη σωστή επίλυση των σχηματιζόμενων γραμμικών προβλημάτων.

Ρύθμιση τάσης σε συνεργασία με τους κατάντη ζυγούς (Downstream Support)

Στο επίπεδο συνεχίζεται η προσπάθεια επίλυσης, από τον πιο απομακρυσμένο προβληματικό ζυγό. Με τον τρόπο αυτό, αποστέλλει αίτημα υποστήριξης στις μονάδες παραγωγής του κατάντη δικτύου. Για κάθε μια που συναντά και αποδέχεται να συνεισφέρει στη ρύθμιση της τάσης, καταστρώνεται το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Σκοπός είναι να ρυθμιστεί το πρόβλημα της τάσης του ζυγού που απέστειλε το αίτημα, και ταυτόχρονα να παραμείνουν στα επιτρεπτά όρια οι τάσεις των κατάντη μονάδων που συνεισφέρουν. Σε περίπτωση που δεν επιλυθεί το πρόβλημα αποστέλλεται αίτημα ακόμη πιο κατάντη.

Ρύθμιση με ανάντη και κατάντη υποστήριξη (Downstream & Upstream Support)

Το τελευταίο επίπεδο μέσω του οποίου καλείται να επιλυθεί η ρύθμιση του τρέχοντος πιο απομακρυσμένου ζυγού είναι με την αποστολή αιτήματος υποστήριξης από το ανάντη δίκτυο. Αν από την κατάντη αναζήτηση έχει αποδεχτεί κάποια μονάδα να συνεισφέρει τότε καταστρώνεται το νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο περιλαμβάνει και τους ανάντη που δύναται να συνεισφέρουν. Στην περίπτωση όπου δεν έχει προκύψει λύση ούτε σε αυτό το πρόβλημα τότε αποδίδεται σειρά για την επίλυση του προβλήματος στον επόμενο απομακρυσμένο ζυγό.

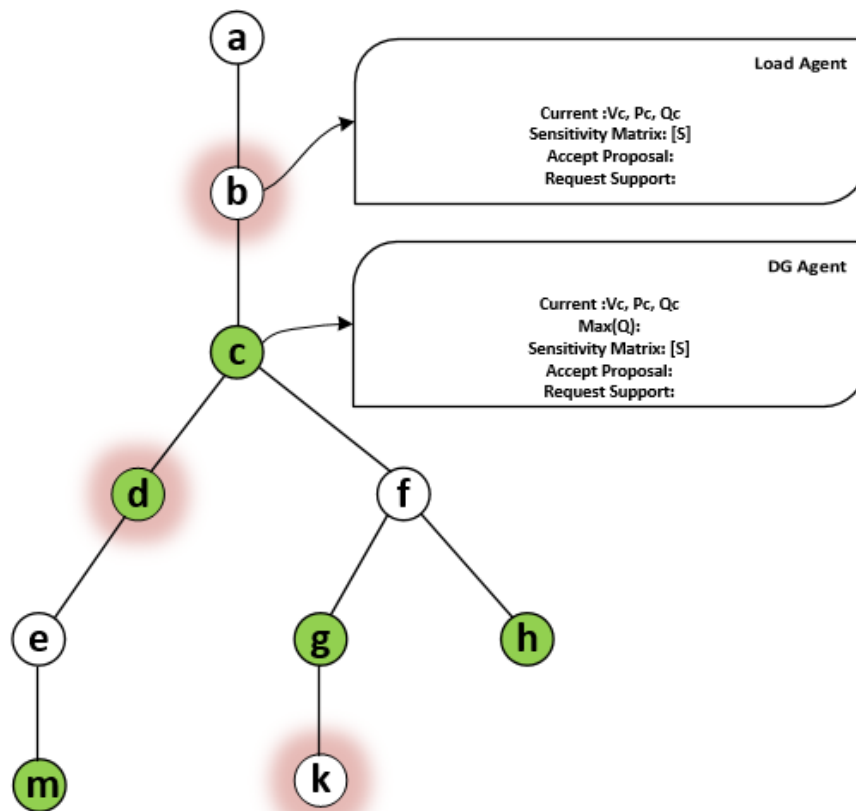
Η προτεινόμενη μέθοδος γίνεται πιο εύκολα κατανοητή στην επόμενη ενότητα όπου εφαρμόζεται σε ένα τμήμα δικτύου.

7.3 Αναλυτική περιγραφή λειτουργίας αλγορίθμου σε γενικευμένο πρόβλημα

Στο παρακάτω τμήμα θεωρούμε την απεικόνιση του ακτινικού δικτύου σε ισοδύναμο γράφο (Κεφάλαιο 2.3.2) για διευκόλυνση της περιγραφής. Οι πράσινες κορυφές διαθέτουν DG agent, ενώ οι υπόλοιπες *Load Agents (Monitoring Agents)*. Οι ευφυής πράκτορες έχουν τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων από *RTU (Remote Terminal Unit)*.

Οι σκιασμένοι κόμβοι είναι αυτοί οι οποίοι θα πρέπει να ρυθμιστούν. Θεωρούμε ότι πιο πάνω από τον **a** κόμβο βρίσκεται ο ζυγός ταλάντωσης ο οποίος αποτελεί και την αρχή του *feeder*. Επομένως, ο εικονιζόμενος (εικόνα 7.1), γράφος αποτελεί τμήμα του δικτύου.

Σε κάθε agent είναι αποθηκευμένη η μήτρα ευαισθησιών του δικτύου, η οποία αποδίδεται στην τελευταία σελίδα της ενότητας. Κάθε ένας agent, είναι σε θέση μεταξύ άλλων ,να γνωρίζει το επίπεδο της τάσης του ζυγού στον οποίο είναι διασυνδεδεμένος, καθώς επίσης και τα μεγέθη παράγωγής ή κατανάλωσης ενεργού ή αέργου ισχύος. Επίσης όπως φαίνεται και από την εικόνα 7.1 διαθέτει δομές οι οποίες αναφέρονται στην απόφαση του να αποδεχτεί συνεισφορά σε κάποιο επίπεδο ρύθμισης τάσης, αλλά και δυνατότητα έκφρασης αιτήματος υποστήριξης σε περίπτωση που έχει πρόβλημα και δεν μπορεί να το επιλύσει. Οι πράκτορες των γεννητριών είναι σε θέση να αποφασίζουν βάση των επικοινωνιών τους με τους υπόλοιπους, να μεταβάλλουν την άεργο ισχύ δηλαδή τον ΣΙ της γεννήτριας που επιτηρούν.



Εικόνα 7.1 Γράφος τμήματος δικτύου

Σε περίπτωση που η τάση είναι εκτός ορίων εκκινεί η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος προκειμένου να ρυθμιστούν οι τάσεις. Τα στάδια δράσης είναι τα εξής:

Τακτική Τοπικής ρύθμισης τάσης (*Local Regulation Tactic*) [1ο επίπεδο]:

Αναφορικά με την ονομασία της τακτικής αυτής, η τοπικότητα αφορά την επίλυση του προβλήματος επί του προβληματικού ζυγού. Η ειδοποιός διαφορά της προτεινόμενης τακτικής με μια αμιγώς τοπική τακτική έγκειται στο ότι η εκάστοτε ρύθμιση γίνεται προς όφελος του συστήματος και όχι μονάχα για την ρύθμιση της τάσης του ζυγού. Η διαδικασία

που θα αναφερθεί παρακάτω κινείται στην κατεύθυνση της προσπάθειας ρύθμισης τάσης αφενός με τις λιγότερες δυνατές μεταβολές αέργου ισχύος και αφετέρου με τη λιγότερη δυνατή επίδραση στις τάσεις των υπολοίπων κόμβων.

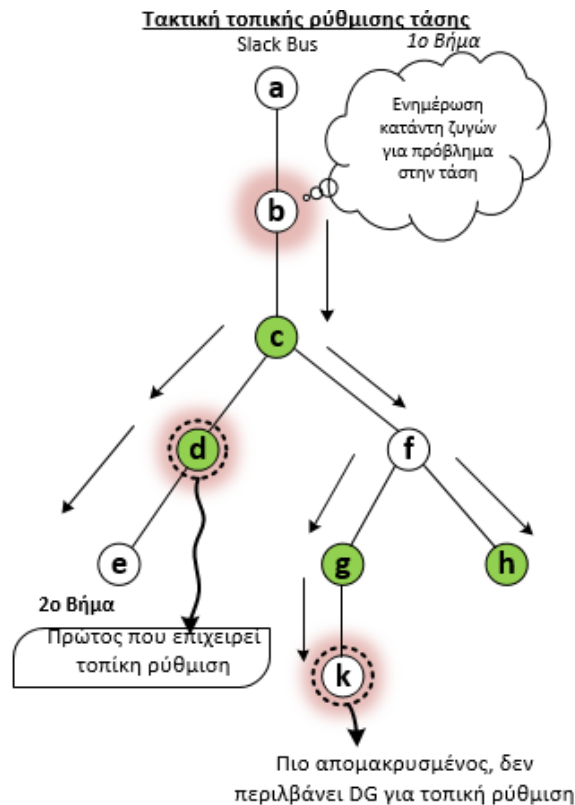
Ο κάθε ένας agent που παρουσιάζει πρόβλημα στην τάση ενημερώνει ότι απαιτεί ρύθμιση τους κατάντη ζυγούς (τα φύλλα του δηλαδή). Σκοπός είναι η τοπική ρύθμιση τάσης να ξεκινήσει από τον πιο απομακρυσμένο DG agent που παρουσιάζει πρόβλημα. Με άλλα λόγια, στο προκείμενο ο **b** θα ρωτήσει τον **c** αν παρουσιάζει πρόβλημα τάσης, και εντελώς ανάλογα ο **c** θα στείλει αντίστοιχο σήμα στα φύλλα του **d & f**. Έπειτα από αυτή τη διαδικασία αποδίδεται προτεραιότητα στους πιο μακρινούς ζυγούς του δικτύου προκειμένου να ξεκινήσει από αυτούς η διαδικασία της τοπικής ρύθμισης. Στην εικόνα 7.2 αποτυπώνεται αυτή η διαδικασία όπου τα βέλη δείχνουν το ερώτημα προς τους κατάντη για αναφορά προβλήματος τάσης.

Ο λόγος για τον οποίο αποδίδεται αυτή η προτεραιότητα στην επίλυση του προβλήματος είναι διότι οι κατάντη ζυγοί του δικτύου παρουσιάζουν την ίδια ευαισθησία ως προς τον οποιοδήποτε ανάντη, με αυτήν που παρουσιάζει ο ίδιος ως προς τον εαυτό του (αυτοευαισθησία). Αυτό σημαίνει ότι μια οποιαδήποτε μεταβολή αέργου από κατάντη DG θα επιφέρει την ίδια μεταβολή στην τάση του με αυτή που θα παρουσίαζε μια τοπική αντιστάθμιση στον επικείμενο ζυγό. Επί παραδείγματι, μια μεταβολή αέργου κατά ΔQ_d στη DG_d , θα επιφέρει μεταβολή τάσης στο ζυγό **b**, $\Delta E'_b = s_{Q_{bd}} \cdot \Delta Q_d$, ενώ μια τοπική μεταβολή αέργου ΔQ_b στον ίδιο ζυγό θα επηρεάσει την τάση κατά $\Delta E_b = s_{Q_{bb}} \cdot \Delta Q_d$. Προφανώς, όμως οι συντελεστές αέργων ευαισθησιών είναι ίδιες, καταλήγοντας ότι $\Delta E_b = \Delta E'_b$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο πιο απομακρυσμένος προβληματικός agent είναι ο d.

Στον πράκτορα του d, επομένως, πραγματοποιείται η εκτίμηση της απαιτούμενης αέργου για την ρύθμιση της τάσης του ζυγού της, ως εξής:

$$\Delta Q_d = \frac{\Delta E_b + E_{hysteric}}{s_{dd}} [p.u.]$$

Στην τελευταία σχέση ΔE_b είναι επιθυμητή μεταβολή τάσης, $E_{hysteric}$ το υστερικό όριο για να προλαμβάνονται τα σφάλματα των χρησιμοποιούμενων ευαισθησιών και s_{dd} η ευαισθησία τάσης του ζυγού d ως προς μεταβολές αέργου στον ίδιο. Αν το απαιτούμενο ποσό αέργου επαρκεί ($|\Delta Q_d| \leq |Q_{max_d}|$), τότε η DG ρυθμίζει τοπικά την τάση του ζυγού της, δημιουργώντας μια μεταβολή κατά ΔE_b στον ανάντη προβληματικό ζυγό, με ενδεχόμενο τη ρύθμιση και του κόμβου b. Στην περίπτωση, όπου ο b δεν ρυθμιστεί θα απαιτείται πλέον λιγότερη αέργος σε επόμενο βήμα για τη ρύθμιση του.



Εικόνα 7.2 Ανάλυση σταδίου τοπικής ρύθμισης

Ρύθμιση τάσης σε συνεργασία με γειτονικούς κόμβους (*Adjacent Voltage Regulation*) [2ο επίπεδο]

Η απόκριση αυτού του επιπέδου επισυμβαίνει στην περίπτωση όπου ο πιο απομακρυσμένος, κόμβος ο οποίος παρουσιάζει πρόβλημα τάσης είναι άμεσα διασυνδεδεμένος (ανάντη ή κατάντη ή και τα δυο) με άλλους DG agent. Η τακτική αυτής της λειτουργίας προϋποθέτει επομένως, την ύπαρξη γειτονικών διαθέσιμων DG agent. Στο προκείμενο τμήμα δικτύου σε αυτήν την τακτική θα περιέλθουν οι κόμβοι d & k -αν δεν έχουν ρυθμιστεί με προηγούμενη τακτική- καθώς περιλαμβάνουν γειτονικές μονάδες παραγωγής. Οι ζυγοί αυτοί περιέρχονται σε αυτό το επίπεδο ρύθμισης -και στα επόμενα δυο- με σειρά προτεραιότητας. Αν επιτευχθεί η ρύθμιση του πιο απομακρυσμένου τότε θα συνεχίσει ο επόμενος που έχει σειρά. Στο σημείο ετούτο να αναφερθεί ότι αποδίδεται αίτημα υποστήριξης στους γειτονικούς agents (adjacent agent), κι αυτοί αποκρίνονται αποστέλλοντας τη δυνατότητα διαθέσιμης αέργου ισχύος τους. Επί παραδείγματι, στον agent k (έστω ο πιο απομακρυσμένος) θα επικοινωνήσει με τους γειτονικούς του, δηλαδή με τον DG agent g ο οποίος απαντάει με τη δυνατότητα συνεισφοράς του. Στον agent k, πραγματοποιείται η εκτίμηση του απαιτούμενου ποσού αντιστάθμισης μέσω της επίλυσης του γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης, το οποίο εξηγείται στη συνέχεια. Ας υποθέσουμε για την περίπτωση του παραδείγματος ότι g δεν έχει διαθέσιμη άεργο ώστε να

είναι σε θέση συνεισφοράς, τότε καθώς δεν υπάρχει κατάντη δίκτυο θα αναζητήσει ανάντη βοήθεια για τη ρύθμιση του.

Για την πληρότητα περιγραφής, ας θεωρήσουμε τον d σε αυτό το επίπεδο ρύθμισης. Συγκεκριμένα, ο d θα καταστρώσει αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτή τη φορά από την αναζήτηση ο πράκτορας θα έχει συλλέξει τα εξής στοιχεία :

$$\text{Available Adjacent Agents: } A = \{a_c, a_d\}$$

$$\text{Maximum Reactive Support } A_Q = \{Q_c^{max}, Q_d^{max}\}$$

Το A αποτελεί το σύνολο των agent που θα συνεισφέρουν κατά το αντίστοιχο πόσο τους που περιλαμβάνεται στο A_Q . Προφανώς για το τα διαθέσιμο ποσό της εκάστοτε γεννήτριας ή DG, ισχύει

$$-\sqrt{S_{nom_j}^2 - P_{current_j}^2} \leq Q_{max_j} \leq \sqrt{S_{nom_j}^2 - P_{current_j}^2}$$

Το γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης αφορά την ελαχιστοποίηση του ποσού που πρέπει να αντισταθμιστεί από τις γεννήτριες οι οποίες θα υποστηρίξουν τον προβληματικό κόμβο, προκειμένου να ρυθμιστεί αυτός και οι εν λόγω να παραμείνουν σε επιτρεπτά όρια. Το πρόβλημα θα είναι το εξής:

$$\min f(Q) = \sum_j \Delta Q_j, j \in A$$

$$\min f(Q) = \min_x c^T x, c = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \& [x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης με τους περιορισμούς} \begin{cases} Q_{min_j} \leq Q_j \leq Q_{max_j} \\ V_{min} \leq V_j + \Delta V_j \leq V_{max} \end{cases}$$

Από τους περιορισμούς της αντικειμενικής συνάρτησης ο πρώτος αναφέρεται στο διαθέσιμο της εκάστοτε DG που δέχτηκε να συμβάλλει στη ρύθμιση της τάσης. Ο δεύτερος περιορισμός αναφέρεται στο ποσό ΔV_j που θα εμφανιστεί σε κάθε κόμβο j , όπου σκοπός είναι το άθροισμα της προηγούμενης τάσης με την επικείμενη μεταβολή ($V_j + \Delta V_j$) να είναι εντός ορίων. Προφανώς το ΔV_j συνδέεται με τους όρους που εξαγει η αντικειμενική συνάρτηση ως εξής

$$\Delta V_j = \sum_{i \in A_j} s_{Q_{ji}} \Delta Q_i$$

Συγκεκριμένα, για το δεδομένο παράδειγμα επί του κόμβου d θα είναι:

Το διάνυσμα μεταβολών αέργου προς ελαχιστοποίηση

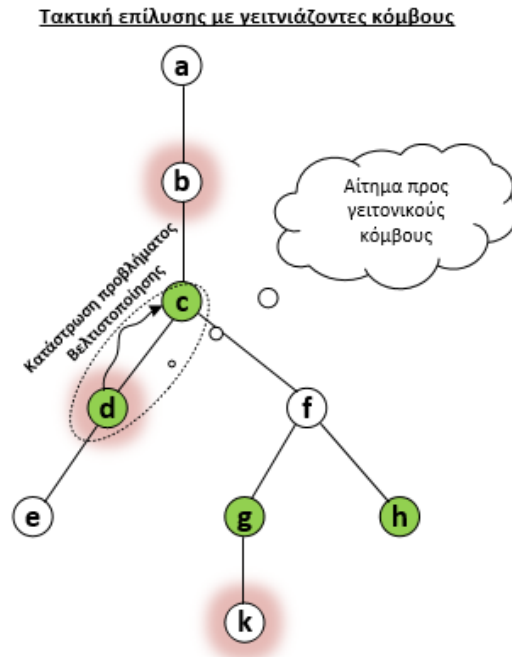
$$[x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_c \\ \Delta Q_d \end{bmatrix}$$

$$V_{min} \leq \begin{bmatrix} V_c + \Delta V_c \\ V_d + \Delta V_d \end{bmatrix} \leq V_{max} \Leftrightarrow$$

$$V_{min} \leq \begin{bmatrix} V_c + s_{cd}\Delta Q_d + s_{cc}\Delta Q_c \\ V_d + s_{dc}\Delta Q_c + s_{dd}\Delta Q_d \end{bmatrix} \leq V_{max}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{min_c} \\ Q_{min_d} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Q_c + \Delta Q_c \\ Q_d + \Delta Q_d \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Q_{max_c} \\ Q_{max_d} \end{bmatrix}$$

Αν η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης καταλήξει σε λύση τότε ενημερώνονται οι DG agent, που εκδήλωσαν επιθυμία συνεισφοράς στην αντιστάθμιση, για το νέο σημείο λειτουργίας τους, δηλαδή τα νέα $Q_{setpoint}^j$.



Στο παρόν σχήμα, στα πλαίσια του προβληματικού *DG agent d*, η μέθοδος αποκρίνεται με κατάντη αναζήτηση, καταλήγοντας με σύνολο διαθέσιμων agent $A = \{a_d, a_m\}$. Εν συνεχεία καταστρώνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού όπου αν καταλήξει σε λύση, αποστέλλεται στον DG agent m το νέο σημείο λειτουργίας του. Αν δεν υπάρξει λύση στο πρόβλημα ακολουθείται το επόμενο βήμα το οποίο αναφέρεται στην αποστολή αιτήματος υποστήριξης σε ανάντη κόμβους.

Τακτική ρύθμισης τάσης με ανάντη και κατάντη DG agents [4ο επίπεδο]

Το επίπεδο αυτό είναι το τελευταίο στάδιο δράσης του προτεινόμενου αλγορίθμου για τον τρέχων ζυγό. Στο επίπεδο αυτό μπορεί να περιέλθει στις περιπτώσεις

- Όπου δεν υπάρχει διαθέσιμος DG agent για συνεισφορά
- Όπου η επίλυση με τους κατάντη DG agent δεν κατέληξε σε λύση

Κατά την αναζήτηση αποστέλλεται αίτημα στον κοντινότερο ανάντη DG agent κι αν δεχτεί τον περιλαμβάνει στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αν πάλι δεν ευρεθεί κανένας διαθέσιμος DG agent, ή το πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν κατάληγει σε λύση τότε αποδίδεται προτεραιότητα επίλυσης στον επόμενο πιο απομακρυσμένο ζυγό.

