



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

**ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ
ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ
ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Χ. Γέσιος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Κυριακή Αντωνιάδου-Πλυταριά, Υποψήφια Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2017



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

**ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ
ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ
ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Χ. Γέσιος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Κυριακή Αντωνιάδου-Πλυταριά Υποψήφια Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Απριλίου 2017

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Απρίλιος 2017

.....

Αλέξανδρος Χ. Γέσιος

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

Copyright © Αλέξανδρος Γέσιος, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός σχήματος ρύθμισης τάσης που εφαρμόζεται σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με αυξημένη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής. Το σχήμα ρύθμισης τάσης που αναπτύσσεται κάνει χρήση της δυνατότητας απορρόφησης αέργου ισχύος των μονάδων διανεμημένης παραγωγής ώστε να μετριάζεται η ανύψωση τάσης και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενεργού ισχύος. Επιπρόσθετα, έχει μικρές απαιτήσεις επικοινωνίας ανάμεσα στις μονάδες και δεν συμμετέχουν όλες οι μονάδες στη ρύθμιση τάσης, για αυτό και ονομάζεται υβριδικός αλγόριθμος ρύθμισης τάσης.

Αρχικά, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας για την εύρεση των σχέσεων της αέργου ισχύος των μονάδων διανεμημένης παραγωγής με την τάση των κόμβων και τις απώλειες του δικτύου. Η ανάλυση ευαισθησίας θεμελιώνει τον υβριδικό αλγόριθμο. Επιπρόσθετα, αναπτύσσονται τρία αυτόνομα σχήματα ρύθμισης τάσης, στα οποία οι αποφάσεις για τη ρύθμιση της τάσης λαμβάνονται σύμφωνα με μετρήσεις στο σημείο κοινής σύνδεσης της μονάδας με το δίκτυο. Επιπλέον, προτείνεται ένα μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης έτσι ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτωση των γραμμών διανομής του δικτύου.

Τα σχήματα ρύθμισης τάσης εφαρμόζονται σε ακτινικό δίκτυο διανομής με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών συστημάτων και συγκρίνονται ως προς τις απώλειες ισχύος και την υπερφόρτωση του δικτύου. Οι προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου γίνονται στο Simulink του MATLAB και η ανάλυση της μόνιμης κατάστασης στο MATPOWER. Τα αποτελέσματα των εφαρμογών αναλύονται και παράλληλα προτείνονται και ορισμένες επεκτάσεις της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ρύθμιση τάσης, ανύψωση τάσης, ακτινικά δίκτυα διανομής, διανεμημένη παραγωγή, έλεγχος αέργου ισχύος, απώλειες ισχύος, φωτοβολταϊκά συστήματα

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is the development of a voltage regulation scheme that is applied in radial distribution networks with high distributed generation (DG) penetration. This voltage regulation scheme deploys the reactive power capability of the DG units in order to mitigate voltage rise and minimize power losses. Furthermore, this control requires minimum communication among the units and only some of the units take part in voltage regulation. This is the reason why it is called hybrid algorithm.

Firstly, sensitivity theory is employed in order to obtain the relation among the reactive power of the DG units, the nodal voltages and the network losses. The sensitivity analysis leads to the hybrid algorithm. Also, three local control schemes are developed in which control actions are determined based only on local measurements at the point of common coupling (PCC). Furthermore, a mixed voltage regulation scheme is proposed in order to avoid network overloading.

The control schemes are applied to a radial distribution network with high photovoltaic generators penetration and are compared in terms of power losses and network overloading. Time domain simulations are carried out in MATLAB Simulink and steady state analysis in MATPOWER. The obtained results are presented and discussed. Future research on the topic is also proposed.

KEY WORDS

Voltage regulation, voltage rise, radial distribution networks, distributed generation, reactive power control, power losses, photovoltaic generators

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην δύσκολη εποχή που ζούμε, νιώθεις ιδιαίτερη ικανοποίηση όταν φθάνει η ώρα να ολοκληρώσεις και να παραδώσεις ένα έργο που σου ανατέθηκε. Με την εργασία αυτή, κλείνει μια από τις σημαντικότερες περιόδους της ζωής μου και το ταξίδι μου στο ΕΜΠ ολοκληρώνεται. Ένα ταξίδι που μου έδωσε την ευκαιρία να συναναστραφώ και να συνεργαστώ με αξιόλογους ανθρώπους, διαμόρφωσε την προσωπικότητα μου και διεύρυνε τους επιστημονικούς μου ορίζοντες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, επίκουρου καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση της, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες συμβουλές και τις καίριες επισημάνσεις του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα Κέλλυ Αντωνιάδου για την υποδειγματική επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, την καθοδήγηση που μου παρείχε καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στον πατέρα μου για την στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους εντός και εκτός της σχολής, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν και με συντρόφευσαν στα φοιτητικά μου χρόνια. Τέλος, ιδιαίτερη μνεία αξίζει στους συναδέλφους μου Μιχάλη, Νίκο, Δημήτρη, Μιχάλη και Ιάκωβο με τους οποίους μοιραστήκαμε ένα τόσο παραγωγικό διάστημα της ζωής μας και βιώσαμε παρέα το ταξίδι.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2 Διανεμημένη παραγωγή στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.3 Αντικείμενο της εργασίας	2
1.4 Δομή της εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Πλεονεκτήματα ενσωμάτωσης διανεμημένης παραγωγής	6
2.3 Μειονεκτήματα της διανεμημένης παραγωγής	7
2.4 Τεχνολογίες διανεμημένης παραγωγής	9
2.4.1 Τεχνολογίες μη ανανεώσιμης διανεμημένης παραγωγής	9
2.4.2 Τεχνολογίες ανανεώσιμης διανεμημένης παραγωγής	9
2.4.3 Ανεμογεννήτριες	10
2.4.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα	11
2.4.5 Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	12
2.4.6 Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί	13
2.5 Επίδραση της διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής	14
2.5.1 Ανύψωση τάσης	14
2.5.2 Υπερφόρτωση και απώλειες ισχύος	15
2.5.3 Διαταραχές ποιότητας ισχύος	16
2.5.4 Επίδραση στην προστασία του συστήματος	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	19
3.1 Εισαγωγή	19
3.2 Φωτοβολταϊκό στοιχείο	19
3.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα	19
3.2.2 Θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία	21
3.2.3 Υλικό κατασκευής	22
3.3 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	23
3.4 Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων	25
3.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ΦΒ συστημάτων	27
3.6 Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών συστημάτων	28
3.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά αντιστροφέων διασυνδεδεμένων ΦΒ συστημάτων	29

3.6.2	Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking)	30
3.6.3	Ρόλος αντιστροφέα στο Έξυπνο Δίκτυο	32
3.6.4	Κύκλωμα αντιστροφέα	33
3.6.4.1	Μονοφασικός αντιστροφέας τριών επιπέδων	34
3.6.4.2	Τριφασικός αντιστροφέας τριών επιπέδων	37
3.6.4.3	Έλεγχος τριφασικού αντιστροφέα συνδεδεμένου με το δίκτυο	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ		43
4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Σχήματα ρύθμισης τάσης	43
4.3	Διατύπωση του πρόβληματος	44
4.4	Ανάλυση ευαισθησίας	46
4.4.1	Μήτρες ευαισθησίας ενεργού και αέργου ισχύος	46
4.4.2	Ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος	50
4.5	Υβριδικός αλγόριθμος	54
4.6	Αυτόνομοι έλεγχοι τάσης	56
4.6.1	Έλεγχος droop – Q(P)	56
4.6.2	Έλεγχος σταθερού συντελεστή ισχύος	59
4.6.3	Συνδιασμός αποκοπής ενεργού ισχύος και ελέγχου αέργου ισχύος	61
4.7	Μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης για αποφυγή υπερφόρτωσης των γραμμών διανομής	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		65
5.1	Εισαγωγή	65
5.2	Ακτινικό δίκτυο διανομής 20 κόμβων	65
5.2.1	Προσομοίωση υβριδικού αλγορίθμου	66
5.2.2	Προσομοίωση ελέγχου droop	70
5.2.3	Προσομοίωση ελέγχου σταθερού συντελεστή ισχύος	72
5.2.4	Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	74
5.3	Ανάλυση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας	75
5.4	Αύξηση διείσδυσης ΔΠ	79
5.4.1	Προσομοίωση υβριδικού αλγορίθμου	79
5.4.2	Προσομοίωση συνδιασμού αποκοπής ενεργού ισχύος και ελέγχου αέργου ισχύος	80
5.4.3	Προσομοίωση μεικτού σχήματος ρύθμισης τάσης	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
6.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	89
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Ένα ΣΗΕ αποτελείται από μονάδες παραγωγής, από φορτία που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια και από το δίκτυο που τα συνδέει. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος, τόσο για τους παραγωγούς όσο και για τους καταναλωτές και με τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία παροχής.

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

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Οι θερμικοί σταθμοί βασίζονται στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών. Τα τελευταία χρόνια καταγράφεται ραγδαία ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) κυρίως με την εκμετάλλευση της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας.

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

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά την διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα ΣΗΕ ποικίλουν σε μέγεθος και δομή, ωστόσο έχουν κοινά βασικά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσομένου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι απαραίτητο, η τάση λειτουργίας του συστήματος να παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν και τον ουδέτερο αγωγό. Υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές διανομής με δύο αγωγούς.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται κυρίως οικιακοί και εμπορικοί καταναλωτές.

1.2 ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για πολλές δεκαετίες το ηλεκτρικό σύστημα των χωρών βασιζόταν σε ένα κεντρικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ροή της ενέργειας ήταν από τους παραγωγούς στους καταναλωτές και για αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκαν μεγάλοι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να δημιουργείται ενδιαφέρον για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα σημεία του δικτύου, στο σύστημα διανομής. Η σύνδεση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο διανομής είναι γνωστή ως διανεμημένη παραγωγή. Αφενός η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση και αφετέρου τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της διανεμημένης παραγωγής.

Η διείσδυση διανεμημένης παραγωγής επιτρέπει και στους καταναλωτές να συμμετέχουν στην τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα να θεωρούνται ενεργές οντότητες στο δίκτυο και όχι απλά παθητικά φορτία. Η ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής συντελεί στη μετάβαση των δικτύων διανομής, καθώς παύουν να είναι παθητικά, δηλαδή να τροφοδοτούν μόνο φορτία, και γίνονται ενεργά.

Η αύξηση της διείσδυσης των μονάδων διανεμημένης παραγωγής εισάγει νέες προκλήσεις αναφορικά με την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας. Η εξέλιξη αυτή έχει σοβαρές επιπτώσεις για τους διαχειριστές του δικτύου διανομής. Μέχρι πρόσφατα, ο σχεδιασμός και η λειτουργία των δικτύων διανομής γινόταν μέσω μιας top-down προσέγγισης. Οι ροές ισχύος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν απαιτούσαν εκτενή εργαλεία διαχείρισης και παρακολούθησης, καθώς ήταν προβλέψιμες. Στα σημερινά ενεργά δίκτυα, το μοντέλο αυτό αλλάζει. Η ολοένα αυξανόμενη σύνδεση μονάδων παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες ροές ισχύος στο δίκτυο, σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις της τάσης, και σε διαφορετικά χαρακτηριστικά στη ροή αέργου ισχύος στο δίκτυο. Η ενεργή διαχείριση του συστήματος διανομής καθίσταται αναγκαία για να εξασφαλίσει την ομαλή σύνδεση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής. Το γεγονός αυτό απαιτεί αλλαγές στον τρόπο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς οι ανάστροφες ροές ισχύος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, να παρακολουθούνται και να προσομοιώνονται προκειμένου να επιτυγχάνεται η καλύτερη πρόβλεψη και εποπτεία του δικτύου.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματική εργασία είναι η ανάπτυξη ενός σχήματος ρύθμισης τάσης που εφαρμόζεται σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση διανεμημένης παραγωγής. Στόχος του σχήματος ρύθμισης τάσης είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής διανομής. Παράλληλα, το προτεινόμενο σχήμα ρύθμισης τάσης έχει μικρές απαιτήσεις επικοινωνίας ανάμεσα στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής ώστε να είναι εύρωστο και ευέλικτο.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

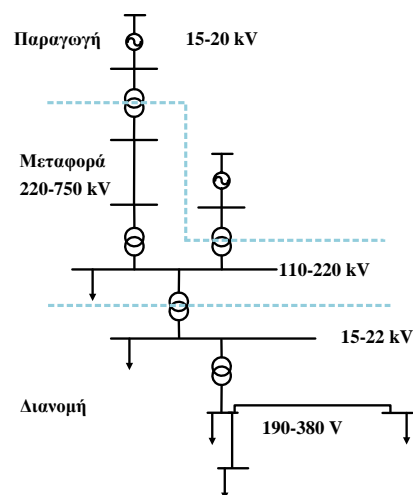
Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

- Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ενσωμάτωσης διανεμημένης παραγωγής και ταξινομούνται οι τεχνολογίες διανεμημένης παραγωγής. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η επίδρασή της στο δίκτυο διανομής.
- Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Γίνεται η μετάβαση από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στο φωτοβολταϊκό πεδίο και παρατίθεται η λειτουργία του αντιστροφέα.
- Στο **Κεφάλαιο 4** ταξινομούνται οι τεχνικές ρύθμισης τάσης και διατυπώνεται το πρόβλημα ελαχιστοποίησης των απωλειών ισχύος. Στην συνέχεια, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας, η οποία θεμελιώνει τον υβριδικό αλγόριθμο. Τέλος, παρουσιάζονται οι αυτόνομοι έλεγχοι ρύθμισης τάσης και προτείνεται ένα μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης για αποφυγή υπερφόρτωσης των γραμμών διανομής.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών ρύθμισης τάσης.
- Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.
- Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία της εργασίας.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τον τελευταίο αιώνα, η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις διακριτές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή [1]. Τα συμβατικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες μονάδες παραγωγής τοποθετημένες σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω των γραμμών μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης σε μεγάλες αποστάσεις και καταλήγει στους υποσταθμούς διανομής. Τέλος, τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης αναλαμβάνουν να διανείμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές διαμέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης. Οι παραπάνω τρεις διακριτές λειτουργίες των συμβατικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Διακριτές λειτουργίες συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράγοντες όπως η ανάπτυξη των τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η συνεχής αύξηση της ζήτησης για αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς και η ανάγκη για αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής έστρεψαν το ενδιαφέρον στην χρήση μικρότερων μονάδων παραγωγής οι οποίες συνδέονται απευθείας στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης ή στην πλευρά του καταναλωτή στην χαμηλή τάση. Οι παραπάνω μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται Μονάδες Διανεμημένης Παραγωγής (ΜΔΠ). Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται η ορολογία των διανεμημένων πηγών ενέργειας (Distributed Energy Resources – DER) που περιλαμβάνουν την διανεμημένη παραγωγή (Distributed Generation – DG), τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems – ESS) και τα ευέλικτα φορτία (responsive loads) [2], [3].

2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής έχει τεχνικά και περιβαλλοντικά ωφέλη. Επιπρόσθετα, εμφανίζει πλεονεκτήματα όσον αφορά την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και την ενεργειακή πολιτική.

- **Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας**

Από τις αρχές του 1990, η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώθηκε σε πολλές χώρες δίνοντας την δυνατότητα να εισέλθουν νέοι συμμετέχοντες στην παραγωγή, την διανομή και την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Βόρεια Αμερική και στην Ευρώπη, είναι σήμερα δυνατόν σχεδόν για τον οποιονδήποτε να παράξει ηλεκτρική ενέργεια και να την εξάγει στο σύστημα παρόλο που σε κάθε χώρα οι κανόνες για την τιμολόγηση της ενέργειας και για την σύνδεση στο δίκτυο μπορεί να διαφέρουν [4]. Η χρήση νέων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πχ ΑΠΕ) ήταν ο βασικός λόγος που συντέλεσε στην απελευθέρωση της αγοράς. Περισσότεροι συμμετέχοντες θα αυξήσουν τον ανταγωνισμό που σε συνδυασμό με την αυξημένη παραγωγή, θα μειώσει τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές.

- **Περιβάλλον και κλιματική αλλαγή**

Ο όρος κλιματική αλλαγή ή «φαινόμενο του θερμοκηπίου» αναφέρεται στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης, η οποία προκαλείται από την αύξηση στην ατμόσφαιρα της συγκέντρωσης αερίων που παγιδεύουν την θερμότητα όπως ακριβώς το γυαλί σε ένα θερμοκήπιο. Το αέριο το οποίο συμβάλλει τα μέγιστα στην κλιματική αλλαγή είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο είναι παράγωγο της καύσης ορυκτών καυσίμων. Δεδομένου ότι οι περισσότερες συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, όπως άνθρακας, φυσικό αέριο και πετρέλαιο, η μετάβαση σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως ο ήλιος και ο άνεμος, θα οδηγήσει σε μείωση εκπομπών CO₂. Οι πυρηνικοί σταθμοί και οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, παρόλο που δεν αυξάνουν άμεσα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, δημιουργούν επιπτώσεις στο περιβάλλον με άλλους τρόπους. Το πιο σημαντικό εμπόδιο για την ευρεία χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι το ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα είναι φθηνότερη. Για αυτόν το λόγο, είναι απαραίτητο να δοθούν οικονομικά κίνητρα για την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είτε να αποθαρρυνθεί η χρήση ορυκτών καυσίμων μέσω φορολογίας ή των μηχανισμών εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών αερίων ρύπων. Κάποιοι από τους παραπάνω μηχανισμούς στέφθηκαν με επιτυχία σε χώρες όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ισπανία [4].

- **Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας**

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς και εκτιμάται ότι μέχρι το 2050 θα έχει διπλασιαστεί. Επίσης, σε γρήγορα αναπτυσσόμενες οικονομίες, όπως η Βραζιλία, η Νότια Αφρική και η Ινδία, η διαθέσιμη παραγωγή οριακά μόνο μπορεί να εξυπηρετήσει την κατανάλωση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η κατασκευή συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή, λόγω κυρίως

περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπρόσθετα, η κατασκευή έργων τέτοιας κλίμακας έχει υψηλό κόστος και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να ολοκληρωθεί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μικρότερης κλίμακας ανανεώσιμες πηγές δεν υπόκειται στους παραπάνω περιορισμούς. Το συνολικό κόστος μπορεί να είναι υψηλότερο αλλά σε μια απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας οι επενδύσεις μπορούν να μοιραστούν σε περισσότερους από έναν συμμετέχοντες και εν τέλει η χρηματοδότηση να είναι ευκολότερη [4].

- **Επίδραση στην λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας**

Η κατάλληλη τοποθέτηση και διαστασιοποίηση μονάδων διανεμημένης παραγωγής κοντά στα κέντρα κατανάλωσης φορτίου μπορεί να έχει θετική επίδραση στην λειτουργία όσον αφορά την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία παροχής. Με την χρήση τέτοιων μονάδων παραγωγής, η ισχύς μεταφέρεται σε μικρότερη απόσταση, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες ισχύος. Επιπρόσθετα μειώνεται η ροή ισχύος από το δίκτυο μεταφοράς ή τμήματα του δικτύου διανομής που έχουν μεγαλύτερη τάση λειτουργίας, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ρίσκο υπερφόρτωσης των γραμμών. Ενώ σε έναν συγκεκριμένο κόμβο του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ) η επίδραση στην υπερφόρτωση μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τη γενική γνώση για το μέγεθος (ονομαστική ισχύ) της εγκατεστημένης μονάδας και το μέγιστο και ελάχιστο φορτίο, η επίδραση στις απώλειες απαιτεί περισσότερο λεπτομερή γνώση της συμπεριφοράς της μονάδας και του φορτίου στη διάρκεια του χρόνου. Η μεγαλύτερη μείωση των απωλειών επιτυγχάνεται όταν η μονάδα διανεμημένης παραγωγής βρίσκεται πολύ κοντά στο φορτίο. Αυτό συμβαίνει με τις οικιακές μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και με τα φωτοβολταϊκά στις στέγες των κατοικιών [2].

Οι ΜΔΠ είναι τοποθετημένες σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής κοντά στους καταναλωτές οπότε η βλάβη σε μια μονάδα θα έχει περιορισμένη επίπτωση σε ολόκληρο το σύστημα σε σχέση με μια βλάβη σε μια μεγάλη κεντρική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή σε μια μεγάλη γραμμή μεταφοράς [2].

- **Ενεργειακή ανεξαρτησία**

Η εξάντληση των αποθεμάτων σε ορυκτά καύσιμα σε συνδυασμό με τις αναταραχές που επικρατούν στις χώρες της Μέσης Ανατολής οι οποίες κατέχουν το ήμισυ το αποθεμάτων σε πετρέλαιο δημιουργούν αβεβαιότητα για τον ενεργειακό εφοδιασμό και για την εξυπηρέτηση των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών μιας χώρας [2],[5]. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει η ανάγκη μείωσης της εξάρτησης από αναξιόπιστες και ασταθείς αγορές ορυκτών καυσίμων μέσω της χρήσης των διαθέσιμων εγχώριων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διανεμημένη παραγωγή παρουσιάζει μειονεκτήματα τα οποία αφορούν το κόστος εγκατάστασης και το στοχαστικό προφίλ παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

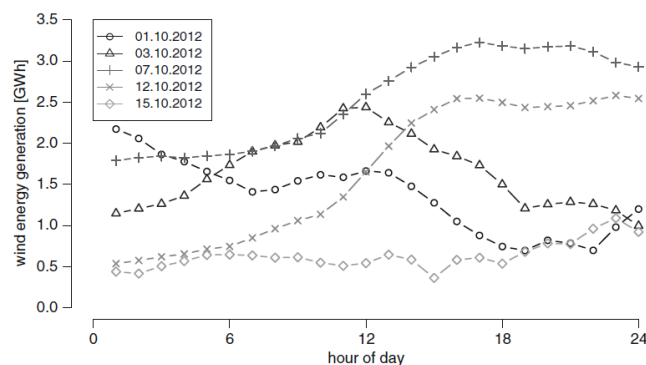
- **Κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος**

Οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής έχουν σχετικά υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με τις μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, υπάρχουν διαφορές στο κόστος κεφαλαίου διαφορετικών τεχνολογιών διανεμημένης παραγωγής, όπως για παράδειγμα το σχετικά χαμηλό κόστος των μονάδων εσωτερικής καύσης σε σχέση με το υψηλότερο κόστος των κυψελών καυσίμου [2].

- **Προφίλ παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**

Η παραγωγή διάφορων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί μια στοχαστική διαδικασία καθώς επηρεάζεται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες καθιστώντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μη γραμμική συνάρτηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα του ανέμου αλλά επίσης επηρεάζεται (σε μικρότερο βαθμό) από την πυκνότητα του αέρα. Αντίστοιχα, η ηλιακή ενέργεια επηρεάζεται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία ενώ ταυτόχρονα η θερμοκρασία της επιφάνειας του ημιαγώγιμου φωτοβολταϊκού στοιχείου επηρεάζει επίσης την απόδοσή του. Για αυτόν τον λόγο, οι παραπάνω πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται συχνά ως διακοπτόμενες (intermittent) καθώς κάποιες φορές είναι διαθέσιμες και κάποιες φορές όχι [6]. Όσον αφορά την αιολική και την ηλιακή ενέργεια παρατηρείται ότι η παραγωγή μπορεί να μεταβληθεί απότομα από στιγμή σε στιγμή καθώς μεταβατικά φαινόμενα, όπως είναι για παράδειγμα η κίνηση των συννέφων για τα φωτοβολταϊκά πάνελ, επηρεάζουν την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται η ωριαία συνολική παραγωγή αιολικής ενέργειας της Δανίας σε διάστημα πέντε ημερών από 1 έως 15 Οκτωβρίου 2012 όπου φαίνεται πως διαφέρει η παραγωγή τόσο από ώρα σε ώρα όσο και από μέρα σε μέρα [6].

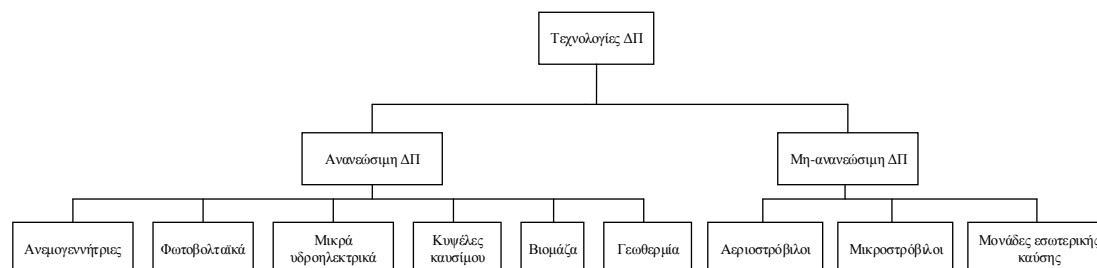
Ο στοχαστικός χαρακτήρας κάποιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επηρεάζει αφενός την λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την δυνατότητα διείσδυσής τους και αφετέρου τα έσοδα των συμμετεχόντων στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (και κατά επέκταση την δυνατότητά τους για περαιτέρω επενδύσεις) [6]. Τέλος, στην περίπτωση των αυτόνομων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ο στοχαστικός χαρακτήρας των πηγών αυτών δημιουργεί ένα άνω όριο διείσδυσής τους και υποδηλώνει ότι πρέπει να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής.



Σχήμα 2.2 : Ωριαία συνολική παραγόμενη ενέργεια από ανεμογεννήτριες στη Δανία για 5 μέρες [6].

2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διανεμημένη παραγωγή ταξινομείται σε δύο κατηγορίες, ανανεώσιμη και μη ανανεώσιμη ΔΠ, ανάλογα με τον τύπο των καυσίμων που χρησιμοποιεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [3]. Ο ταξινόμηση φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 : Ταξινόμηση τεχνολογιών διανεμημένης παραγωγής [3].

2.4.1 Τεχνολογίες μη ανανεώσιμης διανεμημένης παραγωγής

Οι τεχνολογίες μη ανανεώσιμης ΔΠ κάνουν χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, ο άνθρακας και το πετρέλαιο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η καύση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει καθοριστικά στην κλιματική αλλαγή μέσω των καυσαερίων με αποτέλεσμα να κάνουν την εμφάνισή τους φαινόμενα όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και η όξυνση βροχής. Οι μη ανανεώσιμες πηγές θα εξαντληθούν καθώς ο ρυθμός ζήτησης ενέργειας από αυτές τις πηγές είναι πολύ γρηγορότερος από τον ρυθμό αναπλήρωσής τους από την γη [3]. Οι παραπάνω τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για την παραγωγή θερμικής ενέργειας για οικιακή και βιομηχανική χρήση (τεχνολογίες συμπαραγωγής).

2.4.2 Τεχνολογίες ανανεώσιμης διανεμημένης παραγωγής

Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ή ήπιες μορφές ενέργειας) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές θεωρείται η αιολική ενέργεια, η ηλιακή, η αεροθερμική, η γεωθερμική, η υδροθερμική, η ενέργεια των ωκεανών, η υδροηλεκτρική, καθώς και η ενέργεια που παράγεται από βιομάζα, από τα εκλύόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά τους. Πρώτον, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στην φύση. Δεύτερον, πρόκειται για καθαρές μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα.

2.4.3 Ανεμογεννήτριες

Η κινητική ενέργεια από την οριζόντια μετατόπιση του αέρα μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας τα οποία είναι συνδεδεμένα σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Η κινητική ενέργεια των πτερυγίων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αιολικής. Τελευταία χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αλλά έχουν κάνει την εμφάνισή τους και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα λόγω της απόδοσής τους σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Η χρήση της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε με μικρές εγκαταστάσεις, οι οποίες ήταν συνδεδεμένες στην χαμηλή και στην μέση τάση. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των ανεμογεννητριών έχει επεκταθεί σε πολλές χώρες και δίνεται έμφαση στην κατασκευή μεγάλων αιολικών πάρκων συνδεδεμένα στο δίκτυο μεταφοράς. Η αιολική ενέργεια είναι η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

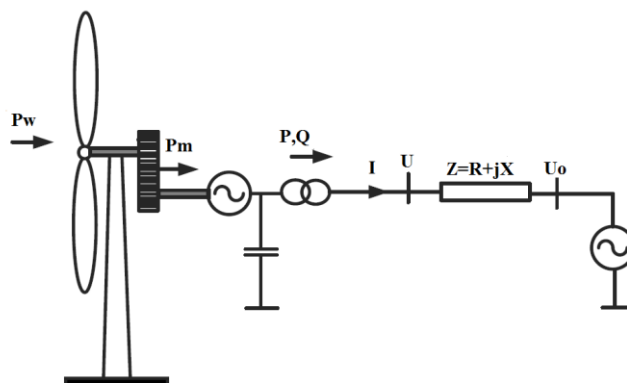
Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (offshore wind parks) είναι μια βιομηχανία η οποία ξεκίνησε το 1991 όταν οι πρώτες ανεμογεννήτριες εγκαταστάθηκαν έξω από τις ακτές της Δανίας. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες προσφέρουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τις χερσαίες. Ο άνεμος είναι ισχυρότερος και πιο σταθερός έξω από την ακτή, επιτρέποντας μεγαλύτερη και πιο αξιόπιστη ηλεκτροπαραγωγή. Εξάλλου, οι δυνατότητες ανάπτυξης αιολικών πάρκων στην ξηρά αρχίζουν να περιορίζονται λόγω του μεγέθους των μηχανών, της κατάληψης σημαντικών εκτάσεων γης και της οπτικής και ηχητικής όχλησης, ενώ οι πιέσεις για την περαιτέρω διεξόδυση των ΑΠΕ αυξάνονται. Επιπρόσθετα, μεγάλα αστικά κέντρα βρίσκονται κοντά σε ακτές, οπότε μπορεί να επιτευχθεί παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή απόσταση από τα κέντρα κατανάλωσης.

Οι μοντέρνες τεχνολογίες ανεμογεννητριών προσφέρουν αξιόπιστη λειτουργία σε ένα ευρύ πεδίο περιοχών εγκατάστασης από την έρημο μέχρι τα παγωμένα αρκτικά κλίματα με υψηλές και χαμηλές ταχύτητες ανέμου [7]. Η χρήση ελαφριών υλικών μειώνει το βάρος της εγκατάστασης και ο σχεδιασμός τους σήμερα είναι κομψός και αεροδυναμικός. Τα βασικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία κατασκευάζονται είναι:

- Αξιοπιστία
- Συμβατότητα με το δίκτυο
- Μείωση ηχητικού θορύβου
- Μέγιστη απόδοση και αεροδυναμικός σχεδιασμός
- Παραγωγή σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου
- Δυνατότητα υπεράκτιας επέκτασης

Για μεγάλες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών συνδεδεμένες με ανορθωτή και αντιστροφέα. Συχνά χρησιμοποιούνται επίσης επαγωγικές γεννήτριες καθώς είναι εύρωστες, αποδοτικές και παράγονται σε ευρεία κλίμακα. Σε περίπτωση μεγάλων ανεμογεννητριών ή στην περίπτωση της σύνδεσης σε αδύναμα δίκτυα, χρησιμοποιούνται πυκνωτές για αντιστάθμιση και για να παράξουν το ρεύμα μαγνήτισης. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται συστήματα αντιστάθμισης για τις απαιτήσεις αέργου ισχύος της επαγωγικής γεννήτριας [7].

