



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

Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Πριονιστής

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



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

Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Πριονιστής

Επιβλέπων Καθηγητής : Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2018.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

.....
Γεώργιος Πριονιστής

Copyright © Γεώργιος Πριονιστής, 2018

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

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.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, για την ανάθεση αυτού του πολύ ενδιαφέροντος θέματος αλλά και για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Θεόδωρο Σουξέ, για την εξαιρετική συνεργασία, το ενδιαφέρον και τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε αυτό το διάστημα για να με βοηθήσει.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου για τη συνεχή στήριξη που έδειξαν σε όλους τους τομείς. Κλείνοντας, μια αφιέρωση στη μνήμη των γονιών μου που είναι ο λόγος που βρίσκομαι εδώ.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την επίδραση που μπορεί να έχει ένα δίκτυο διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή και φορτία στο όριο φόρτισης ενός συστήματος μεταφοράς. Εξετάζεται η αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης μέσω της υποστήριξης από τις διεσπαρμένες πηγές που βρίσκονται στο σύστημα διανομής.

Για την παραπάνω εξέταση προτείνεται μια μεθοδολογία αποκεντρωμένου ελέγχου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του συστήματος διανομής για βελτίωση της ευστάθειας τάσης του συστήματος μεταφοράς. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας εστιάζει στην αποσύμπλεξη και ξεχωριστή ανάλυση των δυο συστημάτων ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του διασυνδεδεμένου συστήματος.

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας γίνεται σε ένα ακτινικό δίκτυο μεταφοράς που συνδέεται με μια γραμμή διανομής μέσω μετασχηματιστή YT/MT (150/20 kV). Τα συστήματα εξετάζονται ξεχωριστά.

Για το σύστημα μεταφοράς λύνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης κάνοντας χρήση των οριακών συνθηκών πρώτης τάξης Kuhn – Tucker. Από το πρόβλημα μεγίστου υπολογίζεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος μεταφοράς καθώς και οι ευαισθησίες της σε μεταβολές των εγγεόμενων ροών ενεργού και αέργου ισχύος από την κάθε γραμμή διανομής.

Για το δίκτυο διανομής, αρχικά γίνεται ρύθμιση της τάσης με χρήση κάποιων μεθόδων ρύθμισης τάσης με διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου των μετατροπέων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Στη συνέχεια, για επιλεγμένα στιγμιότυπα μέσα στη μέρα υπολογίζονται οι ευαισθησίες των εγγεόμενων ροών ισχύος ως προς μεταβολές της τάσης λύνοντας το πρόβλημα ροής φορτίου του συστήματος διανομής.

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι παραπάνω ευαισθησίες οι οποίες αποστέλλονται στο ρυθμιστή του δικτύου διανομής, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της ενίσχυσης του ορίου φόρτισης μέσω της μεταβολής της τάσης στο σύστημα διανομής.

Στη συνέχεια, εξετάζονται κάποια πιθανά σήματα μεταβολής της τάσης που μπορεί να στείλει ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής. Αρχικά, τα σήματα αξιοποιούν τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν και για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου διανομής και τις στρατηγικές ελέγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα.

Για την προσομοίωση των συστημάτων χρησιμοποιούνται τα προγράμματα προσομοίωσης Power World Simulator και WPSTAB.

Λέξεις Κλειδιά:

Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Συστήματα Διανομής, Αποκεντρωμένος Έλεγχος, Άεργη Υποστήριξη, Ευστάθεια/Αστάθεια Τάσης, Μετασχηματιστές Με ΣΑΤΥΦ, Βελτιστοποίηση ΣΗΕ

Abstract

This diploma thesis investigates the effect of a distribution network with distributed generation and distribution load on the maximum power transfer of a small transmission system.

It suggests a decentralized control method of the distributed generation of the distribution network in order to improve the voltage stability of the transmission system. The concept is to separate the two systems (transmission and distribution) and examine them individually.

The proposed method is applied in a radial transmission network connected to a distribution feeder through a transformer of high to medium voltage (HV/MV).

Concerning the transmission system, an optimization problem is solved, using the Kuhn – Tucker first order necessary conditions. The optimization problem is used to calculate the maximum power transfer of the transmission system and the sensitivities of the loadability limit to the injected reactive and active powers from each distribution feeder.

The distribution system is examined in order to investigate its voltage profile and then using different control strategies of the converters that the distributed generation is connected, the voltage is regulated to respect the voltage limits that are imposed. Then, for selected snapshots during the day, the sensitivities of the injected powers to the voltage changes are calculated.

All the sensitivities are then sent to the distribution system controller, in order to estimate how much the maximum power transfer can be increased and to send the control signal that affects the control parameters of the distribution system generation.

Afterwards, some voltage control signals are examined that are sent by the distribution system controller. At first, the voltage control strategies that were introduced (for the distribution voltage regulation) are used in order to increase the voltage of the control parameters hence the maximum power transfer.

Then, another control is examined in which the converters are used to maintain constant voltage of the nodes that the distributed generation is connected. Exploiting this control method, another enhancement signal is imposed forcing the distributed generation converters to maintain higher voltage. This emergency reactive support signal is thereafter called EMRS signal and will be used to examine the even further support that can be achieved through the distributed generation of the distribution network.

The simulations are performed using the simulation software WPSTAB and Power World Simulator.

Key Words :

Maximum Power Transfer, Distributed Generation, Photovoltaic Systems, Distribution Network, Decentralized Control, Reactive Support, Voltage Stability/Instability, Transformers, On Load Tap-Changers, Optimization

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων	xii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xiv
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.1.1 Σύστημα Παραγωγής	1
1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς	2
1.1.3 Δίκτυο Διανομής.....	2
1.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	3
1.2.1 Μονάδες Φωτοβολταϊκής Παραγωγής	5
1.2.2 Χαρακτηριστικά Φ/Β Συστημάτων.....	5
1.2.3 Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων στο Δίκτυο	7
1.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ	9
1.3.1 DC – DC μετατροπείς ισχύος	10
1.3.2 DC – AC μετατροπείς ισχύος (αντιστροφείς).....	11
1.3.3 Μετατροπείς ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα	11
1.4 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ	12
1.4.1 Η έννοια της Ευστάθειας Τάσης.....	12
1.4.2 Ταξινόμηση Φαινομένων Ευστάθειας	13
1.4.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV	14
1.5 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ	19
1.5.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ.....	19
1.5.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης	21
1.5.2.1 Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης.....	21
1.5.2.2 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης.....	22
1.6 ΟΙΟΝΕΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	23
1.7 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ WPSTAB ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ .	24
1.7.1 Προσδιορισμός σημείων ισορροπίας	24
1.7.2 Προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα	25
1.8 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ POWER WORLD SIMULATOR.....	26
1.9 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	27
2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ.....	31
2.1 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ.....	31
2.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕ ΣΑΤΥΦ	33
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	35
2.3.1 Λειτουργία με Σταθερό Μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος.....	36
2.3.2 Λειτουργία Χαρακτηριστικής Καμπύλης $\cos\phi(P)$	37
2.3.3 Λειτουργία Χαρακτηριστικής Καμπύλης $Q(V)$	39
2.3.4 Ρύθμιση Σταθερής Τάσης	40
3 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ (TEST FEEDERS)	43
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	43

3.1.1	Περιγραφή.....	43
3.1.2	Επίπεδα Τάσης	45
3.1.3	Επαγωγική/Ωμική Συμπεριφορά Γραμμών Διανομής	46
3.1.4	Φορτία Συνδεδεμένα στο Δίκτυο Διανομής	48
3.2	ΔΙΚΤΥΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (TEST FEEDERS).....	49
3.2.1	Γραμμή Δοκιμών Μέσης Τάσης 33-11kV	49
3.2.2	Δίκτυο Διανομής 13-Ζυγών IEEE	52
3.2.3	Δίκτυο Δοκιμών 37-Ζυγών IEEE με Πρωτεύον και Δευτερεύον Δίκτυο Οικιακής Τάσης	56
3.2.4	Τυπικό Βρετανικό Δίκτυο Διανομής 75-Ζυγών	60
3.2.5	Δίκτυο Δοκιμών IEEE 30-Ζυγών	62
4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	67
4.1	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	67
4.1.1	Προσομοίωση Δοκιμαστικής Γραμμής Διανομής	71
4.2	ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	71
4.2.1	Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή.....	71
4.2.2	Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή.....	73
4.2.3	Μειωμένο Φορτίο – Μειωμένη Παραγωγή Λόγω Συννεφιάς	74
4.3	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	75
4.4	ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	76
4.4.1	Μεταβολή Τάσεως Αναφοράς (setpoint) του ΣΑΤΥΦ.....	77
4.4.2	Χρήση Χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$ για τα Φ/Β	83
4.4.3	Χρήση Χαρακτηριστικής $Q(V)$ για τα Φ/Β	85
4.4.4	Εφαρμογή Χαρακτηριστικής $Q(V)$ στην ημερήσια καμπύλη.....	87
4.4.5	Σύγκριση Μεθόδων Ρύθμισης Τάσης και Απώλειες	91
4.4.5.1	Προφίλ Τάσεων	91
4.4.5.2	Μεταβολή Λόγου Μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ	92
4.4.5.3	Απώλειες Γραμμών.....	93
5	ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	97
5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	97
5.2	ΌΡΙΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	99
5.2.1	Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς συστήματος μεταφοράς.....	99
5.2.3	Ευαισθησίες Ορίου Φόρτισης ως προς την έγχυση ισχύος.....	101
5.3	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	103
5.3.1	Γενικά.....	103
5.3.2	Μέθοδος Υπολογισμού Ευαισθησιών	105
5.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	106
5.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΠΛΟ ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	107
5.5.1	Ακτινικό σύστημα μεταφοράς	107
5.5.2	Εξεταζόμενη Γραμμή Διανομής	109
5.5.3	Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ικανότητα μεταφοράς.....	113
5.6	ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΈΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ	114
5.6.1	Σήμα Μετακίνησης $Q(V)$ χαρακτηριστικής	115
5.6.2	Μεταβολή Τάσης Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ	118
5.6.3	Συνδυασμός Μεθόδων	119
5.7	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔP_{MAX} ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΙΑΣ ΗΜΕΡΑΣ	121
5.7.1	Φωτοβολταϊκά με Μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος	121

5.7.2	Φωτοβολταϊκές Μονάδες με βάση Καμπύλη $\cos\phi(P)$	123
5.7.3	Φωτοβολταϊκές Μονάδες με βάση Χαρακτηριστική Καμπύλη $Q(V)$	124
5.7.4	Σύγκριση Επίδρασης Στο Όριο Φόρτισης για Κάθε Μέθοδο Ρύθμισης Τάσης και Συμπεράσματα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού	126
6	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΣΗ ΖΥΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΓΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ (EMRS).....	129
6.1	ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	129
6.1.1	Ημερήσιο Προφίλ Τάσης	129
6.2	ΕΝΤΟΛΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ (EMRS).....	132
6.2.1	Υλοποίηση εντολής έκτακτης αέργου υποστήριξης στο WPSTAB....	133
6.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	134
6.3.1	Στιγμιότυπο Δικτύου Διανομής 9:00	135
6.3.2	Στιγμιότυπο Δικτύου Διανομής 14:00	137
6.3.3	Στιγμιότυπο 19:00.....	139
6.3.4	Παρατηρήσεις	141
6.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	142
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	145
7.1	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	145
7.2	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	147
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	149

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Δεδομένα Γραμμής Δοκιμών Μέσης Τάσης 33-11kV.....	49
Πίνακας 3.2 Δεδομένα Γραμμής Δοκιμών IEEE 13 Ζυγών.....	53
Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτικά Δεδομένα προσαρμοσμένου Δικτύου Δοκιμών	54
Πίνακας 3.4 Τάσεις Ζυγών στα διάφορα Σενάρια Παραγωγής Φορτίου	55
Πίνακας 3.5 Φορτία Πρωτεύοντος Συστήματος Διανομής	58
Πίνακας 3.6 Εναέρειες Γραμμές Πρωτεύοντος Δικτύου Διανομής.....	58
Πίνακας 3.7 Γραμμές Δευτερεύοντος Δικτύου Διανομής	59
Πίνακας 3.8 Δεδομένα Μετασχηματιστή MT/XT	59
Πίνακας 3.9 Βασικά Χαρακτηριστικά Γραμμής Δοκιμών	59
Πίνακας 3.10 X/R για κάθε σενάριο που εξετάζει και ΔX/R(%)	63
Πίνακας 3.11 Βασικά Χαρακτηριστικά Γραμμής Δοκιμών IEEE 30 Ζυγών	64
Πίνακας 4.1 Δεδομένα Μετασχηματιστή Με ΣΑΤΥΦ.....	68
Πίνακας 4.2 Στοιχεία Γραμμής ACSR-95	68
Πίνακας 4.3 Μήκη Γραμμών Δικτύου Διανομής	68
Πίνακας 4.4 Σύνθετες Αντιδράσεις Γραμμών Δικτύου Διανομής προς Εξέταση	69
Πίνακας 4.5 Ονομαστικά Φορτία που τροφοδοτεί το Δίκτυο	69
Πίνακας 4.6 Εγκατεστημένη Διεσπαρμένη Παραγωγή	70
Πίνακας 4.7 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ για Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή	72
Πίνακας 4.8 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ για Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή	73
Πίνακας 4.9 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ (Συννεφιά)	74
Πίνακας 4.10 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ για τα 3 σενάρια μετά τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.....	79
Πίνακας 4.11 Τάση Αναφοράς ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα	81
Πίνακας 4.12 Δεδομένα Παραμέτρων Χαρακτηριστικής Καμπύλης $Q(V)$	86
Πίνακας 4.13 Απώλειες Ενεργού Ισχύος για τις Χαρακτηριστικές $\cos\phi(P)$ και $Q(V)$ σε 2 ώρες της ημέρας.....	94
Πίνακας 4.14 Απώλειες Ενεργού Ισχύος για μεταβολή της Τιμής Αναφοράς Ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ	95
Πίνακας 5.1 Δεδομένα Συστήματος Μεταφοράς.....	107
Πίνακας 5.2 Ευαισθησίες Παραμέτρων της γραμμής Δοκιμών σε ξεχωριστές μεταβολές της τάσης.....	111
Πίνακας 5.3 Ευαισθησίες Παραμέτρων της γραμμής Δοκιμών σε ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης στους ζυγούς διεσπαρμένης παραγωγής.....	111
Πίνακας 5.4 Επίδραση μεταβολών τάσεως στις εγχύσεις ισχύος P και Q	112
Πίνακας 5.5 Υπολογισμός μεταβολής MMI στα τρία στιγμιότυπα.....	113
Πίνακας 5.6 Επίδραση της τάσης στο όριο φόρτισης.....	114
Πίνακας 5.7 Παράμετροι Υλοποίησης μετατοπισμένης χαρακτηριστικής $Q(V)$	116
Πίνακας 5.8 Μεταβολή της P_{max} με μετατόπιση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής για τα τρία στιγμιότυπα μέσα στη μέρα	117
Πίνακας 5.9 Μεταβολή της P_{max} με μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για τα τρία στιγμιότυπα.....	119

Πίνακας 5.10 Μεταβολή της $P_{\max}$ με μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ και μετατόπιση της $Q(V)$ για τα τρία στιγμιότυπα μέσα στη μέρα	120
Πίνακας 5.11 Ροές P_{12} και Q_{12} και ζεύγη ευαισθησιών w_1 και w_2 για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος	122
Πίνακας 5.12 Ροές P_{12} και Q_{12} και ζεύγη ευαισθησιών w_1 και w_2 για ρύθμιση με χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$	123
Πίνακας 5.13 Ροές P_{12} και Q_{12} και ζεύγη των ευαισθησιών w_1 και w_2 για ρύθμιση με χαρακτηριστική $Q(V)$	125
Πίνακας 6.1 Δεδομένα Προσομοίωσης WPSTAB	134
Πίνακας 6.2 Μεταβολές Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος στις προτεινόμενες μεθόδους	143
Πίνακας 6.3 Όριο Φόρτισης Συστήματος Μεταφοράς για κάθε μέθοδο που εφαρμόζεται	143

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Κύριες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3].....	4
Σχήμα 1.2	Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια.....	6
Σχήμα 1.3	Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτιζόμενου ηλιακού στοιχείου	6
Σχήμα 1.4	Επίδραση της Θερμοκρασίας	7
Σχήμα 1.5	Επίδραση της Ακτινοβολίας.....	7
Σχήμα 1.6	Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση μεγάλης ισχύος που βασίζει τη λειτουργία της σε κεντρικό αντιστροφέα όπου 1) υποπεδίο, 2) MPPT και DC-DC μετατροπείς τάσης, 3) κεντρικός αντιστροφέας, 4) συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, 5) Μ/Σ ανύψωσης τάσης και διασύνδεση στο MT, 6) τοπική κατανάλωση και διασύνδεση στο δίκτυο	8
Σχήμα 1.7	Ισοδύναμα κυκλώματα μετατροπών DC – DC α) Υποβιβασμού Τάσης, β) ανύψωσης τάσης.....	10
Σχήμα 1.8	α) Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα DC – AC, β) Κυματομορφή της τάσης εξόδου ενός VSI αντιστροφέα με διαμόρφωση εύρους παλμών.....	11
Σχήμα 1.9	Σχηματική απεικόνιση διασύνδεσης μέσω αντιστροφέα στην παρούσα διπλωματική.....	12
Σχήμα 1.10	Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας.....	14
Σχήμα 1.11	Ακτινικό Δίκτυο	15
Σχήμα 1.12	Τάση Συναρτήσεως Ενεργών και Άεργων Φορτίων	16
Σχήμα 1.13	Καμπύλες PV.....	17
Σχήμα 1.14	Καμπύλη PV.....	17
Σχήμα 2.1	Μονάδα ΔΠ και φορτίο συνδέονται στο ανάντη δίκτυο μέσω γραμμής διανομής.....	32
Σχήμα 2.2	Διανυσματικό Διάγραμμα γραμμής διανομής Σχήματος 2.2	32
Σχήμα 2.3	Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.....	34
Σχήμα 2.4	P-Q διαγράμματα: Τριγωνικό, ορθογώνιο και ημικυκλικό νυχτερινής λειτουργίας.....	36
Σχήμα 2.5	$\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική με βάση τα πρόσφατα πρότυπα	38
Σχήμα 2.6	Υλοποίηση της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής.....	38
Σχήμα 2.7	Τυπική Q(V) χαρακτηριστική	39
Σχήμα 2.8	Ρυθμιστής Αέργου Ισχύος	40
Σχήμα 3.1	Απλό Δίκτυο Διανομής με πρωτεύον και δευτερεύον δίκτυο που τροφοδοτεί φορτία μέσης τάσης (MT) και χαμηλής τάσης (XT)	44
Σχήμα 3.2	Σύνθετη Αντίδραση Z απλής γραμμής	46
Σχήμα 3.3	Διανυσματικό Διάγραμμα με μεγάλο λόγο X/R. (α) μόνο ενεργό ρεύμα. (β) και επαγωγικό ρεύμα.....	47
Σχήμα 3.4	Διανυσματικό Διάγραμμα με μικρό λόγο X/R. (α) μόνο ενεργό ρεύμα. (β) και επαγωγικό ρεύμα	47
Σχήμα 3.5	Δοκιμαστική Γραμμή Διανομής Μέσης Τάσης 33/11kV.....	49
Σχήμα 3.6	Ημερήσιες Καμπύλες Παραγωγής και Φορτίου στο Δίκτυο MT 33/11kV	50

Σχήμα 3.7 Προφίλ Τάσεων για 4 απομακρυσμένους Ζυγούς.....	50
Σχήμα 3.8 Άεργος Υποστήριξη Μέσω των Έξυπνων Μετασχηματιστών	51
Σχήμα 3.9 Προφίλ τάσεων 4 απομακρυσμένων ζυγών με (a) Έξυπνο Μ/Σ στο Ζυγό 8 (b) Έξυπνο Μ/Σ στο Ζυγό 16.....	51
Σχήμα 3.10 Δοκιμαστική Γραμμή Διανομής 13 Ζυγών IEEE.....	53
Σχήμα 3.11 Προφίλ Τάσης Ζυγών Χωρίς Παραγωγή απο ΦΒ.....	54
Σχήμα 3.12 Προφίλ Τάσης Ζυγών Με Παραγωγή απο ΦΒ.....	55
Σχήμα 3.13 Πρωτεύον Δίκτυο Δοκιμών IEEE 37-Ζυγών	57
Σχήμα 3.14 Δίκτυο Δοκιμών που περιλαμβάνει Πλευρικές Διασυνδετικές Γραμμές και Δευτερεύον Δίκτυο Διανομής.....	58
Σχήμα 3.15 Δίκτυο Διανομής 75 Ζυγών	60
Σχήμα 3.16 Ενεργός Ισχύ που παράγεται από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	61
Σχήμα 3.17 Απότομη Αύξηση της Ενεργού Ισχύος και παραβίαση του Θερμικού Ορίου.....	61
Σχήμα 3.18 Άεργος απορρόφηση κάθε μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.....	62
Σχήμα 3.19 Δίκτυο Δοκιμών IEEE 30 Ζυγών	63
Σχήμα 3.20 Απορρόφηση Αέργου Ισχύος από τα Αιολικά.....	63
Σχήμα 3.21 Προφίλ Τάσης Στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης	64
Σχήμα 4.1 Εξεταζόμενο Δίκτυο Δοκιμών Μέσης Τάσης 11 Ζυγών.....	67
Σχήμα 4.2 Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής στην περίπτωση Μεγίστου Φορτίου – Μηδενικής Παραγωγής.....	72
Σχήμα 4.3 Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής στην περίπτωση Μηδενικού Φορτίου – Μέγιστης Παραγωγής	73
Σχήμα 4.4 Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής στην περίπτωση Μηδενικού Φορτίου – Μειωμένης Παραγωγής	74
Σχήμα 4.5 Ημερήσιο Προφίλ Ενεργού Φορτίου και Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	75
Σχήμα 4.6 Ημερήσιο Προφίλ Τάσεων Ζυγών Δικτύου Διανομής και Όρια Τάσης ...	76
Σχήμα 4.7 Τάσεις Ζυγών μετά την μεταβολή της Τιμής Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για Υψηλό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή	78
Σχήμα 4.8 Τάσεις Ζυγών μετά την μεταβολή της Τιμής Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή.....	79
Σχήμα 4.9 Τάσεις Ζυγών μετά την μεταβολή της Τιμής Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για Μηδενικό Φορτίο – Μειωμένη Παραγωγή Λόγω Συννεφιάς.....	79
Σχήμα 4.10 Τιμή Αναφοράς Ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ V_{setLTC} (όπως διαμορφώνεται μέσα στη μέρα (μπλε γραμμή) και τάση Ζυγού 1 (πορτοκαλί γραμμή)	80
Σχήμα 4.11 Αλλαγές Θέσης ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα μετά την εφαρμογή ρύθμισης τάσης.....	81
Σχήμα 4.12 Αλλαγές Θέσης ΣΑΤΥΦ στις 18:00 με χρόνο αλλαγής θέσης $t = 10\text{ s}$..	82
Σχήμα 4.13 Ημερήσιο Προφίλ Τάσης Ζυγών έπειτα από την Εφαρμογή Προγραμματισμένης Μεταβολής της Τιμής Αναφοράς V_{setLTC} του ΣΑΤΥΦ	82
Σχήμα 4.14 Χαρακτηριστική Καμπύλη $\cos\phi(P)$	83
Σχήμα 4.15 Ημερήσια Απορρόφηση Αέργου Ισχύος (MVar) από τις μονάδες ΔΠ βάση της χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$	84
Σχήμα 4.16 Ημερήσιο Προφίλ Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής και Όρια Τάσης μετά την εφαρμογή της καμπύλης $\cos\phi(P)$	85
Σχήμα 4.17 Χαρακτηριστική Καμπύλη $Q(V)$	87

Σχήμα 4.18 Ημερήσια Απορρόφηση Αέργου Ισχύος (MVar) από τις μονάδες ΔΠ βάση της χαρακτηριστικής $Q(V)$	88
Σχήμα 4.19 Ημερήσιο Προφίλ Τάσεων Ζυγών Δικτύου Διανομής και Όρια Τάσης μετά την εφαρμογή της καμπύλης $Q(V)$	89
Σχήμα 4.20 Ρεύμα Μετατροπών κατά τη διάρκεια της ημέρας μετά την εφαρμογή της καμπύλης $Q(V)$	90
Σχήμα 4.21 Τυπική Απόκλιση τάσεων με τις τρεις προτεινόμενες μεθόδους	92
Σχήμα 4.22 Κίνηση ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα για τις τρεις μεθόδους ρύθμισης της τάσης	93
Σχήμα 5.1 Υποστήριξη συστήματος μεταφοράς μέσω αποκεντρωμένου ελέγχου.....	97
Σχήμα 5.2 Ακτινικό Σύστημα Μεταφοράς	107
Σχήμα 5.3 Εξεταζόμενο Δίκτυο Δοκιμών Μέσης Τάσης 11 Ζυγών.....	109
Σχήμα 5.4 Προς Εξέταση Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής.....	113
Σχήμα 5.5 Μετατοπισμένη καμπύλη $Q(V)$ για εντολή άεργης υποστήριξης	116
Σχήμα 5.6 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στις φωτοβολταϊκές μονάδες	122
Σχήμα 5.7 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για ρύθμιση με χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ στις φωτοβολταϊκές μονάδες	124
Σχήμα 5.8 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για ρύθμιση με χαρακτηριστική $Q(V)$ στις φωτοβολταϊκές μονάδες	125
Σχήμα 5.9 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για τα τρία σημεία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων.....	127
Σχήμα 6.1 Εξεταζόμενο Σύστημα Διανομής	130
Σχήμα 6.2 Προφίλ Τάσης Ζυγών Συστήματος Διανομής.....	130
Σχήμα 6.3 Ρεύματα Μετατροπών.....	131
Σχήμα 6.4 Κίνηση ΣΑΤΥΦ κατά τη διάρκεια της ημέρας	132
Σχήμα 6.5 Προς Εξέταση Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής.....	135
Σχήμα 6.6 Διάγραμμα P-V χωρίς EMRS.....	136
Σχήμα 6.7 Τάσεις ζυγών 4,8 και 10	136
Σχήμα 6.8 Ενεργός Κατανάλωση Φορτίου Συστήματος Μεταφοράς	137
Σχήμα 6.9 Διάγραμμα P-V, αύξηση ορίου φόρτισης με EMRS.....	137
Σχήμα 6.10 Διάγραμμα P-V χωρίς EMRS.....	138
Σχήμα 6.11 Τάσεις ζυγών 4,8 και 10	138
Σχήμα 6.12 Ενεργός Κατανάλωση Φορτίου Συστήματος Μεταφοράς	139
Σχήμα 6.13 Διάγραμμα P-V, ενίσχυση ορίου φόρτισης με EMRS	139
Σχήμα 6.14 Διάγραμμα P-V χωρίς EMRS.....	140
Σχήμα 6.15 Τάσεις ζυγών 4,8 και 10	140
Σχήμα 6.16 Ενεργός Κατανάλωση Φορτίου Συστήματος Μεταφοράς	141
Σχήμα 6.17 Διάγραμμα P-V, αύξηση ορίου φόρτισης με EMRS.....	141

1

Εισαγωγή

1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

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

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι και το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή, και επειδή δεν είναι εύκολα και οικονομικά αποθηκεύσιμη, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που καταναλώνεται [1].

1.1.1 Σύστημα Παραγωγής

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Αναφέρεται στη μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας (π.χ. θερμική, υδραυλική, αιολική) αρχικά σε κινητική μέσω κινητήριων μηχανών (π.χ. στροβίλων) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω σύγχρονων γεννητριών. Στο σύστημα παραγωγής συμπεριλαμβάνονται και οι υποσταθμοί ανύψωσης σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή, προέρχεται από την θερμική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων, από τη μηχανική ενέργεια των υδάτινων ροών και υδατοπτώσεων, από την πυρηνική σχάση και τα τελευταία χρόνια

όλο και περισσότερο από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, τα θαλάσσια ρεύματα.

1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, γίνεται με τις γραμμές υψηλής (YT) και υπερυψηλής (YYT) τάσης. Αυτές μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς διανομής, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (MT). Επίσης, τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, οι οποίοι συνήθως διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση (YT/MT) και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης (XT), και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10MW. Το σύστημα μεταφοράς συμπεριλαμβάνει και τους υποσταθμούς ζεύξης των διαφορετικών δικτύων των γραμμών υψηλής τάσης.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τιμές τάσης μεταφοράς, αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεταφοράς στα ΣΗΕ έχουν σήμερα τιμές 66kV, 110kV, 132kV, 138kV, 150kV, 220kV, 275kV, 345kV, 400kV, 500kV και 750kV. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι βροχοειδής, σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system).

1.1.3 Δίκτυο Διανομής

Το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των καταναλωτών. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς YT/MT. Στη συνέχεια, μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτούνται οι πελάτες μέσης τάσης και οι υποσταθμοί MT/XT. Από τους υποσταθμούς MT/XT, η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει τελικά στο σύνολο των καταναλωτών.

Τα δίκτυα διανομής, ανάλογα με τον τύπο περιοχής που τροφοδοτούν, μπορούν να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια. Λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής. [2]

Παράλληλα, η ραγδαία ανάπτυξη των εναλλακτικών μορφών ενέργειας και των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη διείσδυση παραγωγής στο δίκτυο διανομής σε μέση τάση MT αλλά και σε χαμηλή τάση XT.

1.2 Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής

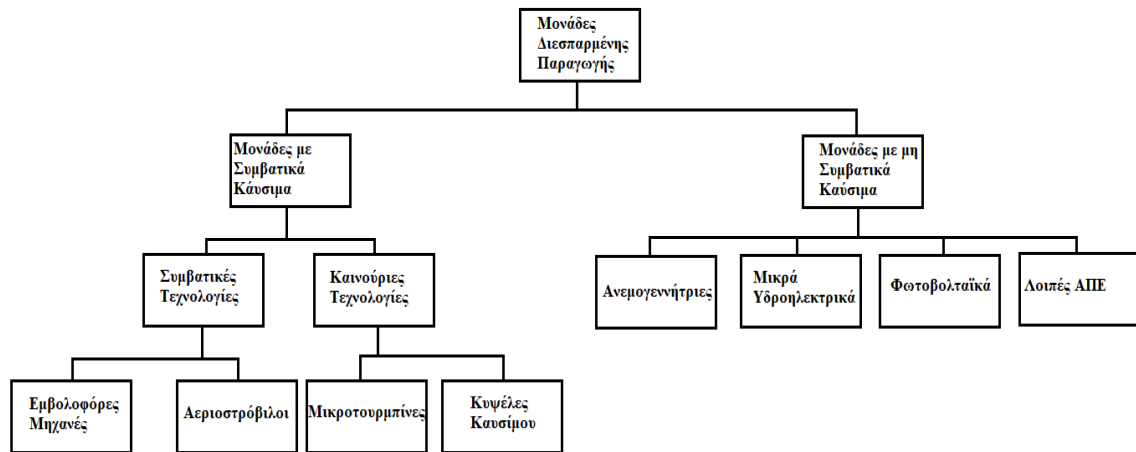
Η διεσπαρμένη παραγωγή στα πρώτα χρόνια της ηλεκτροπαραγωγής αποτελούσε τον κανόνα της παραγωγής. Οι πρώτες μονάδες παρείχαν ενέργεια σε πελάτες που βρίσκονταν κοντά στην παραγωγή. Την τελευταία δεκαετία το ενδιαφέρον προς τη διεσπαρμένη παραγωγή έχει ανανεωθεί λόγω της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως φωτοβολταϊκών και αιολικών, καθώς και της ένταξής τους στα δίκτυα διανομής.

Η διεσπαρμένη παραγωγή είναι μια έννοια για την οποία στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφοροι ορισμοί οι οποίοι δεν συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους. Κάποιοι ορισμοί εστιάζουν στο επίπεδο της τάσης στην οποία γίνεται η σύνδεση ενώ άλλοι εστιάζουν στο ότι η διεσπαρμένη παραγωγή συνδέεται στο σύστημα διανομής, απευθείας στα σημεία που υπάρχουν φορτία. Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τον ακόλουθο ορισμό [3] :

Ως διεσπαρμένη παραγωγή ορίζονται οι μονάδες παραγωγής με ονομαστική δυνατότητα παροχής ισχύος από 1kW έως 100 MW, που κατά κανόνα συνδέονται στο δίκτυο διανομής και δεν σχεδιάζονται ή ελέγχονται από το κέντρο ελέγχου ενέργειας.

Συχνά η Διεσπαρμένη Παραγωγή αναφέρεται σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εφαρμογή τεχνολογίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Είναι όμως δυνατό για την υλοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τεχνολογία παραγωγής. Οι ΑΠΕ αποτελούν γενικά συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, αν εξαιρεθούν τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μεγάλης κλίμακας ή τα μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός όμως από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα. Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται οι κυριότερες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Η διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) στα Δίκτυα Διανομής (ΔΔ) αυξάνεται παγκοσμίως. Η αύξηση της τοπικής παραγωγής έχει οδηγήσει σε διάφορες αλλαγές στη φιλοσοφία λειτουργίας και διαμόρφωσης των Δικτύων Διανομής. Η δυναμική φύση (μεγαλύτερη συμμετοχή των ηλεκτρονικών ισχύος) των συνδεδεμένων φορτίων και της διεσπαρμένης παραγωγής δημιουργεί νέες προκλήσεις για τη λειτουργία των δικτύων μεταφοράς και διανομής οπότε οι ΔΠ καλούνται να παρέχουν στο δίκτυο βοήθεια και στήριξη.



Σχήμα 1.1 Κύριες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3]

Όταν η διεσπαρμένη παραγωγή φτάνει σε ορισμένα επίπεδα διείσδυσης, τότε επιδρά στην ευστάθεια και στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου μεταφοράς. Επίσης, αυξημένη έγχυση ισχύος στο Δίκτυο Διανομής μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υπέρτασης και ανάστροφης ροής ισχύος που μπορεί να επηρεάσει τις ρυθμίσεις προστασίας μέσα στο δίκτυο διανομής. Ένα δίκτυο διανομής με αυξημένη διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής ανταποκρίνεται δυναμικά σε διαταραχές του συστήματος και συνεπώς επηρεάζει τη συνολική ευστάθεια του συστήματος ενέργειας και τη δυναμική του συμπεριφορά.

Οι κύριες μονάδες στα δίκτυα διανομής είναι μονάδες αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής. Στο δίκτυο μέσης τάσης μπορεί να είναι ολόκληρα πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ έως και κάποια MW ενώ στο δίκτυο χαμηλής τάσης και σε δευτερεύοντα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι φωτοβολταϊκά στέγης ή μικρές ανεμογεννήτριες. Το σημαντικό για τις παραπάνω μονάδες που αναφέρονται είναι ότι πρόκειται για μονάδες εξοπλισμένες με ηλεκτρονικά ισχύος και δυνατότητα ρύθμισης της αέργου ισχύος και του συντελεστή ισχύος τους.

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή όταν ελέγχεται μπορεί να παρέχει υποστήριξη στο ανάντη δίκτυο μεταφοράς στηρίζοντας τη ζήτηση άεργου ισχύος από τα φορτία του δικτύου διανομής και μείωση της ροής σε περίπτωση συμφόρησης. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εκμετάλλευση των ηλεκτρονικών ισχύος και των αντιστροφών που υπάρχουν στις περισσότερες μονάδες παραγωγής ΔΠ. Η παροχή στήριξης στο Δίκτυο Μεταφοράς ήδη είναι απαραίτητη σε χώρες με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής.

Σε επόμενο κεφάλαιο, θα γίνει ο διαχωρισμός σε επίπεδα τάσης και σε δοκιμαστικά κατά βάση δίκτυα διανομής με ή και χωρίς διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, θα παρουσιαστούν διάφορες γραμμές δοκιμών (test feeders) που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικές εργασίες και δημοσιεύσεις καθώς και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη χρήση του καθενός.

Τα δίκτυα διανομής στα οποία εστιάζει η παρούσα εργασία αποτελούν γραμμές διανομής με υψηλή διείσδυση σε Διεσπαρμένη Παραγωγή.

1.2.1 Μονάδες Φωτοβολταϊκής Παραγωγής

Ένα είδος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από αυτά που αναφέρθηκαν και προηγουμένως είναι τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Τα Φ/Β Συστήματα που μας ενδιαφέρουν και στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που, εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι και απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότησή τους. Στην Ελλάδα, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής των Φ/Β συστημάτων είναι τεράστια, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από φωτοβολταϊκά έχει ένα μεγάλο πλεονέκτημα που παρατηρείται κυρίως στις μεσογειακές χώρες, άρα και στην Ελλάδα: αποδίδει την μέγιστη ισχύ της κατά τη διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση, ειδικά το καλοκαίρι για τις μεσημεριανές ώρες που λειτουργούν ταυτόχρονα πολλές συσκευές όπως τα κλιματιστικά [4].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ενδιαφέρουν κυρίως τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού.

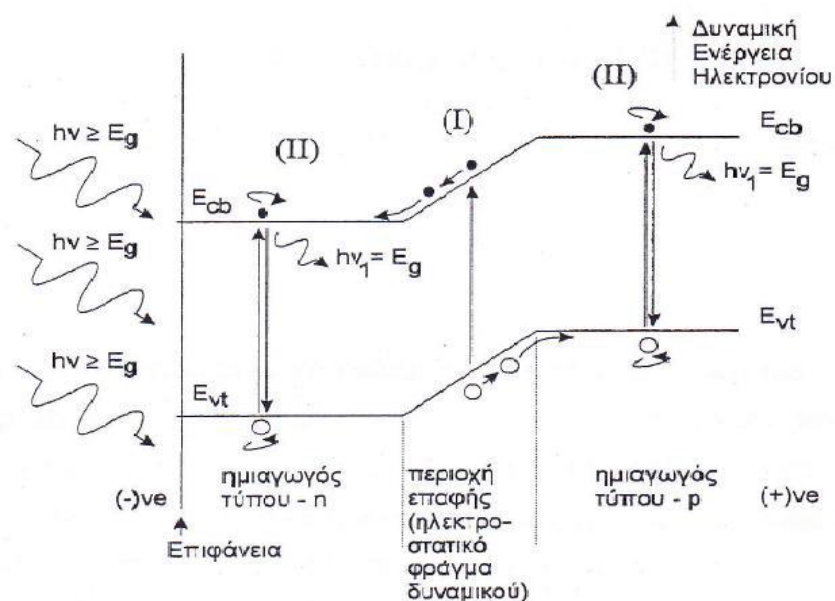
1.2.2 Χαρακτηριστικά Φ/Β Συστημάτων

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια εκμεταλλευόμενες το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα ηλιακά στοιχεία βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανεμημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ελεύθερων φορέων: δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και μια οπή στη ζώνη σθένους. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου και τη συγκέντρωσή τους πάνω στις δύο όψεις του ηλιακού στοιχείου – δηλαδή τη φωτιζόμενη και την πίσω όψη τους -. Συγκεκριμένα επειδή μερικά από τα ζεύγη των φορέων αυτών δημιουργούνται μέσα ή και δίπλα από την περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού διαχωρίζονται προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Για την κατανόηση του μηχανισμού μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σα σφαίρες μάζας m_e που κυλούν πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο ενώ οι οπές συμπεριφέρονται σα φουσαλίδες – θέσεις στις οποίες απουσιάζει η μάζα ενός ηλεκτρονίου – που αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό. Στο μοντέλο αυτό το ηλεκτρόνιο (σφαίρα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική του ενέργεια κινούμενο προς τα κάτω, ενώ η οπή (φουσαλίδα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική της ενέργεια κινούμενη προς τα άνω σε ένα διάγραμμα δυναμικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε μια δίοδο p-n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται φορτία στις δύο αντικρινές επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες

των δυο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, για όσο διάστημα υπάρχει η οπτική διέγερση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

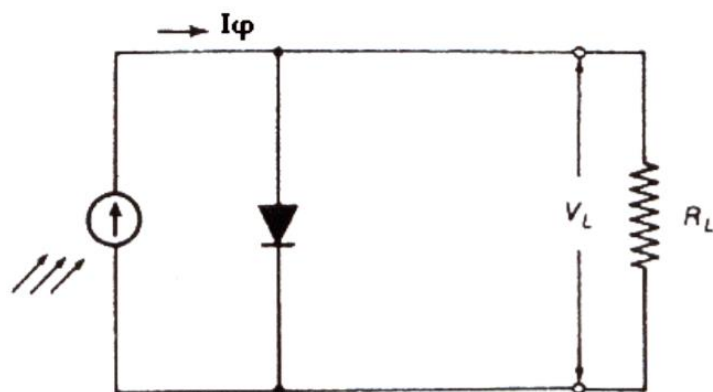
Στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια τιμής $E = h \cdot \nu \leq E_g$. Όπου $E_g = E_{cb} - E_{vt}$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, E_{cb} είναι ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και E_{vt} η κορυφή ζώνης σθένους.

Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να οδηγήσει ένα ρεύμα μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας με τον τρόπο αυτό ωφέλιμη ισχύ.



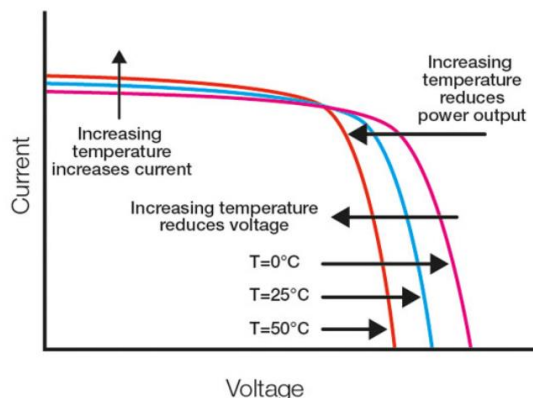
Σχήμα 1.2 Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια

Η περιγραφή κάθε διάταξης και η κατανόηση της λειτουργίας της μπορεί να γίνει μέσα από το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου περιγράφεται στο Σχήμα 1.3. Αποτελείται από μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο.

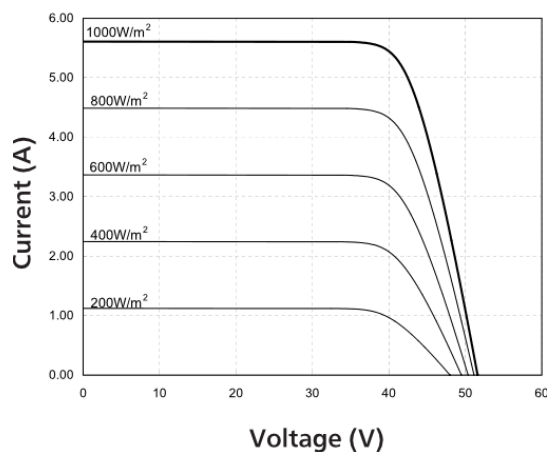


Σχήμα 1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτιζόμενου ηλιακού στοιχείου

Στα Σχήματα 1.4 και 1.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες ρεύματος – τάσης ($I - V$ καμπύλες) των Φ/Β στοιχείων και φαίνεται η επίδραση των μεταβολών της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αντίστοιχα.



Σχήμα 1.4 Επίδραση της Θερμοκρασίας



Σχήμα 1.5 Επίδραση της Ακτινοβολίας

1.2.3 Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων στο Δίκτυο

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής λειτουργούν με συνεχή τάση (DC). Αυτό σημαίνει ότι για να συνδεθεί μια μονάδα στο δίκτυο πρέπει να μετατραπεί η DC τάση σε εναλλασσόμενη τάση AC σταθερού πλάτους και σταθερής συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των αντιστροφών. Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων διαφέρουν από τους αντιστροφείς των άλλων ηλεκτρονικών εφαρμογών καθώς μπορούν να ελέγχουν την έξοδο των φωτοβολταϊκών υποπεδίων, προκειμένου να δημιουργούν συνθήκες μέγιστης απόδοσης.

Τα κύρια μεγέθη των αντιστροφών είναι :

- η ονομαστική ισχύς (P_{NOM})
- η ονομαστική τάση εισόδου (V_{DC})
- η ονομαστική τάση εξόδου (V_{RMS})
- η συχνότητα εξόδου (Hz)
- ο αριθμός των φάσεων

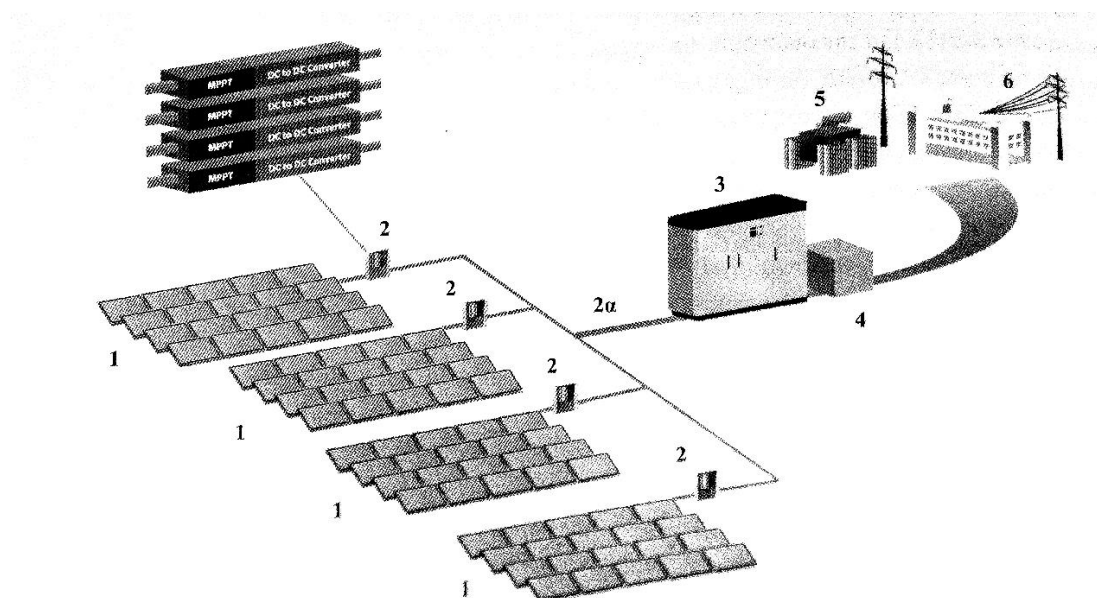
Η τάση εισόδου V_{DC} των αντιστροφέων εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ τους. Για ισχύ μερικών εκατοντάδων W_p οι τάσεις εισόδου μπορεί να είναι 12 V, 24 V ή και τα 48 V. Για μεγαλύτερες τιμές ισχύος του αντιστροφέα η τάση εισόδου αυξάνεται στα 150 V – 400 V και μπορεί να γίνεται και παράλληλη σύνδεση μεταξύ αντιστροφέων στην έξοδο, εφόσον το επιτρέπουν οι προδιαγραφές του κατασκευαστή. Για μεγαλύτερα ΦΒ συστήματα των 100 kW χρησιμοποιούνται οι κεντρικοί τριφασικοί αντιστροφέες, οι οποίοι έχουν τάσεις εισόδου που μπορούν να φτάνουν και τα 600 – 1000 V.

Οι αντιστροφείς μπορεί να παρεμβληθούν σε διαφορετικές θέσεις στη ΦΒ εγκατάσταση, ώστε ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους να μπορούν να ελέγχουν την παραγόμενη ισχύ από :

- ολόκληρο το ΦΒ πεδίο (central inverters)
- ένα υποπεδίο, δηλαδή παράλληλες συστοιχίες ΦΒ πλαισίων (string inverters)
- το κάθε ένα πλαίσιο ανεξάρτητα (micro-inverters)

Στην παρούσα διπλωματική ενδιαφέρει η περίπτωση του κεντρικού αντιστροφέα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ολόκληρη η ισχύς της εγκατάστασης του ΦΒ πεδίου αποδίδεται προς έναν κύριο αντιστροφέα, οπότε έχουμε τη διάταξη του κεντρικού αντιστροφέα (central inverter). Οι σχεδιασμοί των εγκαταστάσεων που βασίζουν τη λειτουργία τους σε κεντρικούς αντιστροφείς προτιμώνται κυρίως για τα μεγάλα ΦΒ συστήματα.

Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζονται προοπτικά τα κυριότερα τμήματα μιας μεγάλης ΦΒ εγκατάστασης που βασίζει τη λειτουργίας της σε διάταξη κεντρικού αντιστροφέα.



Σχήμα 1.6 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση μεγάλης ισχύος που βασίζει τη λειτουργία της σε κεντρικό αντιστροφέα όπου 1) υποπεδίο, 2) MPPT και DC-DC μετατροπείς τάσης, 3) κεντρικός αντιστροφέας, 4) συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, 5) Μ/Σ ανύψωσης τάσης και διασύνδεση στο ΜΤ, 6) τοπική κατανάλωση και διασύνδεση στο δίκτυο

Επίσης, ανάλογα με τον τύπο της φωτοβολταϊκής εγκατάσταση και τις εργασίες που επιτελούν οι αντιστροφείς κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- αντιστροφείς αυτόνομων συστημάτων (stand-alone inverters)
- αντιστροφείς διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο (grid-tied inverters)
- αντιστροφείς δικτύου που υποστηρίζονται από συσσωρευτές (battery back-up inverters)

Το ενδιαφέρον στην παρούσα εργασία εστιάζεται στη 2^η κατηγορία αντιστροφών διασυνδεδεμένων στο δίκτυο (grid – tied inverters). Οι αντιστροφείς αυτοί παρέχουν στην έξοδο τους ημιτονική τάση της ίδιας συχνότητας και ίδιου πλάτους με την τάση του δικτύου που συνδέεται. Ο αντιστροφέας εμπεριέχει συστήματα προστασίας από βραχυκυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος, υπερτάσεις και κάθε μορφής διαταραχής του δικτύου.

Ο αντιστροφέας, επίσης, διασφαλίζει τον πλήρη συγχρονισμό της συχνότητας μεταξύ της παραγόμενης τάσεως AC και της τάσεως του δικτύου, ώστε να μην υπάρχουν φαινόμενα υστέρησης, δηλαδή διαφορά φάση μεταξύ της παραγόμενης τάσεως και της τάσης του τοπικού δικτύου.

Ακόμα, ο αντιστροφέας προβλέπει για την άμεση διακοπή της ηλεκτρικής τροφοδοσίας από το ΦΒ πεδίο προς το διασυνδεδεμένο δίκτυο (grid cut-off) και το εσωτερικό δίκτυο της εγκατάστασης (anti-islanding), μόλις εκδηλωθεί κάποια δυσλειτουργία στο ευρύτερο δίκτυο παρόχου (νησιδοποίηση) [4].

Η δυνατότητα του αντιστροφέα να μεταβάλλει το συντελεστή ισχύος, και να ρυθμίζει την άεργο παραγωγή ή απορρόφηση του είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό που θα αξιοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Αναλυτικά η λειτουργία του παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

1.3 Μετατροπείς Ισχύος

Όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτούν τη χρήση μετατροπέων ισχύος για τη σύνδεση τους στο δίκτυο.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια τεχνολογία η οποία παρεμβάλλεται στη διαδικασία της μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα στην πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και το φορτίο βασισμένη στη συνδυασμένη γνώση των συστημάτων ενέργειας, της ηλεκτρονικής και του ελέγχου. Εξαιτίας της διαφορετικής φύσεως των επιπέδων και μορφών της τάσεως και της συχνότητας της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των μεταβλητών απαιτήσεων των σύγχρονων εφαρμογών, η παρέμβαση των ηλεκτρονικών ισχύος στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του συνολικού συστήματος. [5]

Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις βασικού τύπους, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της εισόδου και της εξόδου του συστήματος.

- DC – DC μετατροπείς
- AC – DC μετατροπείς (ανορθωτές)
- DC – AC μετατροπείς (αντιστροφείς)
- AC – AC μετατροπείς

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής, τα οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων εμπεριέχουν μετατροπείς DC – AC (αντιστροφείς) καθώς και DC – DC μετατροπείς για προσαρμογή του επιπέδου της τάσης.

1.3.1 DC – DC μετατροπείς ισχύος

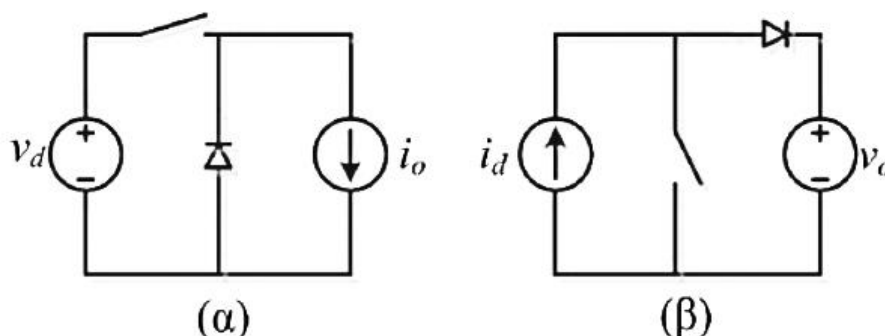
Η βασική λειτουργία των μετατροπέων DC- DC είναι η διατήρηση μιας σταθερής τάσης εξόδου για μεταβαλλόμενη τιμή της τάσης εισόδου ή η οδήγηση της τάσεως/ ρεύματος εισόδου σε κάποια επιθυμητή τιμή. Οι βασικοί εκπρόσωποι των DC – DC μετατροπέων είναι :

- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης
- Μετατροπέας ανύψωσης τάσης
- Μετατροπέας Cuk
- Μικτός Μετατροπέας
- Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα

Από αυτούς τους πέντε μετατροπείς οι μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης θεωρούνται ως βασικές τοπολογίες.

Στο Σχήμα 1.7, απεικονίζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα των βασικότερων DC – DC μετατροπέων. Από τα ισοδύναμα κυκλώματα είναι εμφανές ότι στην περίπτωση όπου στην έξοδο του μετατροπέας απαιτείται έλεγχος της τάσης εξόδου, κάτι που συμβαίνει κατά κόρον στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ο μετατροπέας ανύψωσης και ο μικτός μετατροπέας είναι οι περισσότερο κατάλληλοι, χωρίς να αποκλείονται οι υπόλοιποι μετατροπείς. Όσον αφορά τον μετατροπέα ανύψωσης, η είσοδος του συμπεριφέρεται σαν πηγή ρεύματος κάτι που καταδεικνύει ότι άμεσα μπορεί να ελεγχθεί το ρεύμα εισόδου και δευτερευόντως η τάση της εισόδου.

Στην παρούσα εργασία ο μετατροπέας DC – DC αναφέρεται απλά για λόγους πληρότητας καθώς εξετάζονται φωτοβολταϊκά συστήματα. Ωστόσο, η μελέτη αφορά κυρίως στην πλευρά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε το ενδιαφέρον της μελέτης ξεκινά από τον αντιστροφέα και μετά.



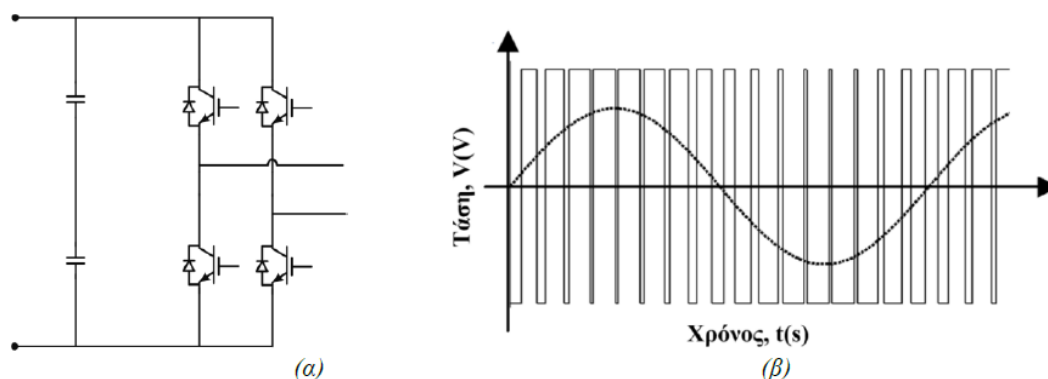
Σχήμα 1.7 Ισοδύναμα κυκλώματα μετατροπέων DC – DC α) Υποβιβασμού Τάσης, β) ανύψωσης τάσης

1.3.2 DC – AC μετατροπείς ισχύος (αντιστροφείς)

Το βασικότερο χαρακτηριστικό των μετατροπέων DC – AC είναι η ικανότητα να παράγουν ημιτονοειδείς τάσεις εξόδου ελεγχόμενες ως προς το μέτρο, τη συχνότητα και τη φάση, από μία DC πηγή ισχύος.

Σύμφωνα με τη μορφή της DC πηγής, οι αντιστροφείς μπορούν να κ κατηγοριοποιηθούν σε δυο βασικούς τύπους : πηγής τάσεως (Voltage Source Inverters – VSI) και πηγές ρεύματος (Current Source Inverters – CSI).

Στο Σχήμα 1.8 εμφανίζεται ένα συμβατικός τριφασικός μετατροπέας και η παραγόμενη AC κυματομορφή. Για την παραγωγή της AC κυματομορφής εξόδου από μία DC πηγή ισχύος , τα ημιαγώγιμα στοιχεία του μετατροπέα ισχύος ανοιγοκλείνουν σύμφωνα με τη στρατηγική ελέγχου βασισμένα σε μια τεχνική διαμόρφωσης όπως φέροντος σήματος (carrier based), εύρους παλμών (pulse width), διανύσματος χώρου (space vector) κλπ. Οι παραγόμενες κυματομορφές εξόδου από τον αντιστροφέα ισχύος αποτελούνται από τη σύνθεση διακριτών τιμών τάσης ραγδαία μεταβαλλόμενων όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 1.8. Παρόλου που η κυματομορφή εξόδου δεν είναι ημιτονοειδής, περιέχει μια θεμελιώδη συνιστώσα η οποία φέρει το επιθυμητό μέτρο και συχνότητα.



Σχήμα 1.8 α) Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα DC – AC, β) Κυματομορφή της τάσης εξόδου ενός VSI αντιστροφέα με διαμόρφωση εύρους παλμών

1.3.3 Μετατροπείς ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα

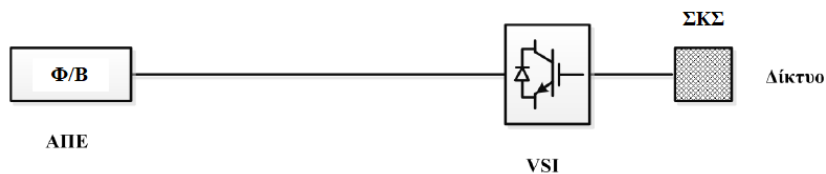
Ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πολύπλευρος και μπορεί να διακριθεί σε τρεις βασικές λειτουργίες:

- Βασική λειτουργία
 - Έλεγχος Ρεύματος
 - Έλεγχος DC τάσης
 - Συγχρονισμός με το δίκτυο
- Λειτουργία Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας
 - Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος
 - Αποφυγή φαινομένου νησιδοποίησης

- Παρακολούθηση του δικτύου
- Βοηθητικές Λειτουργίες – Υποστήριξη του Δικτύου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιοποιούνται μόνο οι βοηθητικές λειτουργίες για την υποστήριξη του δικτύου μέσω του ελέγχου της αέργου ισχύος.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, οπότε μας ενδιαφέρει η μελέτη από τον αντιστροφέα και μετά, εστιάζοντας στις εγγεόμενες ροές ενεργού και αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα και η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.9, δηλαδή από την πλευρά του μετατροπέα και μετά.



Σχήμα 1.9 Σχηματική απεικόνιση διασύνδεσης μέσω αντιστροφέα στην παρούσα διπλωματική

1.4 Ευστάθεια Τάσης

1.4.1 Η έννοια της Ευστάθειας Τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί σταθερές αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του, τόσο κάτω από ονομαστική κατάσταση λειτουργίας, όσο και έπειτα από μια διαταραχή. Επίσης, για το πρόβλημα της αστάθειας τάσης έχει προταθεί ο παρακάτω ορισμός, ο οποίος περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου [6]:

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα των φορτίων (μέσω της δυναμικής συμπεριφοράς τους) να απορροφήσουν ισχύ μεγαλύτερη από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συναντούν ένα άνω όριο στην ισχύ που μπορούν να διακινήσουν. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, το όριο αυτό καθορίζει κατά πόσο ένα σύστημα κινδυνεύει να βρεθεί σε κατάσταση αστάθειας τάσης. Όταν το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος παραβιαστεί, ο οποιοσδήποτε μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου αντί να αυξήσει την καταναλισκόμενη ισχύ, τείνει να τη μειώσει. Στο φαινόμενο αυτό βρίσκεται η ουσία της αστάθειας τάσης.

Η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων είναι ένα από τα κύρια αίτια πρόκλησης της αστάθειας τάσης. Μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία

τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητά τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεων του συστήματος, όπως είναι τα ΣΑΤΥΦ, οι κινητήρες επαγωγής και τα θερμοστατικά φορτία.

Ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης, εμφανίζεται με τη μορφή της συνεχούς μείωσης (σπανιότερα ανόδου) των τάσεων σε ορισμένους ζυγούς του συστήματος. Η επιτάχυνση αυτού του φαινομένου προκαλεί τελικά απότομες βυθίσεις στις τάσεις, οδηγώντας στο φαινόμενο που ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η έννοια της κατάρρευσης έχει οριστεί ως εξής [6] :

Η αστάθεια τάσης ξεκινά ως ένα τοπικό φαινόμενο. Ωστόσο, οι συνέπειές της μπορεί να έχουν ένα πιο διαδεδομένο αντίκτυπο. Από την άλλη, η κατάρρευση τάσης συνήθως είναι το αποτέλεσμα μιας αλληλουχίας γεγονότων που συνοδεύουν την αστάθεια τάσης και οδηγούν ένα σημαντικό κομμάτι του ΣΗΕ να λειτουργεί με χαμηλές τάσεις. Η πιθανή αστάθεια τάσης μπορεί εύκολα να ευνοηθεί από τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες του συστήματος, με τα πιο σημαντικά να είναι [7]:

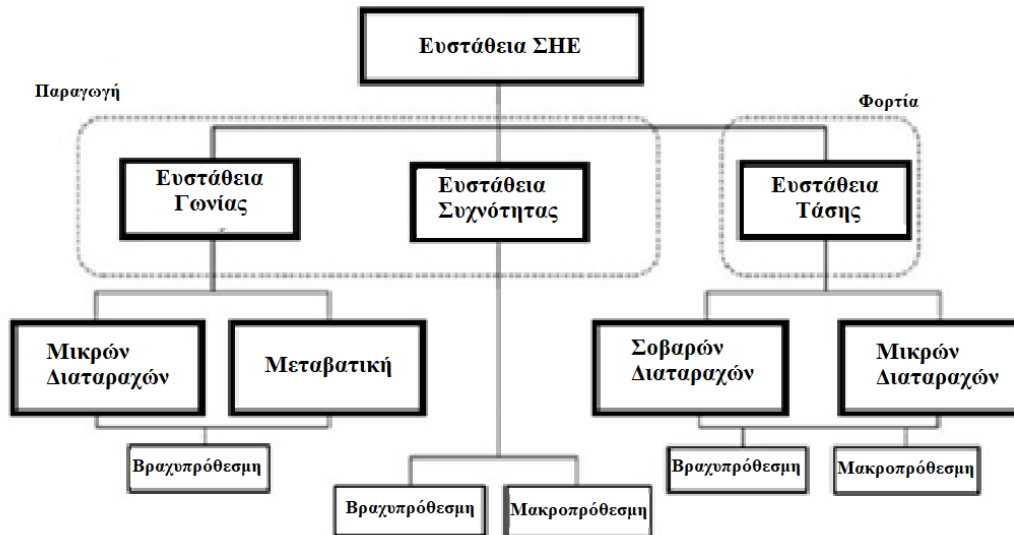
- Μεγάλες αποστάσεις μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης.
- Λειτουργία ΣΑΤΥΦ σε καταστάσεις χαμηλού επιπέδου τάσεων μεταφοράς.
- Κακός και άστοχος συντονισμός του συνόλου των συστημάτων προστασίας και ελέγχου.

1.4.2 Ταξινόμηση Φαινομένων Ευστάθειας

Ενώ η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ενιαίο πρόβλημα, θα ήταν δύσκολο και σχεδόν αδύνατο να μελετηθεί με έναν ενιαίο τρόπο. Η ταξινόμηση της ευστάθειας ΣΗΕ σε διάφορες μορφές είναι αναγκαία, αφού η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες που ο καθένας επιδρά με διαφορετικό τρόπο στο σύστημα και απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στο Σχήμα 1.10, ενώ ο διαχωρισμός τους γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια [7]:

- Η φύση της αστάθειας.
- Το μέγεθος της διαταραχής που προκαλεί την αστάθεια.
- Ο εξοπλισμός, οι μηχανισμοί, οι διαδικασίες και το χρονικό διάστημα που πρέπει να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε να μελετηθεί η αστάθεια.
- Η καταλληλότερη μέθοδος αντιμετώπισης και πρόβλεψης της αστάθειας.

Όπως και τα υπόλοιπα είδη ευστάθειας, η ευστάθεια τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε κατηγορίες με βάση διαφορετικά κριτήρια. Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αποτελεί το μέγεθος της διαταραχής που προκάλεσε την απώλεια της ευστάθειας. Με βάση αυτό το κριτήριο, η ευστάθεια τάσης κατηγοριοποιείται σε ευστάθεια τάσης *μεγάλων διαταραχών* και *μικρών διαταραχών* [7]. Ο διαχωρισμός αυτός χρησιμοποιείται στην επιλογή της μεθόδου ανάλυσης των φαινομένων αστάθειας.



Σχήμα 1.10 Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας

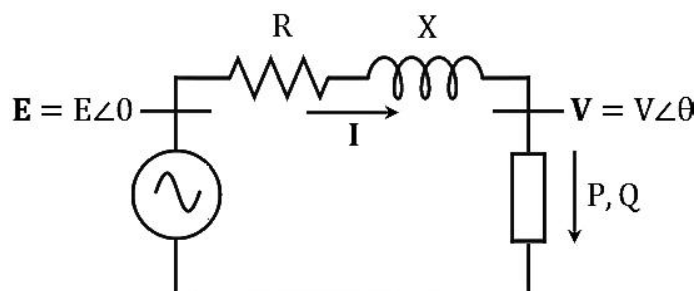
Η *ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε περιπτώσεις εμφάνισης σημαντικών διαταραχών όπως σφάλματα συστήματος, απώλεια γεννήτριας ή απώλεια γραμμής μεταφοράς. Η ικανότητα αυτή καθορίζεται από το μέγεθος του φορτίου που καλείται να καλύψει το σύστημα, καθώς και από τη λειτουργία και αλληλεπίδραση διαφόρων συνεχών ή διακριτών διατάξεων, όπως είναι τα ΣΑΤΥΦ. Ο εντοπισμός της αστάθειας τάσης πραγματοποιείται συνήθως με μη γραμμική δυναμική ανάλυση του συστήματος για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να εντοπιστεί και η επίδραση τέτοιων διατάξεων.

Η *ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε συνθήκες μικρών διαταραχών, όπως σταδιακή αύξηση του φορτίου. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από το καταναλισκόμενο φορτίο και τις αλληλεπιδράσεις διατάξεων σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος για περιπτώσεις εμφάνισης μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση γύρω από ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο χαρακτηρίζεται ευσταθές ή ασταθές [7].

1.4.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV

Όπως έχει αναφερθεί, ένας βασικός παράγοντας στην εμφάνιση αστάθειας τάσης αποτελεί η αδυναμία μεταφοράς της απαιτούμενης ισχύος για την κάλυψη των φορτίων [6]. Το σύστημα έχει την ικανότητα να παρέχει μια μέγιστη ποσότητα ισχύος από το ζυγό Α στο ζυγό Β ή από μια περιοχή σε μια άλλη του δικτύου, η οποία αναφέρεται ως *μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς*. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ενός συστήματος προσδιορίζεται βάσει των διατάξεων και της τοπολογίας του. Η βασική ιδέα προκύπτει από την ανάλυση ενός ακτινικού δικτύου (Σχήμα 1.11), το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης και ένα φορτίο.

Για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι η μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο γίνεται χωρίς ωμικές απώλειες ($R=0$) μέσω της αντίδρασης X . Επίσης, θεωρείται ότι η πηγή τάσης παρέχει σταθερή τάση E . Το μέτρο και η γωνία της τάσης του φορτίου είναι V και θ αντίστοιχα.



Σχήμα 1.11 Ακτινικό Δίκτυο

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.11 είναι :

$$\mathbf{V} = \mathbf{E} - jX\mathbf{I} \quad (1.1)$$

Όπου με έντονα μαύρα γράμματα εμφανίζονται οι φασιθέτες. Άρα, η φαινόμενη ισχύς που καταναλώνει το φορτίο του ακτινικού δικτύου είναι:.

$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{VI}^* = \mathbf{V} \left(\frac{\mathbf{E} - \mathbf{V}}{jX} \right)^* = \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \quad (1.2)$$

Οπότε το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της (1.2) αναλύεται ως εξής:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (1.3)$$

$$Q = \frac{EV \cos \theta - V^2}{X} \quad (1.4)$$

Οι εξισώσεις (1.3) και (1.4) ονομάζονται εξισώσεις *ροής ισχύος* ή *ροής φορτίου* ενός δικτύου χωρίς απώλειες. Για δεδομένο φορτίο (P, Q) οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται ως προς V και θ , με χρήση των οποίων προσδιορίζονται και τα υπόλοιπα μεγέθη. Με την απαλοιφή του θ στις εξισώσεις (1.3) και (1.4) λαμβάνεται η διτετράγωνη εξίσωση:

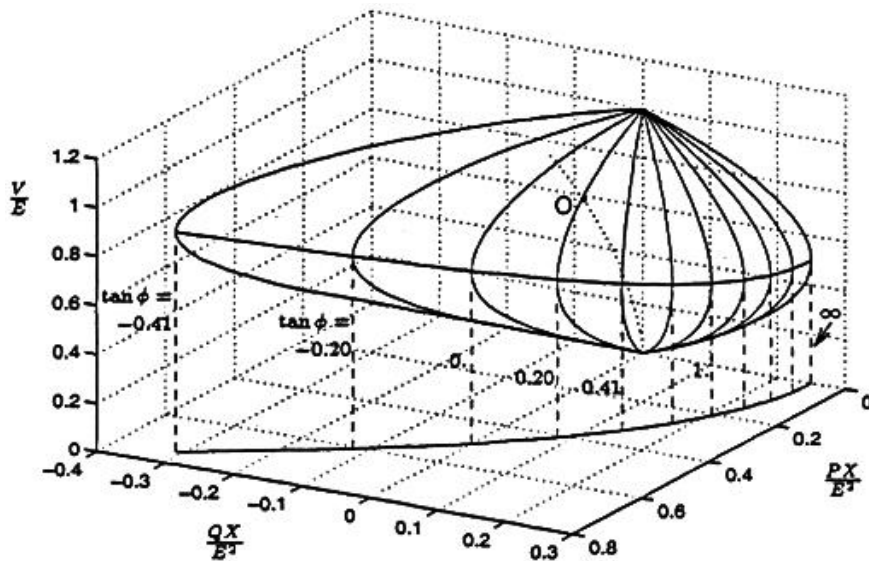
$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.5)$$

Για την ύπαρξη λύσης της εξίσωσης (1.8) πρέπει η διακρίνουσα να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.6)$$

Εφόσον η ανίσωση (1.6) ικανοποιείται, οι λύσεις της εξίσωσης (1.5) δίνονται από τον τύπο:

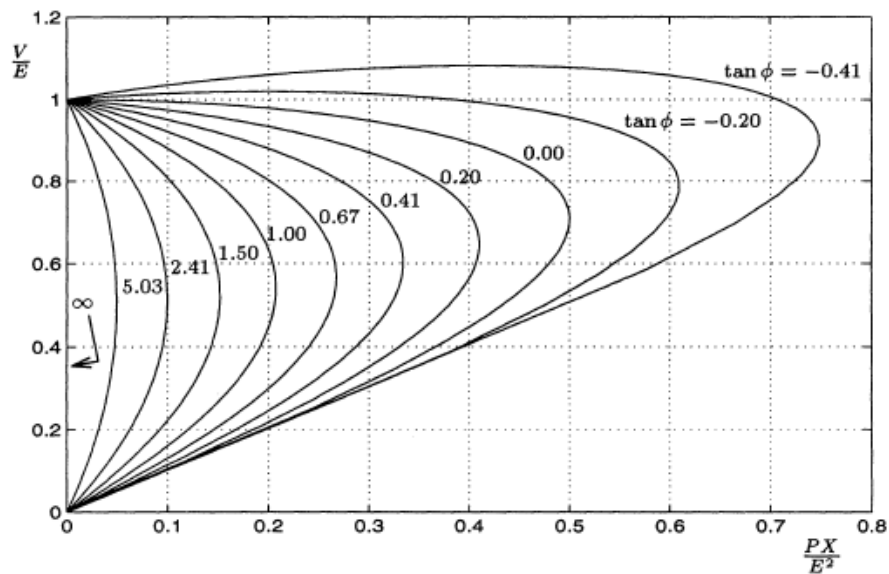
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XE^2 Q} \quad (1.7)$$



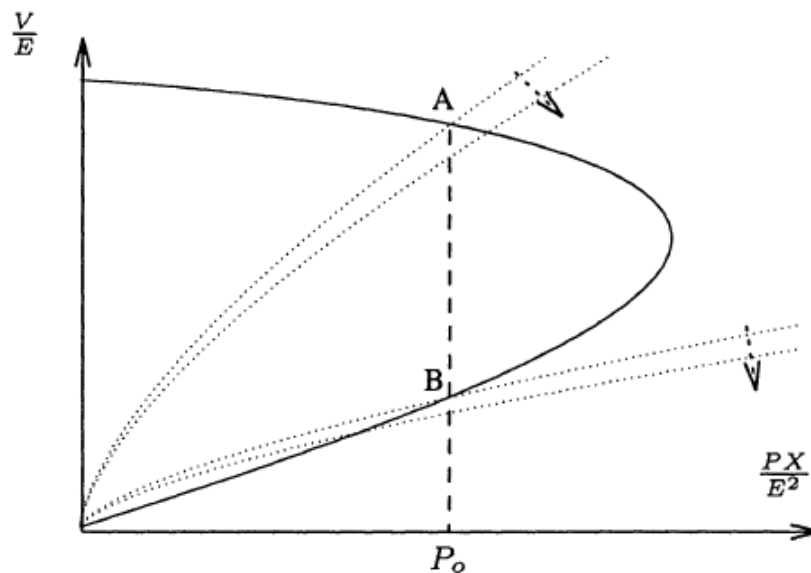
Σχήμα 1.12 Τάση Συναρτήσεως Ενέργων και Άεργων Φορτίων

Στον τρισδιάστατο χώρο (P, Q, V) , η εξίσωση (1.7) ορίζει την επιφάνεια δύο διαστάσεων που φαίνεται στο Σχήμα 1.12. Το πάνω μέρος της επιφάνειας αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «+» στην εξίσωση (1.7), ή αλλιώς στη λύση υψηλής τάσης, ενώ το κάτω μέρος αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «-» στην εξίσωση (1.7), ή αλλιώς στη λύση χαμηλής τάσης. Ο «σημερινός» της επιφάνειας, όπου οι δύο λύσεις είναι ίδιες, αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Οι «μεσημβρινοί» στο Σχήμα 1.12 αντιστοιχούν σε τομές της επιφάνειας με κατακόρυφο επίπεδο $Q = P \tan \phi$, με το ϕ να μεταβάλλεται μεταξύ $-\pi/8$ και $\pi/2$ με βήμα $\pi/16$. Η προβολή αυτών των μεσημβρινών στο επίπεδο P, V μας δίνει καμπύλες της τάσης V συναρτήσεως της ενεργού ισχύος P , με μεταβλητό συντελεστή ισχύος. Οι καμπύλες αυτές, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1.13, ονομάζονται *καμπύλες ισχύος-τάσης* (καμπύλες PV) και παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση και την ανάλυση της αστάθειας τάσης.



Σχήμα 1.13 Καμπύλες PV



Σχήμα 1.14 Καμπύλη PV

Από τις παραπάνω καμπύλες εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για δεδομένη ενεργό ισχύ του φορτίου υπάρχουν δύο λύσεις: μια με υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα. Η πρώτη αντιστοιχεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με τη τάση V σε πιο κοντινές τιμές με την τάση της γεννήτριας E . Η δεύτερη δεν είναι αποδεκτή για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, διότι αντιστοιχεί σε ασταθές σημείο λειτουργίας. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό από το Σχήμα 1.14. Στο σχήμα αυτό, οι διακεκομμένες καμπύλες είναι καμπύλες ζήτησης ενεργού ισχύος του φορτίου συναρτήσει της τάσης. Τα σημεία A και B αποτελούν δύο σημεία λειτουργίας τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ P_0 , αλλά από

διαφορετική ζήτηση. Θεωρείται μια μικρή αύξηση της ζήτησης του φορτίου. Στην περίπτωση που το σύστημα βρίσκεται στο σημείο A, η αυξημένη ζήτηση προκαλεί μια πτώση τάσης και οδηγεί σε υψηλότερη καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Εμφανίζει δηλαδή, την αναμενόμενη απόκριση της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σημείο B, παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη ζήτηση συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου. Αν λοιπόν υποθεθεί ότι υπάρχει ένας μηχανισμός που τείνει να αυξήσει την ισχύ του φορτίου προκειμένου να επιτύχει μια συγκεκριμένη κατανάλωση, το σημείο B καθίσταται ασταθές.

- Όσο αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου (που αντιστοιχεί σε μικρότερα $\tan\varphi$), αυξάνεται και η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Ταυτόχρονα, όμως, αυξάνεται και η τιμή της τάσης, στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο. Αυτό είναι επικίνδυνο από την άποψη ότι, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς επιτυγχάνεται σε υψηλές τιμές τάσης και κοντά στην ονομαστική, δυσκολεύοντας έτσι την ανίχνευση της αστάθειας τάσης.
- Για υπέρ-αντισταθμισμένα φορτία ($\tan\varphi < 0$), ένα τμήμα της καμπύλης PV δείχνει ότι η τάση αυξάνει με την αύξηση της ισχύος φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι υπό αρνητικό $\tan\varphi$, όσο αυξάνεται η κατανάλωση της ενεργού ισχύος, τόσο αυξάνεται η παραγωγή αέργου ισχύος. Επομένως σε συνθήκες χαμηλής ισχύος φορτίου, η μείωση της τάσης που προκαλείται από την κατανάλωση της ενεργού ισχύος αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη παραγωγή της αέργου. Όσο πιο αρνητικό το $\tan\varphi$, τόσο μεγαλύτερο και το τμήμα της PV καμπύλης που συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο.

Αν θεωρηθεί ότι το φορτίο συμπεριφέρεται ως σύνθετη αγωγιμότητα και ότι μεταβάλλεται με σταθερό συντελεστή ισχύος ($\cos\varphi = \text{σταθ}$), η αποδιδόμενη ενεργός ισχύς στο φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$P = P_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan\varphi)^2} \quad (1.8)$$

όπου $Z_l = R_l + jX_l = R_l(1 + j\tan\varphi)$ είναι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Για το υπολογισμό της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύος θα πρέπει να βρεθεί το ακρότατο της (1.8), από την ακόλουθη αναγκαία συνθήκη:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (1.9)$$

Οπότε η παράγωγος της (1.9) ως προς R_l και αντικαθιστώντας στην αναγκαία συνθήκη ακρότατου προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$(R^2 + X^2) - R_l^2(1 + \tan^2 \varphi) = 0 \Rightarrow (R^2 + X^2) = R_l^2(1 + \tan^2 \varphi) \quad (1.10)$$

η οποία είναι ισοδύναμη με :

$$|Z_l| = |Z| \quad (1.11)$$

ενώ η δεύτερη παράγωγος της (1.8) είναι

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 R_l^2} = -2 R_l (1 + \tan^2 \varphi) \quad (1.12)$$

Η οποία είναι πάντα αρνητική για επαγωγικό συντελεστή ισχύος υποδεικνύοντας ότι το ακρότατο που υπολογίστηκε προηγουμένως αντιστοιχεί σε μέγιστο.

Διατυπώνεται λοιπόν το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (με σταθερό συντελεστή ισχύος) που διακινείται σε μία γραμμή μεταφοράς:

Για σταθερό συντελεστή ισχύος, η ισχύς του φορτίου μεγιστοποιείται όταν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου γίνει ίση με τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου και $R=0$, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς προκύπτει με την αντικατάσταση της συνθήκης μεγίστου (1.11) στη σχέση (1.18):

$$P_{max} = \frac{E^2}{4X} \quad (1.13)$$

Η σχέση (1.13) δίνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου στο απλό ακτινικό δίκτυο στο Σχήμα 1.11.

1.5 Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

και Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

1.5.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ

Ένα συνεχές σύστημα το οποίο εμφανίζει δυναμική συμπεριφορά, μπορεί να αναλυθεί με ένα σύνολο N διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες συνήθως γράφονται στη μορφή:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.14)$$

όπου x είναι το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και κάθε f_i ($i=1, \dots, N$) είναι μια συνεχής μη γραμμική συνάρτηση όλων των x_i . Η χρονική απόκριση ενός φυσικού συστήματος συνδέεται με μία λύση της συνήθους διαφορικής εξίσωσης (1.14) για μια αρχική συνθήκη, η οποία δίνει το διάνυσμα κατάστασης τη χρονική στιγμή $t=0$:

$$x(0) = x_0 \quad (1.15)$$

Η αρχική συνθήκη (1.15) και η διαφορική εξίσωση (1.14) συνιστούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών. Είναι αναμενόμενο ότι για κάθε αρχική συνθήκη υπάρχει μία λύση του μη γραμμικού συστήματος (1.14). Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτός ο ισχυρισμός είναι σωστός, περιγράφονται στο θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης [9].

Ένα γενικό δυναμικό μοντέλο της μορφής που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται παρακάτω. Το μοντέλο περιγράφεται σε συμπυκνωμένη, διανυσματική μορφή, με πορεία από πιο τα γρήγορα προς τα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα.

1. *Ακαριαία απόκριση (Δίκτυο)*. Τα μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, είναι πολύ γρήγορα συγκριτικά με το χρονικό διάστημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον στις μελέτες ευστάθειας τάσης. Επομένως, θεωρούνται πρακτικά ακαριαία μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής ή αλλαγής στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Έτσι, για την παράσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υποτίθεται ακαριαία απόκριση και το δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων:

$$0 = g(x, y, z_c, z_d) \quad (1.16)$$

όπου g είναι m ομαλές συναρτήσεις και y το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών. Τα διανύσματα g και y έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Τα διανύσματα x , z_c και z_d διευκρινίζονται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι στις εξισώσεις (1.16) συμπεριλαμβάνονται οι εξισώσεις των μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος.

2. *Βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα*. Η βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των σύγχρονων γεννητριών και των ρυθμιστών τους, των επαγωγικών κινητήρων και των συνδέσμων συνεχούς ρεύματος. Τα δυναμικά φαινόμενα μετά από μια διαταραχή σ' αυτή την κλίμακα διαρκούν συνήθως από ένα έως μερικά δευτερόλεπτα και συχνά αναφέρονται ως βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα. Τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα περιγράφονται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d) \quad (1.17)$$

όπου f είναι n ομαλές συναρτήσεις και x το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

3. *Μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα*. Η μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των φαινομένων, των ρυθμιστών και των διατάξεων προστασίας που δρουν συνήθως από μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής. Οι σχετικοί μηχανισμοί σχεδιάζεται να δρουν μετά από την απόσβεση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, για την αποφυγή περιττών δράσεων ή ασταθών αλληλεπιδράσεων με τα δυναμικά φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας. Μερικά παραδείγματα μηχανισμών που

περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα ΣΑΤΥΦ, η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, η ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω διατάξεις αποτελούνται από συνεχείς διαφορικές εξισώσεις μεγάλης χρονικής σταθεράς και από διακριτές εξισώσεις διαφορών, και έχουν την μορφή:

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.18)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (1.19)$$

όπου $\mathbf{z}_c$ και $\mathbf{z}_d$ είναι τα διανύσματα κατάστασης για τα συνεχή και τα διακριτά μακροπρόθεσμα φαινόμενα αντίστοιχα. Το k εκφράζει τη χρονική στιγμή $t_k = k\Delta T$, όπου ΔT η περίοδος λειτουργίας του διακριτού συστήματος.

Το σύνολο των εξισώσεων (1.17)-(1.20) συνθέτει το πλήρες δυναμικό μοντέλο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.5.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού των μηχανισμών αστάθειας τάσης αποτελεί η χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα. Με βάση αυτό το κριτήριο, η αστάθεια τάσης χωρίζεται σε *βραχυπρόθεσμη* και *μακροπρόθεσμη* [6].

1.5.2.1 Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα των φορτίων να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν έπειτα από μια διαταραχή. Στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, η συμπεριφορά αυτή εξελίσσεται εντός λίγων δευτερολέπτων, μια διάρκεια η οποία ταυτίζεται με το χρονικό διάστημα που εμφανίζεται το φαινόμενο της αστάθειας γωνίας στις σύγχρονες γεννήτριες. Στο διάστημα αυτό εξελίσσονται και φαινόμενα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που αφορούν κυρίως τις γρήγορες προσπάθειες αποκατάστασης φορτίου από κινητήρες επαγωγής και λιγότερο συχνά συνδέσμους υψηλής τάσης-συνεχούς ρεύματος (HVDC links). Η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι επίσης γνωστή ως *μεταβατική κατάρρευση τάσης* [8].

Οι μηχανές επαγωγής παίζουν σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα για τους εξής κυρίως λόγους:

- Είναι φορτία με μικρή αδράνεια και γρήγορη επαναφορά (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Είτε λειτουργούν ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες, καταναλώνουν άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Γι' αυτό λοιπόν, η εγκατάσταση ασύγχρονων μηχανών στο δίκτυο συνοδεύεται συνήθως από κατάλληλες διατάξεις αέργου αντιστάθμισης.

- Κινδυνεύουν να παρουσιάσουν αστάθεια με τη μορφή επιβράδυνσης (λειτουργία κινητήρα) ή υπερεπιτάχυνσης (λειτουργία γεννήτριας), όταν η τερματική τους τάση είναι χαμηλή ή η μηχανική τους ροπή αρκετά μεγάλη.

Για παράδειγμα στα καινούργια Αιολικά Πάρκα εγκαθίστανται συνήθως ανεμογεννήτριες επαγωγής μεταβλητών στροφών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τερματικής τάσης και επομένως της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος, μέσω κατάλληλων μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος. Πολλά Αιολικά Πάρκα, χρησιμοποιούσαν παλαιότερα γεννήτριες σταθερών στροφών. Οι τελευταίες, από πλευράς ευστάθειας τάσης, εμφανίζουν την ίδια σχεδόν συμπεριφορά με τους κινητήρες επαγωγής. Η διαφορά έγκειται στην επιτάχυνσή τους (αντί για επιβράδυνση), σε περίπτωση απώλειας σημείου ισορροπίας. Επιπλέον, εάν μία ασύγχρονη μηχανή οδηγηθεί σε αστάθεια ενώ παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο, μπορεί να συμπαρασύρει σε αστάθεια και γειτονικές μηχανές, με αποτέλεσμα τη μερική ή ολική κατάρρευση του συστήματος.

Το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ένα σύγχρονο ζήτημα, το οποίο αναμένεται να πάρει ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις λόγω:

- Της αυξημένης χρήσης κινητήρων επαγωγής, οι οποίοι εξοπλίζουν ευρέως τα συστήματα ψύξης και κλιματισμού.
- Της διεύδυσης φορτίων, των οποίων η κατανάλωση είναι ανεξάρτητη της τάσης και ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος.
- Της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.
- Της αυξημένης χρήσης γραμμών συνεχούς ρεύματος (DC) στο επίπεδο Υψηλής Τάσης (HVDC).
- Της εντατικότερης χρήσης των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς.

1.5.2.2 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Έπειτα από μια διαταραχή, θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, όταν τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν αποσβεσθεί, όταν δηλαδή στην εξίσωση (1.17) ισχύει:

$$f(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.20)$$

Μετά τη βραχυπρόθεσμη ισορροπία, οι μακροπρόθεσμες αργές δυναμικές, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.18) και (1.19), καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος. Οι γρήγορες δυναμικές συνιστώσες του συστήματος θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται ευσταθώς στις αλλαγές των μακροπρόθεσμων και επομένως, οι εξισώσεις (1.17) μπορούν να αντικατασταθούν από αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας (1.20). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η λογική πίσω από την οιονεί στατική προσέγγιση στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που εμφανίζονται από την εξέλιξη των παραπάνω αργών δυναμικών φαινομένων μπορεί να οδηγήσουν στην μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης [9]. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αυτού του είδους αστάθειας τάσης παίζουν τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, τα οποία με τις ρυθμιστικές τους λειτουργίες επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος.

1.6 Οιονεί Στατική Προσέγγιση

Η μελέτη των ΣΗΕ, από πλευράς αστάθειας τάσης, γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, κυρίως λόγω των σημαντικών προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσει. Οι αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις (1.16)-(1.19) αποτελούν ένα εργαλείο αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ και η επίλυση τους δίνει τη δυνατότητα μιας λεπτομερούς ανάλυσης των μηχανισμών αστάθειας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παρά τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής δύναμης που μπορεί να προσφέρει σήμερα η τεχνολογία, για ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται κάποια απλοποίηση, προκειμένου να αναλυθεί το σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Αυτή η ανάγκη για μια πιο απλοποιημένη και γρήγορη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων (1.16)-(1.19), οδήγησε στο διαχωρισμό τους σε δύο συστήματα ελαττωμένης τάξης και πολυπλοκότητας, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται. Τα δύο αυτά υποσυστήματα προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής των οιονεί στατικών μεταβολών [6] και είναι το *βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα* και το *οιονεί στατικό σύστημα* στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Κατά την ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι τα αργά δυναμικά φαινόμενα, λόγω του αργού ρυθμού εξέλιξής τους, μπορούν να θεωρηθούν σταθερά, όσο τα γρήγορα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές z_c και z_d των εξισώσεων (1.16) και (1.17) θεωρούνται σταθερές και επομένως λαμβάνεται το απλοποιημένο βραχυπρόθεσμο μοντέλο:

$$0 = g(x, y, z_c, z_d) \quad (1.21)$$

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d) \quad (1.22)$$

Από την άλλη, το οιονεί στατικό σύστημα χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Εφόσον το ενδιαφέρον στρέφεται στα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται με αργό ρυθμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν ήδη φτάσει σε ισορροπία. Αντικαθιστώντας, επομένως, τις διαφορικές εξισώσεις (1.14) με αντίστοιχες αλγεβρικές συνθήκες ισορροπίας, προκύπτει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης:

$$g(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.23)$$

$$f(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.24)$$

$$\dot{z}_c = h_c(x, y, z_c, z_d) \quad (1.25)$$

$$z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k)) \quad (1.26)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι πιο συχνή από την βραχυπρόθεσμη, ορισμένα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης επιλέγουν αποκλειστικά το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης για την επίλυση των

εξισώσεων. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ο μειωμένος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης που προσφέρει, καθιστώντας έτσι δυνατή και την εκτίμηση ασφάλειας συστήματος πραγματικού χρόνου, που είναι πολύ σημαντική. Στην παρούσα εργασία μάλιστα, το οιονεί στατικό σύστημα αποτελεί την οιονεί στατική προσομοίωση που έχει υλοποιηθεί.

1.7 Πρόγραμμα WPSTAB για την μακροπρόθεσμη ανάλυση ευστάθειας

1.7.1 Προσδιορισμός σημείων ισορροπίας

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (1.23) και (1.24), οι εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων αντικαθιστούν τις εξισώσεις ροής φορτίου με ένα διευρυμένο σύστημα εξισώσεων. Η επίλυση των εξισώσεων (1.23)-(1.24) στο WPSTAB γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson [9].

Ένα σημείο ισορροπίας προκύπτει επιλύοντας επαναληπτικά μια ακολουθία γραμμικών συστημάτων της μορφής:

$$J_R \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(j+1)} - \mathbf{x}^{(j)} \\ \mathbf{y}^{(j+1)} - \mathbf{y}^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^{(j)} \\ g^{(j)} \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Από τις εξισώσεις (1.23),(1.24) για δεδομένα $\mathbf{z}_c$ και $\mathbf{z}_d$, το διάνυσμα $\mathbf{x}$ των μεταβλητών κατάστασης στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, αποτελείται από τις γωνίες δρομέα των σύγχρονων γεννητριών, ενώ το διάνυσμα $\mathbf{y}$ των αλγεβρικών μεταβλητών αποτελείται από τα μέτρα $\mathbf{V}$, τις φασικές γωνίες $\boldsymbol{\theta}$ των τάσεων των ζυγών του συστήματος καθώς και τη συχνότητα του συστήματος, J_R είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας και g και f οι εξισώσεις ισορροπίας που αντιστοιχούν στην ενεργό ισχύ, την άεργο ισχύ, την ενεργό ισχύ των γεννητριών και των κινητήρων και το γενικό ισοζύγιο ισχύος του συστήματος. Με τον δείκτη j συμβολίζονται οι τιμές των μεταβλητών και των συναρτήσεων στην j -ανακύκλωση. Το γραμμικό σύστημα (1.30) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα J_R , η οποία πραγματοποιείται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss.

Η επίλυση στο WPSTAB γίνεται χρησιμοποιώντας την τεχνική των αραιών πινάκων, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του J_R είναι ο πίνακας της ροής φορτίου (1.23), ο οποίος είναι εξαιρετικά αραιός.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών προέρχονται είτε από επίλυση του προβλήματος αρχικών συνθηκών, είτε από τις προηγούμενες τιμές των αργών μεταβλητών κατάστασης $\mathbf{z}_c$, $\mathbf{z}_d$ κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι αρχικές τιμές θα προκύπτουν από τη λύση της ροής φορτίου (1.23) στο πρόγραμμα

προσομοίωσης Power World Simulator. Οι αργές μεταβλητές κατάστασης του συστήματος παραμένουν σταθερές κατά την επίλυση των βραχυπρόθεσμων εξισώσεων ισορροπίας.

1.7.2 Προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα

Το πρόγραμμα WPSTAB χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (από μερικά λεπτά της ώρας έως μερικές ώρες), εστιάζοντας στην ακριβή παράσταση των μηχανισμών και διατάξεων του συστήματος που προκαλούν το πρόβλημα της αστάθειας τάσης. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο οιονεί στατικών μεταβολών για να παραστήσει τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα με τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας. Τα αργά μεταβατικά φαινόμενα από την άλλη, παριστάνονται συνήθως με εξισώσεις διαφορών.

Η διαδικασία προσομοίωσης έχει ως εξής: Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ολοκληρώνονται οι διαφορικές εξισώσεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ παράλληλα ανανεώνονται τα δεδομένα του συστήματος κάθε φορά που συμβαίνει μια αλλαγή σε διακριτές μεταβλητές ή σε παραμέτρους του συστήματος. Εάν δεν υπάρχουν μακροπρόθεσμες διαφορικές εξισώσεις (1.28), η επίλυση απλοποιείται.

Η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (συνθήκες ισορροπίας (1.26) και αλγεβρικές εξισώσεις (1.27)) πραγματοποιείται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι διατάξεις του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα που παριστάνονται είναι τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο των μετασχηματιστών και οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης των στατών πυκνωτών.:

Το χρονικό βήμα Δt μετάβασης από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη επιλέγεται έτσι ώστε:

- όλες οι διακριτές μεταβάσεις, οι οποίες εκφράζονται με τις εξισώσεις διαφορών (1.29) να λαμβάνουν χώρα σε χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του Δt , ώστε να εξασφαλίζεται η χρονική ακρίβεια των μεταβάσεων.

- να είναι υποπολλαπλάσιο της μικρότερης σταθεράς χρόνου των διαφορικών εξισώσεων (1.28) για να εξασφαλίζει την ευστάθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης, στην περίπτωση που παριστάνονται μακροπρόθεσμες δυναμικές με διαφορικές εξισώσεις [9].

Η ανανέωση του Ιακωβιανού πίνακα J_R κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα πραγματοποιείται μόνο όταν:

- Αλλάζει η τοπολογία του δικτύου (άνοιγμα, κλείσιμο διακοπών).
- Η σύγκλιση δεν έχει επιτευχθεί στις προηγούμενες 5 ανακυκλώσεις.
- Συμβαίνει μεταβολή στο σύστημα.
- Συμβαίνει μεγάλη διαταραχή στις παραγωγές ή τα φορτία του συστήματος.

Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος, δεδομένου ότι η δυσκολότερη υπολογιστικά διαδικασία είναι η τριγωνική παραγοντοποίηση του J_R .

1.8 Πρόγραμμα *Power World Simulator*

Για την μελέτη των συστημάτων διανομής που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται επίσης το πρόγραμμα προσομοίωσης *Power World Simulator*. [10]

Το *Power World Simulator* είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα προσομοίωσης το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να εξετάζει συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής κυρίως αλλά και μέσης τάσης. Το πρόγραμμα διαθέτει τη δυνατότητα επίλυσης ροών φορτίου για συστήματα που έχουν έως και 250.000 ζυγούς. Ωστόσο, στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η δοκιμαστική δωρεάν έκδοση (*Demo Version*) με τη δυνατότητα εξέτασης 13 ζυγών.

Το λογισμικό προσομοίωσης *Power World Simulator* ασχολείται με την παράσταση του δικτύου στη μόνιμη κατάσταση και στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόγραμμα προσομοίωσης *Power World Simulator* χρησιμοποιείται μόνο για την επίλυση της ροής φορτίου του συστήματος διανομής για διάφορα στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε ορισμένες ώρες της ημέρας.

Η επίλυση του προβλήματος της ροής φορτίου στο *Power World Simulator* πραγματοποιείται με τον εξής τρόπο:

Το πρόβλημα ροής ισχύος εμπεριέχει ένα σύστημα με μη γραμμικές εξισώσεις. Για τη λύση ενός μη γραμμικού συστήματος απαιτείται η χρήση ενός επαναληπτικού αλγορίθμου σύγκλισης. Το *Power World Simulator* δίνει τη δυνατότητα χρήσης επαναληπτικών μεθόδων υπολογισμού. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton – Raphson η οποία υλοποιείται με τους εξής τρεις επαναληπτικούς βρόχους :

- Εσωτερικός Βρόχος : Σε αυτό το βρόχο υπολογίζεται η μήτρα αγωγιμοτήτων και επιλύονται οι κλασσικές εξισώσεις ροής φορτίου με τη χρήση των πινάκων που δημιουργούνται.
- Μεσαίος Βρόχος: Εφόσον πραγματοποιηθεί ο εσωτερικός βρόχος, οι συσκευές ελέγχου πραγματοποιούν με την παρακάτω σειρά προτεραιότητας έλεγχο:
 1. Ορίων άεργης παραγωγής (MVar) των γεννητριών
 2. DC επίλυσης της γραμμής
 3. Των διακοπών των χωρητικοτήτων
 4. Του ΣΑΤΥΦ και των συσκευών D-FACTS ένα υπάρχουν
- Εξωτερικός Βρόχος : Στον εξωτερικό βρόχο ή αλλιώς MW Control Loop, η παραγωγή (και πιθανώς τα φορτία) οδηγείται στις τιμές που έχουν τεθεί. Όταν απαιτείται κάποια μεταβολή στον έλεγχο της ενεργού ισχύος (MW control), τότε υπολογίζονται εκ νέου οι δυο εσωτερικοί επαναληπτικοί βρόχοι.

Η μοναδική λύση του συστήματος υπολογίζεται όταν τελικά συγκλίνουν και οι 3 επαναληπτικοί βρόχοι.

1.9 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Η αυξημένη διείσδυση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής και η συνεισφορά που μπορούν να έχουν στη βελτίωση της ευστάθειας τάσης είναι ένα από τα βασικά εξεταζόμενα ζητήματα της παρούσας εργασίας ενώ, έχει μελετηθεί και από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται ως συνέχεια των [11], [12] και [12] οι οποίες εξετάζουν τα εξής ζητήματα:

Στην εργασία [11], εξετάζεται η ενδεχόμενη αύξηση του περιθωρίου ασφαλείας, όσων αφορά στο κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει μέσω της άεργης υποστήριξης του συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές. Η μελέτη γίνεται μέσω κατάλληλης προσομοίωσης ενός ασθενούς συστήματος, που διαθέτει τη δυνατότητα σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου μέσω γραμμής και υποσταθμού YT/MT. Εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια ελέγχου, αρχικά χωρίς τη σύνδεση διεσπαρμένης παραγωγής, στη συνέχεια με το αιολικό πάρκο συνδεδεμένο και συνεχή επιτήρηση της υψηλής τάσης και τέλος με χρήση της Εντολής Άεργης Υποστήριξης. Τέλος, εξετάζεται η συμπεριφορά των δυο αιολικών πάρκων σε συνεχή μεταβολή του φορτίου και αναλύεται η ευστάθεια του συστήματος, η οποία συνδέεται με τη δυναμική του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ που προστίθεται στο ζυγό σύνδεσης του φορτίου.

Στην εργασία [12] διερευνάται η επίδραση της μεταβλητότητας της ενεργού παραγωγής αιολικών πάρκων στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και κατά συνέπεια στο όριο ευστάθειας τάσης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θεωρώντας δύο ακραία σενάρια σταθερά χαμηλής και υψηλής ενεργού παραγωγής. Το σύστημα δοκιμών που εξετάζεται είναι το ίδιο με αυτό της εργασίας [] όπως και οι 3 τεχνικές ελέγχου του μετατροπέα. Για την προσομοίωση της επίδρασης που έχει η μεταβλητότητα του ανέμου στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος, θεωρούνται ως είσοδος στις ανεμογεννήτριες δυο συσχετισμένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου από την περιοχή της Πελοποννήσου. Όπως και στην εργασία [] εξετάζεται μια νέα μορφή ελέγχου (Εντολή Άεργης Υποστήριξης) η οποία τελικά αυξάνει το όριο φόρτισης του συστήματος κατά σημαντικό βαθμό. Τέλος, μελετήθηκε ένα σύστημα μεταφοράς στο οποίο συνδέονται ταυτόχρονα δυο αιολικά πάρκα εφαρμόζοντας την Εντολή Άεργης Υποστήριξης, γεγονός που οδήγησε εκ νέου σε σημαντική αύξηση του ορίου φόρτισης.

Στην εργασία [13] γίνεται στατιστική ανάλυση της επίδρασης που έχει η μεταβλητότητα της ενεργού παραγωγής αιολικών πάρκων στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και κατά συνέπεια στο όριο ευστάθειας τάσης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, μοντελοποιείται η παραγωγή

δυο αιολικών πάρκων κάνοντας χρήση στοχαστικών διαδικασιών Markov, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση του συστήματος. Έπειτα από διερεύνηση των διαφόρων παραμέτρων, επιλέγεται το καταλληλότερο μοντέλο για δοθείσες χρονοσειρές αιολικής παραγωγής, βάσει των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων που προέκυπτan στα μεγέθη της αυτοσυσχέτισης και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Από τις παραπάνω εργασίες αξιοποιούνται τόσο κομμάτια των συστημάτων δοκιμών που εξετάστηκαν (όπως η εξεταζόμενη γραμμή μεταφοράς), όσο και μορφές ελέγχου που μελετήθηκαν και θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως η Εντολή Άεργης Υποστήριξης.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διαμόρφωση και η εξέταση του αποκεντρωμένου ελέγχου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται σε κάποια σύστημα διανομής, ώστε να βελτιωθεί η ευστάθεια τάσης του συστήματος μεταφοράς. Παράλληλα, πραγματοποιείται και έλεγχος τάσης για το σύστημα διανομής.

Όπως και σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες, εξετάζεται η επίδραση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος μεταφοράς. Η διαφοροποίηση ωστόσο, έγκειται στο γεγονός ότι οι μονάδες ΔΠ δε συνδέονται μέσω αποκλειστικής γραμμής στο σύστημα μεταφοράς, αλλά εξετάζεται η σύνδεση μιας ολόκληρης γραμμής διανομής μέσης τάσης (MT) η οποία περιέχει τις φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής καθώς και φορτία που επηρεάζονται από την τάση.

Επειδή το συνολικό σύστημα περιέχει και το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής, η εξέταση του είναι πιο δύσκολη και πολύπλοκη. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται μια μεθοδολογία αποσύμπλεξης των δυο επιμέρους συστημάτων με σκοπό τη διευκόλυνση της εξέτασης.

Οπότε, εξετάζεται το σύστημα διανομής, με ημερήσιες καμπύλες παραγωγής και φορτίου για υψηλή διείσδυση από ΔΠ και γίνεται ρύθμιση της τάσης των ζυγών διανομής MT.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής:

Το 1ο Κεφάλαιο είναι εισαγωγικό σε θέματα που αφορούν στην οργάνωση και τη δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται μια αναφορά στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και συγκεκριμένα στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούν. Συνοψίζονται οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης, και ορίζεται το πρόβλημα της αστάθειας τάσης. Για καλύτερη κατανόηση, αναλύονται τα όρια Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε συνδυασμό με τις καμπύλες PV του δικτύου και των φορτίων. Παρουσιάζεται το δυναμικό μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τα προγράμματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία WPSTAB και Power World Simulator.

Στο 2ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μηχανισμοί ρύθμισης της αέργου ισχύος, αφού πρώτα εμφανίζεται η συμβολή της ΔΠ στη ρύθμιση της τάσης. Έπειτα, παρουσιάζεται η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ και μετά οι τρόποι λειτουργίας των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η λειτουργία των μετατροπέων με ρύθμιση σταθερού, μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, η χαρακτηριστική ρύθμισης $\cos\phi(P)$, η χαρακτηριστική $Q(V)$ και η ρύθμιση Σταθερής Τάσης.

Στο 3ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν στην εξέταση των δικτύων διανομής. Στη συνέχεια μελετώνται τυπικές γραμμές και δίκτυα διανομής που έχουν εξεταστεί στη βιβλιογραφία με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα βασικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν αλλά και την κατηγοριοποίηση τους.

Στο 4ο Κεφάλαιο αξιοποιείται η πληροφορία που προέκυψε από τη βιβλιογραφία για τη διαμόρφωση μιας δοκιμαστικής γραμμής διανομής μέσης τάσης. Εξετάζονται κάποια ακραία σενάρια παραγωγής – φορτίου και εφαρμόζεται μια ημερήσια καμπύλη παραγωγής και φορτίου για μια τυπική μέρα με τους μετατροπείς να λειτουργούν αρχικά με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Έπειτα, γίνεται ρύθμιση της τάσης του δικτύου διανομής για την αντιμετώπιση υπερτάσεων και πτώσεων τάσης που παρατηρούνται μέσα στη μέρα. Η ρύθμιση τάσης γίνεται με μεταβολή της τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, με χρήση της χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$ και χρήση της χαρακτηριστικής $Q(V)$. Αφού προκύψει το προφίλ τάσης των ζυγών για κάθε μέθοδο ρύθμισης γίνεται σύγκριση των μεθόδων.

Στο 5ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία αποκεντρωμένου ελέγχου του συστήματος διανομής από το ρυθμιστή του δικτύου διανομής για την αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος μεταφοράς. Αρχικά, παρουσιάζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης του συστήματος μεταφοράς για την εύρεση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για σταθερές εγχύσεις από τα επιμέρους συστήματα διανομής, ενώ στη συνέχεια υπολογίζονται οι ευαισθησίες του ορίου φόρτισης ως προς τις μεταβολές των εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος. Έπειτα, αναλύεται ξεχωριστά το σύστημα διανομής και υπολογίζονται οι ευαισθησίες των εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος ως προς τις μεταβολές της τάσης από τη λύση της ροής φορτίου του συστήματος διανομής στο πρόγραμμα Power World Simulator. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα αποφεύγεται η λύση προβλήματος βελτιστοποίησης. Ακολούθως, παρουσιάζεται το αποκεντρωμένο σήμα μεταβολής της τάσης που εφαρμόζεται στις μονάδες ΔΠ του συστήματος διανομής με σκοπό την ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ενδεικτικό σύστημα και μελετώνται 3 διαφορετικά σήματα για υποστήριξη έκτακτης ανάγκης για συγκεκριμένα στιγμιότυπα μέσα στη μέρα. Σήμα μετακίνησης της $Q(V)$ χαρακτηριστικής, μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ και συνδυασμός των 2 μεθόδων. Τέλος, γίνεται μια εκτίμηση της μεταβολής της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος μέσα στη μέρα για τις μεθόδους ρύθμισης της τάσης που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο 6ο Κεφάλαιο γίνεται η θεώρηση ότι οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος των Φ/Β μονάδων μπορούν και διατηρούν την τάση των ζυγών τους σταθερή. Για αυτό

τον τρόπο λειτουργίας των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος γίνεται ημερήσια εξέταση του προφίλ τάσης των ζυγών του συστήματος διανομής. Έπειτα εξηγείται και εφαρμόζεται στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB η εντολή υποστήριξης έκτακτης ανάγκης (EMRS) η οποία εξετάστηκε και σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες. Γίνεται χρονική προσομοίωση για τα ίδια χαρακτηριστικά στιγμιότυπα μέσα στη μέρα και υπολογισμός της ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς με αυτή τη μέθοδο η οποία συγκρίνεται τελικά με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο 7ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και οι προοπτικές για περαιτέρω μελέτη και βελτίωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

2

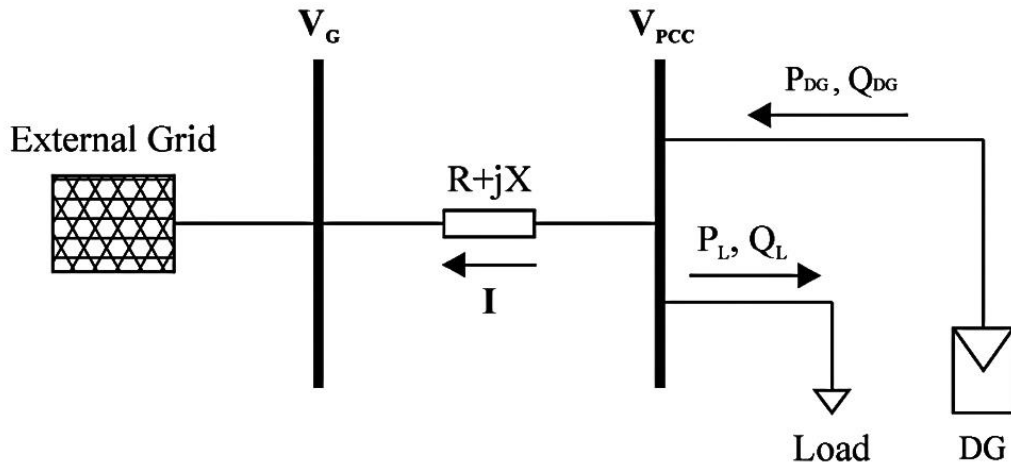
Μηχανισμοί Ρύθμισης Αέργου Ισχύος

2.1 Συμβολή της Διεσπαρμένης Παραγωγής στη Ρύθμιση Τάσης

Παραδοσιακά η ρύθμιση τάσης στα δίκτυα διανομής γίνεται με τη χρήση συσκευών όπως μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, πυκνωτές κ.α., με βασικό σκοπό την αντιμετώπιση της πτώσης τάσης που προκαλείται από τη ροή ισχύος στις γραμμές για την κάλυψη του φορτίου. Με την ενσωμάτωση πλήθους μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στη μέση τάση (MT) αλλά και στη χαμηλή τάση (XT), η παραγωγή από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί πλέον να καλύπτει σημαντικό μέρος του φορτίου ή ακόμα και να το ξεπερνάει προκαλώντας ανάστροφη ροή ισχύος και άρα ανύψωση τάσης. Έτσι, σε ορισμένες περιπτώσεις (όταν το φορτίο είναι χαμηλό και η παραγωγή από ΔΠ υψηλή) η τάση μπορεί να ξεπεράσει τα επίπεδα που ορίζουν τα πρότυπα (π.χ. το [14]).

Σε δίκτυο διανομής με μία κεντρική γραμμή, αν σε κάθε ζυγό η παραγωγή της ΔΠ είναι υψηλότερη από το φορτίο, η ανύψωση της τάσης γίνεται μεγαλύτερη όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον Μ/Σ και το μεγαλύτερο πρόβλημα παρουσιάζεται στο άκρο της γραμμής (κατ' αναλογία με την πτώση τάσης στα παραδοσιακά δίκτυα διανομής).

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται μια απλή γραμμή διανομής που περιέχει φορτίο και διεσπαρμένη παραγωγή και υπολογίζεται προσεγγιστικά η μεταβολή της τάσης που προκαλείται από την διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής.



Σχήμα 2.1 Μονάδα ΔΠ και φορτίο συνδέονται στο ανάντη δίκτυο μέσω γραμμής διανομής

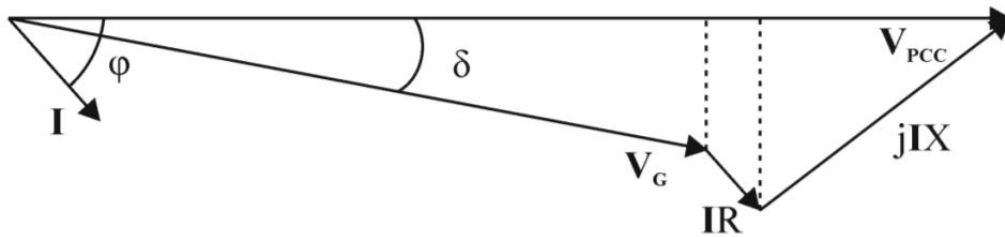
Η πτώση τάσης σε περίπτωση που φορτίο συνδέεται στο ανάντη δίκτυο (Σχήμα 2.1) μέσω γραμμής ωμικής αντίστασης R και επαγωγικής αντίδρασης X , δίνεται κατά προσέγγιση από την παρακάτω σχέση :

$$\Delta V \approx IR \cos \varphi + IX \sin \varphi \quad (2.1)$$

Μία απόδειξη της σχέσης με βάση το διανυσματικό διάγραμμα (Σχήμα 2.2) για περίπτωση ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διείσδυσης ΔΠ παρατίθεται παρακάτω :

$$\tilde{V}_{PCC} = \tilde{V}_G + \tilde{I}(R + jX) \quad (2.2)$$

Όπου V_G είναι η τάση του δικτύου και V_{PCC} η τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται το φορτίο (P_L, Q_L) και η μονάδα ΔΠ (P_{DG}, Q_{DG}).



Σχήμα 2.2 Διανυσματικό Διάγραμμα γραμμής διανομής Σχήματος 2.2

Για μικρή γωνία δ θεωρείται η προβολή της V_G στον οριζόντιο άξονα και η μεταβολή της τάσης υπολογίζεται προσεγγιστικά ως:

$$\Delta V \approx \frac{P_{PCC} \cdot R + Q_{PCC} \cdot X}{V_G} \quad (2.3)$$

Όπου P_{PCC} και Q_{PCC} είναι η συνολική ενεργός και άεργος ισχύς που ρέει από τον ζυγό. Άρα η σχέση τροποποιείται ως εξής:

$$\Delta V \approx \frac{(P_{DG} - P_L) \cdot R + (Q_{DG} - Q_L) \cdot X}{V_G} \quad (2.4)$$

Η ποσοστιαία μεταβολή της τάσης γίνεται:

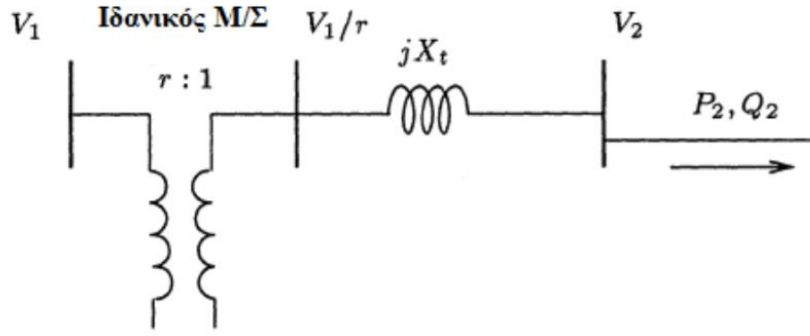
$$\varepsilon\% \approx \frac{\Delta V}{V_{PCC}} \cdot 100 \approx \frac{P_{PCC} \cdot R + Q_{PCC} \cdot X}{V_G^2} \cdot 100 \quad (2.5)$$

2.2 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διάφορα επίπεδα τάσης τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την βοήθεια μετασχηματιστών και αυτομετασχηματιστών ισχύος. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος υπερυψηλής τάσης/υψηλής τάσης ή υψηλής τάσης/μέσης τάσης είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς μεταβολής της σχέσης μετασχηματισμού χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή της λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η επαγόμενη ανά σπείρα τάση είναι σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και σε όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασυνδέσεως ή υποβιβασμού του δικτύου. Το Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός τους γίνεται αυτόματα. Συνήθως ο μηχανισμός αυτός είναι εγκατεστημένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, καθώς σε αυτήν την πλευρά κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές και υπάρχουν περισσότερες σπείρες, δημιουργώντας την δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης της τάσης. Οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ ελέγχουν συνήθως την τάση στη πλευρά διανομής. Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι αργοί, διακριτοί μηχανισμοί αποκατάστασης της τάσης, αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού τους κατά ένα βήμα τη φορά. Ένας σημαντικός περιορισμός στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ότι ο μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού έχει περιορισμένο εύρος τιμών:

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (2.6)$$

Τυπικές τιμές του κάτω ορίου είναι 0.8-0.9 α.μ και του άνω ορίου 1.1-1.2 α.μ. Το μέγεθος του βήματος κάθε φορά είναι συνήθως 0.5%-1.5%. Θεωρώντας ότι η αντίδραση μαγνητίσεως του μετασχηματιστή μπορεί να αμεληθεί, αγνοώντας τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων και θεωρώντας σταθερή αντίδραση σκεδάσεως X_t , το ισοδύναμο κύκλωμα του ΣΑΤΥΦ φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Υπάρχουν δύο μοντέλα για την αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ. Το ένα είναι το διακριτό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο ο λόγος μετασχηματισμού μεταβάλλεται ασυνεχώς και με ένα βήμα τη φορά. Το δεύτερο μοντέλο είναι το συνεχές, το οποίο είναι προσεγγιστικό σε σχέση με το διακριτό μοντέλο



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ

Στο διακριτό μοντέλο όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ, θεωρούμε ότι αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού ακαριαία κατά ένα βήμα μεγέθους Δr . Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε διακριτές τιμές χρόνου, έστω t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$, οι οποίες δίνονται από τον ακόλουθο επαναληπτικό τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (2.7)$$

Σημειώνεται ότι το t_k μπορεί να είναι ανεξάρτητη μεταβλητή και το ΔT_k δεν είναι απαραίτητα σταθερό, αφού μπορεί να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συσκευής και το σφάλμα της τάσης.

Η λογική με την οποία μεταβάλλεται ο λόγος του ΣΑΤΥΦ τις χρονικές στιγμές t_{k+1} , εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$\begin{aligned} r_{k+1} &= r_k + \Delta r, \text{ εάν } V_2 > V_{20} + \frac{d}{2} \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_{k+1} &= r_k - \Delta r, \text{ εάν } V_2 < V_{20} - \frac{d}{2} \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_{k+1} &= r_k, \text{ διαφορετικά} \end{aligned} \quad (2.8)$$

όπου V_{20} είναι η τάση αναφοράς του δευτερεύοντος και d το εύρος της νεκρής ζώνης της ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Θεωρείται ότι η λήψη για την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού βρίσκεται στο πρωτεύον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Η νεκρή ζώνη είναι μια περιοχή τιμών γύρω από την τάση αναφοράς. Όταν το σφάλμα της τάσης ξεπεράσει τα όρια της νεκρής ζώνης τότε το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το διακριτό μοντέλο μετασχηματιστή. Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αρχική καθυστέρηση T_{d1} και μετέπειτα χρονική καθυστέρηση T_{d2} . Η T_{d1} είναι συνήθως μεγαλύτερη, για αποφυγή λανθασμένων και περιττών αλλαγών στη λήψη κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων.

2.3 Τρόποι Λειτουργίας Μετατροπέων Ηλεκτρονικών Ισχύος

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να ελέγχουν ξεχωριστά την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχουν ή καταναλώνουν. Έτσι, μπορούν να ελέγχουν ρεύματα ή τάσεις προσαρμόζοντας κατάλληλα τη ροή ισχύος. Επειδή οι μετατροπείς στην πραγματικότητα συνθέτουν την κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος ή τάσεως, έχουν πολύ γρήγορη αντίδραση, και μπορούν να ρυθμίσουν τάση, ρεύμα ή ισχύ εντός μια περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος (20ms για σύστημα 50Hz). Στην εργασία αυτή θα θεωρηθεί ότι ο έλεγχος που ασκούν οι μετατροπείς είναι πρακτικά ακαριαίος και ότι περιλαμβάνεται στις αλγεβρικές εξισώσεις.

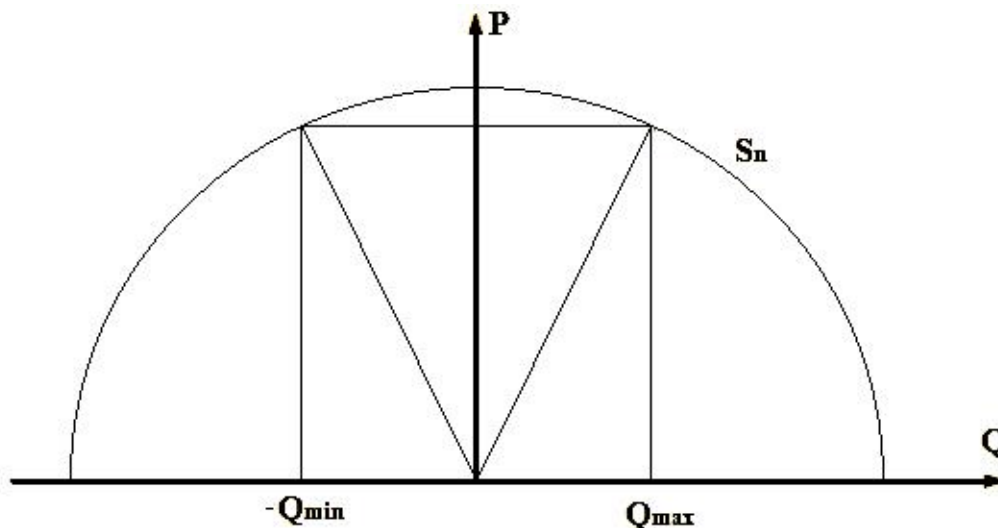
Οποσδήποτε, δεδομένου ότι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει συνεχές ρεύμα, η σύνδεσή της στο δίκτυο γίνεται πάντοτε μέσω μετατροπέα DC/AC (Εν. 1.3.2) και κατάλληλων διατάξεων ζεύξεων και προστασίας.