Στην προκειμένη περίπτωση θα σχηματιστεί για τον *d* το εξής σύνολο:

$A = \{a_d, a_m, a_c\}$ για τους οποίους το γραμμικό πρόβλημα θα είναι:

$$[x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_d \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_c \end{bmatrix}$$

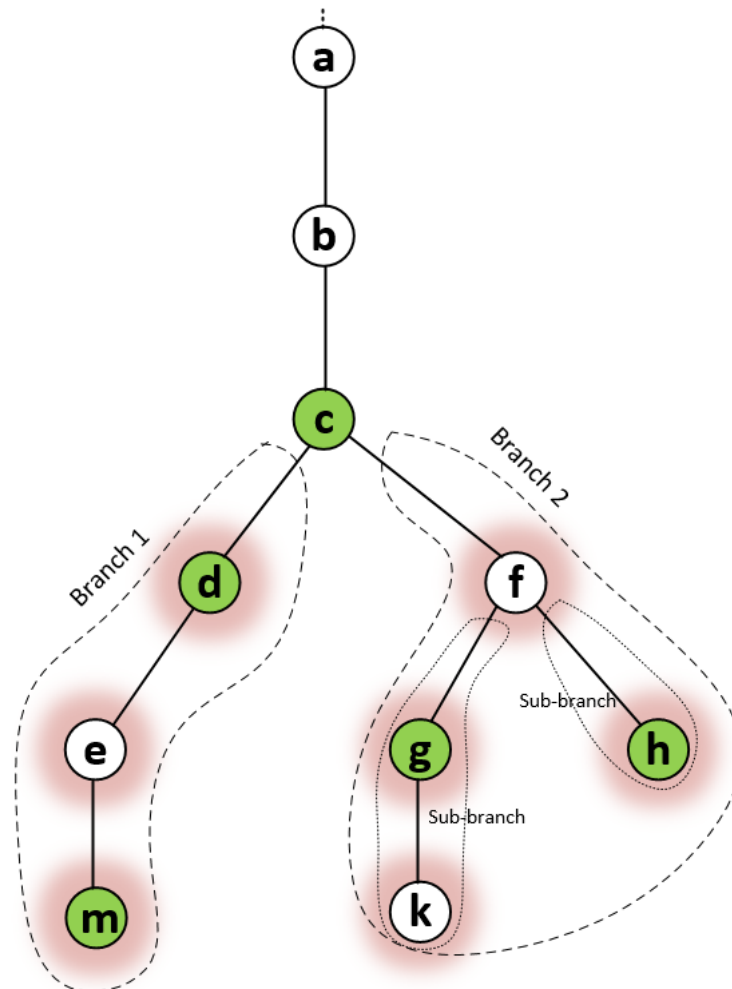
$$V_{min} \leq \begin{bmatrix} V_d + \Delta V_d \\ V_m + \Delta V_m \\ V_c + \Delta V_c \end{bmatrix} \leq V_{max} \Leftrightarrow$$

$$V_{min} \leq \begin{bmatrix} V_d + s_{dd}\Delta Q_d + s_{dm}\Delta Q_m + s_{dc}\Delta Q_c \\ V_m + s_{md}\Delta Q_d + s_{mm}\Delta Q_m + s_{mc}\Delta Q_c \\ V_c + s_{cd}\Delta Q_d + s_{cm}\Delta Q_m + s_{cc}\Delta Q_c \end{bmatrix} \leq V_{max}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{min_d} \\ Q_{min_m} \\ Q_{min_c} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Q_d + \Delta Q_d \\ Q_m + \Delta Q_m \\ Q_c + \Delta Q_c \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Q_{max_d} \\ Q_{max_m} \\ Q_{max_c} \end{bmatrix}$$

Επίδοση Προτεραιότητας

Αναφορικά με τη επίδοση προτεραιότητας στους πιο απομακρυσμένους ζυγούς με πρόβλημα τάσης να διευκρινιστεί ότι όταν το ζήτημα της τάσης εμφανίζεται σε ξεχωριστούς κλάδους χωρίς την ύπαρξη ανάντη προβληματικού, τότε τα προβλήματα προφανώς επιλύονται ανεξάρτητα. Συγκεκριμένα, στην εικόνα 7.4, εντοπίζονται προβλήματα τάσης σε δυο ξεχωριστούς κλάδους (Branch 1, Branch 2). Στην περίπτωση αυτή για το τμήμα του κλάδου 1 ο d ως πιο ανάντη θα αποφασίσει την προτεραιότητα επίλυσης, ενώ στον κλάδο 2 θα αποφασίσει ο f βάση των δεδομένων που θα λάβουν ως αναφορά κατάντη προβλημάτων.



Εικόνα 7.4 Γράφος εξεταζόμενου δικτύου

7.4 Διατύπωση κεντρικού προβλήματος ρύθμισης τάσης

Στην ενότητα αυτή θα διατυπωθεί η τεχνική κεντρικής ρύθμισης τάσης η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο Κεφάλαιο 8 για τη σύγκριση με την προτεινόμενη μέθοδο. Η κεντρική

μέθοδος λαμβάνει στοιχεία μετρήσεων τάσης από όλο τους ζυγούς του δικτύου προκειμένου να καταστρώσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η κεντρική επίλυση βρίσκει την λύση με τις ελάχιστες δυνατές μεταβολές που πρέπει να πραγματοποιηθούν στις γεννήτριες ώστε να ρυθμιστούν όλες οι τάσεις των ζυγών. Με την κατάληξη σε λύση του προβλήματος, οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τις εξαγόμενες τιμές οι οποίες θα πρέπει να αναδιανεμηθούν στις μονάδες παραγωγής του δικτύου προκειμένου να αλλάξουν σημείο λειτουργίας.

Για το παραπάνω δίκτυο που αναλύθηκε το κεντρικό πρόβλημα θα είχε ως εξής:

$$\min f(Q) = \sum_{j \in A_{DG}} \Delta Q_j = [c]^T [x]$$

όπου A_{DG} το σύνολο των μονάδων παραγωγής εν προκειμένω $A_{DG} = \{c, g, h, m\}$

$$[c]^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

Το μέγεθος του πίνακα $[c]$ είναι $ng \times 1$, όπου $ng = length(A_{DG})$ δηλαδή ίσο με το μέγεθος του συνόλου των μονάδων παραγωγής. Προφανώς, το σύνολο των μεταβλητών απόφασης θα είναι:

$$[x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_c \\ \Delta Q_g \\ \Delta Q_h \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} [p, u]$$

Το μέγεθος του διανύσματος θα είναι $1 \times ng$. Οι μεταβλητές απόφασης θα πρέπει να βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων της μέγιστης απορροφώμενης ή εγχεόμενης αέργου ισχύος, η μέγιστη τιμή αέργου ισχύος θεωρείται σταθερή και λαμβάνεται για μέγιστη παραγωγή με τον ελάχιστο δυνατό (μέχρι 0.9 ελάχιστο θέτουμε) συντελεστή ισχύος που μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια. Δηλαδή

$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{max}^2} = \sqrt{\left(\frac{P_{max}}{(\cos\varphi)_{min}}\right)^2 - P_{max}^2}$$

Αν η γεννήτρια ή DG, λειτουργεί με ορισμένο συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας τότε η μέγιστη μεταβολή ΔQ_i ορίζεται ως εξής :

$$\Delta Q_{max}^i = Q_{max} - Q_c$$

όπου Q_c η τρέχουσα τιμή λειτουργίας η οποία είναι θετική για επαγωγικό ΣΙ και αρνητική για χωρητικό. Επομένως, τα όρια τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούνται θα είναι:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_c \\ x_g \\ x_h \\ x_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_{max}^c \\ \Delta Q_{max}^g \\ \Delta Q_{max}^h \\ \Delta Q_{max}^m \end{bmatrix}$$

Η ελαχιστοποίηση αυτών των όρων θα πραγματοποιείται με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης όλων των ζυγών του δικτύου, δηλαδή

$$V_{min} \leq V_j + \Delta V_j \leq V_{max}$$

όπου ως j αναφερόμαστε στο σύνολο των ζυγών του δικτύου. Η ανάλυση της ανισότητας τάσης των γεννητριών:

$$V_{min} \leq \begin{bmatrix} V_b + \Delta V_b \\ V_c + \Delta V_c \\ \vdots \\ V_m + \Delta V_m \end{bmatrix} \leq V_{max} \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_b \\ V_{min} - V_c \\ \vdots \\ V_{min} - V_k \\ V_{min} - V_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_b \\ V_{max} - V_c \\ \vdots \\ V_{max} - V_k \\ V_{max} - V_m \end{bmatrix}$$

Όπου τα ΔV_i αποτελούν τις μεταβολές που εμφανίζονται στις τάσεις του εκάστοτε ζυγού εξαιτίας των μεταβολών άεργου σε κάθε μονάδα παραγωγής. Σημειωτέον, οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται στον κεντρικό ελεγκτή. Όταν η τάση στο ζυγό w είναι η ανυψωμένη τάση τότε τα νέα σημεία λειτουργίας αναφέρονται σε απορρόφηση άεργου ισχύος (επαγωγικό συντελεστή ισχύος) επομένως τα πρόσημα στα μεγέθη των μεταβολών τάσης θα είναι αρνητικά. Επομένως, μέσω των ευαισθησιών τάσης μπορούμε να εκτιμηθούν οι τάσεις αυτές ως εξής

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_b \\ V_{min} - V_c \\ \vdots \\ V_{min} - V_k \\ V_{min} - V_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -s_{bc}\Delta Q_c - s_{bg}\Delta Q_g - s_{bh}\Delta Q_h - s_{bm}\Delta Q_m \\ -s_{cc}\Delta Q_c - s_{cg}\Delta Q_g - s_{ch}\Delta Q_h - s_{cm}\Delta Q_m \\ \vdots \\ -s_{kc}\Delta Q_c - s_{kg}\Delta Q_g - s_{kh}\Delta Q_h - s_{km}\Delta Q_m \\ -s_{mc}\Delta Q_c - s_{mg}\Delta Q_g - s_{mh}\Delta Q_h - s_{mm}\Delta Q_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_b \\ V_{max} - V_c \\ \vdots \\ V_{max} - V_k \\ V_{max} - V_m \end{bmatrix}$$

Για την έκφραση της τελευταίας ανισωτικής σχέσης χρειάζεται η κατάλληλη τροποποίησή της όπως αυτή προτείνεται στο παράρτημα, καθώς σε ένα γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού οι περιορισμοί λαμβάνουν έναν τύπο ανίσωσης \leq ή \geq .

Αν το κεντρικό πρόβλημα καταλήξει σε λύση τότε αποστέλλονται στις μονάδες μέσω του συστήματος επικοινωνίας, τα νέα σημεία λειτουργίας των γεννητριών θα είναι:

$$\begin{bmatrix} Q'_c \\ Q'_g \\ Q'_h \\ Q'_m \end{bmatrix} = [x] * S_{base} + \begin{bmatrix} Q_c^0 \\ Q_g^0 \\ Q_h^0 \\ Q_m^0 \end{bmatrix}$$

Κεφάλαιο 8-Ανάλυση Προσομοιώσεων Προτεινόμενης Μεθόδου Ρύθμισης Τάσης

8.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν την επίδειξη της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης τεχνικής για τη ρύθμιση τάσης ακτινικών δικτύων διανομής ΜΤ. Όλα τα δίκτυα που περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκαν μέσω του πακέτου MATPOWER[36] της MATLAB [37]. Το MATPOWER αποτελεί ένα πακέτο, το οποίο εξυπηρετεί στην επίλυση ροών ισχύος και αλλά και πιο σύνθετων προβλημάτων, όπως η βελτιστοποίηση ροών ισχύος κ.α. Τα δίκτυα, επομένως, αποτυπώθηκαν μέσω της ειδικής μορφοποίησης σύμφωνα με το MATPOWER, βάση του τύπου *caseformat* [38]. Σύμφωνα με τον υπολογισμό των ροών φορτίου προκύπτουν οι τιμές των τάσεων σε κάθε ζυγό οι οποίες θεωρούμε ότι αποτελούν τις τιμές μέσου όρου δεκαλέπτου.

Κατά την παρουσίαση των προσομοιώσεων αποδίδονται σε ορισμένα σημεία οι γράφοι του δικτύου, που εξάγονται από κώδικα στη MATLAB που έχει γραφτεί αποκλειστικά για διευκόλυνση της απεικόνισης του. Δεν αποτελεί τη φυσική τοπολογική χαρτογράφηση του δικτύου. Όπως έχει εξηγηθεί στο κεφάλαιο 2, η απόδοση του δικτύου με τη μορφή γράφου διευκολύνει ιδιαίτερα στην ψηφιοποίηση του δικτύου, καθώς αρκεί μια αραιή μήτρα για την περιγραφή των διασυνδέσεων των κορυφών του γράφου.

8.1.2 Στόχος προσομοιώσεων

Στόχος της παρούσης ενότητας, είναι η ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου ρύθμισης τάσης, μέσα από διαφορετικά εξεταζόμενα δίκτυα και σενάρια λειτουργίας. Η προτεινόμενη μέθοδος όπως έχουμε αναφέρει προϋποθέτει υψηλή διεύθυνση μονάδων ΔΠ. Βασιζόμενοι στη διαθέσιμη άεργο ισχύ των μονάδων, είναι δυνατή η χρήση της για τη ρύθμιση της τάσης σε περιπτώσεις υπέρτασης ή υπότασης. Σε κάθε περίπτωση εμφάνισης προβλήματος τάσης, αρχικά επιχειρείται η επίλυση του προβλήματος με τοπική έγχυση ή απορρόφηση άεργου ισχύος των μονάδων. Αν η τάση παραμένει σε ορισμένους ζυγούς εκτός ορίων τότε μέσω peer - to peer επικοινωνίας αποστέλλονται αιτήματα υποστήριξης στους γειτονικούς ζυγούς.

8.1.3 Σύγκριση με κεντρική μέθοδο

Η προτεινόμενη μέθοδος αποκεντρωμένου ελέγχου συγκρίνεται με τεχνική κεντρικής ρύθμισης. Πιο συγκεκριμένα, η κεντρική μέθοδος επιλύει το ίδιο πρόβλημα τάσης, με τη

διαφορά ότι χρησιμοποιεί πληροφορίες για τις τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου. Με άλλα λόγια, ο κεντρικός σχεδιασμός απαιτεί την ύπαρξη υποδομών επικοινωνίας ικανής ταχύτητας ώστε να αποκρίνονται στις απαιτήσεις του δικτύου. Η μέθοδος κεντρικού ελέγχου μπορεί να επιλύσει κάποιο πρόβλημα βελτιστοποίησης δυνητικά πολλαπλών αντικειμενικών στόχων, η λύση του οποίου παρέχει αποφάσεις για τη επίτευξη της ρύθμισης. Στην προκείμενη περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση που καταστρώνεται έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των άεργων μεταβολών. Κοινός στόχος των δυο εκδοχών - προτεινόμενης και κεντρικής- είναι η ρύθμιση της τάσης με την κατάλληλη διαχείριση της διαθέσιμης άεργου ισχύος των μονάδων παραγωγής. Η σύγκριση των δυο μεθόδων έγκειται στην αντιπαραβολή του συνόλου των μεταβολών που αποφασίστηκε. Σημαντικότερη, ωστόσο, είναι η σύγκλιση της προτεινόμενης μεθόδου καθώς απώτερος σκοπός είναι η ρύθμιση της τάσης.

8.1.4 Θεωρήσεις-παραδοχές

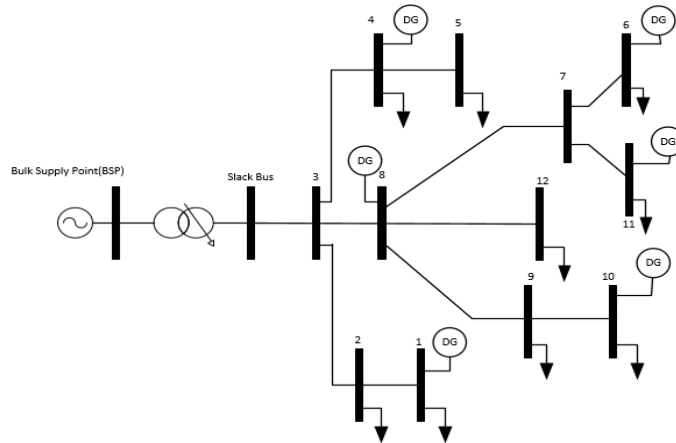
Κατά την διεξαγωγή των προσομοιώσεων για την εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής ρύθμισης τάσης, πραγματοποιήθηκαν οι εξής θεωρήσεις:

- ✓ Το δίκτυο είναι συμμετρικό τόσο ως προς το σύστημα τροφοδοσίας όσο και των καταναλώσεων, προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή των ευαισθησιών τάσης του Κεφαλαίου 6.3.
- ✓ Κάθε μεταβολή στην άεργο ισχύ δεν επηρεάζει την αποδιδόμενη ενεργό ισχύ της μονάδας, θεωρώντας ότι λειτουργεί με σταθερή φαινόμενη ισχύ $|S_{max}|$.
- ✓ Τα φορτία μοντελοποιούνται ως σταθερής μιγαδικής ισχύος [Κεφάλαιο 2.4.4]
- ✓ Ο ζυγός ταλάντωσης (ζυγός MT-MV Busbar) εμφανίζει σταθερή τάση.
- ✓ Οι γεννήτριες ή μονάδες παραγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουν ΣΙ ίσο με τη μονάδα.

Κάθε ζυγός φορτίου περιλαμβάνει πράκτορα φορτίου (*Load Agent*), ενώ στις μονάδες ΔΠ είναι εγκατεστημένοι πράκτορες ΔΠ (*DG agent*). Οι ευφυείς πράκτορες θεωρούμε ότι θα μπορούν να χρησιμοποιούν μονάδες *RTU (Remote Terminal Units)*, μέσω των οποίων θα έχουν τη δυνατότητα μέτρησης των ηλεκτρικών μεγεθών του ζυγού που επιτηρούν.

8.2 Προσομοίωση Δικτύου 13 κόμβων

Η πρώτη ανάλυση αφορά ένα προτυποποιημένο δίκτυο δοκιμών 13 κόμβων της *IEEE (Test Feeder 13Nodes)* [39], με παραλλαγές βάση του [35]. Το δίκτυο αυτό αποτελεί ένα δίκτυο MT το οποίο περιλαμβάνει φορτία και μονάδες παραγωγής.



Εικόνα 8.1 Το εξεταζόμενο δίκτυο 13 ζυγών

8.2.1 Ανάλυση δικτύου

Για την ανάλυση του δικτύου θεωρούμε ότι μετασχηματιστής του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ είναι της τάξης 50ΜVA (150/20kV). Η διασυνδεδετική γραμμή μεταξύ του ζυγού ταλάντωσης και του ζυγού 3 αποτελείται από γραμμή μικρού μήκους και άρα αμελητέας αντίστασης. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για το παρόν εναέριο ακτινικό δίκτυο διανομής είναι αλουμινίου χάλυβα (ACSR). Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε διατομής αγωγού που χρησιμοποιήθηκαν για το δίκτυο δίδονται στους πίνακες 8.1 & 8.2 [35]

$S = 95mm^2$		
$R_1[\Omega /km]$	$X_1[\Omega /km]$	$C_1[\mu F /km]$
0.193	0.107	0.21
$R_0[\Omega /km]$	$X_0[\Omega /km]$	$C_0[\mu F /km]$
1.44	1	0.061

Πίνακας 8.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη γραμμών $95mm^2$

$S = 245mm^2$		
$R_1[\Omega /km]$	$X_1[\Omega /km]$	$C_1[\mu F /km]$
0.075	0.0967	0.258
$R_0[\Omega /km]$	$X_0[\Omega /km]$	$C_0[\mu F /km]$
0.95	0.607	0.0075

Πίνακας 8.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη γραμμών $245mm^2$

Η διαστασιολόγηση κάθε γραμμής αλλά και τα μήκη τους αποδίδονται στον πίνακα 8.3.

Γραμμή	Μήκος [km]	$S[mm^2]$	Γραμμή	Μήκος [km]	$S[mm^2]$
$L_{1,2}$	0.1	245	$L_{6,7}$	2.5	95
$L_{2,3}$	0.986	245	$L_{7,8}$	1.02	95
$L_{3,4}$	1.535	245	$L_{8,9}$	4.2	95
$L_{3,8}$	8	95	$L_{9,10}$	5.8	95
$L_{4,5}$	0.283	245	$L_{8,12}$	3.5	95
$L_{7,11}$	1.2	95			

Πίνακας 8.3 Χαρακτηριστικά γραμμών δικτύου 13 ζυγών

Όλες οι DGs ή G(Generators) λειτουργούν με μοναδιαίο ΣΙ (UPF). Επομένως είναι $Q_{i,0}^{DG} = 0$. Στον πίνακα 8.4 παρουσιάζονται οι γεννήτριες ΔΠ του δικτύου

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	$P[MW]$	$Q_{max}[MVar]$
G_1	5	2
G_4	2.4	0.87
G_6	10	3.63
G_8	1.5	0.48
G_{10}	1	0.73
G_{11}	3.5	1.49

Πίνακας 8.4 Χαρακτηριστικά μονάδων παραγωγής

Η μέγιστη διαθέσιμη άεργος κάθε μονάδας έχει προκύψει από τον ελάχιστο ΣΙ λειτουργίας για μέγιστη ενεργό ισχύ.

Ο πίνακας περιλαμβάνει τα φορτία σε κάθε ζυγό

Αριθμός Ζυγού	Ενεργός Κατανάλωση[MW]	Άεργος Κατανάλωση [MVar]	Συντελεστής ισχύος ($\cos\phi$)
1	0	0	-
2	6,93	0,99	0,989
3	4,09	2,17	0,88
4	0,34	0,21	0,851
5	0,93	0,44	0,904
6	0,3	0,09	0,958
7	0,2	0,07	0,943
8	0	0	-0
9	3,4	1,12	0,949
10	0,5	0,38	0,796
11	2,8	1,48	0,884

12	3,12	1,51	0,9
----	------	------	-----

Πίνακας 8.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη φορτίων

Ως βάση ισχύος στο Matpower εισάγεται 10MVA.

Η τάση λειτουργίας είναι τα 20kV επομένως θεωρούμε ως βασική τάση $V_{base} = 20kV$. Δεδομένου ότι $S_{base} = 10MVA$, υπολογίζουμε την βασική αντίσταση προκειμένου να εισαχθούν οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις των γραμμών στο ανά μονάδα σύστημα

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{400}{10} \Omega = 40\Omega.$$

Οι πιο δυσμενείς περιπτώσεις για ένα δίκτυο, αναφέρονται στις ακραίες καταστάσεις λειτουργίας του δηλαδή:

- Μέγιστο φορτίο - Ελάχιστη παραγωγή
- Μέγιστο φορτίο - Μέγιστη παραγωγή
- Ελάχιστο φορτίο - Μέγιστη παραγωγή
- Ελάχιστη φορτίο - Ελάχιστη παραγωγή

Στη συνέχεια εξετάζονται οι περισσότερες από αυτές για κάθε περίπτωση δικτύου, αλλά και μεμονωμένες καταστάσεις μεταβολής των φορτίων, προκειμένου να αναδειχτεί η λειτουργία της προτεινόμενης τεχνικής ρύθμισης τάσης. Οι μεταβολές που θα γίνονται σε κάθε περίπτωση θα είναι % της ονομαστικής των φορτίων όπως αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες.