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η σύνδεση ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Η αιολική ισχύς P_w , μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ, την οποία η γεννήτρια την μετατρέπει στην ηλεκτρική ισχύ P που εγχέει στο δίκτυο. Αν η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή, τότε η ενεργός ισχύς P θα παραμένει σταθερή, αν και το παραπάνω είναι μια λειτουργική κατάσταση όπου δεν συμβαίνει λόγω των μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου. Η άεργος ισχύς που απορροφούν οι ασύγχρονες γεννήτριες εξαρτάται από την ενεργό ισχύ θεωρώντας ότι η τάση παραμένει σταθερή. Για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος που καταναλώνεται στην λειτουργία ανοιχτού κυκλώματος χρησιμοποιείται συστοιχία πυκνωτών (capacitor bank), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται λειτουργία υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [7].



Σχήμα 2.4 : Σύνδεση ανεμογεννήτριας στο δίκτυο.

2.4.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο. Τέτοιες είναι η ενέργεια του φωτός, η θερμότητα καθώς και διάφορες ακτινοβολίες. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη αφού προέρχεται από τον ήλιο. Παρόλα αυτά η ηλιακή ενέργεια έχει χαμηλή πυκνότητα ισχύος και η εκμετάλλευσή της εξαρτάται από γεωγραφικές και χρονικές διακυμάνσεις [8].

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δύο τρόπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια και μετέπειτα σε ηλεκτρική και χρησιμοποιείται στη λειτουργία των ηλιοθερμικών συστημάτων [4]. Ο δεύτερος περιλαμβάνει την ιδιότητα τεχνητών ημιαγωγικών διατάξεων να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν απορροφήσουν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο και σε αυτό στηρίζουν τη λειτουργία τους τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων: το αυτόνομο και το διασυνδεδεμένο με το δίκτυο. Το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει την φωτοβολταϊκή γεννήτρια, η οποία τροφοδοτεί ένα φορτίο το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο όταν υπάρχει επαρκής ακτινοβολία. Σε αυτήν την περίπτωση, για ενίσχυση της αξιοπιστίας συχνά περιλαμβάνονται και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ή/και εφεδρικές γεννήτριες. Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα περιλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα, τα οποία εγχέουν σε ένα σημείο του δικτύου ηλεκτρική ενέργεια και η εγκατεστημένη ισχύς τους κυμαίνεται από εκατοντάδες kW μέχρι μερικά MW. Στα διασυνδεδεμένα οικιακά

φωτοβολταϊκά συστήματα όλη η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται στο τοπικό δίκτυο και πωλείται από τον ιδιοκτήτη.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις παρουσιάζουν εκθετική αύξηση τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Από τότε που η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας κατέστη εφικτή, η ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και οι μηχανισμοί χρηματοδότησης όπως το σύστημα εγγυημένων σταθερών τιμών (feed in tariffs) συντέλεσαν στην εξάπλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως τα τελευταία πέντε έτη το κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και εκείνο της εγκατάστασής τους έχει πέσει περίπου κατά 80%.

2.4.5 Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Ο όρος Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ - Combined Heat and Power – CHP) αναφέρεται στην ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας στο πλαίσιο μιας ενιαίας διεργασίας. Η συμπαραγωγή περιλαμβάνει την ανάκτηση της εκλυόμενης θερμότητας από μια διαδικασία παραγωγής για την χρήση σε μια άλλη διαδικασία. Η ιδέα της συμπαραγωγής είναι αρκετά παλιά και αναπτύχθηκε λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Τα συστήματα συμπαραγωγής χρησιμοποιούν την θερμότητα η οποία θα εκλυόταν στον περιβάλλον σε μια συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό εξοικονόμηση πόρων και βελτιωμένη απόδοση. Η απόδοση της ΣΗΘ μπορεί να φτάσει το 70-90%, ενώ μιας συμβατικής θερμικής διεργασίας είναι 40-50% [4]. Οι μονάδες συμπαραγωγής ως επί το πλείστον δεν ανήκουν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς χρησιμοποιούν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο για καύσιμο. Μόνο όσες χρησιμοποιούν σαν πηγή ενέργειας τη βιομάζα ανήκουν στις ΑΠΕ.

Για τη διατήρηση της υψηλής απόδοσης της ΣΗΘ σημαντικός παράγοντας είναι η σταθερή ζήτηση θέρμανσης ή κλιματισμού. Για αυτό τον λόγο, μεγάλες εγκαταστάσεις ΣΗΘ χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού στη βιομηχανία (Industrial Heating - CHP/IND), στον αγροτικό τομέα και στην θέρμανση πόλεων (District Heating - CHP/DH). Η αποδοτικότητα της μεθόδου ΣΗΘ έχει οδηγήσει την ανάπτυξη της τεχνολογίας συμπαραγωγής και αποτελεί βασικό άξονα κάθε ενεργειακής πολιτικής [9]. Τα πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι:

- Αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας και εξοικονόμηση καυσίμων.
- Η καλύτερη αξιοποίηση των καυσίμων οδηγεί σε μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.
- Εξοικονόμηση οικονομικών πόρων και βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της οικονομίας.
- Προώθηση αποκεντρωμένων λύσεων ηλεκτροπαραγωγής καθώς οι μονάδες ΣΗΘ σχεδιάζονται για τις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών.
- Η βελτιωμένη ασφάλεια παροχής ενέργειας μειώνει τις πιθανότητες να μείνουν οι καταναλωτές χωρίς ηλεκτρική ή/και θερμική ενέργεια.

Μια εφαρμογή της ΣΗΘ η οποία τυγχάνει προσοχής στη διεθνή βιβλιογραφία είναι η μικρο-ΣΗΘ (micro-CHP), η οποία περιλαμβάνει εγκατάσταση μικρότερων μονάδων συμπαραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για μικρότερους χώρους.

Πιθανή εφαρμογή θα μπορούσε να βρει σε οικιακούς καταναλωτές, ξενοδοχεία, εμπορικά κέντρα και γραφεία [4].

Τα συστήματα συμπαραγωγής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος ενέργειας που παράγεται πρώτο: τα συστήματα κορυφής (topping systems) και τα συστήματα βάσης (bottoming systems). Στα συστήματα κορυφής πρώτα παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια και στην συνέχεια η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για θέρμανση ή για θερμικές διεργασίες. Στα συστήματα βάσης παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια και στη συνέχεια η αποβαλλόμενη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μηχανή που κινεί τη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ατμοστρόβιλος ή αεριοστρόβιλος. Στην πρώτη περίπτωση παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια από την εκτόνωση του ατμοστροβίλου ενώ η παραγωγή θερμότητας επιτυγχάνεται με απομάστευση από κάποια βαθμίδα του ατμοστροβίλου ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ατμού. Στη δεύτερη περίπτωση η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από μηχανή εσωτερικής καύσης (συνήθως αεριοστρόβιλο) και η παραγωγή θερμικής ενέργειας γίνεται με την ανάκτηση της θερμότητας από τα καυσαέρια [9].

2.4.6 Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκμεταλλεύονται τη δυναμική ενέργεια της μάζας νερού που βρίσκεται σε κάποιο ύψος με σκοπό να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική κατά την πτώση του και στη συνέχεια σε ηλεκτρική καθώς το νερό κινεί έναν υδροστροβίλο. Παρόλο που η υδραυλική ενέργεια παρέχεται δωρεάν από τη φύση, η κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών απαιτεί σημαντικές δαπάνες και έργα και έχει επίδραση στο περιβάλλον. Οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεν συγκαταλέγονται στις ΑΠΕ καθώς προκαλούν έντονη περιβαλλοντική αλλοίωση της περιοχής του έργου κυρίως λόγω της κατασκευής μεγάλων φραγμάτων.

Παρόλο που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικά αυξάνεται σταθερά, το ποσοστό που κατέχει στη συνολική παραγωγή ενέργειας μειώνεται. Το 1973, 1400 TWh ηλεκτρικής ενέργειας παράχθηκαν από υδροηλεκτρικά και αποτελούσαν το 21% της συνολικής παραγωγής. Το 2007, οι αντίστοιχες τιμές ήταν 3100 TWh και 15.6%. Σήμερα, στην Ευρώπη και στη Βόρεια Αμερική δεν προβλέπεται η περαιτέρω εξάπλωση μεγάλων υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων λόγω της αντίδρασης της κοινής γνώμης για την κατασκευή φραγμάτων και λόγω του ότι έχουν ήδη αξιοποιηθεί οι πλέον κατάλληλες τοποθεσίες για τη δημιουργία σταθμών [4].

Τα μικρά υδροηλεκτρικά (Small Hydro Power - SHP) δεν εμφανίζουν τα αρνητικά χαρακτηριστικά των μεγάλων σταθμών όσο αφορά την περιβαλλοντική επιβάρυνση και λόγω του μικρότερου μεγέθους τους έχουν το πλεονέκτημα πως μπορούν να κατασκευαστούν πιο κοντά στην κατανάλωση. Παρόλο που δεν υπάρχει διεθνής συμφωνία για τον ορισμό των μικρών υδροηλεκτρικών, μικρά υδροηλεκτρικά θεωρούνται οι υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής με ονομαστική ισχύ έως 30 MW και αυτά συγκαταλέγονται στις ΑΠΕ [4]. Συχνά, τα μικρά υδροηλεκτρικά κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Small hydro: 1 MW – 30 MW
- Mini hydro: 100 kW – 1 MW
- Micro hydro: 5 kW – 100 kW
- Pico hydro: < 5 kW

Ένα καλά σχεδιασμένο μικρό υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να ενταχθεί στον περιβάλλοντα χώρο έχοντας ελάχιστη αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Τα μικρά υδροηλεκτρικά χρησιμοποιούν κυρίως το νερό του ποταμού με μικρή ή καθόλου ανάγκη χρήσης δεξαμενής. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι ο χρόνος κατασκευής τους είναι μικρός, είναι συστήματα συνεχούς ροής και σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

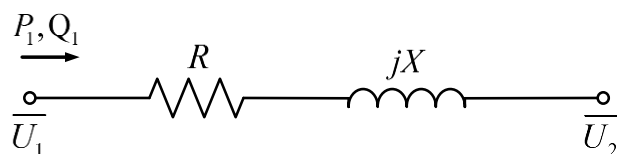
2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής επιφέρει αλλαγές στη λειτουργία του δικτύου διανομής, καθώς το δίκτυο σχεδιάστηκε θεωρώντας μονόδρομη ροή ισχύος και συγκεκριμένα από τον υποσταθμό διανομής προς την κατανάλωση. Οι επιπτώσεις που μπορεί να έχει η ΔΠ εξαρτώνται από τις ιδιότητες του δικτύου διανομής, τις ιδιότητες της διανεμημένης πηγής ενέργειας και τον τρόπο σύνδεσής της με το δίκτυο. Οι αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να εμφανιστούν είναι:

- Η πιθανότητα των υπερτάσεων αυξάνεται λόγω της παραγωγής και της αντίστροφης ροής ισχύος ειδικά σε απομακρυσμένα τμήματα του δικτύου διανομής.
- Υπερφόρτωση των γραμμών διανομής και των μετασχηματιστών σε περίπτωση υψηλής διείσδυσης ΜΔΠ σε περιόδους που η κατανάλωση είναι χαμηλή.
- Διαταραχές της ποιότητας ισχύος παραπάνω από το επιτρεπτό όριο για τους καταναλωτές.
- Λανθασμένη λειτουργία των συστημάτων προστασίας, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε σε αποτυχία είτε σε ανεπιθύμητη λειτουργία. Επίσης, σημαντική επίπτωση στην προστασία έχει ο αποτυχημένος εντοπισμός νησιδοποίησης (islanding).

2.5.1 Ανύψωση τάσης

Στα συμβατικά δίκτυα διανομής, όπου η ισχύς ρέει από τους υποσταθμούς προς τους καταναλωτές, η υπέρταση δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Αν η τάση στην αρχή της γραμμής διανομής είναι εντός ορίων τότε το ρίσκο υπερτάσεων στα σημεία σύνδεσης των καταναλωτών και του εξοπολισμού είναι πολύ μικρό.



Σχήμα 2.5 : Ροή ισχύος μεταξύ δύο κόμβων

Η πτώση τάσης μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων (Σχήμα 2.5) όταν ενεργός ισχύς P_1 και άεργος ισχύος Q_1 εγγέονται στον κόμβο 1 υπολογίζεται προσεγγιστικά από την εξίσωση (2.1) [10].

$$U_1 - U_2 \cong \frac{RP_1 + XQ_1}{U_1} \quad (2.1)$$

Αντίθετα από τα δίκτυα μεταφοράς, στα δίκτυα διανομής ο λόγος R/X της αντίστασης και της αντίδρασης των γραμμών δεν είναι αμελητέος. Σαν αποτέλεσμα, και ο όρος RP_1 και ο όρος XQ_1 της εξίσωσης (2.1) δεν είναι αμελητέοι και τελικά η πτώση τάσης μεταξύ δύο κόμβων είναι συνάρτηση της ροής ενεργού και άεργου ισχύος. Άρα, η έγχυση ενεργού ισχύος από μια μονάδα διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής μπορεί να αλλάξει το πρόσημο της διαφοράς U_1-U_2 και μπορεί να προκαλέσει την αύξηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης της ΜΔΠ. Έτσι, διαταράσσεται το συμβατικά πτωτικό προφίλ της τάσης από τον υποσταθμό προς το τέλος του δικτύου και το δίκτυο κινδυνεύει να βρεθεί σε κατάσταση όπου οι τάσεις κάποιων κόμβων ξεπερνούν το ανώτατο όριο. Όσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση της ΔΠ τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης υπερτάσεων.

Η ροή ενεργού ισχύος πάνω στη γραμμή διανομής σε συνδυασμό με την ωμική αντίσταση της γραμμής τείνει να αυξήσει την τάση στην θέση της ΜΔΠ. Η έγχυση αέργου ισχύος από τη ΜΔΠ αυξάνει περαιτέρω την τάση, ενώ αντίθετα η απορόφιση αέργου ισχύος βοηθάει στη μείωση της τάσης που αυξήθηκε από την έγχυση ενεργού ισχύος της μονάδας [11].

Οι επαγωγικές γεννήτριες παράγουν ενεργό ισχύ και απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο. Συνήθως, χρησιμοποιούνται πυκνωτές για να αντισταθμίσουν την άεργο ισχύ που καταναλώνουν οι επαγωγικές γεννήτριες. Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ή να καταναλώνουν άεργο ισχύ αλλά όταν χρησιμοποιούνται σαν μονάδες ΔΠ συνήθως λειτουργούν υπό σταθερό συντελεστή ισχύος [11]. Τέλος, οι μονάδες που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν τόσο να παράγουν ή να καταναλώνουν άεργο ισχύ. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι δυνατή πολλές φορές η συμμετοχή της ΜΔΠ στη ρύθμιση της τάσης της μέσω ελέγχου αέργου ισχύος.

Παρόλο που το πρότυπο IEEE Std 1547-2003 απαγορεύει την ενεργό συμμετοχή της μονάδας στη ρύθμιση της τάσης, είναι εφικτό να συμμετάσχει η μονάδα στη ρύθμιση τάσης αν υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στον διαχειριστή του δικτύου και στον ιδιοκτήτη της μονάδας ΔΠ [11]. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τεχνικές για να μετριαστεί η ανύψωση τάσης και να διατηρείται η τάση εντός ορίων [10]:

- Μείωση της τάσης του υποσταθμού.
- Επίτρεψη των μονάδων ΔΠ να ελέγχουν την άεργο ισχύ τους για να μειώσουν τον όρο $RP + XQ$.
- Χρήση Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ - On Load Tap Changer - OLTC).
- Μείωση της ωμικής αντίστασης των γραμμών μεταφοράς.
- Μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ.
- Συνδυασμός των παραπάνω.

2.5.2 Υπερφόρτωση και απώλειες ισχύος

Η υπερφόρτωση και οι απώλειες ισχύος στο δίκτυο έχουν σχέση με την ενεργό τιμή του ρεύματος (root mean square - rms) που ρέει στη γραμμή διανομής. Η υπερφόρτωση σχετίζεται με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος ενώ οι απώλειες εξαρτώνται από διάφορες

παραμέτρους, με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος να συμβάλλει στις υψηλότερες απώλειες [4]. Για χαμηλή διείσδυση ΔΠ τόσο οι απώλειες όσο και το ρίσκο υπερφόρτωσης είναι χαμηλό ενώ για υψηλή διείσδυση αυξάνεται. Η ΔΠ συνδέεται πιο κοντά στην κατανάλωση σε σχέση με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, η ισχύς μεταφέρεται σε μικρότερη απόσταση, το οποίο μειώνει τις απώλειες μεταφορές [2]. Επίσης, μειώνεται η ροή ισχύος από το σύστημα μεταφοράς με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος υπερφόρτωσης στα υψηλά επίπεδα τάσης. Έτσι, στη γενική περίπτωση, η ΔΠ έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά την υπερφόρτωση και τις απώλειες.

Η μεγαλύτερη μείωση των απωλειών επιτυγχάνεται όταν η ΔΠ εγκαθιστάται στα ίδια σημεία με την κατανάλωση, όπως συμβαίνει με τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στις οροφές κτιρίων και την ΣΗΘ σε οικιακό επίπεδο [2]. Η περαιτέρω αύξηση της ΔΠ σε ένα δίκτυο, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των απωλειών ακόμα και σε σχέση με τις αρχικές απώλειες πριν την εγκατάσταση ΔΠ λόγω αντίστροφης ροής ισχύος. Ωστόσο, οι αυξημένες απώλειες θα είναι ένα μικρό ποσοστό της φιλικής προς το περιβάλλον ενέργειας που παράχθηκε. Παρόλο που η ΔΠ επηρεάζει τις απώλειες, δεν θα έπρεπε αυτό να χρησιμοποιηθεί σαν επιχείρημα υπέρ ή κατά της ΔΠ [4]. Η σημασία της ΔΠ έγκειται στην χρήση των ΑΠΕ και στην αύξηση αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όποια επίπτωση υπάρχει στις απώλειες θα είναι απλά ένα μικρό ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Οι απώλειες δεν θα αλλάξουν την ενεργειακή ισοροπία ούτε θα επηρεάσουν τις αποφάσεις για τις πολιτικές ενσωμάτωσης των ΔΠ.

Αντίθετα με τις απώλειες ισχύος, η υπερφόρτωση του δικτύου έχει άμεση σχέση με την ικανότητα φιλοξενίας ΔΠ και θέτει ένα άνω όριο ενσωμάτωσης. Από τη στιγμή που το ρεύμα θα ξεπεράσει το ανώτατο όριο θερμικής αντοχής κάποιου στοιχείου του δικτύου, ο εξοπλισμός προστασίας θα δράσει και θα το βγάλει εκτός, αλλιώς το στοιχείο κινδυνεύει να καταστραφεί. Και στις δύο περιπτώσεις θα υπάρξει διακοπή της παροχής ηλεκτρισμού προς τον καταναλωτή [4].

2.5.3 Διαταραχές ποιότητας ισχύος

Ως ποιότητα ισχύος (Power Quality – PQ) ορίζεται το σύνολο των φυσικών χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής παροχής κάτω από κανονικές συνθήκες τροφοδότησης, που δεν διαταράσσουν ή διακόπτουν τις διαδικασίες παραγωγής/λειτουργίας του καταναλωτή ενέργειας [12]. Εφόσον η ισχύς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την τάση και το ρεύμα, πρόβλημα στην ποιότητα ισχύος εμφανίζεται όταν διαταραχθεί η κυματομορφή της τάσης, η κυματομορφή του ρεύματος, ή η συχνότητα της τάσης. Οι διαταραχές στην ποιότητα ισχύος λόγω ενσωμάτωσης ΔΠ μπορεί να είναι:

- **Ανισοροπία μεταξύ των τριών φάσεων της τάσης**

Η σύνδεση μεγάλων μονοφασικών γεννητριών ΔΠ ή η κατανομή πολλών μονοφασικών γεννητριών θα οδηγήσει σε ανισοροπία των φάσεων της τάσης. Μονοφασικές γεννήτριες μπορούν να συνδεθούν μόνο στα δίκτυα χαμηλής τάσης κυρίως σε οικιακούς ή σε μικρούς εμπορικούς καταναλωτές [4].

- **Γρήγορη διακύμανση τάσης (fast voltage fluctuation)**

Γρήγορες διακυμάνσεις της τάσης συχνότητας 1-10 Hz (voltage flicker) μπορεί να δημιουργηθούν από την γρήγορη διακύμανση της παραγόμενης ισχύος από μια μονάδα ΔΠ. Ο όρος flicker (τρεμοπαίξιμο) έχει ληφθεί από την ορατή επίδραση της γρήγορης διακύμανσης τάσης στους φωτεινούς λαμπτήρες [4]. Επίσης, διακύμανση στην τάση μπορεί να δημιουργηθεί κατά την εκίνηση γεννητριών.

- **Έγχυση χαμηλής συχνότητας αρμονικών**

Η ΔΠ δεν παράγει τέλεια ημιτονική κυματομορφή ρευμάτων. Οι αρμονικές συνιστώσες που εγχέονται στο δίκτυο μπορεί να δημιουργήσουν διαταραχές στην κυματομορφή της τάσης. Ωστόσο, η έγχυση αρμονικών από ΔΠ είναι γενικά μικρότερη από την αντίστοιχη του εξοπλισμού των καταναλωτών και του δικτύου, άρα αυτού του τύπου οι διαταραχές είναι σχετικά σπάνιες. Συνεπώς, η ύπαρξη ΔΠ δεν θα επηρεάσει τόσο τις μέχρι τώρα κυρίαρχες αρμονικές των δικτύων διανομής. Όμως, η παρουσία ΔΠ θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των άρτιων αρμονικών συνιστωσών, των υψηλότερης τάξης αρμονικών και των δια-αρμονικών. Συνήθως, οι συχνότητες αυτών των αρμονικών χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μέσω γραμμών ισχύος (Power Line Communication – PLC), οπότε η ύπαρξη ΔΠ μπορεί να δημιουργήσει παρεμβολές σε αυτές τις επικοινωνίες [4].

- **Έγχυση υψηλής συχνότητας αρμονικών**

Οι μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters) αποτελούν πηγή υψίσυχων αρμονικών. Η διακοπτική συχνότητα των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος και τα πολλαπλάσιά της (1 kHz και πάνω) διακρίνονται μέσα στο φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος. Ένα πρόβλημα που έχει αναφερθεί είναι ότι αυτή η διακοπτική συχνότητα μπορεί να βρεθεί κοντά στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος προκαλώντας μεγάλους κυματισμούς της τάσης σε υψηλές συχνότητες. Υψηλή διείσδυση ΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να αυξήσει τις αρμονικές υψηλής τάξης. Το θετικό είναι πως οι διαταραχές υψηλής συχνότητας δεν διαδίδονται μακριά καθώς υπάρχει μεγάλη απόσβεση στις υψηλές συχνότητες. Επίσης, μπορούν εύκολα να φιλτραριστούν. Παρόλα αυτά, η διάδοση και οι επιπτώσεις των υψηλής συχνότητας διαταραχών αποτελούν αχαρτογράφητα νερά [4].

- **Βύθιση τάσης (voltage sag ή voltage dip)**

Η ΔΠ είναι πιθανόν να επηρεάσει το φαινόμενο της βύθισης τάσης στις περιπτώσεις όπου συνδέονται απευθείας στο δίκτυο περιστρεφόμενες μηχανές κατά την εκκίνησή τους [4].

2.5.4 Επίδραση στην προστασία του συστήματος

Η επίδραση της διανεμημένης παραγωγής στην προστασία του συστήματος εξαρτάται από τη συμβολή των μονάδων στο ρεύμα σφάλματος και άρα από το μέγεθός τους και τον τρόπο σύνδεσής τους στο δίκτυο. Οι σύγχρονες γεννήτριες συνεισφέρουν καθόλη τη διάρκεια του σφάλματος στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, οι επαγωγικές γεννήτριες συνεισφέρουν για μια ή

δύο περιόδους στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος και περισσότερο στα ασύμμετρα, ενώ οι μονάδες που συνδέονται με ηλεκτρονικά ισχύος συνεισφέρουν ελάχιστα ή καθόλου [4]. Περιπτώσεις αποτυχίας και ανεπιθύμητης λειτουργίας του συστήματος προστασίας λόγω ΔΠ είναι:

- Η συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης των γεννητριών μπορεί να οδηγήσει σε συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης που ξεπερνάει το όριο του εξοπλισμού [4].
- Η ύπαρξη γεννήτριας κατά μήκος της γραμμής διανομής θα μειώσει το ρεύμα σφάλματος στην αρχή της γραμμής για κάποιο σφάλμα που συμβαίνει μετά τη γεννήτρια. Όταν το ρεύμα βραχυκύκλωσης στην αρχή της γραμμής πέσει κάτω από την τιμή υπερέντασης που ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος τότε μπορεί να μην λειτουργήσει και να αποτύχει η προστασία [4].
- Η συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης κάποιων γεννητριών δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να εντοπιστεί το σφάλμα και να ενεργήσει η προστασία. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην περίπτωση μικρών γεννητριών και μονάδων που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Μη εντοπισμός σφάλματος συμβαίνει και στην περίπτωση γεννητριών που συνδέονται μέσω μετασχηματιστή τριγώνου-αστέρα (Δ - Y) όταν συμβαίνει σφάλμα με την γη [4].
- Η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης μπορεί να προκαλέσει αποσύνδεση γραμμών διανομής χωρίς σφάλμα, στις οποίες συνδέονται ΜΔΠ, λόγω της γρήγορης αντίδρασης των εναέριων γραμμών διανομής μέσης τάσης σε σφάλματα του συστήματος διανομής [2].

Μια από τις σημαντικότερες επιπτώσεις της ΔΠ στο σύστημα προστασίας παρατηρείται όταν το δίκτυο επέρχεται σε κατάσταση μη σκόπινης νησιδοποίησης (islanding) [4], [8]. Ο όρος νησιδοποίηση αναφέρεται στην κατάσταση όπου μονάδες ΔΠ συνεχίζουν και τροφοδοτούν ηλεκτρικά φορτία τα οποία έχουν αποκοπεί από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η μη σκόπιμη νησιδοποίηση ενέχει κινδύνους γιατί:

- Δεν μπορεί να ελεγχθεί η τάση και η συχνότητα του αποκομένου δικτύου, δηλαδή της νησίδας. Οι διακυμάνσεις συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό και τις γεννήτριες ΔΠ.
- Η νησιδοποίηση εμποδίζει την ομαλή αποκατάσταση του δικτύου.
- Η νησιδοποίηση μπορεί να προκαλέσει κίνδυνο για τους εργαζόμενους.
- Η προστασία του δικτύου διανομής δεν έχει σχεδιαστεί για περιπτώσεις νησιδοποίησης.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά θα αναλυθεί η λειτουργία του ΦΒ στοιχείου, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του ΦΒ πλαισίου. Στην συνέχεια θα γίνει η μετάβαση από το ΦΒ πλαίσιο στις ΦΒ συστοιχίες και στα ΦΒ πεδία. Τέλος θα αναλυθεί η λειτουργία του αντιστροφέα.

3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μέρος του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται από διατάξεις όπως είναι η δίοδος p-n (επαφή ημιαγωγών) και η δίοδος Schottky (επαφή μετάλλου-ημιαγωγού), οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν προσπίπτουν πάνω τους φωτόνια [8].

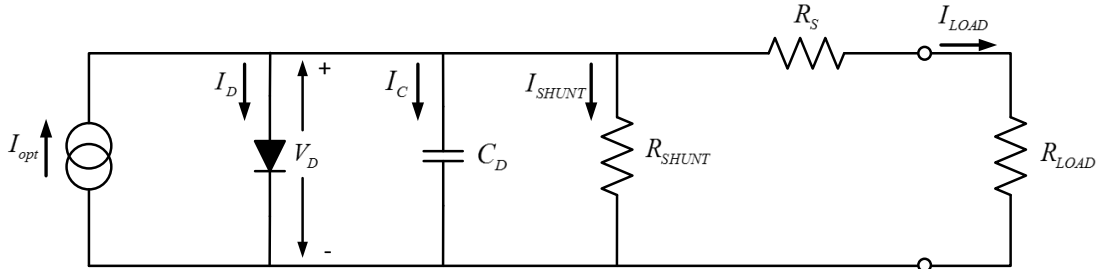
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (Si) που περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους τη δίοδο p-n για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία από τη μεριά του ημιαγωγού τύπου n ώστε να διασφαλίζεται υψηλότερη απόδοση στη μετατροπή ενέργειας. Για τη δημιουργία του ημιαγωγού τύπου n για το πυρίτιο (Si) χρησιμοποιούνται ως άτομα προσμίξεων δοτών τα πεντασθενή χημικά στοιχεία φώσφορος (P), αρσενικό (As) και αντιμόνιο (Sb). Αντίστοιχα, για τη δημιουργία του ημιαγωγού τύπου p χρησιμοποιούνται ως άτομα προσμίξεων αποδεκτών τα τρισθενή χημικά στοιχεία βόριο (B), γάλλιο (Ga), ίνδιο (In) και αλουμίνιο (Al). Το βασικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου στοιχείου για την πρόσμειξη είναι το άτομο της πρόσμειξης να έχει κατά το δυνατόν την ίδια ατομική ακτίνα με αυτή του ατόμου του κρυσταλλικού πλέγματος του πυριτίου (Si) [8].

Κατά τη φωτοβολταϊκή μετατροπή με χρήση δίοδου p-n, προσπίπτοντα φωτόνια απορροφώνται μέσα ή γύρω από την περιοχή p-n και δημιουργούν ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων, τα οποία διαχωρίζονται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n και οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Οι ηλεκτρικοί φορείς που δημιουργούνται οδηγούνται προς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια μέσω των ωμικών επαφών και στους ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος εμφανίζεται η τάση από όπου τροφοδοτείται το ηλεκτρικό φορτίο [8].