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος δεν έχουν δυνατότητα έστω χρονικά περιορισμένης υπερφόρτισης. Σε περίπτωση λοιπόν που ζητηθεί από το ρυθμιστή τάσεως/αέργου ισχύος τιμή ρεύματος μεγαλύτερη από την ονομαστική, αυτή περιορίζεται αυτόματα. Ο περιοριστής σε αυτή την εργασία υλοποιείται με μείωση της τάσης του μετατροπέα πηγής τάσης μέχρις ότου το ρεύμα επιστρέψει σε επιτρεπτή τιμή. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα τείνει να ξεπεράσει το επιτρεπόμενο όριο, ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας με σκοπό την μείωση του ρεύματος. Θεωρείται ότι η δράση του ελεγκτή ρεύματος γίνεται ακαριαία.

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος οφείλει να καλύπτει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ υπό ονομαστική τάση. Συνεπώς, θεωρώντας S_n ονομαστική φαινόμενη ισχύ και V_n ονομαστική τάση του μετατροπέα (στο ανά μονάδα σύστημα), το μέγιστο όριο του ρεύματος είναι:

$$I^{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (2.9)$$

Η μέγιστη άεργος παραγωγή ή απορρόφηση Q_{max} και Q_{min} καθορίζεται από την ικανότητα κάθε μονάδας που φαίνεται και στο διάγραμμα P-Q του Σχήματος 2.4. Ανάλογα με τη λειτουργία, ορίζεται η μέγιστη άεργος ισχύς που δύναται να παραχθεί από μια μονάδα σε σχέση πάντα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ εκείνη τη στιγμή. Στο σχήμα παρουσιάζονται τρία διαγράμματα που ορίζουν διαφορετικές λειτουργίες για τους μετατροπείς. Το τριγωνικό διάγραμμα δημιουργείται όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με σταθερό συντελεστή ισχύος. Το τετραγωνικό δίνει τη δυνατότητα μέγιστης αέργου ισχύος σε χαμηλές τιμές ενεργού ισχύος. Το ημικυκλικό διάγραμμα ικανότητας χρησιμοποιείται όταν οι μετατροπείς μπορούν να φτάνουν τη φαινόμενη ισχύ για πιθανές τιμές ενεργού και αέργου ισχύος. [15]



Σχήμα 2.4 P-Q διαγράμματα: Τριγωνικό, ορθογώνιο και ημικυκλικό νυχτερινής λειτουργίας

Η αξιοποίηση της ευελιξίας των ηλεκτρονικών ισχύος μέσω των οποίων συνδέεται συνήθως η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελεί πλέον μια από τις πρώτες επιλογές ρύθμισης της τάσης. Διάφορες μέθοδοι τοπικού ελέγχου έχουν προταθεί που υλοποιούνται στον αλγόριθμο ελέγχου του μετατροπέα των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του μετατροπέα μέσω του οποίου συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή, οι οποίοι εφαρμόζονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

2.3.1 Λειτουργία με Σταθερό Μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος ορίζει τη διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης στα AC συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Για συντελεστή ισχύος μοναδιαίο, η διαφορά φάσης είναι μηδενική με αποτέλεσμα να μην υπάρχει παραγωγή αέργου ισχύος. Αντίθετα, για συντελεστή ισχύος διάφορο του μηδενός ο μετατροπέας παράγει ή απορροφά άεργο ισχύ.

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος των Φ/Β συστημάτων δίνουν τη δυνατότητα διατήρησης σταθερού συντελεστή ισχύος, μεταβάλλοντας το μέτρο και τη γωνία της τάσης, ελέγχοντας τα ημιαγώγιμα στοιχεία του μετατροπέα βάση κάποιας τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Έτσι, μπορούν να διατηρούν σταθερό συντελεστή ισχύος, με αποτέλεσμα να είναι σταθερή η άεργος παραγωγή τους.

$$\cos\varphi = \sigma\alpha\theta = 1 \quad (2.10)$$

Όταν δεν επιβάλλεται κάποια ρύθμιση από το διαχειριστή του δικτύου, οι φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής λειτουργούν συνήθως με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ώστε να παράγουν τη μέγιστη ενεργό ισχύ (2.10).

Σε επόμενο κεφάλαιο, εξετάζεται η περίπτωση λειτουργίας μοναδιαίου συντελεστή ισχύος για τις φωτοβολταϊκές μονάδες και εξετάζεται το προφίλ της τάσης των ζυγών ενός δοκιμαστικού συστήματος διανομής για μηδενική άεργο παραγωγή ή απορρόφηση από τους μετατροπείς των φωτοβολταϊκών μονάδων.

2.3.2 Λειτουργία Χαρακτηριστικής Καμπύλης $\cos\phi(P)$

Με την υλοποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\cos\phi(P)$ η διεσπαρμένη παραγωγή απορροφά άεργο ισχύ όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός ισχύς, εφόσον τότε είναι πιθανότερη η ύπαρξη ανύψωσης τάσης. Πρόκειται οπότε, για ρύθμιση του μετατροπέα τέτοια ώστε να μεταβάλλει το συντελεστή ισχύος συναρτήσει της ενεργού παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα, όταν η ενεργός παραγωγή μιας μονάδας πάρει κάποια τιμή $P_{thres} = \frac{P}{P_n}$ τότε ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται γραμμικά, με σκοπό η μονάδα να απορροφά άεργο ισχύ ώστε να καταπολεμηθούν οι υπερτάσεις.

Ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος που φτάνει η μονάδα για ονομαστική ενεργό ισχύ καθορίζεται από τα πρότυπα που επιβάλλονται και εξαρτάται από το μέγεθος της εκάστοτε μονάδας αλλά και το επίπεδο τάσης στο οποίο βρίσκεται το δίκτυο.

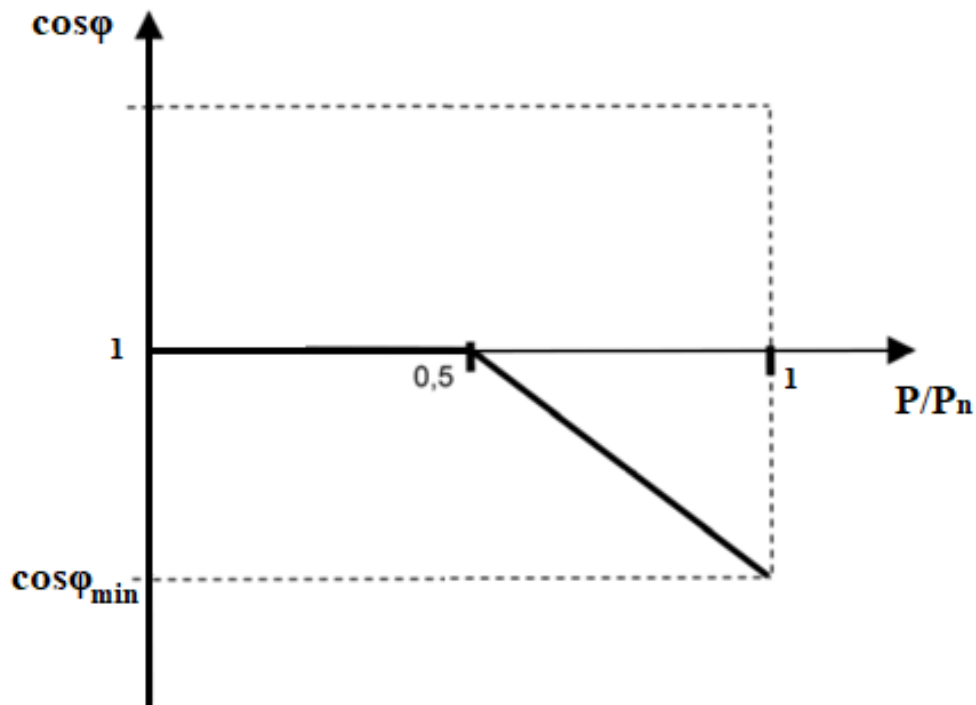
Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ η οποία έχει διαμορφωθεί με βάση τα πιο πρόσφατα πρότυπα [16] που ορίζουν τον ελάχιστο επιτρεπτό συντελεστή ισχύος.

Ως $\cos\phi_{min}$ ορίζεται ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος για τον οποίο ορίζεται η μέγιστη άεργος ισχύς Q_{max} :

$$Q_{max} = P_n \tan(\arccos\phi_{min}) \quad (2.11)$$

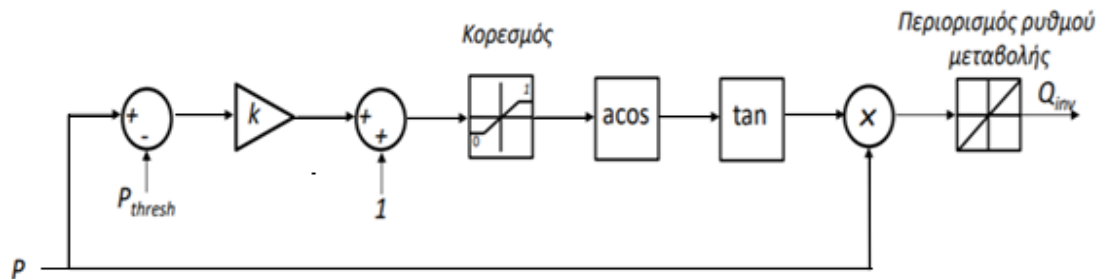
Η υλοποίηση της χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$ παριστάνεται στο Σχήμα 2.5, όπου η κλίση της καμπύλης θα ισούται με

$$k = \frac{1 - \cos\phi_{min}}{P_{thres} - P_n} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.5 $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική με βάση τα πρόσφατα πρότυπα

Όπου, P είναι η τρέχουσα ενεργός ισχύς του αντιστροφέα, P_{thres} η οριακή τιμή και εφαρμόζοντας περιορισμό μέγιστης τιμής προκύπτει το $\cos\phi$.



Σχήμα 2.6 Υλοποίηση της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής

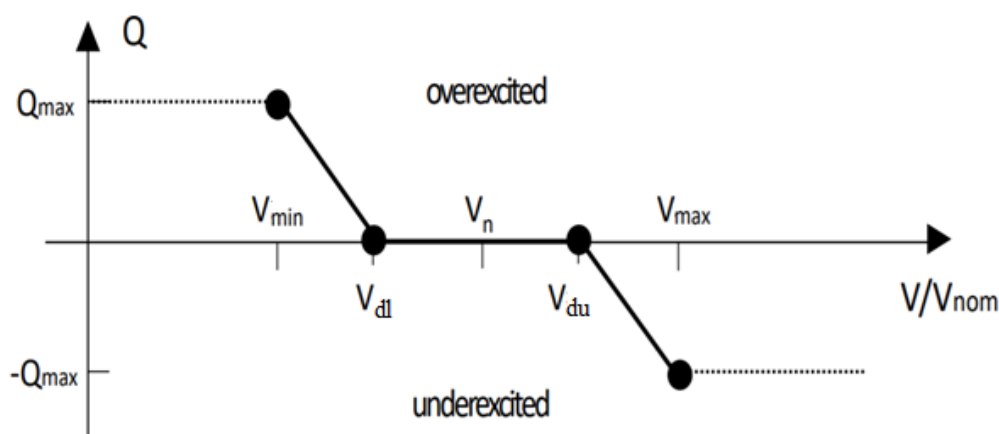
Στο Σχήμα 2.6 εξηγείται η υλοποίηση της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής, όπου η P συγκρίνεται με την τιμή P_{thres} . Στη συνέχεια εφαρμόζεται το κέρδος k ώστε να προκύψει το $\arccos(\cos\phi)$ και βάσει αυτού να υπολογιστεί η άεργος ισχύς που απορροφάται. Η χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ χρησιμοποιείται για αντιμετώπιση υπερτάσεων, οπότε το κέρδος είναι αρνητικό και η άεργος ισχύς που προκύπτει αποτελεί απορρόφηση.

2.3.3 Λειτουργία Χαρακτηριστικής Καμπύλης $Q(V)$

Με την υλοποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης $Q(V)$ η άεργος ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής εξαρτάται άμεσα από την τάση που μετρείται στους ακροδέκτες της.

Η καμπύλη εφαρμόζεται στους αντιστροφείς της διεσπαρμένης παραγωγής και ρυθμίζει την παραγωγή της αέργου ισχύος ορίζοντας μια νεκρή ζώνη τάσης για το σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ), μέσα στην οποία η ΔΠ λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος οπότε και δεν υπάρχει παραγωγή αέργου. Ωστόσο, αν η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης βγει εκτός της νεκρής ζώνης που έχει οριστεί, τότε η διεσπαρμένη παραγωγή καλείται να παράγει ή να απορροφήσει άεργο ισχύ, ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου.

Τόσο η νεκρή ζώνη τάσης, όσο και τα όρια της αέργου ισχύος, καθορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου και τα πρότυπα που ορίζονται και εξυπηρετούν το δίκτυο.



Σχήμα 2.7 Τυπική $Q(V)$ χαρακτηριστική

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται μια τυπική $Q(V)$ χαρακτηριστική στην οποία φαίνονται τα σημεία λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα σημειώνονται τα V_{dl} και V_{du} που ορίζουν τη νεκρή ζώνη μέσα στην οποία δεν υπάρχει ανταλλαγή αέργου ισχύος. Επίσης, τα σημεία V_{max} και V_{min} που ορίζουν την μέγιστη και ελάχιστη τάση αντίστοιχα για την οποία ισχύουν οι ράμπες (droops) ρύθμισης της αέργου ισχύος.

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η χρήση του ορθογώνιου διαγράμματος ικανότητας P-Q όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η υλοποίηση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής γίνεται με μια επαναληπτική διαδικασία που εξηγείται παρακάτω, καθώς όταν υπάρχουν περισσότεροι από ένας μετατροπέας με τέτοια ρύθμιση πρέπει να εξετάζεται και η αλληλεπίδραση τους. Για αυτό με λύση των ροών φορτίων του δικτύου γίνεται ρύθμιση επαναληπτικά, έως ότου συγκλίνουν όλες οι μονάδες στην παραπάνω καμπύλη.

2.3.4 Ρύθμιση Σταθερής Τάσης

Με τη βοήθεια του μετατροπέα πηγής τάσης (VSI) δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης σταθερής τάσης του ζυγού που συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή (στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται παραγωγή από φωτοβολταϊκά) μέσω της δράσης ενός ολοκληρωτικού ελεγκτή.

Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται ως εξίσωση ισορροπίας η σχέση:

$$V_{PV} = V_{ref} \quad (2.12)$$

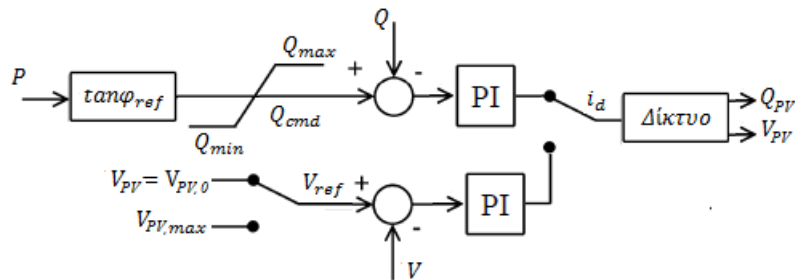
η οποία ικανοποιείται δεδομένου ότι ο ολοκληρωτικός ελεγκτής δεν αφήνει σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση.

Θεωρείται ότι ο ελεγκτής αέργου ισχύος έχει τη δυνατότητα να αυξάνει την τάση V_k του σημείου σύνδεσης της φωτοβολταϊκής μονάδας στο δίκτυο μέσης τάσης σε μια κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, όταν δηλαδή η υψηλή τάση V_H του υποσταθμού YT/MT πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο V_H^{lim} . Η συγκεκριμένη στρατηγική απαιτεί ένα διακριτό σήμα που ζητάει μέγιστη άεργο υποστήριξη από τη διεσπαρμένη παραγωγή. Μόλις το σήμα ληφθεί, η ελεγχόμενη τάση V_k αυξάνει στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή V_{max} . Εναλλακτικά, το σήμα μέγιστης άεργης υποστήριξης μπορεί να σταλεί από τον διαχειριστή του συστήματος, σε όποια χρονική στιγμή εκτιμηθεί ότι υπάρχει έκτακτη ανάγκη. Ας σημειωθεί ότι τίθεται μια χρονική καθυστέρηση 10s, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ενδεχόμενες ακαριαίες μεταβολές της V_{HV} (YT) που επανέρχονται αμέσως εντός των επιθυμητών ορίων, δεν ενεργοποιούν τον έλεγχο. Η λογική ελέγχου με την οποία προσαρμόζεται η τάση V_k , εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_k = V \quad , \text{εάν } V_H < V_H^{lim} \quad (2.13)$$

όπου

- V_H^{lim} : κάτω όριο ελέγχου της υψηλής τάσης V_{HV} για μέγιστη άεργο υποστήριξη.
- V_{max} : όριο μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης Φωτοβολταϊκής Μονάδας



Σχήμα 2.8 Ρυθμιστής Αέργου Ισχύος

Φυσικά, οι δυνατότητες του μετατροπέα για έλεγχο της αέργου ισχύος περιορίζονται από την ικανότητα φόρτισής του. Στην παρούσα εργασία, αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την πραγματική τεχνολογία των φωτοβολταϊκών μονάδων, θεωρείται ότι συνεισφέρουν έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος μέχρι την τιμή που επιτρέπουν τα ονομαστικά τους μεγέθη (μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα). Συνεπώς, σε περίπτωση

υπέρβασης του ορίου επιτρεπόμενου ρεύματος I^{lim} του μετατροπέα, μειώνεται ακαριαία η τάση V_{PV} , μέχρι να επιτευχθεί η επαναφορά του ρεύματος εντός των επιθυμητών ορίων ($I_{PV} < I^{lim}$). Προφανώς, από τη στιγμή που επενεργήσει ο περιοριστής ρεύματος, δεν είναι δυνατός ο έλεγχος τάσεως/αέργου ισχύος, οπότε ο ρυθμιστής αέργου ισχύος διατηρεί την τιμή του ρεύματος στο όριο.

3

Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Γραμμές Δοκιμών (Test Feeders)

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

3.1.1 Περιγραφή

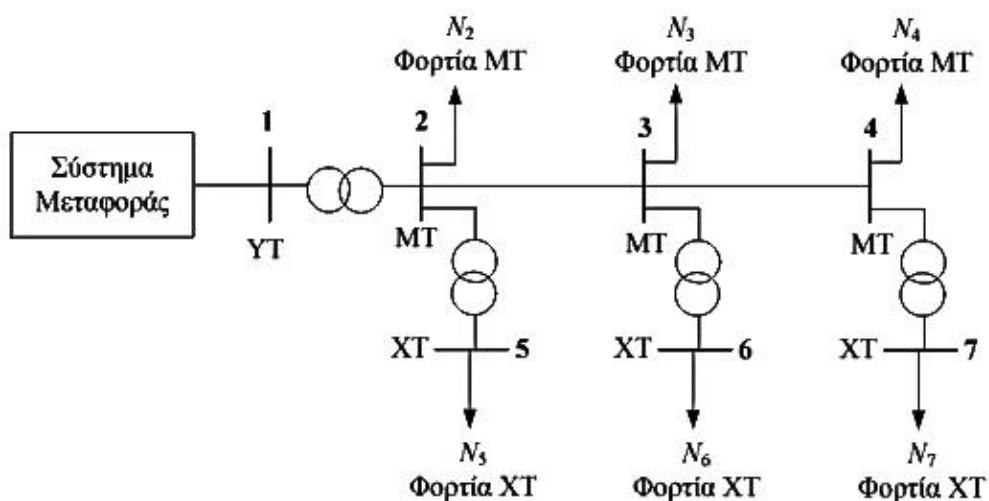
Το δίκτυο διανομής παραλαμβάνει την ηλεκτρική ισχύ που μεταφέρεται στις μείζονες περιοχές φορτίου μέσω του συστήματος μεταφοράς και τη διανέμει μέσα στην εξυπηρετούμενη περιοχή, φθάνοντας μέχρι τον τελευταίο καταναλωτή. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης (ΥΤ/ΜΤ). Στη συνέχεια, μέσω των γραμμών Μέσης Τάσης, τροφοδοτούνται οι πελάτες μέσης τάσης και οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ. Από τους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ, η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει τελικά στο σύνολο των καταναλωτών χαμηλής τάσης (ΧΤ) (Σχήμα 3.1).

Τα δίκτυα διανομής, ανάλογα με τον τύπο περιοχής που τροφοδοτούν, μπορούν να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια. Λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν μέχρι τώρα ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα διανομής να καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο εύρος τάσεων που καλύπτει από τη μέση τάση ως τη χαμηλή και οικιακή τάση. Για διευκόλυνση και κατηγοριοποίηση των δικτύων διανομής, χωρίζονται σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα όπου τα πρωτεύοντα δίκτυα απασχολούν κυρίως τη μέση τάση ενώ τα δευτερεύοντα τη χαμηλή. Σε αντίθεση με τα πρωτεύοντα δίκτυα διανομής, δεν υπάρχει μεγάλη βιβλιογραφία για τα δευτερεύοντα δίκτυα διανομής και την διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτά, ωστόσο παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διανεμημένων μονάδων παραγωγής που

εγκαθίστανται στη χαμηλή τάση με κύριες μονάδες αυτές των φωτοβολταϊκών στέγης.



Σχήμα 3.1 Απλό Δίκτυο Διανομής με πρωτεύον και δευτερεύον δίκτυο που τροφοδοτεί φορτία μέσης τάσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ)

Τα σύγχρονα δίκτυα διανομής είναι σχεδιασμένα να απορροφούν ισχύ από το ανάντη Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω των γραμμών μεταφοράς και να το διανέμουν στους καταναλωτές και η ροή τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος ρέει από την υψηλή στη χαμηλότερη τάση. Ωστόσο, με σημαντική διεύρυνση διεσπαρμένης παραγωγής, η ροή ισχύος μπορεί να αντιστραφεί και το δίκτυο διανομής από παθητικό κύκλωμα που παρέχει ισχύ στα φορτία, μετατρέπεται σε ενεργό δίκτυο με ροές ισχύος και τάσεις που θα καθορίζονται πλέον τόσο από την Διεσπαρμένη παραγωγή όσο και από τα φορτία. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει σημαντική αλλαγή στη φύση των δικτύων διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή.

Από την άλλη πλευρά, η συνεχής αύξηση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής μπορεί να επιφέρει κορεσμό στα δίκτυα διανομής. Για να αποφευχθούν τόσο τα προβλήματα που εισάγονται μαζί με τη Διεσπαρμένη Παραγωγή, όσο και για αυξηθεί η χωρητικότητα των δικτύων διανομής σε διεσπαρμένη παραγωγή, επιβάλλεται να γίνει συστηματική μελέτη των δικτύων διανομής.

Τα δίκτυα διανομής που πλέον θα περιλαμβάνουν νέες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής εξοπλισμένες με ηλεκτρονικά ισχύος και ρυθμιστές τάσης και συχνότητας, γίνονται ενεργά δίκτυα. Ως ενεργά δίκτυα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν τις δυναμικές αλλαγές που θα προκύπτουν τόσο από τη μεταβαλλόμενη ισχύ που θα εγχέεται από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, όσο και από τα φορτία τα οποία στις χαμηλότερες τάσεις είναι οικιακά και ούτως ή άλλως συνεχώς μεταβαλλόμενα.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν αρχικά κάποια βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν τα δίκτυα διανομής και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά τους. Μετέπειτα θα παρουσιαστούν κάποια χαρακτηριστικά δίκτυα δοκιμών (test feeders) που εμφανίζονται συχνά στη βιβλιογραφία για μελέτες δικτύων διανομής. Τα

εξεταζόμενα δίκτυα θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

3.1.2 Επίπεδα Τάσης

Τα δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης (MT) βρίσκονται σε τάσεις από 4kV έως και 35kV. Καθώς τα όρια δεν είναι απόλυτα ορισμένα, γραμμές διανομής υψηλής τάσης μπορεί να χαρακτηρίζονται και ως γραμμές υπομεταφοράς, καθώς μπορεί να τροφοδοτούν τόσο γραμμές διανομής, όσο και απευθείας φορτία.

Στην Ελλάδα τα δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης (MT) βρίσκονται κατά κύριο λόγο στα 20kV και αποτελούν εναέρια ή υπόγεια δίκτυα.

Το επίπεδο τάσης στο οποίο βρίσκεται το κάθε δίκτυο ενδιαφέρει καθώς εμφανίζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως [17]

Τα δίκτυα διανομής Υψηλής Τάσης (YT) παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα δίκτυα διανομής Μέσης και Χαμηλής Τάσης:

- Δυνατότητα μεταφοράς περισσότερης ισχύος για το ίδιο ρεύμα
- Μικρότερη πτώση τάσης για δεδομένη ροή ισχύος
- Μικρότερες απώλειες στις γραμμές για δεδομένη ροή ισχύος
- Μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερες περιοχές, λόγω της μικρότερης πτώσης τάσης και της ικανότητας μεταφοράς μεγαλύτερου ποσού ισχύος
- Απαιτούν μικρότερο αριθμό υποσταθμών

Ωστόσο, σε σχέση με τα δίκτυα διανομής Μέσης και Χαμηλής Τάσης τα οποία βρίσκονται σε χαμηλότερη σχετικά τάση παρουσιάζουν και τα εξής μειονεκτήματα:

- Υψηλότερο κόστος, καθώς ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες τάσεις είναι αρκετά πιο ακριβός, όπως οι μετασχηματιστές, οι γραμμές και τα καλώδια
- Μεγαλύτερη δυσκολία επιδιόρθωσης βλαβών για τους τεχνικούς, καθώς δουλεύουν σε πιο υψηλή τάση οπότε το προσωπικό απαιτείται να είναι ειδικά καταρτισμένο σε εργασίες στην υψηλή τάση
- Δεν μπορούν να τοποθετούνται εναέρια γραμμές Υψηλής Τάσης σε κατοικημένες περιοχές με αποτέλεσμα γίνονται υπόγεια γραμμές με μεγαλύτερο συνολικό κόστος

3.1.3 Επαγωγική/Ωμική Συμπεριφορά Γραμμών Διανομής

Στο ελληνικό δίκτυο, από το μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ (150kV/20kV) του Υποσταθμού Διανομής αναχωρούν διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20kV) που η καθεμία αφορά στη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος σε μια ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται γραμμές κορμού και κατασκευάζονται με αγωγούς μεγάλης διατομής, συνήθως 95mm² ισοδύναμου χαλκού στα εναέρια δίκτυα. [18]

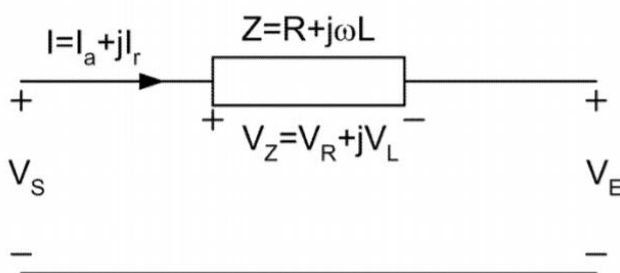
Οι γραμμές κορμού διακλαδίζονται σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς μέσης σε χαμηλή τάση (20kV/400V) δηλαδή στο οικιακό επίπεδο ΧΤ 230V φασική. Η παροχή χαμηλής τάσης σε πελάτες ΧΤ γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης από γυμνούς εναέριους αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης του υποσταθμού. [19]

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ο λόγος μεταξύ της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών X και της ωμικής αντίστασης R . Η αναλογία αυτή X/R στα δίκτυα διανομής είναι σχετικά μικρή καθώς η αντίδραση X είναι μικρότερη όσο γίνονται χαμηλότερα τα επίπεδα της τάσης. Τυπικά, στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης η αναλογία X/R είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας για εναέριες γραμμές και λίγο μικρότερη της μονάδας για καλώδια μέσης τάσης.

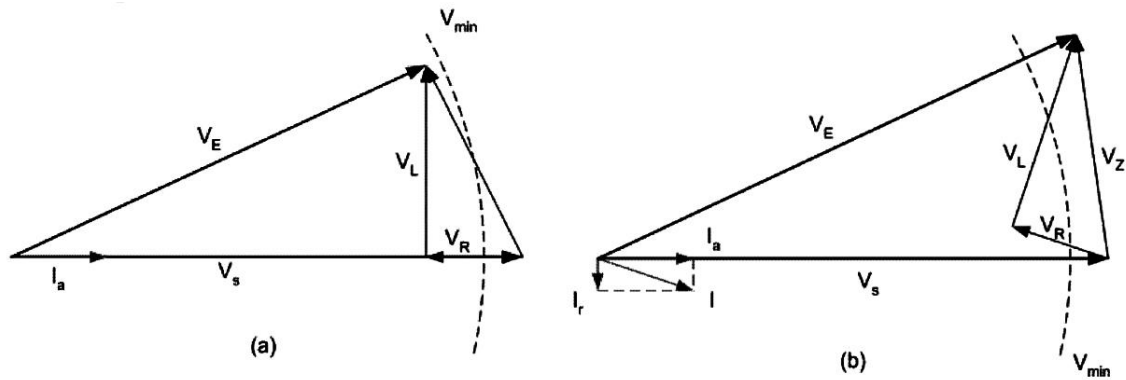
Το μέγεθος αυτού του λόγου X/R παίζει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της αέργου ισχύος. Στα δίκτυα διανομής το κλάσμα X/R είναι μικρότερο σε σχέση με τα δίκτυα μεταφοράς οπότε καθιστά τη ρύθμιση μέσω της αέργου ισχύος δυσκολότερη στην πλευρά της διανομής.

Αυτό φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα όπου για μεγάλη και μικρή τιμή του λόγου X/R γίνεται ρύθμιση της αέργου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι η ισοδύναμη αντίδραση Z_{line} όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 και ο λόγος X/R είναι σχετικά μεγάλος, δηλαδή ($X/R \gg 1$). Τότε το ρεύμα που ρέει μέσω της γραμμής θα προκαλέσει μια πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, που θα περιέχει επαγωγικό και ωμικό κομμάτι. Έστω, για αρχή, ότι το ρεύμα έχει μόνο πραγματικό μέρος, δηλαδή, η πτώση τάσης οφείλεται μόνο στο ωμικό μέρος. Όπως φαίνεται στα διανυσματικά διαγράμματα στο Σχήμα 3.3 (a), η τάση V_E είναι μικρότερη από το ελάχιστο ορισμένο όριο τάσης V_{min} , που εμφανίζεται με διακεκομμένη γραμμή. Όταν το ρεύμα έχει και φανταστικό (επαγωγικό) μέρος, η τάση V_E μπορεί να αυξηθεί και να βρίσκεται πάνω από το όριο V_{min} (Σχήμα 3.3 (b)). Αυτή η στρατηγική ρύθμισης της τάσης ωστόσο είναι υλοποιήσιμη όταν ο λόγος X/R είναι σχετικά μεγάλος.

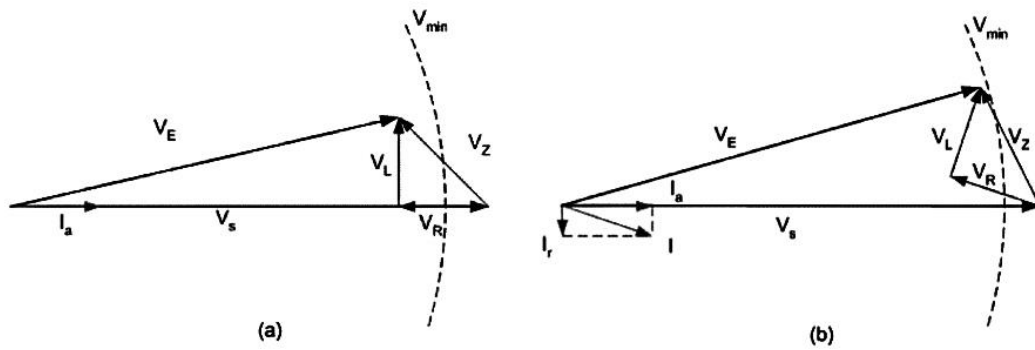
Στην περίπτωση που ο λόγος είναι σχετικά μικρός ($X/R \sim 1$), με την ωμική αντίσταση να έχει την ίδια τιμή με την προηγούμενη περίπτωση, το διανυσματικό διάγραμμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.4). Η τιμή της V_E παραμένει κάτω από το ελάχιστο όριο τάσης ακόμα και μετά την προσθήκη του επαγωγικού μέρους. Δηλαδή, στην περίπτωση με το μικρότερο λόγο X/R η προσθήκη του επαγωγικού μέρους έχει μικρή επίδραση. [20]



Σχήμα 3.2 Σύνθετη Αντίδραση Z απλής γραμμής



Σχήμα 3.3 Διανυσματικό Διάγραμμα με μεγάλο λόγο X/R . (α) μόνο ενεργό ρεύμα. (β) και επαγωγικό ρεύμα



Σχήμα 3.4 Διανυσματικό Διάγραμμα με μικρό λόγο X/R . (α) μόνο ενεργό ρεύμα. (β) και επαγωγικό ρεύμα

Τα διανυσματικά διαγράμματα που εμφανίζονται παραπάνω προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.1)-(3.3) της απλής γραμμής που φαίνεται στο σχήμα και διαμορφώνονται ως εξής:

$$Z = R + j\omega L \quad (3.1)$$

$$V_Z = V_R + jV_L = \tilde{I}(R + j\omega L) \quad (3.2)$$

$$V_E = V_s + \tilde{I}(R + j\omega L) \quad (3.3)$$

Η τιμή του λόγου X/R αποτελεί εσωτερικό χαρακτηριστικό του δικτύου το οποίο δε μπορεί να αλλάξει δυναμικά. Γι' αυτό είναι σημαντικό να είναι γνωστές οι επιδράσεις που έχει στο δίκτυο. Παράλληλα, με την υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής με ηλεκτρονικά ισχύος που προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη δυνατότητα ρύθμισης, είναι σημαντικό να διαμορφώνεται κατάλληλα το δίκτυο εξ αρχής ώστε να αξιοποιούνται οι δυνατότητες ρύθμισης.

3.1.4 Φορτία Συνδεδεμένα στο Δίκτυο Διανομής

Στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας το φορτίο ενός καταναλωτή μεταβάλλεται συνεχώς. Τα φορτία των Δικτύων Διανομής μεταβάλλονται, επειδή οι ανθρώπινες δραστηριότητες ακολουθούν ημερήσιες, εβδομαδιαίες και μηνιαίες κυκλικές μεταβολές. Η ζήτηση του φορτίου είναι γενικά υψηλότερη κατά τη διάρκεια της μέρας και νωρίς το απόγευμα, όταν τα βιομηχανικά και εμπορικά φορτία είναι υψηλά και χαμηλότερη από αργά το βράδυ έως και νωρίς το πρωί.

Τα φορτία ταξινομούνται σε κατηγορίες με όμοια χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες είναι τα οικιακά, τα εμπορικά και τα βιομηχανικά φορτία. Στα οικιακά φορτία η αιχμή είναι συνήθως το βράδυ, ενώ στα εμπορικά φορτία είναι τις μεσημεριανές ώρες. Στη βιομηχανική κατηγορία, το φορτίο είναι σχετικά χαμηλό νωρίς το πρωί, στη συνέχεια αυξάνεται και διατηρείται σταθερό μέχρι το απόγευμα, οπότε και μειώνεται σημαντικά αφού μειώνεται ή σταματά η βιομηχανική δραστηριότητα.

Τα φορτία καταναλώνουν ισχύ που εξαρτάται από την τάση και τη συχνότητα. Εφόσον το ενδιαφέρον σε αυτή την εργασία εστιάζεται κυρίως στη συμπεριφορά σε μεταβολές τάσης, η εξάρτηση από τη συχνότητα δεν λαμβάνεται υπόψη. Η ισχύς εξαρτάται από την τάση του ζυγού που βρίσκεται συνδεδεμένο και από μια αδιάστατη μεταβλητή ζήτησης z που εκφράζει το σύνολο του συνδεδεμένου εξοπλισμού.

Οι χαρακτηριστικές ενεργού και αέργου ισχύος θεωρούνται οι εκθετικής μορφής που εκφράζονται ως εξής [6]:

$$P = zP_0(V/V_0)^\alpha \quad (3.4)$$

$$Q = zQ_0(V/V_0)^\beta \quad (3.5)$$

όπου α , β είναι οι αντίστοιχοι εκθέτες και P_0 και Q_0 η ενεργός και η άεργος ισχύς που καταναλώνεται για μοναδιαία ζήτηση ($z=1$) με τάση V ίση με την τιμή αναφοράς V_0 .

Με βάση αυτές τις σχέσεις μπορούν να περιγραφούν τρία είδη φορτίων για δεδομένες τιμές των α και β .

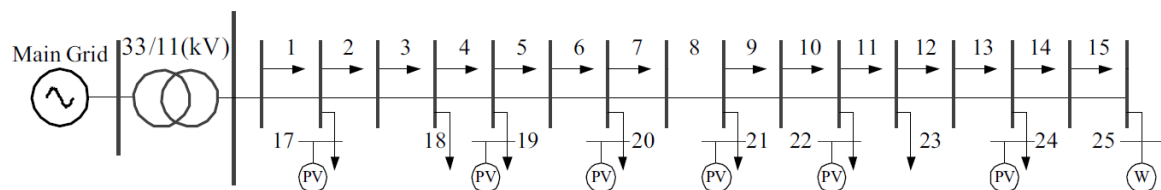
- Για $\alpha=\beta=0$, φορτία σταθερής ισχύος
- Για $\alpha=\beta=1$, φορτία σταθερού ρεύματος
- Για $\alpha=\beta=2$, φορτία σταθερής αγωγιμότητας

Συνήθως στα δίκτυα διανομής τα φορτία μοντελοποιούνται ως φορτία σταθερού ρεύματος για την ενεργό κατανάλωση και ως φορτία σταθερής αγωγιμότητας για την άεργο κατανάλωση. [21]

3.2 Δίκτυα Δοκιμών Γραμμών Διανομής (Test Feeders)

3.2.1 Γραμμή Δοκιμών Μέσης Τάσης 33-11kV

Το δίκτυο που φαίνεται στο Σχήμα 3.5 και προέρχεται από το δίκτυο διανομής του Ηνωμένου Βασιλείου αποτελείται από μια δοκιμαστική γραμμή διανομής που συνδέεται μέσω Μ/Σ 33/11kV 15MVA και έχει αντίδραση βραχυκυκλώσεως 5%. Στη συγκεκριμένη μελέτη [22] ο λόγος μετασχηματισμού θεωρείται σταθερός στο 1. Τα στοιχεία της γραμμής παρουσιάζονται στη δημοσίευση [22] καθώς και πιο συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.1, όπως συγκεντρώθηκαν από τη δημοσίευση. Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο (W) το οποίο παράγει $P_{GWF} = 9$ MW και 6 φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (PV) από 1 MW η καθεμία. Για όλες τις μονάδες παραγωγής θεωρείται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος $\cos\phi = 1$.



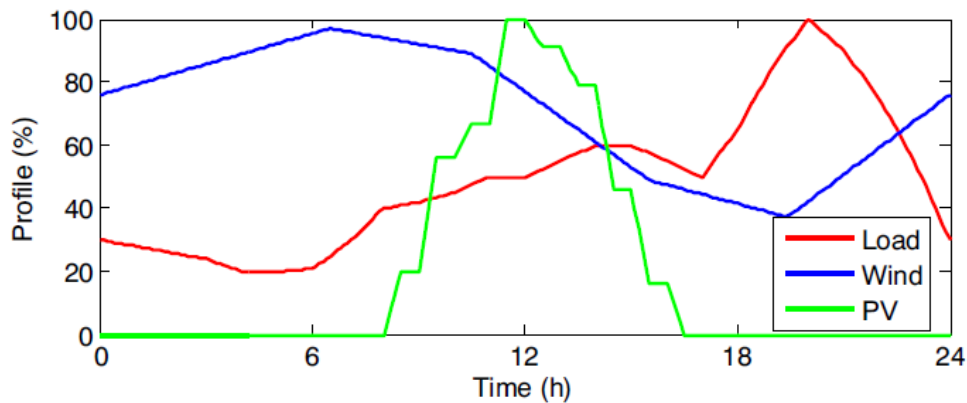
Σχήμα 3.5 Δοκιμαστική Γραμμή Διανομής Μέσης Τάσης 33/11kV

Για το συγκεκριμένο δίκτυο εξετάζονται τα ακραία σενάρια μεγίστου φορτίου και χαμηλής διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και χαμηλής κατανάλωσης φορτίου και μέγιστης παραγωγής. Επίσης, πραγματοποιείται μια ημερήσια προσομοίωση με καμπύλες φορτίου και παραγωγής. (Σχήμα 3.6)

Πίνακας 3.1 Δεδομένα Γραμμής Δοκιμών Μέσης Τάσης 33-11kV

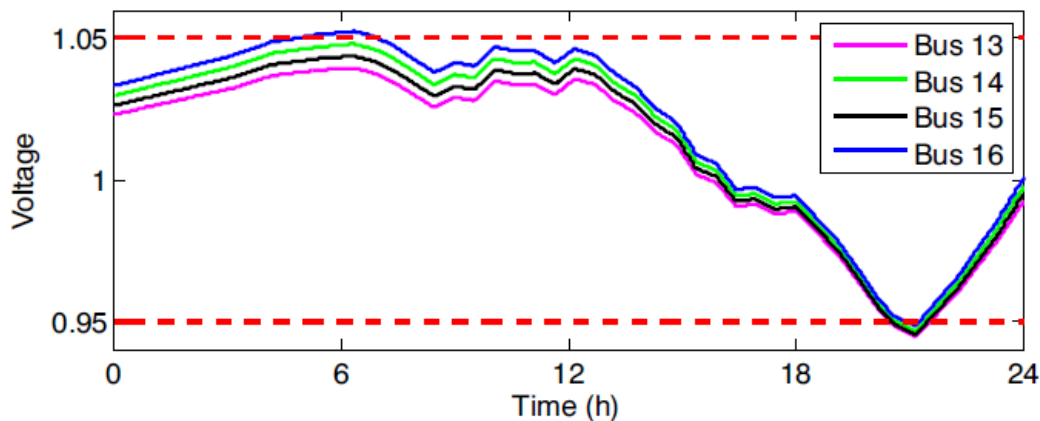
Επίπεδο Τάσης	Υποσταθμός Διανομής	X/R (κύριου άξονα γραμμής)	X/R (γραμμών ΔΠ και φορτίων)	$P_{L\text{συν}}$ (MW)	$Q_{L\text{συν}}$ (MVar)	$P_{G\text{συν}}$ (MW)	$Q_{G\text{συν}}$ (MVar)
11kV (MT)	15MVA 33/11kV	0.77	0.27	12.198	2.522	15	0

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6 η φωτοβολταϊκή παραγωγή παρουσιάζει μέγιστο τις μεσημεριανές ώρες, όταν το φορτίο είναι σχετικά χαμηλό και είναι μηδενική τις βραδινές ώρες που παρουσιάζεται η αιχμή του φορτίου όπως είναι αναμενόμενο. Η αιολική παραγωγή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μέρας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Ημερήσιες Καμπύλες Παραγωγής και Φορτίου στο Δίκτυο MT 33/11kV

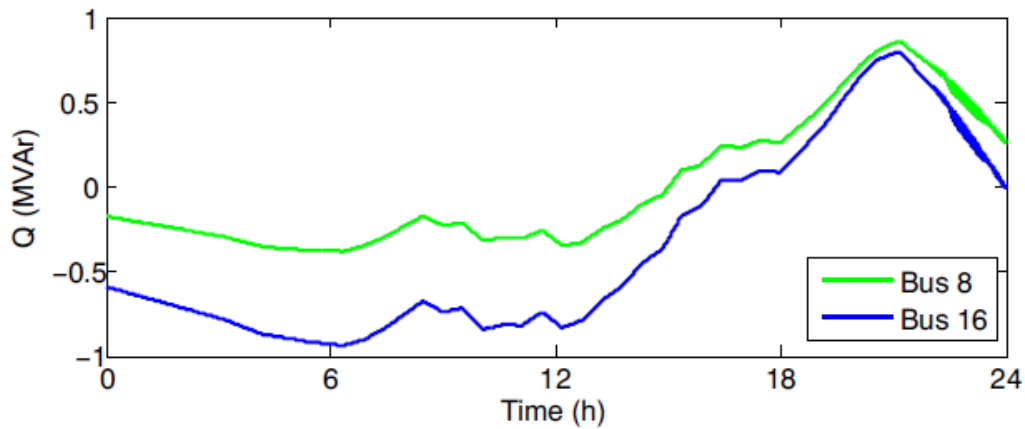
Στην δημοσίευση [22] εξετάζονται οι τέσσερις πιο απομακρυσμένοι ζυγοί που είναι και πιθανότερο να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις τάσης. Παρατηρείται ότι σημειώνονται ανυψώσεις τάσης κατά της μεσημεριανές ώρες όπου η παραγωγή είναι υψηλή και το φορτίο σχετικά χαμηλό, και πτώσεις τάσης τις βραδινές ώρες που η φωτοβολταϊκή παραγωγή μηδενίζεται. (Σχήμα 3.7)



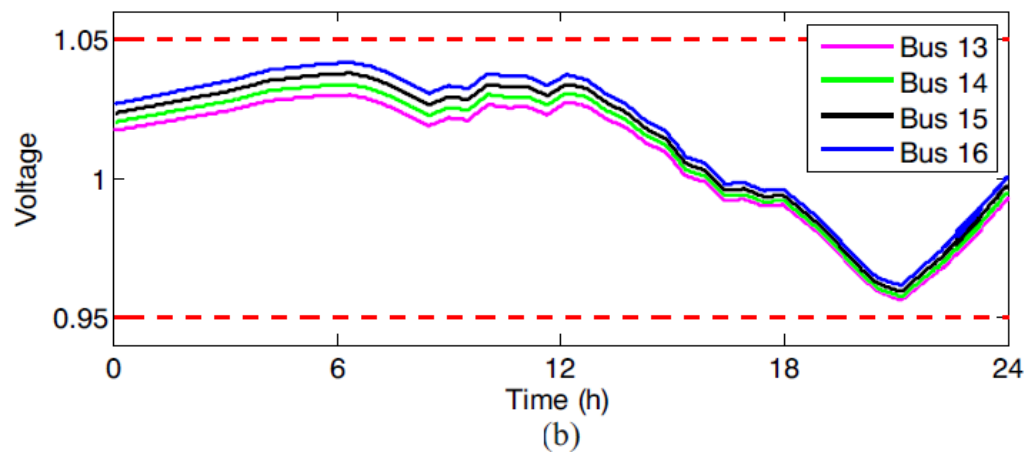
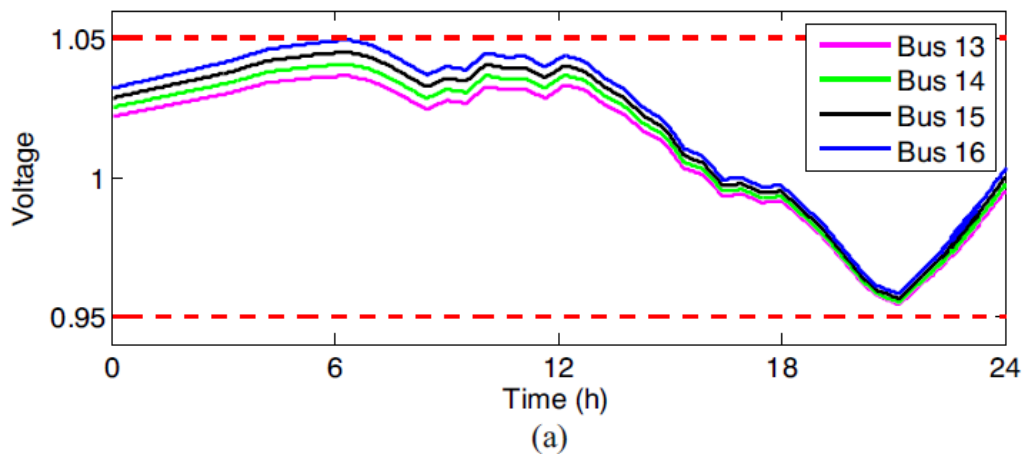
Σχήμα 3.7 Προφίλ Τάσεων για 4 απομακρυσμένους Ζυγούς

Παρατηρείται επίσης ότι ο τελευταίος ζυγός υπερβαίνει το άνω όριο τάσης $V_{\max} = 1,05$ α.μ. που τίθεται από το διαχειριστή του δικτύου ενώ και οι 4 ζυγοί παραβιάζουν το κάτω όριο στην περίπτωση της πτώσης τάσης σε υψηλό φορτίο και χαμηλή παραγωγή.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα για την επίλυση του προβλήματος τάσης εφαρμόζεται έλεγχος με ρύθμιση της αέργου ισχύος σε κάποιους ζυγούς (Ζυγός 8 και 16) με χρήση έξυπνων μετασχηματιστών (Smart Transformers). Οι μετασχηματιστές αναλαμβάνουν να τροφοδοτήσουν το δίκτυο με άεργο ισχύ στην περίπτωση της χαμηλής τάσης και να απορροφήσουν άεργο στις περιπτώσεις ανύψωσης της τάσης (Σχήμα 3.8). Μετά την εφαρμογή των έξυπνων μετασχηματιστών αρχικά στο ζυγό 8 και έπειτα στο ζυγό 16 το ημερήσιο προφίλ τάσης βελτιώνεται και επανέρχεται εντός των αποδεκτών ορίων (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8 Άεργος Υποστήριξη Μέσω των Έξυπνων Μετασχηματιστών



Σχήμα 3.9 Προφίλ τάσεων 4 απομακρυσμένων ζυγών με (a) Έξυπνο Μ/Σ στο Ζυγό 8
(b) Έξυπνο Μ/Σ στο Ζυγό 16

Παρατηρείται στη συγκεκριμένη δοκιμή ότι η αυξανόμενη ζήτηση του φορτίου, μαζί με την διεύθυνση Διεσπαρμένης Παραγωγής που δεν ελέγχεται στα δίκτυα διανομής, όπως τα Φωτοβολταϊκά Πάρκα (PV) και η αιολική παραγωγή (W) που υπάρχουν στη

συγκεκριμένη γραμμή διανομής, δημιουργεί θέματα στο προφίλ της τάσης του δικτύου και των ζυγών του. Επίσης, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής δεν παράγουν τη μέγιστη ισχύ τους ταυτόχρονα ούτε προσαρμόζονται στην καμπύλη του φορτίου. Επίσης, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής υπερβαίνει την αιχμή του φορτίου, γεγονός που καθιστά πιο πιθανή την εμφάνιση υπερτάσεων.

Τα φορτία είναι οικιακά και ακολουθούν την καμπύλη του Σχήματος 3.6. Θεωρούνται συμμετρικά τριφασικά φορτία χαμηλής τάσης.

Συμπερασματικά, το συγκεκριμένο δίκτυο παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς αποτελεί δίκτυο διανομής μέσης τάσης (MT) με σχετικά υψηλό φορτίο και αρκετά μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στα ακραία σενάρια φορτίου παραγωγής να παραβιάζονται τα όρια τάσης.

Η ρύθμιση που γίνεται τελικά στην ημερήσια καμπύλη μέσω των έξυπνων μετασχηματιστών επιφέρει βελτίωση του προφίλ των τάσεων των ζυγών. Παρατηρείται επίσης, ότι η έγχυση ή απορρόφηση αέργου ισχύος στο ζυγό 16, επιφέρει μεγαλύτερη βελτίωση των τάσεων σε σχέση με το ζυγό 8. Αυτό συμβαίνει καθώς η ρύθμιση γίνεται πιο κοντά στους ζυγούς που εμφανίζουν υπερτάσεις και μεγάλες πτώσεις τάσης.

3.2.2 Δίκτυο Διανομής 13-Ζυγών IEEE

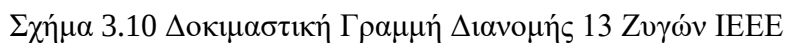
Μία τυπική δοκιμαστική διασυνδετική γραμμή διανομής που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά είναι το IEEE 13 Node Test Feeder (Σχήμα 3.10). Το δίκτυο αυτό είναι σχετικά μικρό, ωστόσο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς είναι μικρό σε μήκος και σχετικά υψηλά φορτισμένο για δίκτυο το οποίο βρίσκεται σε τάση 4.16kV. [21]

Επίσης, πρόκειται για μη συμμετρικό τριφασικό δίκτυο το οποίο περιέχει πυκνωτές αντιστάθμισης, υποσταθμό διανομής και φορτία.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι το δίκτυο περιλαμβάνει τόσο τη μέση τάση στα 4,16 kV όσο και τη χαμηλή τάση στα 0,48 kV, κάτι που είναι σημαντικό καθώς έχει ενδιαφέρον η συμπεριφορά των γραμμών διανομής τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση.

Αξίζει να σημειωθεί για το δίκτυο του Σχήματος 3.10, ότι χρησιμοποιώντας ένα λεπτομερές τριφασικό μοντέλο με όλα τα στοιχεία να έχουν ρεαλιστικές τιμές, δημιουργείται ένα δυνατό περιβάλλον και η μελέτη προσεγγίζει αρκετά τις πραγματικές συνθήκες.

Στη συγκεκριμένη γραμμή διανομής δύναται να τοποθετηθούν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και πιο συγκεκριμένα μονάδες φωτοβολταϊκής παραγωγής όπως γίνεται στη δημοσίευση [23]. Πιο συγκεκριμένα το τυπικό δίκτυο διανομής 13 Ζυγών του IEEE, προσαρμόζεται προσθέτοντας 12 μονάδες φωτοβολταϊκής παραγωγής στους ζυγούς που φαίνεται και στο Σχήμα 3.10. Έπειτα, μελετώνται διάφορες περιπτώσεις φορτίων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει σταθερό φορτίο, απλοποιημένο φορτίο σε 3 διαφορετικές ζώνες, βιομηχανικό προφίλ φορτίου καθώς και οικιακό προφίλ φορτίου.



Line Segment Data				Overhead Line Configurations				
Node A	Node B	Length(ft.)	Configuration	Configuration	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
632	645	500	603			ACSR	ACSR	ID
632	633	500	602	601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
633	634	0	XFM-1	602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
645	646	300	603	603	C B N	1/0	1/0	505
650	632	2000	601	604	A C N	1/0	1/0	505
684	652	800	607	605	C N	1/0	1/0	510
632	671	2000	601					
671	684	300	604	Underground Cable Configurations				
671	680	1000	601	Configuration	Phasing	Cable	Neutral	Space ID
671	692	0	Switch	606	A B C N	50,000 AA, C	None	515
684	611	300	605	607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520
692	675	500	606					
Spot Loads								
Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3	
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90	
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0	
646	D-Z	0	0	230	132	0	0	
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0	
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220	
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212	
692	D-I	0	0	0	0	170	151	
611	Y-I	0	0	0	0	170	80	
	TOTAL	1158	606	0	627	1135	753	
Distributed Loads								
Node A	Node B	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PO	17	10	66	38	117	68

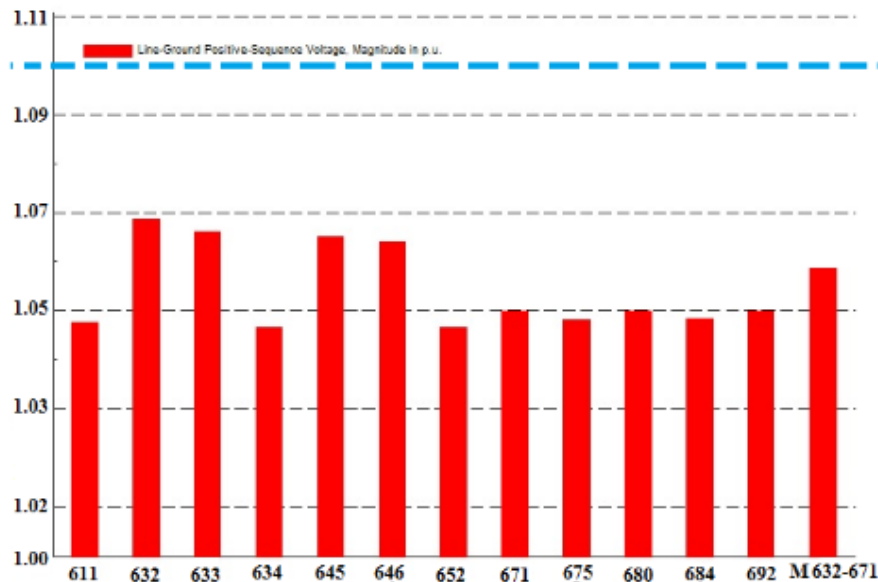
Στον Πίνακα 3.2 εμφανίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου όπως προκύπτουν από το IEEE [24]. Παρακάτω (Πίνακας 3.3), εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία της συγκεκριμένης μελέτης [25] πάνω στο προσαρμοσμένο δίκτυο διανομής.

Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτικά Δεδομένα προσαρμοσμένου Δικτύου Δοκιμών

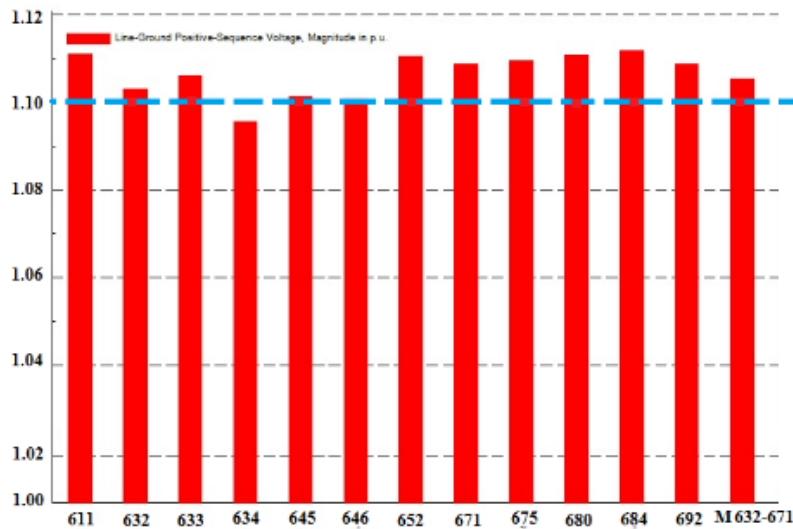
Επίπεδο Τάσης	Υποσταθμός Χαμηλής Τάσης	X/R (γραμμών MT)	X/R (γραμμών XT)	$P_{L\text{συν}}$ (MW)	$Q_{L\text{συν}}$ (MVar)	$P_{G\text{συν}}$ (MW)	$Q_{G\text{συν}}$ (MVar)
4.16 kV (MT)	4.16/0.48 kV	0.77	0.27	3.557	3.102	12	0

Στην περίπτωση σταθερού φορτίου γίνεται μελέτη του προφίλ της τάσης αρχικά χωρίς παραγωγή από φωτοβολταϊκές μονάδες και στη συνέχεια με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκής παραγωγής, οπότε φαίνεται η επίδραση στην τάση των ζυγών με τη σύνδεση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η τάση των ζυγών χωρίς παραγωγή από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ενώ στο Σχήμα 3.12 παρατηρείται η ανύψωση της τάσης λόγω της υψηλής διείσδυσης. Παρατηρείται ότι σε ορισμένους ζυγούς, και κυρίως στους πιο απομακρυσμένους από τον υποσταθμό διανομής, εμφανίζονται μεγάλες ανυψώσεις τάσης που ξεπερνούν τα ορισμένα από το διαχειριστή όρια τάσης. Στο συγκεκριμένο δίκτυο $V_{\max} = 1,10$ α.μ., όπως φαίνεται και στα σχήματα με διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 3.11 Προφίλ Τάσης Ζυγών Χωρίς Παραγωγή απο ΦΒ



Σχήμα 3.12 Προφίλ Τάσης Ζυγών Με Παραγωγή απο ΦΒ

Εξετάζοντας τη φύση των φορτίων τα οποία μεταβάλλονται κρατώντας την παραγωγή σταθερή, παρατηρείται πως διαμορφώνονται οι τάσεις στους ζυγούς για τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια φορτίων. Τα σενάρια διαμορφώνονται μεταβάλλοντας την κατανάλωση του κάθε φορτίου σε κάθε ζυγό ως το 100%, 75%, 50% και 10% της αιχμής του.