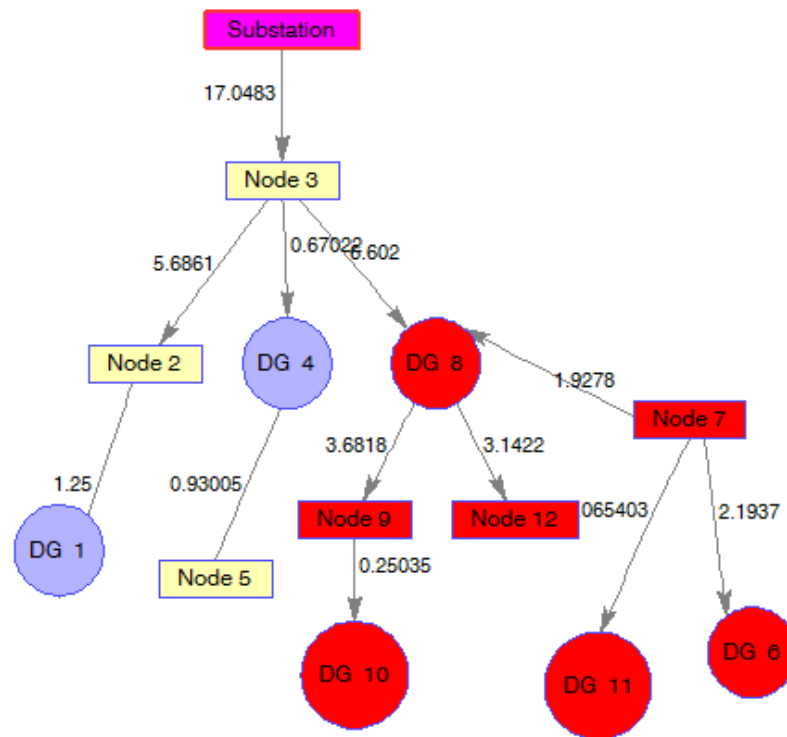
8.2.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων

Τονίζεται και πάλι ότι στην εκκίνηση της κάθε προσομοίωσης οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν με μοναδιαίο ΣΙ ισχύος.

➤ Μέγιστο φορτίο - Ελάχιστη παραγωγή

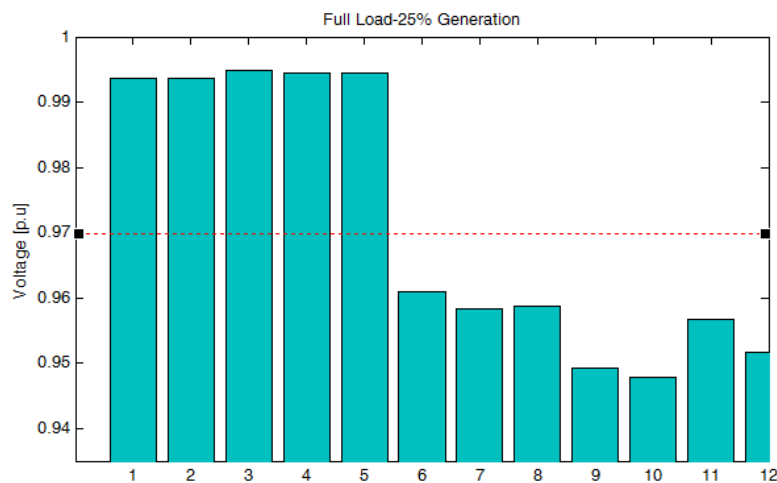
Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται υπολογισμός ροής φορτίου προκειμένου να παρακολουθήσουμε τις τάσεις των ζυγών για το μέγιστο ονομαστικό φορτίο του δικτύου, θεωρώντας ότι ταυτόχρονα υπάρχει ελάχιστη παραγωγή(25% της ονομαστικής των μονάδων ΔΠ) από τις μονάδες παραγωγής. Κατά την προσομοίωση στο MATLAB για διευκόλυνση και προς όφελος απεικόνισης του δικτύου, αποτυπώνονταν κάθε φορά ο γράφος του δικτύου, όπως αυτός στην εικόνα 8.2. Επί του γράφου αποδίδονταν όπως φαίνεται στα βέλη μεταξύ των κόμβων οι ροές ενεργού ισχύος, ενώ αποθηκευμένα ήταν τα στοιχεία τάσης, κατανάλωσης και παραγωγής κάθε κόμβου. Τέλος, οι ερυθρόμορφοι κόμβοι αποτελούν αυτούς που παρουσιάζουν τάση εκτός ορίων.

Από την εικόνα 6.2 παρατηρούμε ότι υπάρχει υψηλή ζήτηση από το δίκτυο διανομής καθώς η ροή ενεργού ισχύος από το ΜΣ είναι 17,0483MW.



Εικόνα 8.2 Γράφος δικτύου 13 κόμβων

Όπως είναι αναμενόμενο στο μέγιστο φορτίο θα εμφανίζεται σημαντική πτώση τάσης στις γραμμές του δικτύου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.3.



Εικόνα 8.3 Γράφημα τάσεων 25% Παραγωγή - Πλήρες φορτίο

Όπως παρατηρούμε από τις μπάρες των διαγραμμάτων η τάση είναι εκτός ορίων σε 7 ζυγούς (6-12), εξαιτίας της πτώσης τάσης που δημιουργείται από την υψηλή ζήτηση ενεργού ισχύος.

Συγκεκριμένα, ο κάθε κόμβος διαθέτει είτε πράκτορα φορτίου είτε πράκτορα παραγωγής, εξετάζει αν υπάρχει πρόβλημα τάσης στο κατάντη δίκτυο. Κάθε ένας ρώτα το παιδί του αν υπάρχει πρόβλημα τάσης σε αυτό. Σκοπός όπως έχει αναφερθεί είναι η εκκίνηση της ρύθμισης από τον πιο κατάντη.

Ενημερώνει δηλαδή ο 8 τους 7,9 & 12, ότι έχει πρόβλημα ζητώντας από αυτούς αν υπάρχει πρόβλημα τάσης στα φύλλα τους. Οι κόμβοι αυτοί ακολούθως πράττουν το ίδιο καταλήγοντας στους τελευταίους κόμβους του δικτύου οι οποίοι εν προκειμένω αποτελούν τους κόμβους που περιλαμβάνουν DG agents (6,10,11).

Η τακτική του τοπικού ελέγχου αναφέρεται αποκλειστικά στους κόμβους που περιλαμβάνουν μονάδες παραγωγής και εμφανίζουν πρόβλημα τάσης. Επομένως, στην παρούσα φάση, επιχειρούν οι (6,10,11) να ρυθμίσουν την τάση αξιοποιώντας τη διαθέσιμη άεργος ισχύ τους. Η προτεραιότητα θα τους επιδοθεί από τον 8, ο οποίος συλλέγει τα στοιχεία των κατάντη. Η απαιτούμενη άεργος ισχύς που θα χρειαστεί να εγχυθεί από κάθε μονάδα εκτιμάται μέσω της ευαισθησίας της τάσης ως προς τον ίδιο ζυγό.

Στον κόμβο 6 (πιο απομακρυσμένος), εξαιτίας της μεγάλης μονάδας ΔΠ που ευρίσκεται προσαρτημένη στον κόμβο αυτό εκτιμάται η απαιτούμενη άεργος μέσω της ευαισθησίας η οποία θα είναι:

$$\Delta Q_{est} = \frac{|DE_6| + E_{hyst}}{S_{66}} = \frac{|0.96585 - 0.97| + 0.001}{0.036567} p.u = 0.140915 p.u$$

όπου DE_6 είναι η επιθυμητή μεταβολή τάσης στον κόμβο 6, η οποία αποτελεί τη διαφορά της τρέχουσας τιμής τάσης από το τιθέμενο όριο. Η τιμή E_{hyst} είναι υστερική τιμή που τίθεται για να αντισταθμίζει το σφάλμα της ευαισθησίας.

Η εκτιμώμενη προς έγχυσης άεργος είναι $\Delta Q = \Delta Q_{est} * S_{base} = 1,40915 MVar$

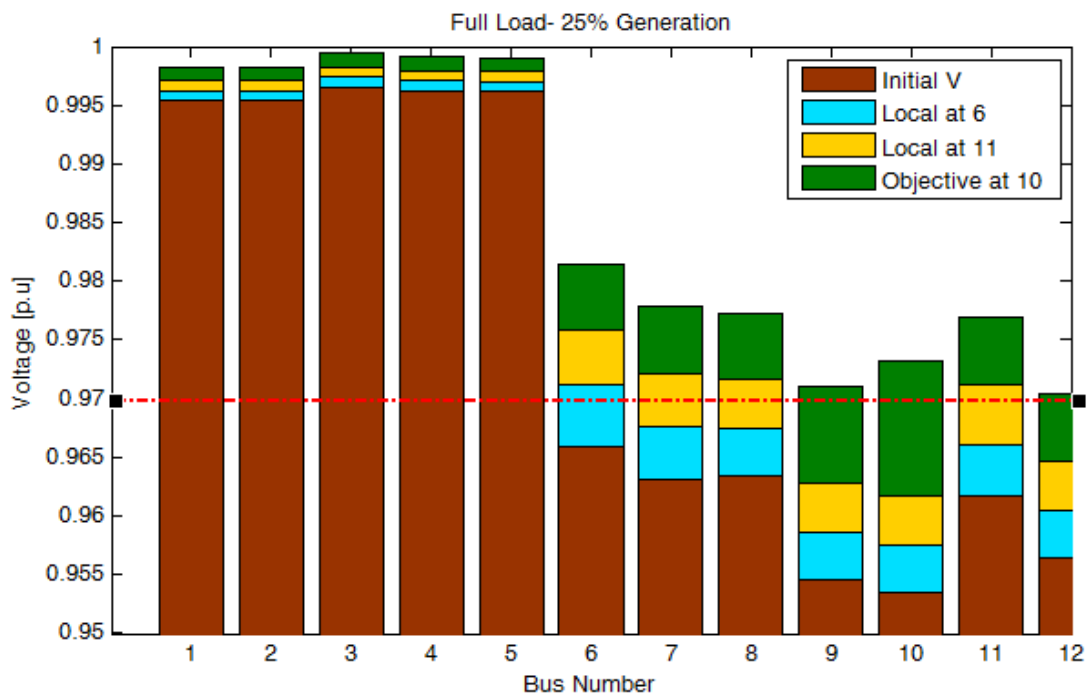
Η τάση νέα τάση στο ζυγό 6 θα είναι $V'_6 = 0.9713 p.u$. Λόγω του μεγάλου ποσού έγχυσης παρατηρούμε το σφάλμα στην τιμή της τάσης (σφάλμα: $|0.971-0.9713|=0.0003$).

Αντιστοίχως και ο 11 επιλύει το πρόβλημα του ζυγού του με τοπική ρύθμιση εγχέοντας 1.4678MVar.

Με την τελευταία έγχυση άεργου ισχύος προφανώς θα επηρεαστούν και οι υπόλοιποι ζυγοί του δικτύου, αλλά κατά κύριο λόγο περισσότερο οι γειτονικοί του 6-οι οποίοι πλησιάζουν το επιτρεπτό όριο τάσης που έχει τεθεί- όπως φαίνεται στην εικόνα 8.4.

Οι υπόλοιπες γεννήτριες εκτίμησαν επίσης την απαιτούμενη άεργο προκειμένου να ρυθμίσουν την τάση τους (υλοποίηση μέσω συνάρτησης στον πράκτορα).

Επόμενο, στάδιο του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι η ρύθμιση των πλέον πιο απομακρυσμένων ζυγών με τη βοήθεια γειτονικών κόμβων.



Εικόνα 8.4 Γράφημα τάσεων κατά τη ρύθμιση

Οι ζυγοί οι οποίοι παρουσιάζουν ακόμη πρόβλημα τάσης είναι ο 9,10 και 12. Ο 10 (πλέον απομακρυσμένος), μη έχοντας γειτονικούς ζυγούς με μονάδα παραγωγής, περνά σε αίτημα υποστήριξης προς τους ανάντη δηλαδή μέσω του 9 στον 8, με τον οποίο καταστρώνει γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, επαναφέροντας την τάση και του 9 στα επιτρεπτά όρια. Υπενθυμίζουμε ότι η προτεραιότητα επίλυσης, πραγματοποιείται για το λόγο ότι μέσω ενδεχόμενης συνεισφοράς του 8 στην επίλυση προβλήματος του 10 επηρεάζονται και οι υπόλοιποι κατάντη. Αυτή είναι και μια διαφορά για την οποία όπως θα καταφανεί προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τη διαχείριση αέργου από την κεντρική μέθοδο ρύθμισης τάσης. Η μέθοδος κινείται προς την κατεύθυνση αποφυγής περιττών αλλαγών αέργου ισχύος, στην προσπάθεια να προσεγγίσει την βέλτιστη διαχείριση της κεντρικής επίλυσης.

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	$Q_{injected} [MVar]$
DG_6	1.40915
DG_8	2.4477
DG_{10}	2,07405
DG_{11}	1,4678

Πίνακας 8.6 Σημεία λειτουργίας

Το σύνολο των μεταβολών τη προτεινόμενης μεθόδου είναι το άθροισμα του πίνακα 8.6 $Q_{tot} = 5.804674 MVar$.

Κεντρική ρύθμιση τάσης

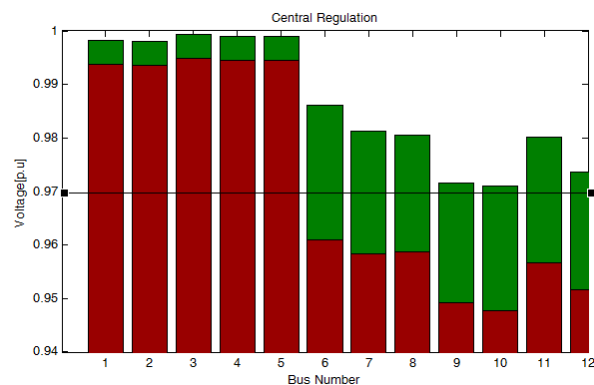
Η τεχνική αυτή ρύθμισης χρησιμοποιείται καθαρά για συγκριτικούς σκοπούς με την προτεινόμενη μέθοδο. Η επίλυση με αυτή την κεντρική μέθοδο προϋποθέτει τη γνώση όλων των τάσεων του δικτύου. Επομένως, επικεντρωνόμαστε στη σύγκριση του συνόλου των εγχύσεων έγινε σε κάθε μέθοδο.

Εν προκειμένω τα νέα σημεία λειτουργίας των γεννητριών της κεντρικής τεχνικής (πίνακας 8.7).

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	$Q_{injected} [MVar]$
DG_6	2,53075
DG_8	1,82667
DG_{10}	0.48
DG_{11}	0,96288

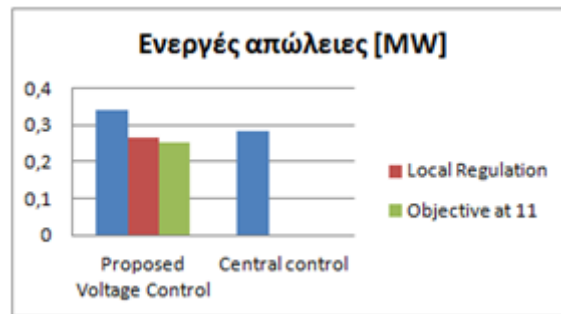
Πίνακας 8.7 Τιμές έγχυσης άεργου ισχύος σύμφωνα με την κεντρική επίλυση

Το σύνολο των εγχύσεων άεργου ισχύος της κεντρικής μεθόδου θα είναι 5.8MVar.



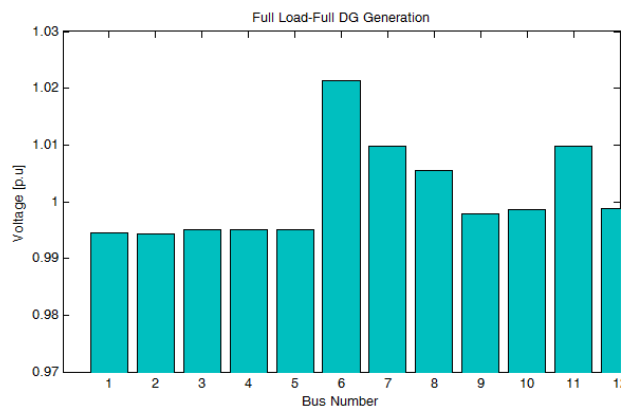
Εικόνα 8.5 Γράφημα τάσεων κεντρικής επίλυσης

Στην προκειμένη περίπτωση η κεντρική εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες μεταβολές ενεργού ισχύος ωστόσο ρυθμίζει πλήρως τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του δικτύου.



➤ Μέγιστο φορτίο - Μέγιστη παραγωγή

Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο παρουσιάζει κανονικά επίπεδα τάσης. Τυπικά αποδίδεται το προφίλ της τάσης.



Εικόνα 8.6 Γράφημα τάσεων δικτύου

Ενεργές απώλειες δικτύου 0,4071MW.

➤ 50% Ονομαστικό Φορτίο - 100% Παραγωγή

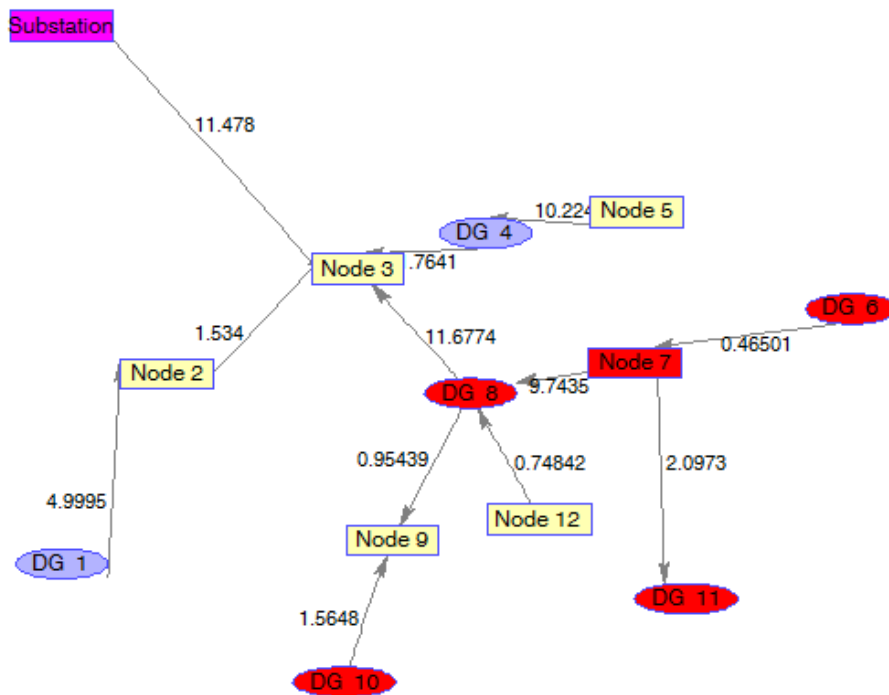
Θεωρούμε 50% του ονομαστικού φορτίου και 100% της ονομαστικής ισχύος των μονάδων ΔΠ. Στην περίπτωση αυτή όπως φαίνεται και στο γράφο του δικτύου εντοπίζεται πρόβλημα τάσης στο ζυγό 6 όπου είναι εγκατεστημένη μεγάλη μονάδα παραγωγής. Στην εικόνα 8.7 αποτυπώνεται ο γράφος του δικτύου, καθώς και οι ζυγοί οι οποίοι παρουσιάζουν πρόβλημα τάσης στην προκειμένη περίπτωση.

Πρώτο στάδιο της προτεινόμενης τεχνικής ρύθμισης τάσης είναι μέσω τοπικού ελέγχου. Η DG10, πραγματοποιεί πρώτη την εκτίμηση και απορροφά το απαιτούμενο ποσό αέργου ισχύος. Συγκεκριμένα, απορροφά $Q=0.32536\text{MVA}_r$ και επομένως η τάση από 1,0307p.u

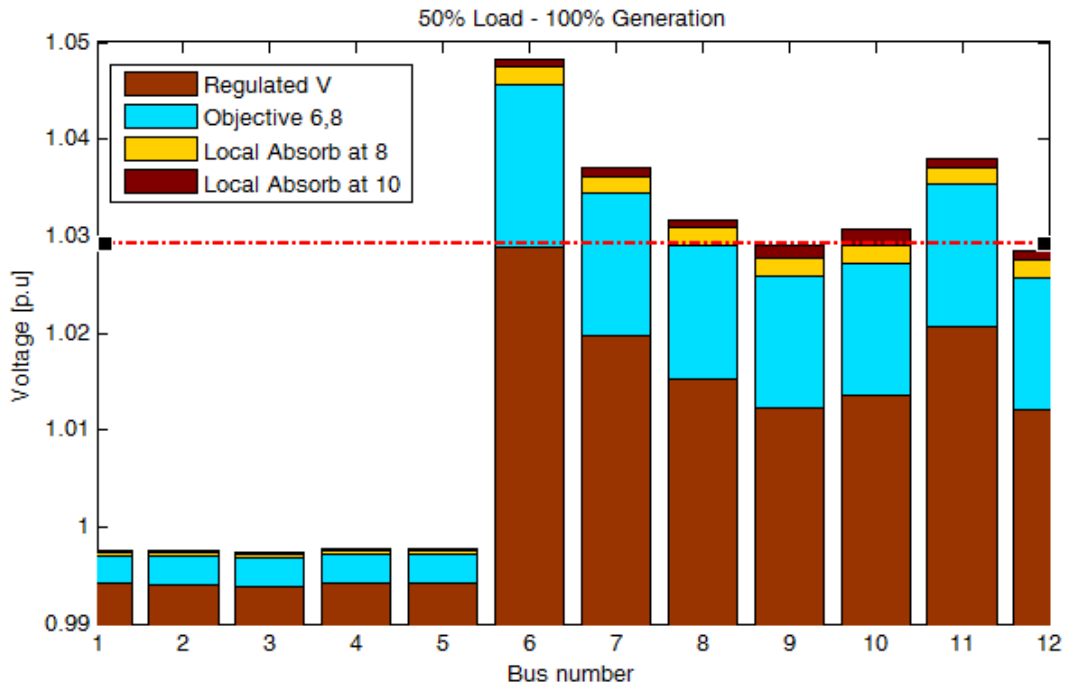
αποκτά τιμή 1,029p.u. Επίσης, η μονάδα παραγωγής 8 κατά σειρά, απορροφά σύμφωνα με την εκτίμησή της 0.66754MVar.