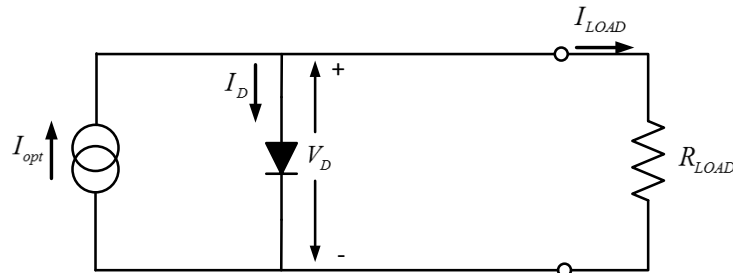
3.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας μη ιδανικής φωτιζόμενης δίοδου p-n που χρησιμοποιείται ως φωτοβολταϊκό στοιχείο φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Περιλαμβάνει την πηγή που παράγει το φωτόρευμα I_{opt} παράλληλα με μια ιδανική δίοδο. Μέρος του φωτορεύματος I_D ρέει μέσω της δίοδου ώστε να διατηρείται το δυναμικό V_D που αναλογεί στο σημείο λειτουργίας ενώ το υπόλοιπο ρεύμα ρέει προς την αντίσταση του φορτίου. Η μη ιδανική συνιστώσα της δίοδου

αναπαριστάται από το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα R-C το οποίο εμπεριέχει τον πυκνωτή που προσδιορίζει την χωρητικότητα της διόδου C_D και την παράλληλη αντίσταση διαρροής R_{SHUNT} . Επίσης, το υπόστρωμα και οι ωμικές επαφές αναπαριστώνται από την αντίσταση σειράς R_S . Για την αναπαράσταση του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου αμελείται ο χωρητικός κλάδος και θεωρείται πως $R_S \rightarrow 0$ και $R_{SHUNT} \rightarrow \infty$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 [8].

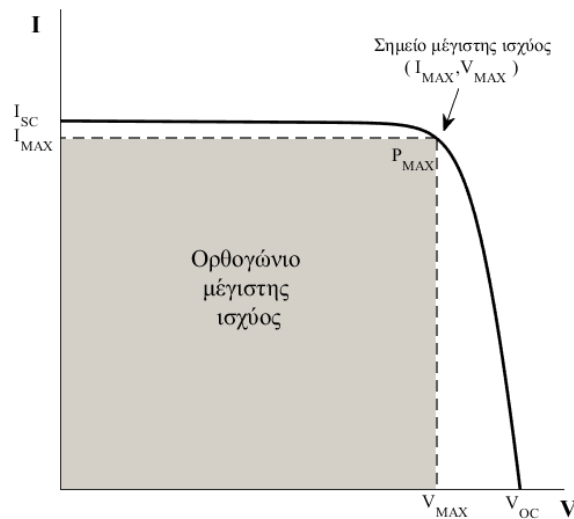


Σχήμα 3.1 : Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου



Σχήμα 3.2 : Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσεως (I-V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 : Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (I-V) φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, για μηδενική τάση αναλογεί η μέγιστη δυνατή τιμή ρεύματος, το οποίο ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{SC} . Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αντιστοιχεί στην τιμή του ρεύματος αν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του φορτίου ($R_{LOAD} \rightarrow 0$). Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού ΦΒ στοιχείου, αν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του φορτίου, η τάση στα άκρα της διόδου είναι μηδενική και θα ισχύει πως $I_D=0$. Συνεπώς, στη μόνιμη κατάσταση $I_{SC}=I_{opt}$ και εφόσον το ΦΒ

στοιχείο θεωρηθεί ιδανικό, η μετρούμενη τιμή του ρεύματος εξόδου I_{SC} παρέχει απευθείας και το φωτόρευμα I_{opt} για τις υφιστάμενες συνθήκες. Στην περίπτωση του μη ιδανικού ΦΒ στοιχείου, αν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες της αντίστασης φορτίου προκύπτει από το ισοδύναμο κύκλωμα πως $V_D = I_{SC} \cdot R_S$ με αποτέλεσμα ο κλάδος που περιλαμβάνει την ιδανική διόδο να διαρρέεται από ρεύμα I_D και το λαμβανόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης θα είναι λίγο μικρότερο από το φωτόρευμα καθώς ισχύει πως $I_{SC} = I_{opt} - I_D - I_{SHUNT}$ [8].

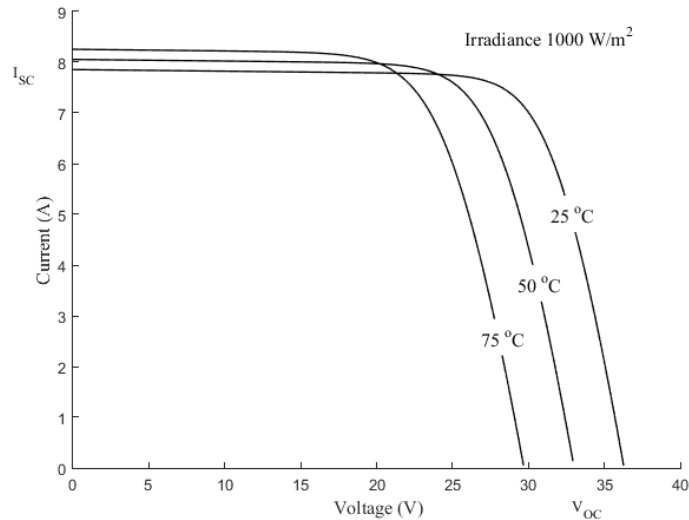
Όταν οι ακροδέκτες εξόδου του ΦΒ στοιχείου ανοικτοκυκλωθούν ($R_{LOAD} \rightarrow \infty$) τότε η τάση εξόδου μεγιστοποιείται και αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} . Αν θεωρηθεί ιδανικό το ΦΒ στοιχείο, τότε η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} ισούται με την τιμή της τάσης V_D στα άκρα της διόδου.

Όταν η αντίσταση φορτίου R_{LOAD} λάβει τιμές που μεταβάλλονται από 0 έως $+\infty$, τότε οι τιμές λειτουργίας για την τιμή του ρεύματος θα κυμαίνονται μεταξύ I_{SC} και 0, ενώ οι τιμές για την τάση λειτουργίας θα κυμαίνονται μεταξύ V_{OC} και 0. Από όλα τα δυνατά ζεύγη των τιμών ρεύματος-τάσης της καμπύλης του Σχήματος 3.3 θα υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας (I_{MAX}, V_{MAX}) για το οποίο η προσφερόμενη ισχύς του ΦΒ στοιχείου μεγιστοποιείται και λαμβάνει την τιμή P_{MAX} . Η τιμή της ισχύος δίνεται από το ισοδύναμο εμβαδόν του σκιασμένου ορθογωνίου μέγιστης ισχύος του Σχήματος 3.3. Το σημείο λειτουργίας (I_{MAX}, V_{MAX}) παρέχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να αποδοθεί από το φωτοβολταϊκό στοιχείο προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου R_{LOAD} για τις δεδομένες εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας. Προκειμένου να μπορεί να μεταφερθεί η ισχύς P_{MAX} στο εξωτερικό φορτίο R_{LOAD} θα πρέπει να υπάρχει προσαρμογή της αντίστασης φορτίου στην τιμή $R_{MAX} = V_{MAX}/I_{MAX}$. Στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις τον ρόλο του προσδιορισμού του σημείου μέγιστης ισχύος και την προσαρμογή της αντίστασης φορτίου αναλαμβάνουν τα συστήματα ανίχνευσης μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT), τα οποία τοποθετούνται στους αντιστροφείς ή στους ρυθμιστές φόρτισης των συσσωρευτών (αν υπάρχει αποθήκευση ενέργειας).

3.2.2 Θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία

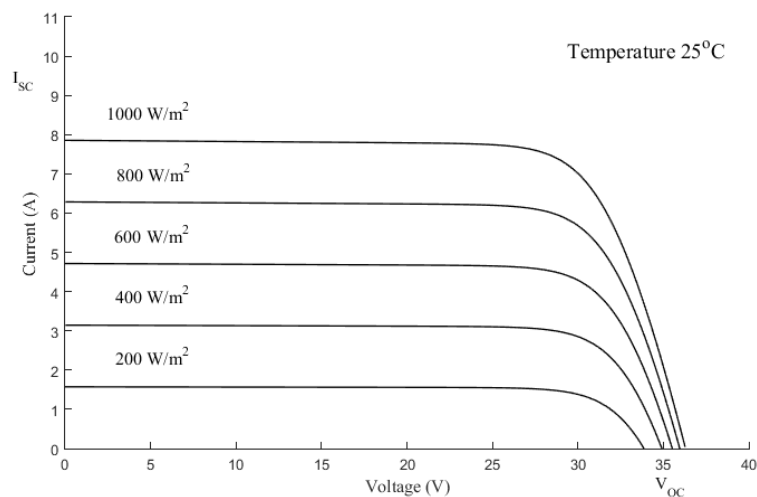
Τα μεγέθη V_{OC} και I_{SC} εκδηλώνουν έντονη εξάρτηση από την θερμοκρασία και από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και σαν αποτέλεσμα των παραπάνω εξαρτήσεων μεταβάλλεται η χαρακτηριστική I-V λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου ή του ΦΒ πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας.

Η θερμοκρασιακή επίδραση ενός ΦΒ πλαισίου ονομαστικής ισχύς 213 W με ρεύμα βραχυκύκλωσης 7.84 A και τάση ανοιχτοκύκλωσης 36.3 V σε συνθήκες θερμοκρασίας 25°C και ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m² φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται σημαντικά. Επίσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης τείνει να αυξηθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά με αργό ρυθμό αύξησης. Η μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος του ΦΒ πλαισίου. Αξίζει να σημειωθεί πως η θερμοκρασία ενός ΦΒ στοιχείου ή πλαισίου δεν ταυτίζεται με την θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς το υλικό των φωτοβολταϊκών θερμαίνεται από την απορρόφηση των προσπίπτοντων φωτονίων που έχουν ενέργεια είτε μικρότερη του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού (υπερύθρο φάσμα) είτε πολύ μεγαλύτερη (υπεριώδες φάσμα) [8].



Σχήμα 3.4 : Θερμοκρασιακή επίδραση στη χαρακτηριστική I-V

Η επίδραση της μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική I-V του ίδιου ΦΒ πλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Παρατηρείται ότι για δεδομένη και σταθερή θερμοκρασία, το ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται περίπου γραμμικά με τη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης δεν μειώνεται ιδιαίτερα. Σε αντίθεση με τις χαρακτηριστικές για τη μεταβολή της θερμοκρασίας, παρατηρείται ότι τα σημεία λειτουργίας για τη μέγιστη απόδοση ηλεκτρικής ισχύς στις διακυμάνσεις της ακτινοβολίας αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στην ίδια τιμή τάσης V_{MAX} .



Σχήμα 3.5 : Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική I-V

3.2.3 Υλικό κατασκευής

Τα συνήθη εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από διόδους επαφής p-n και κατατάσσονται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους σε: μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου, πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου, στοιχεία λεπτών υμενίων και στοιχεία άμορφου πυριτίου [8].

- **ΦΒ στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου**

Τα στοιχεία αυτά έχουν κυκλικό σχήμα διαμέτρου έως 15 εκατοστά και πολλές φορές κόβονται περαιτέρω έτσι ώστε να χωράνε περισσότερα στοιχεία σε δεδομένο εμβαδόν πλαισίου. Ο αρχικός μονοκρύσταλλος κατασκευάζεται με την μέθοδο Czochralski και στην συνέχεια κόβεται σε δίσκους πάχους 300 μm από τους οποίους προκύπτει το τελικό μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η ενεργειακή τους απόδοση κυμαίνεται από 11% έως 19%.

- **ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου**

Κατασκευάζονται από κρύσταλλους που έχουν κοπεί σε λεπτά τμήματα από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλοποιημένου πυριτίου. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών ΦΒ στοιχείων για αυτό και η τιμή τους είναι χαμηλότερη. Η ενεργειακή τους απόδοση κυμαίνεται από 11% έως 16% και είναι σχετικά χαμηλότερη από αυτή των πλαισίων από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

- **ΦΒ στοιχεία λεπτού υμενίου**

Η διαδικασία κατασκευής στοιχείων λεπτού υμενίου περιλαμβάνει την εναπόθεση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγώγιμων υμενίων πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα. Τα ημιαγώγια υμένια (τύπου p και τύπου n) τοποθετούνται στην όψη που θα δεχτεί την ηλιακή ακτινοβολία. Αν τα δύο υμένια είναι από διαφορετικά ημιαγώγια υλικά τότε η επαφή αποκαλείται ετεροεπαφή (heterojunction) ενώ σε αντίθετη περίπτωση ομοεπαφή (homojunction). Αντίθετα με την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων από πυρίτιο, ενδεχομένως στην κατασκευή στοιχείων από λεπτά υμένια να χρησιμοποιούνται τοξικά υλικά, όπως Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) ή Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe). Για αυτόν τον λόγο μπορεί να υπάρξουν επιβλαβείς επιπτώσεις τόσο κατά την εγκατάστασή τους σε κατοικημένες περιοχές όσο και κατά τη διαχείρισή τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.

- **ΦΒ στοιχεία άμορφου πυριτίου**

Το χαρακτηριστικό των στοιχείων άμορφου πυριτίου είναι η διατήρηση της απόδοσής τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Παρά το προαναφερθέν πλεονέκτημά τους έναντι των στοιχείων που κατασκευάζονται με τις άλλες μεθόδους, η απόδοσή τους είναι πολύ χαμηλότερη (γύρω στο 6%) και για αυτόν τον λόγο επιλέγονται σπάνια για μια συμβατική εγκατάσταση, εκτός αν οι θερμοκρασιακές συνθήκες το απαιτούν.

3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία παρέχει στην έξοδό του τάση περίπου ίση με 0.5 V. Η μέγιστη ένταση του ρεύματος εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και κυμαίνεται από 4 έως 7 A. Άρα, η ισχύς του ΦΒ στοιχείου ανέρχεται περίπου στα 3 W. Για τον σχηματισμό του ΦΒ πλαισίου (PV module), συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους πανομοιότυπα ΦΒ στοιχεία [8].

Το ΦΒ πλαίσιο συνιστά μια ενιαία στοιχειοσειρά, δηλαδή περιλαμβάνει ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά με σκοπό την αύξηση της παρεχόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα, η άνω

όψη (υλικό τύπου n) ενός στοιχείου συνδέεται με την κάτω όψη (υλικό τύπου p) του επόμενου στοιχείου που ακολουθεί.

Οι συγκολλήσεις των ηλεκτρικών συνδέσεων αποτελούν το πιο ευαίσθητο σημείο του ΦΒ πλαισίου για αυτόν τον λόγο πρέπει να προφυλάσσονται από διεργασίες ηλεκτροχημικής προσβολής και διάβρωσης όπως επίσης και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που θα τα καταπονήσουν στη διάρκεια του χρόνου. Για να επιτευχθεί η προστασία, όλο το πλαίσιο εγκιβωτίζεται σε διαφανή ρητίνη (για να μην εμποδίζεται η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία) προκειμένου να αποκλειστεί η διείσδυση της υγρασίας και να καθιστάται μηχανικά σταθερό. Τα δύο άκρα της στοιχειοσειράς (τύπου p και τύπου n, θετικό και αρνητικό αντίστοιχα) αποτελούν τους εξωτερικούς ακροδέκτες του πλαισίου και εμπεριέχονται στο κιβώτιο των ηλεκτρικών συνδέσεων. Στο κιβώτιο περιέχονται οι εξωτερικές καλωδιώσεις που απαιτούνται για τη σύνδεση γειτονικών πλαισίων [8].

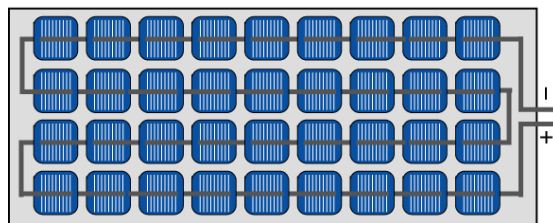
Η κατασκευή του φωτοβολταϊκού πλαισίου πρέπει να προβλέπει τη μηχανική αντοχή του σε καταπονήσεις, όπως είναι το χιόνι, ο πάγος, η χαλαζόπτωση, ο άνεμος και πρέπει να ανταποκρίνεται σε επιφανειακά φορτία 5.500 N/m^2 χωρίς να παραμορφώνεται. Επίσης, πρέπει να είναι στεγανό και να αποκλείει τη διείσδυση υγρασίας και ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται η απαγωγή της εκλυόμενης θερμότητας καθώς, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, η θερμοκρασία είναι πολύ σημαντικός παράγοντας της απόδοσης των ΦΒ στοιχείων [8].

Η βαθμονόμηση του πλαισίου γίνεται σε πρότυπες συνθήκες, Standard Test Conditions (STC), οι οποίες αντιστοιχούν σε ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 , φάσμα προσπίπτουσας δέσμης AM 1,5 και θερμοκρασία πλαισίου $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Επίσης, σε συνθήκες STC αναφέρονται η απόδοση του πλαισίου, η τάση και το ρεύμα που αναλογούν στο σημείο μέγιστης παροχής ισχύος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και η τυπική μορφή του φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Επιπρόσθετα, θεωρείται πως η στοιχειοσειρά αποτελείται από πανομοιότυπα ΦΒ στοιχεία και για δεδομένη τιμή ακτινοβολίας όλα τα στοιχεία θα παρέχουν την ίδια τιμή τάσης στην έξοδό τους, άρα η τάση ακροδεκτών του πλαισίου θα προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους τάσεων. Το ρεύμα είναι κοινό σε όλη τη στοιχειοσειρά καθώς τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης που παρατηρείται στα άκρα του πλαισίου N όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπου το κάθε στοιχείο έχει τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} , υπολογίζεται από την εξίσωση (3.1) [8].

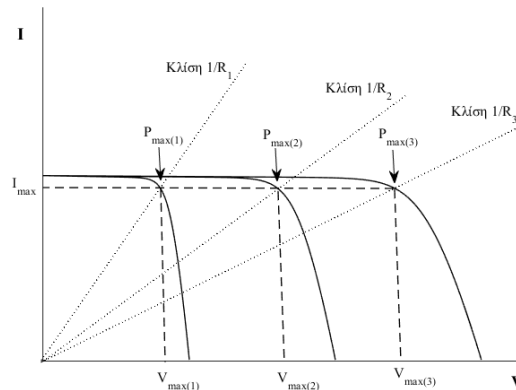
$$V_{OC, \text{πλαίσιο}} = N \cdot V_{OC} \quad (3.1)$$

Όταν η έξοδος του πλαισίου βραχυκυκλωθεί, η τάση ακροδεκτών της στοιχειοσειράς θα είναι μηδενική και το ρεύμα που θα την διαρρέει μπορεί να προσδιοριστεί από το ρεύμα βραχυκύκλωσης οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 3.6 : Σύνδεση σε σειρά ΦΒ στοιχείων για τη δημιουργία ΦΒ πλαισίου

Η συνολική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης μιας σειράς ΦΒ στοιχείων προκύπτει από τη χαρακτηριστική ενός στοιχείου με πρόσθεση των αναλογούντων τάσεων για την ίδια τιμή ρεύματος. Η σύνθεση της χαρακτηριστικής μιας σειράς τριών στοιχείων και τα σημεία μέγιστης παρεχόμενης ισχύος φαίνονται ποιοτικά στο Σχήμα 3.7 [8]. Παρατηρείται πως όσο αυξάνει ο αριθμός των εν σειρά στοιχείων μειώνεται η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο μέγιστης ισχύος, άρα αυξάνεται η τιμή της αντίστασης προσαρμογής φορτίου.



Σχήμα 3.7 : Χαρακτηριστική I-V τριών εν σειρά συνδεδεμένων ΦΒ στοιχείων

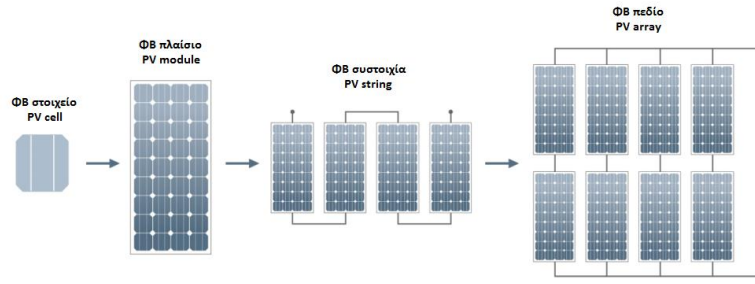
3.4 ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η ονομαστική τάση εξόδου των φωτοβολταϊκών πλαίσιων παίρνει τιμές από 12V και μπορεί να φτάσει και πάνω από 50V. Ουσιαστικά τα ΦΒ πλαίσια διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το πλήθος των στοιχείων που περιλαμβάνουν στη στοιχειοσειρά. Προκειμένου να αυξηθεί η τιμή της λαμβανόμενης τάσης, συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, δημιουργώντας μια συστοιχία πλαίσιων (string).

Τα σημερινά μικρά αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να λειτουργούν με ονομαστική τάση DC στα 48V, ενώ τα συστήματα που είναι τοποθετημένα σε στέγες κτιρίων λειτουργούν με ονομαστική τάση DC από 120V έως 400V. Τα φωτοβολταϊκά πάρκα μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος μπορούν να λειτουργούν με ονομαστική τάση DC από 600V έως 1000V. Αυτό σημαίνει ότι τα πλαίσια (DC τάση 12-50V) θα πρέπει να συνδεθούν σε σειρά ώστε να επιτύχουν την επιθυμητή τάση εξόδου [8].

Το ρεύμα που διαρρέει τη συστοιχία είναι κοινό για όλα τα πλαίσια και στην ουσία προδιαγράφεται από τα χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου. Ως αποτέλεσμα, αν ένα πλαίσιο έχει μειωμένη απόδοση, αυτό θα επηρεάσει την παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύ ολόκληρης της συστοιχίας. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο από τον εγκαταστάτη του συστήματος να επιλέγονται πανομοιότυπα ΦΒ πλαίσια ως προς το μέγιστο ρεύμα για την δημιουργία συστοιχιών, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή παροχή ηλεκτρικής ισχύος.

Μια ΦΒ συστοιχία μπορεί να συνδεθεί απευθείας στον διαχειριστή του ΦΒ συστήματος είτε μπορεί να συνδεθεί παράλληλα με άλλες συστοιχίες ώστε να αυξήσει το ρεύμα που παρέχεται στον διαχειριστή. Ο διαχειριστής του συστήματος μπορεί να είναι είτε ο αντιστροφέας είτε ο ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών. Μια ομάδα συστοιχιών που συνδέεται παράλληλα ορίζει ένα ΦΒ πεδίο (PV array) [8]. Η μετάβαση από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στο φωτοβολταϊκό πεδίο φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



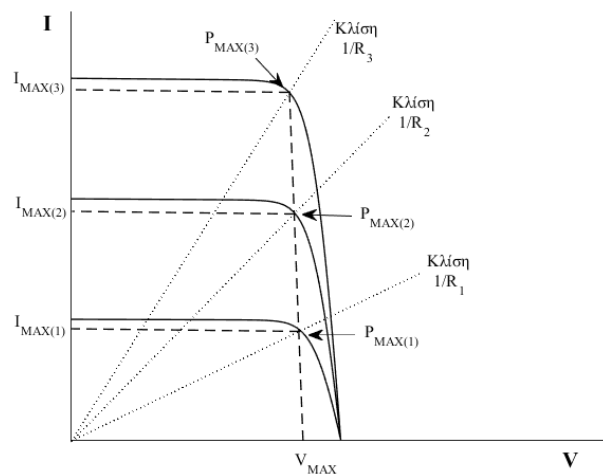
Σχήμα 3.8 : Μετάβαση από το ΦΒ στοιχείο στο ΦΒ πεδίο

Στο Σχήμα 3.9 φαίνονται οι παρεχόμενες χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης από τρεις όμοιες συστοιχίες συνδεδεμένες παράλληλα οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε μεταβλητό ωμικό φορτίο. Η συνολική χαρακτηριστική του συστήματος των παράλληλων συστοιχιών θα προκύψει από τις ανεξάρτητες καμπύλες I-V της κάθε συστοιχίας [8]. Για αυτό για την κάθε τιμή τάσης προστίθενται οι επιμέρους τιμές ρεύματος που παρέχονται από την κάθε συστοιχία.

Η συνολική τάση ανοιχτοκύκλωσης του ΦΒ πεδίου των τριών παράλληλων συστοιχιών προκύπτει ίση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης της μιας συστοιχίας του συστήματος. Όταν η έξοδος του συστήματος των συστοιχιών βραχυκυκλωθεί, τότε αναπτύσσονται μηδενικές τάσεις στις εξόδους της κάθε συστοιχίας οπότε και η συνολική τάση του συστήματος είναι μηδενική. Συγχρόνως το ρεύμα που παρατηρείται στην έξοδο της συστοιχίας κατά την βραχυκύκλωση είναι $N=3$ φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα βραχυκύκλωσης της κάθε συστοιχίας. Δηλαδή ισχύει [8] :

$$I_{SC,πεδίου} = N \cdot I_{SC,συστοιχίας} \quad (3.2)$$

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.9 σε όλες τις συστοιχίες ($N=1, N=2, N=3$) αντιστοιχεί ίδια τάση μέγιστης ισχύος ενώ η συνολική τιμή για το ρεύμα προκύπτει από τα επιμέρους αθροίσματα. Επίσης, η παρεχόμενη μέγιστη ισχύς είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή που θα προέκυπτε από τη μια συστοιχία. Τέλος, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παράλληλων συστοιχιών τόσο αυξάνεται η κλίση για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος άρα τόσο μειώνεται η αντίσταση προσαρμογής του φορτίου.



Σχήμα 3.9 : Χαρακτηριστική I-V τριών παράλληλα συνδεδεμένων ΦΒ συστοιχιών

3.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από ένα ΦΒ σύστημα, πέρα από την ηλιακή ακτινοβολία, επηρεάζεται από την θερμοκρασία, την ρύπανση της όψης που δέχεται την ακτινοβολία, την τοποθέτησή του και τις απώλειες ηλεκτρικής ισχύος [8].

- **Θερμοκρασιακός παράγοντας**

Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου αυξάνεται με την αύξηση της ακτινοβολίας. Όσον αφορά την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ κορυφής (W_p), η βαθμονόμηση του πλαισίου γίνεται σε συνθήκες STC, όπου η θερμοκρασία πλαισίου θεωρείται 25°C . Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του πλαισίου και με τις ηλιακές συνθήκες στην τοποθεσία της εγκατάστασης, η παρεχόμενη ισχύς μειώνεται καθώς η θερμοκρασία του πλαισίου αυξάνεται. Στην Ελλάδα, τα περισσότερα ΦΒ στοιχεία του εμπορίου παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση της ισχύος εξόδου κατά 12%. Δηλαδή ένα βαθμονομημένο πλαίσιο $100 W_p$ κατά STC θα αποδώσει λόγω της αναμενόμενης αύξησης της θερμοκρασίας 88 W. Η θερμοκρασιακή εξάρτηση των ΦΒ πλαισίων μπορεί να μειωθεί με τη χρήση συστημάτων ψύξης [8].

- **Ρύπανση σωματιδιακής προέλευσης**

Στην όψη όπου το ΦΒ πλαίσιο εκτίθεται στην ακτινοβολία επικάθονται σωματιδιακοί ρυπαντές ή σκόνη, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακτινοβολία που φτάνει στα ΦΒ στοιχεία σε ποσοστό που κυμαίνεται από 5% έως 15%. Η υγρασία είναι ένας παράγοντας που δυσχαιρένει την κατάσταση, καθώς οι ρυπαντές προσκολλώνται στην άνω όψη. Ανάλογα με το περιβάλλον όπου είναι εγκατεστημένο το ΦΒ σύστημα, η μείωση της απόδοσης ποικίλει, καθώς για παράδειγμα σε ένα αγροτικό περιβάλλον οι αγροτικές ασχολίες συμβάλλουν περαιτέρω στη σωματιδιακή επικάλυψη [8].

- **Απώλειες ηλεκτρικής ισχύος**

Οι απώλειες ηλεκτρικής ισχύος αποδίδονται στις ωμικές απώλειες των καλωδιώσεων και των συνδέσμων της εγκατάστασης. Άρα, για να μειωθούν οι απώλειες Joule επιλέγονται αυξημένες διατομές καλωδιώσεων του DC κυκλώματος. Οι διαφοροποιήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών των παράλληλων συστοιχιών θα επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος. Επειδή όλα τα πλαίσια δεν γίνεται να είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους, η ισχύς της κάθε συστοιχίας θα διαφέρει. Ως αποτέλεσμα, η λιγότερο παραγωγική συστοιχία θα καθορίσει τη μείωση της παρεχόμενης ισχύος των υπολοίπων καθώς συνδέονται παράλληλα και ελέγχονται από τον ίδιο αλγόριθμο MPPT. Η διαφοροποίηση της παρεχόμενης ισχύος μεταξύ των συστοιχιών μπορεί να οφείλεται και σε άλλους παράγοντες, όπως είναι η μερική σκίαση, η επικάλυψη σωματιδίων, ή η κλίση τοποθέτησης [8].

- **Γωνία τοποθέτησης και προσανατολισμός ΦΒ πλαισίων**

Η γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων επηρεάζει την παροχή ηλεκτρικής ισχύος. Η μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται όταν η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι κάθετη στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου. Σε περίπτωση σταθερής

κλίσης εγκατάστασης, η συνεχής κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτινών δεν είναι εφικτή καθώς η ηλιακή γωνία μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της φωτεινής ισχύος, άρα και της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Για σταθερή γωνία εγκατάστασης σε όλη την διάρκεια του χρόνου, ενδεικτικά επιλέγεται σαν γωνία το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας όπου για την Ελλάδα αντιστοιχεί περίπου σε 37° . Η χρήση κινητών συστημάτων ιχνηλάτισης της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας («trackers») βελτιώνουν την απόδοση του συστήματος καθώς δέχονται τον χειμώνα μέχρι και 10% παραπάνω ηλιακή ακτινοβολία και το καλοκαίρι μέχρι 40%. Τα συστήματα αυτά αυξάνουν τον κόστος, την πολυπλοκότητα και την αξιοπιστία του συστήματος και ενδεχομένως να μην συμφέρει η χρήση τους για μικρούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.

Για σταθερή γωνία εγκατάστασης, ο προσανατολισμός του πλαισίου παίζει σημαντικό ρόλο στη φωτεινή ισχύ που θα προσπίπτει στην επιφάνειά του. Για το Βόρειο ημισφαίριο, ο βέλτιστος προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη είναι ο νότιος ενώ για το Νότιο ημισφαίριο ο βέλτιστος είναι ο βόρειος. Δηλαδή, ο ηλιακός συλλέκτης πρέπει να βλέπει προς τον ισημερινό [8].

- **Απώλειες μετατροπής από DC σε AC**

Η μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από DC σε AC, έτσι ώστε να εξυπηρετηθούν τα AC φορτία ή να προσφερθεί στο AC δίκτυο, οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος κατά 6% έως 10%. Οι απώλειες αυτές συνήθως εκδηλώνονται ως θερμικές απώλειες στο σύστημα του αντιστροφέα και οφείλονται εν μέρει στη διακοπτική λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος. Η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας θα επιφέρει περαιτέρω αύξηση των ηλεκτρικών απωλειών [8].