Στον Πίνακα 3.4, εμφανίζεται στην πρώτη στήλη η τάση των ζυγών για 100% κατανάλωση των φορτίων, χωρίς την διείσδυση φωτοβολταϊκών (PV). Στις επόμενες 4 στήλες η παραγωγή από τις φωτοβολταϊκές μονάδες είναι σταθερή και μεταβάλλονται τα φορτία. Η μεγάλη ανύψωση της τάσης παρουσιάζεται αφότου η ισχύς αρχίζει να ρέει αντίστροφα και το ρεύμα στον πρώτο ζυγό εγχέεται στην κατεύθυνση προς το δίκτυο υψηλότερης τάσης.

Πίνακας 3.4 Τάσεις Ζυγών στα διάφορα Σενάρια Παραγωγής Φορτίου

P ₆₅₀ (MW)	3.55759	-7.053404	-7.869103	-8.67517	-9.946427
Scenarios	W/O PV	100%.PV	75%.PV	50%.PV	10%.PV
Bus	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)
611	1.037809	1.120001	1.136404	1.152239	1.176508
632	1.065191	1.108606	1.117139	1.125341	1.137839
633	1.063239	1.109941	1.118966	1.12765	1.1409
634	1.043819	1.09906	1.112774	1.126026	1.146359
645	1.065191	1.108606	1.117139	1.125341	1.137839
646	1.065191	1.108606	1.117139	1.125341	1.137839
652	1.032317	1.116439	1.134189	1.151329	1.177606
671	1.039238	1.116923	1.132877	1.148277	1.17187
675	1.036651	1.116862	1.133783	1.150124	1.175176
680	1.039238	1.119604	1.135505	1.150853	1.174368
684	1.037809	1.120001	1.136404	1.152239	1.176508
692	1.039238	1.116923	1.132877	1.148277	1.17187
mid 632-671	1.051259	1.11195	1.124312	1.13622	1.154414
650	1.099988	1.099958	1.099956	1.099954	1.099951

Στην πρώτη γραμμή του Πίνακα 3.4 εμφανίζεται η ενεργός ισχύς που περνά από το ζυγό 650 και ρέει προς το ανάντη δίκτυο υψηλότερης τάσης. Με θετικό πρόσημο εμφανίζεται η ροή προς το δίκτυο διανομής ενώ με αρνητικό εμφανίζεται η αντίστροφη ροή προς τον υποσταθμό διανομής.

Μετά την εισαγωγή της διεσπαρμένης Παραγωγής παρατηρείται ότι η μείωση των φορτίων αυξάνει τη ροή ισχύος προς τα ανώτερα επίπεδα τάσης και αυτό επιφέρει μεγάλες ανυψώσεις τάσεις στους ζυγούς του δικτύου διανομής. Σε περιπτώσεις ελάχιστου φορτίου όπως στο σενάριο 10%, οι τάσεις των ζυγών φτάνουν έως και το 1,17 α.μ. που ξεπερνά κατά πολύ τη $V_{\max} = 1,10$ α.μ..

Ως συμπέρασμα, το δίκτυο αυτό αποτελεί ένα από τα πιο συνήθη δοκιμαστικά δίκτυα του IEEE και είναι αρκετά διαδεδομένο καθώς περιλαμβάνει εναέριες και υπόγειες γραμμές, ασύμμετρα τριφασικά φορτία και χαμηλή και μέση τάση. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να εξεταστούν πολλές παράμετροι ταυτόχρονα. Επίσης, για το μήκος του είναι ιδιαίτερα φορτισμένο και στο συγκεκριμένο παράδειγμα υπάρχει υψηλή διείσδυση σε διεσπαρμένη παραγωγή στη συγκεκριμένη δημοσίευση που εξετάζει το δίκτυο.

Το ενδιαφέρον της συγκεκριμένης δημοσίευσης εστιάζεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά. Αρχικά, μας ενδιαφέρει η ιδιαίτερα υψηλή φόρτιση του δικτύου για το δεδομένο μέγεθος του και επίπεδο τάσης που βρίσκεται, καθώς παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στις τάσεις των ζυγών και παραβίαση των ορίων. Λόγω της υπερβολικά μεγάλης διείσδυσης φωτοβολταϊκών ακόμα και σε πλήρες φορτίο οι τάσεις στους ζυγούς φτάνουν έως και 1,12 α.μ. ενώ στο 10% του πλήρους φορτίο η τάση φτάνει έως και 1,17 α.μ. και η ροή ισχύος στο ζυγό του υποσταθμού διανομής μεταβάλλεται από +3,053 MW ροής προς το δίκτυο διανομής -9,947 MW προς το ανώτερο επίπεδο τάσης. Η μεταβολή αυτή επιφέρει μεταβολές και στο επίπεδο της τάσης, που ανεβαίνει σημαντικά όταν η ροή ισχύος αντιστρέφεται.

Επιπλέον, παρουσιάζει ενδιαφέρον η χρήση τριφασικών γραμμών και ασύμμετρων τριφασικών φορτίων που καθιστούν την ανάλυση πιο ρεαλιστική ιδιαίτερα όταν γίνεται αναφορά σε οικιακά φορτία.

Στην παρούσα εργασία ωστόσο δε χρησιμοποιούνται τριφασικά μοντέλα για το δίκτυο διανομής.

3.2.3 Δίκτυο Δοκιμών 37-Ζυγών IEEE με Πρωτεύον και Δευτερεύον Δίκτυο

Οικιακής Τάσης

Τα δίκτυα διανομής του μέλλοντος θα περιέχουν έξυπνους μετρητές, αντιστροφείς, ηλεκτρονικά ισχύος, φωτοβολταϊκά στέγης, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συστοιχίες μπαταριών, ακόμα και ηλεκτρικά οχήματα, όλα τοποθετημένα σε δευτερεύοντα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Οι μονάδες παραγωγής στη χαμηλή τάση καθώς και τα ασύμμετρα φορτία δημιουργούν ανισοκατανομές στις τρεις φάσεις του δικτύου με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και το πρωτεύον δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Για αυτό το λόγο δε μπορεί να αμεληθεί η εξέταση των δευτερευόντων δικτύων διανομής και η διεσπαρμένη παραγωγή που μπορεί να συνδέεται σε τέτοια δίκτυα.

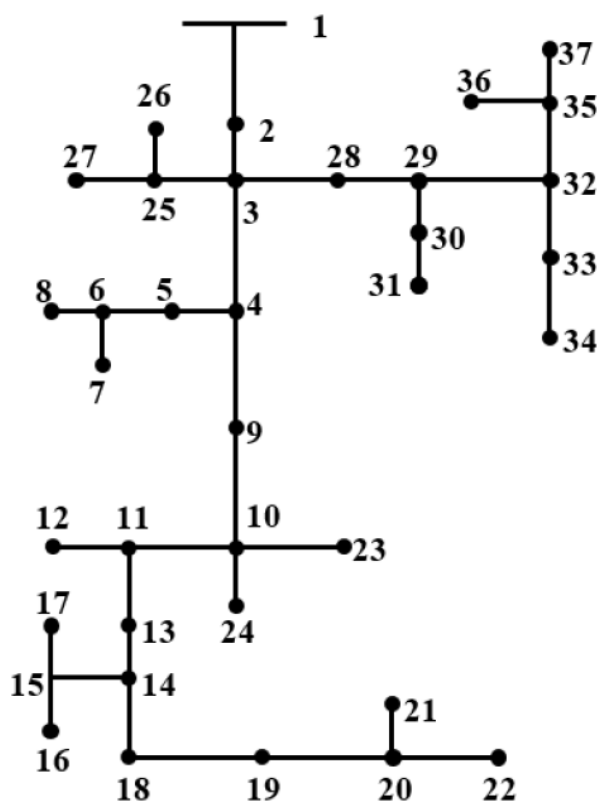
Το δίκτυο που εξετάζεται στην εργασία [26] εξυπηρετεί ακριβώς αυτό το σκοπό, καθώς έχει αναπτυχθεί λαμβάνοντας υπόψιν και το πρωτεύον και το δευτερεύον δίκτυο διανομής, φτάνοντας ως το επίπεδο οικιακής κατανάλωσης.

Το δίκτυο αυτό δύναται να χρησιμοποιηθεί για μελέτες με εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά στέγης, μπαταρίες αποθήκευσης, ηλεκτρικά οχήματα και δίνει αποτελέσματα για την απόδοση, τις απώλειες ενέργειας του συστήματος, τις ανυψώσεις τάσης που μπορεί να προκύπτουν καθώς και τη βέλτιστη διαχείριση και μείωση των μεταβολών αυτών.

Το πρωτεύον δίκτυο διανομής είναι το σύστημα 37 ζυγών του IEEE το οποίο λειτουργεί σε ονομαστική ισχύ 4,8 kV. Πρόκειται για μη συμμετρικό δίκτυο με μη συμμετρικά φορτία και υπόγειες γραμμές. [24]

Για να διευκολυνθεί η μελέτη γίνονται στη συγκεκριμένη εργασία [26] κάποιες τροποποιήσεις των φορτίων αυξάνοντας παράλληλα και τις απώλειες που θα προκύπτουν.

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το μονογραμμικό του πρωτεύοντος δικτύου διανομής που αποτελεί τον κορμό του συστήματος διανομής, πριν τη σύνδεση των πλευρικών γραμμών διανομής (lateral feeders) που θα καταλήξουν στα δευτερεύοντα δίκτυα διανομής που θα τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία. Τα τριφασικά φορτία του πρωτεύοντος δικτύου συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5, ενώ τα στοιχεία των εναέριων γραμμών στον Πίνακα 3.6 .



Σχήμα 3.13 Πρωτεύον Δίκτυο Δοκιμών IEEE 37-Ζυγών

Από ζυγούς του πρωτεύοντος MT/XT ξεκινούν γραμμές διανομής οι οποίες καταλήγουν σε μετασχηματιστές που μεταβάλλουν την τάση σε οικιακό επίπεδο, οπότε προκύπτουν τα δευτερεύοντα δίκτυα διανομής. Κάθε μονοφασικός μετασχηματιστής θεωρείται ότι συνδέεται με 4 σπίτια. Το κάθε σπίτι σε πλήρες φορτίο καταναλώνει έως 12kW, ωστόσο οι καταναλωτές δε χρησιμοποιούν το σύνολο του ηλεκτρικού εξοπλισμού τους ταυτόχρονα και τα περισσότερα νοικοκυριά σπάνια

ξεπερνούν το μισό της εγκατεστημένης ισχύς τους σε μια δεδομένη στιγμή. Οπότε, ένας μονοφασικός μετασχηματιστής 4,8/0,4 kV MT/XT 25kVA αρκεί για κάθε τέσσερις κατοικίες.

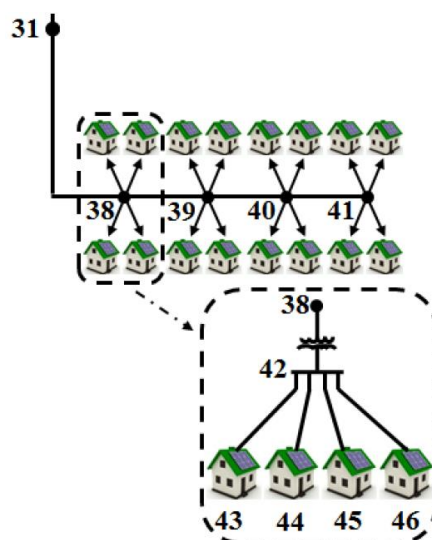
Πίνακας 3.5 Φορτία Πρωτεύοντος Συστήματος Διανομής

Node	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3	Node	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
2	84	44	84	44	84	38	21	0	0	85	40	0	0
5	0	0	0	0	42	21	22	0	0	0	0	42	21
6	42	21	0	0	0	0	23	0	0	85	40	0	0
7	42	21	42	21	42	21	24	126	66	126	66	126	57
8	42	21	0	0	0	0	26	0	0	0	0	85	40
9	0	0	0	0	85	40	27	8	4	85	40	0	0
12	0	0	0	0	42	21	28	0	0	0	0	85	40
13	85	40	0	0	0	0	30	17	8	21	10	0	0
14	0	0	0	0	42	21	31	85	40	0	0	0	0
16	0	0	0	0	85	40	34	0	0	42	21	0	0
17	0	0	42	21	0	0	36	0	0	140	70	21	10
18	140	70	0	0	0	0	37	0	0	42	21	0	0
19	126	62	0	0	0	0	Total	797	397	794	394	866	410

Πίνακας 3.6 Εναέριες Γραμμές Πρωτεύοντος Δικτύου Διανομής

Type of conductor	GMR	Diam. (inch)	Ampacity (A)	60 Hz (Ohms/mile)	
				Resistance	Reactance
#1	0.00418	5	200	1.3873	1.6033

Το μονογραμμικό του δικτύου όπως διαμορφώνεται μετά την εισαγωγή των πλευρικών διασυνδετικών γραμμών (lateral feeders φαίνεται στο Σχήμα 3.14 για τη σύνδεση στο Ζυγό 31:



Σχήμα 3.14 Δίκτυο Δοκιμών που περιλαμβάνει Πλευρικές Διασυνδετικές Γραμμές και Δευτερεύον Δίκτυο Διανομής

Οι γραμμές του δικτύου διανομής στα 60 Hz και σε τρεις διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας φαίνονται στον Πίνακα 3.7

Πίνακας 3.7 Γραμμές Δευτερεύοντος Δικτύου Διανομής

Type of conductor	60 Hz resistance (Ohms/1000 ft)			Inductive reactance (Ohms/1000 ft)
	25°C	50°C	75°C	XI
Triplex	0.4227	0.4645	0.5064	0.0268

Ενώ στον Πίνακα 3.8 εμφανίζονται τα στοιχεία των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ

Πίνακας 3.8 Δεδομένα Μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ

Type	kVA	Voltage	%R	%X
Single-phase center-tapped	25	4.8/√3kV-120/240V	1.6	2.3

Το παραπάνω δίκτυο του Σχήματος 3.13 επίσης αποτελεί ένα από τα τυπικά δίκτυα διανομής του IEEE και έχει προσαρμοστεί ώστε να δοθεί έμφαση και στο δευτερεύον δίκτυο (χαμηλής τάσης).

Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μπορεί να βοηθήσει στη μελέτη της επίδρασης των οικιακών φορτίων στο προφίλ της τάσης των δικτύων διανομής μέσης τάσης.

Παράλληλα, η διεύθυνση μονάδων παραγωγής (Φωτοβολταϊκά Στέγης) με ηλεκτρονικά ισχύος ακόμα και σε οικιακό επίπεδο δημιουργεί νέες δυνατότητες ρύθμισης της τάσης ήδη από το επίπεδο της χαμηλής τάσης.

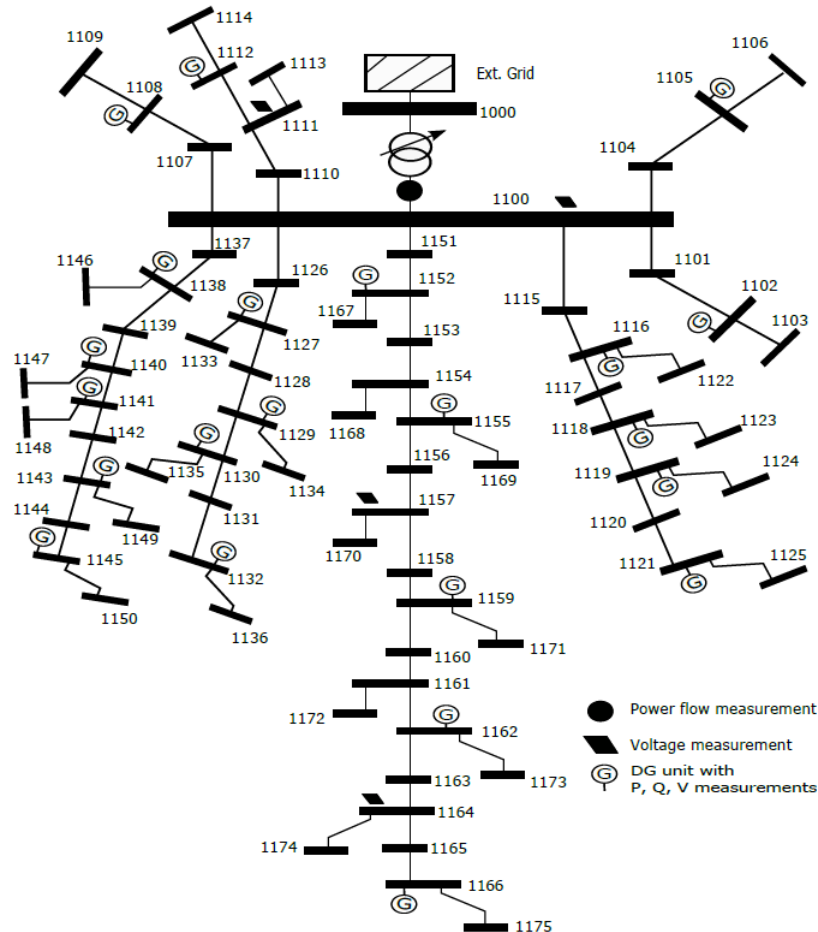
Τέλος, φαίνεται η μεγάλη διαφορά στο λόγο X/R επαγωγικής αντίδρασης προς ωμική αντίσταση των γραμμών που χρησιμοποιούνται στη μέση και στη χαμηλή τάση. Αυτό δικαιολογεί και τη δυσκολία ρύθμισης της τάσης μέσω της αέργου ισχύος στα δίκτυα χαμηλότερης τάσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9 Βασικά Χαρακτηριστικά Γραμμής Δοκιμών

Επίπεδα Τάσης	Υποσταθμός Χαμηλής Τάσης	X/R (γραμμών ΜΤ)	X/R (γραμμών ΧΤ) 25°C	P _{Lσυν} (MW)	Q _{Lσυν} (MVar)
4.8 kV (ΜΤ) , 0,4 kV (ΧΤ)	4.8/0.4 kV	1.15	0.06	2.457	1.201

3.2.4 Τοπικό Βρετανικό Δίκτυο Διανομής 75-Ζυγών

Ακόμα ένα δίκτυο διανομής που παρουσιάζει ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην εργασία [27]. Πρόκειται για δίκτυο διανομής από το δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου και τα δεδομένα για τις γραμμές βρίσκονται στην [28] και έχει προσαρμοστεί για τις ανάγκες της παραπάνω εργασίας. Το δίκτυο διανομής αποτελείται από 75 ζυγούς και συνδέεται με υποσταθμό διανομής μέσω μετασχηματιστή 33/11kV εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.15.



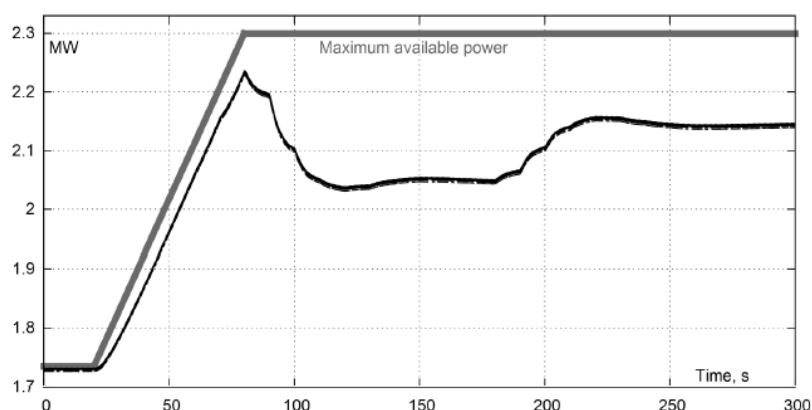
Σχήμα 3.15 Δίκτυο Διανομής 75 Ζυγών

Το δίκτυο έχει εγκατεστημένες 22 μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίες αποτελούνται από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης φαινόμενης ισχύος 3.33 MVA η κάθε μια και ανεμογεννήτριες με σύγχρονες γεννήτριες 3 MVA η κάθε μία. Το δίκτυο τροφοδοτεί 52 φορτία, εκ των οποίων τα 38 παριστάνονται ως σταθερού ρεύματος για την ενεργό ισχύ και σταθερής αγωγιμότητας για την άεργο ισχύ. Τα φορτία δεν προσομοιώνονται ως σταθερής ισχύος καθώς οι μεταβολές τάσης στους ζυγούς που θα συνδεθούν ενδέχεται να μεταβάλλουν την ισχύ που θα καταναλώνουν.

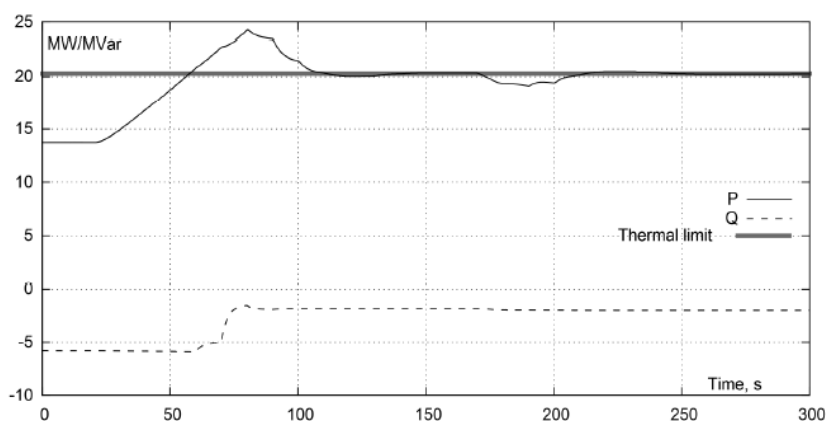
Στην προσομοίωση του δικτύου που πραγματοποιείται στην εργασία [27] φαίνεται η επίδραση της μεταβλητότητας της παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ της τάσης των ζυγών του δικτύου αλλά και στα θερμικά όρια που μπορεί να παραβιάζονται λόγω της ανάστροφης ροής ισχύος που ρέει σε ακραία σενάρια προς το μετασχηματιστή. Παράλληλα, με τη μέθοδο πρόβλεψης (Model Predictive

Control) καταστρώνεται μια στρατηγική αντιμετώπισης παραβιάσεων των τάσεων και των θερμικών ορίων.

Πιο συγκεκριμένα, μια απότομη αύξηση τη ταχύτητας του ανέμου της τάξης του 10% συμβαίνει από την χρονική στιγμή $t = 20$ s έως και τη στιγμή $t = 80$ s και αυξάνει την παραγόμενη ενεργό ισχύ της κάθε μίας ανεμογεννήτριας (Σχήμα 3.16), έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροής ενεργού ισχύος που μεταφέρεται από τον μετασχηματιστή και τελικά παραβίαση της θερμικής του ικανότητας τη χρονική στιγμή $t = 60$ s όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.17) με μαύρη συμπαγή γραμμή.

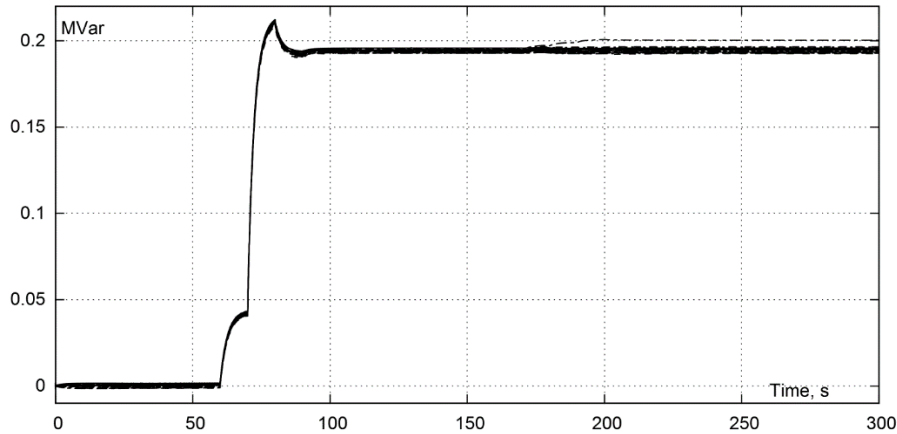


Σχήμα 3.16 Ενεργός Ισχύ που παράγεται από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή



Σχήμα 3.17 Απότομη Αύξηση της Ενεργού Ισχύος και παραβίαση του Θερμικού Ορίου

Βάση του ελέγχου που αναπτύσσεται στην εργασία και αναφέρθηκε παραπάνω, ο διαχειριστής του δικτύου προβαίνει σε κάποιες κινήσεις ώστε να αντιμετωπιστούν οι παραβιάσεις. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της αύξησης της παραγόμενης ενεργού ισχύος από της μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, ο διαχειριστής του δικτύου επιβάλλει στις ανεμογεννήτριες να απορροφήσουν άεργο ισχύ ώστε να μειωθεί η μεγάλη ροή ισχύος προς το μετασχηματιστή που οδηγεί στην παραβίαση των θερμικών ορίων. Η απορρόφηση αέργου ισχύος επιβάλλεται τη χρονική στιγμή $t = 70$ s και για κάθε μονάδα εμφανίζεται στο Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18 Αέργος απορρόφηση κάθε μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.16 η ρύθμιση της αέργου ισχύος δεν αρκεί και ο διαχειριστής επιβάλλει τη χρονική στιγμή $t = 80$ s μείωση και της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων (Σχήμα 3.16) για να αποκατασταθεί το πρόβλημα τελικά τη χρονική στιγμή $t = 120$ s.

Το δίκτυο αυτό έχει ενδιαφέρον καθώς πρόκειται για σχετικά μεγάλο δίκτυο με υψηλή διείσδυση σε διανεμημένη παραγωγή, η οποία δημιουργεί τόσο προβλήματα τάσης όσο και θερμικά προβλήματα λόγω του υψηλού ανάστροφου ρεύματος που προκύπτει σε κάποια σενάρια που εξετάζονται.

Σε αυτή την εργασία γίνεται μια προσπάθεια ρύθμισης της τάσης και του ρεύματος ελέγχοντας της μονάδες παραγωγής μέσω κεντρικού ρυθμιστή. Το πιο σημαντικό είναι η ικανότητα να διατηρηθούν οι μονάδες σε συνθήκες μέγιστης παραγωγής (MPPT) και να διορθώνονται οι τυχόν αποκλίσεις αφού συμβούν ή ακόμα και πριν εμφανιστούν. Ανάλογα και με τη μέθοδο που επιλέγεται ο διαχειριστής επιβάλλει στις μονάδες αρχικά να κάνουν ρύθμιση της αέργου ισχύος και αν αυτό δεν αρκεί να μειώνουν ακόμα και την παραγόμενη ενεργό ισχύ τους.

Ο έλεγχος που θα χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο paper είναι μια μέθοδος πρόβλεψης με υποχωρούν ορίζοντα (Receding Horizon Model Predictive Control) ο οποίος παρουσιάζεται πιο αναλυτικά στην [27].

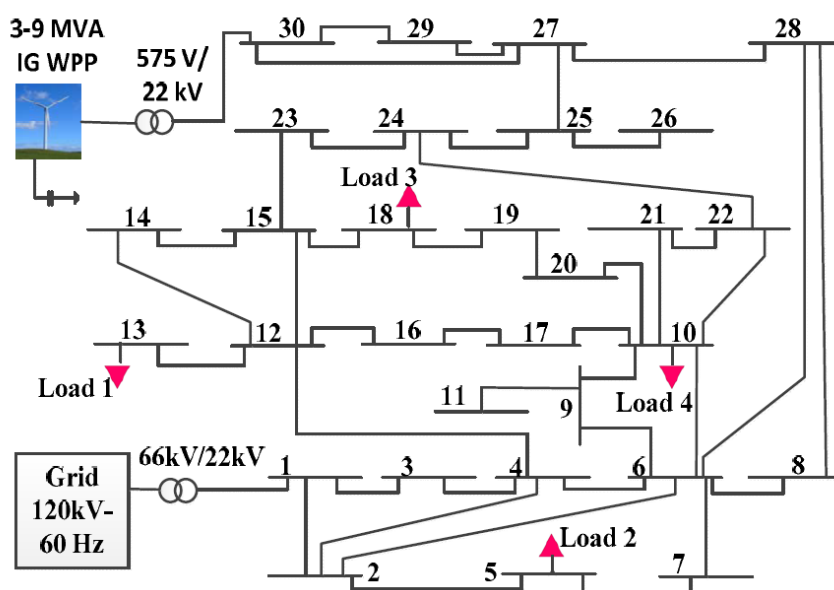
3.2.5 Δίκτυο Δοκιμών IEEE 30-Ζυγών

Ένα ακόμα δοκιμαστικό δίκτυο διανομής του IEEE που χρησιμοποιείται αρκετά για προσομοίωση δικτύων διανομής μέσης τάσης παρουσιάζεται στην [29] και είναι δίκτυο δοκιμών του IEEE, τα πλήρη δεδομένα του οποίου βρίσκονται εδώ [30].

Το δίκτυο αυτό θα χρησιμοποιηθεί κυρίως σε συνθήκες σχετικά χαμηλής διείσδυσης από διεσπαρμένη παραγωγή με κύριο αντικείμενο τη μελέτη της επίδρασης λόγω της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών προς την ωμική αντίσταση X/R όπως αναλύθηκε και στην υποενότητα 3.1.3. Το μονογραμμικό του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 3.19.

Στη δημοσίευση [29] γίνεται η ανάλυση για δυο περιπτώσεις. Αρχικά, σύνδεση μιας μόνο ανεμογεννήτριας και χαμηλή παραγωγή $P_{Glow} = 3$ MVA, και στη συνέχεια, σύνδεση και των τριών ανεμογεννητριών και υψηλή διείσδυση $P_{Ghigh} = 9$ MVA.

Γι' αυτές τις δυο συνθήκες παραγωγής εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια (Πίνακας 3.10), ένα για κάθε διαφορετική τιμή του λόγου X/R που εξετάζεται.

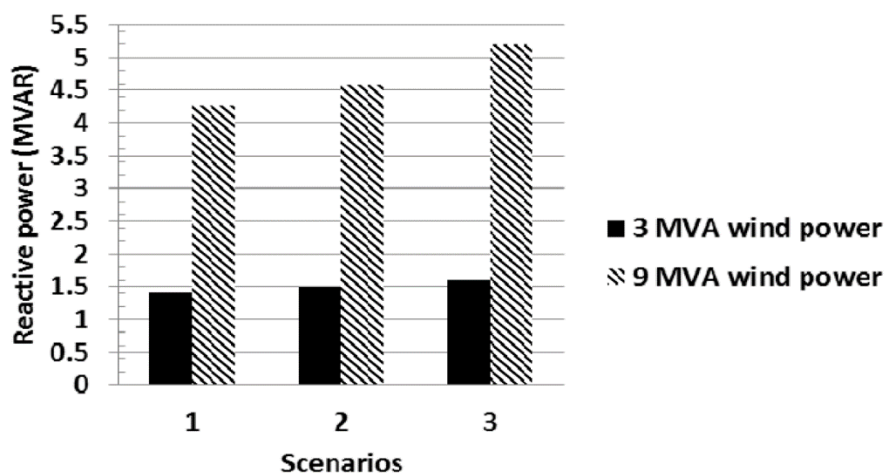


Σχήμα 3.19 Δίκτυο Δοκιμών IEEE 30 Ζυγών

Πίνακας 3.10 X/R για κάθε σενάριο που εξετάζει και $\Delta X/R(\%)$

Scenarios	1	2	3
X/R ratio	0.62	1.1	1.54
$\Delta X/R (\%)$	0	77.4	148

Για τα τρία σενάρια εξετάζεται αρχικά η επίδραση του λόγου X/R στην απορρόφηση άεργου ισχύος από τα αιολικά. Η άεργος ισχύς που μεταφέρεται από το δίκτυο διανομής προς το σημείο κοινής σύνδεσης των αιολικών στο ζυγό 30 του Σχήματος 3.19 (WPP) παρατηρείται ότι αυξάνεται με την αύξηση της παραγόμενης συνολικής ισχύος των ανεμογεννητριών. Παράλληλα παρατηρούμε αύξηση της απορρόφησης της αέργου ισχύος καθώς μεταβάλλεται και ο λόγος X/R στα τρία σενάρια. (Σχήμα 3.20)

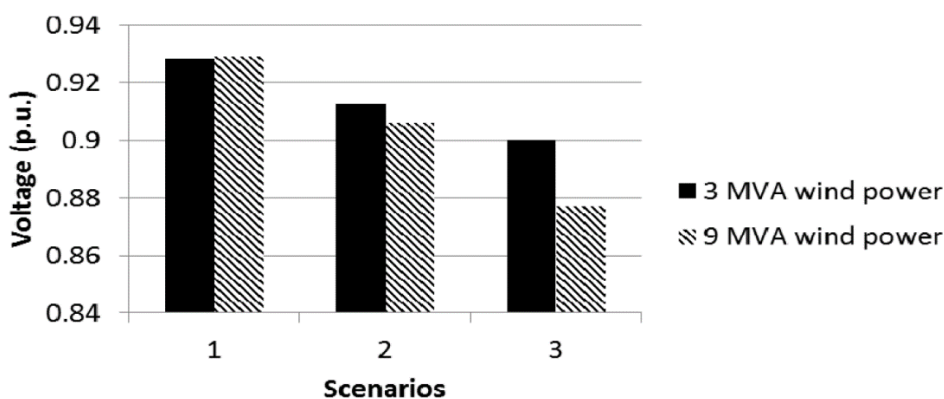


Σχήμα 3.20 Απορρόφηση Αέργου Ισχύος από τα Αιολικά

Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 3.20 οι μαύρες μπάρες δηλώνουν την σύνδεση ενός μόνο πάρκου με συνολική παραγωγή $P_{Glow} = 3 \text{ MVA}$ ενώ η ριγέ μπάρα δηλώνει σύνδεση και των τριών πάρκων με $P_{Ghigh} = 9 \text{ MVA}$.

Στην περίπτωση της χαμηλής παραγωγής (3 MVA) παρατηρείται μια μικρή αύξηση της απορρόφησης όταν αυξάνεται ο λόγος X/R στα τρία σενάρια, ενώ στην αυξημένη παραγωγή είναι αισθητά μεγαλύτερη.

Παράλληλα, για τα ίδια τρία σενάρια για τις τιμές του λόγου X/R, εξετάζεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης των αιολικών πάρκων. Η ανάλυση δείχνει ότι η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης θα μειωθεί με την αύξηση του λόγου X/R στα τρία σενάρια. Επίσης, φαίνεται ότι για την περίπτωση αυξημένης παραγωγής η μείωση της τάσης θα είναι μεγαλύτερη. Αυτό, οφείλεται στις αυξημένες ροές ισχύος που δημιουργούν μεγαλύτερες πτώσεις τάσεων κατά μήκος των γραμμών. Με την αύξηση του επαγωγικού μέρους των γραμμών στα τρία σενάρια αυτές οι πτώσεις γίνονται ακόμα μεγαλύτερες. (Σχήμα 3.21)



Σχήμα 3.21 Προφίλ Τάσης Στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης

Η παραγωγή από ΔΠ είναι σχετικά χαμηλή στο συγκεκριμένο δίκτυο αναλογικά με τα φορτία που τροφοδοτεί. Αυτό δικαιολογεί και τις χαμηλές τάσεις που εμφανίζονται. Πιο συγκεκριμένα, συνδέονται στο δίκτυο 3 μικρά αιολικά με μηχανές επαγωγής με ονομαστική ικανότητα παραγωγής 3MVA το κάθε αιολικό πάρκο. Στα μικρά αιολικά συνηθίζεται η χρήση μηχανών επαγωγής κυρίως λόγω μικρότερου κόστους. Ωστόσο, έχουν το μειονέκτημα ότι αδυνατούν αν ελέγξουν την άεργο ισχύ.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.11

Πίνακας 3.11 Βασικά Χαρακτηριστικά Γραμμής Δοκιμών IEEE 30 Ζυγών

Επίπεδο Τάσης	Υποσταθμός Διανομής (YT/MT)	X/R (γραμμών MT) 3 σενάρια			S_{Lsyn} (MVA)	$\cos\phi_L$	P_{Gsyn} (MW)
22kV (MT)	66/22 kV	0.62	1.1	1.54	41.23	0.98 επαγ.	3 έως 9

Ως συμπέρασμα, σ τη μελέτη πάνω στο συγκεκριμένο δίκτυο διανομής φαίνεται ότι μια αύξηση στο λόγο των γραμμών X/R επιδρά σημαντικά πάνω στις απαιτήσεις του δικτύου σε άεργο ισχύ καθώς και στην τάση των Ζυγών του δικτύου. Επίσης,

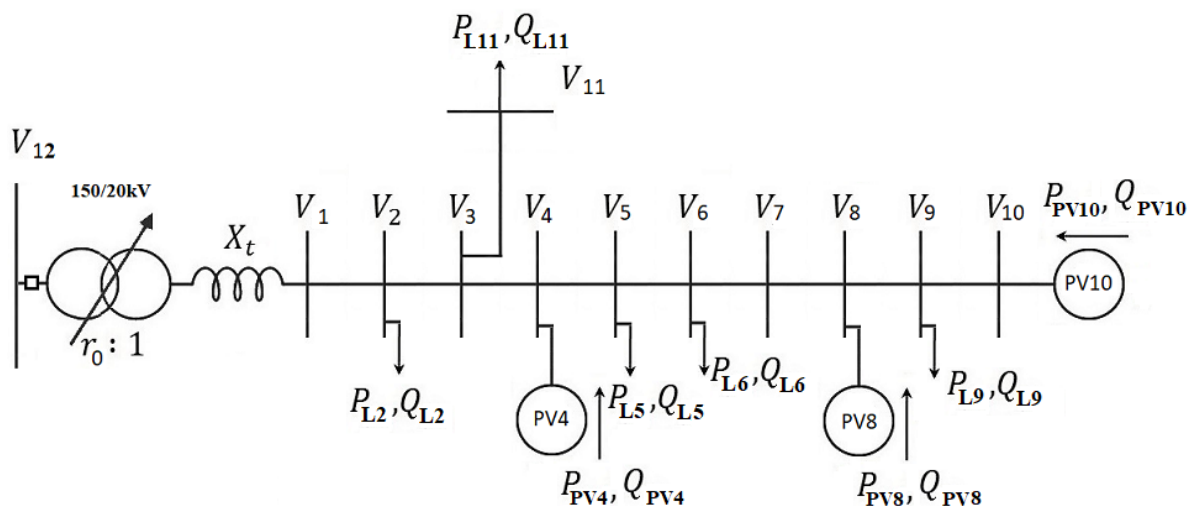
φαίνεται ότι σε ακόμα μεγαλύτερη διείσδυση από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής οι αποκλίσεις μεγαλώνουν.

Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι μικρός λόγος X/R αυξάνει τα επίπεδα της τάσης στο ΣΚΣ ωστόσο μεγάλος λόγος X/R ρίχνει την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης και δημιουργεί την ανάγκη για άεργο υποστήριξη. Όπως είναι λογικό οι αυξημένες ροές ισχύος που οφείλονται σε μεγαλύτερη εγκατεστημένη παραγωγή σε συνεργασία με υψηλές τιμές του λόγου X/R μπορεί να προκαλούν μεγάλες πτώσεις τάσεις και απώλειες στο δίκτυο, ωστόσο μπορεί να προσφέρουν και μεγάλες δυνατότητες ρύθμισης μέσω της αέργου ισχύος.

4

Προσομοίωση Γραμμής Διανομής Μέσης Τάσης

4.1 Δεδομένα Γραμμής Δοκιμών Μέσης Τάσης



Σχήμα 4.1 Εξεταζόμενο Δίκτυο Δοκιμών Μέσης Τάσης 11 Ζυγών

Με γνώμονα τα βασικά χαρακτηριστικά που διατυπώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο 3 αλλά και σύμφωνα με τις γραμμές διανομής που παρουσιάστηκαν από τη βιβλιογραφία, διαμορφώθηκε η δοκιμαστική γραμμή διανομής μέσης τάσης (MT) που φαίνεται στο (Σχήμα 4.1). Η γραμμή διανομής θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση που θα γίνει στην παρούσα εργασία.

Το επίπεδο της τάσης που επιλέχθηκε για τη γραμμή διανομής είναι τα 20kV μέσω μετασχηματιστή YT/MT 150kV/20kV 50MVA. Υπάρχει έτσι η δυνατότητα για μελέτη της επίδρασης που μπορεί να έχει η γραμμή διανομής στο ανάντη δίκτυο μεταφοράς. Παράλληλα, η επιλογή της μέσης τάσης στα 20kV γίνεται για να ταιριάζει στα ελληνικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης (MT).

Ο μετασχηματιστής με το Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος, δηλαδή το Ζυγό 1 του Σχήματος 4.1, που βρίσκεται από την πλευρά της Μέσης Τάσης. Η τιμή αναφοράς ρύθμισης του ζυγού 1 ορίζεται $V_{\text{set,LTC}} = 1$ α.μ. και το βήμα της λήψης $\Delta r = 0,00625$. Τα δεδομένα του Μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4.1 Δεδομένα Μετασχηματιστή Με ΣΑΤΥΦ

$V_{\text{set,LTC}}$ (αμ)	V_{max} (αμ)	V_{min} (αμ)	r_0 (αμ)	r_{min} (αμ)	r_{max} (αμ)	Δr (αμ)	V_{LB} (αμ)	V_{UB} (αμ)
1	1.05	0.95	1	0.9	1.1	0.00625	0.99375	1.00625

Η επιλογή του αγωγού μέσης τάσης του δικτύου έγινε με βάση τη ρεαλιστική προσέγγιση λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος.

Ο αγωγός ACSR-95 (Πίνακας 4.2) τα πλήρη στοιχεία του οποίου βρίσκονται στον εξής κατάλογο [31], που χρησιμοποιήθηκε είναι από τους πλέον διαδεδομένους εναέριους αγωγούς που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης.

Ο σχετικά υψηλός λόγος X/R όπως προαναφέρθηκε (Εν. 3.1.3), επηρεάζει τη ρύθμιση της τάσης μέσω της ρύθμισης της αέργου ισχύος.

Πίνακας 4.2 Στοιχεία Γραμμής ACSR-95

ACSR-95				
R(Ω/km)	X(Ω/km)	B(Mho/km)	Διατομή (mm ²)	Όριο Ρεύματος (A)
0,215	0,334	0,000003421	95	395

Τα μήκη των γραμμών του δικτύου του Σχήματος 4.1 δίνονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3 Μήκη Γραμμών Δικτύου Διανομής

Ζυγός	Ζυγός	L(km)
1	2	2,5
2	3	1,6
3	4	1,14
4	5	2,7
5	6	0,46
6	7	5
7	8	5,05
8	9	1,4
9	10	1,5
3	11	1,14

Οι σύνθετες αντιδράσεις διαμορφώνονται από τους Πίνακες 4.2 και 4.3 όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4 Σύνθετες Αντιδράσεις Γραμμών Δικτύου Διανομής προς Εξέταση

Γραμμές Διανομής με αγωγούς 95-ACSR				
Ζυγός	Ζυγός	R(Ω)	X(Ω)	B(Mho)
1	2	0,5375	0,8350	0,0000086
2	3	0,3440	0,5344	0,0000055
3	4	0,2451	0,3808	0,0000039
4	5	0,5805	0,9018	0,0000092
5	6	0,0989	0,1536	0,0000016
6	7	1,0750	1,6700	0,0000171
7	8	1,0858	1,6867	0,0000173
8	9	0,3010	0,4676	0,0000048
9	10	0,3225	0,5010	0,0000051
3	11	0,2451	0,3808	0,0000039

Στο δίκτυο του Σχήματος 4.1 προσομοιώνεται μόνο το πρωτεύον δίκτυο διανομής μέσης τάσης και όχι τα δευτερεύοντα δίκτυα που καταλήγουν στη χαμηλή τάση και στα οικιακά φορτία, κυρίως για λόγους απλότητας και διατήρησης του μεγέθους της προσομοίωσης. Τα φορτία τροφοδοτούνται από δευτερεύοντες γραμμές διανομής χαμηλής και θεωρούνται οικιακά φορτία.

Κατά συνέπεια η ημερήσια καμπύλη τους εμφανίζει διακυμάνσεις και απαιτεί ανάλογη διαχείριση λαμβάνοντας υπόψη και τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Τα φορτία του δικτύου (Σχήμα 4.1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5 Ονομαστικά Φορτία που τροφοδοτεί το Δίκτυο

Φορτία για ονομαστική τάση 20kV		
Ζυγός	P(MW)	Q(MVar)
2	0,78	0,18
5	3,6	0,72
6	3,6	0,72
9	4,8	0,78
11	0,75	0,9

Για τα φορτία, η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς που καταναλώνουν προσομοιώνεται ως σταθερή αγωγιμότητα, δηλαδή η κατανάλωση των φορτίων εξαρτάται από την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέονται, όπως παρουσιάστηκε και στην υποενότητα 3.1.4.

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται στη γραμμή διανομής του Σχήματος 4.1 θεωρούνται φωτοβολταϊκές μονάδες. Κατά συνέπεια, η παραγωγή τους εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ώρα της ημέρας οπότε χρειάζεται να εξεταστεί η αλληλεπίδραση με τις ημερήσιες καμπύλες φορτίου.

Η μέγιστη ενεργός ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων εμφανίζεται στον Πίνακα 4.6. Θεωρείται ότι οι φωτοβολταϊκές μονάδες παράγουν όλες την ίδια ισχύ μέσα στη μέρα (είναι δηλαδή συγχρονισμένες) καθώς οι καιρικές συνθήκες θεωρούνται ίδιες και για

τις τρεις θέσεις των φωτοβολταϊκών μονάδων, αφού οι αποστάσεις μεταξύ τους δε ξεπερνούν τα 7km.

Πίνακας 4.6 Εγκατεστημένη Διεσπαρμένη Παραγωγή

Ζυγός	P _{PV} (MW)
4	5
8	5
10	5

Συγκεντρωτικά για το εξεταζόμενο δίκτυο ισχύουν τα εξής:

1. Το δίκτυο βρίσκεται σε Μέση Τάση (MT)) στα 20kV και συνδέεται με τον άπειρο ζυγό μέσω μετασχηματιστή ΥΤ/MT 150/20kV ισχύος 50MVA με δυνατότητα ρύθμισης αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και αντίδραση βραχυκυκλώσεως $X_t = 0,2$ α.μ. .
2. Οι γραμμές διαμορφώθηκαν με αγωγούς ACSR-95 με χαρακτηριστικά $R = 0,215\Omega/\text{km}$, $X = 0,334\Omega/\text{km}$ και $B = 0,000003421\text{mho}/\text{km}$. Η αναλογία μεταξύ αντίδρασης και αντίστασης είναι $X/R = 1,553$, αναλογία που δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης μέσω της αέργου ισχύος σε ικανοποιητικό βαθμό. Το όριο ρεύματος των γραμμών είναι $I_{\text{lim}} = 395$ A. Για να υπάρχει ασφάλεια ότι δεν παραβιάζονται τα όρια ρεύματος των γραμμών στα ακραία σενάρια, χρησιμοποιείται διπλή γραμμή μεταξύ των ζυγών 1-2 και 2-3. Το δίκτυο εκτείνεται ακτινικά σε μήκος 22.49km
3. Το δίκτυο τροφοδοτεί 5 περιοχές με οικιακά φορτία μέσα από δευτερεύουσες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης. Σε πλήρες φορτίο και ονομαστική τάση καταναλώνουν συνολικά $P_L = 13,53$ MW και $Q_L = 3,3$ MVar. Τα φορτία λαμβάνονται ως σταθερές αγωγιμότητες, μεταβάλλοντας έτσι την ισχύ που καταναλώνουν ανάλογα με την τάση του Ζυγού στον οποίο συνδέονται.

Στο δίκτυο διανομής του Σχήματος 4.1 συνδέονται 3 μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες θεωρείται ότι έχουν ονομαστική ενεργό ισχύ 5MW η καθεμία. Οι μονάδες αρχικά θεωρείται ότι λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Για τις μονάδες και τους μετατροπείς που τις ελέγχουν έχει γίνει μια υπερδιαστασιολόγηση με την φαινόμενη ονομαστική ισχύ κάθε μονάδας να είναι ως και $S_{n,k} = 5,5\text{MVA}$. Ως ποσοστό του συνολικού φορτίου πρόκειται για μεγάλη διείσδυση από τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, αφού σε ονομαστική παραγωγή ενδέχεται να ξεπερνούν οριακά το φορτίο.

Τέλος, θεωρούμενα επιτρεπτά όρια τάσης που έχουν τεθεί από το διαχειριστή του συστήματος είναι $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης στον κάθε ζυγό.

4.1.1 Προσομοίωση Δοκιμαστικής Γραμμής Διανομής

Το περιβάλλον στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις είναι το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας Power World Simulator [10].

Στο πρόγραμμα έχει διαμορφωθεί η γραμμή διανομής του Σχήματος 4.1, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, με τον Ζυγό 12 να αποτελεί το ζυγό αναφοράς (Slack Bus) του συστήματος, ενώ οι υπόλοιποι ζυγοί, συμπεριλαμβανομένων των ζυγών στους οποίους συνδέεται η Διεσπαρμένη Παραγωγή, προσομοιώνονται ως Ζυγοί PQ, δηλαδή ζυγοί για τους οποίους είναι γνωστές η ενεργός και η άεργος ισχύς που καταναλώνουν ή εγχέουν.

Η λύση της ροής ισχύος γίνεται μέσω του λογισμικού προσομοίωσης, το οποίο βρίσκει μοναδική λύση για το σύστημα χρησιμοποιώντας την πλήρη μέθοδο Newton – Raphson.

Κατά τον υπολογισμό της λύσης των ροών φορτίου του δικτύου υπολογίζεται ταυτόχρονα από το πρόγραμμα και η θέση του ΣΑΤΥΦ όπως διαμορφώνεται με βάση την τιμή αναφοράς και τη νεκρή ζώνη που έχει οριστεί.

Όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν στο ανά μονάδα σύστημα έχουν ανοιχθεί σε βάση ισχύος $S_b = 50MVA$, ίση με αυτή του Μετασχηματιστή.

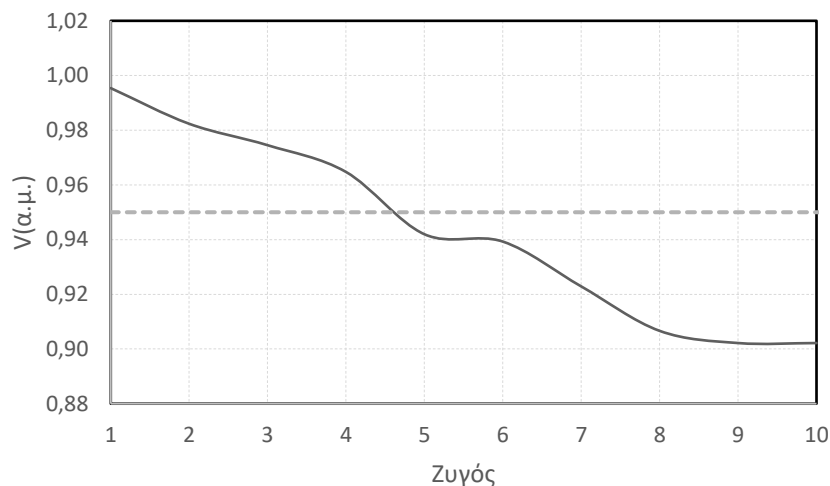
4.2 Σενάρια Φορτίου – Διεσπαρμένης Παραγωγής

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς του δικτύου θα εξετασθούν κάποια ακραία σενάρια Φορτίου – Διεσπαρμένης Παραγωγής ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της τάσης στους Ζυγούς της δοκιμαστικής γραμμής διανομής και πώς επηρεάζεται από τη μεγάλη διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής και από τις αντίστροφες ροές ισχύος που δημιουργούνται. Τα σενάρια αυτά είναι :

- Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή
- Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή
- Μειωμένο Φορτίο – Μειωμένη Παραγωγή

4.2.1 Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή

Αρχικά προσομοιώνεται η περίπτωση που τα φορτία καταναλώνουν το πλήρες φορτίο τους, ενώ η διεσπαρμένη παραγωγή βρίσκεται στο ελάχιστο, δηλαδή στο μηδέν. Το σενάριο αυτό είναι αρκετά πιθανό όταν η παραγωγή αποτελείται από φωτοβολταϊκές μονάδες, καθώς τις νυχτερινές ώρες είναι βέβαιο ότι θα υπάρχει μηδενική παραγωγή ενώ παράλληλα είναι πιθανό να παρατηρηθεί η αιχμή του φορτίου.



Σχήμα 4.2 Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής στην περίπτωση Μεγίστου Φορτίου – Μηδενικής Παραγωγής

Σε αυτό το σενάριο (Σχήμα 4.2) παρατηρείται μεγάλη πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής διανομής με την τάση στους περισσότερους ζυγούς να πέφτει κάτω από το επιθυμητό όριο $\pm 5\%$.

Οι ροές P_{12} και Q_{12} στο ζυγό 12 του συστήματος καθώς και η θέση που λαμβάνει το ΣΑΤΥΦ αυτόματα από την λύση στο πρόγραμμα προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ για Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή

P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r (αμ)
-12.436	-4.512	0.9875

Οι ροές ισχύος στο Ζυγό 12 εμφανίζονται με αρνητικό πρόσημο όταν έχουν κατεύθυνση από το ανάντη δίκτυο μεταφοράς προς τη γραμμή διανομής και θετικό όταν ρέουν αντίστροφα προς τη μεταφορά. Προφανώς, στην περίπτωση μέγιστου φορτίου και μηδενική παραγωγής η γραμμή διανομής απορροφά ισχύ από τη γραμμή μεταφοράς για να ικανοποιήσει τη ζήτηση των φορτίων. Επίσης, η τιμή του λόγου του ΣΑΤΥΦ μειώνεται για να διατηρηθεί ο Ζυγός 1 εντός της ζώνης ρύθμισης παρά τις πτώσεις τάσης.

Προφανώς, οι πιο απομακρυσμένοι ζυγοί από το Ζυγό 1 (από το Ζυγό 5 έως το Ζυγό 10), ο οποίος όπως αναφέρθηκε ρυθμίζεται μέσω του ΣΑΤΥΦ, εμφανίζουν αρκετά μεγάλες αποκλίσεις τάσης λόγω των σύνθετων αντιδράσεων των γραμμών που παρεμβάλλονται.

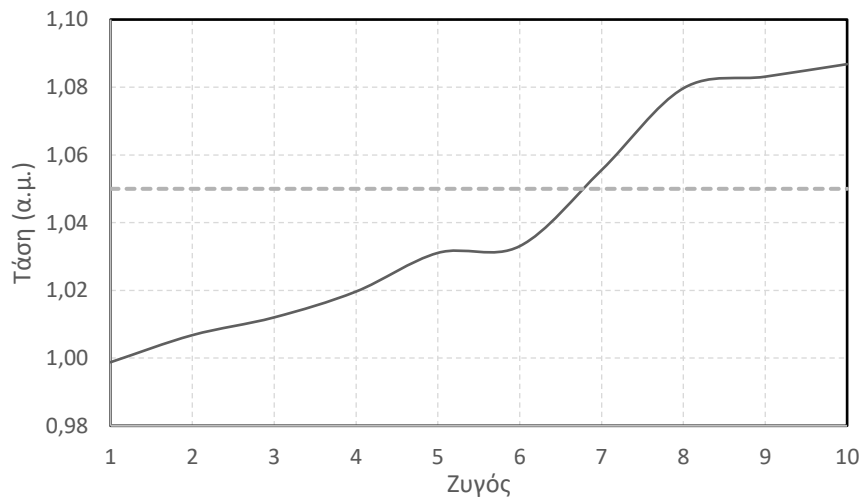
Στην περίπτωση αυτή προφανώς απαιτείται ρύθμιση των τάσεων.

4.2.2 Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή

Όπως διαπιστώθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η ραγδαία ανάπτυξη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερες εισροές ισχύος στα δίκτυα διανομής από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να γίνεται πολλές φορές συγκρίσιμη ή και μεγαλύτερη από το φορτίο.

Άρα η πιθανότητα για υπερτάσεις και αντίστροφη ροή ισχύος προς το δίκτυο της μεταφοράς αυξάνεται και η ρύθμιση της τάσης γίνεται πιο δύσκολη.



Σχήμα 4.3 Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής στην περίπτωση Μηδενικού Φορτίου – Μέγιστης Παραγωγής

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι τάσεις των ζυγών κατά μήκος της γραμμής διανομής του Σχήματος 4.1. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, η μεγάλη παραγωγή από τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής και η απουσία φορτίων θα οδηγήσει τη γραμμή διανομής σε ιδιαίτερα υψηλές υπερτάσεις. Παράλληλα, μαζί με τις υπερτάσεις, εμφανίζεται και αντίστροφη ροή ισχύος, δηλαδή ροές ενεργού και αέργου ισχύος που ρέουν από τη γραμμή διανομής προς τη γραμμή μεταφοράς. Οι ροές P_{12} και Q_{12} στο ζυγό 12 του συστήματος καθώς και η θέση που λαμβάνει το ΣΑΤΥΦ αυτόματα από την λύση στο πρόγραμμα προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ για Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή

P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r (αμ)
14.021	-2.280	0.9937

Προφανώς, στην περίπτωση μηδενικού φορτίου και μέγιστης παραγωγής η γραμμή διανομής εγχέει ισχύ προς τη γραμμή μεταφοράς αφού η παραγωγή είναι μεγάλη και δεν υπάρχει κατανάλωση από τα φορτία της γραμμής διανομής. Επίσης, η τιμή του

λόγου του ΣΑΤΥΦ μειώνεται για να διατηρηθεί ο Ζυγός 1 εντός της ζώνης ρύθμισης παρά τις πτώσεις τάσης που προκύπτουν.

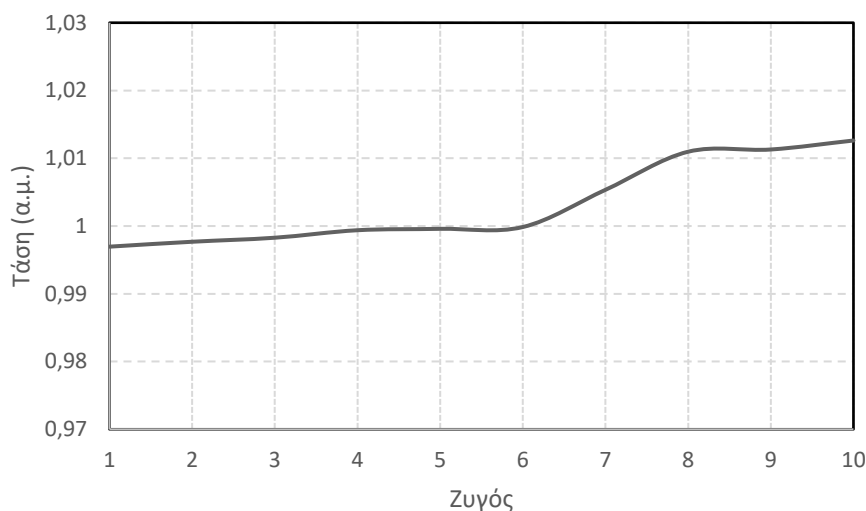
Το αποτέλεσμα είναι να οδηγηθούν οι τάσεις των ζυγών της γραμμής διανομής εκτός των ορίων $\pm 5\%$, και συγκεκριμένα στους απομακρυσμένους ζυγούς 7 έως και 10.

Στην περίπτωση αυτή προφανώς απαιτείται ρύθμιση των τάσεων αφού οι μεγάλες ανυψώσεις της τάσης και η ανάστροφη ροή ισχύος που δημιουργείται στο ακτινικό δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στη λειτουργία και στον εξοπλισμό εάν δεν ελεγχθούν με κατάλληλη ρύθμιση.

4.2.3 Μειωμένο Φορτίο – Μειωμένη Παραγωγή Λόγω Συννεφιάς

Στο συγκεκριμένο σενάριο ελαχιστοποιείται το φορτίο (20% της ονομαστικής τιμής) και συνδέονται και οι 3 μονάδες παραγωγής οπότε αναμένεται ανύψωση της τάσης. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι σε σχετικά υψηλά επίπεδα αφού η κάθε μονάδα παράγει 1,67 MW άρα η συνολική παραγωγή φτάνει τα 5 MW.

Στο Σχήμα 4.4, όπως και προηγουμένως, παρουσιάζεται το προφίλ των τάσεων των ζυγών, όπου παρατηρείται αύξηση της τάσης, χωρίς όμως να παρουσιάζονται υπερτάσεις, καθώς η παραγωγή από τις μονάδες Φ/Β έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη ενότητα 4.2.2.