Εν συνεχεία, παραμένουν εκτός των επιτρεπτών ορίων οι ζυγοί 6,7,11. Όπως έχει αναφερθεί ο 7 θα επιδώσει προτεραιότητα στους κατάντη ζυγούς του. Εν προκειμένω, επειδή ο 7 έχει δυο φύλλα δηλαδή τους στους 6,11, θα επιδώσει προτεραιότητα στον πιο απομακρυσμένο. Ο πράκτορας του ζυγού 6 αποστέλλει αίτημα υποστήριξης στον 8 (ανάντη υποστήριξη). Ο 8 απαντά πρώτα στο αίτημα του. Η επίλυση τους προβλήματος των 8,11 αποδίδει τις εξής μεταβλητές απόφασης

$$x = \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,369999 \\ 0,115505 \end{bmatrix} p.u$$



Εικόνα 8.7 Γράφος Δικτύου



Εικόνα 8.8 Γράφημα τάσεων σε κάθε επίπεδο ρύθμισης

Εν τέλει η επίλυση του προβλήματος του ζυγού 6, προκαλεί πτώση τάσης στον 11 ώστε να επιστρέφει σε επιτρεπτά όρια η τάση του. Τα τελικά σημεία λειτουργίας των μονάδων παραγωγής θα είναι:

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	$Q_{absorbed}[MVar]$
DG_6	3,69999
DG_8	1,82258
DG_{10}	0,32536
DG_{11}	0,96288

Πίνακας 8.8 ς Τιμές αέργου ισχύος απορρόφησης σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο

Το σύνολο των απορροφώμενων αέργων ποσών για τη ρύθμιση θα είναι 5.74795MVar.

Κεντρική τεχνική ρύθμιση

Η κεντρική τεχνική στην παρούσα περίπτωση αποδίδει διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τα νέα σημεία λειτουργίας των μονάδων παραγωγής δίδονται στον πίνακα 8.9.

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	$Q_{injected}[MVar]$
DG_6	3,69999
DG_8	0,24089
DG_{10}	0,06777

DG_{11}	1,48999
-----------	---------

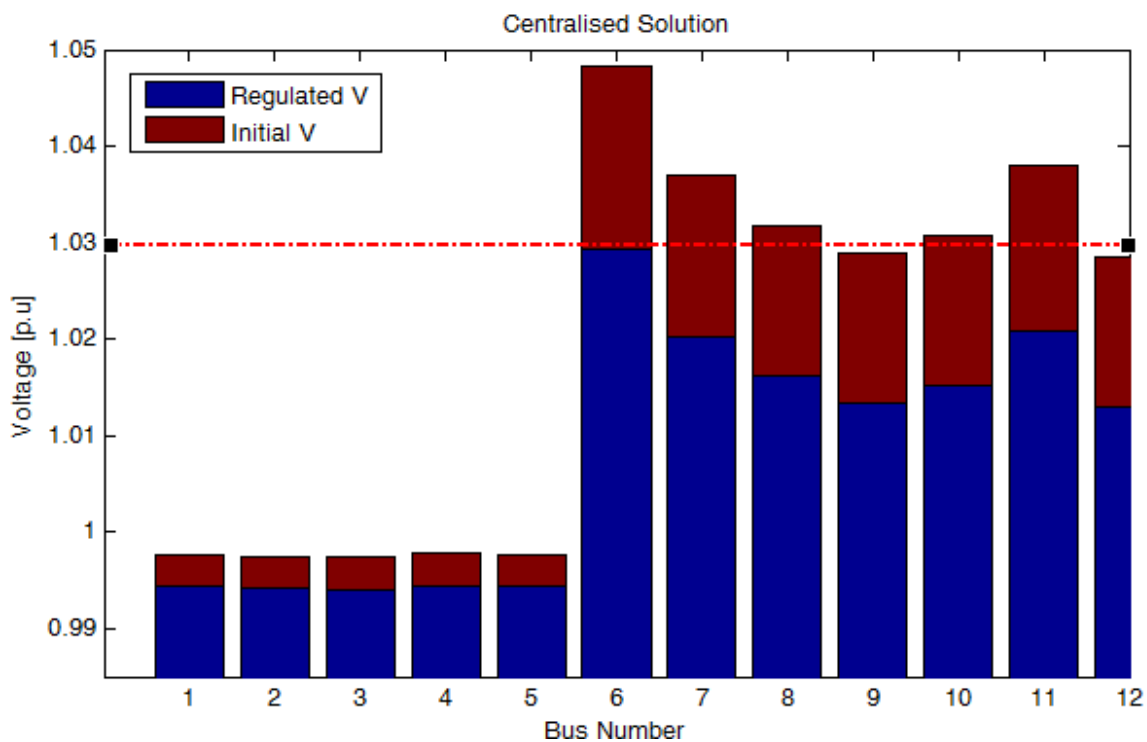
Πίνακας 8.9 Τιμές αέργου απορρόφησης σύμφωνα με την κεντρική μέθοδο

Οι συνολικές επομένως απορροφήσεις που αποφασίζονται μέσω της κεντρικής ρύθμισης είναι $Q_{tot} = 5.49866968 \text{ MVar}$. Και σε αυτή την περίπτωση η διαχείριση της αέργου ισχύος απορρόφησης ήταν καλύτερη από την προτεινόμενη μέθοδο. Ωστόσο, και στις δυο περιπτώσεις επιτεύχθηκε η ρύθμιση της τάσης.

Στην εικόνα 8.9 αποδίδεται το γράφημα των τάσεων και η διαμόρφωσή τους έπειτα από την κεντρική μέθοδο ρύθμισης τάσης.

Τα αποτελέσματα ως προς τις ενεργές απώλειες του δικτύου [σε MW] είναι :

Αρχικές	Προτεινόμενη Ρύθμιση	Κεντρική Ρύθμιση
0,617	0,89769	0,883

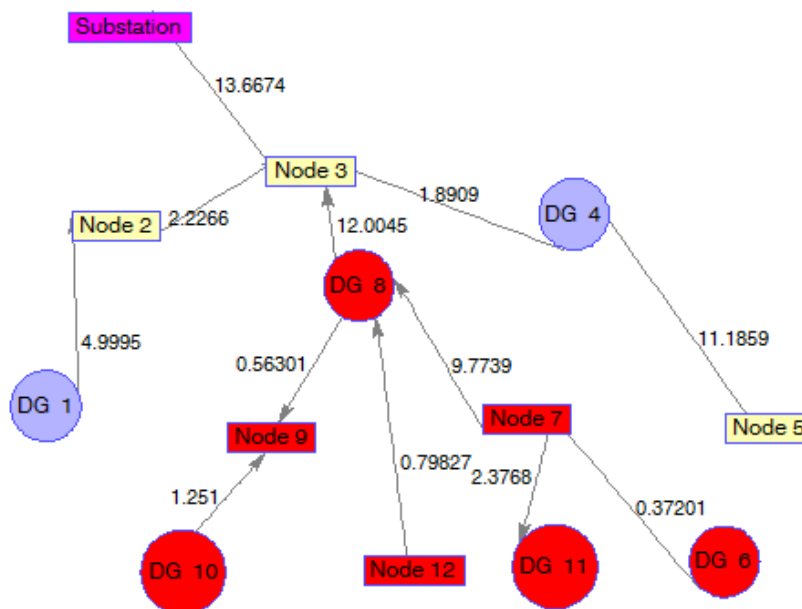


Εικόνα 8.9 Γράφημα τάσεων (Κεντρική Ρύθμιση)

➤ **40% Ονομαστικό φορτίο- 100% Παραγωγή**

Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε και πάλι ανυψωμένη τάση εξαιτίας του χαμηλότερου φορτίου και της μεγάλης παραγωγής. Οι ελεγκτές των πρακτόρων που εντοπίζουν πρόβλημα στην τάση είναι οι 6-12. Ο agent 8 αποδίδει προτεραιότητα επίλυσης στους πιο απομακρυσμένους ζυγούς, και με τον τρόπο αυτό πρώτοι οι κατάντη προβληματικοί ζυγοί εκκινούν ρύθμιση τάσης με τοπική ρύθμιση.

Καθώς το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης είναι αρκετά μεγάλο σε αυτή την περίπτωση καμία από τις γεννήτριες δεν έχει τη δυνατότητα απορρόφησης της απαιτούμενης αέργου σύμφωνα με τις εκτιμήσεις τους. Αυτό που συμβαίνει στην παρούσα φάση είναι να επιλυθεί ο πιο απομακρυσμένος ζυγός με γειτονικούς κόμβους ωστόσο δεν υπάρχει κάποιος για τους απομακρυσμένους 6,10,11,12.



Εικόνα 8.10 Γράφος δικτύου

Οι γεννήτριες 6,10,11 αλλά και ο ζυγός 12, θα αιτούνται ανάντη υποστήριξης από την 8 (*upstream support*). Βέβαια αυτό θα γίνει με προτεραιότητα και μόνο όταν περάσει από όλα τα επίπεδα ο τρέχων πιο απομακρυσμένος ζυγός, θα συνεχίσει ο επόμενος. Ο ζυγός 10 είναι ο πιο απομακρυσμένος εν προκειμένω. Καταστρώνεται πρόβλημα βελτιστοποίησης με κοινό στόχο την ρύθμιση της τάσης τους -του 10 και του συνεισφερόμενου 8-, τηρώντας όπως έχουμε τα όρια της διαθέσιμης αέργου ικανότητάς τους. Το πρόβλημα τους καταλήγει σε λύση με τις μεταβλητές απόφασης να λαμβάνουν τις εξής τιμές :

$$x = \begin{bmatrix} \Delta Q_8 \\ \Delta Q_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.253128 \\ 0.033426 \end{bmatrix} p.u$$

Επομένως οι νέες τιμές της άεργου ισχύος σύμφωνα με την απόφαση ρύθμισης θα είναι

$$\begin{bmatrix} Q'_8 \\ Q'_{10} \end{bmatrix} = [x] * S_{base} + [Q_i^o] = \begin{bmatrix} 2.53128 \\ 0.33426 \end{bmatrix} MVA_r$$

Όπως παρατηρείται και από το γράφημα ρυθμίζεται η τιμή της τάσης των δυο αυτών ζυγών οι οποίοι ταυτόχρονα λόγω της πτώσης τάσης ρυθμίζουν και την τάση του ζυγού 9 και του 12. Το επόμενο αίτημα που αποστέλλεται στον 8 είναι υποστήριξης του 6. Με τον τρόπο αυτό καταστρώνεται και αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης με τους 8 και 6. Ενδεικτικά επεξηγείται η ανάλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$Objective : \min(\Delta Q_6 + \Delta Q_8) = \min \{ [c]^T \cdot [x] \}$$

$$[c] = [1 \ 1] \text{ και } [x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_8 \end{bmatrix}$$

$$\text{Περιορισμοί : } 0 \leq [x] \leq [Q_{max}] \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_8 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Q_6^{nom} - Q_6^{cur} \\ Q_8^{nom} - Q_8^{cur} \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

όπου Q_i^{nom} η ονομαστική μέγιστη ισχύς όπως την έχουμε ορίσει στο Κεφάλαιο 7 για τον τρόπο προσδιορισμού του Q_i^{cur} αποτελεί την τρέχουσα τιμή άεργου ισχύος της γεννήτριας i

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_8 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0,37 \\ 0,273 - 0,2531284 \end{bmatrix}$$

Η βελτιστοποίηση έχει ως στόχο τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών που συμμετέχουν στην επίλυση του προβλήματος, επομένως θα είναι:

$$V_{min} + E_{hyst} \leq \begin{bmatrix} V_6 - \Delta V_6 \\ V_8 - \Delta V_8 \end{bmatrix} \leq V_{max} - E_{hyst}$$

$$\begin{bmatrix} 0.058005746538464 \\ 0.074905046843634 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} s_{66}\Delta Q_6 - s_{68}\Delta Q_8 \\ s_{86}\Delta Q_6 - s_{88}\Delta Q_8 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -0.000005746538464 \\ -0.016905046843634 \end{bmatrix}$$

Οι ευαισθησίες αποδίδονται στο παράρτημα με τους πίνακες, οι προκείμενες τιμές των ευαισθησιών τάσης θα είναι

$$\begin{cases} s_{68} = s_{86} = s_{88} = 0.02715 \\ s_{66} = 0.036567 \end{cases}$$

Το προκείμενο πρόβλημα δεν καταλήγει σε λύση επομένως εν συνεχεία επιχειρείται η επίλυση του γραμμικού προβλήματος με τους πράκτορες: $\{a_8, a_{11}\}$. Ωστόσο, ούτε αυτό το

πρόβλημα καταλήγει σε λύση καθώς έχει απορροφηθεί αρκετή ικανότητα του a_8 . Το τελευταίο πρόβλημα που επιχειρείται να επιλυθεί είναι μεταξύ των 8,12 (γειτονική υποστήριξη), αλλά δεν είναι σε θέση να ρυθμίσει τις τάσεις. Εφόσον οι πιο απομακρυσμένοι δεν μπορούν να καταλήξουν σε λύση ρύθμισης τάσης, δίνεται αντίστοιχα σειρά προκειμένου να επιχειρηθεί μερική ή και ολική ρύθμιση από κάποιον πιο ανάντη ζυγό. Εν προκειμένω, είναι ο 7 ο οποίος πρώτα αποστέλλει αιτήματα στήριξης στη γειτονιά του καθώς αποτελείται από DG agents.

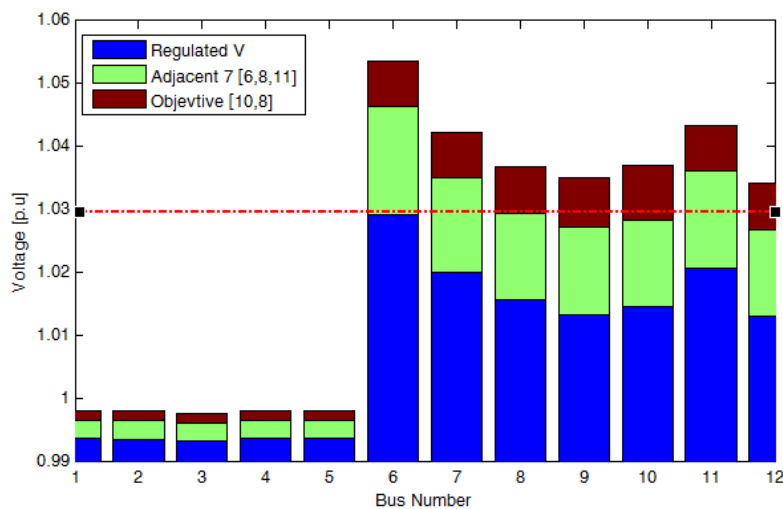
Σχηματίζεται επομένως στον πράκτορα του 7 η επίλυση του προβλήματος με το εξής σύνολο διαθέσιμο πρακτόρων προς συνεισφορά $A_V = \{a_6, a_8, a_{11}\}$. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος

$$\min \left\{ \sum_{j \in A_V} \Delta Q_j \right\} \text{ s. t } \begin{cases} 0 \leq \Delta Q_j \leq Q_{max}^j \\ V_{min} + E_{hyst} \leq V_j - \Delta V_j \leq V_{max} - E_{hyst} \\ V_{min} + E_{hyst} \leq V_7 - \Delta V_7 \leq V_{max} - E_{hyst} \end{cases}$$

Οι μεταβλητές απόφασης στις οποίες συγκλίνει το γραμμικό πρόβλημα είναι οι εξής

$$[x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_8 \\ \Delta Q_{10} \\ \Delta Q_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.369999 \\ 0.2213651 \\ 0.04677314 \\ 0.11275184 \end{bmatrix} p.u$$

$$\begin{bmatrix} Q'_6 \\ Q'_8 \\ Q'_{10} \\ Q'_{11} \end{bmatrix} = [x] * S_{base} + \begin{bmatrix} Q_6^0 \\ Q_8^0 \\ Q_{10}^0 \\ Q_{11}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.69999 \\ 2.213651 \\ 0.4677314 \\ 1.1275184 \end{bmatrix} MVAr$$



Εικόνα 8.11 Γράφημα τάσεων (στάδια ρύθμισης)

Η συνολική απορρόφηση αέργου ισχύος που αποφασίστηκε από την προτεινόμενη μέθοδο είναι $Q_{tot} = 7.5089MVar$.

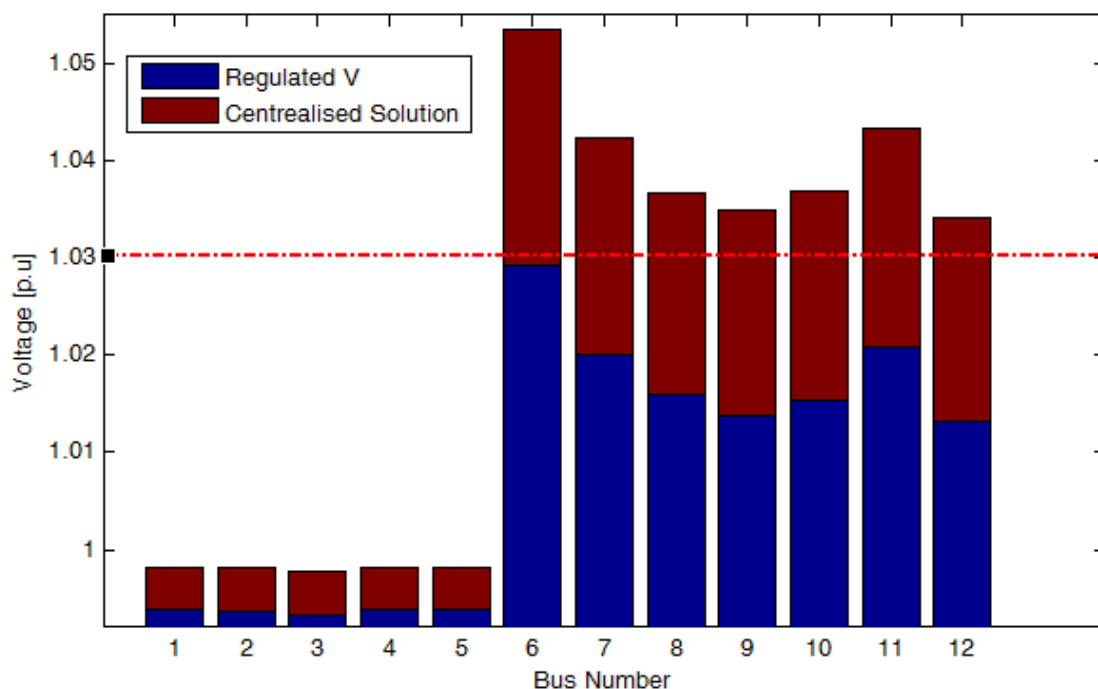
Κεντρικός Έλεγχος

Σε αυτήν την περίπτωση ότι η κεντρική τεχνική καταφέρνει να διαχειριστεί κατάλληλα τη δυνατότητα απορρόφησης των μονάδων παραγωγής. Τα νέα σημεία λειτουργίας των μονάδων παραγωγής βάση της κεντρικής επίλυσης είναι:

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	$Q_{absorbed}[MVar]$
DG_6	3,69999
DG_8	1,94285
DG_{10}	0,29481
DG_{11}	1,4899

Πίνακας 8.10 Απορροφήσεις αέργου μονάδων ΔΠ

Η συνολική απορρόφηση αέργου ισχύος $Q_{tot} = 7.4276624MVar$



Εικόνα 8.12 Τάσεις σύμφωνα με τις ρυθμίσεις της Κεντρικής Μεθόδου

Τα αποτελέσματα ως προς τις ενεργές απώλειες του δικτύου [σε MW] είναι:

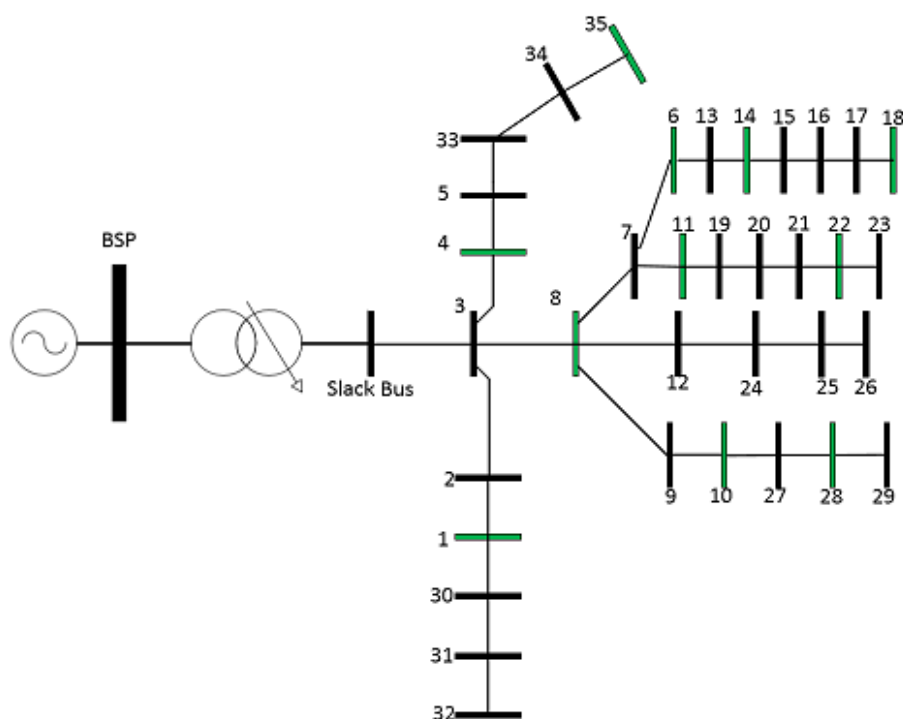
Αρχικές	Προτεινόμενη Ρύθμιση	Κεντρική Ρύθμιση
0.617	1.071	1.067

8.3 Δίκτυο 36 ζυγών

Μια επέκταση του προηγούμενου δικτύου για την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου ρύθμισης τάσης.

8.3.1 Ανάλυση δικτύου 36 κόμβων

Για πιο δύσκολες καταστάσεις ρύθμισης τάσης του δικτύου, προσομοιώνουμε το ίδιο δίκτυο με επεκτάσεις των γραμμών του. Λαμβάνουμε το δίκτυο της εικόνας 8.13 το οποίο έχει 36 ζυγούς.



Εικόνα 8.13 Εξεταζόμενο δίκτυο MT 36 ζυγών

Για την επέκταση του δικτύου θεωρούμε ότι αποτελούνται από αγωγούς θωρακισμένους αγωγούς χάλυβα με μόνωση XLPE, των διατομών που δίνονται στον πίνακα 8.11. Η επιλογή αυτών των αγωγών πραγματοποιήθηκε καθώς θεωρούμε ότι επεκτάσεις οδηγούνται σε βιομηχανική περιοχή. [43][44]

Τα μεγέθη των φορτίων που είναι εγκατεστημένα στις επεκτάσεις των αγωγών αποδίδονται στον πίνακα 8.12.