3.6 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων μετατρέπουν τη DC τάση που παράγουν τα φωτοβολταϊκά σε AC τάση σταθερού πλάτους και σταθερής συχνότητας. Επιπρόσθετα, οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι υπεύθυνοι για τη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ισχύος μέσω των σχημάτων MPPT (Maximum Power Point Tracking) και σε ορισμένες περιπτώσεις ελέγχουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [8]. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αντιστροφέων είναι:

- Ονομαστική ισχύς P_{NOM}
- Ονομαστική τάση εισόδου V_{DC}
- Ονομαστική τάση εξόδου V_{rms}
- Συχνότητα εξόδου
- Αριθμός φάσεων (μονοφασικοί-τριφασικοί)

Στα ΦΒ συστήματα, πολλές φορές, μεταξύ του ΦΒ πεδίου και το αντιστροφέα, παρεμβάλλεται ένα άλλο κύκλωμα ηλεκτρονικών ισχύος μετατροπής DC-DC. Το κύκλωμα αυτό μετατρέπει τη DC τάση εξόδου των ΦΒ σε DC τάση κατάλληλης τιμής προκειμένου να οδηγηθεί στον αντιστροφέα και να διασφαλιστεί καλύτερη απόδοση μετατροπής. Επίσης, το παραπάνω κύκλωμα μπορεί να είναι υπεύθυνο για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Η τάση εισόδου του αντιστροφέα εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ του. Για ισχύ μερικών

εκατοντάδων W οι τάσεις εισόδου μπορεί να είναι 12V, 24V ή 48V. Για ισχύ μερικών kW, η τάση εισόδου μπορεί να αυξάνει στα 150V έως 400V. Τέλος, για μεγάλα ΦΒ συστήματα χρησιμοποιούνται κεντρικοί αντιστροφείς με τάση εισόδου 600V έως 1000V. Οι αντιστροφείς, ανάλογα με την παραγόμενη ισχύ που ελέγχουν και την θέση τους στη ΦΒ εγκατάσταση, μπορούν να χωριστούν σε:

- **Κεντρικός αντιστροφέας (central inverter)**

Όταν χρησιμοποιείται η διάταξη του κεντρικού αντιστροφέα, όλη η παραγόμενη ισχύς της εγκατάστασης αποδίδεται σε έναν κύριο αντιστροφέα. Η χρήση του κεντρικού αντιστροφέα επιλέγεται σε πολύ μεγάλα ΦΒ συστήματα εγκατεστημένης ισχύος πάνω από 100 kW [8].

- **Αντιστροφέας συστοιχιών (string inverter)**

Ένας αντιστροφέας μπορεί να ελέγχει μια ή παραπάνω συστοιχίες. Σε περίπτωση που συλλέγει ηλεκτρική ισχύ από μερικές παράλληλες συστοιχίες ΦΒ πλαισίων, τότε ονομάζεται αντιστροφέας πολλαπλών συστοιχιών (multi-string inverter). Ο αντιστροφέας μπορεί να εφαρμόζει ξεχωριστό αλγόριθμο MPPT σε κάθε μια από τις συστοιχίες ή κοινό έλεγχο MPPT.

- **Μικρο-αντιστροφέας πλαισίου (microinverter)**

Το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο ελέγχεται από έναν αντιστροφέα ανεξάρτητα. Αυτός ο τύπος αντιστροφέων χρησιμοποιείται για ΦΒ μικρής ισχύος. Το μειονέκτημα χαμηλότερης απόδοσης μετατροπής ισχύος που εμφανίζεται συνήθως στους μικρο-αντιστροφείς, αντισταθμίζεται από την καλύτερη ρύθμιση που επιτυγχάνουν όσον αφορά το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος [8]. Επίσης, ένα άλλο μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι για μια εγκατάσταση πιθανόν να απαιτείται η χρήση πολλών μικρο-αντιστροφέων που ενδεχομένως να αυξήσει την πολυπλοκότητα και να μειώσει την αξιοπιστία του συστήματος.

3.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά αντιστροφέων διασυνδεδεμένων ΦΒ συστημάτων

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων παρέχουν στην έξοδό τους τάση ίδιας συχνότητας και ίδιου πλάτους με την τάση του δικτύου. Ο αντιστροφέας πρέπει να εντοπίζει τις λειτουργικές αστάθειες της τάσης και της συχνότητας του δικτύου και να αποκόπτει τη σύνδεση του ώστε να προστατέψει το ΦΒ πεδίο και τον εξοπλισμό της εγκατάστασης. Επιπρόσθετα, περιέχει συστήματα προστασίας από σφάλματα, υπερτάσεις και λοιπές διαταραχές του δικτύου, όπως είναι η διακοπή παροχής. Απαιτείται συνήθως γαλβανική απομόνωση μεταξύ δικτύου και αντιστροφέα έτσι ώστε να αποφευχθεί η έγχυση DC συνιστώσας. Οι αντιστροφείς πρέπει να λειτουργούν σε ξηρό και δροσερό περιβάλλον. Η υψηλή θερμοκρασία στον χώρο εγκατάστασής τους σε συνδυασμό με υγρασία αποτελούν παράγοντες μείωσης της διάρκειας ζωής τους και αστοχίας κατά τη λειτουργία τους. Ο αντιστροφέας πρέπει να διασφαλίζει τον συγχρονισμό της συχνότητας της παραγόμενης τάσης με τη συχνότητα του δικτύου για να μην υπάρχουν φαινόμενα υστέρησης. Ο αντιστροφέας πρέπει να εντοπίζει και να αποτρέπει φαινόμενα νησιδοποίησης [8].

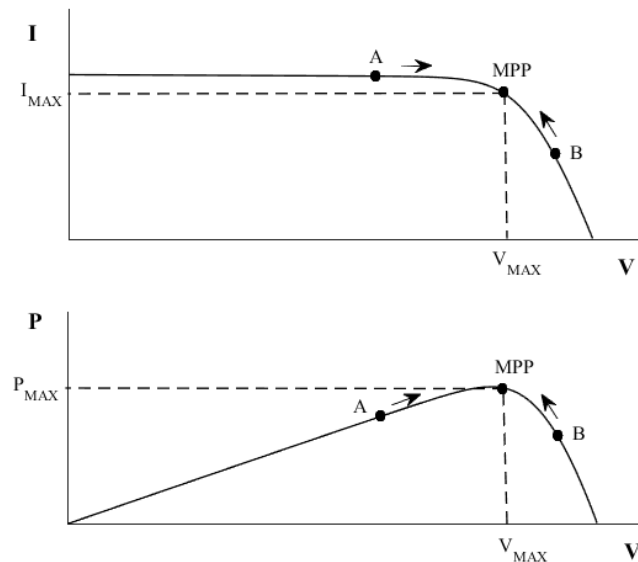
3.6.2 Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking)

Ο αντιστροφέας είναι υπεύθυνος για την εύρεση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος της ΦΒ εγκατάστασης και υλοποιεί αλγορίθμους MPPT έτσι ώστε να βρει την τιμή της τάσης που αντιστοιχεί σε αυτό το σημείο. Κάποιοι από τους ευρέως διαδεδομένους αλγόριθμους MPPT είναι:

- **Διαταραχή και παρατήρηση (Perturb and Observe - P&O)**

Ο αλγόριθμος P&O αρχικά ξεκινάει από ένα σημείο αφετηρίας A (Σχήμα 3.10) μέσω της μέτρησης του ρεύματος και της τάσης του ΦΒ [4]. Στην συνέχεια αυξάνει την τάση λειτουργίας του ΦΒ και το ΦΒ φτάνει σε ένα νέο σημείο λειτουργίας. Αν στο νέο σημείο λειτουργίας η παρεχόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το προηγούμενο σημείο τότε βρίσκεται αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point -MPP) οπότε πρέπει να αυξηθεί η τάση λειτουργίας. Αν το αρχικό σημείο λειτουργίας είναι το σημείο B (Σχήμα 3.12), τότε αυξάνοντας την τάση θα μειωθεί και η παρεχόμενη ισχύς, άρα βρίσκεται δεξιά του MPP και θα πρέπει να μειώσει την τάση λειτουργίας για να προσεγγίσει το MPP.

Ένα μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι η αδυναμία τερματισμού όταν προσεγγίσει το σημείο μέγιστης ισχύος με αποτέλεσμα τη διαρκή ταλάντωση γύρω από αυτό. Το εύρος ταλάντωσης έχει να κάνει με το βήμα μεταβολής της τάσης σε συνδυασμό με τις μεταβολές στη θερμοκρασία και την ακτινοβολία.



Σχήμα 3.10 : Αλγόριθμος MPPT Perturb & Observe

- **Στοιχειώδης αγωγιμότητα (Incremental conductance)**

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στο γεγονός ότι στην χαρακτηριστική P-V η εφαπτομένη στο σημείο μέγιστης ισχύος (P_{MAX}, V_{MAX}) είναι παράλληλη στον άξονα V, άρα και η κλίση της είναι 0 (Σχήμα 3.11) [4]. Στα σημεία αριστερά του MPP, η καμπύλη είναι αύξουσα και δεξιά του MPP είναι φθίνουσα Άρα θα ισχύει:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{\max}} = 0 \quad (3.3)$$

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V < V_{\max}} > 0 \quad (3.4)$$

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V > V_{\max}} < 0 \quad (3.5)$$

Όμως:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3.6)$$

Και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.3), (3.4) και (3.5) στην εξίσωση (3.6)

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad V = V_{\max} \quad (3.7)$$

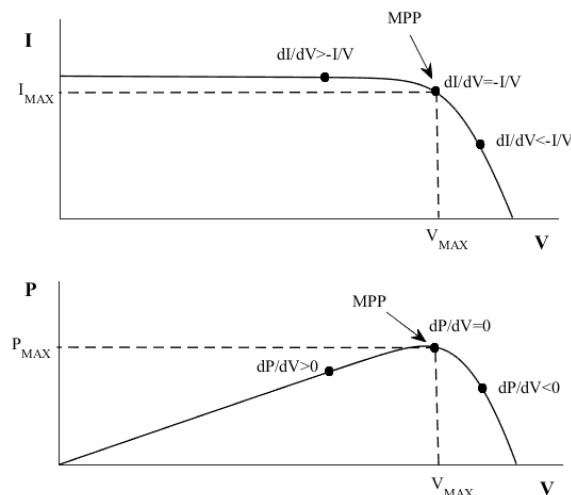
$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad V > V_{\max} \quad (3.8)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad V < V_{\max} \quad (3.9)$$

Επομένως, το σημείο μέγιστης ισχύος προσεγγίζεται συγκρίνοντας διαδοχικά τη στιγμιαία αγωγιμότητα $\frac{I}{V}$ με τη στοιχειώδη αγωγιμότητα $\frac{dI}{dV}$.

Όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου P&O, ο αλγόριθμος αυτός ξεκινάει μετρώντας την τρέχουσα τιμή του ρεύματος και της τάσης. Κατόπιν υπολογίζονται οι στοιχειώδεις μεταβολές dI και dV (χρησιμοποιώντας τις αμέσως προηγούμενες τιμές) προκειμένου να γίνουν οι έλεγχοι των εξισώσεων. Βάσει αυτών των συγκρίσεων θα ληφθεί η απόφαση για τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας.

Το πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου σε σχέση με τον αλγόριθμο P&O είναι ότι όταν προσεγγιστεί το σημείο MPP, τότε το ΦΒ σύστημα θα λειτουργεί σε αυτό το σημείο χωρίς να ταλαντώνεται.



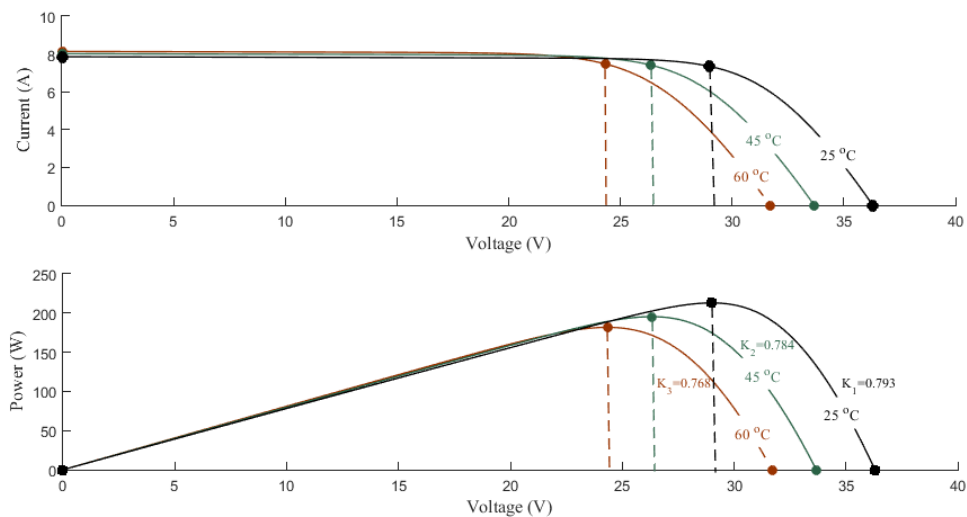
Σχήμα 3.11 : Αλγόριθμος MPPT Incremental Conductance

- **Μέθοδοι σταθερής τάσης**

Ο όρος σταθερή τάση στους αλγόριθμους MPPT μπορεί να αναφέρεται σε διαφορετικές τεχνικές εύρεσης του σημείου λειτουργίας για μέγιστη ισχύ. Μια από αυτές είναι όταν επιλέγεται μια σταθερή τιμή λειτουργίας κάτω από όλες τις συνθήκες. Αν η τάση εξόδου του ΦΒ συστήματος διατηρείται σταθερή, τότε δεν είναι μέθοδος MPPT με την αυστηρή έννοια του όρου, αλλά μπορεί να έχει πλεονεκτήματα σε περιπτώσεις όπου οι άλλοι αλγόριθμοι MPPT αποτυγχάνουν και χρησιμοποιείται πολλές φορές σαν εφεδρική. Μια τεχνική που εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία, στηρίζεται στην προσέγγιση ότι η τάση του MPP αντιστοιχεί στο 0.7 έως 0.8 της τάσης ανοιχτοκύκλωσης [4]. Η παραπάνω προσέγγιση ισχύει ακόμα και όταν μεταβάλλεται τόσο η θερμοκρασία των πλαισίων όσο και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η παραπάνω μέθοδος περιγράφεται από την σχέση:

$$V_{MAX} = K \cdot V_{OC} \quad (3.10)$$

Στο Σχήμα 3.12 φαίνεται η μεταβολή του παράγοντα K για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ενός ΦΒ πλαισίου. Από το σχήμα είναι φανερή η μικρή μεταβολή του λόγου της τάσης στο σημείο MPP με την τάση ανοιχτοκύκλωσης. Γενικά, η συγκεκριμένη τεχνική δεν εγγυάται ιχνηλάτηση του σημείου MPP με ακρίβεια, αλλά πρόκειται για μια αρκετά απλή λύση όσον αφορά την υλοποίηση.



Σχήμα 3.12 : Μεταβολή του όρου K για μεταβολές της θερμοκρασίας

3.6.3 Ρόλος αντιστροφέα στο Έξυπνο Δίκτυο

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις έχουν γνωρίσει πολύ μεγάλη άνοδο τις δύο τελευταίες δεκαετίες ακολουθώντας εκθετική αύξηση εγκατεστημένης ισχύος. Η ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και η συνεχής μείωση των τιμών των ΦΒ συστημάτων αναμένεται πως θα ενισχύσει την ανοδική πορεία τους τα επόμενα χρόνια. Η αυξημένη διείσδυση ΦΒ συστημάτων δημιουργεί προκλήσεις τόσο στη λειτουργία των δικτύων διανομής όσο και στην διαχείρισή τους. Επιπρόσθετα, η χρήση τεχνολογιών πληροφορικής (Information Technology-IT) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συντελεί στη μετάβαση στην επόμενη

γενιά δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστά ως Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids). Τα έξυπνα δίκτυα επιτρέπουν την αποδοτικότερη χρήση της ισχύος, των υποδομών μεταφοράς και διανομής και διευκολύνουν την επέκταση και τη διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για να μπορέσουν τα ΦΒ συστήματα να ανταπεξέλθουν στην παραπάνω μετάβαση και δεδομένου ότι τα ΦΒ συστήματα συνδέονται στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα θα πρέπει να καθοριστεί μια νέα σειρά δυνατοτήτων του αντιστροφέα [14].

Αυτές περιλαμβάνουν :

- Δυνατότητα επικοινωνίας με τοπικούς ελεγκτές στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο (Point of Common Couple-PCC) και παροχή πληροφοριών σε συστήματα τηλεμετρίας (Supervisory Control and Data Acquisition-SCADA) έτσι ώστε:
 - Να γίνεται έλεγχος ενεργού ισχύος (αποκοπή-curtailment)
 - Να γίνεται έλεγχος αέργου ισχύος ή συντελεστή ισχύος
- Δυνατότητα λήψης εντολών για:
 - Ρύθμιση τάσης
 - Έλεγχο ενεργού ισχύος
 - Έλεγχο αέργου ισχύος
- Δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος για φόρτιση DC συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας από την ισχύ του δικτύου
- Δυνατότητα λήψης και αποστολής σημάτων μέσω επικοινωνίας γραμμών ισχύος (Power Line Communication) για:
 - Επικοινωνία με κεντρικούς ελεγκτές
 - Εντοπισμό φαινομένων νησιδοποίησης (islanding detection)

3.6.4 Κύκλωμα αντιστροφέα

Οι ημιαγωγικοί διακόπτες που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος είναι ημιαγωγοί τύπου πυριτίου (Si) και διακρίνονται σε διόδους, τρανζίστορ και θυρίστορ. Η λειτουργία του αντιστροφέα βασίζεται σε ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος, οι οποίοι επιτρέπουν ή διακόπτουν τη ροή ρεύματος από έναν κλάδο όταν εφαρμόζεται ένα σήμα στην πύλη του ημιαγωγού. Για την υλοποίηση των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν IGBTs ισχύος (Insulated Gate Bipolar Transistor), GTOs (Gate Turn-Off θυρίστορ), MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) ή θυρίστορ (Silicon Control Rectifier-SCR) ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου. Επίσης, οι παραπάνω ημιαγωγικές διατάξεις συνδέονται αντιπαράλληλα με διόδους ελεύθερης διέλευσης, έτσι ώστε να επιτρέπεται αμφίδρομη ροή ρεύματος [12].

Ανάλογα με τα επίπεδα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, οι αντιστροφείς μπορούν να χωριστούν σε αντιστροφείς δύο επιπέδων και πολλαπλών επιπέδων τάσης. Οι συμβατικοί αντιστροφείς δύο επιπέδων τάσης, όταν χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υψηλής τάσης, παρουσιάζουν μια σειρά από προβλήματα, όπως υψηλή μεταβολή της τάσης dv/dt , υψηλή διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών στοιχείων, υψηλά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και αρμονική παραμόρφωση. Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων, οι οποίοι συνθέτουν κυματομορφές τάσης εξόδου με μικρότερο περιεχόμενο αρμονικών και επιτυγχάνουν υψηλότερες τάσεις εξόδου με ημιαγωγικά στοιχεία χαμηλής τάσης και μικρής διακοπτικής συχνότητας. Τα διακριτά επίπεδα τάσης στις κυματομορφές εξόδου προέρχονται από πυκνωτές [15].

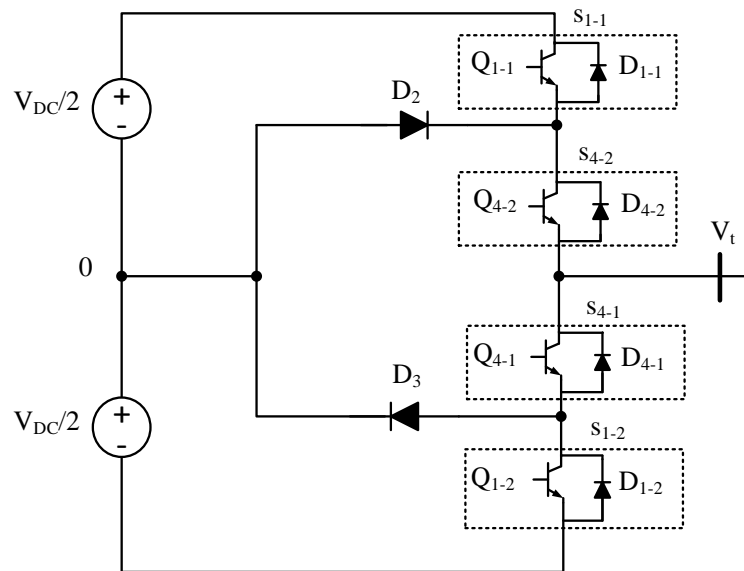
3.6.4.1 Μονοφασικός αντιστροφέας τριών επιπέδων

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το κύκλωμα ενός μονοφασικού αντιστροφέα τριών επιπέδων σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας με διόδους περιορισμού (Three-level Half Bridge Neutral Point Clamped Inverter) [13]. Το κύκλωμα του αντιστροφέα μπορεί να θεωρηθεί σαν συνδυασμός δύο αντιστροφέων συνδεσμολογίας ημιγέφυρας δύο επιπέδων και δύο ακόμα διόδων D_2 και D_3 . Η τάση εισόδου V_{DC} χωρίζεται σε δύο πανομοιότυπες πηγές τάσης. Η πρώτη ημιγέφυρα αποτελείται από τους διακόπτες Q_{1-1}/D_{1-1} και Q_{4-1}/D_{4-1} και η δεύτερη ημιγέφυρα από τους διακόπτες Q_{1-2}/D_{1-2} και Q_{4-2}/D_{4-2} . Η κατάσταση του κάθε διακόπτη είναι 1 αν ο διακόπτης είναι κλειστός και 0 αν ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Επίσης, οι διακόπτες Q_{1-1} και Q_{4-1} έχουν συμπληρωματική λειτουργία, δηλαδή πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

$$s_{1-1} + s_{4-1} \equiv 1 \quad (3.11)$$

Αντίστοιχα, οι διακόπτες Q_{1-2} και Q_{4-2} πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

$$s_{1-2} + s_{4-2} \equiv 1 \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.13 : Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα τριών επιπέδων συνδεσμολογίας ημιγέφυρας με διόδους περιορισμού

- Για παραγωγή θετικής τάσης εξόδου πρέπει να ισχύει :

$$s_{1-2} \equiv 0 \quad (3.12)$$

$$s_{4-2} \equiv 1$$

Στην περίπτωση όπου:

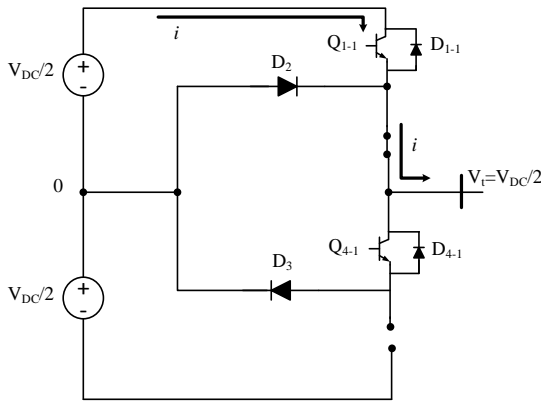
$$s_{1-1} \equiv 1 \quad (3.13)$$

$$s_{4-1} \equiv 0$$

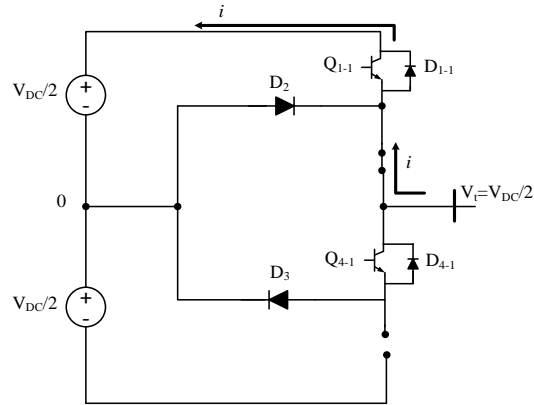
όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.14 και Σχήμα 3.15, ανεξαρτήτως της φοράς του ρεύματος θα ισχύει πως:

$$V_t = \frac{V_{DC}}{2} \tag{3.14}$$

Καθώς, όταν το ρεύμα έχει φορά προς την έξοδο του αντιστροφέα άγει το Q_{1-1} , ενώ αν το ρεύμα έχει φορά προς τον αντιστροφέα περνάει από την διόδο ελεύθερης διέλευσης D_{1-1} .



Σχήμα 3.14 : Παραγωγή θετικής τάσης εξόδου (α)



Σχήμα 3.15 : Παραγωγή θετικής τάσης εξόδου (β)

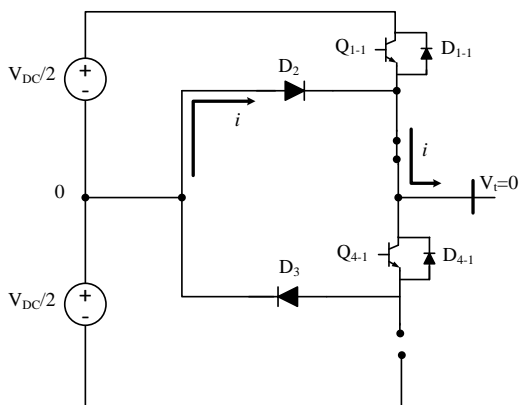
Στην περίπτωση όπου:

$$s_{1-1} \equiv 0 \tag{3.15}$$

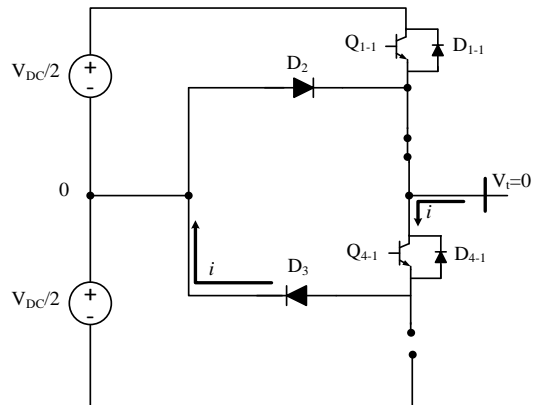
$$s_{4-1} \equiv 1$$

όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.16 και Σχήμα 3.17, ανεξαρτήτως φοράς ρεύματος, θα ισχύει

$$V_t = 0 \tag{3.16}$$



Σχήμα 3.16 : Παραγωγή μηδενικής τάσης εξόδου (α)



Σχήμα 3.17 : Παραγωγή μηδενικής τάσης εξόδου (β)

Όταν το ρεύμα έχει φορά προς την έξοδο του αντιστροφέα τότε άγει η διόδος περιορισμού D_2 και όταν το ρεύμα έχει φορά προς τον αντιστροφέα τότε άγει η διόδος περιορισμού D_3 . Ως

αποτέλεσμα των παραπάνω, η μέση τιμή της θετικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να ελεγχθεί από τους παλμούς οδήγησης των s_{1-1} και s_{4-1} .

- Για την παραγωγή αρνητικής τάσης πρέπει να ισχύει:

$$s_{1-1} \equiv 0 \quad (3.17)$$

$$s_{4-1} \equiv 1$$

Στην περίπτωση όπου:

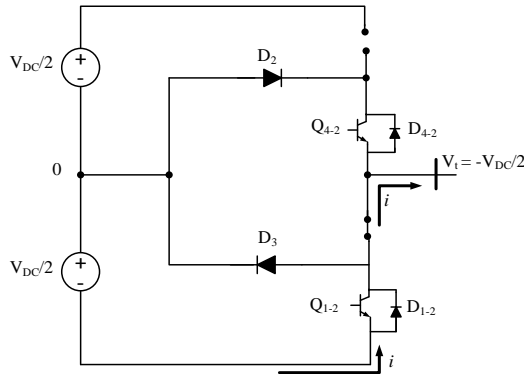
$$s_{1-2} \equiv 1 \quad (3.18)$$

$$s_{4-2} \equiv 0$$

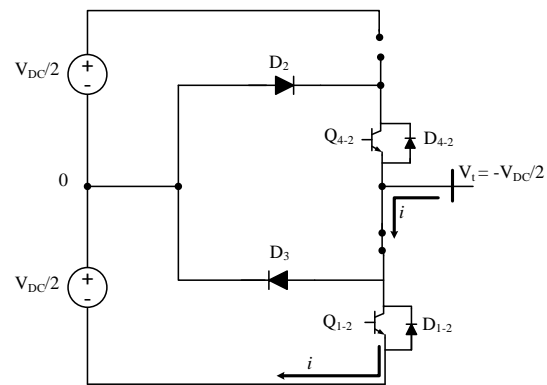
όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.18 και Σχήμα 3.19, ανεξαρτήτως φοράς ρεύματος, θα ισχύει πως:

$$V_i = -\frac{V_{DC}}{2} \quad (3.19)$$

Όταν το ρεύμα έχει φορά προς την έξοδο του αντιστροφέα άγει η διόδος D_{1-2} ενώ όταν το ρεύμα έχει φορά προς τον αντιστροφέα τότε άγει το Q_{1-2} .



Σχήμα 3.18 : Παραγωγή αρνητικής τάσης εξόδου (α)



Σχήμα 3.19 : Παραγωγή αρνητικής τάσης εξόδου (β)

Στην περίπτωση όπου:

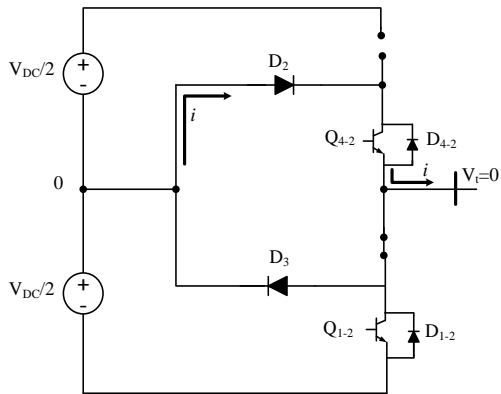
$$s_{1-2} \equiv 0 \quad (3.20)$$

$$s_{4-2} \equiv 1$$

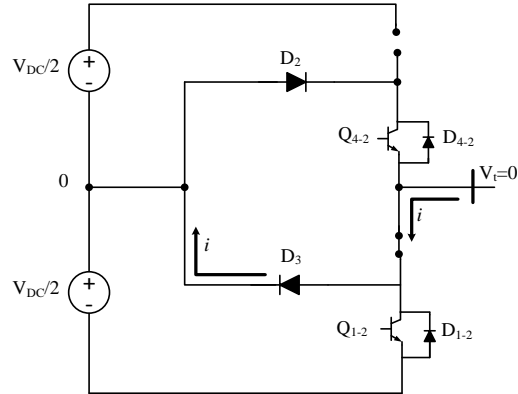
όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.20 και Σχήμα 3.21, ανεξαρτήτως φοράς ρεύματος, θα ισχύει πως:

$$V_i = 0 \quad (3.21)$$

Όταν το ρεύμα έχει φορά προς την έξοδο του αντιστροφέα τότε το ρεύμα περνάει από την διόδο D_2 ενώ όταν το ρεύμα έχει φορά προς τον αντιστροφέα το ρεύμα περνάει από την διόδο D_3 .