Σχήμα 4.4 Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής στην περίπτωση Μηδενικού Φορτίου – Μειωμένης Παραγωγής

Παρατηρείται ότι στο συγκεκριμένο σενάριο το δίκτυο λειτουργεί ικανοποιητικά καθώς υπάρχει ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου. Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι P_{12} και Q_{12} στο ζυγό 12 του συστήματος καθώς και η θέση που λαμβάνει το ΣΑΤΥΦ αυτόματα από την λύση στο πρόγραμμα προσομοίωσης

Πίνακας 4.9 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ (Συννεφιά)

P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r (αμ)
2.240	-0.772	1

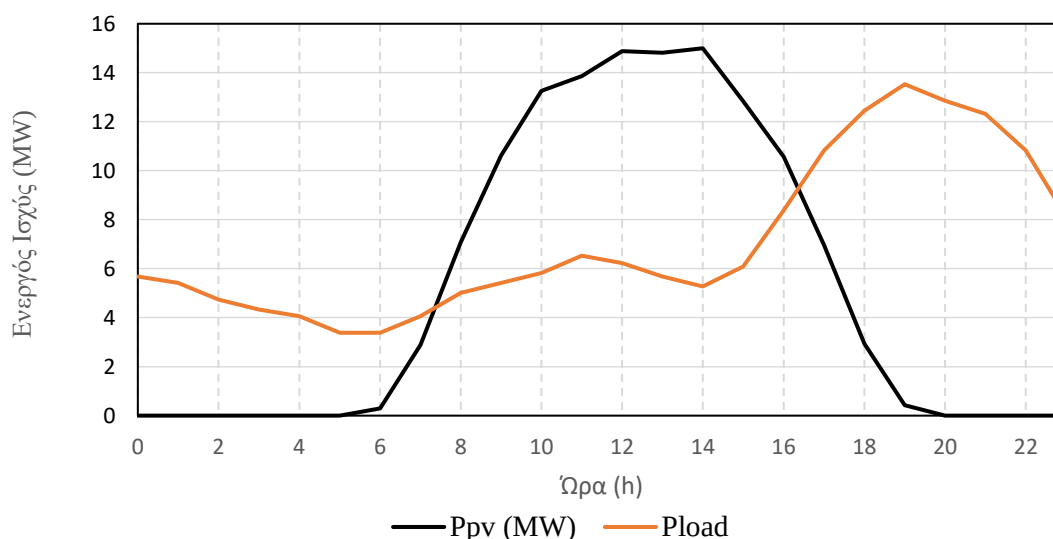
4.3 Ημερήσια Καμπύλη Φορτίου και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί το ημερήσιο προφίλ της τάσης των ζυγών του δικτύου του Σχήματος 4.1 λαμβάνοντας υπόψιν μια ημερήσια καμπύλη οικιακού φορτίου και μια ημερήσια καμπύλη παραγωγής από φωτοβολταϊκά.

Η θεώρηση γίνεται για μία μέρα με ηλιοφάνεια όπου τα φωτοβολταϊκά παράγουν την ονομαστική τους ισχύ, κατά την ώρα μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας (13:00-14:00). Η προσομοίωση με τις ημερήσιες καμπύλες γίνεται για τη περίπτωση μέγιστης διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής που φτάνει τα 15 MVA ενώ θεωρείται ότι οι μονάδες λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, οπότε δεν παράγουν καθόλου άεργο ισχύ. Η περίπτωση συνεισφοράς άεργου ισχύος θα μελετηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Για την υλοποίηση των ημερήσιων καμπυλών φορτίου και παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν καμπύλη πραγματικού οικιακού φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στη δημοσίευση [23] και καμπύλη παραγωγής από στοιχεία πραγματικής φωτοβολταϊκής παραγωγής που βρέθηκε μέσω της σελίδας [32].

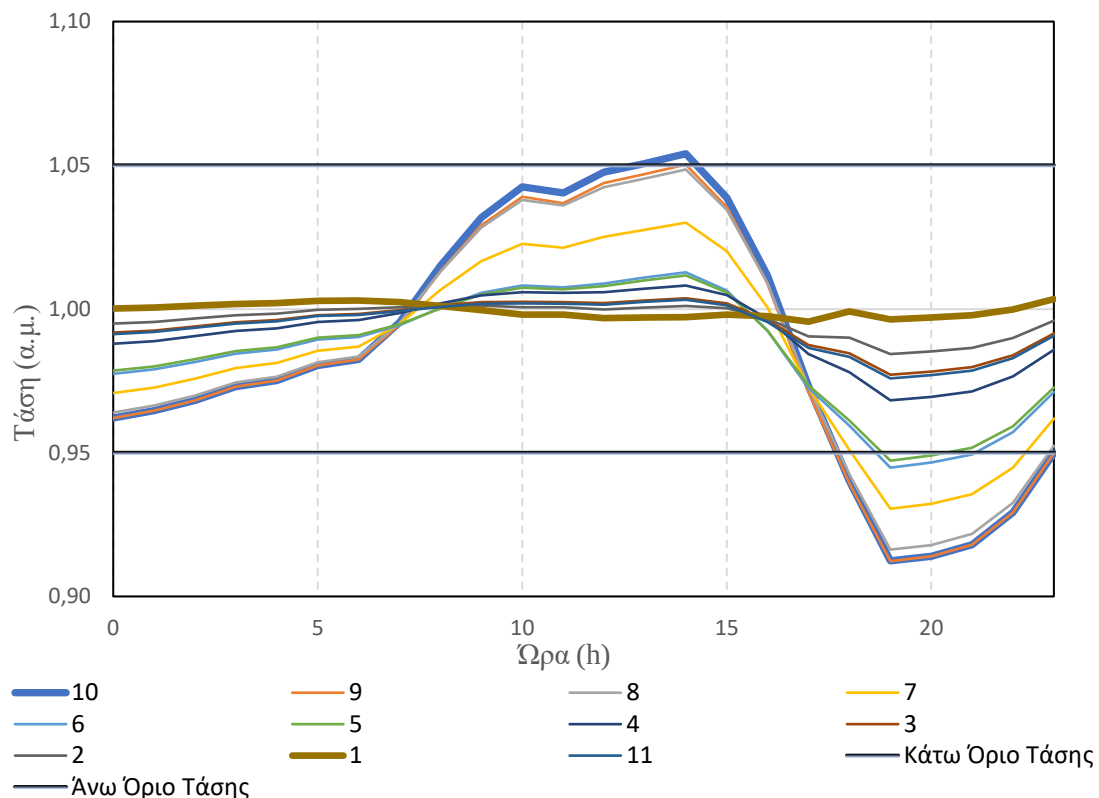
Στο Σχήμα 4.5 φαίνονται οι δύο καμπύλες συνολικού φορτίου και παραγωγής σε MW για κάθε ώρα της εξεταζόμενης ημέρας.



Σχήμα 4.5 Ημερήσιο Προφίλ Ενεργού Φορτίου και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε, οι πιο κρίσιμοι ζυγοί είναι αυτοί που βρίσκονται πιο μακριά από τον άπειρο ζυγό του συστήματος μεταφοράς στους οποίους όπως είναι λογικό παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες αποκλίσεις τάσης.

Στο διάγραμμα του Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι τάσεις στους ζυγούς καθώς και τα όρια μέγιστης και ελάχιστης τάσης που έχουν θεωρηθεί ($\pm 5\%$).



Σχήμα 4.6 Ημερήσιο Προφίλ Τάσεων Ζυγών Δικτύου Διανομής και Όρια Τάσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 υπάρχουν ζυγοί που παραβιάζουν τα όρια της τάσης μέσα στη μέρα (με πιο έντονες γραμμές εμφανίζονται οι ζυγοί 1 και 10). Παράλληλα, παρουσιάζεται το ημερήσιο προφίλ της τάσης του Ζυγού 1, ο οποίος ρυθμίζεται από το ΣΑΤΥΦ που τείνει να διατηρήσει την τάση του κοντά στην ονομαστική τιμή 1 α.μ.. Οπότε, η τάση του Ζυγού 1 διατηρείται εντός του εύρους της νεκρής ζώνης που καθορίζεται από τα όρια που ορίστηκαν στην υποενότητα 4.1 (Πίνακας 4.1).

4.4 Ρύθμιση Τάσης Δικτύου Διανομής

Όπως φάνηκε στην ημερήσια καμπύλη τάσης της προηγούμενης ενότητας (Σχήμα 4.6), η γραμμή διανομής αντιμετωπίζει τόσο ανυψώσεις τάσεων τις μεσημεριανές ώρες, όπου εμφανίζεται υψηλή παραγωγή από τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, όσο και μεγάλες πτώσεις τάσης τις βραδινές ώρες που τα φορτία είναι μέγιστα και η παραγωγή μηδενίζεται.

Για να βελτιωθεί το προφίλ της τάσης της γραμμής διανομής θα πρέπει να πραγματοποιηθούν κάποιες αλλαγές που εξετάζονται στη συνέχεια.

Αρχικά, θα αξιοποιηθεί η ικανότητα του ΣΑΤΥΦ να μεταβάλλει την τάση του δευτερεύοντος και η δυνατότητα να επιτευχθούν οι επιτρεπτές τιμές τάσης μόνο με την αλλαγή της τάσεως αναφοράς του Ζυγού 1.

Έπειτα, θα εξεταστεί η δυνατότητα ρύθμισης της αέργου ισχύος των φωτοβολταϊκών μονάδων που θα σταματήσουν να λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Η πρώτη περίπτωση αφορά στη μεταβολή του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ ανάλογα με την τιμή της ενεργού παραγωγής της μονάδας Διεσπαρμένης Παραγωγής, ενώ η δεύτερη

μέθοδος μεταβάλλει την άεργο παραγωγή ή απορρόφηση ανάλογα με την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται η Διεσπαρμένη Παραγωγή. Ο τρόπος λειτουργίας κάθε περίπτωσης παρουσιάζεται παρακάτω.

Οι αρχές λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ καθώς και των χαρακτηριστικών καμπυλών $\cos\phi(P)$ και $Q(V)$ μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής έχουν παρουσιαστεί στις Ενότητες 2.3.3 και 2.3.2.

4.4.1 Μεταβολή Τάσεως Αναφοράς (setpoint) του ΣΑΤΥΦ

Μια πρώτη προσέγγιση ρύθμισης της τάσης του Δικτύου θα γίνει με χρήση του ΣΑΤΥΦ και της δυνατότητας που δίνει να ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή εντός ενός ορισμένου ορίου.

Σε προηγούμενη κεφάλαιο εξηγήθηκε η λειτουργία του Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο, καθώς και η δυνατότητα του να μεταβάλλει την τιμή αναφοράς ρύθμισης του δευτερεύοντος τυλίγματος, δηλαδή στο Ζυγό 1 Μέσης Τάσης (Σχήμα 4.1).

Η δυνατότητα μεταβολής της τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ εφαρμόζεται αρχικά στα ακραία σενάρια που μελετήθηκαν παραπάνω ώστε να διαπιστωθεί εάν στο δίκτυο που προσομοιώθηκε, οι τάσεις των ζυγών Μέσης Τάσης (MT) μπορούν να ρυθμιστούν εντός των επιτρεπόμενων ορίων ή αν οι μεταβολές της τάσης από το επίπεδο του Μετασχηματιστή έως και τον τελευταίο σε απόσταση Ζυγό, είναι τόσο μεγάλες που δε μπορούν να καλυφθούν μέσα στο επιτρεπόμενο εύρος 0,95 – 1,05 α.μ..

Ο υπολογισμός για την εκτίμηση της ικανοποιητικής τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, $V_{set,LTC}$ γίνεται με τον εξής τρόπο.

Για κάθε πιθανό σενάριο παραγωγής – φορτίου υπολογίζονται μέσω του προγράμματος προσομοίωσης Power World Simulator οι ροές ισχύος με αρχική τιμή αναφοράς του ΣΑΤΥΦ την τιμή που εφαρμόστηκε και στις προηγούμενες ενότητες, δηλαδή, $V_1 = V_{set,LTC} = 1$ α.μ.,

Οπότε υπολογίζονται οι τάσεις που προκύπτουν σε κάθε ζυγό κατά μήκος της γραμμής διανομής. Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος των ορίων τάσης που έχουν τεθεί ως περιορισμοί, ώστε όλοι οι ζυγοί να βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων

$$0,95 \leq V_i \leq 1,05, \quad \text{όπου} \quad i = 1, \dots, 11 \quad (4.1)$$

Εφόσον, έστω και ένας ζυγός βρίσκεται εκτός των επιθυμητών ορίων, μεταβάλλεται η τιμή αναφοράς του ΣΑΤΥΦ κατά ένα βήμα και υπολογίζονται και πάλι οι ροές ισχύος και οι τάσεις V_{inew} των Ζυγών του συστήματος.

Δημιουργείται έτσι μια επαναληπτική μέθοδος υπολογισμού της κατάλληλης τιμής αναφοράς του ΣΑΤΥΦ με το βρόχο της επανάληψης να τερματίζει όταν όλες οι τάσεις των Ζυγών της γραμμής βρίσκονται εντός των ορίων, ή όταν εξαντληθεί η δυνατότητα ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ.

Πιο συγκεκριμένα, αν εμφανίζεται κατά μήκος της γραμμής μεγάλη υπέρταση, η εντολή που δίνεται μειώνει την τιμή αναφοράς του ΣΑΤΥΦ κατά $\Delta r = -0,0125$ α.μ. σε κάθε επανάληψη, ενώ στην περίπτωση της πτώσης τάσης αυξάνεται η τιμή κατά $\Delta r = +0,0125$ α.μ.. Η μεταβολή Δr θεωρήθηκε ίση με το εύρος νεκρής ζώνης ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ.

Παρακάτω παρουσιάζεται σε ψευδοκώδικα ο αλγοριθμικός υπολογισμός που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ σε κάθε περίπτωση.

όσο ($V_i > 1,05$ ή $V_i < 0,95$) και ($0,9 < r < 1,1$)

εάν ($V_i < 0,95$) τότε

$V_{setLTC} = V_{setLTC} + 0,0125;$

αλλιώς εάν ($V_i > 1,05$) τότε

$V_{setLTC} = V_{setLTC} - 0,0125;$

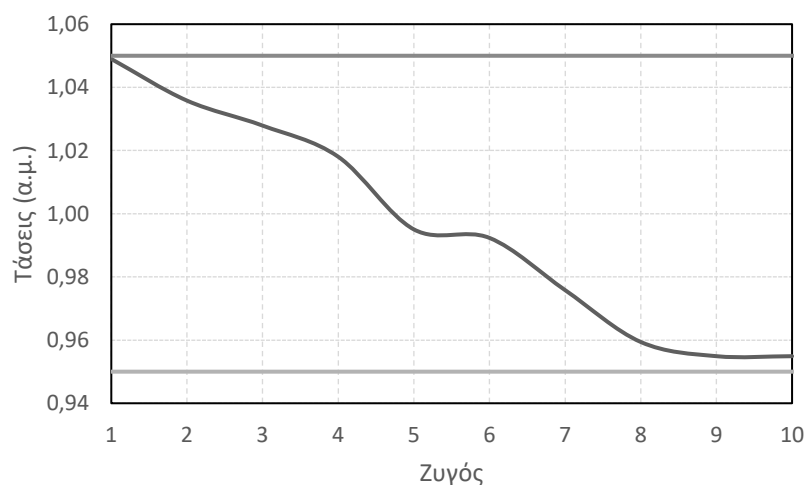
pws (Newton Raphson);

$V_i = V_{inew};$

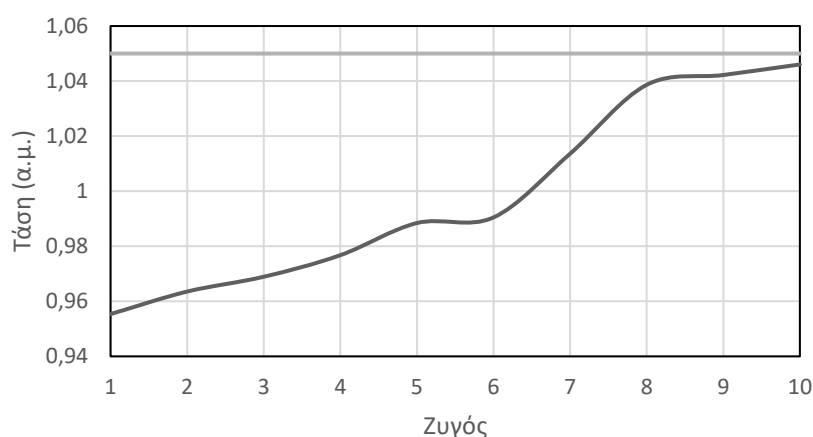
Τέλος

Εφόσον αλλάξει η τιμή αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ, τότε λύνεται και πάλι η ροή φορτίων με το ΣΑΤΥΦ να ρυθμίζεται εντός της νέας νεκρής Ζώνης που προκύπτει κάθε φορά, ώστε να υπολογίζεται εκ νέου ο πίνακας V_i που δίνει της τάσεις των Ζυγών της γραμμής διανομής.

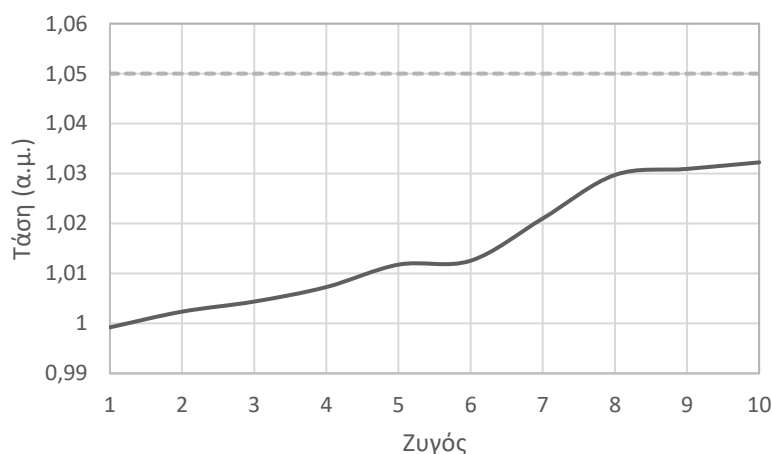
Η εφαρμογή στα ακραία σενάρια που μελετήθηκαν στην ενότητα 4.2 φαίνεται στα σχήματα (Σχήμα 4.7, Σχήμα 4.8 και Σχήμα 4.9) που εμφανίζονται παρακάτω:



Σχήμα 4.7 Τάσεις Ζυγών μετά την μεταβολή της Τιμής Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για Υψηλό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή



Σχήμα 4.8 Τάσεις Ζυγών μετά την μεταβολή της Τιμής Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή



Σχήμα 4.9 Τάσεις Ζυγών μετά την μεταβολή της Τιμής Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για Μηδενικό Φορτίο – Μειωμένη Παραγωγή Λόγω Συννεφιάς

Οι ροές P_{12} και Q_{12} στο ζυγό 12 του συστήματος καθώς και η θέση μετά τη ρύθμιση που λαμβάνει το ΣΑΤΥΦ αυτόματα από την λύση στο πρόγραμμα προσομοίωσης για κάθε σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10.

Πίνακας 4.10 Ροές Ισχύος P_{12} και Q_{12} και λόγος r του ΣΑΤΥΦ για τα 3 σενάρια μετά τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ

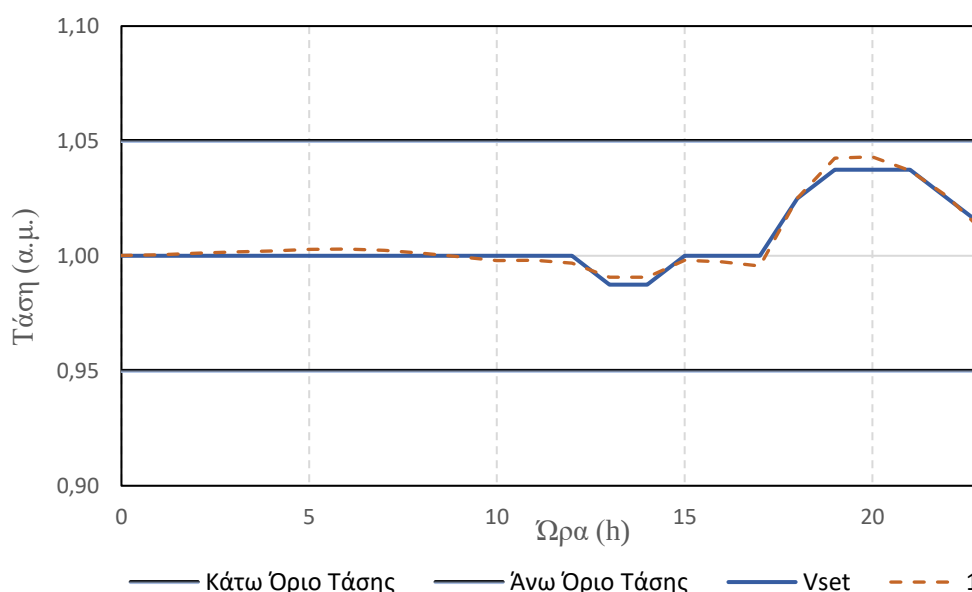
Σενάριο	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	$V_{set,LTC}$ (αμ)
Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή	-13.798	-5.006	0.9375	1.05
Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή	13.942	-2.472	1.0375	0.95
Μειωμένο Φορτίο – Μειωμένη Παραγωγή	2.240	-0.772	1	1

Παρατηρείται ότι μετά τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς για το Ζυγό 1 του Σχήματος 4.1, στο πρώτο σενάριο η απορρόφηση ενεργού ισχύος P_{12} καθώς και της άεργου Q_{12}

αυξάνεται, όπως είναι λογικό, αφού οι τάσεις των ζυγών αυξάνονται με συνέπεια να αυξηθεί και η κατανάλωση των φορτίων του δικτύου διανομής. Στα υπόλοιπα σενάρια οι μεταβολές είναι μικρές και οφείλονται κυρίως στις μικρές διαφορές απωλειών που εμφανίζονται μετά τη ρύθμιση.

Όπως φάνηκε παραπάνω, ακόμα και στα ακραία σενάρια το δίκτυο είναι δυνατόν να ρυθμιστεί εντός των επιθυμητών ορίων, δηλαδή οι μεταβολές της τάσης κατά μήκος της γραμμής να μην ξεπερνούν τα άνω και κάτω όρια τάσης με την κατάλληλη ρύθμιση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Στη συνέχεια, θα εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος ρύθμισης τάσης του δικτύου στην ημερήσια καμπύλη παραγωγής και φορτίου.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.10 εμφανίζεται η τάση αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ (μπλε συμπαγής γραμμή) όπως διαμορφώνεται μέσα στη μέρα καθώς και η τάση του Ζυγού 1 (με διακεκομμένη πορτοκαλί γραμμή), που θα πρέπει να βρίσκεται πάντα εντός της νεκρής ζώνης που ορίζει η μεταβαλλόμενη πλέον τιμή αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ (setpoint).

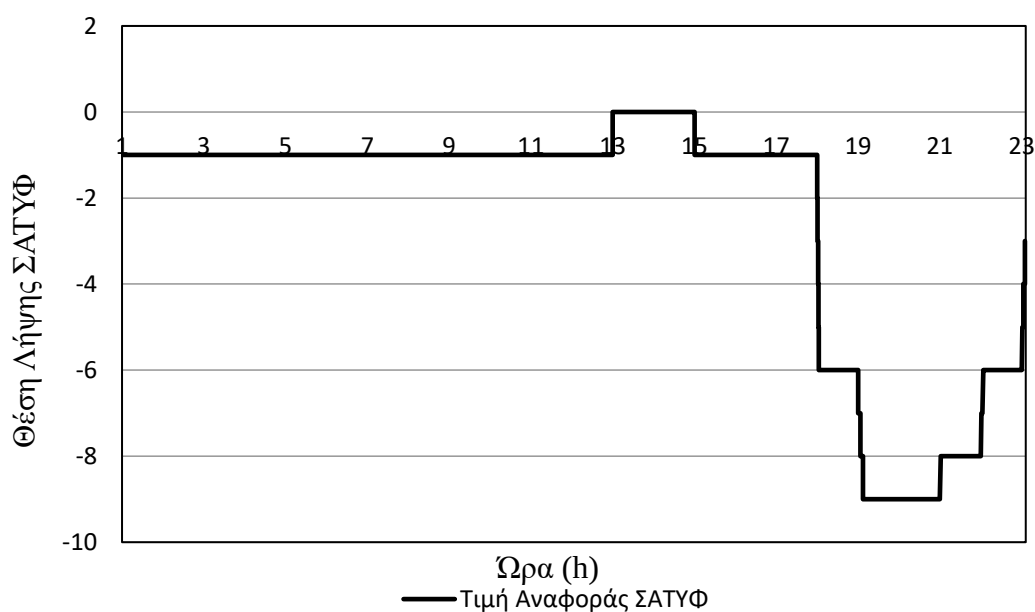


Σχήμα 4.10 Τιμή Αναφοράς Ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ V_{setLTC} (όπως διαμορφώνεται μέσα στη μέρα (μπλε γραμμή) και τάση Ζυγού 1 (πορτοκαλί γραμμή)

Οι τιμές του Σχήματος 4.10 φαίνονται αναλυτικά μέσα στην ημέρα στον Πίνακα 4.11, ενώ στο παρακάτω Σχήμα 4.11 φαίνεται η μεταβολή της θέσης λήψης του ΣΑΤΥΦ σύμφωνα με την τάση αναφοράς.

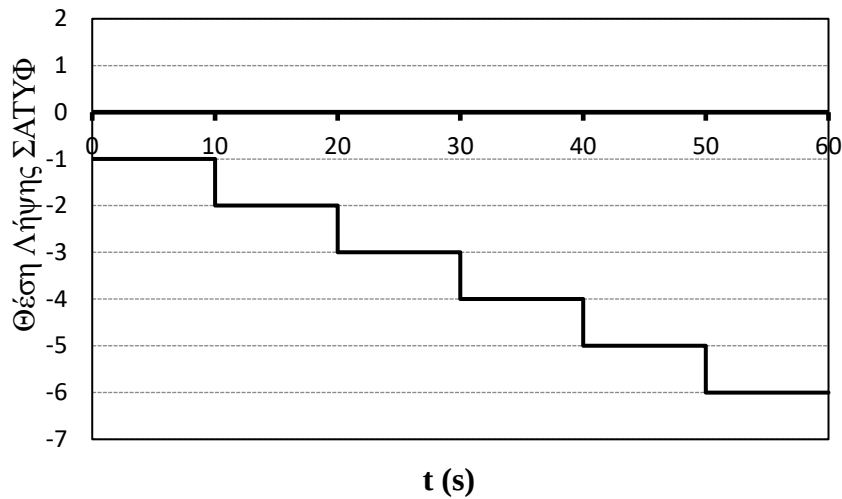
Πίνακας 4.11 Τάση Αναφοράς ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα

Ωρα (h)	$V_{\text{set,LTC}}$	Ωρα (h)	$V_{\text{set,LTC}}$
0	1	12	1
1	1	13	0,9875
2	1	14	0,9875
3	1	15	1
4	1	16	1
5	1	17	1
6	1	18	1,025
7	1	19	1,0375
8	1	20	1,0375
9	1	21	1,0375
10	1	22	1,025
11	1	23	1,0125



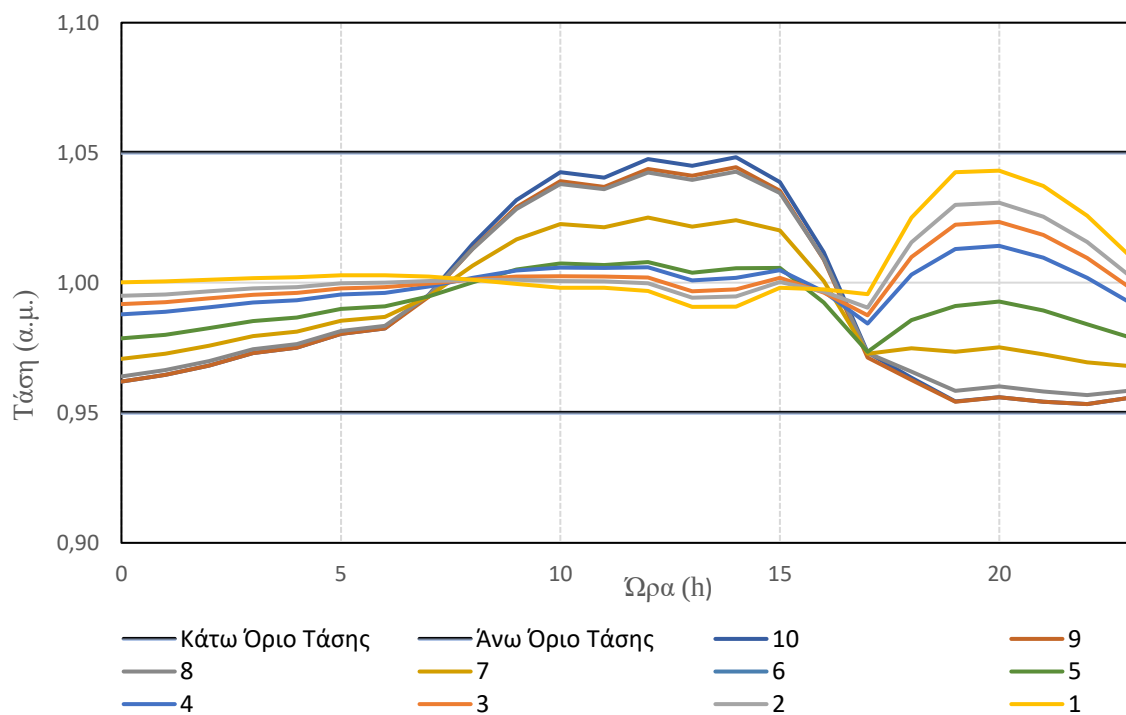
Σχήμα 4.11 Αλλαγές Θέσης ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα μετά την εφαρμογή ρύθμισης τάσης

Το ΣΑΤΥΦ αλλάζει θέση διακριτά περνώντας πάντα από τις ενδιάμεσες θέσης, μέχρι να φτάσει στην επιθυμητή τιμή τάσης αναφοράς ο Ζυγός 1. Η κάθε μεταβολή θέσης διαρκεί 10s με αποτέλεσμα να χρειάζονται κάποια δευτερόλεπτα για να ολοκληρωθεί η ρύθμισης. Συγκεκριμένα, στις 18:00 το ΣΑΤΥΦ αλλάζει ακαριαία 5 θέσεις, χρειάζεται δηλαδή 50 s για να ολοκληρωθεί η μετάβαση στην επιθυμητή τάσης αναφοράς. Σε μικρότερη κλίμακα αυτό φαίνεται και στο σχήμα



Σχήμα 4.12 Αλλαγές Θέσης ΣΑΤΥΦ στις 18:00 με χρόνο αλλαγής θέσης $t = 10$ s

Οπότε, τελικά προκύπτει το προφίλ της τάσης για τους Ζυγούς V_i όπως παρουσιάζονται και στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 4.13)



Σχήμα 4.13 Ημερήσιο Προφίλ Τάσης Ζυγών έπειτα από την Εφαρμογή Προγραμματισμένης Μεταβολής της Τιμής Αναφοράς V_{setLTC} του ΣΑΤΥΦ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13, η ρύθμιση της τάσης με τη μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ καταφέρνει να διατηρήσει όλους τους Ζυγούς εντός των επιτρεπτών ορίων τάσης.

Φαίνεται ότι τις απογευματινές ώρες, όπου και εμφανίζεται σημαντική πτώση τάσης, η τάση του Ζυγού 1 αυξάνεται σημαντικά, καθώς είναι και ο ζυγός που ρυθμίζεται από το ΣΑΤΥΦ.

Ενώ το αποτέλεσμα είναι θετικό από την πλευρά ρύθμισης της τάσης, αυτή η μέθοδος αναγκάζει το ΣΑΤΥΦ να μεταβάλλει τις λήψεις του μέσα στη μέρα, ειδικά όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά παραγωγής και φορτίου από μία ώρα στην επόμενη, όπως συμβαίνει στις 18:00 και φαίνεται στο Σχήμα 4.12.

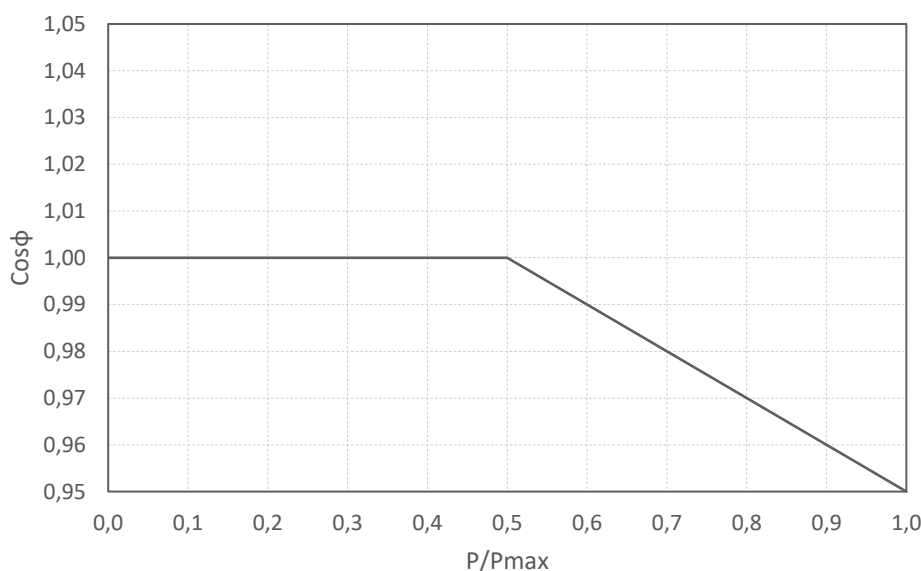
Στη συνέχεια θα εξεταστούν άλλες μέθοδοι ρύθμισης της τάσης του δικτύου διανομής ώστε να συγκριθούν τόσο στο επίπεδο ρύθμισης της τάσης, όσο και στο κατά πόσο φθείρουν τον εξοπλισμό του δικτύου.

4.4.2 Χρήση Χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$ για τα Φ/B

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 2.3.2), η χαρακτηριστική καμπύλη $\cos\phi(P)$ αποτελεί μια μέθοδο αντιμετώπισης της ανύψωσης της τάσης από τις φωτοβολταϊκές μονάδες.

Πιο συγκεκριμένα, η χαρακτηριστική ορίζει στη μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής την οποία ελέγχει να απορροφά άεργο ισχύ, όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός ισχύς, εφόσον τότε είναι πιθανότερη η ύπαρξη προβλήματος ανύψωσης τάσης.

Με βάση τα πιο πρόσφατα πρότυπα και τις βιβλιογραφικές αναφορές που εξετάστηκαν στην Ενότητα , διαμορφώθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη $\cos\phi(P)$ του Σχήματος 4.14, η οποία θα εφαρμοστεί στην ημερήσια καμπύλη παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ώστε να εξεταστεί η επίδραση που έχει αυτή η μέθοδος περιορισμού υπερτάσεων στο ημερήσιο προφίλ της τάσης.



Σχήμα 4.14 Χαρακτηριστική Καμπύλη $\cos\phi(P)$

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.14, ο συντελεστής ισχύος σύμφωνα με τον οποίο θα λειτουργήσει ο αναστροφέας των φωτοβολταϊκών μονάδων καθορίζεται από την παραγόμενη ισχύ P_{PV} κάθε μίας από τις τρεις μονάδες.

Πιο συγκεκριμένα, όταν η παραγόμενη ισχύς του κάθε πάρκου ξεπεράσει το μισό της ονομαστικής, δηλαδή,

$$P_{rel} = \frac{P}{P_{Max}} = 0,5 \quad (4.2)$$

τότε, ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται γραμμικά και να γίνεται χωρητικός (απορρόφηση αέργου ισχύος). Με αυτό τον τρόπο η διεσπαρμένη παραγωγή αρχίζει να απορροφά ισχύ σύμφωνα με τη σχέση

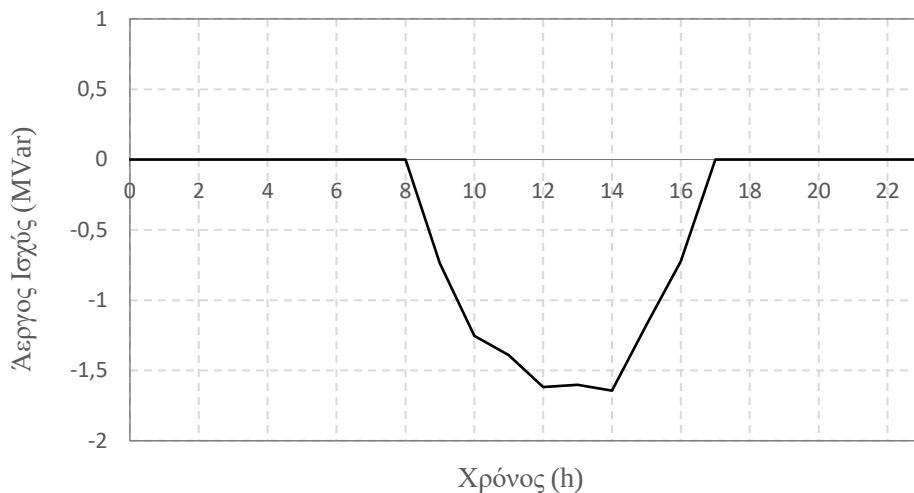
$$Q = -P \tan(\cos^{-1} \varphi) \quad (4.3)$$

Όπου ο συντελεστής ισχύος ακολουθεί τη σχέση :

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= 1, \quad \frac{P}{P_{max}} \leq 0,5 \\ \cos \varphi &= -\frac{1}{10} \left(\frac{P}{P_{max}} \right) + 1,05, \quad 0,5 \leq \frac{P}{P_{max}} \leq 1,0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Βάση των παραπάνω σχέσεων (4.3) και (4.4) οι φωτοβολταϊκές μονάδες θα απορροφούν ισχύ μέσα στη μέρα η οποία θα εξαρτάται από την ενεργό παραγωγή τους. Όπως προαναφέρθηκε τα Φ/Β πάρκα είναι σχετικά κοντά μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι καμπύλες παραγωγής άρα και αέργου ισχύος να ταυτίζονται.

Το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζεται, όπως και πριν, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος, δηλαδή την τάση του Ζυγού 1 εντός της νεκρής ζώνης $1 \pm 0,00625$ (Πίνακας 4.1).



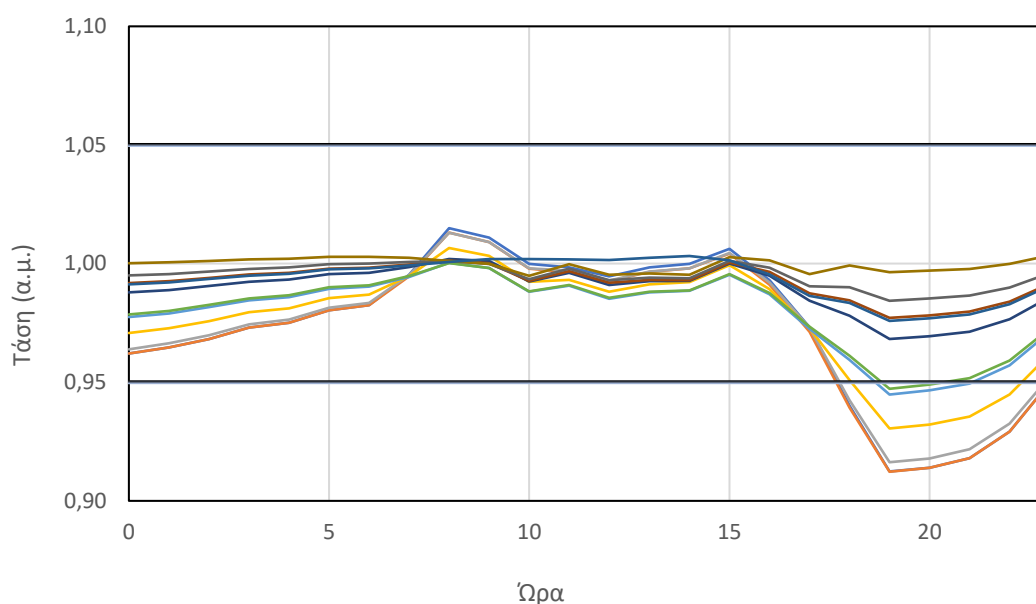
Σχήμα 4.15 Ημερήσια Απορρόφηση Αέργου Ισχύος (MVar) από τις μονάδες ΔΠ βάση της χαρακτηριστικής $\cos \varphi(P)$

Η ημερήσια προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης Power World Simulator με τους Ζυγούς 4,8 και 10 να χαρακτηρίζονται ως Ζυγοί PQ λαμβάνοντας τις τιμές για την αέργου ισχύ που προκύπτουν στο παραπάνω Σχήμα 4.15 βάση των σχέσεων (4.3) και (4.4) και της παραγωγής P_k του Σχήματος 4.5.

Με βάση αυτή την απορρόφηση Q_k όπως προέκυψε από την χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ στις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, υπολογίζεται εκ νέου το προφίλ της τάσης των ζυγών για τις ίδιες ημερήσιες καμπύλες παραγωγής και φορτίου του Σχήμα 4.5. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16, με τη μέθοδο αυτή μειώνεται η τάση τις ώρες μεγάλης φωτοβολταϊκής παραγωγής που η χαρακτηριστική καμπύλη εφαρμόζεται, αφού τότε οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής απορροφούν άεργο ισχύ.

Οι τάσεις για τις ώρες 9:00 – 16:00 βρίσκονται πλέον όλες εντός των επιθυμητών ορίων και συγκεκριμένα πολύ κοντά στην τιμή 1 α.μ..

Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν προσφέρει ρύθμιση για τις ώρες 18:00 – 22:00, όπου εμφανίζονται μεγάλες πτώσεις τάσης.



Σχήμα 4.16 Ημερήσιο Προφίλ Τάσεις Ζυγών Δικτύου Διανομής και Όρια Τάσης μετά την εφαρμογή της καμπύλης $\cos\phi(P)$

Άρα, ενώ αντιμετωπίζονται με επιτυχία οι ανυψώσεις τάσης για τις μεσημεριανές ώρες, οι μεγάλες πτώσεις που εμφανίζονται τις βραδινές ώρες δεν αντιμετωπίζονται και θα χρειαστεί πάλι ρύθμιση της τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ όπως γίνεται στη ενότητα 4.4.1.

4.4.3 Χρήση Χαρακτηριστικής $Q(V)$ για τα Φ/B

Όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενη ενότητα (Εν.2.3.3), με την υλοποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης $Q(V)$ η άεργος ισχύς της Διεσπαρμένης Παραγωγής εξαρτάται από την τάση που μετρείται στους ακροδέκτες της.

Πιο συγκεκριμένα, η χαρακτηριστική καμπύλη ρύθμισης της τάσης $Q(V)$ καλεί τους μετατροπείς της Διεσπαρμένης Παραγωγής να απορροφούν άεργο ισχύ, όταν η τάση στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ) είναι μεγαλύτερη από κάποιο άνω όριο, και αντίστοιχα να παράγουν άεργο ισχύ όταν η τάση στο ΣΚΣ είναι μικρότερη από

κάποιο κάτω όριο τάσης. Επίσης, ορίζεται μια νεκρή ζώνη εντός της οποίας οι μονάδες δε χρειάζεται να συνεισφέρουν σε άεργο υποστήριξη για τη διατήρηση της τάσης.

Με βάση τα πιο πρόσφατα πρότυπα και τις βιβλιογραφικές αναφορές που εξετάστηκαν στην ενότητα 2.3.3, διαμορφώθηκε η παρακάτω χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$ (Σχήμα 4.17), η οποία θα εφαρμοστεί στην ημερήσια καμπύλη ώστε να εξεταστεί η επίδραση που έχει στο ημερήσιο προφίλ τις τάσης.

Για να οριστεί πλήρως η καμπύλη $Q(V)$, πρέπει να οριστούν οι εξής παράμετροι:

- Το εύρος της νεκρής ζώνης που ορίζεται εντός του διαστήματος V_{dl} και V_{du}
- Η μέγιστη και η ελάχιστη άεργος υποστήριξη, Q_{max} και Q_{min} αντίστοιχα, που μπορεί να συνεισφέρει κάθε μετατροπέας, όπως προκύπτει από το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης (μέγιστο ρεύμα).
- Η τάσεις V_{min} και V_{max} για τις οποίες απαιτείται η μέγιστη και η ελάχιστη άεργος υποστήριξη αντίστοιχα
- Από τις παραπάνω παραμέτρους ορίζονται οι κλίσεις λ^+ και λ^- για τις ράμπες τάσης - αέργου ισχύος που τελικά ακολουθεί ο μετατροπέας της μονάδας Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Για τη συγκεκριμένη γραμμή διανομής οι μετατροπείς των μονάδων ακολουθούν την χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$ η οποία προκύπτει με βάση τις εξής παραμέτρους που ορίζουν το εύρος ζώνης, την μέγιστη και ελάχιστη άεργο καθώς και μέγιστη και ελάχιστη τάση στους ζυγούς όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.12:

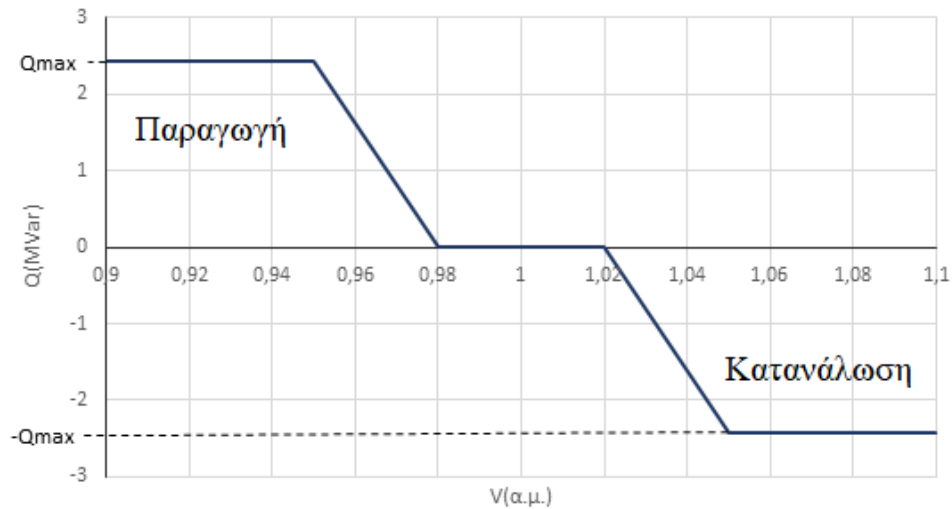
Πίνακας 4.12 Δεδομένα Παραμέτρων Χαρακτηριστικής Καμπύλης $Q(V)$

$V_{dl}(\alpha\mu)$	$V_{du}(\alpha\mu)$	Q_{max} (MVar)	Q_{min} (MVar)	V_{min} (αμ)	V_{max} (αμ)
0,98	1,02	2,42	-2,42	0,95	1,05

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12 προκύπτει η τμηματικά γραμμική συνάρτηση (4.5) που δίνει την χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$

$$\begin{aligned}
 Q_{inj} &= Q_{min} & 0,90 \leq V_{PCC} \leq 0,95 \\
 Q_{inj} &= Q_{max} - \lambda (V_k - V_{min}), & 0,95 \leq V_{PCC} \leq 0,98 \\
 Q_{inj} &= 0, & 0,98 \leq V_{PCC} \leq 1,02 \\
 Q_{inj} &= -\lambda (V_k - V_{max}), & 1,02 \leq V_{PCC} \leq 1,05 \\
 Q_{inj} &= Q_{max} & 1,05 \leq V_{PCC} \leq 1,10
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Βάση των παραπάνω παραμέτρων προκύπτει και η καμπύλη του Σχήμα 4.17



Σχήμα 4.17 Χαρακτηριστική Καμπύλη $Q(V)$

4.4.4 Εφαρμογή Χαρακτηριστικής $Q(V)$ στην ημερήσια καμπύλη

Η χαρακτηριστική $Q(V)$ του Σχήματος 4.17 υλοποιείται για την ημερήσια καμπύλη φορτίου παραγωγής που εφαρμόστηκε και προηγουμένως (Σχήμα 4.5), ώστε να εξεταστεί η συμβολή στη ρύθμιση της τάσης.

Όταν η γραμμή αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή μονάδα είναι πιο εύκολο να γίνει η ρύθμιση μέσω της $Q(V)$ χαρακτηριστικής καθώς ρυθμίζεται η τάση ενός μόνο ζυγού. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, η γραμμή διανομής τροφοδοτείται από 3 μονάδες με αποτέλεσμα να γίνεται πιο δύσκολη η ρύθμιση. Αυτό συμβαίνει διότι η μεταβολή της τάσης του ενός ζυγού επηρεάζει τις τάσεις των υπολοίπων ζυγών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, έπειτα από τη ρύθμιση κάθε μονάδας να αλλάζει η λύση των άλλων δυο πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη.

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος υπολογισμού της $Q(V)$ χαρακτηριστικής για κάθε μονάδα σε κάθε ώρα της ημέρας. Ο αλγόριθμος αποτελείται από μια επανάληψη η οποία τερματίζει όταν και οι τρεις μονάδες έχουν κάνει σωστή ρύθμιση που βρίσκεται πάνω στην καμπύλη $Q(V)$.

Στον αλγόριθμο οι τάσεις V_i αποτελούν τις τάσεις των ζυγών 4,8 και 10 ενώ Q_i είναι η άεργος ισχύς κάθε μονάδας στους ίδιους ζυγούς του Σχήμα 4.1, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην διαδικασία $PWS(V_i, Q_i)$ η οποία δίνει τη λύση των ροών ισχύος μέσω του προγράμματος Power World Simulator. Στη συνέχεια εξετάζεται η τάση που προκύπτει για κάθε ζυγό και εφαρμόζεται η καμπύλη $Q(V)$ του Σχήμα 4.17. Η επανάληψη συνεχίζεται μέχρι τη σύγκλιση των Q_i , Q_{set} , οπότε και υπολογίζονται οι τιμές της τάσης και της άεργου ισχύος για κάθε ώρα της μέρας. Η ρύθμιση του ΣΑΤΥΦ γίνεται αυτόματα κατά τη διαδικασία $PWS(V_i, Q_i)$.

$$V_i = 0; Q_i = 0; Q_{set} = 0;$$

Αρχή επανάληψης

$$Q_i = \frac{Q_i + Q_{set}}{2};$$

$$PWS(V_i, Q_i);$$

εάν $V_i < 0,95$

$$Q_{set} = Q_{max};$$

αλλιώς εάν $0,95 \leq V_i < 0,98;$

$$Q_{set} = Q_{max} - \lambda (V_i - V_{min});$$

αλλιώς εάν $0,98 \leq V_i < 1,02;$

$$Q_{set} = 0;$$

αλλιώς εάν $1,02 < V_i \leq 1,05;$

$$Q_{set} = -\lambda (V_i - V_{Q_{max}});$$

αλλιώς εάν $V_i > 1,05;$

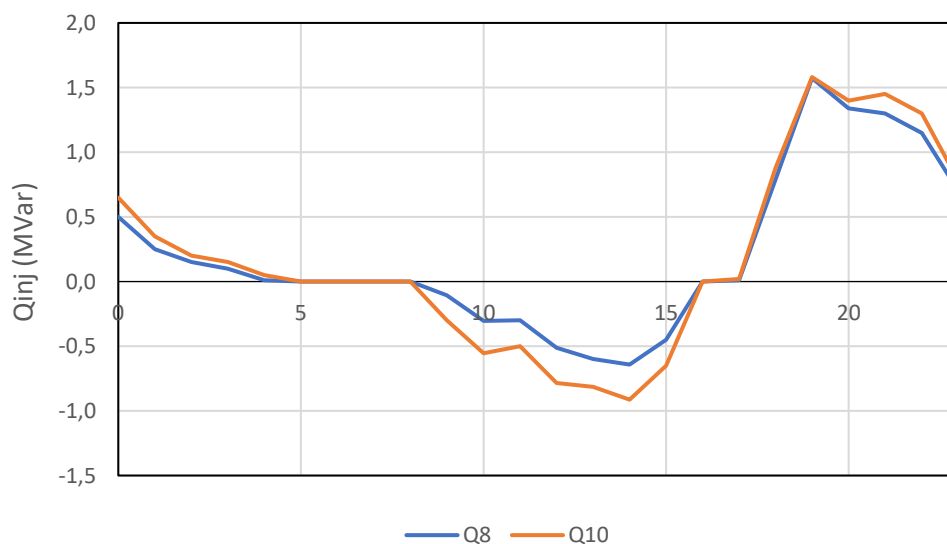
$$Q_{set} = Q_{min};$$

Μέχρι ($Q_i - Q_{set} \geq 0,05 \text{ MVar}$);

PWS(V_i, Q_i);

Τέλος

Αρχικά, παρουσιάζονται οι καμπύλες της αέργου ισχύος (παραγωγή και κατανάλωση) για κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα που προκύπτει με την εφαρμογή της καμπύλης $Q(V)$ (Σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.18 Ημερήσια Απορρόφηση Αέργου Ισχύος (MVar) από τις μονάδες ΔΠ βάσει της χαρακτηριστικής $Q(V)$

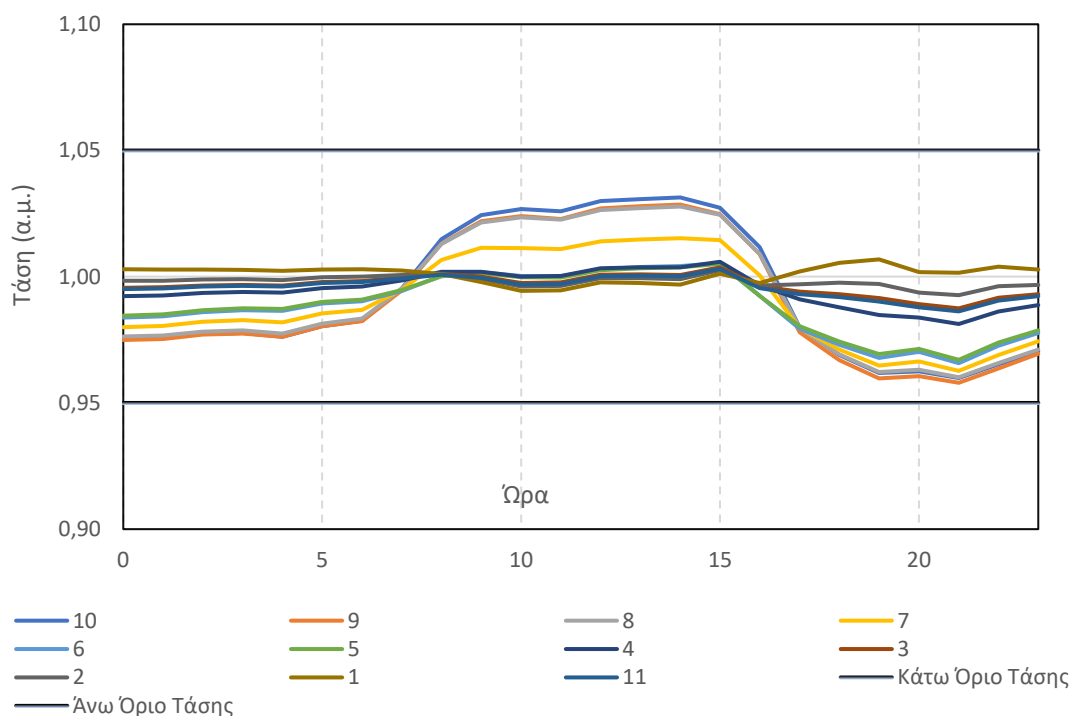
Παρατηρείται, ότι η άεργος της μονάδας που βρίσκεται στο Ζυγό 4 θα παραμείνει μηδενική κατά τη διάρκεια της μέρας, καθώς ο Ζυγός 4 για κάθε ώρα της ημέρας θα βρίσκεται εντός του εύρους νεκρής ζώνης της χαρακτηριστικής.

Αυτό συμβαίνει διότι ο Ζυγός 4 βρίσκεται κοντά στον ρυθμιζόμενο από το ΣΑΤΥΦ Ζυγό 1 που τείνει να διατηρήσει την τάση του εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Ως αποτέλεσμα δεν εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις τάσης στο Ζυγό 4, άρα και η ρύθμιση είναι περιορισμένη έως και μηδενική.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα (Σχήμα 4.18), οι μονάδες 8 και 10 απορροφούν άεργο ισχύ τις μεσημεριανές ώρες ώστε να μειωθούν οι τάσεις των ζυγών, ενώ παράγουν άεργο ισχύ τις βραδινές – απογευματινές ώρες, ώστε να αυξηθεί η τάση της γραμμής.

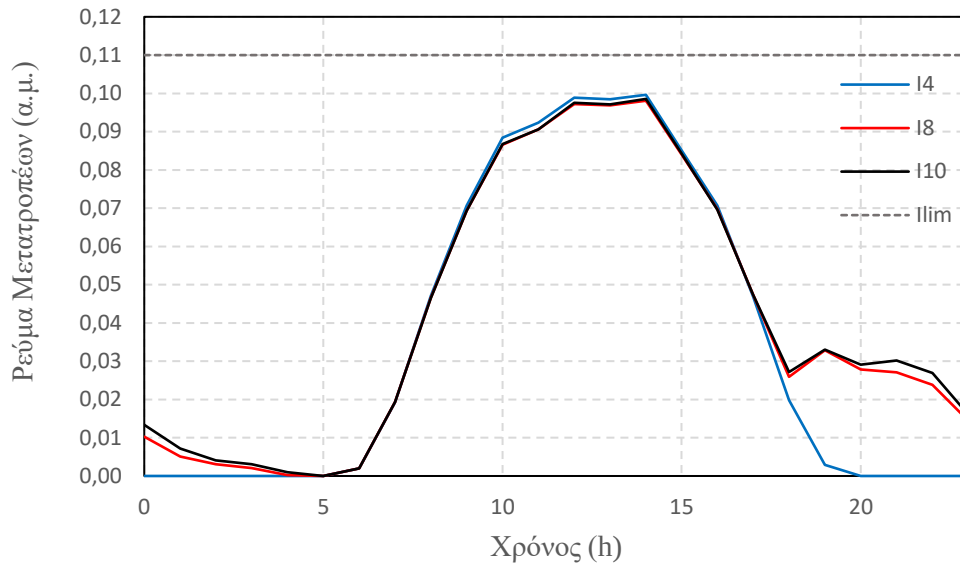
Όπως ήταν αναμενόμενο, η μονάδα που βρίσκεται στο Ζυγό 10 εμφανίζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Αυτό οφείλεται στην τάση του Σημείου Κοινής Σύνδεσης για το Ζυγό 10 που έχει μεγαλύτερες αποκλίσεις από το ΣΚΣ της μονάδας 8.

Το ημερήσιο προφίλ της τάσης φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.19 :



Σχήμα 4.19 Ημερήσιο Προφίλ Τάσεων Ζυγών Δικτύου Διανομής και Όρια Τάσης μετά την εφαρμογή της καμπύλης Q(V)

Το ρεύμα των μετατροπέων των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής διαμορφώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20



Σχήμα 4.20 Ρεύμα Μετατροπών κατά τη διάρκεια της ημέρας μετά την εφαρμογή της καμπύλης $Q(V)$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος οφείλει να καλύπτει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ υπό ονομαστική τάση. Συνεπώς, θεωρώντας S_n την ονομαστική φαινόμενη ισχύ και V_n την ονομαστική τάση του μετατροπέα (στο ανά μονάδα σύστημα), το μέγιστο όριο του ρεύματος είναι:

$$I_{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (4.6)$$

Το όριο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20 με διακεκομμένη γραμμή και έχει τιμή 275 A ή 0,11 α.μ..

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.19, μετά την εφαρμογή της καμπύλης $Q(V)$ δεν παρατηρείται καμία παραβίαση των ορίων ρεύματος των μετατροπών μέσα στη διάρκεια της ημέρας.

Συμπεραίνεται ως εκ τούτου ότι με τη συγκεκριμένη χαρακτηριστική που εφαρμόστηκε, γίνεται σωστή ρύθμιση της τάσης τόσο για τις ανυψώσεις που εμφανίζονται όσο και για τις πτώσεις τάσης που παρατηρούνται τις βραδινές ώρες.

Επίσης, οι φωτοβολταϊκές μονάδες καταφέρνουν να κάνουν ρύθμιση της τάσης για όλη την ημέρα, χωρίς να παραβιάζουν τα όρια ρεύματος των μετατροπών.

Κάθε μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής προσαρμόζει την άεργο υποστήριξη της με βάση την τάση που βλέπει στο ΣΚΣ. Οπότε, δε θα χρειαστεί να κάνει ρύθμιση αν δεν υπάρχει απόκλιση τάσης, όπως μπορεί να συμβεί με τη χρήση της χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$.

Ο Ζυγός 4, που βρίσκεται κοντά στο Μετασχηματιστή και στο ρυθμιζόμενο από το ΣΑΤΥΦ, Ζυγό 1, εμφανίζει μικρές αποκλίσεις τάσης με αποτέλεσμα να βρίσκεται κατά τη διάρκεια της ημέρας εντός της νεκρής ζώνης τάσης. Άρα, δε συνεισφέρει στη ρύθμιση.

4.4.5 Σύγκριση Μεθόδων Ρύθμισης Τάσης και Απώλειες

Έχοντας εφαρμόσει τρεις διαφορετικές μεθόδους ρύθμισης της τάσης για μια συγκεκριμένη ημερήσια καμπύλη παραγωγής φορτίου, προκύπτουν τα βελτιωμένα προφίλ της τάσης για κάθε μέθοδο, εμφανίζοντας τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα που θα αναλυθούν παρακάτω.

Για την καλύτερη σύγκριση των μεθόδων θα εξετασθούν συγκριτικά, οι τάσεις των ζυγών όπως προκύπτουν μετά τη ρύθμιση και η διακύμανση τους γύρω από την ονομαστική τιμή τάσης 1 α.μ. καθώς και η καταπόνηση του ΣΑΤΥΦ, δηλαδή οι μεταβολές που απαιτούνται μέσα στη μέρα για κάθε μέθοδο, ενώ τέλος θα συγκριθούν και οι απώλειες που εμφανίζει κάθε μέθοδος.

4.4.5.1 Προφίλ Τάσεων

Το προφίλ της τάσης των ζυγών είναι το πλέον σημαντικό, καθώς χωρίς την εφαρμογή κάποιας ρύθμισης παρατηρείται ότι πολλοί ζυγοί βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων, πράγμα που μπορεί να φθείρει τον εξοπλισμό της γραμμής αλλά και των οικιακών συσκευών.