Γραμμή	Μήκος [km]	S [mm ²]	Γραμμή	Μήκος [km]	S [mm ²]
L12-24	0,8	70	L6-13	0,62	50
L24-25	0,49	70	L13-14	0,15	50
L25-26	0,35	70	L14-15	0,21	50
L10-27	1,1	95	L15-16	0,72	50
L27-28	0,67	95	L16-17	0,17	50
L28-29	0,2	95	L17-18	0,25	50
L1-30	1,2	150	L11-19	0,6	50
L30-31	0,8	150	L19-20	0,3	50
L31-32	0,95	150	L20-21	0,24	50
L5-33	1,3	150	L21-22	0,3	50
L33-34	0,79	150	L22-23	0,12	50
L34-35	0,4	150			

Πίνακας 8.11 Χαρακτηριστικά γραμμών [43]

Bus No.	P[MW]	Q[MVAr]
14	0,01	0,005
15	0,05	0,0182
16	0,8	0,41
17	0,2	0,108
18	0	0
19	0,05	0,0228
20	0,075	0,0425
21	0,12	0,0511
22	0,063	0,0349
23	0,095	0,0345
24	0,25	0,1139
25	0,11	0,0653
26	0	0
27	0,045	0,0243
28	0,075	0,0465
29	0,2	0,0911
30	1,1	0,5265
31	0,24	0,155
32	1,8	0,7668
33	0,235	0,1204
34	0,08	0,0475
35	0,453	0,179

Εικόνα 8.12 Εγκατεστημένη ισχύς φορτίων

Οι πρόσθετες μονάδες ΔΠ που είναι εγκατεστημένες στα πρόσθετα τμήματα δικτύου έχουν τα εξής χαρακτηριστικά

Γεννήτρια/μονάδα ΔΠ	P_{max} [MW]	Q_{max} [MVar]
DG 14	0.9	0.436
DG 18	0.175	0.085
DG 26	0.8	0.388
DG 28	0.25	0.122
DG 35	0.4	0.194

Πίνακας 8.13 Μονάδες παραγωγής

8.3.2 Παρουσίαση προσομοιώσεων

- 70% ονομαστικό φορτίο-100% παραγωγή

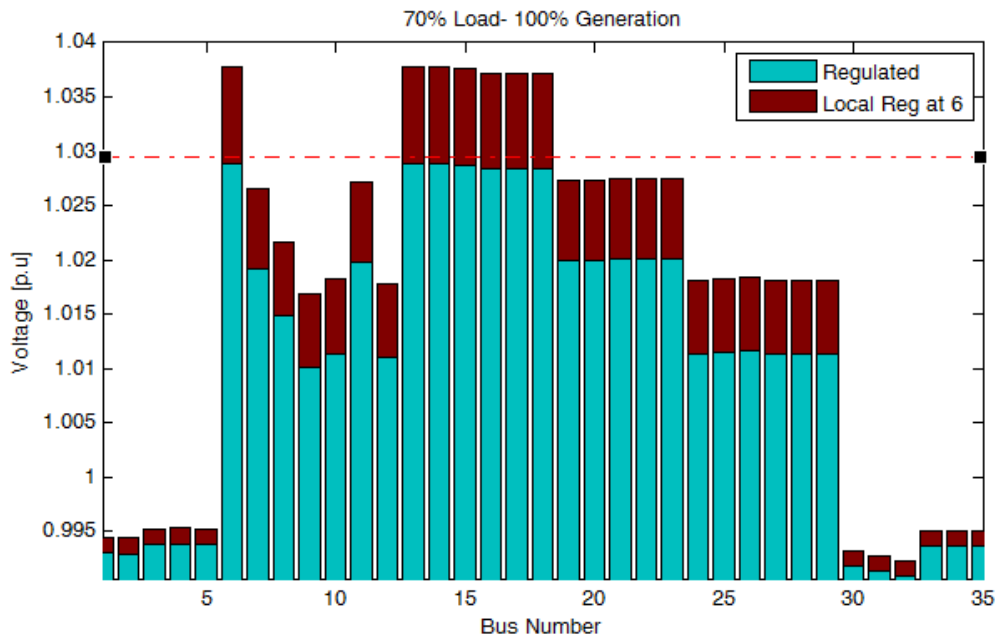
Από τον γράφο της εικόνας 8.15 μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι σε ορισμένα τμήματα του δικτύου ενδέχεται να υπάρχει ανύψωση τάσης, καθώς παρατηρείται ροή ενεργού ισχύος προς τον ΜΣ. Πράγματι παρατηρείται ανύψωση τάσης στους ζυγούς 6 και κατάντη εξαιτίας της αυξημένης παραγωγής των μονάδων.

Η επίλυση του προβλήματος εναπόκειται στον πιο απομακρυσμένο ζυγό του κλάδου δηλαδή ο DG agent 18 αναλαμβάνει να επιλύσει πρώτος το πρόβλημα της τάσης μέσω τοπικής απορρόφησης αέργου ισχύος. Δεν είναι σε θέση ωστόσο να λειτουργήσει σε τόσο χαμηλό ΣΙ. Εν συνεχεία, εκτιμάει και ο 14 αν δύναται να ρυθμίσει την τάση του. Εν τέλει μονάχα ο 16 καταφέρνει να το επιτύχει απορροφώντας $Q_6 = 2.3866MVar$.

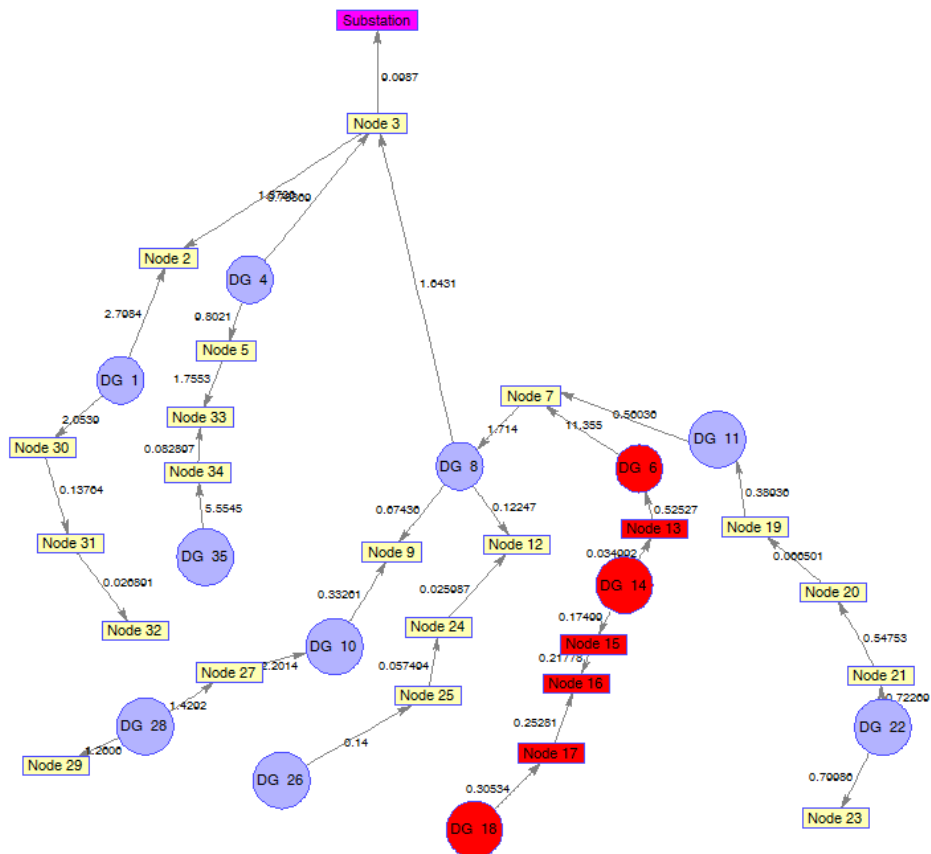
Στην περίπτωση όπου η ρύθμιση της τάσης είναι δυνατή από τοπική ρύθμιση μονάχα η τιμή της αέργου ισχύος που αποφασίζεται σε κάθε μέθοδο είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις.

Το σχετικό γράφημα για την παρουσίαση των τάσεων των ζυγών πριν και μετά την προκειμένη ρύθμιση αποδίδεται στην εικόνα 8.14. Η επίλυση επιτυγχάνεται από τοπική απορρόφηση αέργου ισχύος της μονάδος 6.

Οι τάσεις των ζυγών εκτός ορίων πριν και μετά τη ρύθμιση στην εικόνα 8.14.



Εικόνα 8.14 Γράφημα τάσης



Εικόνα 8.15 Γράφος δικτύου

➤ **60% Φορτίο-100% Παραγωγή**

Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα της ανύψωσης γίνεται αρκετά έντονο, καθώς επεκτείνεται σε μεγάλο μέρος ζυγών του δικτύου. Συγκεκριμένα, οι ζυγοί που παρουσιάζουν τάση εκτός ορίων είναι όλοι οι ζυγοί κατάντη του 7 δηλαδή συνολικά 13 ζυγοί, όπως παρουσιάζεται από τις κόκκινες κορυφές του γράφου στην εικόνα 8.17.

Ο ζυγός 7 αποδίδει προτεραιότητα επίλυσης στους κατάντη πιο απομακρυσμένους ζυγούς οι οποίοι παρουσιάζουν έχουν ίση ευαισθησία ως προς αυτόν, με την αυτοευαισθησία του 7. Με άλλα λόγια, εφόσον υπάρχουν κατάντη ζυγοί που εμφανίζουν πρόβλημα τάσης και θα επιχειρήσουν να ρυθμίσουν κατά το δυνατόν τοπικά, θα επωφεληθεί εν γένει κι ο ζυγός 7.

Με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος αποκρίνεται με προσπάθεια να ρυθμιστούν πρώτα οι τάσεις των ζυγών με τοπική ρύθμιση τάσης, ωστόσο το μέγεθος του προβλήματος είναι τέτοιο που απαιτείται συνεργατική επίλυση από τις διαθέσιμες προς συνεισφορά γεννήτριες.

Με τον τρόπο αυτό εκκινεί διαπραγματεύσεις ο DG agent 18, αιτούμενος από τους ανάντη DG agents συνεισφορά στην από κοινού επίλυση του προβλήματος. Εν αρχή σχηματίζει πρόβλημα βελτιστοποίησης με τη συνεισφορά του 14, ωστόσο το πρόβλημα δεν καταλήγει σε λύση καθώς δεν επαρκούν οι δυο τους μονάχα. Με τον τρόπο αυτό, αποδίδεται αίτημα από υψηλότερο επίπεδο, με αποτέλεσμα να καταστρώνεται πρόβλημα βελτιστοποίησης με τους διαθέσιμους $DG agent = \{a_{18}, a_{14}, a_6\}$. Το πρόβλημα καταλήγει σε λύση και οι μεταβλητές απόφασης έχουν τις εξής τιμές

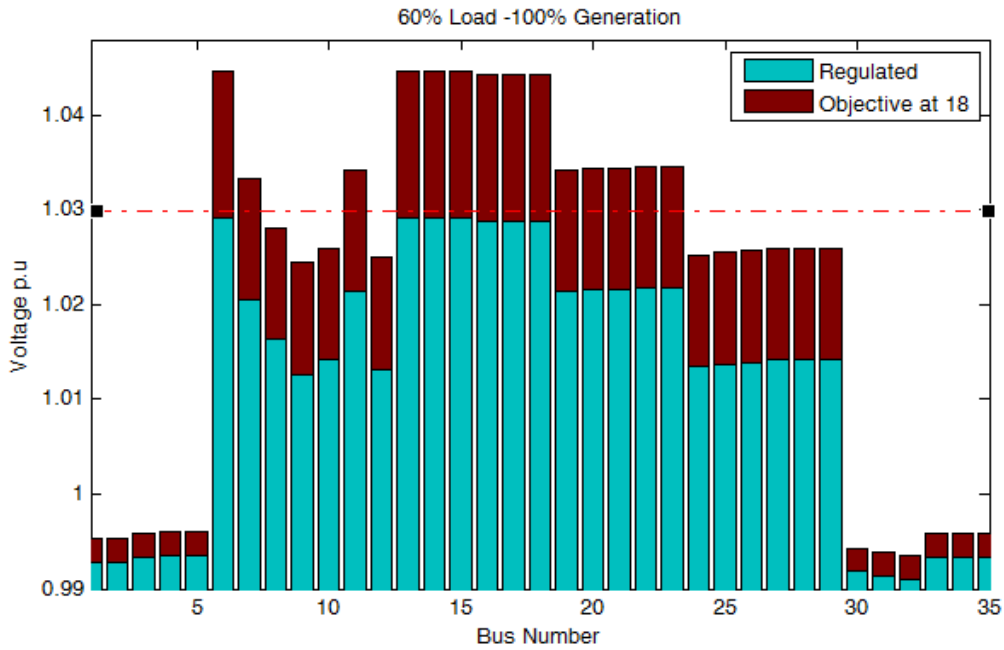
$$[x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_{14} \\ \Delta Q_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3649265 \\ 0.04145694 \\ 0.00747066 \end{bmatrix} \Rightarrow [Q'] = [Q] + [x] * S_{base} = \begin{bmatrix} 3.649265 \\ 0.4145694 \\ 0.047066 \end{bmatrix} MW$$

Σημαντικό να σημειωθεί ότι έπειτα από τα νέα σημεία λειτουργίας των γεννητριών που θα συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης, επηρεάζονται με ανάλογη πτώση τάσης και οι ζυγοί κατάντη του 11. Ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται εξαρτάται από την τοπολογία τους ως προς τις πηγές αέργου ισχύος, δηλαδή την ευαισθησία αυτών προς τους υπόλοιπους ζυγούς. Προφανώς, η ακτινική διάταξη του δικτύου επιβάλλει την ίδια πτώση τάσης στους κατάντη ζυγούς του 11. Εν προκειμένω, η εκτίμηση της πτώσης τάσης στον 11 και κατάντη θα είναι

$$s_{11,6} * (\Delta Q_6 + \Delta Q_{14} + \Delta Q_{18}) = \frac{\Delta Q_6 + \Delta Q_{14} + \Delta Q_{18}}{x_{sub,3} + x_{3,8} + x_{8,7}} = \frac{0.413854}{0,033089} = 0.013694 p.u$$

$$s_{q,6} = s_{q,14} = s_{q,18}, q \in \{11,19,20,23\}$$

Η παραπάνω πτώση τάσης αποτελεί την εκτιμώμενη τιμή αυτής, η οποία δεν απέχει πολύ από την πραγματική όπως βλέπουμε στην εικόνα 8.16.



Εικόνα 8.16 Γράφημα Τάσεων κατά τη ρύθμιση

Το συνολικό ποσό απορρόφησης που αποφασίσθηκε στην προτεινόμενη μέθοδο είναι:

$$Q_{tot} = 4.13854 MVar$$

Ακολουθεί ο γράφος του δικτύου για την προκειμένη φόρτισή του (εικόνα 8.17).

Bus Name	Initial Voltage [p.u]	Proposed (Local control at 6)	Central Voltage Control
6	1.0445	1.0293	1.0293
13	1.0447	1.0292	1.0292
14	1.0448	1.0293	1.0293
15	1.0446	1.0291	1.0291
16	1.0443	1.0288	1.0288
17	1.0443	1.0288	1.0288
18	1.0443	1.0288	1.0288
11	1.0342	1.0214	1.0214
19	1.0343	1.0215	1.0215
20	1.0344	1.0216	1.0216
21	1.0344	1.0216	1.0216
22	1.0345	1.0217	1.0217
23	1.0345	1.0217	1.0217

Για άλλη μια φορά η διαφορά στις ενεργές απώλειες είναι σχεδόν αμελητέα μεταξύ των δυο μεθόδων. Συγκεκριμένα, στον κεντρικό έλεγχο οι ενεργές απώλειες του δικτύου ανέρχονται στο 0.898MW, ενώ στην προτεινόμενη μέθοδο 0,899MW.

➤ 60% Φορτίο-100% Παραγωγή

Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης θα είναι ακόμη μεγαλύτερο, καθώς η παραγωγή των μονάδων ΔΠ είναι η μέγιστη ονομαστική ενώ ταυτόχρονα οι καταναλώσεις είναι κάτω από το μισό της ονομαστικής κατανάλωσης. Παρατηρώντας το γράφο του δικτύου για αυτή την περίπτωση στην εικόνα 8.17. Συγκεκριμένα, 24 ζυγοί παρουσιάζουν πρόβλημα ανύψωσης τάσης.

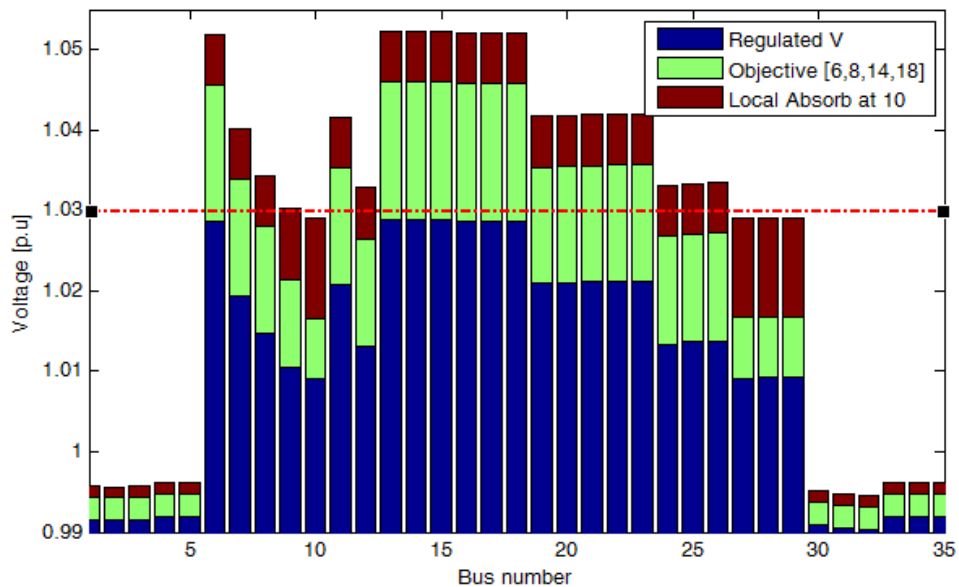
Όπως έχει αναφερθεί κάθε πράκτορας που εντοπίζει πρόβλημα τάσης ενημερώνει τα φύλλα του(σε όρους δέντου) προκειμένου η ρύθμιση να εκκινήσει από τους πιο απομακρυσμένους. Όλες οι γεννήτριες επιχειρούν να ρυθμίσουν την τάση με μια τοπική απορρόφηση αέργου ισχύος, η οποία όπως δείχθηκε εκτιμάται μέσω της αυτοευαισθησίας τους. Η ρύθμιση βέβαια σε κάθε κλαδί εκκινεί από τον πιο κατάντη. Η DG 10 είναι η μοναδική DG που διαθέτει την απαιτούμενη άεργο ισχύ απορρόφησης. Έτσι αποφασίζει την απορρόφηση ποσού $Q_{absorb}^{10} = 2.28207MVar$, η οποία δημιουργεί ικανή πτώση τάσης ώστε να ρυθμίζονται οι γειτονικοί του ζυγοί 9,27,28 & 29.

Ο πράκτορας 7 ενημερώνεται για τα κατάντη προβλήματα των δυο κλάδων και γνωρίζοντας ότι ο κλάδος που περιλαμβάνει τον 18 είναι πιο απομακρυσμένος του επιδίδει προτεραιότητα επίλυσης.

Εν συνεχεία ο πράκτορας του 18(ως ο πιο απομακρυσμένος) ζητά υποστήριξη από το ανάντη δίκτυο. Πρώτο αίτημα συνεισφοράς από τον 14 με τον οποίο δεν είναι σε θέση να επιλύσουν το ζήτημα, όπως ούτε και με τον 18, επομένως σχηματίζει πρόβλημα επίλυσης και με τον 8. Το πρόβλημα που καλείται να επιλυθεί είναι με τους πράκτορες παραγωγής $A_V = \{a_{18}, a_{14}, a_6, a_8\}$ το οποίο καταλήγει σε λύση με μεταβλητές απόφασης

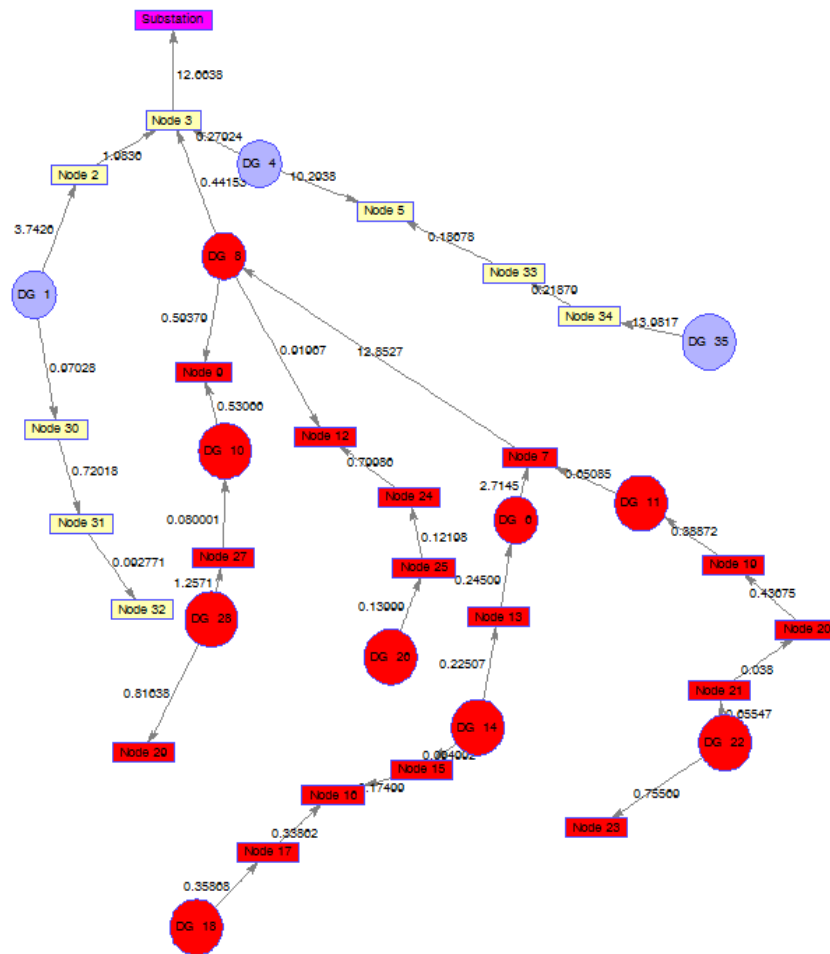
$$[x] = \begin{bmatrix} \Delta Q_6 \\ \Delta Q_8 \\ \Delta Q_{14} \\ \Delta Q_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.36999 \\ 0.265294 \\ 0.435999 \\ 0.087999 \end{bmatrix} p.u$$

Η τελευταία απορρόφηση αέργου ισχύος που αποφασίστηκε προκαλεί ικανή πτώση τάσης ώστε να ρυθμίζονται και οι ζυγοί κατάντη του 11, όπως φαίνεται και από την εικόνα 8.18. Η συνολική άεργος απορρόφησης της προτεινόμενης μεθόδου είναι $Q_{tot} = 9.159018MVar$.