Σχήμα 3.20 : Παραγωγή μηδενικής τάσης εξόδου (γ)

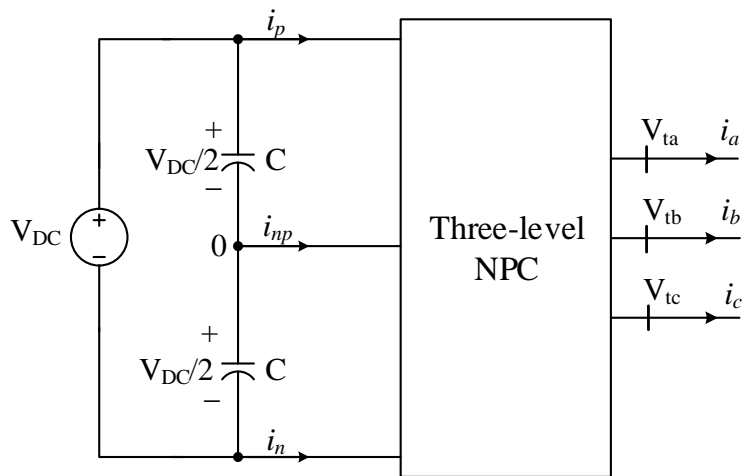


Σχήμα 3.21 : Παραγωγή μηδενικής τάσης εξόδου (δ)

Άρα από τους παλμούς οδήγησης των διακοπών s_{1-2} και s_{4-2} μπορεί να ελεγχθεί η μέση τιμή της αρνητικής τάσης εξόδου. Η παραπάνω ανάλυση αιτιολογεί την ονομασία «αντιστροφέας τριών επιπέδων» καθώς η τιμή εξόδου της AC εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να πάρει τις τιμές: $-V_{DC}/2$, 0 , $+V_{DC}/2$. Οι τεχνικές ελέγχου των παλμών οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών βασίζονται στην τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) [13].

3.6.4.2 Τριφασικός αντιστροφέας τριών επιπέδων με διόδους περιορισμού

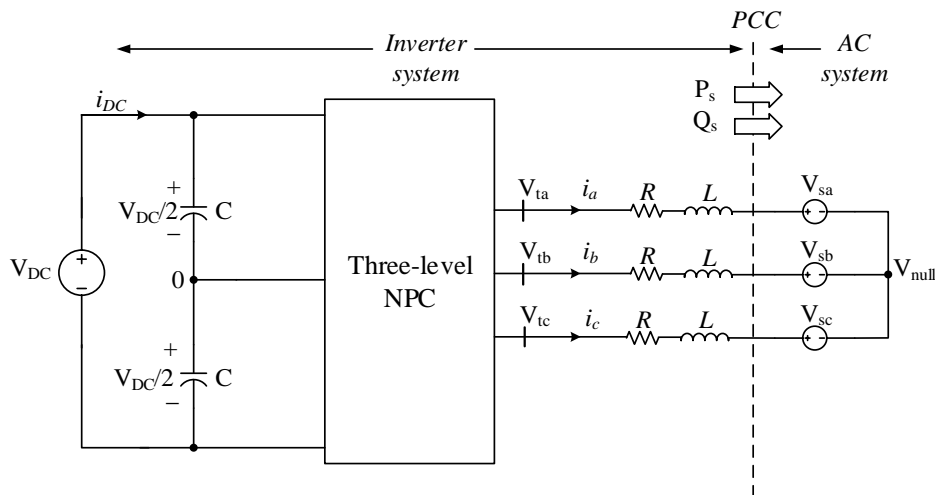
Ο τριφασικός αντιστροφέας τριών επιπέδων με διόδους περιορισμού (Three-level Three Phase NPC Inverter) αποτελείται από τρεις πανομοιότυπους μονοφασικούς αντιστροφέες, όπως αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Για τη δημιουργία των δύο πηγών τάσης στο DC μέρος του αντιστροφέα χρησιμοποιείται ένας χωρητικός καταμεριστής τάσης. Αν οι πυκνωτές του καταμεριστή είναι πανομοιότυποι, τότε η DC τάση θα διαιρείται ισότιμα στους πυκνωτές (Σχήμα 3.22). Η τάση αναφοράς είναι το σημείο 0 ανάμεσα στους πυκνωτές. Το AC τερματικό του κάθε μονοφασικού αντιστροφέα συνδέεται σε κάθε φάση του τριφασικού συστήματος στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο αντιστροφέας [13].



Σχήμα 3.22 : Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα τριών επιπέδων τάσης με διόδους περιορισμού

3.6.4.3 Έλεγχος τριφασικού αντιστροφέα συνδεδεμένου με το δίκτυο

Στο Σχήμα 3.23 φαίνεται το διάγραμμα σύνδεσης ενός αντιστροφέα με το δίκτυο. Κάθε φάση του τριφασικού αντιστροφέα συνδέεται με την αντίστοιχη φάση του AC δικτύου μέσω ενός RL κλάδου. Το AC δίκτυο θεωρείται ότι είναι ένας άπειρος ζυγός ο οποίος αποτελείται από μια ιδανική τριφασική ημιτονική πηγή τάσης V_{sabc} σταθερού μέτρου και συχνότητας. Το σημείο στο οποίο συνδέεται ο αντιστροφέας στο δίκτυο ονομάζεται σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Couple-PCC). Στο PCC ο αντιστροφέας και το δίκτυο ανταλλάσσουν ενεργό και άεργο ισχύ [13]. Στόχος είναι η σύνθεση ενός σχήματος ελέγχου της ενεργού και της άεργου ισχύος που εγχέονται στο δίκτυο από την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται στον αντιστροφέα.



Σχήμα 3.23 : Σύνδεση τριφασικού αντιστροφέα στο δίκτυο

Ο έλεγχος της στιγμιαίας ενεργού ισχύος P_s και της στιγμιαίας άεργου ισχύος Q_s μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος ονομάζεται έλεγχος μέσω τάσης (voltage mode control) όπου η ενεργός και η άεργος ισχύς ελέγχονται από τη φάση και το μέτρο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα V_{tabc} . Παρόλο που ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι σχετικά απλός στην υλοποίησή του, έχει το μειονέκτημα πως δεν ελέγχεται το ρεύμα του αντιστροφέα και ως αποτέλεσμα δεν παρέχει προστασία έναντι των υπερεντάσεων. Ο δεύτερος έλεγχος ονομάζεται έλεγχος μέσω ρεύματος (current mode control) όπου το ρεύμα στο AC μέρος του αντιστροφέα i_{abc} , ελέγχεται μέσω της τάσης V_{tabc} . Μέσω αυτού του ελέγχου καθιστάται εφικτή η προστασία έναντι υπερεντάσεων. Επίσης, ο έλεγχος μέσω ρεύματος είναι εύρωστος στις διακυμάνσεις του AC συστήματος και του συστήματος του αντιστροφέα, έχει καλύτερη απόδοση σε δυναμικά φαινόμενα και είναι πιο ακριβής [13].

Ο έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος που παράγει ο αντιστροφέας βασίζεται στον μετασχηματισμό dq, όπου το τριφασικό ρεύμα i_{abc} αναλύεται σε δύο κάθετες συνιστώσες i_d και i_q . Πιο συγκεκριμένα, ο μετασχηματισμός Clarke μετασχηματίζει ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα σε καρτεσιανές συντεταγμένες στο στατικό επίπεδο αβ. Στη συνέχεια, ο μετασχηματισμός Park στρέφει το διφασικό στάσιμο σύστημα στο dq επίπεδο το οποίο αποτελεί ένα στρεφόμενο πλαίσιο.

- **Μετασχηματισμός Clarke**

Έστω το συμμετρικό τριφασικό σύστημα το οποίο περιγράφεται από τα παρακάτω μεγέθη τάσης και ρεύματος και δ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{MAX} \cos(\omega t) \\ u_{MAX} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_{MAX} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{MAX} \cos(\omega t - \delta) \\ i_{MAX} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \delta) \\ i_{MAX} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \delta) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Στο καρτεσιανό σύστημα $\alpha\beta$ οι εξισώσεις της τάσης μετασχηματίζονται σύμφωνα με τον Μ/Σ Clarke:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} C \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

όπου

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Και ισχύει

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} C \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{MAX} \cos(\omega t) \\ u_{MAX} \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Το τριφασικό ρεύμα μετασχηματίζεται αντίστοιχα

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{MAX} \cos(\omega t - \delta) \\ -i_{MAX} \sin(\omega t - \delta) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Και η τριφασική ενεργός και άεργος ισχύς υπολογίζεται:

$$P(t) = \frac{3}{2} [u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}] \quad (3.28)$$

$$Q(t) = \frac{3}{2} [-u_{\alpha} i_{\beta} + u_{\beta} i_{\alpha}] \quad (3.29)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση οι συνιστώσες του ρεύματος και της τάσης στο αβ σύστημα είναι κάθετες μεταξύ τους.

- **Μετασχηματισμός Park**

Η σχέση που συνδέει το αβ σύστημα με το στρεφόμενο σύστημα dq είναι:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Όπου

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Και θ είναι η γωνία κατά την οποία έχει γίνει η περιστροφή.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3.30) την εξίσωση (3.26), προκύπτει:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{MAX} \cos(\omega t) \\ u_{MAX} \sin(\omega t) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} u_{MAX} \cos(\omega t) \cos \theta + u_{MAX} \sin(\omega t) \sin \theta \\ -u_{MAX} \cos(\omega t) \sin \theta + u_{MAX} \sin(\omega t) \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Αν το σύστημα dq περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα έτσι ώστε να ισχύει

$$\theta = \omega t \quad (3.34)$$

προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{MAX} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Το ρεύμα στο σύστημα dq υπολογίζεται:

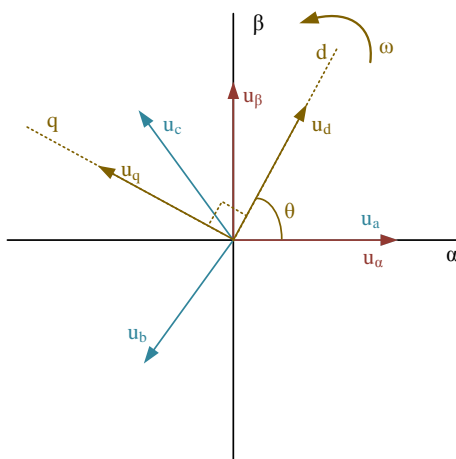
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{MAX} \cos(\delta) \\ -i_{MAX} \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς υπολογίζονται:

$$P(t) = \frac{3}{2} [u_d i_d + u_q i_q] = \frac{3}{2} u_d i_d \quad (3.37)$$

$$Q(t) = \frac{3}{2} [-u_d i_q + u_q i_d] = -\frac{3}{2} u_d i_q \quad (3.38)$$

Ο μετασχηματισμός των τριφασικών τάσεων στο σύστημα αβ και στο περιστρεφόμενο σύστημα dq φαίνεται στο Σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24 : Σύστημα abc, αβ και dq στο ίδιο επίπεδο

Αν κατά τον μετασχηματισμό Park ισχύει η συνθήκη της εξίσωσης (3.34), η ενεργός και άεργος ισχύς αποπλέκονται όπως φαίνεται από την εξίσωση και η ενεργός ισχύς που εγχέει ο αντιστροφέας στο δίκτυο μπορεί να ελεγχθεί από το ρεύμα i_d ενώ η άεργος από το ρεύμα i_q . Η διάταξη η οποία διασφαλίζει ότι το στρεφόμενο πλαίσιο στρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα της τάσης είναι το Phase Locked Loop (PLL) [13].

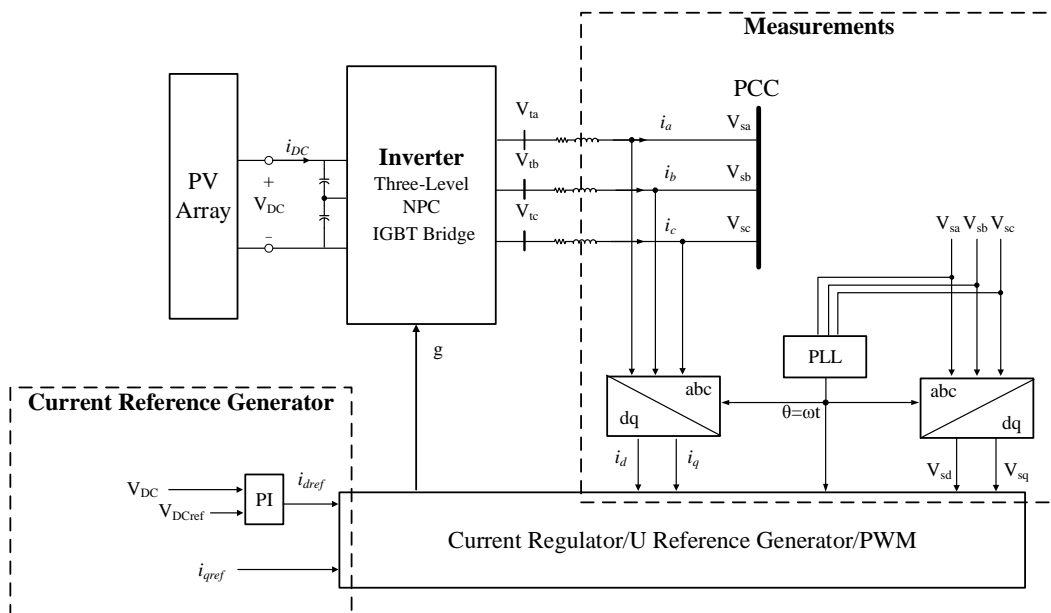
Το PLL είναι ένα σύστημα το οποίο παράγει τη γωνία κατά την οποία θα γίνει ο μετασχηματισμός dq ώστε να διασφαλίζεται η συνθήκη της εξίσωσης (3.34). Το τελικό κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25. Αν το PLL διασφαλίζει τη συνθήκη της εξίσωσης (3.34), τότε η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο και η άεργος ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται από τον αντιστροφέα υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.37) και (3.38). Επίσης, αν θεωρηθεί πως η τάση στο PCC (V_{sabc}) παραμένει σταθερή, τότε η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς εξαρτώνται μόνο από το i_d και i_q αντίστοιχα. Για το κύκλωμα του Σχήματος 3.25 υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.39) και (3.40).

$$P(t) = \frac{3}{2} V_{sd} i_d \quad (3.39)$$

$$Q(t) = -\frac{3}{2} V_{sd} i_q \quad (3.40)$$

Οπότε, για τον έλεγχο του αντιστροφέα, όσο αφορά την ενεργό και άεργο ισχύ, αρκεί να μεταβάλλεται το ρεύμα αναφοράς του dq άξονα [13].

- Το ρεύμα αναφοράς του άξονα d παράγεται από ένα ελεγκτή PI έτσι ώστε η τάση V_{DC} να πλησιάζει την τάση αναφοράς V_{DCref} . Η τάση αναφοράς μπορεί να προκύπτει από έναν αλγόριθμο MPPT ή από άλλη μέθοδο σε περίπτωση που πρέπει να γίνει αποκοπή ενεργού ισχύος και όχι παροχή της μέγιστης δυνατής ισχύς από το ΦΒ σύστημα.
- Το ρεύμα αναφοράς του άξονα q υπολογίζεται ανάλογα με τις ανάγκες παραγωγής ή κατανάλωσης αέργου ισχύος. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η λειτουργία υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, τότε το ρεύμα αναφοράς του q άξονα είναι 0.



Σχήμα 3.25 : Έλεγχος αντιστροφέα

ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθεί ο υβριδικός αλγόριθμος ρύθμισης τάσης. Αρχικά θα ταξινομηθούν οι τεχνικές ρύθμισης τάσης που κάνουν χρήση ελέγχου αέργου ισχύος και θα διατυπωθεί το πρόβλημα ρύθμισης τάσης σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην συνέχεια θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας η οποία θεμελιώνει τον υβριδικό αλγόριθμο. Τέλος, θα παρουσιαστούν οι αυτόνομοι έλεγχοι τάσης και θα προταθεί ένα μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης για αποφυγή υπερφόρτωσης των γραμμών διανομής. Οι έλεγχοι που θα παρουσιαστούν εφαρμόζονται σε ΜΔΠ φωτοβολταϊκών συστημάτων.

4.2 ΣΧΗΜΑΤΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Η εξάπλωση της διανεμημένης παραγωγής δημιουργεί νέες τεχνικές προκλήσεις στην ομαλή λειτουργία των δικτύων διανομής που αφορούν την διακύμανση της τάσης, την προστασία του δικτύου, την υπερφόρτωσή του και την ποιότητα ισχύος. Από τις παραπάνω, η ανύψωση τάσης αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που εμποδίζει την περαιτέρω διείσδυση διανεμημένης παραγωγής στα δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης.

Όσον αφορά την μέση τάση (MT), έχουν προταθεί διάφορες λύσεις έτσι ώστε να μετριαστεί η ανύψωση τάσης. Η ενίσχυση του δικτύου αποτελεί μια αποδοτική αλλά κοστοβόρα επιλογή. Μια λύση για την ρύθμιση τάσης είναι η συντονισμένη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ με ρυθμιστή τάσης (Step Voltage Regulator – SVR). Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι πως απαιτεί υψηλό κόστος εγκατάστασης καθώς πρέπει να εγκατασταθούν νέοι ρυθμιστές τάσης ενώ οι ΜΔΠ δεν συμμετέχουν στη ρύθμιση τάσης. Επιπρόσθετα, η λειτουργία του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά από την ενεργή συμμετοχή των ΜΔΠ. Η συμμετοχή των ΜΔΠ στη ρύθμιση τάσης μπορεί να επιτευχθεί με τον έλεγχο αέργου ισχύος της μονάδας [16]. Οι τεχνικές ελέγχου αέργου ισχύος ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- **Κεντρικός έλεγχος (centralized control)**

Για την υλοποίηση τεχνικών κεντρικού ελέγχου είναι απαραίτητη η ύπαρξη δικτύου επικοινωνίας καθώς όλες οι πληροφορίες των στοιχείων του δικτύου στέλνονται σε έναν κεντρικό ελεγκτή. Ο κεντρικός ελεγκτής επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης και λαμβάνει αποφάσεις για τη βέλτιστη ρύθμιση των ΜΔΠ. Στην συνέχεια, οι ρυθμίσεις στέλνονται στις μονάδες. Οι κεντρικοί έλεγχοι είναι έντονα εξαρτημένοι από τα μέσα επικοινωνίας και για αυτόν τον λόγο επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος [17].

- **Κατανεμημένος έλεγχος (distributed control)**

Βασικό χαρακτηριστικό του κατανεμημένου ελέγχου είναι η έλλειψη κεντρικού ελεγκτή και ο κατανεμημένος τρόπος με τον οποίο γίνεται η επικοινωνία ανάμεσα στις ΜΔΠ για την λήψη αποφάσεων. Η σύγκλιση των κατανεμημένων ελέγχων είναι αργή και δεν εγγυώνται βέλτιστη λύση [16].

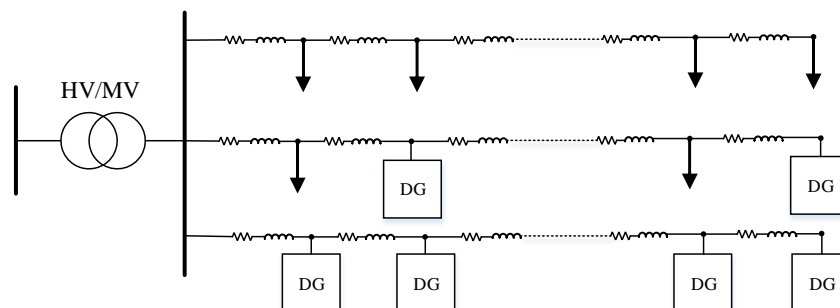
- **Τοπικός έλεγχος (local control)**

Στις στρατηγικές τοπικού ελέγχου, οι αποφάσεις για τη ρύθμιση αέργου ισχύος λαμβάνονται ξεχωριστά από την κάθε ΜΔΠ βασιζόμενες σε μετρήσεις στο ΡCC. Έτσι η λειτουργία του δικτύου είναι ευέλικτη και εύρωστη, ενώ δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός διευρυμένου συστήματος επικοινωνίας.

4.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην ΜΤ, τα ακτινικά δίκτυα διανομής βρίσκονται συνήθως σε αγροτικές περιοχές με μικρή πυκνότητα πληθυσμού. Οι ΜΔΠ που εγκαθίστανται σε ακτινικά δίκτυα διανομής είναι συνήθως διακοπτόμενες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά συστήματα) και αυτό ωθεί τους διαχειριστές του δικτύου διανομής (Distribution System Operator – DSO) να τις τοποθετούν σε γραμμές διανομής που περιλαμβάνουν μόνο ΔΠ. Αυτό συμβαίνει για να μειωθεί η επίδραση των ΜΔΠ στα συμβατικά φορτία [16]. Η τοπολογία ενός τέτοιου δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 4.1 όπου αποτελείται από τρία είδη γραμμών διανομής:

- μόνο κατανάλωσης
- μεικτής παραγωγής και κατανάλωσης
- μόνο παραγωγής



Σχήμα 4.1 : Τοπολογία ακτινικού δικτύου διανομής ΜΤ που αποτελείται από τρία είδη γραμμών διανομής

Σε αυτό το δίκτυο, η ρύθμιση τάσης μπορεί να επιτευχθεί κατανέμοντας την άεργο ισχύ στις ΜΔΠ. Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί του δικτύου διανομής που αφορούν τα θερμικά όρια των γραμμών και τη δυνατότητα παραγωγής ή κατανάλωσης αέργου ισχύος των ΜΔΠ. Στόχος του ελέγχου είναι η ρύθμιση τάσης ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου διανομής. Η ελαχιστοποίηση των απωλειών είναι ένα μεικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα

βελτιστοποίησης (mixed-integer non-linear optimization problem) το οποίο περιγράφεται μαθηματικά από την αντικειμενική συνάρτηση :

$$\min \sum_{i \in N} P_{loss,i} \quad (4.1)$$

με περιορισμούς:

$$V_i^2 = \left\{ \left[V_{prev,i}^4 + 4(A_i R_i + B_i X_i) V_{prev,i}^2 - 4(A_i X_i - B_i R_i)^2 \right]^{1/2} + V_{prev,i}^2 + 2(A_i R_i + B_i X_i) \right\} / 2 \quad (4.2)$$

$$\forall i \in N$$

$$P_{loss,i} = R_i (A_i^2 + B_i^2) / V_i^2 \quad \forall i \in N \quad (4.3)$$

$$Q_{loss,i} = X_i (A_i^2 + B_i^2) / V_i^2 \quad \forall i \in N \quad (4.4)$$

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad \forall i \in N_{DG} \quad (4.5)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad \forall i \in N \quad (4.6)$$

$$I_i \leq I_{\max} \quad \forall i \in N \quad (4.7)$$

Οι εξισώσεις (4.1)-(4.7) προκύπτουν από τις εξισώσεις ροής ισχύος. Το N συμβολίζει το σύνολο των κόμβων και των κλάδων του δικτύου ενώ το N_{DG} συμβολίζει το σύνολο των κόμβων που έχουν ΜΔΠ. Οι όροι $P_{loss,i}$ και $Q_{loss,i}$ είναι οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος ενώ οι όροι R_i και X_i είναι η αντίσταση και η αντίδραση του κλάδου i . Οι όροι V_i και $V_{prev,i}$ είναι το μέτρο της τάσης του i -οστού κόμβου και του προηγούμενου γειτονικού κόμβου αντίστοιχα, ενώ I_i είναι το ρεύμα που ρέει στον κλάδο i . Ο όρος Q_i είναι η άεργος ισχύς που παράγεται από το ΦΒ σύστημα που βρίσκεται στον κόμβο i . Οι συντελεστές A_i και B_i υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.8) και (4.9) αντίστοιχα.

$$A_i = \sum_{j \in N_{d,i}} P_j - \sum_{j \in N_{d,i+1}} P_{loss,j} \quad (4.8)$$

$$B_i = \sum_{j \in N_{d,i}} Q_j - \sum_{j \in N_{d,i+1}} Q_{loss,j} \quad (4.9)$$

Οι όροι P_j και Q_j συμβολίζουν την έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα στον κόμβο j ενώ το σύνολο $N_{d,i}$ είναι το σύνολο των κόμβων που βρίσκονται πιο μακριά από τον κόμβο i σε σχέση με τον υποσταθμό διανομής [16].

Η λύση του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης θα δώσει την άεργο ισχύ που πρέπει να παράγει ή να καταναλώνει κάθε ΜΔΠ ώστε η τάση του κάθε κόμβου να είναι εντός ορίων, να μην ξεπερνιούνται τα θερμικά όρια των γραμμών και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Για την εφαρμογή του ελέγχου απαιτείται η χρήση κεντρικού ελεγκτή και ένα εκτενές σύστημα επικοινωνίας ανάμεσα στον ελεγκτή και στις ΜΔΠ. Στόχος είναι να λυθεί το άνωθεν πρόβλημα βελτιστοποίησης με έναν πιο εύρωστο τρόπο ώστε να υπάρχουν ελάχιστες

απαιτήσεις επικοινωνίας και να καθιστάται το σύστημα πιο αξιόπιστο. Για τους προαναφερθέντες λόγους, θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας ώστε να βρεθεί πως επηρεάζονται οι απώλειες ισχύος του δικτύου από την παραγωγή αέργου ισχύος των ΜΔΠ του δικτύου.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Ο έλεγχος αέργου ισχύος θα εφαρμοστεί σε γραμμές διανομής όπου υπάρχουν ΜΔΠ και είναι πιθανή η εμφάνιση υπερτάσεων. Αυτό συμβαίνει πιο συχνά σε γραμμές διανομής που περιλαμβάνουν μόνο ΔΠ λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος. Οι γραμμές διανομής που περιλαμβάνουν και καταναλωτές και ΔΠ είναι λιγότερο επιρρεπείς σε υπερτάσεις. Για αυτόν τον λόγο ο προτεινόμενος έλεγχος αέργου ισχύος θα γίνει σε γραμμές διανομής που περιλαμβάνουν μόνο ΔΠ.

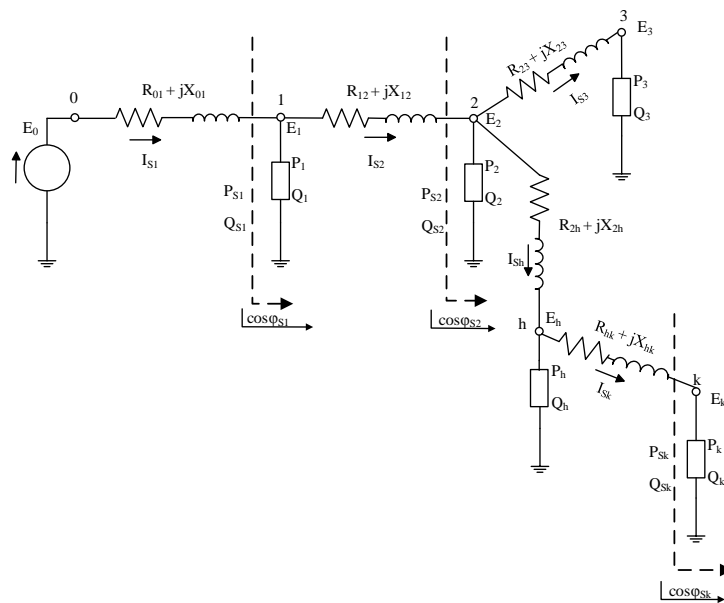
4.4.1 Μήτρες ευαισθησίας ενεργού και αέργου ισχύος

Η ανάλυση ευαισθησίας βασίζεται στον Ιακωβιανό πίνακα και συνθέτει τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων των κόμβων (μέτρο $[\Delta E]$ και φάση $[\Delta \theta]$) και των εγχύσεων ισχύος στους κόμβους (ενεργό $[\Delta P]$ και άεργο $[\Delta Q]$) [18].

$$\begin{bmatrix} [\Delta E] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = [s] \cdot \begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$[s] = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] \end{bmatrix}^{-1} \cdot [I] \quad (4.11)$$

Όπου $[s]$ είναι η μήτρα ευαισθησίας και $[I]$ είναι ο μοναδιαίος πίνακας.



Σχήμα 4.2 : Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα ακτινικού δικτύου

Στα ακτινικά δίκτυα, ζητούμενο είναι ο έλεγχος του μέτρου της τάσης και όχι της γωνίας της τάσης του κάθε κόμβου. Θεωρώντας ότι η τάση του υποσταθμού MT ρυθμίζεται στην τιμή E_0 , η διαφορά δυναμικού V_{0i} με τον κόμβο i υπολογίζεται από:

$$V_{0i} = E_0 - E_i \quad (4.12)$$

Για παράδειγμα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2, η διαφορά δυναμικού του κόμβου $i=3$ και του κόμβου 0 υπολογίζεται από:

$$V_{03} = E_0 - E_3 \quad (4.13)$$

Προσθέτοντας και αφαιρώντας τις τάσεις E_1 και E_2 καταλήγουμε στην εξίσωση (4.14).

$$V_{0i} = V_{01} + V_{02} + V_{03} \quad (4.14)$$

Γενικεύοντας, η διαφορά δυναμικού του κόμβου i και του κόμβου 0 υπολογίζεται:

$$V_{0i} = \sum_{hk \in PT_i} V_{hk} \quad (4.15)$$

Όπου στην εξίσωση (4.15) PT_i είναι σύνολο των κόμβων που περιέχονται στη διαδρομή που ενώνει τον κόμβο i και τον κόμβο 0. Η τάση V_{hk} υπολογίζεται από τις παραμέτρους του δικτύου και τη ροή ισχύος στις γραμμές.

$$\begin{aligned} V_{hk} &= E_h - E_k = R_{hk} I_{Sk} \cos \varphi_{Sk} + X_{hk} I_{Sk} \sin \varphi_{Sk} = \\ &= \frac{R_{hk} E_k I_{Sk} \cos \varphi_{Sk} + X_{hk} E_k I_{Sk} \sin \varphi_{Sk}}{E_k} = \frac{R_{hk} P_{Sk} + X_{hk} Q_{Sk}}{E_k} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Όπου (Σχήμα 4.2) I_{Sk} , R_{hk} και X_{hk} είναι το ρεύμα, η αντίσταση και η αντίδραση του κλάδου hk αντίστοιχα. Οι όροι P_{Sk} , Q_{Sk} και $\cos \varphi_{Sk}$ είναι η ενεργός ισχύς, η άεργος ισχύς και ο συντελεστής ισχύος του τμήματος Sk . Οι τάσεις των κόμβων είναι κοντά στην ονομαστική τάση E_n και η εξίσωση (4.16) μπορεί προσεγγιστικά να γραφτεί:

$$V_{hk} \cong \frac{R_{hk} P_{Sk} + X_{hk} Q_{Sk}}{E_n} \quad (4.17)$$

Οι ενεργός ισχύς P_{Sk} και η άεργος ισχύς Q_{Sk} υπολογίζονται από:

$$P_{Sk} = \sum_{q \in DE_k} P_q + \sum_{rs \in DE_k} P_{Rrs} \quad (4.18)$$

$$Q_{Sk} = \sum_{q \in DE_k} Q_q + \sum_{rs \in DE_k} Q_{Xrs} \quad (4.19)$$

Όπου P_q , Q_q είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων που βρίσκονται μετά από τον κόμβο k , ενώ P_{Rrs} , Q_{Xrs} είναι οι απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα των κλάδων που βρίσκονται μετά τον κόμβο k . Το σύνολο των στοιχείων που είναι εγκατεστημένα μετά τον κόμβο k συμβολίζεται DE_k . Η ενεργός και η άεργος ισχύς P_{Rrs} , Q_{Xrs} θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά με την ενεργό και άεργο ισχύ P_q , Q_q και με την υπόθεση αυτή οι εξισώσεις (4.18) και (4.19) γράφονται προσεγγιστικά:

$$P_{Sk} \cong \sum_{q \in DE_k} P_q \quad (4.20)$$

$$Q_{Sk} \cong \sum_{q \in DE_k} Q_q \quad (4.21)$$

Από τις εξισώσεις (4.15), (4.17), (4.20) και (4.21) προκύπτει πως η διαφορά δυναμικού V_{0i} είναι συνάρτηση των (P_1, P_2, \dots) και των (Q_1, Q_2, \dots) . Το ίδιο θα ισχύει για την τάση E_i του κόμβου i .

$$\begin{aligned} E_i &= E_0 - V_{0i} = E_0 - \sum_{hk \in PT_i} V_{hk} \\ &\cong E_0 - \sum_{hk \in PT_i} \frac{R_{hk} P_{Sk} + X_{hk} Q_{Sk}}{E_n} \\ &\cong E_0 - \sum_{hk \in PT_i} \frac{R_{hk} \sum_{q \in DE_k} P_q + X_{hk} \sum_{q \in DE_k} Q_q}{E_n} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Θεωρώντας πως ο όρος E_0 παραμένει σταθερός, προκύπτει πως:

$$E_i = f(P_1, P_2, \dots, P_N, Q_1, Q_2, \dots, Q_N) \quad (4.23)$$

Η εξίσωση (4.23) δείχνει πως αν η ενεργός και η άεργος ισχύς ενός κόμβου j μεταβληθούν κατά $\Delta P_j = P_j^f - P_j^0$ και $\Delta Q_j = Q_j^f - Q_j^0$ όπου P_j^f , Q_j^f είναι οι τελικές τιμές και P_j^0 , Q_j^0 είναι οι αρχικές τιμές, τότε η τάση του κόμβου i θα μεταβληθεί κατά:

$$\Delta E_i = E_i^f - E_i^0 \quad (4.24)$$

Η μεταβολή ΔE_i μπορεί να υπολογιστεί με τη γραμμικοποίηση της εξίσωσης (4.24) από την εξίσωση (4.25).