Όπως παρατηρείται, οι μέθοδοι εφαρμογής της χαρακτηριστικής καμπύλης $Q(V)$ καθώς και η μεταβολή της τιμής αναφοράς του ΣΑΤΥΦ καταφέρνουν να διατηρούν όλους του ζυγούς του συστήματος εντός των επιτρεπτών ορίων κατά τη διάρκεια της μέρας.

Η χαρακτηριστική καμπύλη $\cos\phi(P)$ ωστόσο, εφόσον εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση υπερτάσεων, τις απογευματινές ώρες δε τίθεται σε λειτουργία, με αποτέλεσμα να μην κάνει ρύθμιση των μεγάλων πτώσεων τάσης που εμφανίζονται.

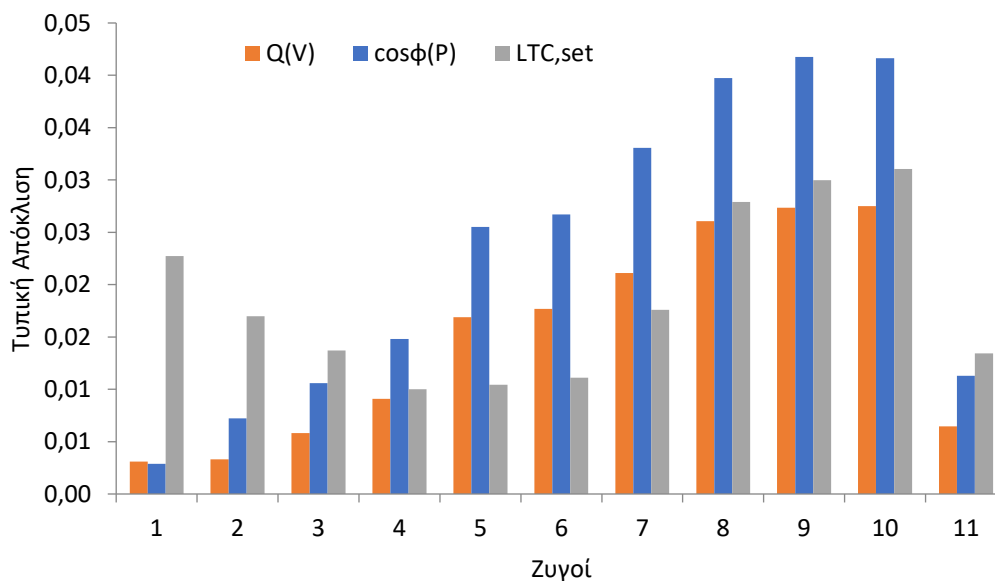
Όσον αφορά τις δυο περιπτώσεις ρύθμισης οι οποίες επιτυγχάνουν τα επιτρεπτά όρια τάσης, παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ δημιουργεί μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης κατά μήκος των ζυγών της γραμμής.

Για την καλύτερη σύγκριση των διακυμάνσεων της τάσης στους ζυγούς της γραμμής θα υπολογιστεί για κάθε μέθοδο η τυπική απόκλιση που εμφανίζεται σε κάθε ζυγό μέσα στη μέρα.

Όπου, σ είναι η τυπική απόκλιση της τάσης των ζυγών μέσα στη μέρα,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_{nom})^2}{N - 1}} \quad (4.7)$$

Οπότε στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται η συνήθης απόκλιση κάθε ζυγού μέσα στη μέρα για κάθε μέθοδο που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 4.21 Τυπική Απόκλιση τάσεων με τις τρεις προτεινόμενες μεθόδους

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.21 στους περισσότερους ζυγούς, η ρύθμιση με τη χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$ επιφέρει τη μικρότερη τυπική απόκλιση.

Για τους Ζυγούς που βρίσκονται στη μέση της γραμμής (Ζυγοί 5,6,7), η μέθοδος μεταβολής της τιμής αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ δίνει μικρή απόκλιση καθώς οι ζυγοί δεν επηρεάζονται από άλλες ροές ισχύος όπως στις άλλες μεθόδους.

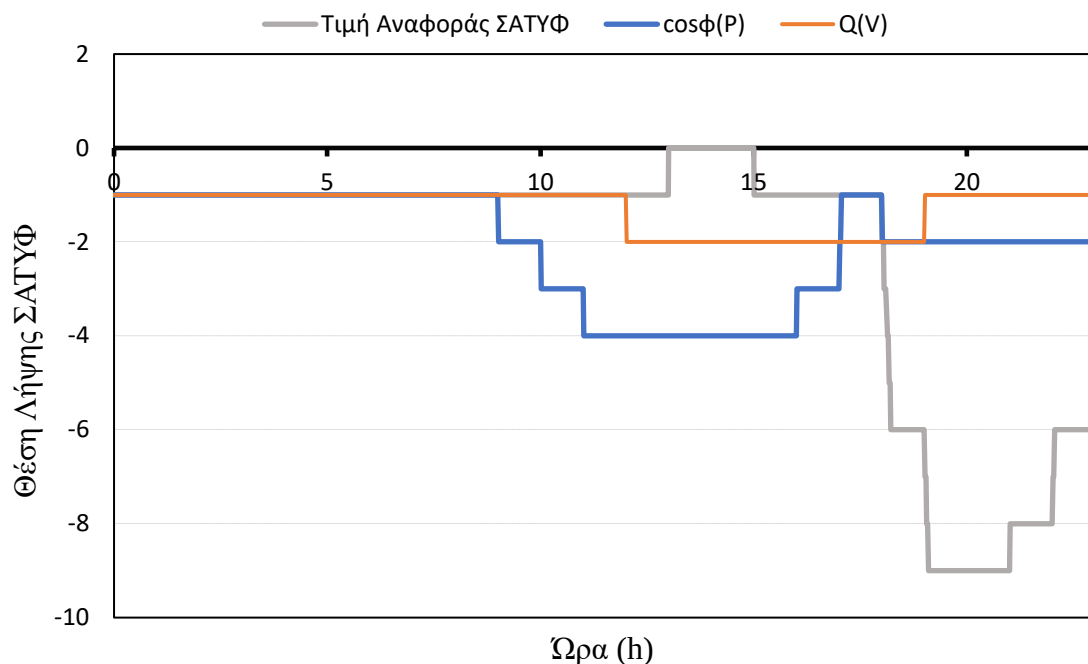
Ωστόσο, οι ζυγοί που βρίσκονται κοντά στο Ζυγό 1 που ρυθμίζεται απο το ΣΑΤΥΦ εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις της τάσης, καθώς μεταβάλλονται απο το ΣΑΤΥΦ ώστε να διατηρούνται οι απομακρυσμένοι ζυγοί εντός των ορίων.

Παράλληλα, η ρύθμιση με τη μέθοδο $\cos\phi(P)$ εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις ειδικά για τους μακρυνούς ζυγούς καθώς κάνει ρύθμιση μόνος τις μεσημεριανές ώρες, με αποτέλεσμα τις περισσότερες ώρες της μέρας το προφίλ της τάσης να είναι μη θεμιτό.

4.4.5.2 Μεταβολή Λόγου Μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ

Όπως έχει ειπωθεί και σε προηγούμενες ενότητες, το ΣΑΤΥΦ έχει οριστεί να ρυθμίζει την τάση του Δευτερεύοντος του Μετασχηματιστή εντός μιας νεκρής ζώνης. Τόσο οι επιπλέον ροές αέργου ισχύος, αλλά κυρίως η εξαναγκασμένη μεταβολή της τιμής αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ, θα επιφέρουν μεταβολές στις λήψεις του ΣΑΤΥΦ που μπορεί να καταπονούν περισσότερο ή λιγότερο τον εξοπλισμό.

Για αυτό θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ώστε να διαπιστωθεί η κίνηση του ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα με την κάθε μέθοδο.



Σχήμα 4.22 Κίνηση ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα για τις τρεις μεθόδους ρύθμισης της τάσης

Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται η κίνηση του ΣΑΤΥΦ μέσα στη μέρα για τις τρεις μεθόδους ρύθμισης της τάσης που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν πρωτίστως.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η μεταβολή της τιμής αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ (κόκκινη καμπύλη) προκαλεί πολλές αλλαγές θέσης της λήψης μέσα στη μέρα με αποτέλεσμα να επιβαρύνει πιο πολύ τον εξοπλισμό και να αυξάνει το κόστος συντήρησης. Αυτό συμβαίνει διότι η αλλαγή της τιμής αναφοράς, ώστε να διατηρηθούν όλοι οι ζυγοί εντός ορίων, μεταβάλλει σημαντικά την τάση του Ζυγού 1 που ρυθμίζεται από το ΣΑΤΥΦ με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η λήψη του ΣΑΤΥΦ για να επιτευχθεί αυτή η τιμή.

Η χαρακτηριστική καμπύλη $\cos\phi(P)$ επιβάλλει μικρότερες μεταβολές για το ΣΑΤΥΦ και κυρίως τις μεσημεριανές ώρες.

Τέλος, η χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$ διατηρεί τις τάσεις κοντά στις ονομαστικές. Με αυτό τον τρόπο και η τάση του Ζυγού 1 βρίσκεται κατά τη διάρκεια της μέρας κοντά στην ονομαστική του τιμή με αποτέλεσμα να μη συμβαίνουν μεγάλες μεταβολές στις λήψεις του ΣΑΤΥΦ ακόμα και τις ώρες που εμφανίζονται τα ακραία σενάρια.

4.4.5.3 Απώλειες Γραμμών

Οι παραπάνω μέθοδοι που χρησιμοποιούνται βελτιώνουν σε ικανοποιητικό βαθμό το ημερήσιο προφίλ της τάσης. Ωστόσο, η επιπλέον ροή αέργου ισχύος που προκύπτει με τη ρύθμιση της τάσης, αυξάνει τα ρεύματα που διαρρέουν το δίκτυο με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες του συστήματος.

Ιδιαίτερα η χρήση της καμπύλης $\cos\phi(P)$ ενδέχεται να αυξήσει τις απώλειες του συστήματος ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει ανύψωση τάσης, καθώς δίνει εντολή ρύθμισης της αέργου ισχύος με κριτήριο την παραγόμενη ενεργό ισχύ.

Οι συνολικές ενεργές απώλειες της γραμμής υπολογίζονται ως το άθροισμα των απωλειών της κάθε γραμμής λόγω της αντίστασης της:

$$P_{\alpha\pi_{i,j}} = I^2 R_{i,j} \quad (4.8)$$

$$P_{ολ.α\pi} = \sum_{i=1, j=1}^N P_{\alpha\pi_{i,j}} , \quad \text{όπου } i = 1, 2, \dots, 11 \quad (4.9)$$

Για τη σύγκριση των μεθόδων υπολογίστηκαν οι ωμικές απώλειες για τις δυο μεθόδους για δυο συγκεκριμένες ώρες τις μέρας, όπου εμφανίζεται είτε πολύ υψηλή παραγωγή από τις μονάδες ΔΠ, είτε εμφανίζεται υψηλή κατανάλωση από τα φορτία. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι απώλειες για τις 13:00 το μεσημέρι και για τις 19:00 το απόγευμα.

Παράλληλα, θα γίνει σύγκριση και με τη μέθοδο που εφαρμόστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου αλλάζουμε την τιμή αναφοράς ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Σε αυτή την περίπτωση αναμένουμε μικρότερες απώλειες καθώς περιορίζονται οι επιπλέον ροές αέργου ισχύος.

Πίνακας 4.13 Απώλειες Ενεργού Ισχύος για τις Χαρακτηριστικές $\cos\phi(P)$ και $Q(V)$ σε 2 ώρες της ημέρας

	$\cos\phi(P)$			$Q(V)$		
	Ενεργός Ισχύς (MW)	Απώλειες (MW)	Ποσοστό (%)	Ενεργός Ισχύς (MW)	Απώλειες (MW)	Ποσοστό (%)
13:00	14,82	0,93982	6,3416	14,82	0,88634	5,9807
19:00	14,218	0,74616	5,2479	14,31	0,77429	5,3409

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.13, οι απώλειες τις μεσημεριανές ώρες είναι μεγαλύτερες όταν εφαρμόζεται η χαρακτηριστική καμπύλη $\cos\phi(P)$. Αυτό οφείλεται κυρίως και στο λόγο που εξηγήθηκε νωρίτερα. Η καμπύλη ρυθμίζει με κριτήριο την ενεργό παραγωγή, με αποτέλεσμα να εισάγει μερικές φορές παραπάνω ροές αέργου ισχύος από τις απαιτούμενες για την ρύθμιση της τάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι ωμικές απώλειες.

Για τις απογευματινές ώρες, δηλαδή στις 19:00 όπου και παρατηρείται το υψηλότερο φορτίο, παρατηρούμε μεγαλύτερες απώλειες για την καμπύλη $Q(V)$. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η $\cos\phi(P)$ δεν κάνει ρύθμιση των πτώσεων τάσης. Οι απώλειες ωστόσο είναι συγκρίσιμες, καθώς παρόλο που δεν υπάρχει επιπλέον ροή αέργου ισχύος για τη μέθοδο $\cos\phi(P)$, οι αποκλίσεις της τάσης είναι πολύ μεγάλες με αποτέλεσμα να υπάρχουν σχετικά υψηλές ωμικές απώλειες.

Πίνακας 4.14 Απώλειες Ενεργού Ισχύος για μεταβολή της Τιμής Αναφοράς
Ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ

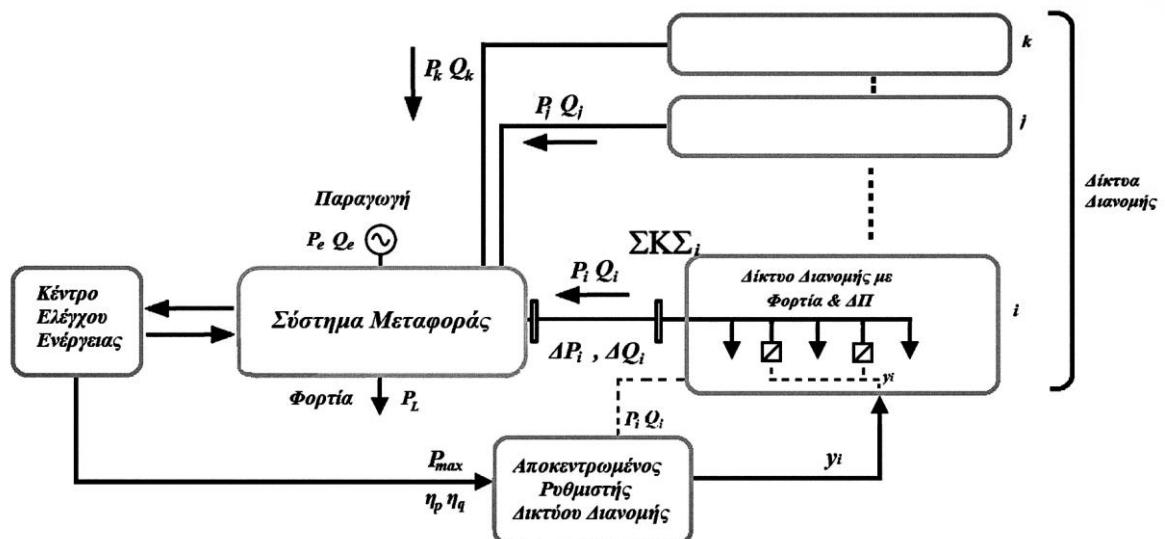
	Μεταβολή Τιμής Αναφοράς Ρύθμισης ΣΑΤΥΦ		
	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Απώλειες (MW)	Ποσοστό (%)
13:00	14,82	0,5472	3,6923
19:00	14,218	0,6658	4,6829

5

Αποκεντρωμένος Έλεγχος Διανομής για την Υποστήριξη του Συστήματος Μεταφοράς

5.1 Περιγραφή Μεθοδολογίας Ελέγχου

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται ο αποκεντρωμένος έλεγχος διεσπαρμένων πηγών με σκοπό την υποστήριξη ενός ακτινικού συστήματος μεταφοράς με περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση που μπορεί να ασκήσει ένα δίκτυο διανομής, όπως αυτό που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4, στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος στο οποίο συνδέεται, υπό τις παραπάνω συνθήκες.



Σχήμα 5.1 Υποστήριξη συστήματος μεταφοράς μέσω αποκεντρωμένου ελέγχου

Σε κάθε σύστημα μεταφοράς συνδέονται πολλές διαφορετικές γραμμές διανομής με πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης που τροφοδοτούν φορτία και περιέχουν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό καθιστά την συνολική ανάλυση και την κατάστρωση εξισώσεων δύσκολη και πολύπλοκη. Το βασικό και κυρίαρχο πλεονέκτημα της μεθοδολογίας που προτείνεται έγκειται στην ξεχωριστή μελέτη των συστημάτων διανομής με μόνη παράμετρο ρύθμισης την ανταλλαγή ενεργού και αέργου ισχύος με το σύστημα μεταφοράς. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στο διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς, σε περίπτωση κάποια αναταραχής, να επιλέγει από ποια γραμμή διανομής να ζητήσει ενίσχυση.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία που θα αναλυθεί σε αυτό το κεφάλαιο βασίζεται στην ξεχωριστή ανάλυση των συστημάτων μεταφοράς και διανομής. Δηλαδή, προτείνεται μια αποσύμπλεξη των συστημάτων η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα την απλοποίηση της ανάλυσης στα επιμέρους συστήματα που δημιουργούνται.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1, το συνολικό δίκτυο που μελετάται, αποτελείται από ένα σύστημα μεταφοράς, και κάποιο ή κάποια συστήματα διανομής που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς στο ΣΚΣ και όπως φαίνεται στο σχήμα μπορεί να περιέχουν τόσο φορτία όσο και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής συνδεδεμένες μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Τέλος, παρουσιάζεται σχηματικά ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής ο οποίος αναλαμβάνει να στέλνει σήματα που αφορούν στη ρύθμιση στην πλευρά του συστήματος διανομής.

Ο ρόλος του ρυθμιστή του δικτύου διανομής είναι να προσδιορίσει την ευαισθησία των εγχύσεων P_i και Q_i στα σήματα ελέγχου y_i και να στείλει κάποιο σήμα ρύθμισης στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής των δικτύου διανομής ώστε να μεταβάλλει την μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος μεταφοράς. Για τη διαμόρφωση του σήματος, λαμβάνει υπόψη τις ευαισθησίες η_p , η_q της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος ως προς τις παραπάνω εγχύσεις P_i και Q_i .

Από την πλευρά του συστήματος μεταφοράς ενδιαφέρει το σημείο μέγιστης φόρτισης γι' αυτό και εξετάζονται οι συνθήκες μεγίστου με χρήση των αναγκαίων συνθηκών Kuhn Tucker πρώτης τάξεως οι οποίες θα εφαρμοστούν μετέπειτα σε συγκεκριμένο δίκτυο. Οι συνθήκες μεγιστοποίησης της φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δίνουν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος που εξετάζεται, P_{max} . Παράλληλα, εξετάζεται και η ευαισθησία της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος η_p και η_q , ως προς τις εγχύσεις P_i και Q_i .

Η ανάλυση του κάθε δικτύου διανομής που μπορεί να συνδέεται στο σύστημα μεταφοράς, όπως αυτή που έγινε και στο Κεφάλαιο 4, δίνει στο ρυθμιστή τα δεδομένα της ισχύος που μεταφέρεται μεταξύ της κάθε γραμμής διανομής και του συστήματος μεταφοράς. Δηλαδή, τα δεδομένα των ροών ισχύος P_i και Q_i εισάγονται επίσης στο ρυθμιστή του δικτύου διανομής για την πραγματοποίηση του ελέγχου. Οι ισχυείς υπολογίζονται προσεγγιστικά από την ανάλυση των ροών φορτίου των επιμέρους μη διασυνδεδεμένων συστημάτων διανομής. Επιπλέον, από την ανάλυση των επιμέρους δικτύων διανομής υπολογίζονται οι ευαισθησίες των εγχύσεων P_i και Q_i ως προς τις μεταβολές που εφαρμόζονται.

Άρα ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής i που φαίνεται και στο Σχήμα 5.1 λαμβάνει ως δεδομένα τα στοιχεία από τα 2 συστήματα, P_{max} , η_p , η_q , P_i και Q_i ώστε να πραγματοποιήσει έλεγχο κάποιας μορφής που θα αναλυθεί παρακάτω και να στείλει σήμα ρύθμισης y_i σε κάποιο ή κάποια από τα συστήματα διανομής και πιο συγκεκριμένα στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται σε αυτά. Το σήμα έχει ως στόχο να αυξήσει την P_{max} του συστήματος μεταφοράς. Το μέτρο της μεταβολής που θα προκύψει θα εξαρτάται και από τις ευαισθησίες η_p και η_q που υπολογίζονται από την ανάλυση του συστήματος μεταφοράς.

Οπότε, μέσω του ρυθμιστή του δικτύου διανομής, γίνεται η σύνδεση μεταξύ των δυο συστημάτων και γίνεται προσπάθεια αύξησης της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος μέσω αποκεντρωμένου ελέγχου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Ο επιμέρους υπολογισμός των παραμέτρων P_{max} , η_p , η_q , P_i και Q_i που ενδιαφέρουν το ρυθμιστή, ώστε να αποστείλει το σήμα ρύθμισης θα μελετηθούν αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

5.2 Όριο φόρτισης συστήματος μεταφοράς

5.2.1 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς συστήματος μεταφοράς

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η μεθοδολογία που εξετάζεται αποκοπεί στην ενίσχυση του ορίου φόρτισης ενός συστήματος μεταφοράς. Για να γίνει αυτό, εξετάζονται οι συνθήκες μεγίστου και υπολογίζεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς κάποιου συστήματος μεταφοράς, λύνοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης με χρήση των αναγκαίων συνθηκών Kuhn Tucker πρώτης τάξεως. Σε αυτή την ενότητα θεωρείται ότι οποιεσδήποτε εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος προς τη γραμμή μεταφοράς είναι σταθερές.

Για την ανάλυση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας θα γίνει η υπόθεση ότι το σύστημα μπορεί να περιγραφεί (στη μόνιμη κατάσταση) από ένα σύνολο n αλγεβρικών εξισώσεων με n αλγεβρικές μεταβλητές οι οποίες αναπαρίστανται με το διάνυσμα $\mathbf{u}$ ως εξής :

$$\varphi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0 \quad (5.1)$$

όπου φ ένα διάνυσμα n ομαλών εξισώσεων και $\mathbf{p}$ ένα διάνυσμα με k παραμέτρους.

Η εξίσωση (5.1) είναι πολύ γενική και εκφράζει το σημείο ισορροπίας του συστήματος και περιλαμβάνει τις εξισώσεις ροής ισχύος (που προκύπτουν από τους νόμους Kirchhoff), του ηλεκτρικού συστήματος, όπως και τις συνθήκες ισορροπίας των ρυθμιστών.

Για να προσδιοριστεί το όριο φόρτισης, γίνεται η υπόθεση ότι οι ανεξάρτητες παράμετροι $\mathbf{p}$ αντιστοιχούν στις μεταβλητές ζήτησης φορτίου. Ειδικότερα, ως *όριο*

φόρτισης εννοείται το σημείο στο οποίο η ζήτηση φτάνει στη μέγιστη τιμή της, μετά την οποία δεν υπάρχει λύση της (5.1). Αν το φορτίο θεωρείται ως φορτίο σταθερής ισχύος, τότε το όριο φόρτισης αντιστοιχεί στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ σε ένα ζυγό ή σε ένα σύνολο ζυγών. Το p μπορεί να περιλαμβάνει ενεργό και άεργο ισχύ.

Σε ένα γενικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει άπειρος αριθμός τρόπων να φτάσει το σύστημα σε όριο φόρτισης, για κάθε διαφορετικό συνδυασμό των $\mathbf{p}$ μεταβλητών. Με αυστηρά μαθηματικούς όρους, το όριο φόρτισης αντιστοιχεί στο μέγιστο βαθμωτής συνάρτησης ζ του $\mathbf{p}$, με περιορισμό τις εξισώσεις (5.1). Οπότε, προκύπτει το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max_{\mathbf{p}, \mathbf{u}} \quad \zeta(\mathbf{p}) \quad (5.2)$$

$$\text{υπό τους περιορισμούς} \quad \varphi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0$$

Η λύση στο πρόβλημα ικανοποιεί τις συνθήκες που δίνονται ακολούθως και είναι γνωστές ως συνθήκες Kuhn-Tucker. Αρχικά, ορίζεται η συνάρτηση Lagrange.:

$$L = \zeta(\mathbf{p}) + \mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \zeta(\mathbf{p}) + \sum_i w_i \varphi_i(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (5.3)$$

όπου, $\mathbf{w}$ ένα διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange. Οι αναγκαίες συνθήκες βελτίστου είναι οι παράγωγοι της L ως προς $\mathbf{w}$, $\mathbf{p}$ και $\mathbf{u}$ να γίνουν ίσες με μηδέν (συνθήκες βελτιστοποίησης πρώτης τάξεως):

$$\nabla_{\mathbf{w}} L = 0 \Leftrightarrow \varphi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0 \quad (5.4)$$

$$\nabla_{\mathbf{p}} L = 0 \Leftrightarrow \nabla_{\mathbf{p}} \zeta + \varphi_{\mathbf{p}}^T \mathbf{w} = 0 \quad (5.5)$$

$$\nabla_{\mathbf{u}} L = 0 \Leftrightarrow \varphi_{\mathbf{u}}^T \mathbf{w} = 0 \quad (5.6)$$

όπου, $\varphi_{\mathbf{u}}$ και $\varphi_{\mathbf{p}}$ είναι οι Ιακωβιανοί πίνακες των συναρτήσεων του φ ως προς τα $\mathbf{u}$ και $\mathbf{p}$ αντίστοιχα, και $\nabla_{\mathbf{x}} \zeta$ είναι η κλίση της βαθμωτής συνάρτησης ζ ως προς κάποιο διάνυσμα $\mathbf{x}$, δηλαδή το διάνυσμα μερικών παραγώγων :

$$[\nabla_{\mathbf{x}} \zeta]_i = \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \quad (5.7)$$

Ανεξάρτητη παράμετρος $\mathbf{p} \in \mathbb{R}$ ορίζεται η κατανάλωση των φορτίων P_L (θεωρούμενο με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ($\mathbf{p}=[P_L]$)). Αντίστοιχα, το διάνυσμα $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^4$, $\mathbf{u}^T = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ περιλαμβάνει τις φασικές γωνίες και τα μέτρα των τάσεων. Το εξεταζόμενο πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί σε αυτό το σημείο ως ακολούθως:

Οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος διαμορφώνονται ως εξής :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = P_i + P_e - P = P_i + \frac{u_2 E \sin(-u_1)}{X} - \frac{u_2 u_4}{X} \sin(u_1 - u_3) = 0 \\ \varphi_2(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = Q_i + Q_e - Q = Q_i + \frac{u_2 E \cos(u_1)}{X} - \frac{2u_2^2}{X} + \frac{u_2 u_4}{X} \cos(u_1 - u_3) = 0 \\ \varphi_3(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = p - \frac{u_2 u_4}{X} \sin(u_1 - u_3) = 0 \\ \varphi_4(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = Q_L + \frac{u_4^2}{X} - \frac{u_2 u_4}{X} \cos(u_3 - u_1) = 0, \quad (Q_L = 0) \end{array} \right. \quad (5.8)$$

Όπου, P_i και Q_i θεωρούνται οι εγχύσεις από ένα σύστημα διανομής και εδώ θεωρούνται σταθερές, P η ισχύς καταναλώνει το φορτίο της γραμμής μεταφοράς και P_e η ενεργός ισχύς που εγχέεται από το άπειρο ΣΗΕ.

Η συνάρτηση Lagrange (5.3) γίνεται

$$L = \zeta(\mathbf{p}) + \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \rightarrow L = p + w_1 \varphi_1(\mathbf{u}, \mathbf{p}) + w_2 \varphi_2(\mathbf{u}, \mathbf{p}) + w_3 \varphi_3(\mathbf{u}, \mathbf{p}) + w_4 \varphi_4(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (5.9)$$

Οπότε εφαρμόζονται οι αναγκαίες συνθήκες Kuhn Tucker πρώτης τάξεως (5.4),(5.5) και (5.6) για να δημιουργηθεί ένα σύστημα εξισώσεων που αποτελείται από 9 εξισώσεις με 9 αγνώστους που είναι $\mathbf{u}^T = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$, P_{max} και οι πολλαπλασιαστές Lagrange w_1, w_2, w_3 και w_4 . Από την επίλυση του συστήματος προκύπτει η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς P_{max} του συστήματος μεταφοράς για σταθερές εγχύσεις ισχύος από τα συστήματα διανομής που συνδέονται. [6]

5.2.3 Ευαισθησίες Ορίου Φόρτισης ως προς την έγχυση ισχύος

Στην προηγούμενη ενότητα υπολογίστηκε η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς P_{max} για σταθερές εγχύσεις ισχύος στο σύστημα μεταφοράς από τις διάφορες γραμμές διανομής. Ωστόσο, στην περιγραφή του ελέγχου που αναφέρεται στην ενότητα 5.1 οι εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος από τα συστήματα διανομής μπορεί να μεταβάλλονται.

Οπότε, σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η γενική μεθοδολογία για τον υπολογισμό ευαισθησιών του ορίου φόρτισης P_{max} που υπολογίστηκε προηγουμένως ως προς άλλες παραμέτρους που συμβολίζονται ως p_1 . Δηλαδή, αν συμβεί κάποια αλλαγή στην παράμετρο $\mathbf{p}$, το σύστημα θα λειτουργεί σε κάποιο άλλο σημείο ισορροπίας, στο οποίο θα συνεχίσει να ικανοποιεί τις εξισώσεις (5.1).

Σύμφωνα με την ανάλυση στο βιβλίο [], η ευαισθησία του ορίου φόρτισης P_{max} ως προς το p_1 ορίζεται ως :

$$S_{P_{max} p_1} = - \frac{\boldsymbol{\varphi}_{p_1}^T \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}_{p_1} \mathbf{d}} \quad (5.10)$$

Όπου, $\mathbf{d}$ είναι το διάνυσμα κατεύθυνσης σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες μεταβλητές $\mathbf{p}$ που μετέχουν στον πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση που το $\mathbf{p}$ είναι βαθμωτό (όπως το P_L που εξετάζεται στην παρούσα εργασία), το $\mathbf{d}=1$.

Ο αριθμητής της σχέσης (5.10) είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του Φ ως προς τις παραμέτρους $\mathbf{p}_1$ (που επηρεάζουν αλλά δε συμμετέχουν στη μεγιστοποίηση της φόρτισης) και ως προς τις οποίες υπολογίζεται η ευαισθησία του P_{max} .

Με βάση τις εξισώσεις (5.8), η παράμετρος προς μεγιστοποίηση $\mathbf{p}$ εμφανίζεται μόνο

στη $\varphi_3(\mathbf{u}, \mathbf{p})$ για αυτό και $\mathbf{w}^T \varphi_{\mathbf{p}} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = w_3$ και όπως θα φανεί και

παρακάτω από την λύση του προβλήματος μεγίστου, $w_3 = -1$.

Αντίστοιχα, ο αριθμητής της σχέσης (5.10) είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του Φ ως προς τις παραμέτρους $\mathbf{p}_1$ (που επηρεάζουν αλλά δε συμμετέχουν στη μεγιστοποίηση της φόρτισης) και ως προς τις οποίες υπολογίζεται η ευαισθησία του P_{max} και προκύπτει από τις εξισώσεις (5.8) ότι, $\varphi_{\mathbf{p}_1}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

Άρα,

$$\varphi_{\mathbf{p}_1}^T \mathbf{w} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Η ευαισθησία (5.10) γίνεται :

$$S_{P_{max} \mathbf{p}_1} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_P \\ \eta_Q \end{bmatrix}$$

Δηλαδή,

$$\eta_{P_i} = \frac{\partial P_{max}}{\partial P_i} = w_1 \quad (5.13)$$

και

$$\eta_{Q_i} = \frac{\partial P_{max}}{\partial Q_i} = w_2 \quad (5.14)$$

Στην πράξη, μεγαλύτερες ευαισθησίες φανερώνουν τα φορτία ή τις γεννήτριες που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στη φόρτιση του συστήματος ή αντίστροφα ποιες παράμετροι μπορούν να αυξήσουν τη μεταφερόμενη ισχύ πιο αποτελεσματικά.

Από τη σχέση (5.10) και την ανάλυση των εξισώσεων (5.4),(5.5) και (5.6) για κάποιο συγκεκριμένο σύστημα θα υπολογιστούν οι ευαισθησίες στις παραμέτρους $\mathbf{p}$ που θα μεταβάλλονται. Στην προκειμένη, η προτεινόμενη μεθοδολογία εξετάζει μεταβολές στις παραμέτρους έγχυσης P_i και Q_i από τα συστήματα διανομής που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς. Οπότε, οι ευαισθησίες που θα υπολογίζονται από τη σχέση

(5.10) θα αποτελούν τις ευαισθησίες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος ως προς τις P_i και Q_i και φαίνονται στο Σχήμα 5.1 ως η_p και η_q (5.13) και (5.14). Για κάθε διαφορετική έγχυση ισχύος από τις γραμμές διανομής το σύστημα λειτουργεί σε διαφορετικό σημείο ισορροπίας με αποτέλεσμα να αλλάζει τόσο η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς, όσο και οι ευαισθησίες τις στις παραμέτρους αυτές. Άρα, για κάθε P_i και Q_i προκύπτει ζεύγος ευαισθησιών η_p και η_q .

5.3 Ευαισθησία έγχυσης ισχύος από γραμμή διανομής

5.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα 5.1 και φαίνεται στο Σχήμα 5.1, το σύστημα μεταφοράς συνδέεται με πολλές γραμμές διανομής οι οποίες περιέχουν φορτία και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Εδώ εξετάζεται μόνο μια γραμμή διανομής για απλοποίηση της ανάλυσης.

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται στη συγκεκριμένη γραμμή διανομής λειτουργούν παράγοντας P_k , ενώ με κατάλληλη ρύθμιση μπορούν να απορροφούν ή να εγχέουν και ποσότητες αέργου ισχύος Q_k , όπου $k = 1, \dots, n$. Η δυνατότητα ρύθμισης που προσφέρουν στο επίπεδο της διανομής, σημαίνει ότι μεταβάλλοντας την άεργο ισχύ μπορούν να αυξάνουν ή να μειώνουν τις εγχύσεις προς το σύστημα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, δίνουν τη δυνατότητα μεταβολής των παραμέτρων P και Q κατά $\Delta P(y)$ και $\Delta Q(y)$.

Το y είναι κάποιο σήμα που αποστέλλει ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής και στην ουσία αποτελεί ένα διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου και μπορεί να είναι σήμα μεταβολής της τάσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, μεταβολής της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ ή μεταβολής της λειτουργίας των αντιστροφών μέσω των οποίων συνδέονται οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Οι παραπάνω μεταβολές με τη σειρά τους θα μεταβάλλουν τις εγχύσεις προς το σύστημα μεταφοράς προκαλώντας δηλαδή την εξαρτώμενη από το σήμα y μεταβολής τους $\Delta P(y)$ και $\Delta Q(y)$.

Το σήμα y που εφαρμόζεται είναι τέτοιο ώστε να υποστηρίζεται το σύστημα μεταφοράς, δηλαδή να αυξάνεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του. Στην παρούσα εργασία το σήμα y θα αποσκοπεί σε αύξηση της τάσης των ζυγών στους οποίους συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή, η οποία πραγματοποιείται είτε με άμεση μεταβολή της τάσης των ζυγών, είτε έμμεσα με αλλαγές στις χαρακτηριστικές λειτουργίας των αντιστροφών ή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το σήμα y είναι σήμα μεταβολής κάποιας τάσης και εκφράζεται κατά περίπτωση ως εξής:

Αν επιβάλλεται άμεση μεταβολή της τάσης των ζυγών που συνδέονται οι μονάδες ΔΠ τότε :

$$\mathbf{y} = \Delta \mathbf{V} = [\Delta V_1 \Delta V_2 \dots \Delta V_n] \quad (5.15)$$

Αν το σήμα μεταβάλλει την τάση αναφοράς του ΣΑΤΥΦ τότε:

$$y = \Delta V_{set,LTC} \quad (5.16)$$

Ενώ, όταν μεταβάλλεται κάποια τάση αναφοράς στη λειτουργία των αντιστροφών μέσω των οποίων συνδέονται οι μονάδες ΔΠ, τότε:

$$y = \Delta V_{ref,inv} \quad (5.17)$$

Αναφέρεται σε αυτό το σημείο, ότι η μεταβολή της τάσης των ζυγών (5.15), μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε ζυγό για αυτό και χρησιμοποιείται διάνυσμα. Σε αυτή την περίπτωση θα προκύπτουν και οι ευαισθησίες ως διανύσματα.

Οι μεταβολές στις λειτουργίες των αντιστροφών (5.16) που πραγματοποιούνται θα είναι ίδιες για όλες τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και μπορεί να είναι αλλαγή μιας ή περισσότερων τάσεων αναφοράς κάποιας χαρακτηριστικής ρύθμισης (π.χ. $Q(V)$ χαρακτηριστική). Σε αυτή την περίπτωση το σήμα y αποτελεί βαθμωτό μέγεθος.

Το σήμα μεταβολής της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ (5.17), είναι επίσης βαθμωτό, αφού αναφέρεται στη μεταβολή μιας μόνο τάσης και αναφέρεται στην τάση αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.

Ορίζονται οπότε, οι ευαισθησίες των P και Q ως προς τις διάφορες μεταβολές που ορίζονται από το σήμα y που αναγράφεται ως διάνυσμα για να καλύπτει κάθε πιθανό σήμα:

$$\mathbf{s}_P = \nabla_y P = \left[\frac{\partial P}{\partial y_1} \quad \dots \quad \frac{\partial P}{\partial y_n} \right]^T \quad (5.18)$$

και

$$\mathbf{s}_Q = \nabla_y Q = \left[\frac{\partial Q}{\partial y_1} \quad \dots \quad \frac{\partial Q}{\partial y_n} \right]^T \quad (5.19)$$

Όπου το y προκύπτει από τις σχέσεις (5.15), (5.16) και (5.17) που αναγράφονται παραπάνω.

Η μελέτη των ευαισθησιών S_P και S_Q παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς ίδιες μεταβολές της τάσης σε διαφορετικούς ζυγούς παραγωγής μπορεί να επηρεάζουν τις ροές ισχύος P και Q σε εντελώς διαφορετικό βαθμό. Αυτό μπορεί να οφείλεται αρχικά στην τοπολογία του συστήματος, στα φορτία, αλλά και στη δυνατότητα ρύθμισης της κάθε μονάδας. Σε επόμενη ενότητα εξετάζονται συγκεκριμένα στιγμιότυπα μέσα στη μέρα ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα ως προς τη γενική συμπεριφορά των γραμμών διανομής σε τέτοιες μεταβολές.

Το σύστημα διανομής περιέχει πολλά μη γραμμικά στοιχεία, ωστόσο οι σχέσεις (5.18) και (5.19) είναι γραμμικές. Για πιο ακριβή ανάλυση θα μπορούσε να λυθεί ένα ακόμα πρόβλημα βελτιστοποίησης για το σύστημα διανομής, το οποίο θα λύνει το σύστημα για μέγιστες τιμές των P και Q σε διάφορες μεταβολές y .

Η αποκεντρωμένη ανάλυση των συστημάτων διανομής γίνεται με μια προσέγγιση που ενδέχεται να δημιουργεί κάποιες αποκλίσεις. Θεωρείται ότι ο ζυγός αναφοράς (slack bus) ο οποίος συμπίπτει με το σημείο κοινής σύνδεσης με το σύστημα μεταφοράς, διατηρεί την τάση του σταθερή και ίση με 1 α.μ. ενώ παράλληλα το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζεται ώστε να διατηρεί την τάση του ζυγού μέσης τάσης κοντά στο 1 αμ. Άρα πρώτον, η τάση του σημείου κοινής σύνδεσης δεν είναι η πραγματική τάση και δεύτερον ότι οι τιμές που λαμβάνει ο λόγος του ΣΑΤΥΦ δε θα είναι ίδιες με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται οι εγχύσεις P και Q . Στο διασυνδεδεμένο σύστημα, ειδικά σε περίπτωση διαταραχών, η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης του συστήματος μεταφοράς με το σύστημα διανομής ενδέχεται να είναι, με αποτέλεσμα ο ζυγός που θεωρείται σταθερός στην ξεχωριστή ανάλυση του συστήματος διανομής στην πραγματικότητα να μεταβάλλει την τάση του. Ωστόσο, σε σχέση με την τιμή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς, οι αποκλίσεις στην πλευρά των γραμμών διανομής είναι αρκετά μικρές για αυτό και η προσέγγιση θεωρείται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό.

5.3.2 Μέθοδος Υπολογισμού Ευαισθησιών

Ο αποκεντρωμένος έλεγχος που προτείνεται στην εργασία και αναφέρθηκε πριν, αναφέρεται σε κάθε γραμμή διανομής ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, λύνοντας το πρόβλημα των ροών φορτίου της κάθε γραμμής διανομής – στην παρούσα εργασία, οι ροές ισχύος υπολογίζονται στο πρόγραμμα προσομοίωσης Power World Simulator – προκύπτουν οι ισχύεις P και Q της κάθε γραμμής διανομής. Προφανώς, λόγω της μεταβαλλόμενης φύσης των φορτίων αλλά και τη μεταβαλλόμενη παραγωγή από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι ισχύεις P και Q μεταβάλλονται μέσα στη μέρα με αποτέλεσμα να αλλάζει η παράμετρος προς μεγιστοποίηση p του προβλήματος (5.2) άρα και το όριο φόρτισης του συστήματος που εξετάζεται.

Οπότε, οι ευαισθησίες S_P και S_Q λαμβάνουν διαφορετικές τιμές μέσα στη μέρα. Για αυτό το λόγο σε κάθε στιγμιότυπο που ελέγχεται παρακάτω υπολογίζονται εκ νέου με λύση των ροών φορτίου του συστήματος διανομής στο πρόγραμμα προσομοίωσης Power World Simulator. Συγκεκριμένα, γίνεται λύση της ροής φορτίου του συστήματος διανομής πριν και μετά την εφαρμογή του σήματος μεταβολής της τάσης y ώστε να υπολογιστεί η μεταβολή των εγχύσεων ΔP και ΔQ που οφείλεται στη μεταβολή ΔV . Το πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογίζει τη νέα θέση του ΣΑΤΥΦ μετά από κάθε μεταβολή της τάσης.

Το πρόβλημα μεγιστοποίησης των εγχύσεων P και Q μέσω της εφαρμογής του σήματος y αποτελεί ένα μη γραμμικό πρόβλημα. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία για τα συγκεκριμένα εξεταζόμενα δίκτυα παρατηρείται ότι η αύξηση της τάσης θα επιφέρει πάντοτε αύξηση των εγχύσεων αέργου ισχύος και πολύ μικρή μείωση των εγχύσεων ενεργού ισχύος με αποτέλεσμα η ευαισθησία της P_{max} σε μεταβολές της τάσης να διατηρεί σταθερό και θετικό πρόσημο. Οπότε, το τελικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος γίνεται γραμμικό και η μεγιστοποίηση της τάσης θα οδηγεί πάντοτε σε μεγιστοποίηση της αύξησης του ορίου φόρτισης. Άρα γίνεται μια γραμμική προσέγγιση του υπολογισμού των ευαισθησιών.

Στις εφαρμογές που γίνονται στο παρακάτω κεφάλαιο, το σήμα y θα αποτελεί βαθμωτό μέγεθος ή θα γίνονται ταυτόχρονες και ίσες μεταβολές της τάσης στους ζυγούς διεσπαρμένης παραγωγής. Με αυτό τον τρόπο οι ευαισθησίες θα υπολογίζονται ως βαθμωτά μεγέθη και όχι ως διανύσματα ώστε να μπορούν να υπολογιστούν αριθμητικά οι μεταβολές της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

5.4 Μέθοδος αποκεντρωμένης υποστήριξης συστήματος μεταφοράς

Η αποκεντρωμένη ανάλυση των επιμέρους συστημάτων μεταφοράς και διανομής που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες ενότητες και φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 5.1, αποσκοπεί στην αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος μεταφοράς.

Σε αυτή την ενότητα θα αναπτυχθεί η διαδικασία με την οποία το δίκτυο διανομής μπορεί να συμβάλει στην ενίσχυση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τις ευαισθησίες η_p , η_q , S_p και S_q .

Όπως ειπώθηκε και στην ενότητα 5.1 οι ευαισθησίες η_p και η_q στην εργασία υπολογίζονται από ξεχωριστή ανάλυση της γραμμής μεταφοράς με λύση του προβλήματος μεγιστοποίησης και αποστέλλονται στο ρυθμιστή του δικτύου διανομής. Στο πραγματικό σύστημα, υπολογίζονται από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς και υπολογίζονται στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (Κ.Ε.Ε.) και φτάνει ως είσοδος στο ρυθμιστή του συστήματος διανομής. (Σχήμα 5.1)

Η μεταβολή της μέγιστης μεταφερομένης ισχύος ως προς τη μεταβολή της τάσης των ζυγών όπου συνδέονται οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Delta P_{max} = \eta_p S_p^T \Delta y + \eta_q S_q^T \Delta y \quad (5.20)$$

Η σχέση (5.20) αποτελεί την ευαισθησία της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος P_{max} ως προς τις μεταβολές που επιβάλλει ο αποκεντρωμένος ρυθμιστής του δικτύου διανομής. Με άλλα λόγια, αποτελεί τη σχέση που συνδέει τις μεταβολές που γίνονται στην πλευρά του συστήματος διανομής με την επίδραση που μπορεί να έχουν στη ΜΜΙ του συστήματος μεταφοράς.

Το πρόσημο της σχέσης (5.20) φανερώνει και τι είδους μεταβολή τάσης πρέπει να συμβεί για ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς. Αν η ευαισθησία είναι πάντοτε θετική, τότε αυξήσεις των τάσεων θα οδηγούν πάντα σε αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Στην περίπτωση της μεταβολής των τάσεων των ζυγών της διεσπαρμένης παραγωγής οδηγούνται στο άνω επιτρεπτό όριο. [11]

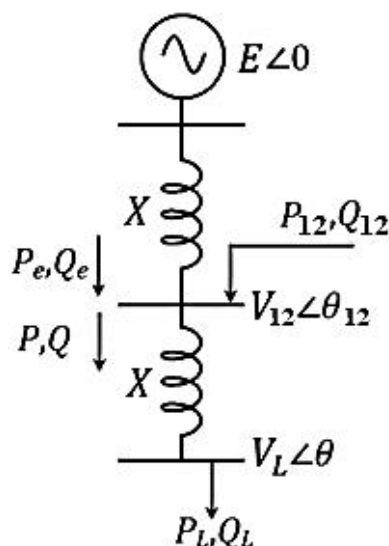
Αφού υπολογιστούν οι ευαισθησίες των επιμέρους συστημάτων, η σχέση (5.20) θα εφαρμοστεί σε ενδεικτικό δίκτυο αρχικά για τον υπολογισμό της P_{max} στη διάρκεια

της ημέρας και μετέπειτα για τον υπολογισμό μέγιστης ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς από το σύστημα διανομής.

5.5 Εφαρμογή σε απλό ακτινικό σύστημα μεταφοράς

5.5.1 Ακτινικό σύστημα μεταφοράς

Οι συνθήκες βελτιστοποίησης που αναλύθηκαν θεωρητικά στην υποενότητα 5.2.1 θα εξεταστούν για συγκεκριμένο ακτινικό σύστημα μεταφοράς το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Στον ενδιαμέσο ζυγό συνδέεται ένας υποσταθμός διανομής, η έγχυση του οποίου στο σύστημα μεταφοράς εμφανίζεται ως P_{12} και Q_{12} .



Σχήμα 5.2 Ακτινικό Σύστημα Μεταφοράς

Το ακτινικό σύστημα μεταφοράς του Σχήμα 5.2 έχει περιορισμένη δυνατότητα μεταφοράς και περιλαμβάνει μια σταθερή πηγή τάσης E , η οποία αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο Thevenin του διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα μεταφοράς αντιπροσωπεύουν δύο ίσες αντιδράσεις $X_1=X_2=X$ στην πλευρά της πηγής και του φορτίου αντίστοιχα. Τα δεδομένα του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1 Δεδομένα Συστήματος Μεταφοράς

E (αμ)	X (αμ)	V _B (kV)	S _B (MVA)
0.98	0.2	150	100

Για το ακτινικό σύστημα μεταφοράς που φαίνεται και στο Σχήμα 5.2 εφαρμόζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης (Εν.5.2.1) για τον προσδιορισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για σταθερές τιμές των εγχύσεων P_{12} και Q_{12} . Ειδικότερα, λύνεται το πρόβλημα (5.2), με την παράμετρο $\mathbf{p}$ που μεγιστοποιείται να είναι η κατανάλωση P_L που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.2. Για το ακτινικό σύστημα μεταφοράς καταστρώνονται οι εξισώσεις ισορροπίας (5.8) και εφαρμόζοντας τις αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξεως Kuhn Tucker (5.4),(5.5),(5.6) προκύπτουν 9 εξισώσεις με 9 αγνώστους.

$$P_{12} - \frac{u_2 E \sin(u_1)}{X} - \frac{u_2 u_4}{X} \sin(u_1 - u_3) = 0 \quad (\alpha)$$

$$Q_{12} + \frac{u_2 E \cos(u_1)}{X} - \frac{2u_2^2}{X} + \frac{u_2 u_4}{X} \cos(u_1 - u_3) = 0 \quad (\beta)$$

$$p - \frac{u_2 u_4}{X} \sin(u_1 - u_3) = 0 \quad (\gamma)$$

$$\frac{u_4^2}{X} - \frac{u_2 u_4}{X} \cos(u_3 - u_1) = 0 \quad (\delta)$$

$$1 + w_3 = 0 \quad (\epsilon)$$

$$[E \cos(u_1) + u_4 \cos(u_1 - u_3)] w_1 + [E \sin(u_1) + u_4 \sin(u_1 - u_3)] w_2 + [u_4 \cos(u_1 - u_3)] w_3 + [u_4 \sin(u_3 - u_1)] w_4 = 0 \quad (\zeta) \quad (5.21)$$

$$[-E \sin(u_1) - u_4 \sin(u_1 - u_3)] w_1 + [E \cos(u_1) - 4u_2 + u_4 \cos(u_1 - u_3)] w_2 + [-u_4 \sin(u_1 - u_3)] w_3 + [-u_4 \cos(u_3 - u_1)] w_4 = 0 \quad (\eta)$$

$$[\cos(u_1 - u_3)] w_1 + [\sin(u_1 - u_3)] w_2 + [\cos(u_1 - u_3)] w_3 + [\sin(u_3 - u_1)] w_4 = 0 \quad (\theta)$$

$$[-\sin(u_1 - u_3)] w_1 + [\cos(u_1 - u_3)] w_2 + [-\sin(u_1 - u_3)] w_3 + \left[\frac{2u_4}{u_2} - \cos(u_3 - u_1)\right] w_4 = 0 \quad (\iota)$$

Το σύστημα (5.21) αποτελείται από 9 εξισώσεις με 9 αγνώστους και η λύση του υπολογίζει τις τάσεις και τις γωνίες $\mathbf{u}^T = [\theta_{12} \ V_{12} \ \theta \ V_L]^T$, την μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ P_{max} και τους πολλαπλασιαστές Lagrange w_1, w_2, w_3 και w_4 . Το σύστημα υπολογίζεται στο MATLAB καθώς η επίλυσή του είναι σχετικά δύσκολη.

Ο υπολογισμός της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για εγχύσεις σταθερές και ίσες με το μηδέν δίνει για το ακτινικό σύστημα μεταφοράς όριο φόρτισης τα 125MW από την επίλυση του συστήματος (5.21) στο MATLAB.

Όπως ειπώθηκε, οι εγχύσεις ισχύος από τον υποσταθμό διανομής οι οποίες μεταβάλλονται είναι οι P_{12} και Q_{12} (Σχήμα 5.2), άρα η παράμετρος $\mathbf{p}_1$ είναι η εξής:

$$\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} P_L \\ P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_L \\ P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Οπότε, οι η_p και η_q αποτελούν τις ευαισθησίες της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος ως προς τις εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος από τον υποσταθμό διανομής.

Στο MATLAB λύνεται το πρόβλημα για πολλές τιμές των εγχύσεων P_{12} και Q_{12} ώστε να δημιουργηθεί ένας πίνακας με ζεύγη ευαισθησιών για τους πιθανούς συνδυασμούς εγχύσεων από τον υποσταθμό διανομής.

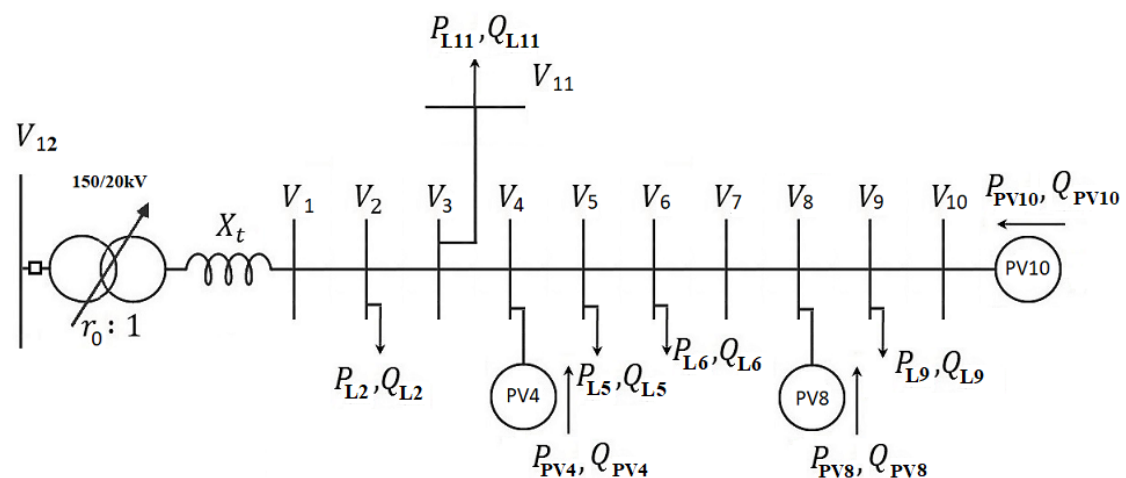
5.5.2 Εξεταζόμενη Γραμμή Διανομής

Το δίκτυο διανομής που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4 και εξετάζεται σε αυτή τη ενότητα φαίνεται ξανά παρακάτω για λόγους εποπτείας (Σχήμα 5.3).

Για το παρόν δίκτυο εξετάζονται οι ευαισθησίες της έγχυσης ενεργού και της άεργου ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης (Ζυγός 12 στο Σχήμα 4.1), καθώς και των ρευμάτων των μετατροπέων που υπάρχουν στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, ως προς τις μεταβολές της τάσης στους ζυγούς που συνδέονται οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής και στις οποίες υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης τάσης μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος.

Στην προηγούμενη υποενότητα 5.5.1 έγινε ξεχωριστή ανάλυση της γραμμής μεταφοράς και προέκυψαν οι ευαισθησίες της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του ακτινικού συστήματος μεταφοράς του Σχήμα 5.2 στις εγχύσεις ισχύος P_{12} και Q_{12} .

Οπότε, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των ευαισθησιών των εγχύσεων P_{12} και Q_{12} ως προς τις μεταβολές της τάσης των ζυγών στους οποίους συνδέονται οι μονάδες φωτοβολταϊκής παραγωγής. Εφαρμόζονται δηλαδή στην εξεταζόμενη γραμμή διανομής οι σχέσεις (5.18) και (5.19) που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.3.



Σχήμα 5.3 Εξεταζόμενο Δίκτυο Δοκιμών Μέσης Τάσης 11 Ζυγών

Ο υπολογισμός των ευαισθησιών γίνεται για κάποια επιλεγμένα στιγμιότυπα, που προκύπτουν από την ημερήσια ανάλυση που έγινε στην ενότητα 4.4, και ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Η τάση του δευτερεύοντος (MT) του Μ/Σ θεωρείται περίπου σταθερή και ίση με 1α.μ, αφού ρυθμίζεται μέσω του Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Εφαρμόζεται σήμα μεταβολή της τάσης των ζυγών (5.15) στους οποίους συνδέονται οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στα σημεία κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) που ρυθμίζει η κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα κατά $\mathbf{y} = \Delta \mathbf{V} = [\Delta V_4 \ \Delta V_8 \ \Delta V_{10}]$. Στην προκειμένη περίπτωση που εξετάζεται οι μεταβολές $\Delta V_k = +0,005$ αμ, για $k = 4, 8$ και 10 . Η μεταβολή της τάσης είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι βέβαιο ότι δεν παραβιάζονται τα όρια ρεύματος και η περιοχή εξέτασης θεωρείται γραμμική.

Πραγματοποιείται η ίδια εξέταση για τρία διαφορετικά στιγμιότυπα στα οποία εμφανίζονται και διαφορετικές συνθήκες παραγωγής – φορτίου (Σχήμα 4.5). Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τα στιγμιότυπα για τις ώρες 9:00, 14:00, και 19:00 στα οποία εμφανίζονται χαρακτηριστικά σενάρια παραγωγής-φορτίου. Ως αρχικές τιμές για κάθε στιγμιότυπο χρησιμοποιούνται οι τιμές τάσης και παραγωγής της κάθε μονάδας που προκύπτουν από το ημερήσιο προφίλ θεωρώντας ρύθμιση με τη χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$ για το οποίο έχουν υπολογιστεί οι εγχύσεις P_{12} και Q_{12} (Εν. 4.4.3).

Εφαρμόζεται αρχικά ξεχωριστά αύξηση της τάσης των τριών ζυγών παραγωγής ΔV_k , όπου $k=4,8,10$, και υπολογίζονται εκ νέου οι ροές ισχύος της γραμμής μεταφοράς με την πλήρη λύση Newton-Raphson στο περιβάλλον προσομοίωσης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ως ένα κοινό σήμα ταυτόχρονη αύξηση της τάσης και των τριών ζυγών παραγωγής.

Οι ζυγοί παραγωγής προσομοιώνονται στο συγκεκριμένο σημείο ως ζυγοί PV (PV bus), ώστε να εφαρμόζεται στο πρόγραμμα η μεταβολή της τάσης και να προκύπτει ως λύση η άεργος παραγωγή Q_k της κάθε μονάδας. Αυτό σημαίνει ότι για τη μεταβολή της τάσης της κάθε μονάδας, οι άλλες 2 προσαρμόζουν την ισχύ τους ώστε να διατηρούν την τάση του ζυγού τους.

Για λόγους σύγκρισης, υπολογίζονται οι ευαισθησίες για ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης όλων των ζυγών ΔΠ, καθώς και για ξεχωριστή μεταβολή της τάσης κάθε ζυγού. Στην δεύτερη περίπτωση, η συνολική ευαισθησία αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους ευαισθησιών εφόσον η μεταβολή της τάσης είναι κοινή.

Αναφέρεται σε αυτό το σημείο, ότι έχει γίνει η προσέγγιση ότι ο ζυγός 12 (ζυγός αναφοράς) διατηρεί σταθερή την τάση του και ίση με 1 αμ. Επίσης, θεωρείται ότι στην ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης, οι ζυγοί λαμβάνουν ακαριαία την τιμή και δεν εμφανίζονται ταλαντώσεις.

Για κάθε στιγμιότυπο που επιλέγεται μέσα στη μέρα, η ενεργός παραγωγή των μονάδων P_k παραμένει σταθερή, επομένως οι μεταβολές οφείλονται στη μεταβολή της άεργου παραγωγής των μονάδων και στη μεταβολή των φορτίων.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των ευαισθησιών που προέκυψαν με την παραπάνω αριθμητική μέθοδο και τις εγχύσεις που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση της γραμμής στο Power World Simulator.

Οι ροές ισχύος από τη γραμμή διανομής προς το σύστημα μεταφοράς παρουσιάζονται με θετικό πρόσημο, ενώ οι ροές από το άπειρο ΣΗΕ προς τη γραμμή δοκιμών παρουσιάζονται με αρνητικό πρόσημο. Αυτό συμβαίνει για να διευκολυνθεί ο μετέπειτα υπολογισμός της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, όπου οι ισχύεις P_{12} και Q_{12} αποτελούν παραμέτρους του συστήματος βελτιστοποίησης, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.2.3.

Πίνακας 5.2 Ευαισθησίες Παραμέτρων της γραμμής Δοκιμών σε ξεχωριστές μεταβολές της τάσης

	9:00		14:00		19:00	
	S_P	S_Q	S_P	S_Q	S_P	S_Q
4	-0,108	3,080	-0,120	3,136	-0,216	3,000
8	-0,044	0,016	-0,048	0,016	-0,224	0,040
10	-0,040	0,016	-0,040	0,012	-0,176	0,032
Σύνολο	-0,192	3,112	-0,208	3,164	-0,616	3,072

Στον Πίνακα 5.3, παρουσιάζονται οι τιμές των ευαισθησιών για τα τρία στιγμιότυπα με ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης και υπολογισμό της συνολικής μεταβολής των εγχύσεων λόγω της μεταβολής της τάσης στους 3 ζυγούς.