Εικόνα 8.18 Γράφημα τάσεων

Εικόνα 8.16 Γράφημα Τάσεων (Στάδια Ρύθμισης)



Εικόνα 8.17 Γράφος δικτύου

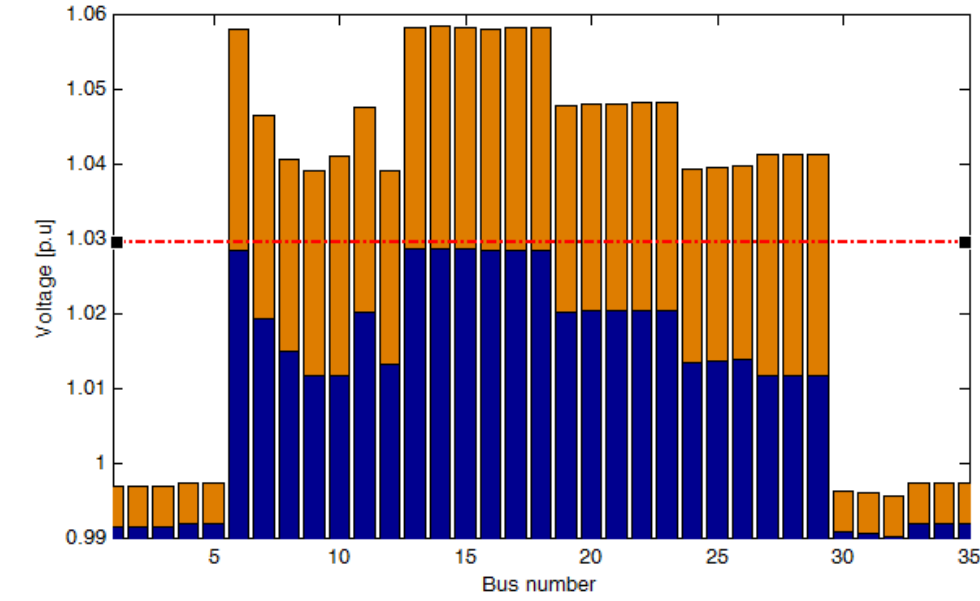
Κεντρική Επίλυση προβλήματος

Το κεντρικό πρόβλημα εξάγει λύση με συνολικό ποσό απορρόφησης $Q_{tot} = 8,99634 MVar$.

Οι ενεργές απώλειες καταγράφονται στον πίνακα 8.14 σε MW

Αρχικές	Προτεινόμενη Ρύθμιση	Κεντρική Ρύθμιση
0.617	1.453	1.434

Πίνακας 8.14 Ενεργές Απώλειες [MW]



Εικόνα 8.18 Γράφημα τάσεων (κεντρική επίλυση)

➤ **80% ονομαστικό φορτίο & 40% παραγωγή**

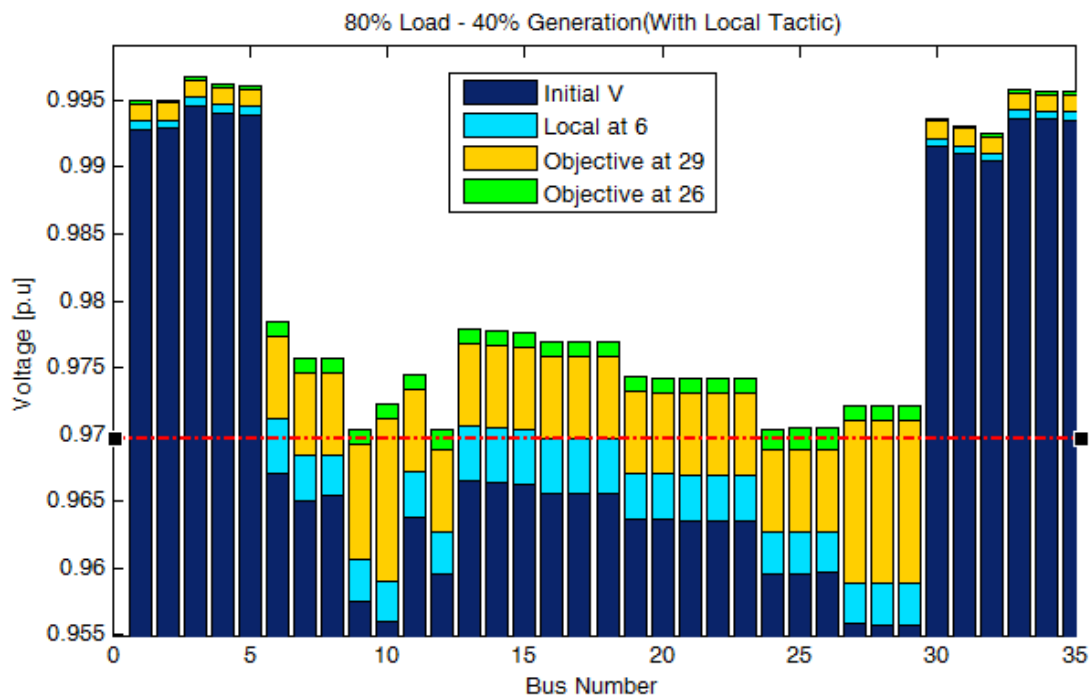
Στη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης του δικτύου η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης καλείται ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο πρόβλημα τάσης. Ο συνολικός αριθμός ζυγών που εμφανίζουν πρόβλημα στην τάση είναι 24. Δίνεται προτεραιότητα επίλυσης στους κατάντη πιο απομακρυσμένους ζυγούς που παρουσιάζουν πρόβλημα τάσης.

Η απόκριση του αλγορίθμου αναφέρεται αρχικά στη ρύθμιση μέσω τοπικών εγχύσεων αέργου ισχύος, με προτεραιότητα στις πιο απομακρυσμένες. Ωστόσο, καθώς η πτώση τάσης είναι ιδιαίτερα μεγάλη συγκριτικά με τις προηγούμενες εξεταζόμενες περιπτώσεις μπορούμε διαισθητικά να εκτιμήσουμε ότι σχεδόν καμία DG δεν θα καταφέρει να το επιτύχει χωρίς τη συνεργασία που προβλέπουν τα επόμενα στάδια του αλγορίθμου. Μονάχα η DG6 καταφέρνει να πραγματοποιήσει τοπική αντιστάθμιση, καθώς αποτελεί σχετικά μεγάλη μονάδα ΔΠ και επομένως έχει και μεγάλη ικανότητα έγχυσης.

$$\Delta Q_6 = -1.05825 \text{ MVar} \Rightarrow Q_6 = Q_6^0 + \Delta Q_6 = -1.05825 \text{ MVar}$$

Εν συνεχεία οι κατάντη ζυγοί αποστέλλουν αιτήματα υποστήριξης προς το ανάντη δίκτυο. Το μοναδικό από τα προβλήματα βελτιστοποίησης που καταλήγουν σε λύση αποτελεί αυτό που καταστρώνει ο DG 18 με σύνολο διαθέσιμων agents $A = \{a_{18}, a_{14}, a_6, a_8\}$, το οποίο καταλήγει σε λύση χωρίς ωστόσο να ρυθμίσει της τάσης στους ζυγούς, πράγμα το οποίο οφείλεται σε σφάλμα των ευαισθησιών. Οι μεταβλητές απόφασης αποστέλλονται στους agent που εκδήλωσαν επιθυμία προκειμένου να ρυθμίσουν το συντελεστή ισχύος τους.

Ακόμη και στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το σφάλμα των ευαισθησιών είναι σχεδόν αμελητέο παρά το πλήθος των γεννητριών που συνεισφέρουν ποσά άεργων αντισταθμίσεων.



Εικόνα 8.19 Γράφημα τάσεων (Στάδια ρύθμισης)

Ο απομακρυσμένος ζυγός 29 καταστρώνει γραμμικό πρόβλημα με τους DG agent $\{a_{28}, a_{10}, a_8\}$. Μέσω των νέων σημείων λειτουργίας ρυθμίζεται η τάση στους περισσότερους ζυγούς όπως φαίνεται στην εικόνα 8.19. Ο ζυγός 29 ρυθμίζεται ταυτόχρονα με τους περισσότερους γειτονικούς ζυγούς του. Η επίδραση του και στους υπόλοιπους ζυγούς παρατηρούμε ότι έχει θετικό αντίκτυπο με την έννοια ότι ρυθμίζονται κι άλλοι παράλληλα με τις προκειμένες εγχύσεις άεργου ισχύος. Απομένουν εκτός ορίων τάσης οι 9,10,12,24,25 & 26. Πλέον αναλαμβάνει ο 26 ο οποίος σχηματίζει γραμμικό πρόβλημα επίλυσης -κατόπιν αιτήματος - με τον ανάντη DG8. Όλες οι τάσεις των ζυγών είναι πλέον εντός ορίων.

8.4.1 Δίκτυο 50 ζυγών με 2 feeders

Σε όλες τις προσομοιώσεις όπως έχει αναφερθεί η τάση του ζυγού αναφοράς θεωρείται σταθερή και ίση με 1 ανά μονάδα. Επομένως, οι δυο τροφοδότες είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους με την έννοια ότι οι μεταβολές στον έναν δεν επηρεάζουν τον άλλο.

Ο δεύτερος feeder θεωρούμε ότι αποτελείται από 14 (36-49) επιπλέον ζυγούς. Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των φορτίων του δεύτερου feeder:

Bus No	P[MW]	Q[MVAr]	cosφ
36	1,2	0,35	0,96
37	0,8	0,2904	0,94
38	1,3	0,5923	0,91
39	0,866	0,2353	0,965
40	0,622	0,1447	0,974
41	0,7	0,3586	0,89
42	0,3	0,1487	0,896
43	0,97	0,4725	0,899
44	0,4	0,1581	0,93
45	0,2	0,0852	0,92
46	0,33	0,1304	0,93
47	0,1	0,0456	0,91
48	0,54	0,196	0,94
49	0,43	0,1699	0,93

Πίνακας 8.15 Ονομαστικά μεγέθη φορτίων

Το πρόσθετο αυτό τμήμα αποτελείται από εναέριες γραμμές αγωγών τύπου ACSR, τα χαρακτηριστικά των οποίων αποδίδονται στον πίνακα 8.16.

Γραμμή	Μήκος
36-37	0,9
37-38	0,62
38-39	1,5
39-40	1,3
40-41	0,98
41-42	1,1
42-43	0,88
43-44	0,76
44-45	1,32
45-46	0,629
46-47	0,97
47-48	1,7
48-49	1,078

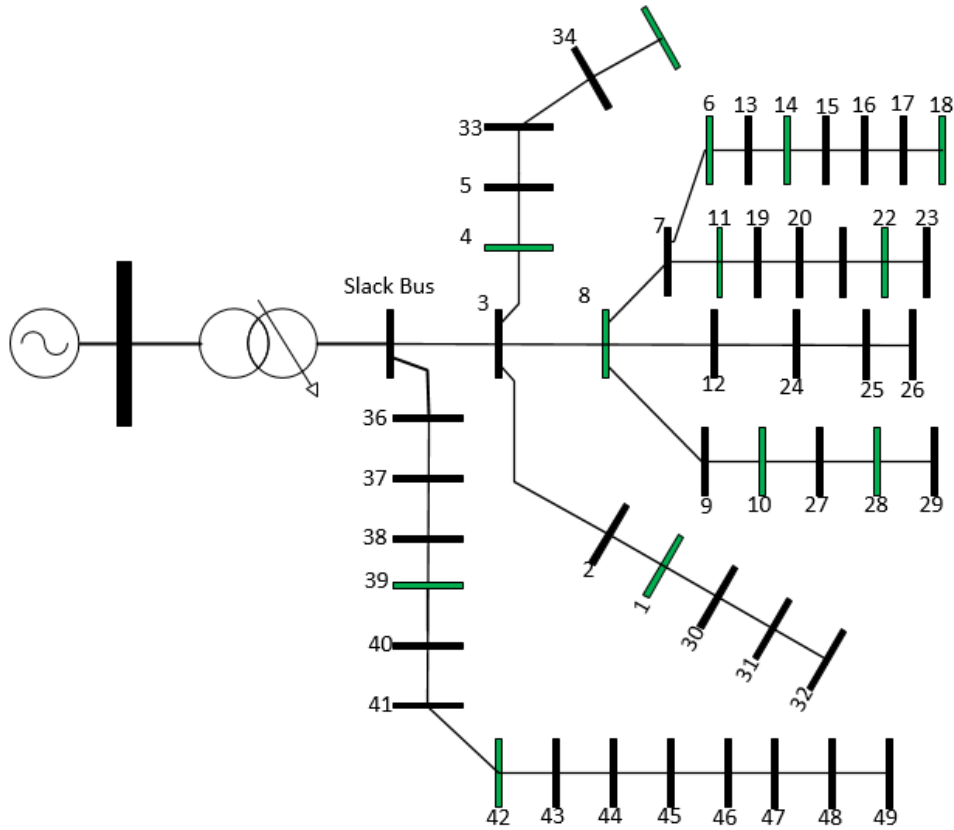
Πίνακας 8.16 Μήκη γραμμών

Με την σειρά χρώματος του παραπάνω πίνακα οι διατομές των αγωγών είναι τύπου ACSR 3x95 ,3x35 και 3x16 mm².

S[mm ²]	R[Ω/km]	Χ[Ω/km]
3x95	0.215	0.334

3x35	0.576	0.397
3x16	1.268	0.422

Εικόνα 8.17 Χαρακτηριστικά μεγέθη αγωγών [45]



Εικόνα 8.20 Δίκτυο 50 ζυγών (2 feeders)

Οι πρόσθετες μονάδες ΔΠ που είναι εγκατεστημένες στα πρόσθετα τμήματα δικτύου έχουν τα εξής χαρακτηριστικά

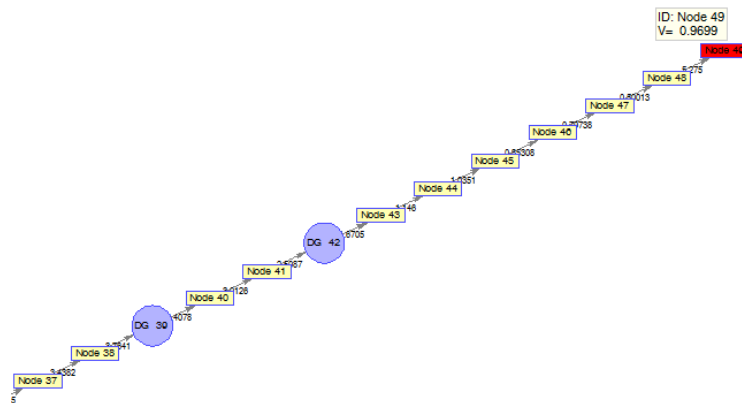
DG name	$P_{max}[MW]$	$Q_{max}[MVAr]$
DG 39	0.9	0.436
DG 42	0.175	0.085

Η θεώρηση που έχει γίνει ότι ο δεύτερος feeder είναι εγκατεστημένος στο ζυγό MT που αποτελεί το ζυγό ταλάντωσης του δικτύου, ο οποίος είναι σταθερά ρυθμισμένος από τον AVR. Αυτό σημαίνει ότι κατά της διάρκεια των όποιων μεταβολών στον feeder 1, δεν

υπάρχει επίδραση στο προφίλ τάσης στον feeder 2. Αυτό εξασφαλίζει ότι η ρύθμιση τάσης του ενός δεν είναι ανεξάρτητη από του άλλου καθώς η τεχνική επίλυσης είναι αποκεντρωμένη.

8.4.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων

- Θεωρούμε για το δίκτυο των 2 κορμών τροφοδότησης κατάσταση φόρτισης 85% του ονομαστικού φορτίου και 55% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος. Υποθέτουμε αυξημένη ζήτηση φορτίου τον τελευταίων ζυγών του 2ου feeder δηλαδή των ζυγών 47,48 & 49.

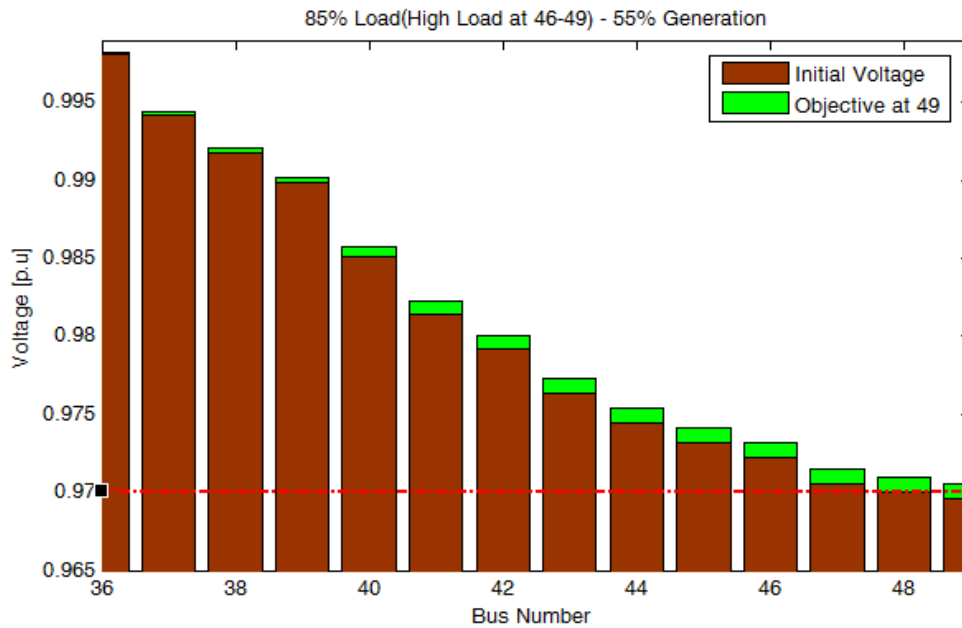


Εικόνα 8.21 Τμήμα γράφου 2ου τροφοδότη

Στην περίπτωση αυτή στον κύριο feeder δεν παρουσιάζεται κάποιο πρόβλημα τάσης ενώ στο δεύτερο υπάρχει υπόταση στο ζυγό 49. Συγκεκριμένα, η τάση στο ζυγό αυτό είναι 0,9699 p.u.

Ο agent 49 ζητάει για υποστήριξη από ανάντη DG agent, και συγκεκριμένα πρώτα από τον DG agent 42, με τον οποίο καταφέρνουν να επιλύσουν το πρόβλημα. Η επίλυση ανάγεται στην έγχυση αέργου ισχύος από ζυγό 42. Το νέο σημείο λειτουργίας για τον 42 αποδίδεται από την επίλυση του γραμμικού προβλήματος που επιλύεται στον 49. Η μεταβλητή απόφασης είναι $x_1 = [\Delta Q_1] = [0.016332] p.u \Rightarrow Q_1 = Q_1^0 + \Delta Q_1 * S_{base} = 0.16332 MVA$.

Όπως έχουμε δει και σε προηγούμενες προσομοιώσεις, η κεντρική μέθοδος ελέγχου τάσης αποκρίνεται πρακτικά με την ίδια σχεδόν λύση στις μεταβλητές ελέγχου, καθώς αξιοποιεί τις γεννήτριες παραγωγής με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Ως προς τις μεταβολές στις ενεργές απώλειες επομένως, καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα στα 0.582MW ενώ οι αρχικές ήταν 0,584MW.



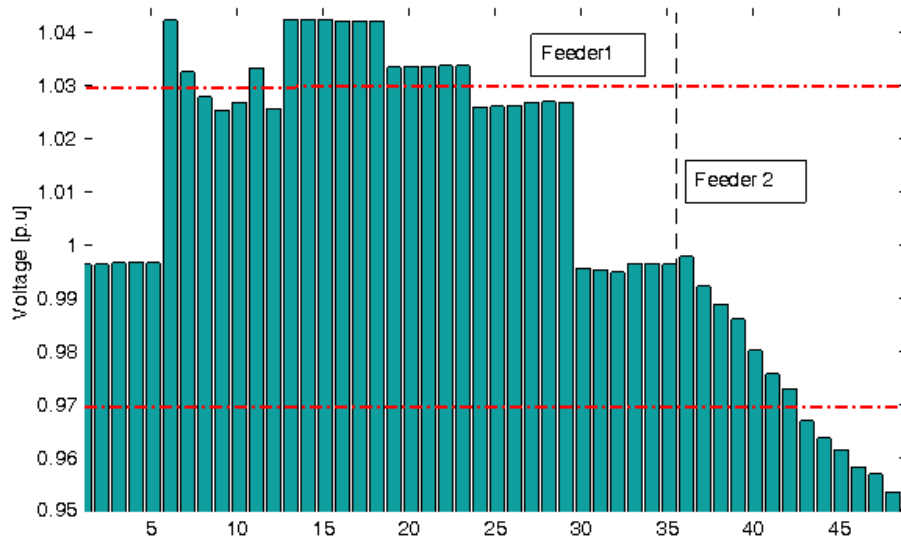
Εικόνα 8.22 Γράφημα ρύθμισης τάσης

- Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε διαφορετικά ποσοστά φόρτισης σε κάθε feeder. Θέτουμε στον 1ο feeder 45% της ονομαστικής κατανάλωσης και 85% παραγωγή των μονάδων που είναι εγκατεστημένες σε αυτό. Στο 2ο feeder θεωρούμε υψηλή κατανάλωση 95% της ονομαστικής των φορτίων και 25% της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων ΔΠ.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η τάση στον 1 feeder είναι εκτός του πάνω ορίου τάσης, ενώ στο δεύτερο εξαιτίας της υψηλής φόρτισης εντοπίζεται υπόταση εικόνα 8.23.