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \frac{\partial E_i}{\partial P_1} \Delta P_1 + \frac{\partial E_i}{\partial P_2} \Delta P_2 + \dots + \frac{\partial E_i}{\partial P_N} \Delta P_N + \frac{\partial E_i}{\partial Q_1} \Delta Q_1 + \frac{\partial E_i}{\partial Q_2} \Delta Q_2 + \dots + \frac{\partial E_i}{\partial Q_N} \Delta Q_N \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{\partial E_i}{\partial P_j} \Delta P_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial E_i}{\partial Q_j} \Delta Q_j = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial E_i}{\partial P_j} \Delta P_j + \frac{\partial E_i}{\partial Q_j} \Delta Q_j \right) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Σε μορφή πινάκων η εξίσωση (4.25) γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_1 \\ \dots \\ \Delta E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial P_1} & \frac{\partial E_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial P_N} \\ \frac{\partial E_2}{\partial P_1} & \frac{\partial E_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial E_2}{\partial P_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial E_N}{\partial P_1} & \dots & \dots & \frac{\partial E_N}{\partial P_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial Q_N} \\ \frac{\partial E_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial E_2}{\partial Q_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial E_N}{\partial Q_1} & \dots & \dots & \frac{\partial E_N}{\partial Q_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Και η γενική μορφή της είναι:

$$[\Delta E] = [s_P][\Delta Q] + [s_Q][\Delta P] \quad (4.27)$$

Όπου $[s_P]$ και $[s_Q]$ είναι οι μήτρες ευαισθησίας ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα, $[\Delta E]$ είναι το διάνυσμα μεταβολής του μέτρου της τάσης των κόμβων και $[\Delta P]$, $[\Delta Q]$ είναι τα διανύσματα των μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό των στοιχείων $\frac{\partial E_i}{\partial P_j}$, $\frac{\partial E_i}{\partial Q_j}$ των δύο μητρών ευαισθησίας,

παραγωγίζοντας την εξίσωση (4.22) προκύπτει:

$$\frac{\partial E_i}{\partial P_j} = -\frac{1}{E_n} \left[\sum_{hk \in PT_i} R_{hk} \left(\sum_{q \in DE_k} \frac{\partial P_q}{\partial P_j} \right) + X_{hk} \left(\sum_{q \in DE_k} \frac{\partial Q_q}{\partial P_j} \right) \right] \quad (4.28)$$

Επίσης θα ισχύει:

$$\frac{\partial Q_q}{\partial P_j} = 0 \quad (4.29)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.29) στην εξίσωση (4.28), προκύπτει πως:

$$\frac{\partial E_i}{\partial P_j} = -\frac{1}{E_n} \left[\sum_{hk \in PT_i} R_{hk} \left(\sum_{q \in DE_k} \frac{\partial P_q}{\partial P_j} \right) \right] \quad (4.30)$$

Ισχύει πως:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_q}{\partial P_j} = 1 & \alpha \nu \quad q = j \\ \frac{\partial P_q}{\partial P_j} = 0 & \alpha \nu \quad q \neq j \end{cases} \quad (4.31)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (4.31) και πως ο όρος PT_i είναι το σύνολο των κόμβων που περιέχονται στην διαδρομή που ενώνει τον κόμβο i και τον κόμβο 0 , η εξίσωση (4.30) γράφεται:

$$\frac{\partial E_i}{\partial P_j} = -\frac{1}{E_n} \left[\sum_{hk \in PT_{i,j}} R_{hk} \right] \quad (4.32)$$

Όπου το σύνολο $PT_{i,j}$, είναι το σύνολο των κοινών κόμβων που υπάρχουν στην διαδρομή από τον κόμβο 0 έως τον κόμβο i και στην διαδρομή από τον κόμβο 0 έως τον κόμβο j .

Αντίστοιχα για την μερική παράγωγο $\frac{\partial E_i}{\partial Q_j}$ προκύπτει η εξίσωση (4.33).

$$\frac{\partial E_i}{\partial Q_j} = -\frac{1}{E_n} \left[\sum_{hk \in PT_{i,j}} X_{hk} \right] \quad (4.33)$$

Από τις εξισώσεις (4.32) και (4.33) εξάγεται το συμπέρασμα πως το στοιχείο (i,j) της μήτρας ευαισθησίας (ενεργού ή αέργου ισχύος) είναι το αριθμητικό άθροισμα των αντιστάσεων ή των αντιδράσεων των κλάδων που ρέει ενεργός και άεργος ισχύς οι οποίες απορροφώνται και από τον κόμβο i και από τον κόμβο j , πολλαπλασιασμένο με τον παράγοντα $-\frac{1}{E_n}$ [18]. Για παράδειγμα, τα στοιχεία $(3,2)$ των μητρών ευαισθησίας ενεργού και αέργου ισχύος, υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.34) και (4.35) αντίστοιχα (Σχήμα 4.2).

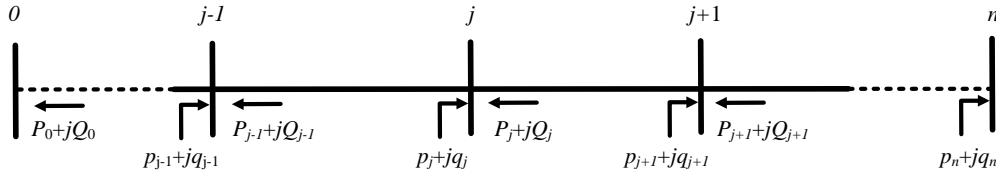
$$\frac{\partial E_3}{\partial P_2} = -\frac{1}{E_n} [R_{01} + R_{12}] \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_2} = -\frac{1}{E_n} [X_{01} + X_{12}] \quad (4.35)$$

Το αρνητικό πρόσημο των στοιχείων των μητρών ευαισθησίας έχει μεγάλη σημασία και σημαίνει πως αν εγχέεται άεργος ισχύς σε έναν κόμβο j είναι $\Delta Q_j < 0$ τότε θα ισχύει $\Delta E_i > 0$ και θα αυξηθεί η τάση του κόμβου i . Δηλαδή, για να μειωθεί η τάση σε έναν κόμβο πρέπει να απορροφηθεί άεργος ισχύς από το δίκτυο χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ΜΔΠ [18].

4.4.2 Ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός ακτινικού δικτύου διανομής που αποτελείται από n κόμβους. Στον κάθε κόμβο εγχέεται ενεργός ισχύς p_j και άεργος ισχύς q_j . Οι εξισώσεις DistFlow (4.36) - (4.38) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή ισχύος στον κάθε κόμβο j [19].



Σχήμα 4.3 : Σχηματικό διάγραμμα ακτινικού δικτύου διανομής

$$P_{j+1} = P_j - r_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} - P_{j+1}$$

$$P_{loss,j} = r_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} \quad (4.36)$$

$$Q_{j+1} = Q_j - x_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} - Q_{j+1} \quad (4.37)$$

$$V_{j+1}^2 = V_j^2 - 2(r_j P_j + x_j Q_j) + (r_j^2 + x_j^2) \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} \quad (4.38)$$

Ο όρος $r_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2}$ της εξίσωσης (4.36) είναι οι απώλειες ενεργούς ισχύος του κλάδου που

ενώνει τους κόμβους j και $j+1$.

Λόγω της ενσωμάτωσης ελέγχου αέργου ισχύος από τις ΜΔΠ για τη ρύθμιση της τάσης, από την εξίσωση (4.33) μπορεί να βρεθεί η ευαισθησία της τάσης του κόμβου m σε σχέση με τη μεταβολή της αέργου ισχύος της ΜΔΠ που βρίσκεται στον κόμβο k και μπορεί να γραφτεί [16]:

$$\frac{\partial V_m}{\partial Q_k} \approx \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{\min(m,k)} X_i \quad (4.39)$$

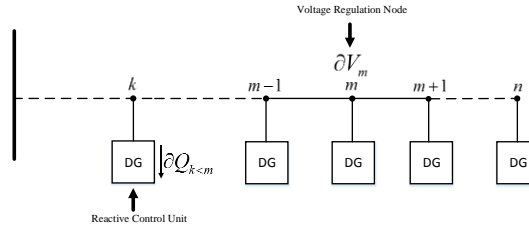
Όπου V_m είναι το μέτρο της τάσης του κόμβου m , Q_k είναι η αέργος ισχύς που παράγεται από την ΜΔΠ στον κόμβο k , X_i είναι η αντίδραση της γραμμής μεταξύ του κόμβου $i-1$ και i και V είναι η ονομαστική τάση του δικτύου. Το αρνητικό πρόσημο της εξίσωσης (4.33) αφαιρέθηκε γιατί άλλαξε η συμβατική φορά της αέργου ισχύος. Για τη σύνθεση της εξίσωσης (4.33) θεωρήθηκε πως η αέργος ισχύς έχει φορά προς το φορτίο, δηλαδή απορροφάται.

Αν υποθεθεί πως η τάση του κόμβου m ρυθμίζεται από την ΜΔΠ του κόμβου k , η απαιτούμενη μεταβολή της αέργου ισχύος εξαρτάται από τη θέση του κόμβου k σε σχέση με τον κόμβο m . Άρα, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις [16]:

1. $k < m$

Η τάση ρυθμίζεται από μια ΜΔΠ που βρίσκεται πιο κοντά στον υποσταθμό ΜΤ σε σχέση με τον κόμβο του οποίου ρυθμίζεται η τάση (Σχήμα 4.4). Από την εξίσωση (4.39) προκύπτει η εξίσωση (4.40).

$$\frac{\partial V_m}{\partial Q_{k < m}} \approx \frac{1}{V} \sum_{i=1}^k X_i \quad (4.40)$$

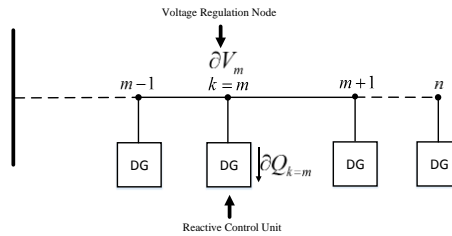


Σχήμα 4.4 : Περίπτωση 1, $k < m$

2. $k = m$

Η τάση ρυθμίζεται από μια ΜΔΠ που βρίσκεται στον ίδιο κόμβο που ρυθμίζεται η τάση (Σχήμα 4.5). Από την εξίσωση (4.39) προκύπτει:

$$\frac{\partial V_m}{\partial Q_{k = m}} \approx \frac{1}{V} \sum_{i=1}^m X_i \quad (4.41)$$

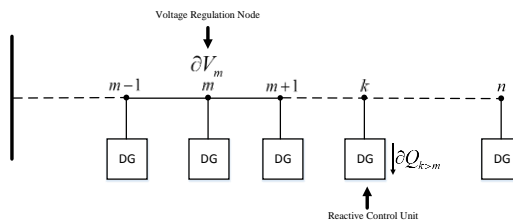


Σχήμα 4.5 : Περίπτωση 2, $k = m$

3. $k > m$

Η τάση ρυθμίζεται από μια ΜΔΠ που βρίσκεται πιο μακριά από τον κόμβο που ρυθμίζεται η τάση σε σχέση με τον υποσταθμό ΜΤ (Σχήμα 4.6). Από την εξίσωση (4.39) προκύπτει:

$$\frac{\partial V_m}{\partial Q_{k > m}} \approx \frac{1}{V} \sum_{i=1}^m X_i \quad (4.42)$$



Σχήμα 4.6 : Περίπτωση 3, $k > m$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (4.41) και (4.40) και τις τις εξισώσεις (4.41) και (4.42) προκύπτει:

$$\frac{\Delta Q_{k < m}}{\Delta Q_{k=m}} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{\sum_{i=1}^k X_i} > 1 \quad (4.43)$$

$$\frac{\Delta Q_{k > m}}{\Delta Q_{k=m}} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{\sum_{i=1}^m X_i} = 1 \quad (4.44)$$

Από τις εξισώσεις (4.43), (4.44) προκύπτει το συμπέρασμα πως η απαιτούμενη άεργος ισχύς για τη ρύθμιση της τάσης ελαχιστοποιείται όταν η τάση ενός κόμβου ρυθμίζεται από ΜΔΠ που είναι τοποθετημένη στον ίδιο κόμβο ή πιο μακριά από αυτόν σε σχέση με τον υποσταθμό ΜΤ [16].

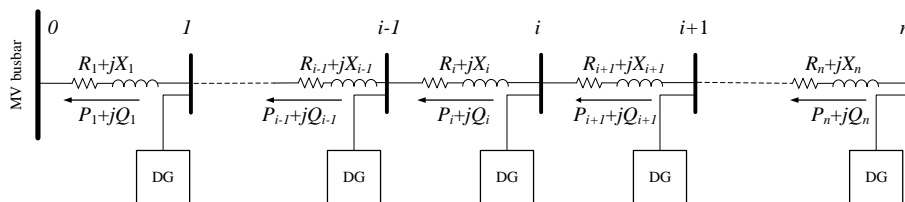
Χρησιμοποιώντας τη σχέση για την εύρεση των απωλειών ενεργού ισχύος της εξίσωσης (4.36), οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής διανομής n κόμβων (Σχήμα 4.7), όταν η ΜΔΠ στον κόμβο k καταναλώνει άεργο ισχύ ΔQ_k , υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$P_{loss,k} \approx \frac{1}{V^2} \left[\sum_{i=1}^n R_i \left(\sum_{j=i}^n P_j \right)^2 + \sum_{i=1}^k R_i \left(\sum_{j=i}^n Q_j + \Delta Q_k \right)^2 + \sum_{i=k+1}^n R_i \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right)^2 \right] \quad (4.45)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.43) και (4.44) στην εξίσωση (4.45) προκύπτει:

$$\frac{P_{loss,k \neq m}}{P_{loss,k=m}} > 1 \quad (4.46)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (4.46), οι απώλειες ελαχιστοποιούνται όταν η ΜΔΠ που χρησιμοποιείται για ρύθμιση τάσης είναι τοποθετημένη στον κόμβο που ρυθμίζεται η τάση του [16]. Σε αυτό το συμπέρασμα βασίζεται ο υβριδικός αλγόριθμος που θα αναπτυχθεί στην Ενότητα 4.5.



Σχήμα 4.7 : Σχηματικό διάγραμμα ακτινικού δικτύου μόνο με ΜΔΠ

4.5 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Στο δίκτυο του Σχήματος 4.7, το οποίο περιέχει μόνο ΜΔΠ, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο τέλος της γραμμής διανομής. Συνεπώς, σε περίπτωση υπέρτασης, η ΜΔΠ που βρίσκεται στον τελευταίο κόμβο θα πρέπει να απορροφήσει άεργο ισχύ για να μειώσει την τάση, ώστε να επιτευχθεί ελάχιστη αύξηση στις απώλειες ενεργού ισχύος.

Η ανύψωση τάσης μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων υπολογίζεται σύμφωνα με [16]:

$$V_{i-1} \cos \theta - V_i = -\frac{P_i R_i + Q_i X_i}{V_i} \quad (4.47)$$

$$\sin \theta = \frac{Q_i R_i - P_i X_i}{V_i V_{i-1}} \quad (4.48)$$

όπου, V_{i-1} και V_i είναι τα μέτρα των τάσεων, θ είναι διαφορά φάσης των δύο τάσεων και P_i , Q_i είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα που ρέουν στον κλάδο. Αν οι ΜΔΠ είναι τοποθετημένες στο τέλος της γραμμής διανομής, τότε η ισχύς που ρέει στους κλάδους είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα να είναι αμελητέα η διαφορά φάσης μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων. Σε αυτή την περίπτωση η γωνία θ θεωρείται μηδέν και η ανύψωση τάσης μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων μηδενίζεται όταν η άεργος ισχύς που ρέει στον κλάδο είναι [16]:

$$Q_i = -\frac{R_i}{X_i} P_i \quad (4.49)$$

Σε περίπτωση υπέρτασης, αν η ΜΔΠ του τελευταίου κόμβου λειτουργεί σύμφωνα με την εξίσωση (4.49), οι τάσεις των δύο τελευταίων κόμβων γίνονται ίσες. Στο σημείο αυτό, η ΜΔΠ του προτελευταίου κόμβου αναλαμβάνει τη ρύθμιση τάσης και λειτουργεί σύμφωνα με την εξίσωση (4.49). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κατά μήκος της γραμμής διανομής μέχρι να επιτευχθεί η ρύθμιση τάσης και να εξαληφθεί η υπέρταση. Κατά συνέπεια, η διείσδυση ΔΠ μπορεί να περιοριστεί μόνο από τα θερμικά όρια της γραμμής καθώς η τάση ρυθμίζεται από τις ΜΔΠ [16].

Κάτω από συνθήκες μέγιστης παραγωγής, οι ΜΔΠ που συμμετέχουν στη ρύθμιση τάσης πρέπει να είναι έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης ισχύος ίσης με της εξίσωσης (4.49). Η προαναφερθείσα λειτουργία αντιστοιχεί στη λειτουργία ελάχιστου συντελεστή ισχύος. Ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος είναι ανάλογος του λόγου R/X του κλάδου ανάμεσα στον κόμβο που συμμετέχει στη ρύθμιση τάσης και στον προηγούμενό του. Ως αποτέλεσμα, η ΜΔΠ που συμμετέχει στη ρύθμιση τάσης πρέπει να υπερδιαστασιολογηθεί κατά έναν παράγοντα υπερδιαστασιολόγησης ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με:

$$D = \sqrt{1 + \left(\frac{R_i}{X_i}\right)^2} \quad (4.50)$$

Η υπερδιαστασιολόγηση σύμφωνα με την εξίσωση (4.50) είναι αναγκαία συνθήκη για να εφαρμοστεί το παραπάνω σχήμα ρύθμισης τάσης. Η υπερδιαστασιολόγηση εφαρμόζεται

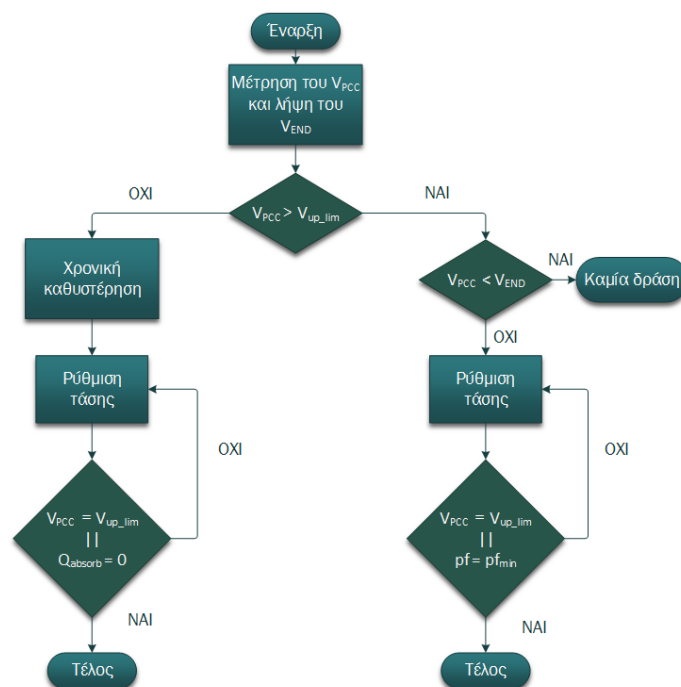
μόνο στις ΜΔΠ που βρίσκονται στους τελευταίους κόμβους της γραμμής διανομής και είναι πιο πιθανό να εμφανίσουν υπερτάσεις. Οι υπόλοιπες ΜΔΠ δεν χρειάζεται να συνεισφέρουν στη ρύθμιση τάσης μέσω απορρόφησης αέργου ισχύος άρα δεν χρειάζονται υπερδιαστασιολόγηση και λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο αριθμός των υπερδιαστασιολογημένων μονάδων των τελευταίων κόμβων καθορίζεται από ανάλυση ροής ισχύος. Η ικανότητα απορρόφησης αέργου ισχύος των υπερδιαστασιολογημένων μονάδων καθορίζεται από την εξίσωση (4.51) [16].

$$Q_{\max,i} = \sqrt{(D_i P_{\max,i})^2 - (P_i)^2} \quad (4.51)$$

Στην εξίσωση (4.51), $Q_{\max,i}$ είναι η μέγιστη άεργος ισχύς που μπορεί να παρέχει η ΜΔΠ κάθε χρονική στιγμή, $P_{\max,i}$ είναι η μέγιστη ενεργός ισχύς της μονάδας και P_i είναι η στιγμιαία ενεργός ισχύς που παράγει.

Επιπρόσθετα, ο λόγος R/X των γραμμών διανομής είναι συνήθως κοντά στο 1, το οποίο αντιστοιχεί σε ΣΙ κοντά στο 0.7 επαγωγικό και σε παράγοντα υπερδιαστασιολόγησης 1.41. Σε περίπτωση που οι ΜΔΠ συνδέονται στο δίκτυο μέσω αντιστροφών, η απόδοση παραμένει υψηλή ενώ το επιπρόσθετο κόστος υπερδιαστασιολόγησης είναι χαμηλό [16].

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε, στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του υβριδικού αλγορίθμου. Ονομάζεται υβριδικός γιατί δεν ανήκει σε κάποια από τις κατηγορίες ελέγχου που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4.2 και εφαρμόζεται μόνο στις υπερδιαστασιολογημένες ΜΔΠ. Δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής που να συντονίζει τις ΜΔΠ ώστε να εμπίπτει στην κατηγορία κεντρικού ελέγχου. Επίσης, δεν επικοινωνούν όλες οι μονάδες μεταξύ τους για να ανήκει στον καταναμημένο έλεγχο. Ούτε στον τοπικό έλεγχο ανήκει, επειδή οι αποφάσεις των ΜΔΠ για έλεγχο αέργου ισχύος δεν λαμβάνονται μόνο από μετρήσεις στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο.



Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα ροής υβριδικού αλγορίθμου

Συγκεκριμένα, κάθε μονάδα μετράει την τάση στο PCC (V_{PCC}) και λαμβάνει την τάση του τελευταίου κόμβου (V_{END}). Η πληροφορία αυτή μπορεί να μεταδοθεί μέσω PLC. Όταν η τάση V_{PCC} ξεπεράσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο τάσης (V_{up_lim}), ο ελεγκτής της ΜΔΠ ελέγχει αν η τάση V_{END} είναι μεγαλύτερη από την τάση V_{PCC} . Αν είναι, τότε δεν γίνεται καμία δράση από την μονάδα καθώς σημαίνει ότι οι κοντινότερες ΜΔΠ στον τελευταίο κόμβο απορροφούν ακόμα άεργο ισχύ και δεν έχουν φτάσει στον ελάχιστο ΣΙ. Διαφορετικά, ξεκινάει η ΜΔΠ τη διαδικασία ρύθμισης τάσης απορροφώντας άεργο ισχύ μέχρι να εξαλειφθεί η υπέρταση ή μέχρι να φτάσει τον ελάχιστο ΣΙ. Όταν επιτευχθεί η ρύθμιση τάσης, όλες οι ΜΔΠ που συμμετείχαν συνεχίζουν να λειτουργούν με σταθερό ΣΙ.

Το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου αναφέρεται στην αντίστροφη διαδικασία κατά την οποία οι ΜΔΠ μειώνουν την απορροφούμενη άεργο ισχύ και αυξάνουν τον ΣΙ. Συνεπώς, σε περίπτωση που η τάση V_{PCC} πέσει κάτω από το όριο V_{up_lim} , η ΜΔΠ μειώνει την άεργο ισχύ που απορροφά είτε μέχρι να φτάσει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος είτε η τάση V_{PCC} να εξισωθεί με την τάση V_{up_lim} . Για να διασφαλιστεί ότι η διαδικασία αυτή ενεργοποιείται ξεχωριστά στις ΜΔΠ, εισάγεται χρονική καθυστέρηση στην κάθε ΜΔΠ. Δηλαδή από την στιγμή που η τάση V_{PCC} πέσει κάτω από το ανώτατο όριο V_{up_lim} , πρώτη θα ενεργήσει η ΜΔΠ που είναι πιο κοντά στο υποσταθμό και τελευταία θα μειώσει την απορροφούμενη άεργο ισχύ η ΜΔΠ που βρίσκεται στον τελευταίο κόμβο [16].

4.6 ΑΥΤΟΝΟΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΤΑΣΗΣ

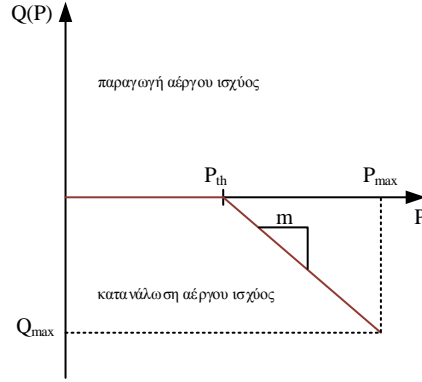
Οι αυτόνομοι έλεγχοι τάσης περιλαμβάνουν τις τεχνικές ρύθμισης τάσης κατά τις οποίες οι αποφάσεις για τη λειτουργία της ΜΔΠ λαμβάνονται ξεχωριστά από την κάθε μονάδα χωρίς να υπάρχει επικοινωνία με τις υπόλοιπες. Οι αποφάσεις για τον έλεγχο αέργου ισχύος μπορεί είτε να λαμβάνονται από μετρήσεις στο PCC είτε να είναι καθορισμένες εξαρχής για την ΜΔΠ. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν ο έλεγχος droop – Q(P) όπου η απορροφούμενη άεργος ισχύς είναι συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος, ο έλεγχος σταθερού συντελεστή ισχύος όπου καθορίζεται εξαρχής ο ΣΙ λειτουργίας της ΜΔΠ και ένας συνδυασμένος έλεγχος όπου αποκόπτεται ενεργός ισχύς και ελέγχεται η άεργος.

4.6.1 Έλεγχος droop – Q(P)

Στον έλεγχο droop, η ενεργός ισχύς που εγχέεται από την ΜΔΠ του κάθε κόμβου χρησιμοποιείται σαν είσοδος ώστε να υπολογιστεί η απαιτούμενη άεργος ισχύς για τη ρύθμιση της τάσης [20]. Η σχέση ανάμεσα στην ενεργό και την άεργο ισχύ του ΦΒ συστήματος είναι:

$$Q = \begin{cases} m(P - P_{th}) & P > P_{th} \\ 0 & P < P_{th} \end{cases} \quad (4.52)$$

όπου m είναι ο συντελεστής κλίσης και P_{th} είναι το κατώφλι (threshold) ενεργού ισχύος από το οποίο και πάνω θα ξεκινήσει να καταναλώνει άεργο ισχύ η ΜΔΠ για να μετριάσει την ανύψωση τάσης. Άρα, για την εφαρμογή του ελέγχου, απαιτείται η εύρεση των δύο παραμέτρων m και P_{th} για την κάθε ΜΔΠ που είναι συνδεδεμένη στους κόμβους της γραμμής διανομής [20]. Η γραφική παράσταση της καμπύλης Q(P) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 : Καμπύλη $Q(P)$ ελέγχου droop

Δεδομένου του δικτύου του Σχήματος 4.7, επειδή η γραμμή διανομής περιλαμβάνει μόνο ΔΠ, ο τελευταίος κόμβος n θα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τάση. Συνεπώς, αν το σχήμα ελέγχου διασφαλίζει πως η τάση του τελευταίου κόμβου είναι κάτω από το ανώτατο όριο, τότε όλες οι τάσεις της γραμμής διανομής θα είναι κάτω από το ανώτατο όριο. Επιπρόσθετα, η μεγαλύτερη τάση στον τελευταίο κόμβο θα εμφανίζεται κατά τη μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος, δηλαδή όταν όλες οι ΜΔΠ παράγουν την ονομαστική ισχύ τους, αυτό το σημείο λειτουργίας είναι το κρίσιμο σημείο. Για αυτόν τον λόγο οι δύο παράμετροι της εξίσωσης (4.52) θα υπολογιστούν από την ανάλυση ευαισθησίας έτσι ώστε η τάση του τελευταίου κόμβου να είναι εντός ορίων.