Πίνακας 5.3 Ευαισθησίες Παραμέτρων της γραμμής Δοκιμών σε ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης στους ζυγούς διεσπαρμένης παραγωγής

	9:00		14:00		19:00	
Ευαισθησίες	S_P	S_Q	S_P	S_Q	S_P	S_Q
$\sum S_{P,k}, \sum S_{Q,k}$	-0,172	3,100	-0,108	3,140	-0,544	3,052

Αρχικά, παρατηρείται ότι η μεταβολή της τάσης του Ζυγού 4 επιφέρει τη μεγαλύτερη μεταβολή στις ροές ισχύος προς τη μεταφορά. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι διότι, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.2, η ευαισθησία της αέργου ισχύος είναι αρκετά μεγαλύτερη από τους άλλους 2 ζυγούς. Αυτό συμβαίνει επειδή ο Ζυγός 4 βρίσκεται πιο κοντά στο ΣΑΤΥΦ που ρυθμίζεται με αποτέλεσμα να αντιστέκεται στις μεταβολές της τάσης του και άρα των ζυγών κοντά σε αυτό.

Η μεταβολή της Αέργου Ισχύος είναι προφανώς θετική και αυξάνεται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει διότι στις μονάδες παραγωγής που αποτελούν στην προσομοίωση ζυγούς παραγωγής εφαρμόζεται αύξηση της τάσης και οι μονάδες παράγουν αναγκαστικά άεργο ισχύ, που εν μέρει θα καταναλωθεί τοπικά στο δίκτυο και τελικά θα εξαχθεί προς το σύστημα μεταφοράς.

Η μεταβολή της Ενεργού Ισχύος στο ζυγό 12 είναι αρνητική παρόλο που οι μονάδες ΔΠ δεν μεταβάλλουν την παραγόμενη ενεργό ισχύ τους. Ωστόσο, η αύξηση της τάσης σε κάποιους ζυγούς, αυξάνει την τάση των ζυγών της γραμμής δοκιμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει αύξηση της κατανάλωσης των φορτίων που εξαρτώνται

άμεσα από την τάση των ζυγών στους οποίους συνδέονται. Η μείωση ωστόσο είναι μικρή και σχεδόν αμελητέα σε σχέση με την αύξηση της αέργου ισχύος.

Παρατηρείται ότι εμφανίζονται αποκλίσεις μεταξύ των ευαισθησιών που υπολογίστηκαν κατά την ταυτόχρονη μεταβολή και αυτών που υπολογίζονται από το άθροισμα των επιμέρους μεταβολών. Ο κύριος λόγος είναι ότι όταν πραγματοποιούνται ξεχωριστές μεταβολές των τάσεων, οι υπόλοιπες μονάδες ρυθμίζουν την άεργο ισχύ τους έτσι ώστε να διατηρούν την τάση τους σταθερή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απορροφούν μέρος της αέργου που παράγεται από τις υπόλοιπες μονάδες με αποτέλεσμα να μειώνεται η έγχυση αέργου κυρίως ισχύος προς το ζυγό 12. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως τις βραδινές ώρες που εμφανίζονται χαμηλές τάσεις.

Προφανώς το σύστημα δεν είναι γραμμικό οπότε οι ευαισθησίες μπορεί να μεταβάλλονται. Επίσης, μεγάλες μεταβολές της τάσης μπορεί να επηρεάζουν τη θέση του ΣΑΤΥΦ ή τα όρια ρεύματος των μετατροπέων με αποτέλεσμα να αλλάζουν σημαντικά οι ευαισθησίες. Στον Πίνακα 5.4 παρακάτω, φαίνεται ότι για μικρές μεταβολές της τάσης οι ευαισθησίες εμφανίζουν μια γραμμικότητα, αλλά όσο αυξάνονται οι μεταβολές, επενεργούν τα όρια ρεύματος και το ΣΑΤΥΦ και η γραμμικότητα χάνεται. Επίσης, η σχέση της κατανάλωσης των φορτίων με την τάση είναι μη γραμμική, οπότε η ευαισθησία της έγχυσης ενεργού ισχύος δε μεταβάλλεται γραμμικά. Οι μεταβολές πραγματοποιούνται στο μεσημεριανό στιγμιότυπο 14:00.

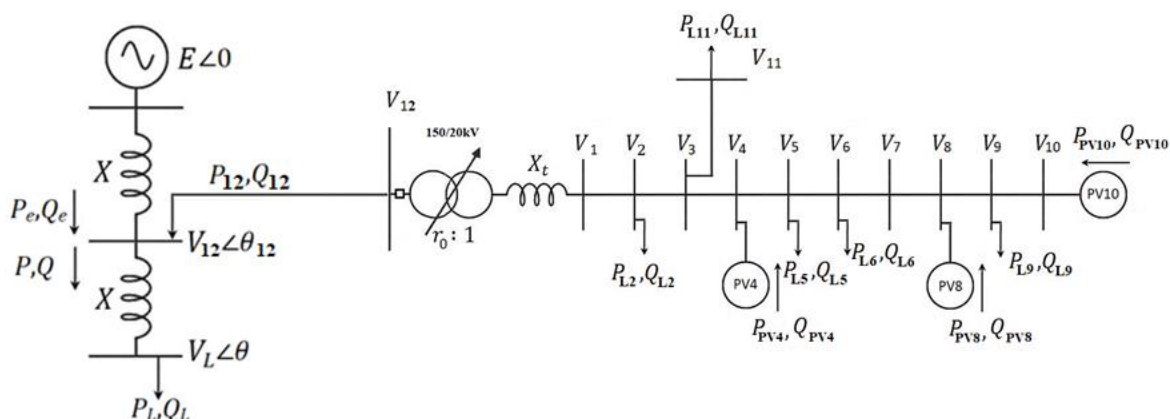
Πίνακας 5.4 Επίδραση μεταβολών τάσεως στις εγχύσεις ισχύος P και Q

ΔV (αμ)	ΔP (αμ)	S_P	ΔQ (αμ)	S_Q
0,001	-0,0001	-0,080	0,0031	3,140
0,002	-0,0002	-0,110	0,0063	3,140
0,003	-0,0003	-0,113	0,0094	3,140
0,004	-0,0005	-0,115	0,0126	3,140
0,005	-0,0005	-0,108	0,0157	3,140
0,01	-0,0007	-0,072	0,0203	2,028
0,05	-0,0027	-0,055	0,1114	2,228

Τέλος, οι ευαισθησίες που υπολογίζονται κατά την ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης, παρατηρείται ότι είναι ανάλογες των ευαισθησιών που οφείλονται μόνο στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 4. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε ζυγός εμφανίζει διαφορετική ευαισθησία ρεύματος που οφείλεται κυρίως στο σημείο του ζυγού στη γραμμή. Άρα, η ίδια μεταβολή της τάσης θα έχει διαφορετική ενίσχυση αέργου ισχύος για κάθε ζυγό. Πιο συγκεκριμένα, η μικρή μεταβολή της τάσης που εφαρμόζεται στα στιγμιότυπα, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την άεργο παραγωγή του ζυγού 4, ενώ σε μικρότερο βαθμό τις παραγωγές των ζυγών 8 και 10. Ως συνέπεια, το αντίκτυπο στις εγχύσεις P_{12} και Q_{12} είναι μικρό.

5.5.3 Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ικανότητα μεταφοράς

Εφόσον για τα δυο επιμέρους συστήματα έχουν υπολογιστεί οι ευαισθησίες η_p , η_q , S_p και S_q υπολογίζεται η ενίσχυση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που οφείλεται στο σήμα $y = \Delta V = [0,005 \ 0,0005 \ 0,005]$.



Σχήμα 5.4 Προς Εξέταση Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής

Από την επίλυση του προβλήματος μεγίστου έχουν υπολογιστεί οι ευαισθησίες η_p , η_q για διάφορες τιμές των εγχύσεων P_{12} και Q_{12} ενώ στην προηγούμενη υποενότητα υπολογίστηκαν οι ευαισθησίες S_p και S_q για τρία συγκεκριμένα στιγμιότυπα. Στον Πίνακα 5.4, χρησιμοποιείται η σχέση (5.20) για τον υπολογισμό της μεταβολής της P_{max} σε ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης των ζυγών φωτοβολταϊκής παραγωγής $\Delta V_k = +0.005 \text{ a.u.}$

Πίνακας 5.5 Υπολογισμός μεταβολής MMI στα τρία στιγμιότυπα

	η_p	η_q	S_p	S_q	ΔP_{max} (MW)
9:00	0,19173	0,60344	-0,172	3,100	0,4594
14:00	0,18647	0,60413	-0,108	3,140	0,4690
19:00	0,21859	0,60633	-0,544	3,052	0,4329

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 5.4, η μικρή αύξηση της τάσης επιφέρει αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του ακτινικού συστήματος μεταφοράς, η οποία ανάλογα και με τις συνθήκες φορτίου και παραγωγής μέσα στη μέρα κυμαίνονται στο 1-2% της συνολικής MMI. Αυτή η συνεισφορά, αν και μικρή, είναι σημαντική καθώς αποτελεί την υποστήριξη μιας μόνο γραμμής διανομής. Σε μεγάλο σύστημα μεταφοράς με πολλές συνδεδεμένες γραμμές διανομής, η αύξηση της MMI μπορεί να είναι μεγάλη για σχετικά μικρή άεργο υποστήριξη από κάθε επιμέρους γραμμή διανομής.

Παρατηρείται επίσης, ότι για αύξηση της τάσης στο συγκεκριμένο σύστημα οι μεταβολή της MMI είναι θετική. Για διάφορες μεταβολές που εξετάστηκαν παρατηρείται ότι η ευαισθησία της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος διατηρεί θετικό πρόσημο. Οπότε, σε επόμενο κεφάλαιο για μέγιστη υποστήριξη οι τάσεις θα οδηγηθούν στο άνω επιτρεπόμενο όριο. Η επίδραση της τάσης στη MMI φαίνεται και στον Πίνακα 5.6, όπου φαίνεται η θετική μονοτονία της ευαισθησίας του ορίου φόρτισης ως προς την τάση αλλά και η μη γραμμικότητα της σχέσης.

Πίνακας 5.6 Επίδραση της τάσης στο όριο φόρτισης

ΔV (αμ)	$\Delta P_{\max}$ (MW)
0,001	0,094
0,002	0,188
0,003	0,281
0,004	0,375
0,005	0,469
0,01	0,606
0,05	3,339
0,1	4,367

5.6 Μέθοδοι Υποστήριξης Έκτακτης Ανάγκης

Όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες ενότητες, ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής (Σχήμα 5.1) συγκεντρώνει δεδομένα από τα συστήματα διανομής και μεταφοράς ώστε να δώσει κάποιο σήμα μεταβολής y και να επιφέρει αύξηση της $P_{\max}$ του συστήματος μεταφοράς. Στην παρούσα διπλωματική το σήμα επιβάλλει μεταβολή της τάσης. Το σήμα μεταβολής μπορεί να είναι είτε άμεσο αν οι ζυγοί θεωρούνται ζυγοί παραγωγής, είτε έμμεσο όταν η αύξηση της τάσης γίνεται με αλλαγές στις χαρακτηριστικές ρύθμισης της τάσης ή στην τάση αναφοράς του ΣΑΤΥΦ που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. (Κεφ. 4)

Το σήμα y αποσκοπεί στην αντιμετώπιση μιας διαταραχής που μπορεί να εμφανιστεί, όπως η αύξηση του ισοδύναμου φορτίου του συστήματος μεταφοράς. Αποτελεί δηλαδή σήμα που αποστέλλεται σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης με σκοπό την υποστήριξη του συστήματος μεταφοράς. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αξιοποίηση των διαθέσιμων μεθόδων για την αύξηση της τάσης, οι οποίες αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

Προτείνεται άρα ένα διακριτό σήμα το οποίο θα ζητάει άεργη υποστήριξη από την διεσπαρμένη παραγωγή (σε αυτή την περίπτωση από τις Φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής) ώστε να στέλνει το σήμα μεταβολής y . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός φθηνού κι εύκολου να αποκτηθεί καναλιού επικοινωνίας, είτε ασύρματα (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ενσύρματα από τις γραμμές μεταφοράς. Το σήμα αίτησης άεργης υποστήριξης μπορεί να προέρχεται από το κέντρο ελέγχου ενέργειας της εκάστοτε περιοχής (Σχήμα 5.1), από μια αυτόματη συσκευή παρακολούθησης ενός γεγονότος

όπως η απώλεια της παραγωγής ή η απώλεια ενεργητικών στοιχείων της μεταφοράς, ή τέλος από μία συσκευή παρακολούθησης των συνθηκών χαμηλής τάσης του συστήματος μεταφοράς. Σε κάθε περίπτωση η ακριβής εφαρμογή κι εκτέλεση έχει μείνει έξω από αυτή την εργασία.

Άρα, στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η δυνατότητα των φωτοβολταϊκών μονάδων που συνδέονται στο δίκτυο διανομής να ενισχύσουν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής μεταφοράς παράγοντας άεργο ισχύ λόγω της αύξησης της τάσης των ζυγών τους. Η ενεργός παραγωγή των φωτοβολταϊκών θεωρείται ότι παραμένει σταθερή.

Αρχικά, γίνεται προσαρμογή των τάσεων των ζυγών των φωτοβολταϊκών μονάδων μέσω μεταβολών στις χαρακτηριστικές ρύθμισης της τάσης ($Q(V)$ χαρακτηριστική) και στο ΣΑΤΥΦ. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σήμα y προκύπτει από τις σχέσεις (5.16) και (5.17) αντίστοιχα. Όταν σταλεί το σήμα για άεργο υποστήριξη οι μεταβολές της τάσης γίνονται με τρεις διαφορετικούς τρόπους, αξιοποιώντας τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για ρύθμιση της τάσης. (Εν. 4.4)

Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι αύξησης των τάσεων θα είναι:

- Μετακίνηση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής, ορίζοντας τη νεκρή ζώνη σε υψηλότερες τάσεις (5.16)
- Μεταβολή της τιμής αναφοράς του ΣΑΤΥΦ (5.17)
- Συνδυασμός των δυο παραπάνω μεθόδων
- υπολογισμός των ευαισθησιών γίνεται μέσω της επίλυσης της ροής φορτίου του συστήματος διανομής, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.3.2 και ο υπολογισμός της μεταβολής της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος υπολογίζεται μέσω της σχέσης (5.20).

Για κάθε μέθοδο θα θεωρηθεί ότι η διαταραχή συμβαίνει για μια συγκεκριμένη ώρα της μέρας. Οι ώρες που επιλέγονται είναι η πρωινή ώρα 9:00, η μεσημεριανή ώρα 14:00 και η βραδινή ώρα 19:00. Η επιλογή αυτών των στιγμιότυπων δεν είναι τυχαία καθώς οι δύο αποτελούν ώρες της μέρας με αιχμή φορτίου και μέγιστη κατανάλωση, ενώ η πρωινή ώρα αποτελεί μια μέση κατάσταση.

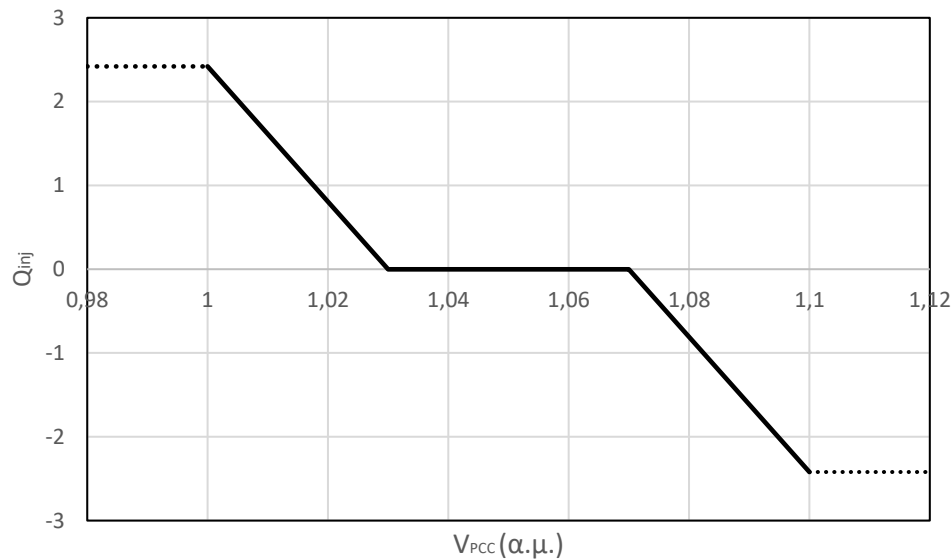
5.6.1 Σήμα Μετακίνησης $Q(V)$ χαρακτηριστικής

Σε αυτή την περίπτωση το σήμα μεταβολής y αποστέλλεται στους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών μονάδων και αφορά στη μεταβολή της χαρακτηριστικής $Q(V)$ που εφαρμόστηκε σε προηγούμενη ενότητα 4.4.3. Πιο συγκεκριμένα, αφορά στη μεταβολή των τάσεων αναφοράς που ορίζουν τη νεκρή ζώνη και τις μέγιστες και ελάχιστες τάσης ρύθμισης της $Q(V)$ χαρακτηριστικής. Άρα το σήμα y σύμφωνα και με την (5.16) γίνεται:

$$y = \Delta V_{QV} = [\Delta V_{dl} \ \Delta V_{du} \ \Delta V_{min} \ \Delta V_{max}] \quad (5.23)$$

Για την μετακίνηση της χαρακτηριστικής $Q(V)$ προς τα δεξιά, εφαρμόζεται ταυτόχρονη και ίση μεταβολή των 4 τάσεων αναφοράς που ορίζουν την καμπύλη η οποία ορίζεται ως μία βαθμωτή μεταβολή τάσης $\Delta V_{QV} = +0,05 \text{ αμ.}$ Το σήμα αποστέλλεται ταυτόχρονα και στις 3 φωτοβολταϊκές μονάδες και είναι το ίδιο.

Η χαρακτηριστική καμπύλη διαμορφώνεται βάση της μεταβολής των παραμέτρων (Σχήμα 5.5) που παρουσιάζονται και στον Πίνακα 5.7 :



Σχήμα 5.5 Μετατοπισμένη καμπύλη $Q(V)$ για εντολή άεργης υποστήριξης

Πίνακας 5.7 Παράμετροι Υλοποίησης μετατοπισμένης χαρακτηριστικής $Q(V)$

V_{dl} (αμ)	V_{du} (αμ)	Q_{max} (MVar)	Q_{min} (MVar)	V_{min} (αμ)	V_{max} (αμ)
1.03	1.07	2.42	-2.42	1.00	1.10

Οπότε προκύπτει η τμηματικά γραμμική συνάρτηση (5.24) που δίνει τη μετατοπισμένη χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$:

$$\begin{aligned}
 Q_k &= Q_{min} & V_k &\leq 1,00 \\
 Q_k &= Q_{max} - \lambda (V_k - V_{min}), & 1,00 &\leq V_k \leq 1,03 \\
 Q_k &= 0, & 1,03 &\leq V_k \leq 1,07 \\
 Q_k &= -\lambda (V_k - V_{max}), & 1,07 &\leq V_k \leq 1,10 \\
 Q_k &= Q_{max} & V_k &\geq 1,10
 \end{aligned} \tag{5.24}$$

Στα συγκριμένα στιγμιότυπα (9:00, 14:00, 19:00) εφαρμόζεται η μετατοπισμένη χαρακτηριστική $Q(V)$ που φαίνεται στο Σχήμα 5.5, με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι τάσεις των ζυγών V_k . Βάση της νέας χαρακτηριστικής οι φωτοβολταϊκές μονάδες αυξάνουν την άεργο ισχύ τους και στηρίζουν το σύστημα μεταφοράς. Ο υπολογισμός της ροής φορτίου βάση της νέας χαρακτηριστικής $Q(V)$ πραγματοποιείται όπως και στην ενότητα 4.4.4.

Θεωρείται ότι εφόσον δοθεί το σήμα y οι αντιστροφείς λειτουργούν ακαριαία βάση της νέας μετατοπισμένης χαρακτηριστικής $Q(V)$.

Υπολογίζονται οπότε οι εγγεόμενες ροές του δικτύου διανομής από το πρόβλημα ροής φορτίου στο Power World Simulator και στη συνέχεια βάση της εξίσωσης (5.20) η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Πίνακας 5.8 Μεταβολή της P_{max} με μετατόπιση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής για τα τρία στιγμιότυπα μέσα στη μέρα

	Q(V)			Μετατοπισμένη Q(V)			
Ωρες	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	ΔP_{max} (MW)
9:00	4,889	-2,149	0,99375	4,820	0,052	1,00000	1,313
14:00	8,991	-4,183	0,98750	8,869	-1,275	1,00000	1,738
19:00	-12,789	-1,520	0,99375	-13,416	2,181	1,00625	2,107

Ο Πίνακας 5.8 φανερώνει και για τα τρία στιγμιότυπα ότι το σήμα y που επιβάλλεται επιφέρει αύξηση στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής μεταφοράς.

Αυτό συμβαίνει καθώς οι μονάδες παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες αέργου ισχύος με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ροή προς τη γραμμή μεταφοράς Q_{12} . Η αύξηση της τάσης και στα τρία στιγμιότυπα αυξάνει την κατανάλωση των φορτίων και εφόσον η ενεργός παραγωγή των φωτοβολταϊκών παραμένει σταθερή, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εγγεόμενης ισχύος P_{12} προς τη μεταφορά. Ωστόσο, αφενός οι μεταβολές της ενεργού ισχύος είναι μικρότερες από αυτές της άεργου ισχύος, αφετέρου επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό τη μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος αφού $\eta_P < \eta_Q$.

Επίσης, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη μεταβολή συμβαίνει στις 19:00, καθώς το φορτίο είναι υψηλό και οι τάσεις των ζυγών αρκετά χαμηλές με αποτέλεσμα να βρίσκονται όλες εκτός της νεκρής ζώνης της μετατοπισμένης $Q(V)$ χαρακτηριστικής, κάτι που δε συμβαίνει στα υπόλοιπα στιγμιότυπα.

5.6.2 Μεταβολή Τάσης Αναφοράς του ΣΑΤΥΦ

Στην προκειμένη περίπτωση αποστέλλεται σήμα μεταβολής y στο μετασχηματιστή του υποσταθμού διανομής που αφορά στη μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Στην κανονική λειτουργία το ΣΑΤΥΦ διατηρεί την τάση του ζυγού μέσης τάσης κοντά στο 1 αμ. Ωστόσο, ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής αποστέλλει σήμα μεταβολής ώστε να αλλάξει την τάση αναφοράς και να εξεταστεί η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του ακτινικού συστήματος μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση το σήμα μεταβολής προκύπτει από τη σχέση (5.17) και είναι :

$$y = \Delta V_{LTC} \quad (5.25)$$

Μια ενδεχόμενη μείωση της τάσης αναφοράς θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης του ζυγού 1 (Σχήμα 4.1) που αποτελεί το δευτερεύοντα ζυγό που ρυθμίζεται και κατ' επέκταση συνολική μείωση των τάσεων των ζυγών της γραμμής διανομής.

Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών μονάδων συνεχίζουν να λειτουργούν σύμφωνα με τη χαρακτηριστική $Q(V)$ όπως ορίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (Εν.4.4.3), χωρίς κάποια μετακίνηση.

Αυτή η μεταβολή έχει δυο διαφορετικές επιπτώσεις που επηρεάζουν τις ισχύεις P_{12} και Q_{12} που εγχέονται στο δίκτυο μεταφοράς :

- Χαμηλότερες τάσεις στους ζυγούς του δικτύου διανομής συνεπάγεται χαμηλότερη κατανάλωση των φορτίων, όπως έχει δειχτεί και στην ενότητα 3.1.4, άρα και αύξηση της έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο μεταφοράς
- Χαμηλότερες τάσεις στους ζυγούς V_k στους οποίους συνδέονται οι φωτοβολταϊκές μονάδες έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένες παραγωγές αέργου ισχύος βάση της χαρακτηριστικής $Q(V)$, άρα και αύξηση της έγχυσης αέργου ισχύος στο ακτινικό δίκτυο μεταφοράς.

Άρα, διατηρώντας την αρχική χαρακτηριστική καμπύλη $Q(V)$ (Σχήμα 4.17), σ' αυτό το κομμάτι θα μειωθεί η τιμή αναφοράς ρύθμισης του δευτερεύοντος του ΣΑΤΥΦ εφαρμόζοντας το σήμα $y = \Delta V_{LTC} = -0,05$ αμ οπότε η τάση του Ζυγού 1 θα ελέγχεται πλέον εντός της νέας νεκρής ζώνης:

$$V_{LTC} - \frac{d}{2} \leq V_1 \leq V_{LTC} + \frac{d}{2} \quad (5.26)$$

Όπου, d είναι το εύρος της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ, όπως έχει οριστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και στην προκειμένη $d = 0,0125$ αμ.

Οπότε, από την επίλυση της ροής φορτίου για το σύστημα διανομής, μέσω του λογισμικού προσομοίωσης Power World Simulator, και της σχέσης (5.20),

υπολογίζεται τελικά η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του ακτινικού συστήματος μεταφοράς (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9 Μεταβολή της P_{max} με μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για τα τρία στιγμιότυπα

	$V_{set,LTC} = 1 \text{ αμ}$			$V_{set,LTC} = 0,95 \text{ αμ}$			
Ωρες	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	ΔP_{max} (MW)
9:00	4,889	-2,149	0,99375	5,318	0,727	1,06250	1,816
14:00	8,991	-4,183	0,98750	9,310	-1,213	1,06250	1,858
19:00	-12,789	-1,520	0,99375	-12,197	2,570	1,00625	2,609

Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, η μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ και στις τρεις περιπτώσεις αυξάνει την ισχύ P_{12} που ρέει προς τη γραμμή μεταφοράς, αφού μειώνεται η κατανάλωση των φορτίων ενώ αυξάνεται και η άεργος ισχύς Q_{12} λόγω της αύξησης της άεργου παραγωγής κάθε φωτοβολταϊκής μονάδας.

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι μεγαλύτερη τις απογευματινές ώρες.

Με αυτή τη μέθοδο παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της MMI σε σχέση με τη μετακίνηση της χαρακτηριστικής $Q(V)$. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη μείωση της κατανάλωσης των φορτίων που προκαλείται από την μείωση της τάσης του ζυγού 1 μέσω του ΣΑΤΥΦ.

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος επιβαρύνει πιο πολύ το Μ/Σ καθώς επιβάλλει γρήγορες αλλαγές λήψεων που εμπεριέχουν χρονικές καθυστερήσεις. Αυτό σημαίνει αφενός ότι για να αλλάξει 10 θέσεις, όπως συμβαίνει στο παράδειγμα θα χρειαστεί πάνω από 1 λεπτό, αφετέρου ότι φθείρεται πιο γρήγορα ο εξοπλισμός με συνέπεια επιβαρύνσεις συντήρησης.

Παράλληλα, μικρότερο προφίλ τάσης στους ζυγούς του δικτύου διανομής μπορεί να σημαίνει ότι τα όρια ρεύματος των αντιστροφών είναι πιο πιθανό να παραβιαστούν.

5.6.3 Συνδυασμός Μεθόδων

Προτείνεται ακόμα, ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων για επιπλέον υποστήριξη του συστήματος μεταφοράς.

Σε αυτή την περίπτωση, το σήμα μεταβολής y αποστέλλεται ταυτόχρονα σε αντιστροφείς και μετασχηματιστή επιβάλλοντας και τις δυο μεταβολές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το σήμα y είναι της μορφής:

$$y = \Delta V = [\Delta V_{LTC} \ \Delta V_{QV}] \quad (5.27)$$

Σε αυτή την περίπτωση το σήμα μεταβολής y δεν αποτελεί βαθμωτό μέγεθος καθώς ορίζει ταυτόχρονα διαφορετικές μεταβολές σε στοιχεία του δικτύου διανομής. Οπότε, οι ευαισθησίες S_P και S_Q που υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.18) και (5.19), αποτελούν διανύσματα που περιέχουν τις επιμέρους ευαισθησίες στις δυο διακριτές μεταβολές που εφαρμόζονται. Οπότε, σε αυτή την περίπτωση η (5.20) διαμορφώνεται ως εξής:

$$\Delta P_{max} = \frac{\partial P_{max}}{\partial V_{LTC}} \Delta V_{LTC} + \frac{\partial P_{max}}{\partial V_{Q(V)}} \Delta V_{Q(V)} \quad (5.28)$$

Ωστόσο, για τον υπολογισμό γίνεται η προσέγγιση ότι η ευαισθησία προκύπτει από τη συνολική μεταβολή των εγχύσεων P_{12} και Q_{12} προς την ταυτόχρονη μεταβολή και των 2 παραμέτρων του διανύσματος y . Επειδή, οι μεταβολές της τάσης είναι σχετικά μικρές ($\pm 5\%$) και σταθερές, υπολογίζεται προσεγγιστικά η γραμμική μεταβολή της ΔP_{max} επίλυοντας τη ροή φορτίου του συστήματος διανομής για ταυτόχρονη μεταβολή και των 2 παραμέτρων και υπολογίζοντας τη συνολική μεταβολή των εγχύσεων. Ο Πίνακας 5.10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση της ροής φορτίου του συστήματος διανομής και την εφαρμογή της σχέσης για δεδομένη κοινή μεταβολή y (5.20).

Πίνακας 5.10 Μεταβολή της P_{max} με μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ και μετατόπιση της $Q(V)$ για τα τρία στιγμιότυπα μέσα στη μέρα

	$V_{set,LTC} = 1 \text{ αμ} / Q(V)$			$V_{set,LTC} = 0,95 \text{ αμ} / Q(V)$ μετατοπισμένη			
Ωρες	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	r	ΔP_{max} (MW)
9:00	4,889	-2,149	0,99375	5,081	2,564	1,06250	2,879
14:00	8,991	-4,183	0,98750	9,259	0,466	1,06250	2,880
19:00	-12,789	-1,520	0,99375	-12,197	2,570	1,00625	2,609

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.10, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς αυξάνεται στα δύο πρώτα στιγμιότυπα, καθώς οι μονάδες εγχέουν μεγαλύτερες ποσότητες αέργου ισχύος στη γραμμή διανομής.

Για τις 19:00 παρατηρείται ότι η μεταβολή της MMI δε μεταβάλλεται σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο. Αυτό συμβαίνει γιατί στην προηγούμενη περίπτωση οι τάσεις των ζυγών είναι πολύ χαμηλές λόγω της μεταβολής της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αντιστροφείς να δουλεύουν στη περιοχή μέγιστης παραγωγής Q με την παλιά καμπύλη $Q(V)$. Άρα, η μετατόπιση της χαρακτηριστικής $Q(V)$ δε μεταβάλλει την μεταβολή της MMI.

5.7 Εκτίμηση ΔP_{max} κατά τη Διάρκεια μιας ημέρας

Από την ημερήσια ανάλυση που έγινε στην Ενότητα 4.4 παραπάνω του προηγούμενου κεφαλαίου, έχουν υπολογιστεί οι εγγεόμενες ροές ισχύος P_{12} και Q_{12} στο σύστημα μεταφοράς για κάθε ώρα μιας τυπικής ημέρας, ενώ από το πρόβλημα μεγιστοποίησης έχουν υπολογιστεί στο περιβάλλον του MATLAB τα ζεύγη w_1 και w_2 για όλες τις πιθανές τιμές των P_{12} και Q_{12} που ρέουν από και προς τη γραμμή μεταφοράς (Εν.5).

Πριν εφαρμοστεί το σήμα y για άεργο υποστήριξη του ακτινικού συστήματος μεταφοράς από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, θα εκτιμηθεί η μεταβολή της P_{max} για το συνολικό δίκτυο για κάθε ώρα της μέρας, βάση του προσεγγιστικού τύπου:

$$\Delta P_{max} = \eta_P \cdot \Delta P_{12} + \eta_Q \cdot \Delta Q_{12} \quad (5.29)$$

Στην προκειμένη περίπτωση δεν εφαρμόζονται μεταβολές τάσης, οπότε η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος υπολογίζεται σε σχέση με την τιμή της όταν δεν υπάρχει καθόλου η γραμμή διανομής.

Παράλληλα στο WPSTAB (1.8), προσομοιώνεται το συνολικό δίκτυο και υπολογίζεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στη χρονική προσομοίωση που γίνεται. Το σύστημα φτάνει το όριο φόρτισης του με την επιβολή μιας διαταραχής του φορτίου του συστήματος μεταφοράς, το οποίο αυξάνει σταδιακά το φορτίο του με μορφή ράμπας μέχρι να επιτευχθούν συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Για τις περιπτώσεις λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, χαρακτηριστικής $Q(V)$ και χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$ εφαρμόζεται η σχέση (5.29) και συγκρίνεται με την πλήρη χρονική προσομοίωση του συνολικού συστήματος στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB, ώστε να φανούν οι αποκλίσεις της μεταβολής της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής μεταφοράς μετά τη ξεχωριστή μελέτη των δυο συστημάτων. Ο υπολογισμός μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας εμφανίζεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή ενώ η χρονική προσομοίωση στο WPSTAB με μαύρη συμπαγή γραμμή.

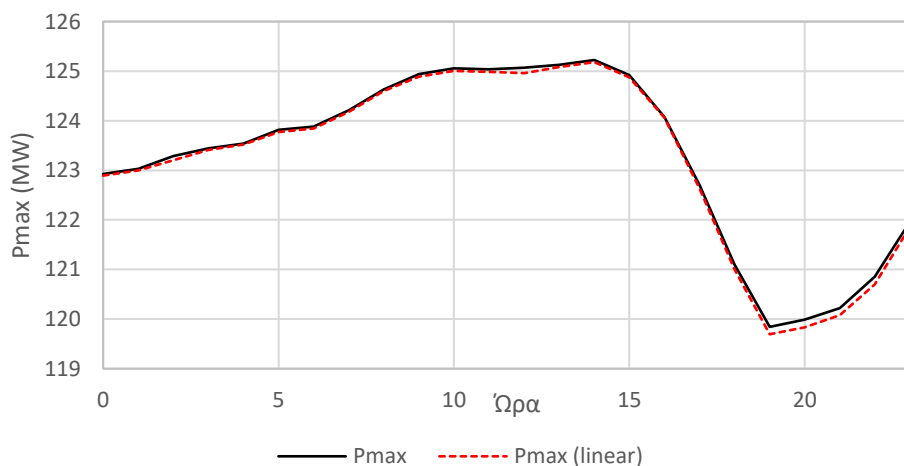
5.7.1 Φωτοβολταϊκά με Μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος

Όταν οι φωτοβολταϊκές μονάδες λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στον Πίνακα 5.11 φαίνονται οι ροές P_{12} και Q_{12} καθώς και τα ζεύγη των ευαισθησιών w_1 και w_2 .

Από τον Πίνακα 5.9 και το Σχήμα 5.6 παρατηρείται ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς P_{max} αυξάνεται τις μεσημεριανές ώρες που η παραγωγή είναι υψηλή και οι τάσεις των ζυγών είναι σχετικά μεγάλες (Σχήμα 4.6), ενώ μειώνεται τις απογευματινές ώρες που το φορτίο είναι υψηλό και οι ροές ισχύος προς τη γραμμή διανομής είναι μεγάλες, καθώς δεν υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή.

Πίνακας 5.11 Ροές P_{12} και Q_{12} και ζεύγη ευαισθησιών w_1 και w_2 για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος

Ωρα (h)	P_{12} (MW)	Q_{12} (Mvar)	η_P	η_Q	$\Delta P_{\max}$ (MW)	$P_{\max}$ (προσομοίωση)
0	-5,528	-1,590	0,20784	0,601789	-2,1058	123,584
1	-5,256	-1,510	0,20784	0,601789	-2,0011	123,372
2	-4,773	-1,335	0,20784	0,601789	-1,7954	123,484
3	-4,244	-1,173	0,20784	0,601789	-1,5880	123,584
4	-3,985	-1,087	0,20784	0,601789	-1,4824	123,576
5	-3,339	-0,884	0,20784	0,601789	-1,2260	123,814
6	-3,044	-0,868	0,20784	0,601789	-1,1550	123,883
7	-1,159	-0,974	0,20241	0,602267	-0,8212	124,21
8	1,962	-1,310	0,19705	0,602817	-0,4031	124,633
9	4,858	-1,727	0,19173	0,603438	-0,1107	124,696
10	6,871	-2,174	0,19173	0,603438	0,0055	124,508
11	6,750	-2,164	0,19173	0,603438	-0,0116	124,534
12	7,944	-2,514	0,18647	0,604131	-0,0375	124,244
13	8,393	-2,452	0,18647	0,604131	0,0837	124,212
14	8,932	-2,456	0,18647	0,604131	0,1818	124,213
15	6,246	-2,138	0,18647	0,604131	-0,1269	124,219
16	2,043	-2,227	0,19705	0,602817	-0,9399	124,075
17	-3,545	-2,717	0,20784	0,601789	-2,3718	122,72
18	-8,715	-3,559	0,21332	0,601385	-3,9994	122,009
19	-12,026	-4,416	0,21859	0,60633	-5,3063	121,48
20	-11,883	-4,241	0,21859	0,60633	-5,1689	121,428
21	-11,436	-4,027	0,21887	0,601055	-4,9235	121,672
22	-10,181	-3,450	0,21887	0,601055	-4,3020	122,172
23	-7,810	-2,452	0,21332	0,601385	-3,1406	122,795



Σχήμα 5.6 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στις φωτοβολταϊκές μονάδες

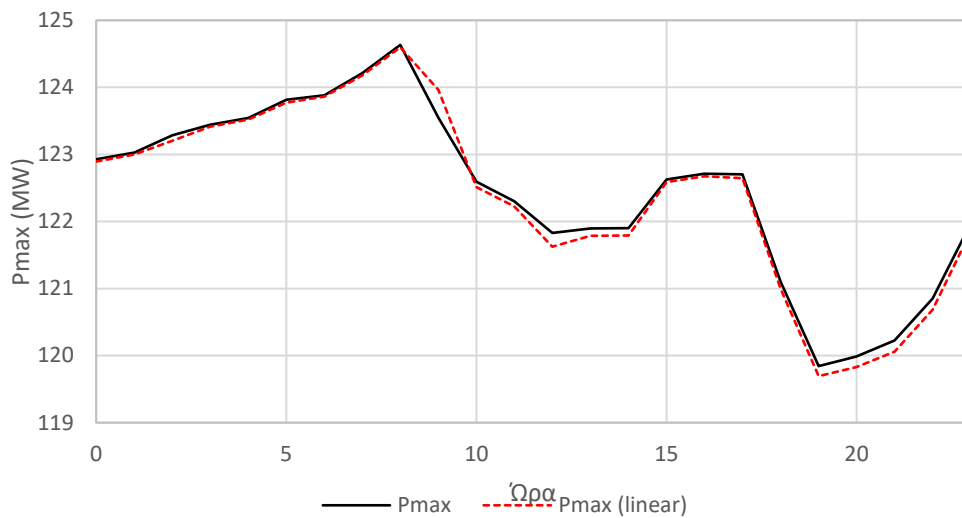
5.7.2 Φωτοβολταϊκές Μονάδες με βάση Καμπύλη $\cos\phi(P)$

Πίνακας 5.12 Ροές P_{12} και Q_{12} και ζεύγη ευαισθησιών w_1 και w_2 για ρύθμιση με χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$

Ωρα (h)	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	η_P	η_Q	$\Delta P_{\max}$ (MW)	$P_{\max}$ (προσομοίωση)
0	-5,528	-1,590	0,2078	0,6018	-2,106	122,928
1	-5,256	-1,510	0,2078	0,6018	-2,001	123,028
2	-4,773	-1,335	0,2078	0,6018	-1,795	123,285
3	-4,244	-1,173	0,2078	0,6018	-1,588	123,441
4	-3,985	-1,087	0,2078	0,6018	-1,482	123,541
5	-3,339	-0,884	0,2078	0,6018	-1,226	123,814
6	-3,044	-0,868	0,2024	0,6023	-1,139	123,883
7	-1,159	-0,974	0,2024	0,6023	-0,821	124,21
8	1,962	-1,310	0,1970	0,6028	-0,403	124,633
9	4,930	-3,289	0,1917	0,6034	-1,039	123,549
10	6,969	-6,275	0,1911	0,6087	-2,488	122,592
11	6,896	-6,724	0,1911	0,6087	-2,775	122,3
12	8,036	-7,905	0,1850	0,6149	-3,374	121,828
13	8,497	-7,783	0,1850	0,6149	-3,214	121,897
14	9,016	-7,930	0,1850	0,6149	-3,208	121,902
15	6,320	-5,945	0,1911	0,6087	-2,411	122,624
16	2,163	-4,524	0,1965	0,6081	-2,326	122,714
17	-3,545	-2,717	0,2024	0,6023	-2,354	122,703
18	-8,715	-3,559	0,2133	0,6014	-3,999	121,102
19	-12,026	-4,416	0,2186	0,6063	-5,306	119,843
20	-11,883	-4,241	0,2186	0,6063	-5,169	119,986
21	-11,436	-4,027	0,2186	0,6063	-4,941	120,223
22	-10,181	-3,450	0,2186	0,6063	-4,317	120,852
23	-7,810	-2,452	0,2130	0,6066	-3,151	122

Οι μονάδες θεωρείται πως λειτουργούν βάση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\cos\phi(P)$ (Σχήμα 4.14) οπότε διαμορφώνεται το ημερήσιο προφίλ τάσης στους ζυγούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.12 οι ροές P_{12} και Q_{12} καθώς και τα ζεύγη των ευαισθησιών w_1 και w_2 κατά τη διάρκεια της μέρας.

Από τον Πίνακα 5.12 καθώς και το Σχήμα 5.7 παρατηρείται ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς $P_{\max}$ τις μεσημεριανές ώρες που η παραγωγή είναι υψηλή αρχίζει και μειώνεται τις ώρες που πραγματοποιείται η ρύθμιση της τάσης. Αυτό συμβαίνει διότι η χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ αναγκάζει τις φωτοβολταϊκές μονάδες να απορροφήσουν ισχύ ώστε να μειωθεί η τάση των ζυγών της γραμμής διανομής (Σχήμα 4.15). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η άεργος ισχύς που εισέρχεται στη γραμμή διανομής Q_{12} . Τις απογευματινές η χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ δεν πραγματοποιεί ρύθμιση οπότε η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι ίδια με πριν.



Σχήμα 5.7 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για ρύθμιση με χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ στις φωτοβολταϊκές μονάδες

5.7.3 Φωτοβολταϊκές Μονάδες με βάση Χαρακτηριστική Καμπύλη $Q(V)$

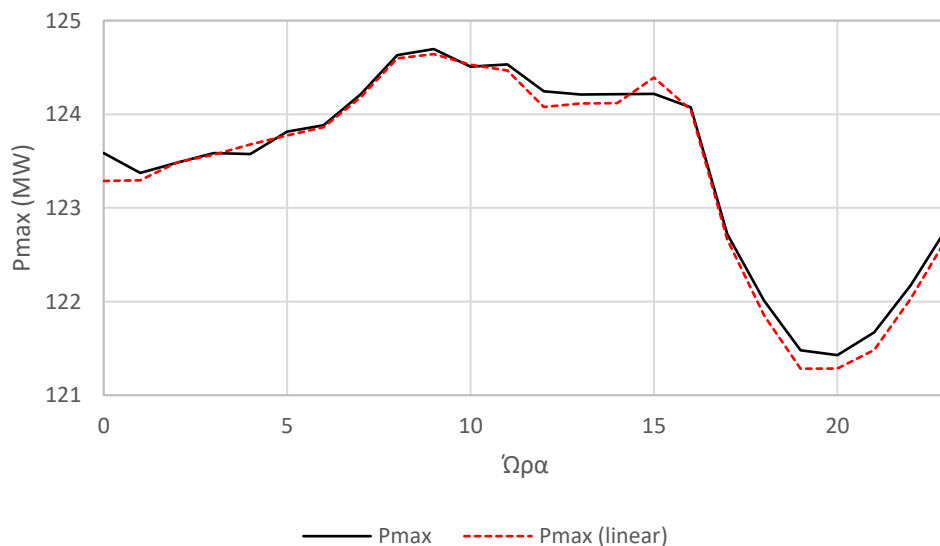
Στην υποενότητα αυτή, οι μονάδες λειτουργούν βάση της χαρακτηριστικής καμπύλης $Q(V)$ (Σχήμα 4.17) οπότε διαμορφώνεται το ημερήσιο προφίλ τάσης στους ζυγούς όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13 οι ροές P_{12} και Q_{12} καθώς και τα ζεύγη των ευαισθησιών w_1 και w_2 κατά τη διάρκεια της μέρας. Σύμφωνα με αυτά, προκύπτει η καμπύλη του Σχήμα 5.8, όπου με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η P_{max} όπως προκύπτει τα δεδομένα του Πίνακα 5.13, ενώ με μαύρη συμπαγή γραμμή εμφανίζεται η P_{max} υπολογισμένη για κάθε ώρα από την χρονική προσομοίωση στο WPSTAB.

Από τον Πίνακα 5.13 καθώς και το Σχήμα 5.8 παρατηρείται ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς P_{max} αρχίζει και μειώνεται τις ώρες που πραγματοποιείται η ρύθμιση της τάσης, δηλαδή τις μεσημεριανές ώρες που η παραγωγή είναι υψηλή. Αυτό συμβαίνει διότι η χαρακτηριστική $Q(V)$ αναγκάζει τις φωτοβολταϊκές μονάδες να απορροφήσουν άεργο ισχύ ώστε να μειωθεί η τάση των ζυγών της γραμμής διανομής (Σχήμα 4.18). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η άεργος ισχύς που εισέρχεται στη γραμμή διανομής Q_{12} .

Τις απογευματινές ώρες η χαρακτηριστική $Q(V)$ αναγκάζει τις φωτοβολταϊκές μονάδες σε έγχυση αέργου ισχύος για τη βελτίωση των μεγάλων πτώσεων τάσης κατά μήκος της γραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός τη βελτίωση του προφίλ της τάσης των ζυγών (Σχήμα 4.19) και αφετέρου την μεγαλύτερη ροή Q_{12} προς τη γραμμή μεταφοράς με συνέπεια την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Πίνακας 5.13 Ροές P_{12} και Q_{12} και ζεύγη των ευαισθησιών w_1 και w_2 για ρύθμιση με χαρακτηριστική $Q(V)$

Ωρα (h)	P_{12} (MW)	Q_{12} (MVar)	η_P	η_Q	$\Delta P_{\max}$ (MW)	$P_{\max}$ (προσομοίωση)
0	-5,596	-0,913	0,20784	0,60179	-1,712	123,584
1	-5,329	-0,992	0,20784	0,60179	-1,705	123,372
2	-4,667	-0,901	0,20784	0,60179	-1,512	123,484
3	-4,226	-0,922	0,20784	0,60179	-1,433	123,584
4	-3,390	-1,027	0,20784	0,60179	-1,323	123,576
5	-3,339	-0,884	0,20784	0,60179	-1,226	123,814
6	-3,044	-0,868	0,20241	0,60227	-1,139	123,883
7	-1,159	-0,974	0,20241	0,60227	-0,821	124,21
8	1,962	-1,310	0,19705	0,60282	-0,403	124,633
9	4,899	-2,149	0,19173	0,60344	-0,357	124,696
10	4,930	-2,321	0,19108	0,60868	-0,471	124,508
11	6,846	-3,022	0,19108	0,60868	-0,531	124,534
12	8,004	-3,906	0,18500	0,61487	-0,921	124,244
13	8,452	-3,982	0,18500	0,61487	-0,885	124,212
14	8,991	-4,138	0,18500	0,61487	-0,881	124,213
15	6,282	-2,968	0,19108	0,60868	-0,606	124,219
16	2,043	-2,227	0,19646	0,60806	-0,953	124,075
17	-3,530	-2,695	0,20241	0,60227	-2,338	122,72
18	-9,153	-1,989	0,21332	0,60138	-3,149	122,009
19	-12,789	-1,520	0,21859	0,60633	-3,717	121,48
20	-12,649	-1,568	0,21859	0,60633	-3,716	121,428
21	-12,030	-1,464	0,21859	0,60633	-3,517	121,672
22	-11,299	-0,822	0,21859	0,60633	-2,968	122,172
23	-7,980	-1,005	0,21296	0,60665	-2,309	122,795



Σχήμα 5.8 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για ρύθμιση με χαρακτηριστική $Q(V)$ στις φωτοβολταϊκές μονάδες

Συγκριτικά με τις δυο προηγούμενες υποενότητες, παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις. Αυτές μπορεί να οφείλονται αρχικά στο γεγονός ότι η εφαρμογή της $Q(V)$ καμπύλης γίνεται με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου σύγκλισης, που δίνει μια πιθανή απόκλιση. Παράλληλα, οι ευαισθησίες w_1 και w_2 μπορεί να εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές.

Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση ωστόσο, οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τα 0,2 MW, ακόμα και στις πιο μεγάλες μεταβολές της P_{max} , όπως στις 19:00.

5.7.4 Σύγκριση Επίδρασης Στο Όριο Φόρτισης για Κάθε Μέθοδο Ρύθμισης

Τάσης και Συμπεράσματα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού

Η ξεχωριστή ανάλυση των συστημάτων και ο υπολογισμός της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής μεταφοράς μέσω της σχέσης (5.29) δίνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αποτελέσματα πολύ κοντινά σε αυτά που προέκυψαν από τη χρονική προσομοίωση του πλήρους συστήματος στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB το οποίο κάνει πλήρη μη γραμμική επίλυση των εξισώσεων για τον υπολογισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος P_{max} .

Για τα τρία σημεία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων που μελετήθηκαν (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος (UPF), χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$, χαρακτηριστική $Q(V)$), εξάγονται κάποια συμπεράσματα για τη μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής μεταφοράς.

Η αύξηση των ροών ισχύος P_{12} και Q_{12} προς τη γραμμή μεταφοράς επιφέρουν αυξήσεις στη MMI, όπως παρατηρείται τις μεσημεριανές ώρες. Από την άλλη, όταν οι P_{12} και Q_{12} είναι αρνητικές και η ροή προς τη γραμμή διανομής είναι μεγάλη (όπως συμβαίνει τις απογευματινές – βραδινές ώρες που εμφανίζεται και η αιχμή του φορτίου) τότε η MMI μειώνεται.

Αυτό σημαίνει ότι όταν οι τάσεις στους ζυγούς διανομής είναι υψηλές η MMI αυξάνεται και η ροή ισχύος αντιστρέφεται προς τη γραμμή μεταφοράς. Αντίθετα, όταν εμφανίζονται πτώσεις τάσης κατά μήκος των ζυγών διανομής, η MMI μειώνεται καθώς η γραμμή διανομής απορροφά ισχύ από τη γραμμή μεταφοράς.

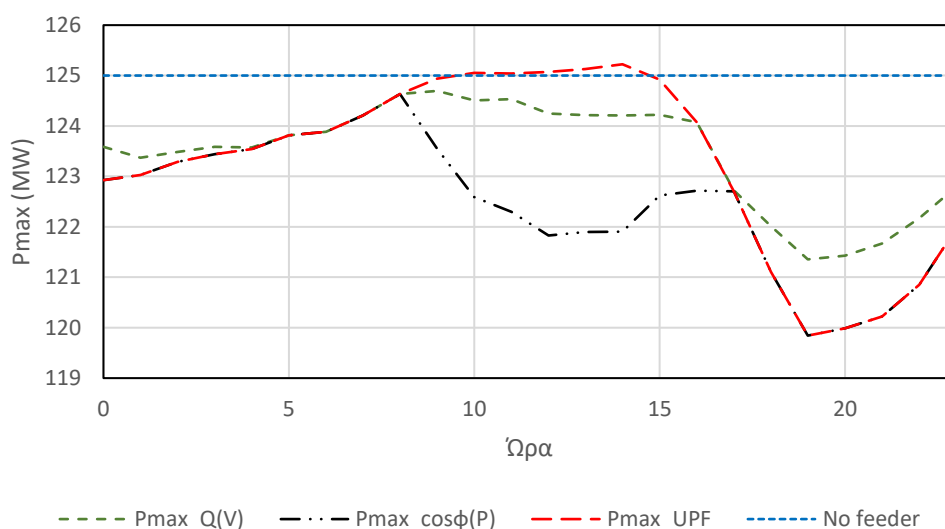
Όσον αφορά τις τρεις διαφορετικές μεθόδους ελέγχου των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών μονάδων που εμφανίζονται και στο Σχήμα 5.9, προφανώς η λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος εμφανίζει τη μεγαλύτερη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ τις απογευματινές ώρες, καθώς δεν εμφανίζονται επιπλέον ροές αέργου ισχύος όπως συμβαίνει για τις χαρακτηριστικές $\cos\phi(P)$ και $Q(V)$. Μεταξύ των δυο χαρακτηριστικών παρατηρείται ότι η $\cos\phi(P)$ μειώνει πιο πολύ τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ καθώς οι μονάδες απορροφούν μεγαλύτερες ποσότητες αέργου ισχύος.

Ωστόσο, τις απογευματινές και βραδινές ώρες η $Q(V)$ αυξάνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ σε σχέση με τις άλλες δυο λειτουργίες αφού δημιουργεί ροές

αέργου ισχύος προς το Ζυγό 12 κατά την ανύψωση των τάσεων που εφαρμόζει η ρύθμιση.

Ο γραμμικός υπολογισμός της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο παρατηρείται ότι εμφανίζει μικρές αποκλίσεις σε σχέση με την πλήρη χρονική προσομοίωση που υπολογίστηκε στο πρόγραμμα WPSTAB. Εφόσον, μπορεί να χρησιμοποιείται χωρίς να εισάγει μεγάλα σφάλματα υπολογισμού, εμφανίζει κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα.

Σε μια γραμμή μεταφοράς, όπως αυτή που εξετάζεται, μπορεί να συνδέονται πάνω από μια γραμμές διανομής, με πρωτεύοντα και δευτερεύοντα συστήματα, μεταβλητά φορτία και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με μεταβαλλόμενη παραγωγή ενέργειας. Αυτό καθιστά τη συνολική εξέταση και προσομοίωση ενός τέτοιου δικτύου δύσκολη και πολύπλοκη.



Σχήμα 5.9 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς γραμμής μεταφοράς για τα τρία σημεία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων

Η δυνατότητα ξεχωριστής ανάλυσης του συστήματος μεταφοράς και του συστήματος διανομής είναι το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου που προτείνεται. Δηλαδή, ο διαχειριστής ενός δικτύου μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τις εγγεόμενες ισχύεις από την κάθε συνδεδεμένη γραμμή διανομής δύναται σε κάθε στιγμή να κάνει μια εκτίμηση για τη μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής μεταφοράς που μπορεί να επιτευχθεί. Έτσι απομπλέκονται τα συστήματα και κατά συνέπεια οι υπολογισμοί.

Παράλληλα, σε περιπτώσεις αναταραχών μπορεί να δίνει τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου μεταφοράς να γνωρίζει εκ των προτέρων, ποια γραμμή διανομής επηρεάζει πιο πολύ τη ΜΜΙ και ως εκ τούτου ποια μπορεί να στηρίξει και κατά πόσο το σύστημα μεταφοράς όταν χρειαστεί.

6

Φωτοβολταϊκά με Σταθερή Τάση Ζυγών και Άεργη Υποστήριξη Έκτακτης Ανάγκης (EMRS)

6.1 Ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους Ζυγούς Παραγωγής

Σε αυτό το κεφάλαιο θεωρείται ότι οι φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής του εξεταζόμενου συστήματος διανομής (Σχήμα 6.1) έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή την τάση των ζυγών στους οποίους συνδέονται.

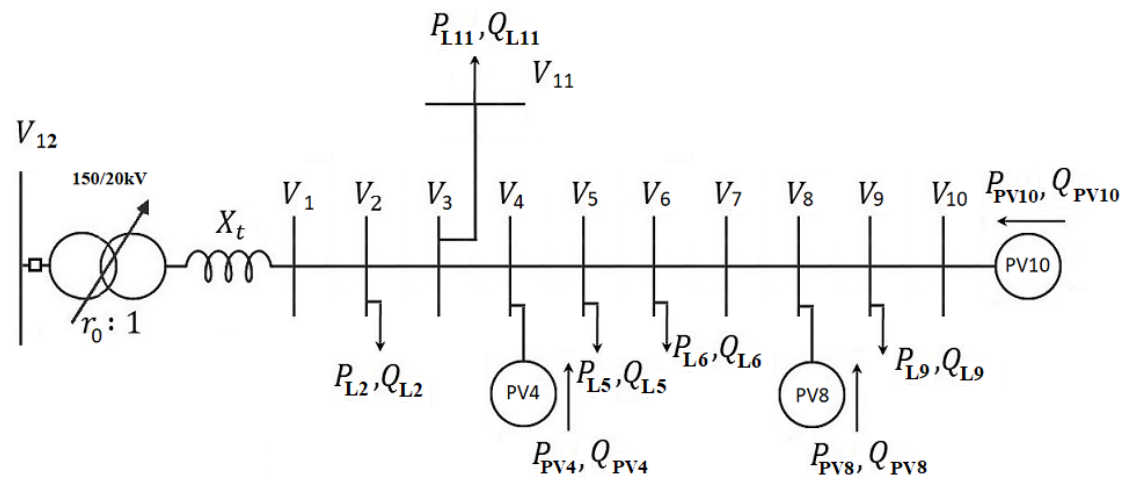
Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μετατροπέα πηγής τάσης, ο οποίος λειτουργεί με σταθερή τάση και μεταβλητό ρεύμα στην πλευρά εναλλασσομένου ρεύματος (AC) και αποτελεί ουσιαστικά ελεγχόμενη πηγή σταθερής τάσης (Κεφ. 2). Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα απευθείας ρύθμισης της τάσης των ζυγών που συνδέονται οι φωτοβολταϊκές μονάδες και ως εκ τούτου η δυνατότητα απευθείας αύξησης της τάσης των ζυγών για υποστήριξη έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση διαταραχής.

Ακολούθως εξετάζεται η ρύθμιση σταθερής τάσης των ζυγών Φ/Β κι εν συνεχεία εξετάζεται η έκδοση κατάλληλου σήματος μεταβολής γ για έκτακτη υποστήριξη του συστήματος μεταφοράς.

6.1.1 Ημερήσιο Προφίλ Τάσης

Για το σύστημα διανομής (Σχήμα 4.1) που παρουσιάστηκε και εξετάστηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται ημερήσια προσομοίωση στο Power World Simulator με χρήση των ημερήσιων καμπυλών παραγωγής και φορτίου (Σχήμα 4.5)

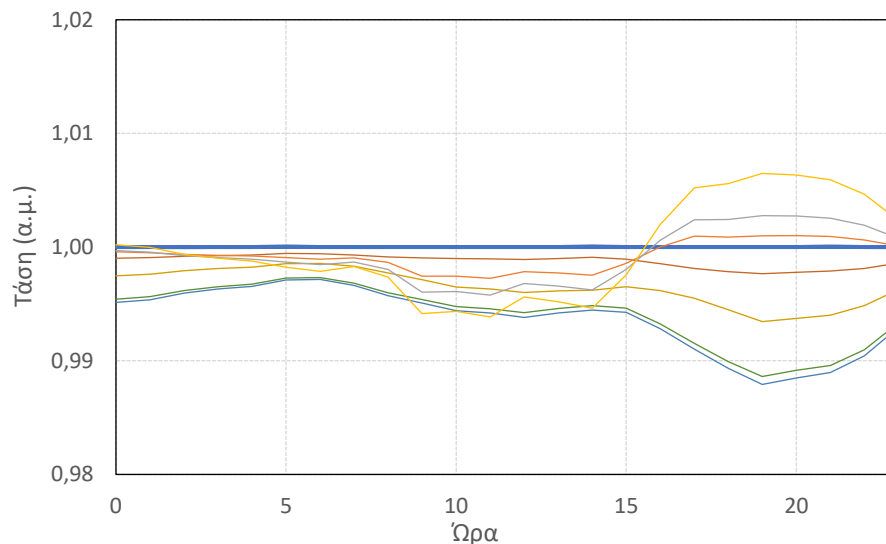
που χρησιμοποιήθηκαν και στο Κεφάλαιο 4. Το σχήμα παρουσιάζεται ξανά παρακάτω.



Σχήμα 6.1 Εξεταζόμενο Σύστημα Διανομής

Για κάθε ώρα πραγματοποιείται επίλυση της ροής φορτίου του συστήματος διανομής με τους ζυγούς που συνδέονται οι φωτοβολταϊκές μονάδες να διατηρούν την τάση τους σταθερή και ίση με 1 αμ. Για να συμβεί αυτό θεωρείται ότι συνδέονται μέσω μετατροπέα πηγής τάσης και στο πρόγραμμα προσομοίωσης Power World Simulator θεωρούνται ζυγοί παραγωγής (PV). Το ΣΑΤΥΦ, όπως και προηγουμένως, ρυθμίζει την τάση του ζυγού 1 στο 1 αμ.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται το προφίλ τάσης των ζυγών του συστήματος διανομής με τους ζυγούς 4,8 και 10 που αποτελούν τους ζυγούς που συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή να διατηρούν σταθερή τάση.