Όπως παρατηρούμε και στους τροφοδοτές υπάρχει πλήθος ζυγών με τάση εκτός ορίων. Στο σύνολο του δικτύου 21 από τους 49(50οστός ο ζυγός ταλάντωσης), παρουσιάζουν πρόβλημα τάσης. Στον πρώτο τροφοδοτή παρατηρείται σημαντική ανύψωση τάση στους ζυγούς [6 13 14 15 16 17 18 ,7,11,19,13 ,21,22 & 23], ενώ στο δεύτερο υπόταση στους [43-49].

Στον κεντρικό έλεγχο, ο τυπικός ελεγκτής θα ενημερωθεί για τα προβλήματα τάσης και των δυο τροφοδοτών όπως θα δούμε. Η επίλυση, εξάλλου, στην προτεινόμενη μέθοδο ρύθμισης τάσης γίνεται στα στενότερα δυνατά πλαίσια της περιοχής που εμφανίζεται το πρόβλημα και μόνο αν δεν επιλύεται ζητείται υποστήριξη από το υπόλοιπο δίκτυο.



Εικόνα 8.23 Γράφημα τάσεων δικτύου

Απόκριση αλγορίθμου

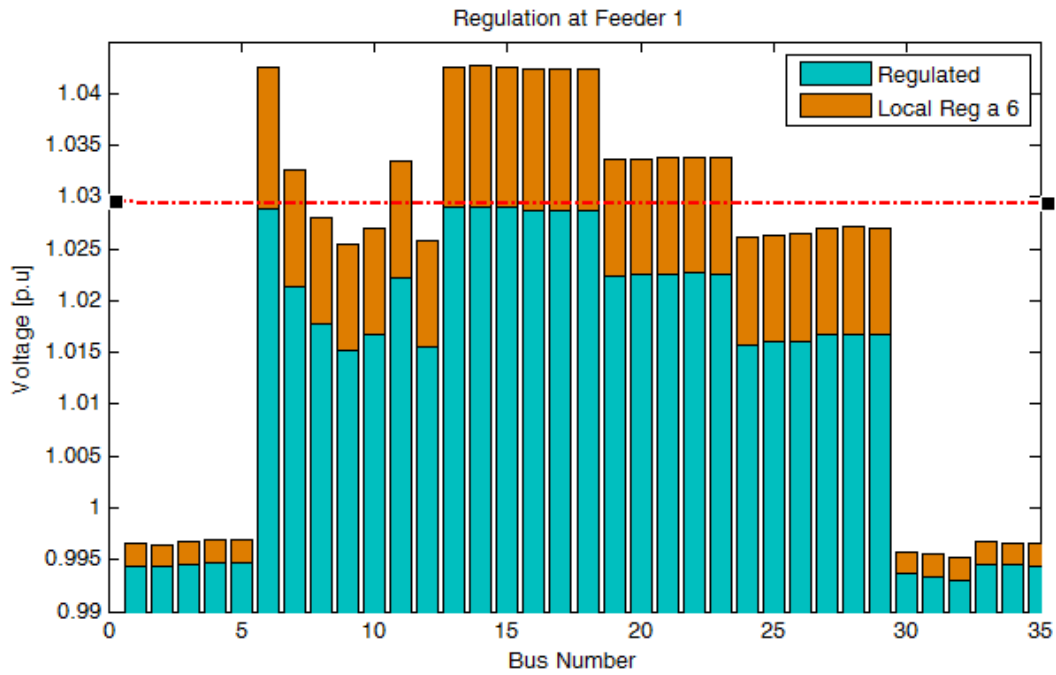
Στον 1ο feeder το πρώτο στάδιο έγκειται στην προσπάθεια ρύθμισης τάσης με τοπική αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Όπως έχει αναφερθεί, αποδίδεται η κατάλληλη προτεραιότητα επίλυσης στους πιο μακρινούς ζυγούς σε κάθε κλάδο του δικτύου. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες μονάδες προκειμένου να ρυθμίσουν τοπικά την τάση του, μόνο η DG6 έχει την ικανότητα απορρόφησης ικανού ποσού ισχύος.

$$Q_6 = Q_6^0 + \Delta Q_6 * S_{base} = 3.67694 MVar$$

Η νέα τάση στο ζυγό 6 είναι 1,0289p.u

Η άεργος αντιστάθμιση της DG6 προκαλεί πτώση τάσης και στους υπόλοιπους ζυγούς ρυθμίζοντας την τάση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.25.

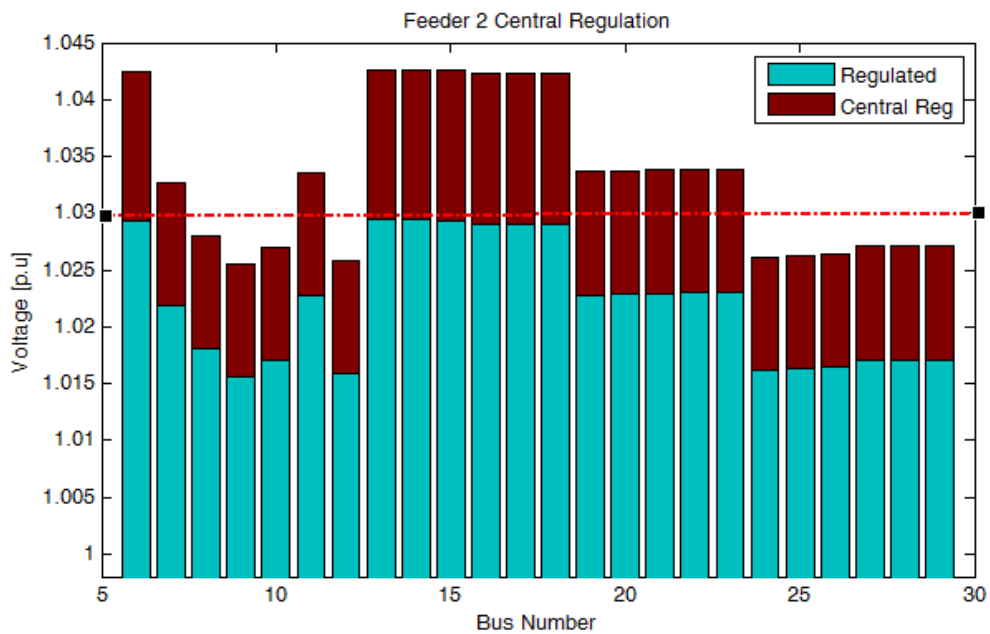
Στο 2ο feeder, το πρόβλημα είναι αρκετά εκτεταμένο καθώς η πτώση τάσης στους τελευταίους ζυγούς είναι σημαντική. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής είναι σχετικά χαμηλή και επομένως η άεργες ικανότητες αντιστάθμισης είναι επίσης χαμηλές. Ο τελευταίος ζυγός 49 αιτείται από τον ανάντη DG 42 να συνεισφέρει αλλά η εκτίμηση του γραμμικού προβλήματος δεν καταλήγει σε λύση. Επόμενο βήμα είναι να ενταχθεί και ο DG 39 στην ομάδα υποστήριξης του κατάντη δικτύου, πάλι ωστόσο δεν αρκεί η απαιτούμενη διαθέσιμη άεργος των αυτών γεννητριών. Εν συνεχεία, επιχειρείται ακριβώς το ίδιο και από τους υπόλοιπους ανάντη ζυγούς, δηλαδή η προσπάθεια επίλυσης με ανάντη υποστήριξη προκειμένου να μετριάσουν το πρόβλημα. Ωστόσο καμία δεν καταφέρνει να καταλήξει σε λύση.



Εικόνα 8.25 Γράφημα τάσεων κατά τη ρύθμιση

Κεντρική ρύθμιση τάσης

Ο κεντρικός έλεγχος . Το γραμμικό πρόβλημα του 2ου τροφοδότη δεν αναμένεται να καταλήξει σε λύση διότι όπως είδαμε από την προτεινόμενη μέθοδο δεν επαρκούσε η διαθέσιμη ικανότητα έγχυσης αέργου ισχύος των μονάδων ,ούτε για τη μερική επίλυση του προβλήματος .



Εικόνα 8.26 Γράφημα τάσεων κατά τη ρύθμιση

Όπως αναμένονταν ούτε η κεντρική μέθοδος είναι σε θέση να επιλύσει το πρόβλημα τάσης του 2ου feeder. Ως προς τις μεταβολές των απωλειών ενεργού ισχύος για τη ρύθμιση του πρώτου δικτύου με την κεντρική μέθοδο, οι ολικές απώλειες του δικτύου ήταν 0,8186 MW ενώ με την προτεινόμενη μέθοδο είναι 0,819MW (αρχικές απώλειες 0,656MW). Για τον πρώτο feeder αποκρίνεται με το ίδιο αποτέλεσμα απορρόφησης αέργου ισχύος.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα - Προοπτικές για επεκτάσεις

Από τα πρώτα Κεφάλαια της εργασίας σχολιάστηκε η ανάγκη εκσυγχρονισμού των συμβατικών δικτύων στα πλαίσια της ανάπτυξης των ευφυών δικτύων. Οι νέες απαιτήσεις σε επίπεδο καταναλωτή-παραγωγού, η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ αλλά και γενικότερα της ΔΠ απαιτούν καινοτόμες τεχνικές ελέγχου και ρύθμισης των δικτύων. Η υψηλή εμφάνιση πολλών μονάδων ΔΠ, ηλεκτρικών οχημάτων, διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας, τα ευέλικτα φορτία αλλά και η τάση αποκέντρωσης των μονάδων παραγωγής, αναδεικνύουν την ολοένα εξελισσόμενη δομή και λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν εναλλακτικές μέθοδοι υπολογισμού ευαισθησιών τάσης ως προς ενεργές και άεργες μεταβολές ισχύος, βασιζόμενες στην τοπολογία της ακτινικής διάταξης των δικτύων διανομής. Η Ιακωβιανή μήτρα της μεθόδου N-R εισάγει μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα για τον υπολογισμό των ευαισθησιών, πράγμα το οποίο παρακάμφθηκε στις δυο προσεγγίσεις που περιγράφηκαν. Η ακτινική τοπολογία των δικτύων διανομής επιτρέπει την απλοποιημένη αποτίμηση των ευαισθησιών τάσης. Οι προσεγγίσεις και οι θεωρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη δεύτερη μέθοδο υπολογισμού ευαισθησιών δεν εισάγουν σημαντικό σφάλμα στην εκτιμώμενη τάση. Από την ανάλυση των ευαισθησιών τάσης στο κεφάλαιο 6, προκύπτει ότι οι ευαισθησίες που χρησιμοποιούνται στην προτεινόμενη μέθοδο ρύθμισης τάσης είναι δυνατό να εκτιμήσουν με σφάλμα μικρότερο του 0.05% τις τάσεις στους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου στα πλαίσια των επιτρεπτών ορίων της γραμμικοποίησης. Η χρησιμοποίησή τους επομένως, προτείνεται στην παρούσα αποκεντρωμένη τεχνική ρύθμισης τάσης. Τέθηκαν, ωστόσο, τιμές υστέρησης στο όριο της τάσης προκειμένου να αποφεύγονται τα σφάλματα από λανθασμένες εκτιμήσεις κατά την χρήση των ευαισθησιών.

Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης τάσης επικεντρώνεται στην κατεύθυνση ελαχιστοποίησης των άεργων μεταβολών των μονάδων ΔΠ για τη ρύθμιση της τάσης. Συγκεκριμένα, η χρησιμοποίηση της προτεραιότητας ρύθμισης των πιο απομακρυσμένων ζυγών μειώνει περιττές μεταβολές άεργου ισχύος που θα πραγματοποιούνταν από πιο ανάντη ζυγούς. Σε εκτεταμένα προβλήματα τάσης, η επιλογή της επίδοσης προτεραιότητας -δηλαδή η εκκίνηση ρύθμισης τάσης από τον πιο απομακρυσμένο ζυγό- έδειξε ότι η ρύθμιση είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί από μερικούς μόνο ζυγούς, μειώνοντας ταυτόχρονα τις απαιτούμενες μεταβολές που θα πραγματοποιούνταν σε διαφορετική περίπτωση. Στην ενότητα των προσομοιώσεων φαίνεται ότι η απόκριση της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου να καταλήγει σε αποτελεσματική διαχείριση της διαθέσιμης άεργου ισχύος των εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής. Η προσπάθεια επίλυσης του

προβλήματος της τάσης με τη χρήση αέργου από τις μονάδες ΔΠ, απαιτεί την ορθή διαχείρισή της προκειμένου να ρυθμίζεται η τάση στα επιτρεπτά όρια. Επιπρόσθετα, η προσπάθεια επίλυσης του ζητήματος τάσης στα πλαίσια της περιοχής του προβληματικού ζυγού, μειώνει την επίδραση των αέργων μεταβολών προς τις μεταβολές τάσης του υπόλοιπου δικτύου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν, ότι η προτεινόμενη μέθοδος ακολουθεί την κεντρική μέθοδο με ικανοποιητικό τρόπο στις περισσότερες περιπτώσεις. Στα σενάρια που εξετάστηκαν για κάθε δίκτυο, οι διαφορές ήταν σχετικά μικρές ως προς το σύνολο των μεταβολών που αποφασίζονταν στις δυο τεχνικές ρύθμισης. Σε μεμονωμένα προβλήματα τάσης, δηλαδή σε προβλήματα τάσης όπου περιορίζονταν σε ένα μόνο κλάδο του δικτύου οι αποφάσεις για τα νέα σημεία λειτουργίας των μονάδων και στις δυο μεθόδους ήταν πολύ κοντινές. Πραγματοποιήθηκε επισκόπηση των ενεργών απωλειών του δικτύου και η επίδραση των δυο μεθόδων ήταν σχεδόν ίδια στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Επεκτάσεις

Όσον αφορά στις επεκτάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μετέπειτα μελέτες της μεθόδου προτείνεται η προσαρμογή της δυνατότητα περικοπής παραγόμενης ή καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος με τη χρήση των ευαισθησιών τάσης ως προς ενεργές μεταβολές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6. Η δυνατότητα ρύθμισης τάσης μέσω ενεργών μεταβολών θα μπορούσε να αποτελεί, επιπλέον επίπεδο ρύθμισης σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης με τη διαθέσιμη άεργο των μονάδων παραγωγής. Η υλοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος θα μπορούσε να εφαρμοσθεί πιο αποδοτικά στα πλαίσια ενός δικτύου ΧΤ, επεκτείνοντας τις ευαισθησίες τάσης, λαμβάνοντας δηλαδή υπ' όψιν την ασυμμετρία των ρευμάτων και τάσεων .

Μια ακόμη επέκταση, θα ήταν η συμμετοχή του συμβατικού εξοπλισμού ρύθμισης για την συνεργατική επίλυση του ζητήματος της ρύθμισης τάσης. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε ιδιαίτερη προσοχή και θα ήταν απαραίτητη η μελέτη των καθυστερήσεων που θα εισήγαγαν τα συμβατικά μέσα -όπως οι ρυθμιστές τάσης που εμφανίζουν αργή απόκριση-. Επίσης, ενδιαφέρον έχει η διερεύνηση του κατά πόσο θα μπορούσε η προτεινόμενη μέθοδος να λειτουργεί ως επιπλέον στάδιο γρήγορης ρύθμισης τάσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε μια πλατφόρμα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Χρήσιμη θα ήταν η μελέτη επίλυσης του προβλήματος της τάσης με περισσότερους αντικειμενικούς στόχους. Τέλος, σημαντική θα ήταν και η μελέτη των απαιτούμενων τηλεπικοινωνιακών υποδομών για την peer- to -peer επικοινωνία μεταξύ των ευφυών πρακτόρων.

Βιβλιογραφία

- [1] Ιωάννης Ψαρράς, "Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική" έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2010
- [2] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές", έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [3] Π. Κάπρος, "Σημειώσεις Ενεργειακής Οικονομίας", έκδοση ΕΜΠ
- [4] Stephen F. Bush "Smart Grid communication - enabled intelligence for the electric Power grid", έκδοση Wiley, 2014
- [5] Ackermann, T., Andersson, G., and Söder, L. (2001), Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems (2001), Research*, **57** (3), 195–204, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [6] Σαγάνη Αγγελική, "Η ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας - Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2009
- [7] <http://electrical-engineering-portal.com/load-shedding-in-generating-tnd-systems>
- [8] Άρης Ε. Δημέας, "Συμβολή στον καταναμεμημένο έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στην χαμηλή τάση", Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 2006
- [9] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010
- [10] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: Τόμος Ι, Μόνιμη Κατάσταση λειτουργίας", Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1985
- [11] Κορλός Κ. Θεοφάνης, "Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείσδυση φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2012
- [12] Fereidoon P. Sioshansi, "Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy", Academic Press
- [13] Jeffrey M. Blooming, Timothy C. Green, "Increasing Distributed Generation Penetration Using Soft Normally- Open Points", Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE
- [14] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, V. Allegranza, R. Cicoria, A. Iaria, "Meshed vs Radial MV Distribution Network in Presence of Large Amount of DG", Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES

- [15] B. Ruben, A. Cross, Strickland, M. Aten, R. Ferris, "Meshing Radial Networks at 11kV", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference
- [16] J.Ekanayake; K. Liyanage; J. Wu; A. Yokoyama; N.Jenkins, " Smart Grid: Technology and Applications", Wiley 2012
- [17] S. Lang, N. Cai, J. Mitra, "Multi- Agent System based Voltage Regulation in a Low-Voltage Distribution Network", North American Power Symposium (NAPS), 2013
- [18] G. Andersson "Modelling and Analysis of Electric Power Systems", ETH, March 2004
- [19] G. Sapienza , "Voltage Control in MV Networks with high presence using a Real-Time Digital Simulator", Ph.D Thesis , Polytecnico Di Milano
- [20] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, "Power System Analysis" ,Mc Graw-Hill 1994
- [21] P. Kundur, "Power System Stability and Control", Mc Graw Hill 1994, EPRI
- [22] U. Eminoglu, M. Hakan Hocaoglu, "A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models", Electric Power Systems Research 76 (2005)
- [23] J.B. V. Subrahmanyam, "Load Flow Solution of Unbalanced Radial Distribution Systems", Department of Electrical & Electronics Engg, BRECW, Hyderabad,AP, India-500 059
- [24] Σ. Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας" , Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [25] Aga J. M., Jadhav H. T., "Improving fault ride-through capability of DFIG connected wind turbine system: A review", Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference
- [26] Foo Y. S. Eddy, Grooi H.B., "Multi-Agent System for Optimization of Microgrids", 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia
- [27] D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, R. Balme, "Smart Grid Applications and Developments", Springer 2014
- [28] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, S. Rahman, "Securing critical loads in a PV-based microgrid with a multi-agent system", Renewable Energy 39 (2012) 166e174
- [29] <http://www.gridtech.eu/project-scope/technologies?id=21>
- [30] K. R. Padiyar, "FACTS Controllers in Power transmission and Distribution", New Age Publishers, 2007

- [31] H.E. Farag, E. F. El-Saadany, R.Seethapathy, "A Two Ways Communication-Based Distributed Control for Voltage Regulation in Smart Distribution Feeders", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL 3, March 2012
- [32] Βλαχοκυριάκου Όλγα, "Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες και αποκεντρωμένος έλεγχος για ρύθμιση τάση σε περίπτωση τάσης", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2014
- [33] M. E. Baran, I. El-Markabi, "A Multiagent-Based Dispatching Scheme for Distributed Generators for Voltage Support on Distribution Feeders", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 22, February 2007
- [34] M. Brenna, E. De Berardinis, F. Foiadelli, G. Sapienza, D. Zaninelli, "Voltage Control in Smart Grids : An Approach Based on Sensitivity Theory", Published August 2010
- [35] M. Brenna, E. De Berardinis, L. Delli Carpini, F. Foiadelli, P. Paulon, P. Petroni, G. Sapienza, G. Scrosati, D. Zaninelli, "Automatic Distributed Voltage Control Algorithm in Smart Grids Applications", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, Vol. 4, No. 2, June 2013
- [36] MATPOWER: <http://www.pserc.cornell.edu//matpower/>
- [37] MATLAB: <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>
- [38] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, "MATPOWER 5.0 User's Manual", 2014
- [39] Distribution System Analysis Subcommittee Report "Radial Distribution Test Feeders", IEEE PES
- [40] Γεώργιος Α. Κόλλιας, "Η εξέλιξη των Δικτύων τα επόμενα χρόνια και η αντιμετώπιση των προβλημάτων από τη διείδυση των ΑΠΕ", Παρουσίαση ΔΕΔΗΕ
- [41] <http://certs.lbl.gov/certs-der.html>
- [42] [://venturebeat.com/2010/07/06/microgrids-energy-transmission/](http://venturebeat.com/2010/07/06/microgrids-energy-transmission/)
- [43] "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources", 2013
- [44] <http://www.demirerkablo.com/media/17220/55.pdf>
- [45] Βαγγέλογλου Α., "Κατασκευή εργαστηριακού μοντέλου δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας", Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ 2012

Παράρτημα

Παράρτημα Α - Ανάλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού

Α.1 Πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού

Το μαθηματικό πρότυπο του Γραμμικού Προγραμματισμού (*Linear Programming*) πρόκειται για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής πόρων υπό περιορισμούς (*constraints*). Η ποιότητα των αποφάσεων που εξάγει ένα τέτοιο πρόβλημα εξαρτάται από την ακρίβεια της περιγραφής της κατάστασης του δεδομένου προβλήματος αλλά και της καταλληλότητας των παραδοχών και προϋποθέσεων.

Στόχος της ανάλυσης ενός γραμμικού προβλήματος είναι ο προσδιορισμός των μεταβλητών απόφασης ή αγνώστων μεταβλητών $[x_1, x_2, \dots, x_n] = [x]$, οι οποίες ελαχιστοποιούν (ή μεγιστοποιούν) την αντικειμενική συνάρτηση (*Objective function*) και ταυτόχρονα να ικανοποιούν τους περιορισμούς.

Αντικειμενική Συνάρτηση/Objective function

$$\min/\max_x f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Αυστηρή προϋπόθεση για την επίλυση του προβλήματος είναι ότι στην κλασσική διατύπωσή του οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν μόνο θετικές τιμές $x_i \geq 0$.

Περιορισμοί/Constraints

Στις παρακάτω σχέσεις που τίθενται ισχύει μόνο ένα από τα σύμβολα ισότητας ή ανισότητας.