Έστω ΔV_n η μεταβολή της τάσης του τελευταίου κόμβου. Η άεργος ισχύς της ΜΔΠ κάθε κόμβου πρέπει να ελέγχεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται ότι η μεταβολή της τάσης του τελευταίου κόμβου είναι μηδενική [20].

$$\Delta V_n = 0 \quad (4.53)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.53) στην εξίσωση (4.25) για $i=n$ προκύπτει:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_n}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial V_n}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) = 0 \quad (4.54)$$

Η σχέση μεταξύ των μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος του ΦΒ συστήματος του κόμβου i εκφράζεται ως ακολούθως [20]:

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= m_i \Delta P_i \\ Q_i - Q_{th,i} &= m_i (P_i - P_{th,i}) \end{aligned} \quad \forall i \quad (4.55)$$

Θεωρώντας πως η ρύθμιση της τάσης θα ξεκινήσει μετά το $P_{th,i}$, ο όρος $Q_{th,i}$ θεωρείται 0 (Σχήμα 4.9) [20]. Όπου m_i είναι η κλίση της καμπύλης $Q(P)$ της ΜΔΠ του κόμβου i . Αντικαθιστώντας την (4.55) στην (4.54) προκύπτει η εξίσωση (4.56).

$$m_i = -\frac{\frac{\partial V_n}{\partial P_i}}{\frac{\partial V_n}{\partial Q_i}} \quad \forall i \quad (4.56)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.32) και (4.33) και θεωρώντας πως ο λόγος R/X διατηρείται σταθερός κατά μήκος της γραμμής διανομής προκύπτει η εξίσωση (4.57) για την κλίση m_i .

$$m_i = -\frac{R}{X} \quad (4.57)$$

Από την εξίσωση (4.52), η απαιτούμενη άεργος ισχύς σε κάθε κόμβο i του δικτύου προκύπτει από την εξίσωση (4.58).

$$Q_i = \begin{cases} m_i(P_i - P_{th,i}) & P_i > P_{th,i} \\ 0 & P_i < P_{th,i} \end{cases} \quad \forall i \quad (4.58)$$

Η παράμετρος $P_{th,i}$ προσαρμόζεται έτσι ώστε να ρυθμίζεται η τάση στο κρίσιμο σημείο. Στο κρίσιμο σημείο ισχύει:

$$P_i = P_{\max,i} \quad \forall i \quad (4.59)$$

Έστω $V_{\max,n}$ η τάση του τελευταίου κόμβου στο κρίσιμο σημείο χωρίς να γίνεται έλεγχος αέργου ισχύος. Η τάση μετά τον έλεγχο αέργου ισχύος στο κρίσιμο σημείο θα πρέπει να ισούται με το άνω όριο της τάσης $V_{\text{up_lim}}$. Για αυτόν τον λόγο, η άεργος ισχύς που απορροφάται από τις ΦΒ μονάδες πρέπει να μεταβάλλει την τάση του τελευταίου κόμβου κατά:

$$\Delta V_{\max,n} = V_{\max,n} - V_{\text{up_lim}} \quad (4.60)$$

Αντικαθιστώντας το $\Delta V_{\max,n}$ στην εξίσωση (4.25) και λαμβάνοντας υπόψη πως η ενεργός ισχύς της κάθε ΜΔΠ δεν μεταβάλλεται, άρα $\Delta P_i = 0$, καθώς όλες παράγουν την ονομαστική ισχύ τους, θα ισχύει:

$$\Delta V_{\max,n} = -\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_n}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \quad (4.61)$$

Το αρνητικό πρόσημο της εξίσωσης (4.61) εμφανίζεται λόγω του ότι η απαιτούμενη άεργος ισχύς είναι αρνητική (Σχήμα 4.9). Επιπρόσθετα, αν θεωρηθεί ότι όλες οι ΜΔΠ στους n κόμβους πρέπει να συνεισφέρουν την ίδια άεργο ισχύ στο κρίσιμο σημείο για τη ρύθμιση τάσης θα ισχύει πως [20]:

$$\Delta Q_i = Q_{\max} \quad \forall i \quad (4.62)$$

Αντικαθιστώντας την (4.62) στην (4.61) προκύπτει η εξίσωση (4.63).

$$Q_{\max} = - \frac{\Delta V_{\max, n}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_n}{\partial Q_i} \right)} \quad (4.63)$$

Αρα, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.58) $P_i = P_{\max, i}$ και $Q_i = Q_{\max}$ προκύπτει:

$$P_{th, i} = P_{\max, i} - \frac{Q_{\max}}{m_i} \quad \forall i \quad (4.64)$$

Τελικά από τις εξισώσεις (4.56) και (4.64) προκύπτουν για κάθε κόμβο i του δικτύου οι δύο παραμέτροι της εξίσωσης (4.58), σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η απαιτούμενη άεργος ισχύς που απορροφούν τα ΦΒ ώστε να ρυθμίζεται η τάση.

Για την εφαρμογή του παραπάνω ελέγχου, είναι απαραίτητο να υπερδιαστασιολογηθούν όλες οι ΜΔΠ που συμμετέχουν στον έλεγχο έτσι ώστε να έχουν την ικανότητα να απορροφούν την απαιτούμενη άεργο ισχύ $Q_{\max, i}$ κατά τη μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος $P_{\max, i}$. Ο παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης βρίσκεται από την σχέση (4.65).

$$D_i = \sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\max, i}}{P_{\max, i}} \right)^2} \quad \forall i \quad (4.65)$$

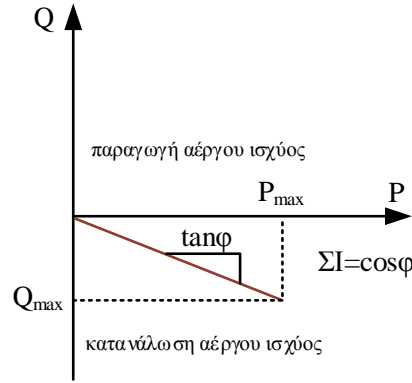
4.6.2 Έλεγχος σταθερού συντελεστή ισχύος

Μια εύκολα υλοποιήσιμη και φθηνή λύση για τη μετρίαση της ανύψωσης τάσης είναι η λειτουργία των ΦΒ συστημάτων υπό σταθερό επαγωγικό συντελεστή ισχύος [21], [22]. Με αυτή την τεχνική, καθόλη την διάρκεια λειτουργίας της μονάδας ο ΣΙ διατηρείται σταθερός. Η σχέση της απορροφούμενης άεργου ισχύος με την παραγόμενη ενεργό ισχύ περιγράφεται από την εξίσωση (4.67). Η καμπύλη Q-P παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 4.10.

$$\Sigma I = \cos \varphi \quad (4.66)$$

$$Q = \tan \varphi \cdot P \quad (4.67)$$

Για την εύρεση του ΣΙ λειτουργίας των μονάδων θα γίνει χρήση της ανάλυσης ευαισθησίας και της αντίστοιχης λογικής με την Ενότητα 4.5.1 όπου σκοπός είναι η ρύθμιση της τάσης του τελευταίου κόμβου ώστε να βρίσκεται εντός ορίων στο κρίσιμο σημείο. Σε αντίθεση με την προηγούμενη προσέγγιση όμως, όπου θεωρήθηκε πως όλες οι ΜΔΠ πρέπει να απορροφήσουν την ίδια άεργο ισχύ (4.59) (ανεξαρτήτως ονομαστικής ισχύος) για την ρύθμιση της τάσης στο κρίσιμο σημείο, στον έλεγχο σταθερού ΣΙ γίνεται η υπόθεση ότι κάθε ΜΔΠ θα απορροφήσει άεργο ισχύ ανάλογα με την ονομαστική ισχύ της. Ως αποτέλεσμα, όλα τα ΦΒ θα λειτουργούν με ίδιο ΣΙ.



Σχήμα 4.10 : Καμπύλη Q-P σταθερού συντελεστή ισχύος

Στο κρίσιμο σημείο λειτουργίας ισχύει η σχέση (4.59) και η άεργος ισχύς που απορροφάται από τις ΜΔΠ πρέπει να μεταβάλλει την τάση του τελευταίου κόμβου κατά $\Delta V_{\max,n}$. Επίσης, ισχύει:

$$\Delta V_{\max,n} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_n}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \quad (4.68)$$

Έστω $\cos\varphi$, ο ΣΙ που πρέπει να λειτουργούν όλες οι ΜΔΠ ώστε να ρυθμιστεί η τάση στο κρίσιμο σημείο. Η άεργος ισχύς που πρέπει να απορροφήσει η κάθε μονάδα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\Delta Q_i = P_{\max,i} \tan \varphi \quad \forall i \quad (4.69)$$

Αντικαθιστώντας την (4.69) στην (4.68) και λύνοντας ως προς $\tan\varphi$ προκύπτει:

$$\tan \varphi = \frac{\Delta V_{\max,n}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_n}{\partial Q_i} P_{\max,i} \right)} \quad (4.70)$$

Τελικά, ο ΣΙ υπολογίζεται από την σχέση (4.71).

$$\Sigma I = \cos(\text{Arc tan}(\tan \varphi)) \quad (4.71)$$

Η άεργος ισχύς της κάθε μονάδας υπολογίζεται από την εξίσωση (4.72).

$$Q_i = \tan \varphi \cdot P_i \quad \forall i \quad (4.72)$$

Ο παράγοντας υπερδιαστασιασολόγησης της κάθε ΜΔΠ υπολογίζεται από:

$$D = \sqrt{1 + (\tan \varphi)^2} \quad (4.73)$$

4.6.3 Συνδυασμός αποκοπής ενεργού ισχύος και ελέγχου αέργου ισχύος

Οι έλεγχοι τάσης που παρουσιάστηκαν, υβριδικός αλγόριθμος, έλεγχος Q(P) και ο έλεγχος σταθερού ΣΙ, στηρίζονται στην απορρόφηση αέργου ισχύος από τα ΦΒ συστήματα για τη ρύθμιση της τάσης. Επιπρόσθετα, όσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος τόσο μεγαλύτερη είναι και η αέργος ισχύς που απαιτείται για τη ρύθμιση της τάσης. Σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ, η αυξημένη ροή ενεργού και αέργου ισχύος στις περιόδους μέγιστης παραγωγής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να ξεπεράσει το θερμικό όριο των γραμμών διανομής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να γίνει αποκοπή ενεργού ισχύος ώστε να μην παραβιάζεται το ανώτατο ρεύμα της γραμμής και να μην υπερφορτώνεται το δίκτυο. Ωστόσο, η αποκοπή ενεργού ισχύος έχει άμεση επίδραση στο κέρδος του ιδιοκτήτη των ΦΒ λόγω της μείωσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο, για να ελαχιστοποιηθεί η αποκοπή ενεργού ισχύος ενδείκνυται ο συνδυασμός της με απορρόφηση αέργου ισχύος από τις ΦΒ μονάδες [23].

Επιπρόσθετα, οι προηγούμενες μέθοδοι ρύθμισης τάσης που αναπτύχθηκαν απαιτούν υπερδιαστασιολόγηση των αντιστροφών, το οποίο αυξάνει το κόστος. Αν δεν υπερδιαστασιολογηθεί ο αντιστροφάς, όταν το ΦΒ σύστημα παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ τότε δεν μπορεί να απορροφηθεί αέργος ισχύς. Σε περίπτωση που αποκόπτεται ενεργός ισχύς, υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης αέργου ισχύος χωρίς να χρειαστεί υπερδιαστασιολόγηση ο αντιστροφάς. Η μέγιστη αέργος ισχύς Q_{PV} , που μπορεί να παραχθεί ή να καταναλωθεί από έναν μη υπερδιαστασιολογημένο αντιστροφά, περιορίζεται από την ονομαστική φαινόμενη ισχύ S_{Nom} και τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ P_{PV} και περιγράφεται από τις εξισώσεις (4.74) και (4.75). Για τη μέγιστη ενεργό ισχύ $P_{PV,max}$ ισχύει η εξίσωση (4.76) [24].

$$(P_{PV})^2 + (Q_{PV})^2 \leq (S_{Nom})^2 \quad (4.74)$$

$$|Q_{PV}| \leq \sqrt{(S_{Nom})^2 - (P_{PV})^2} \quad (4.75)$$

$$P_{PV,max} = S_{Nom} \quad (4.76)$$

Στόχος είναι η δημιουργία ενός σχήματος αυτόνομου ελέγχου ρύθμισης τάσης, που αποκόπτει ενεργό ισχύ από τα ΦΒ συστήματα και παράλληλα απορροφά αέργο ισχύ ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος υπερφόρτωσης του δικτύου. Λόγω της αποκοπής ενεργού ισχύος δεν θα γίνει υπερδιαστασιολόγηση των αντιστροφών. Η απορρόφηση της αέργου ισχύος θα γίνεται με τη μέθοδο του σταθερού συντελεστή ισχύος. Ο κίνδυνος υπερφόρτωσης υπάρχει όταν τα ΦΒ παράγουν τη μέγιστη ονομαστική ενεργό ισχύ $P_{PV,max}$. Επίσης, θεωρείται ότι στην αποκοπή ισχύος συνεισφέρουν ισότιμα τα ΦΒ πεδία του δικτύου αποκόπτοντας το ίδιο ποσοστό της παραγόμενης ενεργού ισχύος, δηλαδή ισχύει [23]:

$$P_{PV,curt} = c \cdot P_{PV,max} \quad (4.77)$$

Συντελεστής αποκοπής: c

$$0 < c < 1$$

Άρα, πρέπει να εκφραστεί ο ελάχιστος επιτρεπτός ΣΙ συναρτήσει του συντελεστή αποκοπής c ώστε να μην χρειάζεται υπερδιαστασιολόγηση ο αντιστροφέας. Η παρεχόμενη ισχύς του ΦΒ συστήματος μετά την αποκοπή υπό συνθήκες μέγιστης παραγωγής θα είναι:

$$P_{PV} = P_{PV, \max} - P_{PV, \text{curt}} = P_{PV, \max} - (c \cdot P_{PV, \max}) = (1 - c) \cdot P_{PV, \max} \quad (4.78)$$

Η απορρόφηση αέργου ισχύος γίνεται με τη μέθοδο του σταθερού ΣΙ, συνεπώς η άεργος ισχύς που απορροφάται υπολογίζεται:

$$Q_{PV} = \tan \varphi \cdot P_{PV} = \tan \varphi \cdot (1 - c) \cdot P_{PV, \max} \quad (4.79)$$

$$\Sigma I = \cos \varphi$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4.76), (4.78) και (4.79) στην (4.75) προκύπτει:

$$|\tan \varphi \cdot (1 - c) \cdot P_{PV, \max}| \leq \sqrt{(P_{PV, \max})^2 - ((1 - c) \cdot P_{PV, \max})^2} \quad (4.80)$$

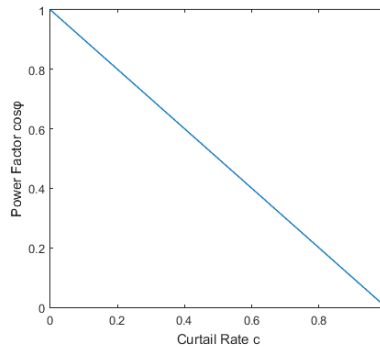
$$|\tan \varphi| \leq \frac{\sqrt{1 - (1 - c)^2}}{(1 - c)} \quad (4.81)$$

Η μέγιστη απορροφούμενη άεργος ισχύς άρα και ο ελάχιστος επιτρεπτός ΣΙ προκύπτει όταν ισχύει:

$$|\tan \varphi| = \frac{\sqrt{1 - (1 - c)^2}}{(1 - c)} = f(c) \quad c \in (0, 1) \quad (4.82)$$

$$\Sigma I = \cos \varphi = \cos(\text{Arc tan}(\tan \varphi)) = g(c) \quad c \in (0, 1) \quad (4.83)$$

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η γραφική παράσταση του $\Sigma I = \cos \varphi$ συναρτήσει του συντελεστή αποκοπής c . Κάθε σημείο της γραφικής παράστασης δηλώνει ποιος είναι ο ελάχιστος επιτρεπτός ΣΙ για το αντίστοιχο ποσοστό αποκοπής ισχύος ώστε να μην απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση του αντιστροφέα.



Σχήμα 4.11 : Καμπύλη $\cos \varphi - c$

Η τελική εύρεση του ελάχιστου ποσοστού αποκοπής γίνεται εφαρμόζοντας ανάλυση ροής ισχύος για τα σημεία της καμπύλης του Σχήματος 4.11 για όλα τα ΦΒ του δικτύου. Για ένα ακτινικό δίκτυο σαν αυτό του Σχήματος 4.7 που αποτελείται από n κόμβους κάθε ΦΒ πεδίο που είναι συνδεδεμένο στον κόμβο i έχει ονομαστική ισχύ $P_{PV,max,i}$. Η ροή ισχύος εφαρμόζεται για:

$$P_{PV,i} = (1-c) \cdot P_{PV,max,i} \quad \forall i \quad (4.84)$$

$$Q_{PV,i} = \tan \varphi \cdot (1-c) \cdot P_{PV,max,i} = f(c) \cdot (1-c) \cdot P_{PV,max,i} \quad \forall i \quad (4.85)$$

$$c \in (0,1)$$

Η μικρότερη τιμή c για την οποία επιτυγχάνεται ρύθμιση τάσης και το ρεύμα γραμμής δεν ξεπερνά το ανώτατο όριο αποτελεί τον ελάχιστο συντελεστή αποκοπής. Από τις εξισώσεις (4.82) και (4.83) βρίσκεται ο συντελεστής ισχύος λειτουργίας των ΦΒ.

Εφόσον βρεθεί ο συντελεστής αποκοπής ενεργού ισχύος και ο συντελεστής ισχύος είναι εφικτό να εφαρμοστούν διάφορες στρατηγικές αυτόνομου ελέγχου για τη λειτουργία του συστήματος.

4.7 Μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης για αποφυγή υπερφόρτωσης των γραμμών διανομής

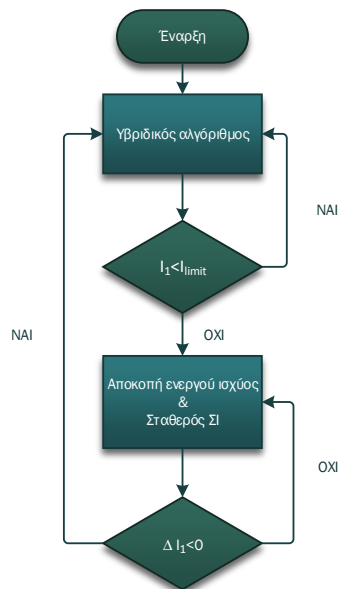
Στην Ενότητα 4.6 αναπτύχθηκε ένα σχήμα ρύθμισης τάσης όπου αποκόπτεται ενεργός ισχύς από τα ΦΒ συστήματα και γίνεται έλεγχος αέργου ισχύος μέσω σταθερού ΣΙ. Στόχος του ελέγχου είναι η ρύθμιση της τάσης ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος υπερφόρτωσης του δικτύου. Επιπρόσθετα, ο συγκεκριμένος έλεγχος έχει το πλεονέκτημα πως δεν χρειάζεται να υπερδιαστασιολογηθεί κανένας αντιστροφέας. Παρόλα αυτά, η αποκοπή ενεργού ισχύος καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας δεν αποτελεί την πλέον αποδοτική επιλογή λαμβάνοντας υπόψη την απώλεια κέρδους του ιδιοκτήτη των ΦΒ μονάδων.

Στο ακτινικό δίκτυο διανομής του Σχήματος 4.7, λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος, η μέγιστη τιμή του ρεύματος σε όλη τη γραμμή διανομής εμφανίζεται στον κλάδο 1. Συνεπώς, αν το ρεύμα που ρέει στον πρώτο κλάδο δεν ξεπερνά το ανώτατο όριο, δεν υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτωσης της γραμμής διανομής. Επίσης, ο κίνδυνος υπερφόρτωσης κάνει την εμφάνισή του σε περιόδους μέγιστης ακτινοβολίας όπου τα ΦΒ παράγουν μέγιστη ενεργό ισχύ. Άρα, όταν το δίκτυο δεν βρίσκεται στο κρίσιμο σημείο λειτουργίας, η χρήση μόνο αέργου ισχύος μπορεί να ρυθμίσει την τάση λαμβάνοντας υπόψη το θερμικό όριο των γραμμών διανομής. Για αυτόν τον λόγο, προτείνεται ένα μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης, όπου όσο το ρεύμα του πρώτου κλάδου είναι εντός του ανωτάτου ορίου, η ρύθμιση τάσης γίνεται με έλεγχο αέργου ισχύος. Για τον έλεγχο αέργου ισχύος επιλέγεται ο υβριδικός αλγόριθμος, καθώς όπως αναπτύχθηκε στην Ενότητα 4.5, επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος. Διαφορετικά, αν ο υβριδικός αλγόριθμος δεν μπορεί να ρυθμίσει την τάση λαμβάνοντας υπόψη τα θερμικά όρια της γραμμής διανομής, εφαρμόζεται αυτόνομος έλεγχος όπου αποκόπτεται ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς ελέγχεται με σταθερό ΣΙ.

Το διάγραμμα ροής του μεικτού σχήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12. Για την εφαρμογή του μεικτού σχήματος απαιτείται η χρήση ενός ελεγκτή ο οποίος παρακολουθεί το ρεύμα I_1 του πρώτου κλάδου. Κατά την έναρξη του ελέγχου, αναλαμβάνει τη ρύθμιση τάσης ο

υβριδικός αλγόριθμος. Όσο το ρεύμα I_1 δεν ξεπερνάει το ανώτατο όριο I_{limit} η ρύθμιση της τάσης πραγματοποιείται από τον υβριδικό αλγόριθμο. Αν το ανώτατο ρεύμα ξεπεραστεί, ο ελεγκτής στέλνει σήμα σε όλες τις ΜΔΠ να προχωρήσουν σε αποκοπή ενεργού ισχύος με σταθερό ΣΙ. Όταν το δίκτυο βρίσκεται υπό τον αυτόνομο έλεγχο, αν υπάρξει αύξηση της παραγωγής από τις ΜΔΠ άρα και αύξηση του ρεύματος I_1 ($\Delta I_1 > 0$), τότε σημαίνει πως πρέπει να παραμείνει στην κατάσταση του αυτόνομου ελέγχου. Αντίθετα, αν μειωθεί η παραγωγή από τις ΜΔΠ, άρα αν μειωθεί το ρεύμα I_1 ($\Delta I_1 < 0$) τότε το δίκτυο ίσως μπορεί να ρυθμιστεί από τον υβριδικό αλγόριθμο. Συνεπώς, ο ελεγκτής στέλνει σήμα στις ΜΔΠ να υλοποιήσουν τον υβριδικό αλγόριθμο ρύθμισης τάσης.

Όπως αναπτύχθηκε στην Ενότητα 4.5, για την υλοποίηση του υβριδικού αλγορίθμου απαιτείται να υπερδιαστασιοποιηθούν μόνο οι αντιστροφείς των ΦΒ μονάδων που βρίσκονται στους τελευταίους κόμβους. Αντίστοιχα, στον αυτόνομο έλεγχο αποκοπής ενεργού ισχύος με σταθερό ΣΙ δεν απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση κανενός αντιστροφέα. Ως συνέπεια, ο συνδυασμός των δύο μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί υπερδιαστασιολογώντας μόνο τους αντιστροφείς των ΦΒ μονάδων των τελευταίων κόμβων. Αν για τον έλεγχο αέργου ισχύος επιλέγονταν ο έλεγχος droop ή ο έλεγχος σταθερού ΣΙ, τότε για τον συνδυασμό τους με τον έλεγχο αποκοπής ενεργού ισχύος και σταθερού ΣΙ θα ήταν απαραίτητη η υπερδιαστασιολόγηση όλων των αντιστροφέων των ΦΒ μονάδων.



Σχήμα 4.12 : Διάγραμμα ροής μεικτού σχήματος ρύθμισης τάσης

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

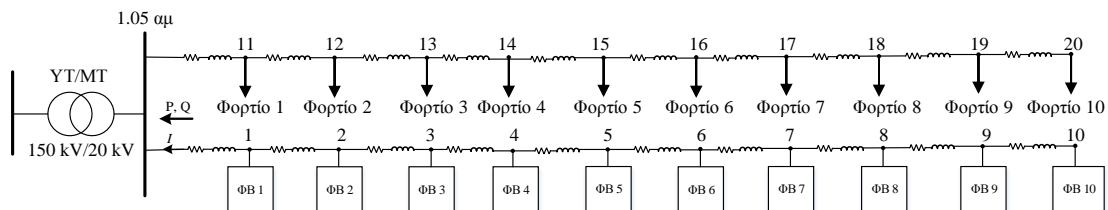
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών των τεχνικών ρύθμισης τάσης που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Οι προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου έγιναν στο Simulink του MATLAB R2015a. Για την ανάλυση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έγινε χρήση του MATPOWER [25].

5.2 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 20 ΚΟΜΒΩΝ

Το δίκτυο 20 κόμβων που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.1 είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με έναν υποσταθμό και δύο γραμμές διανομής. Οι δύο γραμμές είναι πανομοιότυπες, περιλαμβάνουν 10 κόμβους η κάθε μία και οι αποστάσεις των κόμβων φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Η σύνθετη αντίσταση και το θερμικό όριο της γραμμής διανομής είναι $0.404+j0.386 \Omega/\text{km}$ και 296A αντίστοιχα. Η ονομαστική ισχύς των ΦΒ μονάδων και των φορτίων του κάθε κόμβου αναγράφονται στον Πίνακα 5.2. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς διανεμημένης παραγωγής είναι 10.6 MW. Ο ΣΙ όλων των φορτίων θεωρείται σταθερός και είναι 0.95 επαγωγικός. Ο Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ είναι 150/20 kV και είναι συνδεσμολογίας Dy5. Η τάση του υποσταθμού μέσης τάσης έχει σταθερό μέτρο 1.05 ανά μονάδα (αμ). Τα όρια της τάσης του δικτύου είναι $\pm 10\%$ της ονομαστικής, δηλαδή το ανώτατο όριο είναι $V_{up_lim}=1.1\alpha\mu$ (per unit – pu).



Σχήμα 5.1 : Ακτινικό δίκτυο διανομής 20 κόμβων

Πίνακας 5.1 : Μήκος γραμμών

Γραμμή	ΜΤ-1	1-2	2-3	3-4	4-5
	ΜΤ-11	11-12	12-13	13-14	14-15
Μήκος γραμμής (km)	2	3	2	2	1
Γραμμή	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
Μήκος γραμμής (km)	3	2	3	4	3

Πίνακας 5.2 : Ονομαστική ενεργός ισχύς ΦΒ μονάδων και φορτίων

ΦΒ μονάδα	ΦΒ 1	ΦΒ 2	ΦΒ 3	ΦΒ 4	ΦΒ 5
MW	0.8	0.5	1.5	0.5	0.5
ΦΒ μονάδα	ΦΒ 6	ΦΒ 7	ΦΒ 8	ΦΒ 9	ΦΒ 10
MW	1	1.5	1.5	2	0.8
Φορτίο	Φορτίο 1	Φορτίο 2	Φορτίο 3	Φορτίο 4	Φορτίο 5
MW	0.75	0.25	0.8	1	0.5
Φορτίο	Φορτίο 6	Φορτίο 7	Φορτίο 8	Φορτίο 9	Φορτίο 10
MW	0.8	0.5	0.7	0.25	0.5

5.2.1 Προσομοίωση υβριδικού αλγορίθμου

Για την υλοποίηση του υβριδικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 4.5, απαιτείται η εύρεση των ΦΒ μονάδων που υλοποιούν τον αλγόριθμο και οι αντιστροφείς τους χρειάζονται υπερδιαστασιολόγηση σύμφωνα με την εξίσωση (4.47). Από την εξίσωση (4.46), προκύπτει πως για το παραπάνω δίκτυο η άεργος ισχύς που απαιτείται από την τελευταία ΦΒ μονάδα για να εξισώσει την τάση V_{10} με την τάση V_9 είναι :

$$Q_{10} = -\frac{0.404}{0.386}P_{10} = -1.0466P_{10} \quad (5.1)$$

όπου P_{10} η παραγόμενη ενεργός ισχύς της μονάδας ΦΒ10.

Επιπρόσθετα, ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος λαμβάνεται από την εξίσωση (5.2) και ο παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης από την εξίσωση (5.3).

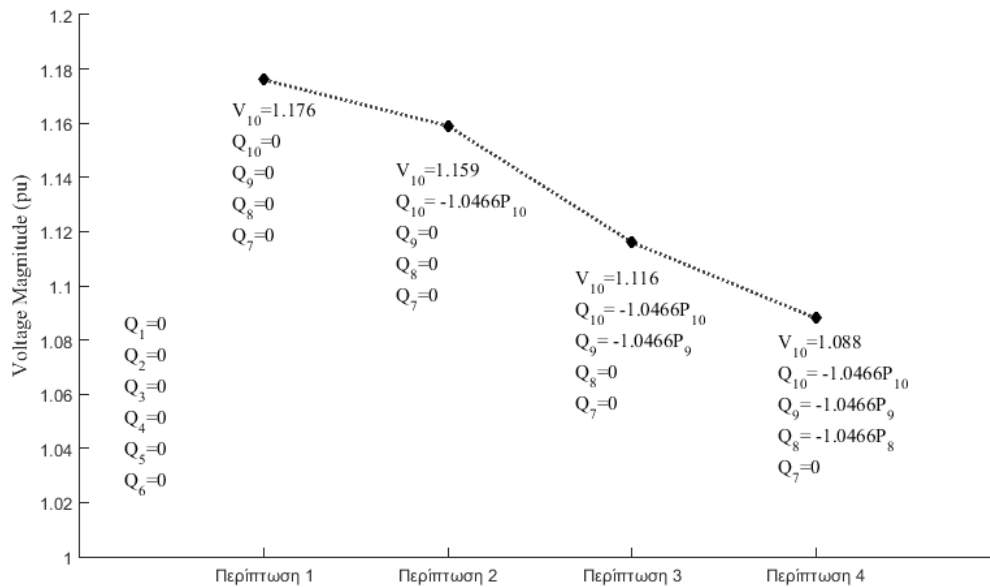
$$\Sigma I_{\min} = \frac{P_{10}}{\sqrt{(P_{10})^2 + (-1.0466P_{10})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+1.095}} = 0.69 \quad (5.2)$$

$$D = \sqrt{1 + \left(\frac{0.404}{0.386}\right)^2} = 1.44 \quad (5.3)$$

Για την εύρεση των υπερδιαστασιολογημένων αντιστροφών πραγματοποιείται ανάλυση ροής ισχύος, θεωρώντας πως όλες οι ΦΒ μονάδες παράγουν ονομαστική ενεργό ισχύ, δηλαδή το δίκτυο βρίσκεται στο κρίσιμο σημείο λειτουργίας. Η ροή ισχύος πραγματοποιείται στο MATPOWER με την μέθοδο Newton. Θα διακριθούν περιπτώσεις ανάλογα με τις ΦΒ μονάδες που συμμετέχουν στη ρύθμιση τάσης. Οι περιπτώσεις αναγράφονται στον Πίνακα 5.3. Επιπρόσθετα, η τάση του κόμβου 10, που προκύπτει από τη ροή ισχύος για την κάθε περίπτωση, αναπαριστάται γραφικά στο Σχήμα 5.2.