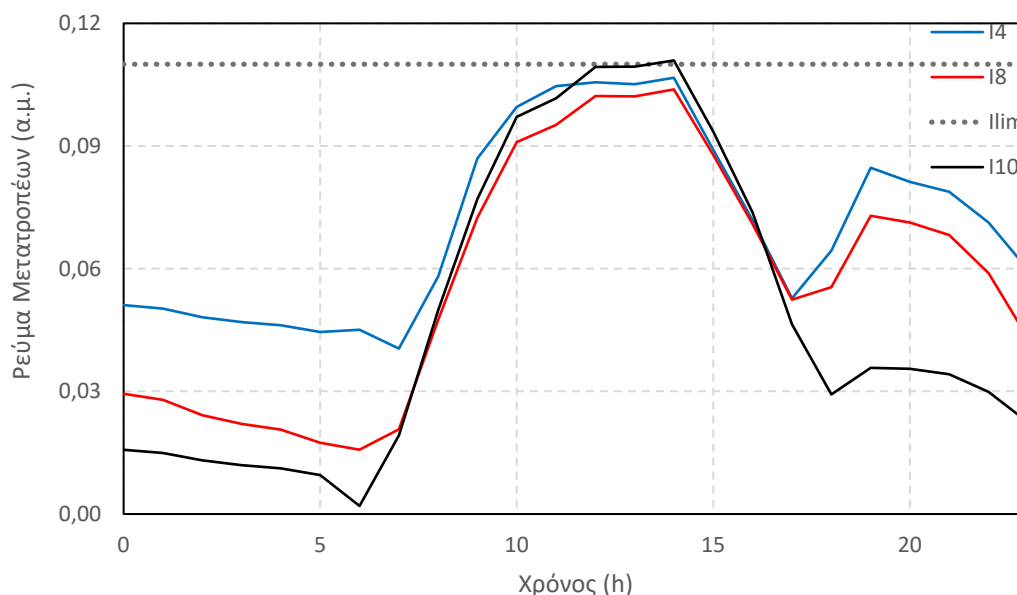
Σχήμα 6.2 Προφίλ Τάσης Ζυγών Συστήματος Διανομής

Παρατηρείται στο Σχήμα 6.2 ότι όλοι οι ζυγοί κατά μήκος της γραμμής βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων τάσης που έχουν τεθεί για συνθήκες κανονικής

λειτουργίας ($\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης). Συγκριτικά με τις ρυθμίσεις που έγιναν σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 4) και παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.13, 4.16, και 4.19, οι ζυγοί λαμβάνουν τιμές τάσης πολύ κοντινές στην ονομαστική τιμή 1αμ. Αυτό συμβαίνει καθώς οι ζυγοί παραγωγής ρυθμίζουν την τάση τους στο 1 αμ οπότε διατηρούν και τους υπόλοιπους ζυγούς κοντά σε αυτό.

Για να διατηρούν την τάση των ζυγών σταθερή, οι μετατροπείς πηγής τάσης παρέχουν ή απορροφούν άεργο ρεύμα, καθώς η ενεργός παραγωγή παραμένει αμετάβλητη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ρευμάτων των μετατροπέων που σε ώρες υψηλής ενεργού παραγωγής μπορεί να φτάνουν και τα όρια ρεύματος τους (2.9).

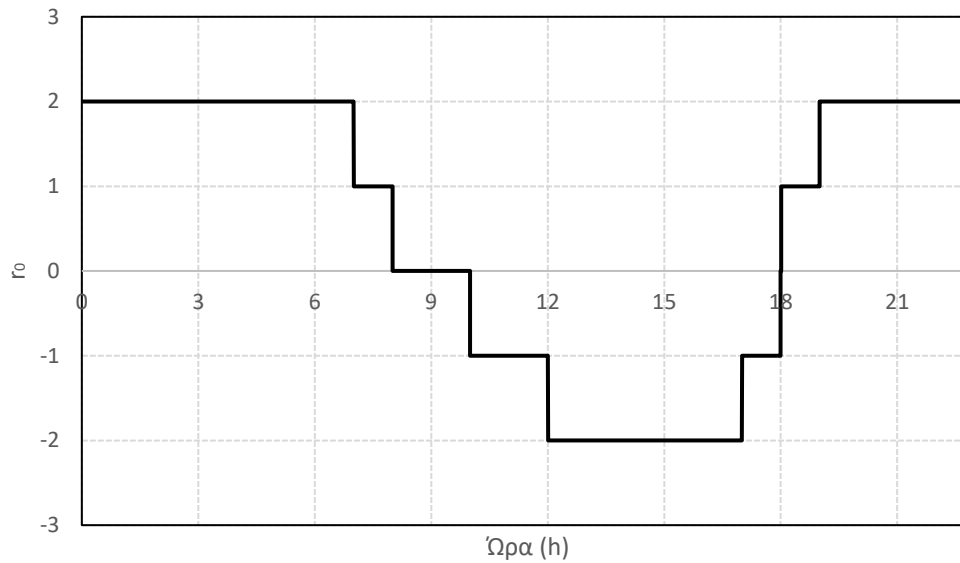
Ειδικότερα, τις μεσημεριανές ώρες, όπου η ενεργός παραγωγή είναι υψηλή, αυξάνονται οι τάσεις των ζυγών κατά μήκος της γραμμής. Οι ζυγοί σταθερής τάσης εγχείουν άεργο ισχύ για τη διατήρηση της τάσης στο 1 αμ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το ρεύμα των μετατροπέων, και συγκεκριμένα στις 14:00 να αγγίζει το όριο ρεύματος ο μετατροπέας της μονάδας του ζυγού 10.



Σχήμα 6.3 Ρεύματα Μετατροπέων

Παράλληλα, τις απογευματινές και βραδινές ώρες σημειώνονται υψηλά ρεύματα παρόλο που η ενεργός παραγωγή από τα Φ/Β είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει διότι η κατανάλωση των φορτίων είναι υψηλή οπότε απαιτείται μεγάλη έγχυση αέργου ισχύος για να διατηρείται η τάση κοντά στο 1 αμ.

Τέλος, λόγω της διατήρησης της τάσης από τους ζυγούς παραγωγής, το ΣΑΤΥΦ θα κάνει πολύ λιγότερες αλλαγές κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους ρύθμισης τάσης. Στο σχήμα παρουσιάζεται η κίνηση κατά τη διάρκεια του 24ωρου.



Σχήμα 6.4 Κίνηση ΣΑΤΥΦ κατά τη διάρκεια της ημέρας

6.2 Εντολή Υποστήριξης Έκτακτης Ανάγκης (EMRS)

Η δυνατότητα του μετατροπέα να διατηρεί σταθερή την τάση των ζυγών V_k χρησιμοποιείται ως σήμα ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής αποστέλλει σήμα μεταβολής y της τάσης των 3 μετατροπέων για την ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς.

Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα πιθανό απλουστευμένο σενάριο επικοινωνίας και στρατηγικής ελέγχου που απαιτεί μόνο ένα διακριτό σήμα το οποίο θα ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη από την διεσπαρμένη παραγωγή (σε αυτή την περίπτωση από τις Φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής) ώστε να στέλνει το σήμα μεταβολής y . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός φθηνού κι εύκολου να αποκτηθεί καναλιού επικοινωνίας, είτε ασύρματα (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ενσύρματα από τις γραμμές μεταφοράς. Το σήμα αίτησης άεργης υποστήριξης μπορεί να προέρχεται από το κέντρο ελέγχου ενέργειας της εκάστοτε περιοχής (Σχήμα 5.1), από μια αυτόματη συσκευή παρακολούθησης ενός γεγονότος όπως η απώλεια της παραγωγής ή η απώλεια ενεργητικών στοιχείων της μεταφοράς, ή τέλος από μία συσκευή παρακολούθησης των συνθηκών χαμηλής τάσης του συστήματος μεταφοράς. Σε κάθε περίπτωση η ακριβής εφαρμογή κι εκτέλεση έχει μείνει έξω από αυτή την εργασία.

Όπως αποδείχτηκε και στην ενότητα 5.3.2 για το συγκεκριμένο δίκτυο που μελετάται, η μέγιστη αύξηση της τάσης επιφέρει και τη μέγιστη ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς, καθώς η ευαισθησία της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος ως προς μεταβολές της τάσης παρουσιάζει θετική μονοτονία. Οπότε, σε αυτή την περίπτωση το σήμα μεταβολής y αποτελεί σήμα μέγιστης τάσης $V_{k,max}$ στους ζυγούς, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η τάση τους στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή και να διατηρείται στην τιμή αυτή, όσο ικανοποιείται ο περιορισμός ρεύματος.

Σε αυτή την περίπτωση το σήμα y είναι:

$$y = [V_{4,max} \ V_{8,max} \ V_{10,max}] \quad (6.1)$$

Το σήμα y αποτελεί την εντολή μεγιστοποίησης της τάσης των ζυγών (Emergency Reactive Support, EMRS) και έχει μελετηθεί σε προηγούμενες εργασίες [].

Ο έλεγχος υλοποιείται μέσω της διακριτής και ακαριαίας προσαρμογής των τάσεων V_k των ζυγών μέσης τάσης που συνδέονται τα φωτοβολταϊκά, ενώ οι τάσεις υπόκεινται στον περιορισμό τάσης $V_k \leq V_{k,max}$, το οποίο αποτελεί το όριο τάσης των μετατροπέων μέσω των οποίων συνδέονται στο δίκτυο οι μονάδες.

Επειδή το σήμα εφαρμόζεται σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, θεωρείται ότι οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις των ζυγών ξεπερνούν το όριο τάσης κανονικής λειτουργίας $\pm 5\%$ που έχει οριστεί για το σύστημα διανομής και μπορούν να φτάσουν ως τα όρια τάσης των μετατροπέων 1,1 αμ.

Οι ζυγοί στους οποίους συνδέονται οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής ελέγχουν μέσω των μετατροπέων την τάση τους V_k η οποία υπόκειται στον περιορισμό τάσης :

$$V_k \leq V_{k,max} \quad (6.2)$$

υπό τον περιορισμό ρεύματος,

$$I_k \leq I^{lim} \quad (6.3)$$

6.2.1 Υλοποίηση εντολής έκτακτης αέργου υποστήριξης στο WPSTAB

Το σήμα έκτακτης αέργου υποστήριξης (EMRS) που παρουσιάζεται παραπάνω υλοποιείται στο περιβάλλον χρονικής προσομοίωσης WPSTAB(Κεφ. 2).

Για τη χρονική προσομοίωση θεωρείται το συνολικό σύστημα μεταφοράς και διανομής του Σχήμα 5.4, ώστε να μελετηθεί η ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς από το σύστημα διανομής με την παραπάνω προτεινόμενη αποκεντρωμένη μέθοδο.

Αρχικά θεωρείται μια διαταραχή του φορτίου της γραμμής μεταφοράς που ξεκινάει μετά από $t = 300$ s προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, το φορτίο της γραμμής μεταφοράς υπόκειται σε μια συνεχή μεταβολή σε μορφή ράμπας, με ρυθμό αύξησης ΔG ανά περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή ανά 1 s, μέχρις ότου το σύστημα ξεπεράσει το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Πίνακας 6.1 Δεδομένα Προσομοίωσης WPSTAB

t_{step} (s)	t_{max} (s)	ΔG (MW/sec)	$V_{12\text{thres}}$ (αμ)	t_d (s)	$V_{k,\text{max}}$ (αμ)
1	5000	0,2	0,9	10	1,1

Η ελεγχόμενη τάση είναι η V_{12} από την μεριά υψηλής τάσης YT του μετασχηματιστή (Σχήμα 4.1). Η συνεχής αύξηση του φορτίου επιφέρει μείωση στην τάση του ζυγού 12 υψηλής τάσης. Όταν η τάση του ζυγού 12 $V_{12\text{thres}}$ πέσει κάτω από 0,9 α.μ. τότε αποστέλλεται το σήμα άεργης υποστήριξης (EMRS) στους μετατροπείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Επισημαίνεται ότι υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση t_d της τάξεως των 10 s μέχρις ότου επενεργήσει ο έλεγχος, για αποφυγή ακαριαίων υποδιεγέρσεων που ενδεχομένως να εξαλειφθούν και βρεθούν εντός των επιθυμητών ορίων μετά από αυτό το χρονικό διάστημα καθυστέρησης.

Κατά τη διάρκεια μεταβολής του φορτίου και ως εκ τούτου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η ενεργός ισχύς που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές μονάδες θεωρείται σταθερή για κάθε ώρα και ίση με την τιμή που αναγράφεται στο Σχήμα 4.5.

Όταν εξαντληθεί η δυνατότητα περαιτέρω άεργου υποστήριξης ή συναντηθούν τα όρια ρεύματος, θα διαμορφωθούν και οι μέγιστες τάσεις για τους ζυγούς του συστήματος.

Για να τεκμηριωθεί η αύξηση που επιφέρει ο εν λόγω έλεγχος συγκρίνεται με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ που υπολογίστηκε για κάθε ώρα της μέρας, με ρύθμιση της τάσης από τη χαρακτηριστική $Q(V)$ που επιλέχθηκε υπέρ των άλλων μεθόδων ρύθμισης (Πίνακας 5.11). Στην προσομοίωση του συνολικού συστήματος θεωρείται ότι όταν ξεκινάει να συμβαίνει η διαταραχή του φορτίου οι ζυγοί παραγωγής διατηρούν σταθερή τάση και ίση με τις τάσεις των ζυγών που φαίνονται στο Σχήμα 6.2.

Συνοψίζοντας, για την προσομοίωση τη χρονική στιγμή $t = 300$ s αρχίζει να αυξάνεται γραμμικά το φορτίο. Όταν η τάση του ζυγού 12 υψηλής τάσης πέσει κάτω από το όριο τάσης 0,9 αμ, αποστέλλεται από το ρυθμιστή του δικτύου διανομής σήμα μεγιστοποίησης της τάσης των ζυγών που συνδέονται οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση το σήμα y αποτελεί το σήμα EMRS.

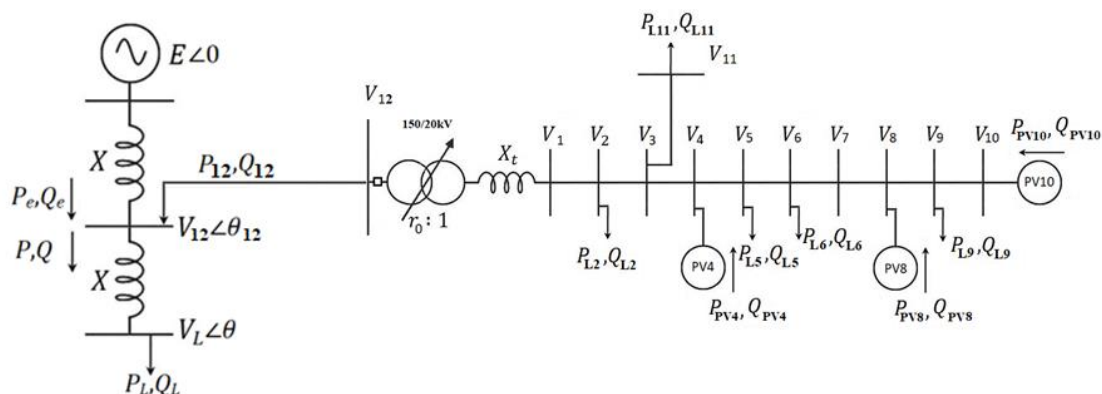
6.3 Προσομοίωση Εξεταζόμενου Δικτύου

Ακολούθως, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου έκτακτης υποστήριξης στο συνολικό σύστημα που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.4.

Θεωρείται ότι η διαταραχή συμβαίνει κάποιες επιλεγμένες ώρες μέσα στη μέρα, οπότε λαμβάνονται ως αρχικές τιμές για την προσομοίωση τρία επιμέρους

στιγμιότυπα που λαμβάνονται από την ημερήσια ανάλυση του συστήματος διανομής που εξετάστηκε στην Ενότητα 6.1.1.

Τα τρία στιγμιότυπα επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν τα πιθανά ακραία σενάρια παραγωγής φορτίου. Συγκεκριμένα, επιλέγεται ένα μεσημεριανό στιγμιότυπο όπου εμφανίζεται μέγιστη παραγωγή, ένα βραδινό όπου εμφανίζεται αιχμή φορτίου και ένα πρωινό που αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση για λόγους πληρότητας.



Σχήμα 6.5 Προς Εξέταση Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής

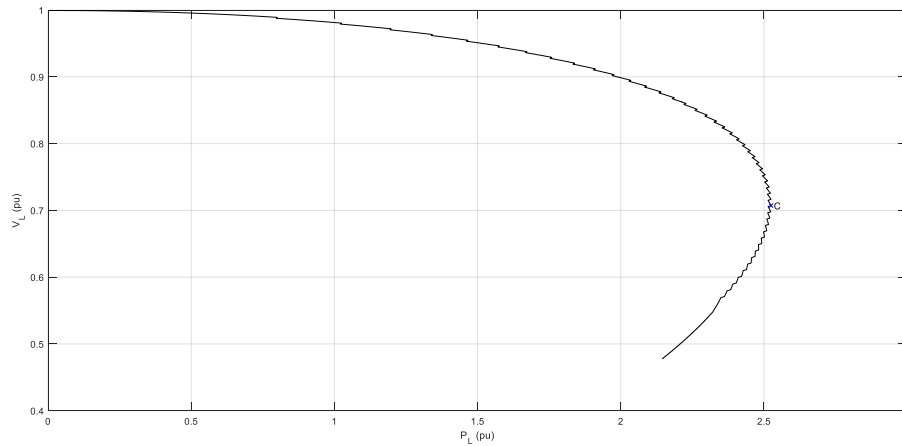
Για κάθε στιγμιότυπο εφαρμόζεται η διαταραχή του φορτίου που αναφέρθηκε και εξετάζεται αρχικά το όριο φόρτισης του ακτινικού συστήματος μεταφοράς χωρίς την εφαρμογή της εντολής έκτακτης υποστήριξης EMRS.

Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή της εντολής EMRS και εξετάζεται το νέο όριο φόρτισης που επιτυγχάνεται. Τέλος, υπολογίζεται η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που επιφέρει ο προτεινόμενος έλεγχος ώστε να συγκριθεί με τις μεθόδους που εξετάστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 5.

Για κάθε στιγμιότυπο παρουσιάζονται παρακάτω οι καμπύλες PV καθώς και τα ρεύματα των μετατροπέων των τριών Φ/Β, οι τάσεις των ζυγών στα ΣΚΣ και η ενεργός κατανάλωση του φορτίου του συστήματος μεταφοράς κατά τη διάρκεια της χρονικής προσομοίωσης.

6.3.1 Στιγμιότυπο Δικτύου Διανομής 9:00

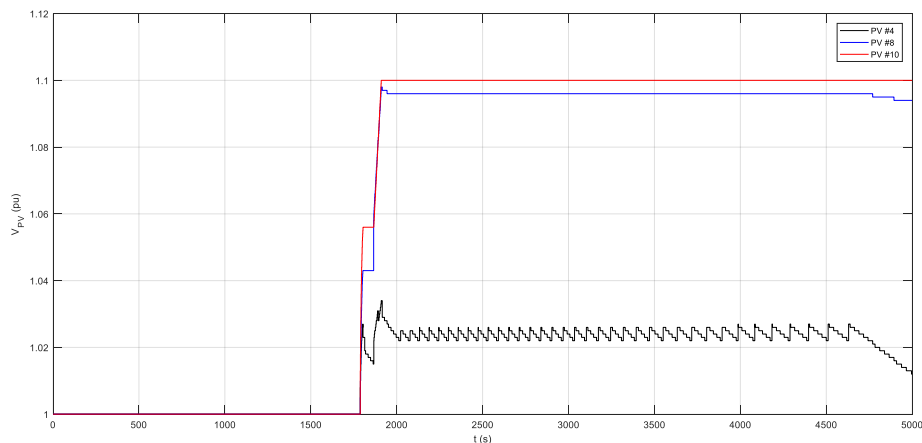
Αρχικά, θεωρώντας απενεργοποιημένο τον έλεγχο EMRS, το σύστημα οδηγείται σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος χωρίς να εφαρμόζεται εντολή EMRS και η $P_{max} = 126,250 \text{ MW}$ (Σχήμα 6.6). Η τιμή αυτή αναφέρεται στο όριο φόρτισης του συστήματος για τις 9:00 όταν οι μετατροπείς κάνουν έλεγχο σταθερής τάσης στους ζυγούς τους.



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα P-V χωρίς EMRS

Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση με έλεγχο EMRS και εξετάζεται το νέο όριο φόρτισης που επιτυγχάνεται καθώς και οι τάσεις και τα ρεύματα στους ζυγούς των μετατροπέων.

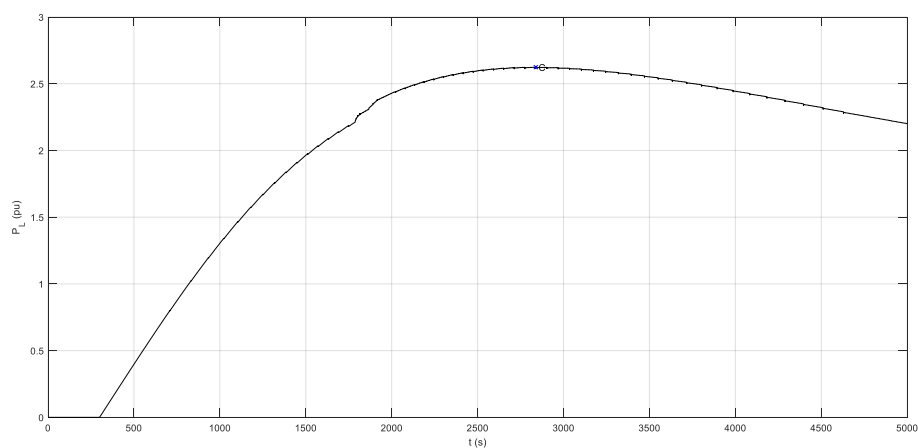
Η εντολή EMRS εφαρμόζεται στο σύστημα την χρονική στιγμή $t = 1800$ s όπου η τιμή της τάσης του ζυγού 12 πέφτει κάτω από την επιτρεπτή τιμή 0,9 αμ.



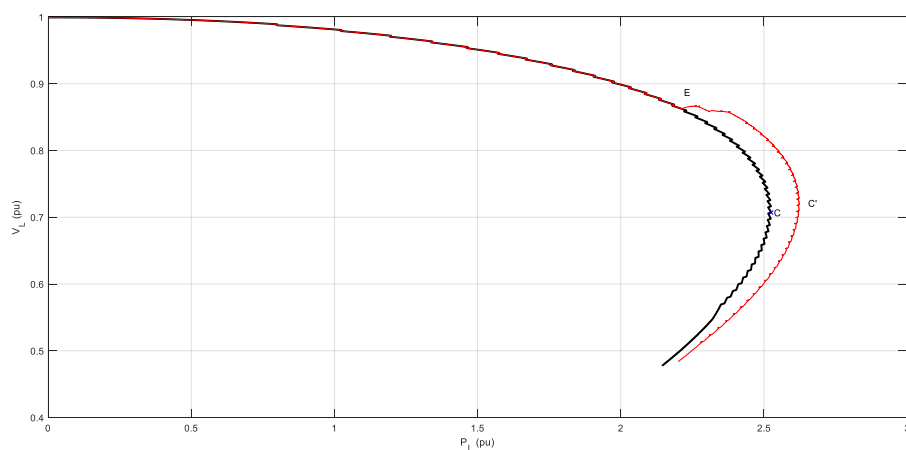
Σχήμα 6.7 Τάσεις ζυγών 4,8 και 10

Το σημείο C αποτελεί το σημείο όπου συναντάται η μέγιστη κατανάλωση ενεργού ισχύος του φορτίου του συστήματος μεταφοράς.

Στο Σχήμα 6.9 εμφανίζεται το διάγραμμα P-V και φαίνεται το σημείο E, δηλαδή η στιγμή που δίνεται η εντολή άεργης υποστήριξης (EMRS) με αποτέλεσμα την αύξηση του σημείου C' που αποτελεί το σημείο στο οποίο το σύστημα φτάνει σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Από την καμπύλη προκύπτει η $P_{max} = 131,205$ MW. Άρα, η μεταβολή που επιφέρει η EMRS στις 9:00 είναι $\Delta P_{max} = 4,962$ MW.



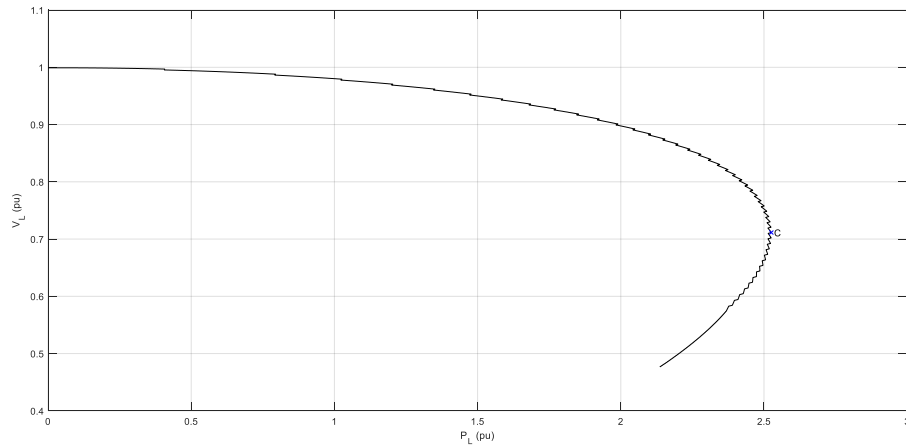
Σχήμα 6.8 Ενεργός Κατανάλωση Φορτίου Συστήματος Μεταφοράς



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα P-V, αύξηση ορίου φόρτισης με EMRS

6.3.2 Στιγμιότυπο Δικτύου Διανομής 14:00

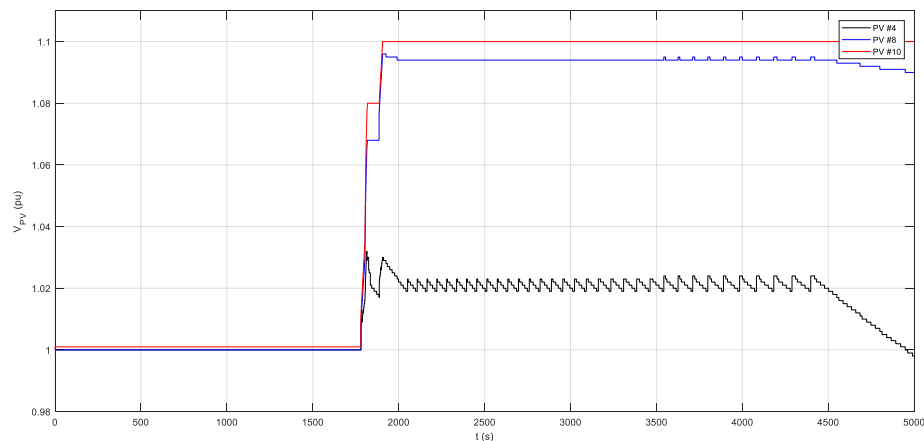
Αρχικά, θεωρώντας απενεργοποιημένο τον έλεγχο EMRS, το σύστημα οδηγείται σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος χωρίς να εφαρμόζεται εντολή EMRS και η $P_{max} = 126,282 \text{ MW}$ (Σχήμα 6.10). Η τιμή αυτή αναφέρεται στο όριο φόρτισης του συστήματος για τις 14:00 όταν οι μετατροπείς κάνουν έλεγχο σταθερής τάσης στους ζυγούς τους.



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα P-V χωρίς EMRS

Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση με έλεγχο EMRS και εξετάζεται το νέο όριο φόρτισης που επιτυγχάνεται καθώς και οι τάσεις και τα ρεύματα στους ζυγούς των μετατροπέων.

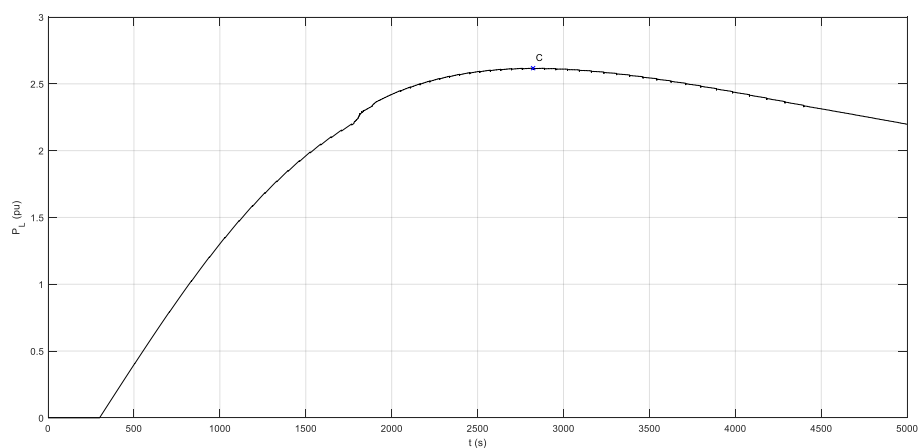
Η εντολή EMRS εφαρμόζεται στο σύστημα την χρονική στιγμή $t = 1800$ s όπου η τιμή της τάσης του ζυγού 12 πέφτει κάτω από την επιτρεπτή τιμή 0,9 αμ.



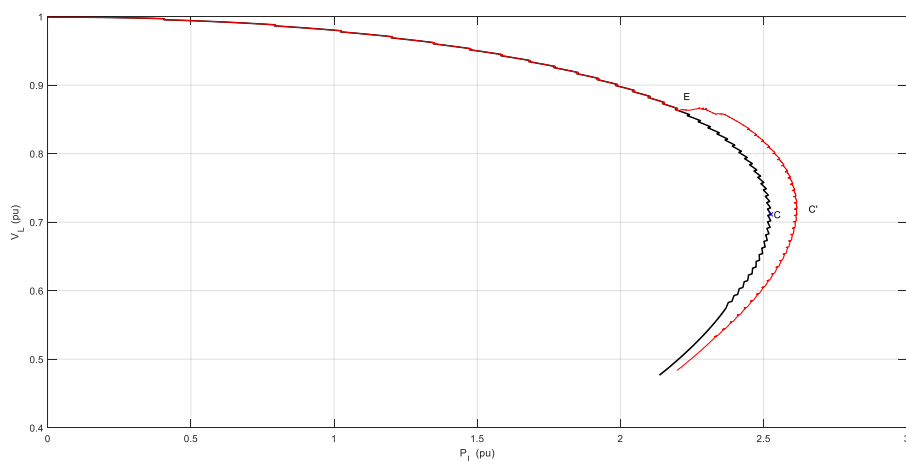
Σχήμα 6.11 Τάσεις ζυγών 4,8 και 10

Το σημείο C αποτελεί το σημείο όπου συναντάται η μέγιστη κατανάλωση ενεργού ισχύος του φορτίου του συστήματος μεταφοράς.

Στο Σχήμα 6.13 εμφανίζεται το διάγραμμα P-V και φαίνεται το σημείο E, δηλαδή η στιγμή που δίνεται η εντολή άεργης υποστήριξης (EMRS) με αποτέλεσμα την αύξηση του σημείου C' σε σχέση με το σημείο C που αποτελεί το σημείο στο οποίο το σύστημα φτάνει σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Από την καμπύλη προκύπτει η $P_{max} = 130,870$ MW. Άρα, η μεταβολή που επιφέρει η EMRS στις 9:00 είναι $\Delta P_{max} = 4,588$ MW.



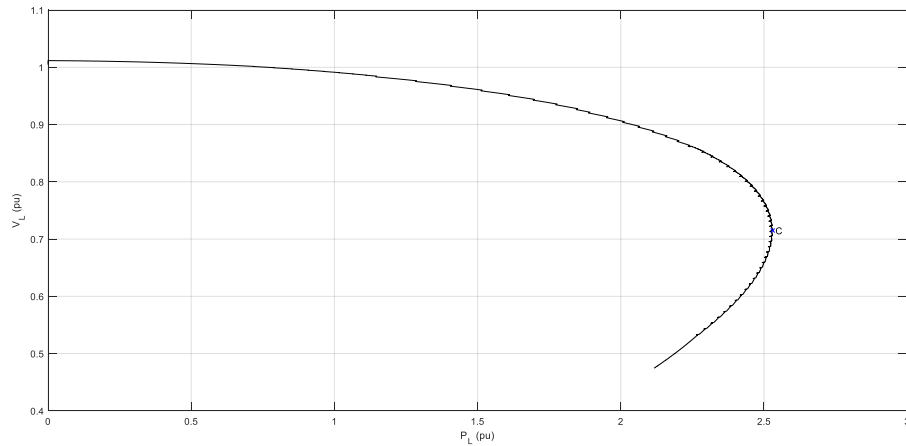
Σχήμα 6.12 Ενεργός Κατανάλωση Φορτίου Συστήματος Μεταφοράς



Σχήμα 6.13 Διάγραμμα P-V, ενίσχυση ορίου φόρτισης με EMRS

6.3.3 Στιγμιότυπο 19:00

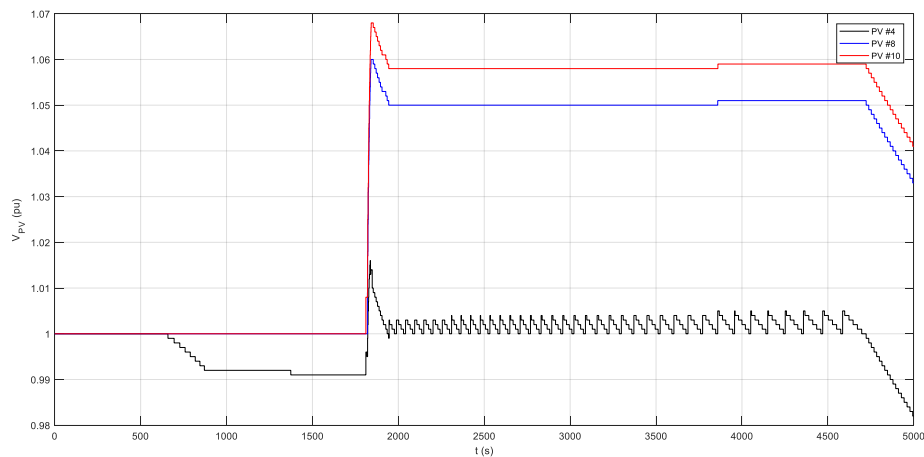
Αρχικά, θεωρώντας απενεργοποιημένο τον έλεγχο EMRS, το σύστημα οδηγείται σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος χωρίς να εφαρμόζεται εντολή EMRS και η $P_{max} = 126,524 \text{ MW}$ (Σχήμα 6.14). Η τιμή αυτή αναφέρεται στο όριο φόρτισης του συστήματος για τις 9:00 όταν οι μετατροπείς κάνουν έλεγχο σταθερής τάσης στους ζυγούς τους.



Σχήμα 6.14 Διάγραμμα P-V χωρίς EMRS

Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση με έλεγχο EMRS και εξετάζεται το νέο όριο φόρτισης που επιτυγχάνεται καθώς και οι τάσεις και τα ρεύματα στους ζυγούς των μετατροπέων.

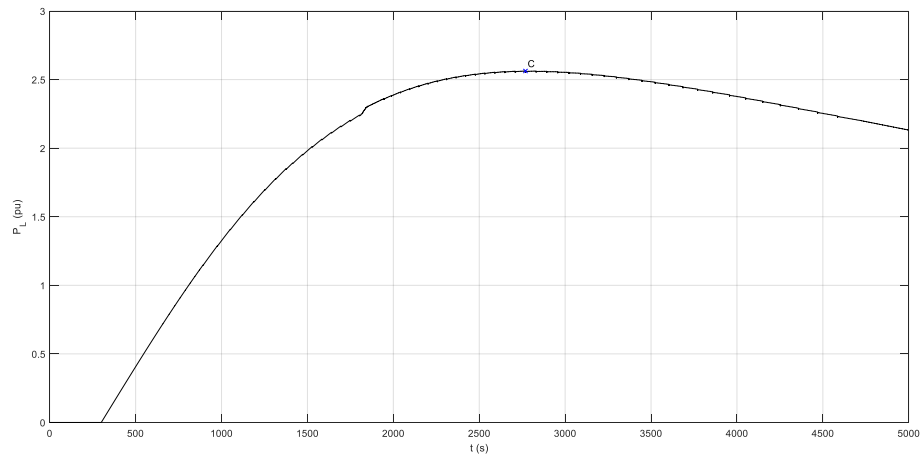
Η εντολή EMRS εφαρμόζεται στο σύστημα την χρονική στιγμή $t = 1800$ s όπου η τιμή της τάσης του ζυγού 12 πέφτει κάτω από την επιτρεπτή τιμή 0,9 αμ.



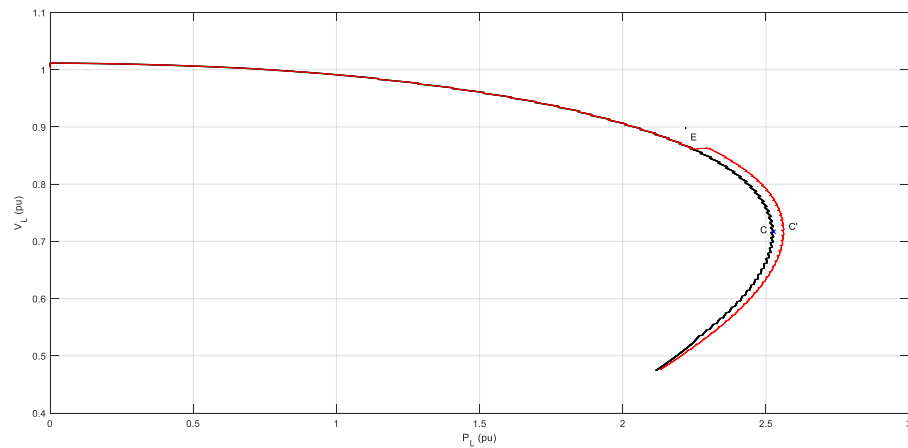
Σχήμα 6.15 Τάσεις ζυγών 4,8 και 10

Το σημείο C αποτελεί το σημείο όπου συναντάται η μέγιστη κατανάλωση ενεργού ισχύος του φορτίου του συστήματος μεταφοράς.

Στο Σχήμα 6.17 εμφανίζεται το διάγραμμα P-V και φαίνεται το σημείο E, δηλαδή η στιγμή που δίνεται η εντολή άεργης υποστήριξης (EMRS) με αποτέλεσμα την αύξηση του σημείου C που αποτελεί το σημείο στο οποίο το σύστημα φτάνει σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Από την καμπύλη προκύπτει η $P_{max} = 128,135$ MW. Άρα, η μεταβολή που επιφέρει η EMRS στις 19:00 είναι $\Delta P_{max} = 1,6105$ MW.



Σχήμα 6.16 Ενεργός Κατανάλωση Φορτίου Συστήματος Μεταφοράς



Σχήμα 6.17 Διάγραμμα P-V, αύξηση ορίου φόρτισης με EMRS

6.3.4 Παρατηρήσεις

Η μέθοδος υποστήριξης έκτακτης ανάγκης (EMRS) βασίζεται στη ρύθμιση σταθερής τάσης που επιτυγχάνεται μέσω εγχύσεως αέргων ρευμάτων των μετατροπέων ηλεκτρονικός ισχύος.

Παρατηρείται στα στιγμιότυπα που εξετάστηκαν ότι λόγω των ορίων ρεύματος (6.3) των μετατροπέων, οι τάσεις των ζυγών μπορεί να μην επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή τάση $V_{k,max}$ (6.2). Αυτό ωστόσο εξαρτάται και από το κάθε στιγμιότυπο που εξετάζεται.

Επίσης, όταν ο έλεγχος επιβάλλει τη μεταβολή της τάσης παρατηρούνται κάποιες ακαριαίες μεταβολές (spikes) των ρευμάτων που ξεπερνούν τα όρια ρεύματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μονάδων και της λειτουργίας

διατήρησης σταθερής τάσης. Αφού αποκατασταθούν σταθερές τάσεις και στους τρεις ζυγούς παρατηρείται ότι τα ρεύματα παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Πιο συγκεκριμένα, τις πρωινές ώρες η ενεργός παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι σχετικά υψηλή με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται οι υψηλές τάσεις στους απομακρυσμένους ζυγούς 8 και 10. Το ίδιο συμβαίνει και τις μεσημεριανές ώρες όπου εμφανίζεται η μέγιστη ενεργός παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά. Αυτό σημαίνει ωστόσο, ότι τα όρια ρεύματος είναι πιο εύκολο να παραβιάζονται.

Τη βραδινή ώρα που εξετάζεται, όπου η ενεργός παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική και παρουσιάζεται η αιχμή του φορτίου, το προφίλ των τάσεων είναι σχετικά χαμηλό. Αυτό καθιστά πιο δύσκολη την ανύψωση των τάσεων που όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.13 απέχουν αρκετά από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση $V_{k,max}$ καθώς παραβιάζονται τα όρια ρεύματος και των τριών μετατροπέων.

Και για τα τρία στιγμιότυπα υπάρχει αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος P_{max} .

6.4 Σύγκριση με την Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Στο προηγούμενο κεφάλαιο 5 στις ενότητες 5.6.1, 5.6.2 και 5.6.3 εφαρμόστηκαν κάποιες μέθοδοι αύξησης της τάσης με σκοπό την ενίσχυση του ακτινικού συστήματος μεταφοράς αξιοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία αποκεντρωμένου ελέγχου (Σχήμα 5.2) από το δίκτυο διανομής μέσης τάσης που περιέχει τρεις φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής (Σχήμα 4.1). Οι μέθοδοι αύξησης της τάσης αξιοποίησαν της υπάρχουσες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου διανομής.

Στο Κεφάλαιο 6, θεωρήθηκε ότι οι μετατροπείς μπορούν να κάνουν ρύθμιση σταθερής τάσης στους ζυγούς που συνδέονται οι μονάδες φωτοβολταϊκής παραγωγής και έγινε προσομοίωση του συνολικού συστήματος διανομής και μεταφοράς στο WPSTAB. Για την αύξηση της τάσης εφαρμόστηκε η εντολή EMRS.

Στη ρύθμιση σταθερής τάσης θεωρείται ότι οι μετατροπείς λειτουργούν βάση του ημικυκλικού διαγράμματος ικανότητας P-Q (Σχήμα 2.7) με αποτέλεσμα να μπορούν να αποδίδουν άεργο ισχύ ίση με την φαινόμενη ισχύ, σεβόμενοι πάντα το όριο ρεύματος (2.9).

Άρα γίνεται μια σύγκριση της μεταβολής της P_{max} με κάθε μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος όπως προέκυψαν από τις παραπάνω μεθόδους.

Πίνακας 6.2 Μεταβολές Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος στις προτεινόμενες μεθόδους

Ωρα	Μετακίνηση Q(V)	Μεταβολή V_{LTC}	Συνδυασμός Μεθόδων	EMRS
9:00	1,313	1,816	2,879	4,962
14:00	1,738	1,858	2,880	4,588
19:00	2,107	2,609	2,609	1,611

Στον πίνακα παρατηρείται επίσης ότι για το απογευματινό στιγμιότυπο η μεταβολή με τον έλεγχο της EMRS είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στη ρύθμιση σταθερής τάσης που εφαρμόζεται για το συγκεκριμένο στιγμιότυπο. Συγκεκριμένα, λόγω υψηλού φορτίου η διατήρηση σταθερής τάσης στο 1 αμ δημιουργεί ήδη υψηλά ρεύματα οπότε δεν υπάρχει μεγάλο περιθώριο υποστήριξης. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 6.15 όπου οι τάσεις δεν επιτυγχάνουν το μέγιστο όριο 1,1 αμ.

Βάση του Πίνακα 5.7 και τον παραπάνω μεταβολών προκύπτει η διαμόρφωση της P_{max} για κάθε προτεινόμενη μέθοδο του Κεφαλαίου 5 και συγκρίνεται με τα όρια φόρτισης που επιτυγχάνονται με τον έλεγχο με την EMRS. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 Όριο Φόρτισης Συστήματος Μεταφοράς για κάθε μέθοδο που εφαρμόζεται

Ωρα	P_{max} (MW)			
	Μετακίνηση Q(V)	Μεταβολή V_{LTC}	Συνδυασμός Μεθόδων	EMRS
9:00	126,009	126,512	127,575	131,205
14:00	125,951	126,071	127,093	130,870
19:00	123,587	124,089	124,089	128,135

Οι τρεις πρώτες μέθοδοι που προτείνονται βασίζονται στον αποκεντρωμένο έλεγχο που πραγματοποιεί ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής και στο διαχωρισμό μεταξύ του συστήματος διανομής και του συστήματος μεταφοράς που προτάθηκε στο Κεφάλαιο 5 και υπολογίζονται από την λύση του προβλήματος των ροών φορτίου του συστήματος διανομής στο Power World Simulator και με χρήση της σχέσης (5.20).

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ αυξάνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ σε μεγαλύτερο βαθμό από τη μέθοδο μετακίνησης της Q(V) χαρακτηριστικής. Αυτό αρχικά οφείλεται στα φορτία, τα οποία μειώνουν την κατανάλωση τους καθώς το ΣΑΤΥΦ μειώνει την τάση αναφοράς. Επίσης, παίζει σημαντικό ρόλο η τοπολογία της γραμμής διανομής. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της ίδιας χαρακτηριστικής Q(V) σε κάθε διαφορετική φωτοβολταϊκή μονάδα μεταβάλλει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την παραγωγή

αέργου ισχύος εξαρτώμενη πάντα από την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται. Πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι η μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ εμφανίζει δυο μειονεκτήματα. Μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση εφαρμογής καθώς τα βήματα γίνονται διακριτά και απαιτούν κάποια δευτερόλεπτα και επιβάρυνση του μετασχηματιστή που μπορεί να επιφέρει έξοδα συντήρησης.

Προφανώς, ο συνδυασμός των δυο μεθόδων επιφέρει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της MMI. Ωστόσο, όπως και προηγουμένως, δεν εξασφαλίζει ότι όλες οι μονάδες προσφέρουν τη μέγιστη άεργο υποστήριξη. Για παράδειγμα, τις πρωινές και τις μεσημεριανές ώρες που οι τάσεις των ζυγών είναι σχετικά υψηλές, η μετακίνηση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής μπορεί να επιφέρει αλλαγές μόνο στην μονάδα του ζυγού 4 που διατηρεί σχετικά χαμηλή τάση τη στιγμή που οι ζυγοί 8 και 10 θα βρίσκονται εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης της $Q(V)$ χαρακτηριστικής. Τις βραδινές ώρες 19:00 από την άλλη, λόγω του υψηλού φορτίου του δικτύου διανομής παρουσιάζεται σχετικά χαμηλό προφίλ τάσης με αποτέλεσμα οι μονάδες να παρέχουν μέγιστη άεργο υποστήριξη όπως ορίζει η ρύθμιση από την $Q(V)$ χαρακτηριστική.

Τέλος, και στα τρία στιγμιότυπα παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος όταν εφαρμόζεται η εντολή EMRS. Αυτό οφείλεται αρχικά στο γεγονός ότι η ρύθμιση σταθερής τάσης επιτυγχάνει μέγιστη τάση για κάθε ζυγό, κάτι που δε συμβαίνει απαραίτητα με την $Q(V)$ χαρακτηριστική καθώς επηρεάζεται από την τοπολογία του δικτύου. Επίσης, γίνεται η θεώρηση στην εντολή έκτακτης υποστήριξης ότι οι μετατροπείς μπορούν να αποδώσουν μέγιστη άεργο ισχύ κάτι που δε συμβαίνει στην $Q(V)$ χαρακτηριστική καθώς εκεί ορίζεται $Q_{\max}$ και $Q_{\min}$ από τα πρότυπα που υπάρχουν.

7

Συμπεράσματα και Προοπτικές

7.1 Σύνοψη και Βασικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η επίδραση που έχει ένα δίκτυο διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή και φορτία στο όριο φόρτισης ενός συστήματος μεταφοράς. Εξετάστηκε η αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης μέσω της υποστήριξης από τις διεσπαρμένες πηγές που βρίσκονται στο σύστημα διανομής.

Για το δοκιμαστικό δίκτυο διανομής, αρχικά γίνεται ρύθμιση της τάσης με χρήση κάποιων μεθόδων ρύθμισης τάσης για μια τυπική ημέρα με συγκεκριμένη ημερήσια καμπύλη παραγωγής και φορτίου. Οι μέθοδοι ρύθμισης της τάσης $\cos\phi(P)$, $Q(V)$ και η μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, συγκρίνονται και για το συγκεκριμένο σύστημα προκρίνεται η χαρακτηριστική $Q(V)$ ως η καλύτερη ρύθμιση τάσης. Για κάθε ώρα της ημέρας, λύνοντας το πρόβλημα της ροής φορτίου στο πρόγραμμα προσομοίωσης Power World Simulator, υπολογίζονται οι εγχεόμενες ροές ισχύος στο σύστημα μεταφοράς.

Για την παραπάνω εξέταση της ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς προτάθηκε μια μεθοδολογία αποκεντρωμένου ελέγχου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του συστήματος διανομής για βελτίωση της ευστάθειας τάσης του συστήματος μεταφοράς. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας εστιάζει στην αποσύμπλεξη και ξεχωριστή ανάλυση των δυο συστημάτων μεταφοράς και διανομής ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του διασυνδεδεμένου συστήματος όταν υπάρχουν πολλές γραμμές διανομής όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα. Ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής αξιοποιώντας δεδομένα που λαμβάνει μπορεί να δώσει εντολή μεταβολής της τάσης στους ζυγούς του συστήματος διανομής με σκοπό την ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς. Η ξεχωριστή ανάλυση των δυο συστημάτων πραγματοποιείται ως εξής:

Για το σύστημα μεταφοράς λύθηκε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης κάνοντας χρήση των οριακών συνθηκών πρώτης τάξης Kuhn – Tucker. Από το πρόβλημα μεγίστου υπολογίστηκε η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος μεταφοράς καθώς και οι ευαισθησίες της σε μεταβολές των εγχεόμενων ροών ενεργού και αέργου ισχύος από την κάθε γραμμή διανομής.

Στη συνέχεια, για επιλεγμένα στιγμιότυπα μέσα στη μέρα, εφαρμόστηκε μεταβολή της τάσης των ζυγών του δικτύου διανομής που συνδέονται οι φωτοβολταϊκές μονάδες ώστε να υπολογιστεί η ευαισθησία που εμφανίζουν οι εγχεόμενες ροές ισχύος στο σύστημα μεταφοράς ως προς τις μεταβολές τάσης στους ΔΠ του συστήματος διανομής. Για το συγκεκριμένο δίκτυο παρατηρήθηκε ότι οι ευαισθησίες του μέγιστου ορίου φόρτισης ως προς τις μεταβολές της τάσης διατηρούν σταθερό θετικό πρόσημο και η μεγιστοποίηση της τάσης επιφέρει μέγιστη ενίσχυση. Οι ευαισθησίες υπολογίστηκαν λύνοντας το πρόβλημα ροής φορτίου του συστήματος διανομής πριν και μετά την αύξηση ώστε να υπολογιστεί η γραμμική μεταβολή των εγχεόμενων ροών. Στην ανάλυση του συστήματος διανομής γίνεται η προσέγγιση ότι ο ζυγός αναφοράς (slack bus) που αποτελεί το πρωτεύον YT του Μ/Σ διατηρεί σταθερή τάση, κάτι που δε συμβαίνει στο πραγματικό σύστημα, ιδιαίτερα σε περίπτωση διαταραχής φορτίου στο σύστημα μεταφοράς.

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι παραπάνω ευαισθησίες οι οποίες αποστέλλονται στο ρυθμιστή του δικτύου διανομής, αυτός μπορεί πλέον να εκτιμήσει την ενίσχυση που μπορεί να επιφέρει μια αύξηση της τάσης των ζυγών του συστήματος διανομής. Άρα, μπορεί να στείλει σήμα μεταβολής της τάσης για να υποστηρίξει το σύστημα μεταφοράς σε περίπτωση ανάγκης.

Το πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι ο ρυθμιστής απαιτεί λίγα δεδομένα για να πραγματοποιήσει αυτή την εκτίμηση. Επίσης, για ένα σύστημα μεταφοράς στο οποίο συνδέονται πολλές γραμμές διανομής και η ανάλυση είναι δύσκολη, η αποσύμπλεξη απαιτεί μόνο τη μέτρηση των εγχεόμενων ροών ισχύος και όχι τη σε βάθος ανάλυση κάθε γραμμής διανομής, η οποία μπορεί να περιέχει φορτία αλλά και ΔΠ.

Στη συνέχεια, εξετάστηκαν κάποια πιθανά σήματα μεταβολής της τάσης που μπορεί να στείλει ο ρυθμιστής του δικτύου διανομής. Αρχικά, τα σήματα αξιοποιούν τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν και για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου διανομής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε μια πιθανή μετακίνηση της χαρακτηριστικής $Q(V)$, η μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ και ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων. Μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας υπολογίζεται η μεταβολή του ορίου φόρτισης

Τέλος, εξετάστηκε η δυνατότητα ρύθμισης σταθερής τάσης στους μετατροπείς και η περαιτέρω ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς με την εντολή υποστήριξης έκτακτης ανάγκης (EMRS) που έχει προταθεί σε προηγούμενες εργασίες. Για την εφαρμογή της EMRS χρησιμοποιείται το πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB.

Τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας εστιάζουν στην προτεινόμενη μεθοδολογία και στην εκτίμηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η οποία εμφανίζει μικρές αποκλίσεις σε σχέση με την προσομοίωση του συνολικού συστήματος παρά τις προσεγγίσεις που γίνονται κατά την αποσύμπλεξη των δυο συστημάτων.

Ο προσεγγιστικός υπολογισμός του ορίου φόρτισης συγκρίθηκε στο Κεφάλαιο 5 με τον ακριβή υπολογισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και αποδείχτηκε ότι οι προσεγγίσεις δεν επηρεάζουν σημαντικά.

Παράλληλα, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των μεθόδων αύξησης της τάσης που προτείνονται και εμφανίζονται κάποια αποτελέσματα ενίσχυσης του συγκεκριμένου

συστήματος. Η μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την ΜΜΙ του συστήματος μεταφοράς (2-3%), ωστόσο, αν θεωρηθεί ότι μπορούν να συνδεθούν πιο πολλές γραμμές διανομής με την ίδια δυνατότητα η ενίσχυση μπορεί να είναι σημαντική.

7.2 Προοπτικές Περαιτέρω Έρευνας

Για το συγκεκριμένο δίκτυο που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία εξάχθηκαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο, είναι χρήσιμη η περαιτέρω εξέταση δικτύων διανομής που οι ευαισθησίες του ορίου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος ως προς μεταβολές της τάσης μπορεί να αλλάζουν πρόσημο, δηλαδή που δεν έχουν σταθερή μονοτονία. Σε εκείνη την περίπτωση χρειάζεται να λυθεί πρόβλημα βελτιστοποίησης και στην πλευρά της διανομής, κάτι που δεν έγινε στην παρούσα διπλωματική λόγω του συγκεκριμένου δικτύου.

Επίσης, κάποιες από τις μεθόδους ρύθμισης της τάσης εξαρτώνται σημαντικά από την τοπολογία του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η χαρακτηριστική ρύθμισης $Q(V)$ μπορεί να είχε εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα σε ένα διαφορετικό δίκτυο διανομής. Ακόμα όμως και στο ίδιο δίκτυο θα μπορούσε να κάνει ακόμα καλύτερη ρύθμιση εάν γινόταν προσαρμογή των παραμέτρων της χαρακτηριστικής για κάθε μετατροπέα λαμβάνοντας υπόψη πάντα την τοπολογία του δικτύου.

Επίσης, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε ένα απλό ακτινικό δίκτυο μεταφοράς, στο οποίο θεωρήθηκε ότι το διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύεται από μία σταθερή ισοδύναμη πηγή Thevenin. Στην πράξη όμως τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι βροχοειδή και εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα. Αυτή η πολυπλοκότητα των δικτύων μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εξετάστηκαν.

Στην προσομοίωση του συστήματος διανομής, γίνεται η προσέγγιση ότι ο ζυγός αναφοράς διατηρεί σταθερή τάση και ίση με 1 αμ. Οπότε, κατά το διαχωρισμό που γίνεται μεταξύ διανομής και μεταφοράς υπάρχει μια διαφοροποίηση. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία ελέγχθηκε και οι αποκλίσεις υπολογίστηκαν αμελητέες.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία αποκεντρωμένου ελέγχου βασίζεται στην ύπαρξη ενός ρυθμιστή του δικτύου διανομής ο οποίος δεν υπάρχει στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, τα δεδομένα που χρειάζεται να λαμβάνει είναι απλά και το σήμα που αποστέλλει μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα, οπότε θεωρείται ότι είναι εύκολο να υλοποιηθεί κάτι τέτοιο στον υποσταθμό διανομής YT/MT.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξή, *‘Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας’*, Αθήνα 2001.
- [2] Β. Κ. Παπαδιά, *‘Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας’*, Τόμοι Ι,ΙΙ Αθήνα 1985.
- [3] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιά, *‘Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως’*, Αθήνα 1991.
- [4] Κ. Θ. Δέρβος, *‘Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Από τη θεωρία στην πράξη’*, Ε.Μ.Π. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ, Αθήνα, Ιανουάριος 2013.
- [5] Π. Ε. Κακοσίμος, *‘Προβλεπτικός έλεγχος σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές’*, Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Δεκέμβριος 2013.
- [6] T. van Cutsem, Κ. Βουρνάς, *‘Voltage Stability of Electric Power Systems’*, Springer Science & Business Media, 1998.
- [7] P. Kundur, *‘Power System Stability and Control’*, 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
- [8] C. W. Taylor, *‘Power system voltage stability’*, McGraw-Hill Ryerson, Limited, 1994.
- [9] Κ. Βουρνάς, *‘Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα’*, Αθήνα 1999.
- [10] PowerWorldSimulator, *‘The visual approach to electric power systems’*
- [11] Θ. Σουξές, *‘Άεργος υποστήριξη συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές’*, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2016.
- [12] Γ. Τζούνας, *‘Επίδραση αιολικής παραγωγής στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας’*, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2017.
- [13] Ι Γρανίτσας, *‘Στατιστική ανάλυση της επίδρασης αιολικών πάρκων στην ευστάθεια τάσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας’*, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2017.
- [14] EN 50160, *‘Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, August 2010’*.
- [15] Π. Χ. Κοτσαμπόπουλος, *‘Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο επιδράσεων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής με χρήση ψηφιακών μοντέλων και πραγματικού εξοπλισμού’*, Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάιος 2017.

- [16] Διεθνές Πρότυπο, VDE-AR-N 4105, “Power generation systems connected to the low-voltage distribution network. Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks”, August 2011
- [17] E.-E. E. Portal, ‘Primary Distribution Voltage Levels’, *EEP - Electrical Engineering Portal*, August 2012
- [18] Π. Γεωργιλάκης, ‘Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας’, Αθήνα 2015
- [19] Ν. Μητρόπουλος ‘Μελέτη θερμικής Καταπόνησης Δυο Αγωγών ACSR 95mm του δικτύου διανομής μέσης Τάσης κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα και εκτίμηση κινδύνου ατυχήματος λόγω πτώσης στο έδαφος’, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2007.
- [20] M. Tonso, J. Moren, S. W. H. de Haan, and J. A. Ferreira, "Variable inductor for voltage control in distribution networks," in *Power Electronics and Applications*, 2005 European Conference on, 2005, pp 1-10.
- [21] M. Shafiei, G. Nourbakhsh, G. Ledwich, T. Fernando, H. Iu, και A. Arefi, ‘Dynamic load modelling using measured data in distribution networks’, στο *2017 3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*,
- [22] X. Gao, G. De Carne, M. Liserre and C. Vournas, “Voltage control by means of smart transformer in medium voltage feeder with distribution generation,” *Power Tech*, 2017 IEEE Manchester, 20 Jul. 2017.
- [23] M. H. Namin and V. G. Agelidis, "Voltage sensitivity study of LV/MV networks under high penetration of photovoltaic generation considering residential and industrial load profiles," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013 IEEE 39th, 2013, pp. 2309-2314.
- [24] W. H. Kersting, “Radial Distribution Test Feeders,” in *Proc. 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, vol. 2, pp. 908–912.
- [25] M. H. Namin and V. G. Agelidis, "Voltage sensitivity study of LV/MV networks under high penetration of photovoltaic generation considering residential and industrial load profiles," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013 IEEE 39th, 2013, pp. 2309-2314.
- [26] A. R. Malekpour and A. Pahwa, “Radial Test Feeder including primary and secondary distribution network,” *2015 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–9, 2015.
- [27] H. S. Bidgoli, M. Glavic, and T. Van Cutsem, “Receding-horizon control of distributed generation to correct voltage or thermal violations and track desired schedules,” in *Proc. 19th IEEE Power Syst. Comput. Conf.*, 2016, pp. 1–8.

- [28] *United Kingdom Generic Distribution System. Contribute to sedg/ukgds development by creating an account on GitHub*. Centre for Sustainable Electricity and Distributed Generation, 2018.
- [29] S. M. Alizadeh, C. Ozansoy, και T. Alpcan, 'The impact of X/R ratio on voltage stability in a distribution network penetrated by wind farms', in *2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2016, pp. 1–6.
- [30] T. Saha, "Test System Report," Power and Energy Research Group, The University of Queensland, 2011.
- [31] 'ACSR Conductor Data Sheet'.
- [32] [Online], 'EPRI | Distributed PV Monitoring and Feeder Analysis'.