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n (\leq, =, \geq) b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n (\leq, =, \geq) b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n (\leq, =, \geq) b_n \end{aligned}$$

Συγκεντρωτικά το πρόβλημα σε διανυσματική μορφή θα είναι

$$\min/\max_x \{f(x) = [C]^T \cdot [x]\}$$

$$s. t. [x] \geq 0 \ \& \ [A][x] \leq [b]$$

όπου

$[C]^T$ διάνυσμα σειράς $1 \times n$

$[A]$ μητρώο συντελεστών διαστάσεων $m \times n$

$[b]$ διάνυσμα σταθερών στήλης διαστάσεων $m \times 1$

$$C^T = [c_1, c_2, \dots, c_n], \quad [x] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad [b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \quad [A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}$$

Προκειμένου να υπάρχει μια και μοναδική λύση του συστήματος $[A][x] \leq [b]$ πρέπει ο αριθμός των αγνώστων να είναι ίσος με τον αριθμό των ανεξάρτητων εξισώσεων, όπου η λύση είναι $[x] = [A]^{-1} \cdot [b]$.

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το μητρώο A , δεν είναι απαραίτητα τετραγωνικό κι έτσι δεν εντοπίζεται μονοσήμαντη λύση. Συνήθως, μάλιστα, ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των περιορισμών δηλαδή $m \leq n$. Επομένως, ενός τέτοιου συστήματος συνίσταται στην επίλυση της μητρικής εξίσωσης των αυτών διαστάσεων.

A.2 Επίλυση προβλήματος

Για την επίλυση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι οι οποίοι διαφέρουν κατά κύριο λόγο στον τρόπο που συγκλίνουν στην εύρεσης της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Κοινό στοιχείο των αλγορίθμων είναι ότι εκμεταλλεύονται ιδιότητες του χώρου εφικτότητας που απλοποιούν την υπολογιστική διαδικασία. Με άλλα λόγια, σκοπός κάθε τεχνικής βελτιστοποίησης είναι η εύρεση της ελάχιστης τιμής στα πλαίσια της εφικτής περιοχής η οποία ορίζεται από ένα κυρτό χώρο(ή πολύτοπο σημείων $P_1, P_2 \dots, P_n$), ο οποίος ορίζεται ως τον χώρο για τον οποίο κάθε ζεύγος $P_1 - P_2$ σχηματίζει ευθύγραμμο τμήμα το οποίο ανήκει επίσης στον ίδιο χώρο σημείων. Στο υπολογιστικό πακέτο της MATLAB® που χρησιμοποιήσαμε για την επίλυση του γραμμικού προβλήματος διατίθενται οι εξής αλγόριθμοι:

- **Interior point (Default):** Ο οποίος χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επιτήρησης/διόρθωσης τιμών, ενώ συνήθως χρησιμοποιείται για μεγάλης κλίμακας προβλήματα των οποίων οι μήτρες περιγραφής είναι αραιής μορφής.

- **Active-set:** Κατευθύνεται προς την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε επανάληψη πέρα από ένα υποσύνολο του κυρτού χώρου (active set) το οποίο είναι τοπικά ενεργό κάθε φορά, μέχρις ότου να συγκλείσει τη λύση.
- **Simplex:** Χρησιμοποιεί μια συστηματική διαδικασία για την μετατροπή του προβλήματος σε μια τυπική μορφή προκειμένου να εξετάσει αν είναι δυνατή αλλά και βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

A.3 Εφαρμογή γραμμικού προγραμματισμού στον προτεινόμενο αλγόριθμο

Όπως έχει αναφερθεί μετά από την πρώτη τακτική τοπικής ρύθμισης τάσης του αλγορίθμου, ακολουθούν οι επόμενες οι οποίες συνίστανται στην κατάστροψη ενός γραμμικού προβλήματος. Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται η αναζήτηση των διαθέσιμων γεννητριών οι οποίες θα συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης. Αξιοποιώντας την ανάλυση ευαισθησιών που έχει παρουσιαστεί, σκοπός είναι να ρυθμιστεί ο προβληματικός ζυγός τάσης χωρίς ωστόσο να βγουν εκτός ορίων οι τάσεις των συμμετεχόντων γεννητριών. Η αντικειμενική συνάρτηση που καθορίζεται, έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των ποσοτήτων αέργου ισχύος που εγχέονται ή απορροφώνται ενώ οι προϋποθέσει σύγκλισης του γραμμικού προβλήματος είναι αφενός να διασφαλιστούν τα όρια φαινομένης ισχύος των γεννητριών και αφετέρου να παραμείνουν στα επιτρεπτά όρια τάσης οι τάσεις των συνεισφερόμενων γεννητριών.

Συνεπώς αν θεωρήσουμε ότι n το πλήθος των γεννητριών που θα συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάση του ζυγού w ο οποίος δεν περιλαμβάνει DG ή γεννήτρια. Τότε το γραμμικό πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$[x] = \begin{bmatrix} x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \geq 0$$

Οι μεταβλητές απόφασης είναι αυτές που εξάγει το πρόβλημα βελτιστοποίησης αν καταλήξει σε λύση. Οι τιμές του είναι αυστηρά θετικές στα πλαίσια της βελτιστοποίησης και το πρόσημο δεν αφορά έγχυση ή απορρόφηση. Η μέγιστη τιμή μεταβολής εξαρτάται από την τρέχουσα τιμή της αέργου ισχύος της γεννήτριας. Γενικά, η μέγιστη τιμή αέργου ισχύος θεωρείται σταθερή και λαμβάνεται για μέγιστη παραγωγή με τον ελάχιστο δυνατό(μέχρι 0.9 ελάχιστο θέτουμε) συντελεστή ισχύος που μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια. Δηλαδή

$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{max}^2} = \sqrt{\left(\frac{P_{max}}{(\cos\varphi)_{min}}\right)^2 - P_{max}^2}$$

Αν η γεννήτρια ή DG, λειτουργούν με ορισμένο συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας τότε η μέγιστη μεταβολή ΔQ_i ορίζεται ως εξής:

$$\Delta Q_{max}^i = Q_{max} - Q_c$$

όπου Q_c η τρέχουσα τιμή λειτουργίας η οποία είναι θετική για επαγωγικό ΣΙ και αρνητική για χωρητικό.

Τα όρια επομένως για τις μεταβλητές απόφασης

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_{max}^i \\ \vdots \\ \Delta Q_{max}^n \end{bmatrix}$$

Όπως αναφέρθηκε σκοπός είναι να ελαχιστοποιούνται τα ποσά αέργου προκειμένου να ρυθμίζεται η τάση στον ζυγό που πραγματοποίησε το αίτημα βοήθειας εν προκειμένω ο w , αλλά να παραμένουν στα όρια οι τάσεις των γεννητριών που συνεισφέρουν. Η συνθήκη που θα πρέπει να ικανοποιείται επομένως θα είναι

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

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

Όπου τα ΔV_i αποτελούν τις μεταβολές που εμφανίζονται στις τάσεις εξαιτίας των μεταβολών αέργου σε κάθε ζυγό. Όταν η τάση στο ζυγό w είναι η ανυψωμένη τάση τότε τα νέα σημεία λειτουργίας αναφέρονται σε απορρόφηση αέργου ισχύος (επαγωγικό συντελεστή ισχύος) επομένως τα πρόσημα στα μεγέθη των μεταβολών τάσης θα είναι αρνητικά. Επομένως, μέσω των ευαισθησιών μπορούμε να εκτιμηθούν οι τάσεις αυτές ως εξής

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_i \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -s_{ii}\Delta Q_i - s_{ij}\Delta Q_j - \dots - s_{in}\Delta Q_n \\ \vdots \\ -s_{ni}\Delta Q_i - s_{nj}\Delta Q_j - \dots - s_{nn}\Delta Q_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_i \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_i \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq - \begin{bmatrix} s_{ii} & \dots & s_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{ni} & \dots & s_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_i \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

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

$$\text{όπου προφανώς } [b_1] = \begin{bmatrix} V_{max} - V_i \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix} \text{ και } [b_2] = \begin{bmatrix} V_{min} - V_i \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix}$$

Προκειμένου να λάβει την κλασσική μορφή, οι περιορισμοί (*constraints*) πρέπει να έχουν συγκεκριμένη μορφή για το λόγο αυτό πολλαπλασιάζουμε τη δεύτερη ανίσωση με -1, καταλήγοντας:

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

$$\text{όπου } [S] = \begin{bmatrix} -[s] \\ [s] \end{bmatrix} \text{ και } [B] = \begin{bmatrix} [b_1] \\ [b_2] \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση όπου εντοπίζεται πτώση τάσης κάτω από τα επιτρεπτά όρια, έστω στο ζυγό w. Τότε αυτό που διαφοροποιείται είναι ότι η συνεισφορά των DGs είναι τέτοια ώστε να λειτουργούν με χωρητικό ΣΙ, δηλαδή να παράγουν άεργο ισχύ. Αλλάζουν επομένως τα πρόσημα

$$\begin{bmatrix} V_{min} - V_i \\ \vdots \\ V_{min} - V_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} S_{ii} & \dots & S_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{ni} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta Q_i] \\ \vdots \\ [\Delta Q_n] \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max} - V_i \\ \vdots \\ V_{max} - V_n \end{bmatrix}$$

Συγκεντρωτικά είναι

$$[S] = \begin{bmatrix} [s] \\ -[s] \end{bmatrix} \text{ και } [B] = \begin{bmatrix} [b_1] \\ [b_2] \end{bmatrix}$$

Παράρτημα Β - Πίνακες Ευαιθησιών Τάσης - Αέργου

Υπενθυμίζεται ότι η ευαιθησία τάσης έστω $s(i, j)$, αποτελεί το μέτρο της επίδρασης του ζυγού i ως προς μεταβολές αέργου στο ζυγό j .

Δίκτυο 13 ζυγών

Πίνακας άεργων ευαιθησιών δικτύου

No Bus	DG1	DG4	DG6	DG8	DG10	DG11
1	0,008356	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
2	0,00816	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
3	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
4	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
5	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
6	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879
7	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,029879
8	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715
9	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,038385	0,02715
10	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,0539	0,02715
11	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089
12	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715

Ιακωβιανές ευαισθησίες μεταβολών άεργου ισχύος για κανονικές συνθήκες φόρτισης $S_{j22}(i,j) = \partial U_i / \partial Q_j$

No Bus	DG1	2	3	DG4	5	DG6	7	DG8	9	DG10	DG11	12
1	0,008356	0,008116	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
2	0,008116	0,008116	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
3	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
4	0,00575	0,00575	0,00575	0,009434	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
5	0,00575	0,00575	0,00575	0,009434	0,010113	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
6	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,036567	0,029879	0,02715	0,02715	0,02715	0,029879	0,02715
7	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,029879	0,029879	0,02715	0,02715	0,02715	0,029879	0,02715
8	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715
9	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,038385	0,038385	0,02715	0,02715
10	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,038385	0,0539	0,02715	0,02715
11	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,029879	0,029879	0,02715	0,02715	0,02715	0,033089	0,02715
12	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,036153

Δίκτυο 36 ζυγών [Πίνακας έργων ευαισθησιών προτεινόμενης μεθόδου]

Bus Name	DG1	DG4	DG6	DG8	DG10	DG11	DG14	DG18	DG22	DG26	DG28	DG35
1	0,008356	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
2	0,008116	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
3	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
4	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,009434
5	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,010113
6	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,036567	0,036567	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
7	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,029879	0,029879	0,029879	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
8	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,00575
9	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,038385	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,038385	0,00575
10	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,0539	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,0539	0,00575
11	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089	0,029879	0,029879	0,033089	0,02715	0,02715	0,00575
12	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,036513	0,02715	0,00575
13	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,03852	0,03852	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
14	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,038993	0,038993	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
15	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,038993	0,039654	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
16	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,038993	0,041922	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
17	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,038993	0,042458	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
18	0,00575	0,00575	0,036567	0,02715	0,02715	0,029879	0,038993	0,043245	0,029879	0,02715	0,02715	0,00575
19	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089	0,029879	0,029879	0,034979	0,02715	0,02715	0,00575
20	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089	0,029879	0,029879	0,035924	0,02715	0,02715	0,00575
21	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089	0,029879	0,029879	0,03668	0,02715	0,02715	0,00575
22	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089	0,029879	0,029879	0,037625	0,02715	0,02715	0,00575
23	0,00575	0,00575	0,029879	0,02715	0,02715	0,033089	0,029879	0,029879	0,037625	0,02715	0,02715	0,00575

24	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,038893	0,02715	0,00575
25	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,040351	0,02715	0,00575
26	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,041392	0,02715	0,00575
27	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,0539	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,056843	0,00575
28	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,0539	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,058635	0,00575
29	0,00575	0,00575	0,02715	0,02715	0,0539	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,02715	0,058635	0,00575
30	0,008356	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
31	0,008356	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
32	0,008356	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575
33	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,013461
34	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,015495
35	0,00575	0,009434	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,00575	0,016525

Παράρτημα Γ - Κώδικας σε MATLAB

Η υλοποίηση της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου πραγματοποιήθηκε στο MATLAB. Οι κώδικες που γράφτηκαν κατά το διάστημα της διπλωματικής εργασίας είναι αναρτημένοι στο

["https://www.dropbox.com/sh/kno23dxyjq6eog1/AAAgqB20tySOWewXI3tNR84la?dl=0"](https://www.dropbox.com/sh/kno23dxyjq6eog1/AAAgqB20tySOWewXI3tNR84la?dl=0)

Load_net

```
%At this script the network structure is loaded in order to calculate Zbus
%
global ng nb gensets nodes buses;
%% impedance of transformer in Ω
Xsub=0.23;
%% Load Network Case Data
format long;
eps(7);
mpopt=mpoption('out.all',0, 'verbose',0,'out.bus',0);
results=loadcase('caselnet');
define_constants;
Zbus=results.branch(:,1:2);
bb=size(results.bus);
nodes=bb(1);
buses=nodes-1;
BaseMVA=results.baseMVA;

%% define Ximpedance of transformer and other Base measurements
%Base voltage in kV,
Vb=20;
Zbase=Vb^2/BaseMVA;
Xsub=0.23;
Xsub=Xsub/Zbase;
%%Formation of Zbus matrix and (connectivity)
%load branches
nl=results.branch(:,1);
nr=results.branch(:,2);
con=sparse(nl,nr,1,nodes,nodes);
tmpC=con;
%formation of Zbus only through X impedances
gensets=results.gen(:,1);
ng=length(gensets);
Pm=results.gen(:,9);
Qm=results.gen(:,4);
X=results.branch(:,4);
nb=nodes;
%%
%% biograph Configuration
bio=biograph(con);
bio.LayoutType = 'equilibrium';
bio.LayoutScale = 3/4;
dolayout(bio);
set(bio.Nodes(gensets(:)), 'Shape', 'circle');
set(bio.Nodes(gensets(:)), 'Color', [0.7 0.7 1]);
bio.Nodes(nodes).ID='Substation';
bio.Nodes(nodes).Color=[1 0 1];
for n=1:ng
bio.Nodes(gensets(n)).ID=sprintf('%s %d', 'DG', gensets(n));
end
set(bio, 'ShowWeights', 'off');
bio.LayoutType = 'equilibrium';
%%
%off diagonal elements
Zbus=zeros(nodes,nodes);
for k=1:length(X)
```

```

        Zbus(nl(k),nr(k))=(Zbus(nl(k),nr(k))+X(k));
        Zbus(nr(k),nl(k))=(Zbus(nr(k),nl(k))+X(k));

    end

    %% diagonal elements
    for k=1:nodes
        for n=1:nodes
            Zbus(k,k)=Zbus(k,k)+Zbus(k,n);
        end
        Zbus(k,k)=-Zbus(k,k);
    end
end

```

Υπολογισμός ευαισθησιών

Sensitivities

```

%% At this script voltage sensitivities factor presented at Chapter 6.3
%% are calculated, for network's structure loaded on Load_net
ind=0;
Xbranch=0;
path_node=zeros(nodes-3,nodes-6);
%% path of every busbar node to substation
for tmpx=1:buses
    flgx=tmpx;
    ind=1;
    path_node(tmpx,ind)=tmpx;
    while not(flgx==nodes)

        for n=1:nodes
            if tmpC(n,flgx)
                ind=ind+1;
                path_node(tmpx,ind)=n;
                flgx=n;
                break
            end
        end
    end
end
path_node;
%lengths
for n=1:buses
    path_gen=path_node(n,:);
    flglen=0;
    %length of gen
    for i=1:length(path_node(n,:))
        if path_node(n,i)==0
            break
        end
        flglen=flglen+1;
    end
    lg(n)=flglen;
    %% reverse
    if (mod(flglen,2)==0)
        for i=1:(flglen/2)
            tmp=path_node(n,i);
            path_node(n,i)=path_node(n,flglen-i+1);
            path_node(n,flglen-i+1)=tmp;
        end
    else

```

```

        for i=1:(round(flglen/2)-1)
            tmp=path_node(n,i);
            path_node(n,i)=path_node(n,flglen-i+1);
            path_node(n,flglen-i+1)=tmp;
        end
    end
end
%% reverse path in order to be from sub to current node

%% path of every genset to substation

%find the shortest path and then compare with this index going

arrayS1=zeros(buses,ng);
for n=1:ng
    lgen=lg(gensets(n));
    X_br=0;
    for k=1:buses
        minm=lgen;
        if lg(k)<lgen
            minm=lg(k);
        end
        if gensets(n)==k
            %common path
            common_path=path_node(k,1:minm);
        else
            for z=1:minm
                if (path_node(gensets(n),z)==path_node(k,z))
                    common_path(z)=path_node(k,z);
                else
                    break;
                end
            end
        end
        xbr=0;
        for z=1:(length(common_path)-1)
            xbr=xbr+abs(Zbus(common_path(z),common_path(z+1)));
        end
        arrayS(k,n)=xbr;
        clear common_path
    end
end
end

```

Volt Reg script

Αποτελεί το κύριο κομμάτι του κώδικα, στο οποίο επενεργεί το προτεινόμενο σχήμα ρύθμισης τάσης. Δεν παρατίθεται εδώ λόγω του ότι είναι αρκετά εκτενής.

optimization

Για την υλοποίηση του υπολογισμού του γραμμικού προβλήματος, που σχηματίζεται κατά περίπτωση στα επίπεδα 2-4 της ρύθμισης, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση linprog της MATLAB [37].

```

function [x,exitflag]=optimization(bus,dg,vol,Qmx,Qc,arrayS)
global ng gensets
lng=length(dg);
pos1=0;
%% Check if it is voltage arise or voltage sag
if (1.03-vol(bus))<0
    pos1=1;
end
pos1;
isdg=0;
for n=1:ng
    if gensets(n)==bus
        isdg=1;
        lng=lng+1;
        dg(lng)=bus;
        break;
    end
end
bus;
lng;
[ind]=find_pos(dg);
%first define the tranposed vector min(Sum(DQ))=C_t*x where x=DQj
c=ones(lng,1);
%constraints for optimization, Qmin<= Q+DQ <=Qmax ->Qmin-Q<= x <=
% LB= [Qmin-Q] <= x <= [Qmax-Q]= UB
pos1;
LB=zeros(lng,1);
UB=zeros(lng,1);
Qc=Qc/10;
Qmx=Qmx/10;
% Calculate available Q of genset due to its current Qc value
% Lower and upper bound
for k=1:lng
    if Qc(ind(k))>0
        UB(k,1)=Qmx(ind(k))-Qc(ind(k));
    else
        UB(k,1)=Qmx(ind(k));
    end
end
% DE1=b1 DE2=b2 as explained on the appendix
%Inequality or equality Ax<=b sDQ<=DE A=Sensitivity Factors DE
DE1=zeros(lng,1);
DE2=zeros(lng,1);

for n=1:lng
    DE1(n,1)=1.0295-vol(dg(n));
    DE2(n,1)=vol(dg(n))-0.9705;
end
if isdg==0
    DE1(lng+1)=1.0295-vol(bus);
    DE2(lng+1)=vol(bus)-0.9705;
    s(lng+1,1:lng)=arrayS(bus,ind(1:lng));
end

%%

for gn=1:lng
    for oth=1:lng
        s(gn,oth)=arrayS(dg(gn),ind(oth));
    end
end

```

```

    end
end

%%
%Set the optimization problem
%Choose algorithm, left deffault "interior-point"
%options=optimset('Algorithm','simplex');
if pos1
    [x,fval,exitflag,desc]=linprog(c,[-s;s],([DE1; DE2]),[],[],LB,UB);
else
    [x,fval,exitflag,desc]=linprog(c,[s;-s],([DE1; DE2]),[],[],LB,UB);
end

```

Κεντρική υλοποίηση ρύθμισης τάσης

Η υλοποίηση έγινε και σε αυτή την περίπτωση με την linprog.

```

Load_net;
Sensitivities;
mpopt=mpoption('out.all',0, 'verbose',0, 'out.bus',0);
net=rupf('case50',mpopt);
init=net.bus(:,8);
init_los=zeros(nodes,1);
init_los=net.branch(:,14)+net.branch(:,16);
los1=sum(init_los(:));
init_vol(1:buses,1)=net.bus(1:buses,8);
c=ones(1,ng);
%constraints for optimization, Qmin<= Q+DQ <=Qmax ->Qmin-Q<= x <=
% LB= [Qmin-Q] <= x <= [Qmax-Q]= UB
[Variat,p_b]=check_voltages(net.bus(:,8));
Qpu=Qm(1:ng)/(BaseMVA);
if net.bus(p_b(1),8)<0.97
    inj=1;
else
    inj=0;
end
LB(1:ng,1)=0;
UB(1:ng,1)=Qpu(1:ng);
%Inequality or equality Ax<=b sDQ<=DE A=Sensitivity Factors DE
DE1=zeros(buses,1);
DE2=zeros(buses,1);
DE1(1:buses)=1.0295-net.bus(1:buses,8);
DE2(1:buses)=net.bus(1:buses,8)-0.9705;
[x,fval,exitflag,des]=linprog(c,[arrayS;-arrayS],[DE1;DE2],aux,b,LB,UB);
%options=optimset('Algorithm','simplex');
if inj
    [x,fval,exitflag,des]=linprog(c,([+arrayS;-arrayS]),[DE1;
DE2],[],[],LB,UB,[]);
else
    [x,fval,exitflag,des]=linprog(c,([-arrayS;+arrayS]),[DE1;
DE2],[],[],LB,UB,[]);
end
check=[x Qpu]
for n=1:ng
    percent(n)=abs(x(n))/Qpu(n);
end

```