Πίνακας 5.3 : Εύρεση ΦΒ μονάδων που θα υλοποιήσουν τον υβριδικό αλγόριθμο

Περίπτωση 1	Καμία ΦΒ μονάδα δεν απορροφά άεργο ισχύ και όλες λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Από την ανάλυση ροής ισχύος προκύπτει πως η τάση του κόμβου 10 ισούται με 1.176 αμ και είναι εκτός του ανωτάτου ορίου.
Περίπτωση 2	Μόνο η μονάδα ΦΒ10 απορροφά άεργο ισχύ σύμφωνα με την εξίσωση (5.1), ενώ οι υπόλοιπες εννιά λειτουργούν με $\Sigma I=1$. Η τάση του κόμβου 10 ισούται με 1.159 αμ, όπου είναι εκτός ανωτάτου ορίου.
Περίπτωση 3	Οι δύο τελευταίες μονάδες, ΦΒ9 και ΦΒ10, απορροφούν άεργο ισχύ και λειτουργούν με τον ελάχιστο ΣI της εξίσωσης (5.2), ενώ οι υπόλοιπες οκτώ λειτουργούν με $\Sigma I=1$. Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση του κόμβου 10 είναι 1.116 και βρίσκεται εκτός ανωτάτου ορίου.
Περίπτωση 4	Οι τρεις τελευταίες μονάδες, ΦΒ8, ΦΒ9 και ΦΒ10, λειτουργούν με τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος της εξίσωσης (5.2), ενώ οι υπόλοιπες επτά λειτουργούν με $\Sigma I=1$. Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση του κόμβου 10 είναι 1.088 και είναι εντός ορίων.

**Σχήμα 5.2 :** Τάση του κόμβου 10

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει πως για να ρυθμιστεί η τάση της γραμμής διανομής που περιλαμβάνει μόνο ΦΒ όταν όλα παράγουν ονομαστική ισχύ, απαιτείται μόνο οι τελευταίες ΦΒ μονάδες να απορροφήσουν άεργο ισχύ και να λειτουργήσουν με τον ελάχιστο ΣI . Συνεπώς, θα υπερδιαστασιολογηθούν οι αντιστροφείς των τριών τελευταίων ΦΒ μονάδων και οι τρεις τελευταίες μονάδες (ΦΒ8, ΦΒ9, ΦΒ10) θα υλοποιήσουν τον υβριδικό αλγόριθμο. Εφόσον οι τρεις τελευταίες ΦΒ μονάδες μπορούν να ρυθμίσουν την τάση στο κρίσιμο σημείο λειτουργίας, θα θεωρηθεί πως μπορούν να ρυθμίσουν την τάση καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου.

Το δίκτυο του Σχήματος 5.1 μοντελοποιήθηκε στο Simulink. Ο υβριδικός αλγόριθμος υλοποιείται από τις μονάδες ΦΒ8, ΦΒ9 και ΦΒ10. Η χρονική καθυστέρηση για την ενεργοποίηση της ρύθμισης τάσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ΦΒ μονάδες είναι 0.25s (Σχήμα 4.8). Η καθυστέρηση επικοινωνίας είναι 0.08s. Η καθυστέρηση επικοινωνίας αναφέρεται στην

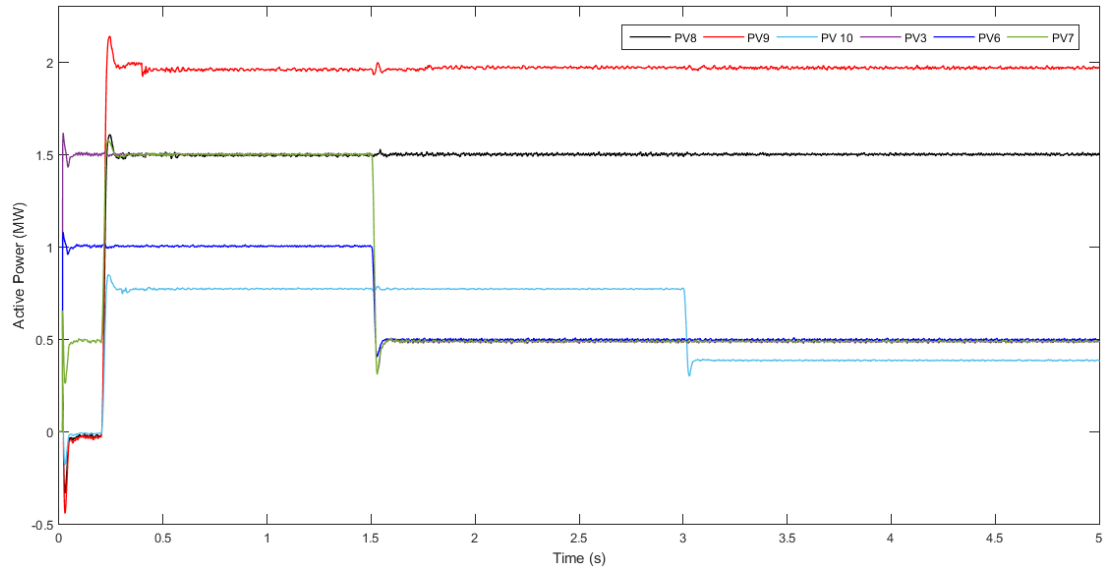
καθυστέρηση λήψης της τάσης $V_{\text{END}}=V_{10}$ του τελευταίου κόμβου από τις μονάδες ΦΒ9 και ΦΒ8.

Η παραγόμενη ενεργός ισχύς των δέκα ΦΒ μονάδων απεικονίζεται στα Σχήμα 5.3 και 5.4. Οι διακυμάνσεις της παραγωγής ενεργού ισχύος (Σχήμα 5.3) είναι συχνό φαινόμενο στα ΦΒ συστήματα λόγω των γρήγορων μεταβολών των συνθηκών ηλιοφάνειας. Η κατανάλωση αέργου ισχύος από τις μονάδες ΦΒ8, ΦΒ9 και ΦΒ10 για τη ρύθμιση της τάσης φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Ο συντελεστής ισχύος των τεσσάρων τελευταίων μονάδων φαίνεται στο Σχήμα 5.6 και το ανά μονάδα μέτρο της τάσης στο Σχήμα 5.7.

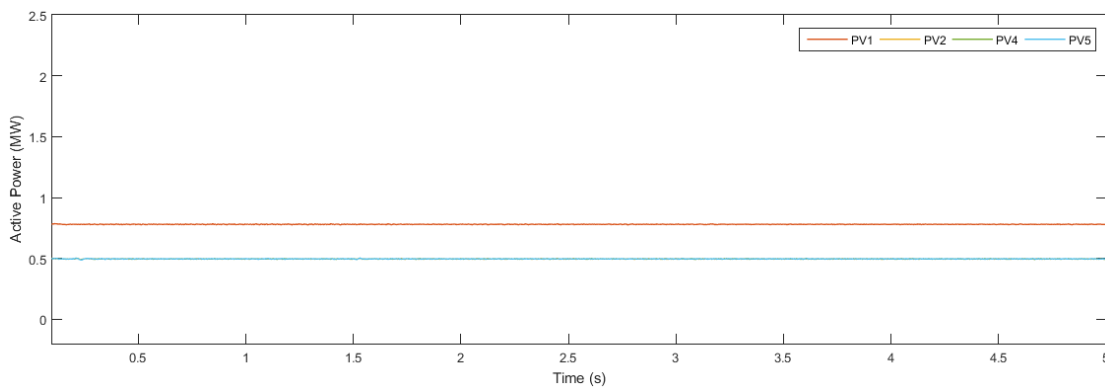
Μέχρι τα 0.2s οι τάσεις των κόμβων 7, 8, 9, 10 είναι κάτω από το ανώτατο όριο και η διαδικασία ρύθμισης τάσης είναι απενεργοποιημένη. Συνεπώς, όλα τα ΦΒ λειτουργούν με μοναδιαίο ΣΙ. Τη χρονική στιγμή 0.2s αυξάνεται η παραγόμενη ενεργός ισχύς των ΦΒ7, ΦΒ8, ΦΒ9 και ΦΒ10 (Σχήμα 5.3). Ως αποτέλεσμα, η τάση ξεπερνά το ανώτατο όριο. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέτρο τάσης εμφανίζεται στον κόμβο 10 και η μονάδα ΦΒ10 ξεκινάει την απορρόφηση αέργου ισχύος. Η μονάδα ΦΒ10, τη χρονική στιγμή 0.3s, ξεκινά να απορροφά άεργο ισχύ μέχρι να φτάσει στον ελάχιστο ΣΙ (Σχήμα 5.6). Την χρονική στιγμή 0.38s, η μονάδα ΦΒ9 λαμβάνει την τάση του κόμβου 10 και εφόσον είναι ίση με την τάση του κόμβου 9 ξεκινάει τη ρύθμιση. Στην πραγματικότητα, λόγω της μη μηδενικής γωνίας θ της εξίσωσης (4.44), η τάση του κόμβου 10 θα είναι λίγο μικρότερη από την τάση του κόμβου 9 αλλά αυτό δεν επηρεάζει τη διαδικασία ρύθμισης τάσης [16]. Τη χρονική στιγμή 0.46s, η μονάδα ΦΒ9 έχει απορροφήσει τη μέγιστη άεργο ισχύ (Σχήμα 5.5) και λειτουργεί με τον ελάχιστο ΣΙ (Σχήμα 5.6). Οι τάσεις των κόμβων 8, 9, 10 είναι ίσες. Επειδή η υπέρταση συνεχίζεται, η μονάδα ΦΒ8 απορροφά άεργο ισχύ (Σχήμα 5.5) μέχρι να ρυθμιστεί η τάση (Σχήμα 5.7) τη χρονική στιγμή 0.5s. Οι τρεις τελευταίες ΦΒ μονάδες, έχοντας ρυθμίσει την τάση, λειτουργούν με σταθερό ΣΙ.

Τη χρονική στιγμή 1.5s, η παραγόμενη ισχύς των μονάδων ΦΒ3, ΦΒ6, ΦΒ7 μειώνεται (Σχήμα 5.3). Ως αποτέλεσμα, η τάση των τριών τελευταίων κόμβων μειώνεται (Σχήμα 5.7). Παρόλα αυτά, η ρύθμιση της τάσης δεν ενεργοποιείται αυτόματα και στις τρεις ΦΒ μονάδες λόγω των χρονικών καθυστερήσεων. Άμεσα θα ενεργήσει η μονάδα που είναι πιο κοντά στον υποσταθμό ΜΤ, δηλαδή η μονάδα ΦΒ8. Θα ξεκινήσει να μειώνει την άεργο ισχύ που απορροφά (Σχήμα 5.5) μέχρι να φτάσει μοναδιαίο ΣΙ (Σχήμα 5.6). Όμως, η τάση παραμένει κάτω από το ανώτατο όριο (Σχήμα 5.7). Ως αποτέλεσμα, μετά από 0.25s θα ενεργοποιηθεί η ρύθμιση τάσης της μονάδας ΦΒ9 και θα μειώσει την απορροφούμενη άεργο ισχύ μέχρι η τάση της να εξισωθεί με την τάση $V_{\text{up_lim}}$ (Σχήμα 5.7).

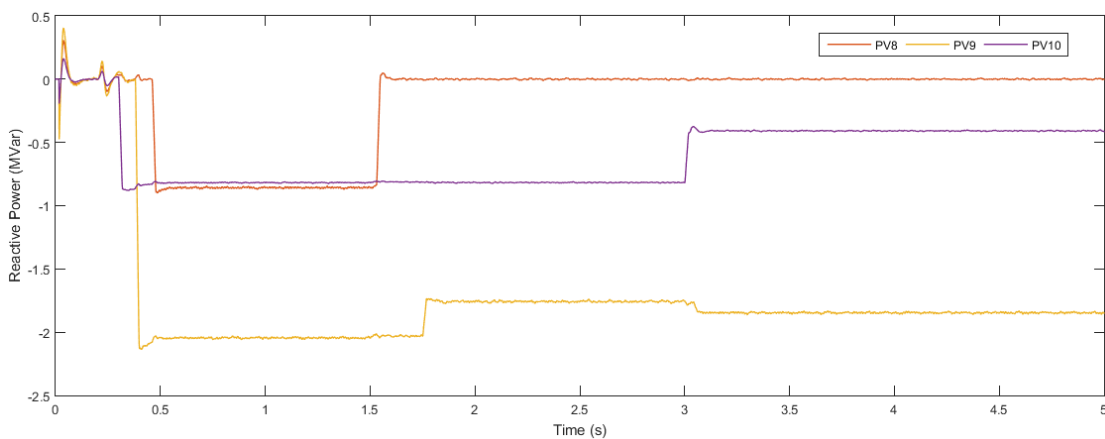
Τη χρονική στιγμή 3s, η ενεργός ισχύς του ΦΒ10 μειώνεται (Σχήμα 5.3). Επειδή λειτουργεί με ελάχιστο ΣΙ (Σχήμα 5.6), η άεργος ισχύς που απορροφά θα μειωθεί αμέσως (Σχήμα 5.5). Ως συνέπεια, θα αλλάξει και η άεργος ισχύς που απορροφά η μονάδα ΦΒ9, καθώς η διαδικασία ρύθμισης τάσης είναι ενεργοποιημένη από το προηγούμενο στάδιο.



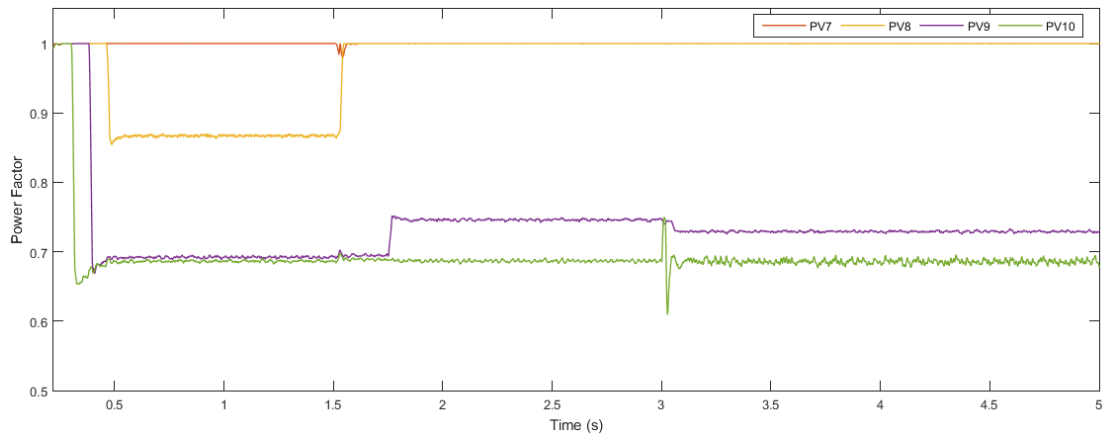
Σχήμα 5.3 : Παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων ΦΒ3, ΦΒ6, ΦΒ7, ΦΒ8, ΦΒ9, ΦΒ10



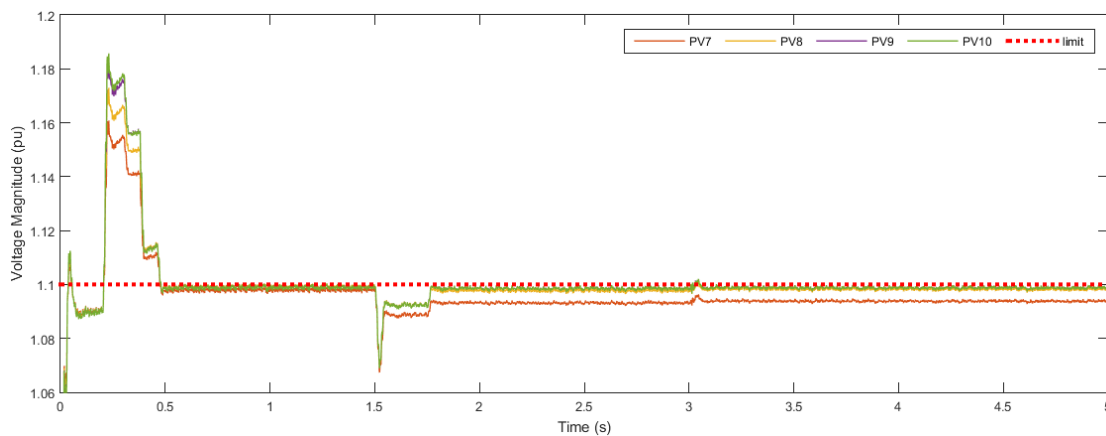
Σχήμα 5.4 : Παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων ΦΒ1, ΦΒ2, ΦΒ4, ΦΒ5



Σχήμα 5.5 : Κατανάλωση αέργου ισχύος των μονάδων ΦΒ8, ΦΒ9, ΦΒ10



Σχήμα 5.6 : Συντελεστής ισχύος των μονάδων ΦΒ7, ΦΒ8, ΦΒ9 και ΦΒ10



Σχήμα 5.7 : Μέτρο τάσης (αμ) των κόμβων 7, 8, 9 και 10

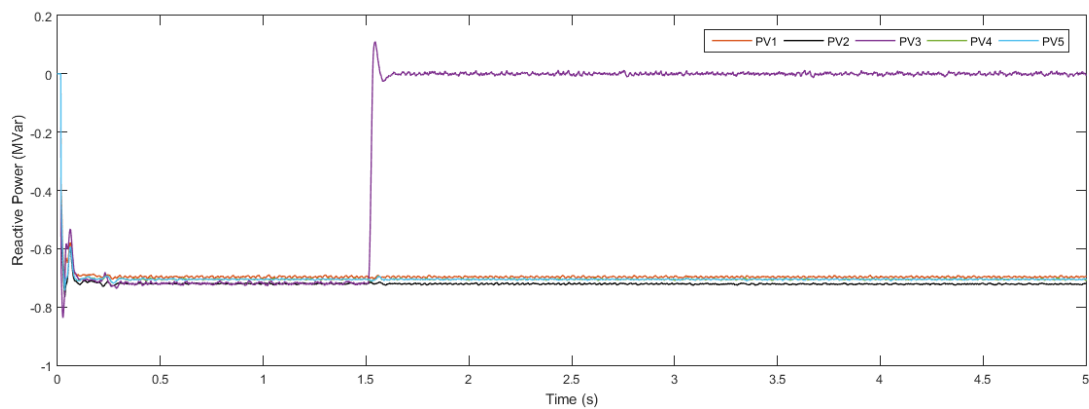
5.2.2 Προσομοίωση ελέγχου droop

Εφαρμόζοντας την ανάλυση της Ενότητας 4.6.1 στο δίκτυο του Σχήματος 5.1, προκύπτουν τα δεδομένα του Πίνακα 5.4 για τις παραμέτρους m_i , $P_{th,i}$ της εξίσωσης (4.55) και για τον παράγοντα υπερδιαστασιολόγησης D_i της εξίσωσης (4.62) της κάθε ΦΒ μονάδας.

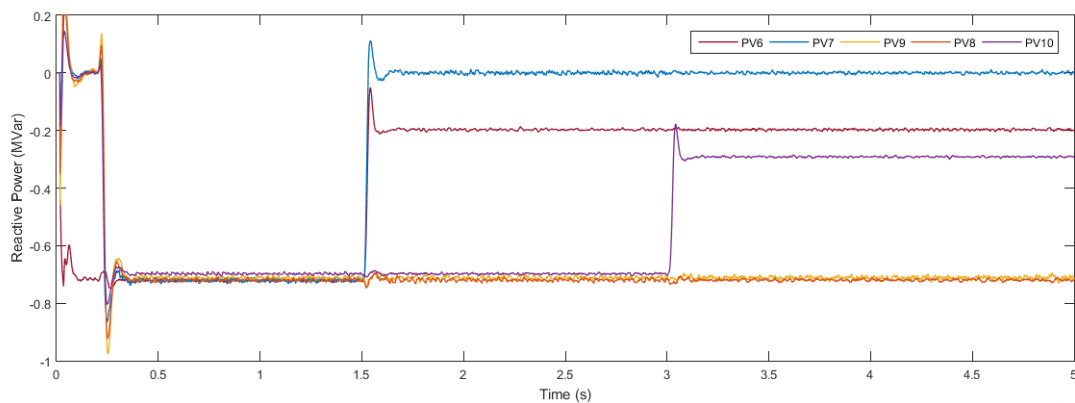
Πίνακας 5.4 : Παράμετροι ελέγχου droop για τις ΦΒ μονάδες

ΦΒ μονάδα	P_{Nom} (MW)	m_i	$P_{th,i}$ (MW)	D_i
ΦΒ 1	0.8	-1.0466	0.108	1.35
ΦΒ 2	0.5	-1.0466	-0.192	1.76
ΦΒ 3	1.5	-1.0466	0.808	1.11
ΦΒ 4	0.5	-1.0466	-0.192	1.76
ΦΒ 5	0.5	-1.0466	-0.192	1.76
ΦΒ 6	1	-1.0466	0.308	1.23
ΦΒ 7	1.5	-1.0466	0.808	1.11
ΦΒ 8	1.5	-1.0466	0.808	1.11
ΦΒ 9	2	-1.0466	1.31	1.06
ΦΒ 10	8	-1.0466	0.108	1.35

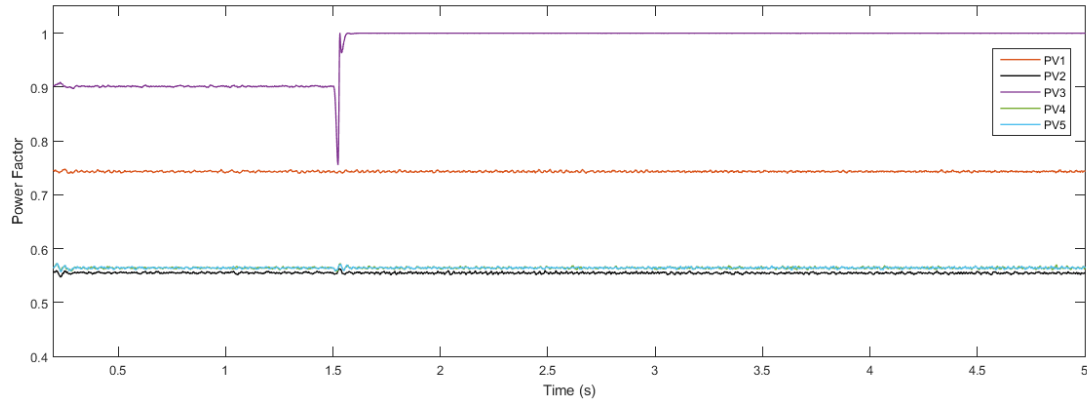
Η προσομοίωση γίνεται για το στιγμιότυπο παραγωγής ενεργού ισχύος των μονάδων των Σχημάτων 5.3 και 5.4. Η άεργος ισχύς που καταναλώνεται από τις μονάδες φαίνεται στα Σχήματα 5.8 και 5.9. Στο διάστημα 0.2-0.5s όλες οι ΦΒ μονάδες παράγουν ονομαστική ενεργό ισχύ. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.8 και 5.9, στο κρίσιμο σημείο, όλες οι μονάδες συνεισφέρουν την ίδια άεργο ισχύ Q_{\max} για τη ρύθμιση της τάσης. Η παραπάνω παραδοχή έγινε στην εξίσωση (4.59). Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.8 και 5.9, οι ΦΒ μονάδες αντιδρούν αμέσως στις μεταβολές της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Ο ΣΙ λειτουργίας των μονάδων παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.10 και 5.11. Αξίζει να σημειωθεί πως για να λειτουργήσει μια μονάδα με μοναδιαίο ΣΙ πρέπει η παραγόμενη ενεργός ισχύς να είναι μικρότερη από την ισχύ P_{th} . Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζεται το ανά μονάδα μέτρο της τάσης των τεσσάρων τελευταίων κόμβων του κλάδου με τα ΦΒ.



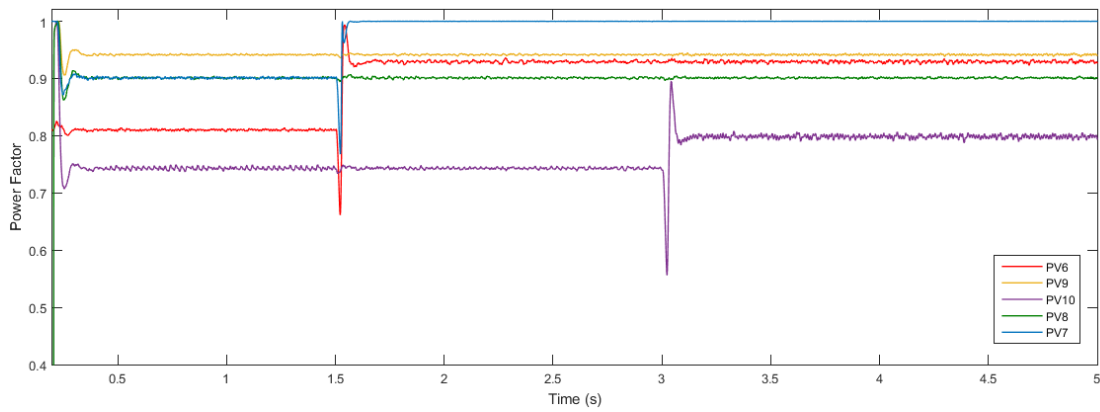
Σχήμα 5.8 : Κατανάλωση αέργου ισχύος των μονάδων ΦΒ1, ΦΒ2, ΦΒ3, ΦΒ4, ΦΒ5



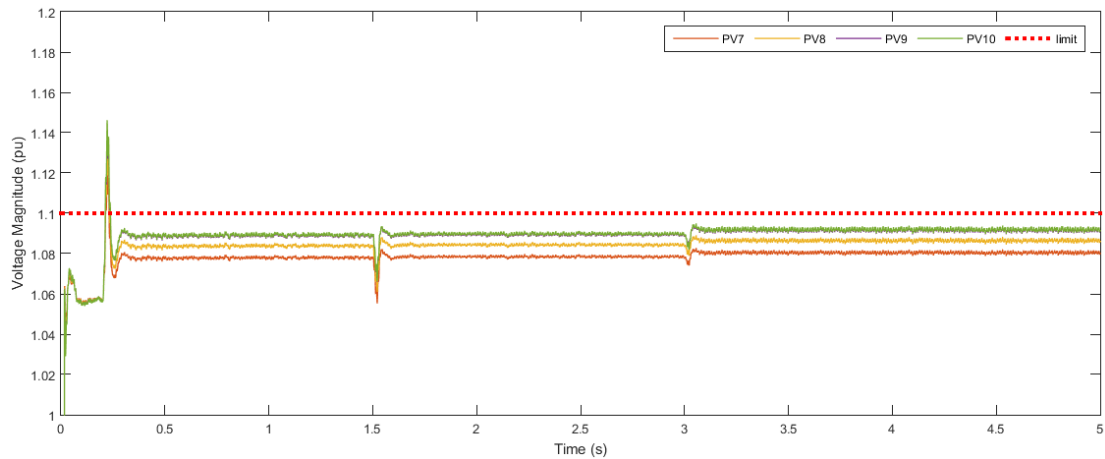
Σχήμα 5.9 : Κατανάλωση αέργου ισχύος των μονάδων ΦΒ6, ΦΒ7, ΦΒ8, ΦΒ9, ΦΒ10



Σχήμα 5.10 : Συντελεστής ισχύος των μονάδων ΦB1, ΦB2, ΦB3, ΦB4, ΦB5



Σχήμα 5.11 : Συντελεστής ισχύος των μονάδων ΦB6, ΦB7, ΦB8, ΦB9, ΦB10



Σχήμα 5.12 : Μέτρο τάσης (αμ) των κόμβων 7, 8, 9 και 10

5.2.3 Προσομοίωση ελέγχου σταθερού συντελεστή ισχύος

Από την ανάλυση της Ενότητας 4.6.2 για το δίκτυο του Σχήματος 5.1 προκύπτει πως ο συντελεστής ισχύος λειτουργίας των ΦB μονάδων, για να επιτυγχάνεται ρύθμιση τάσης, είναι:

$$\Sigma I_i = 0.876 \quad i \in [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] \quad (5.4)$$

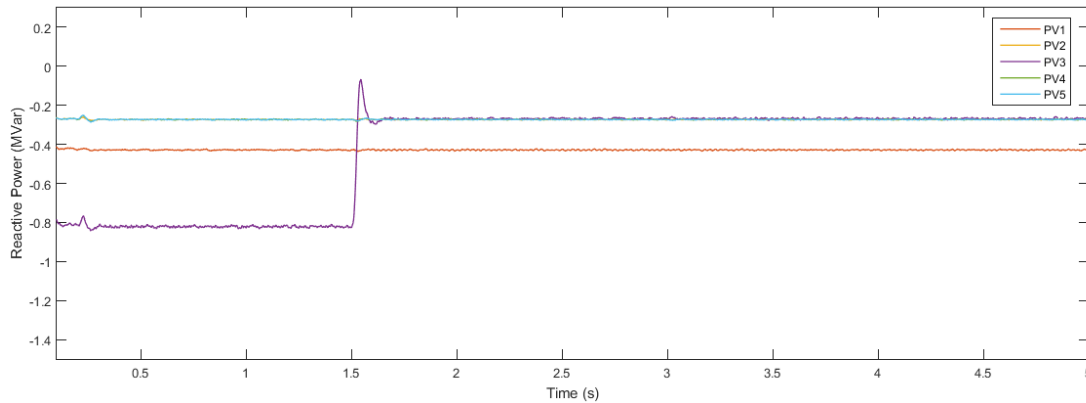
και η άεργος ισχύς της κάθε ΦΒ μονάδας υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_i = -0.55 \cdot P_i \quad i \in [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] \quad (5.5)$$

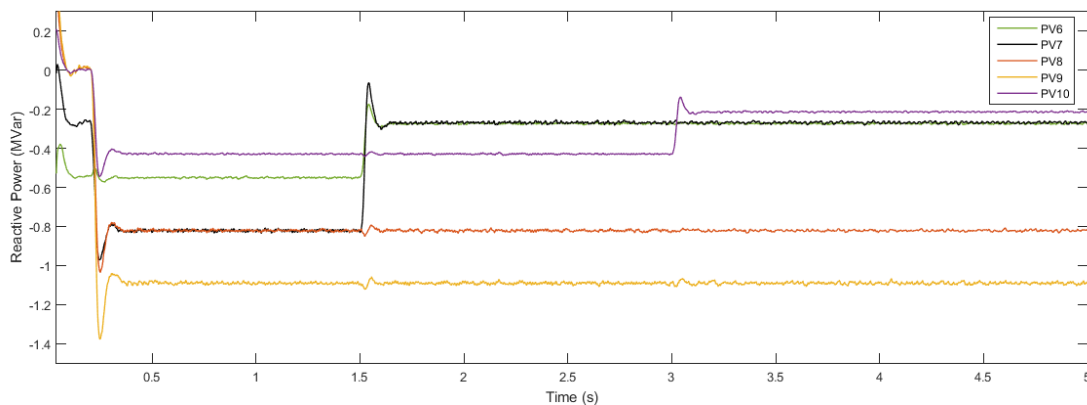
Ο παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης των αντιστροφών υπολογίζεται από την εξίσωση (4.70) και προκύπτει:

$$D_i = \sqrt{1 + (-0.55)^2} = 1.141 \quad i \in [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] \quad (5.6)$$

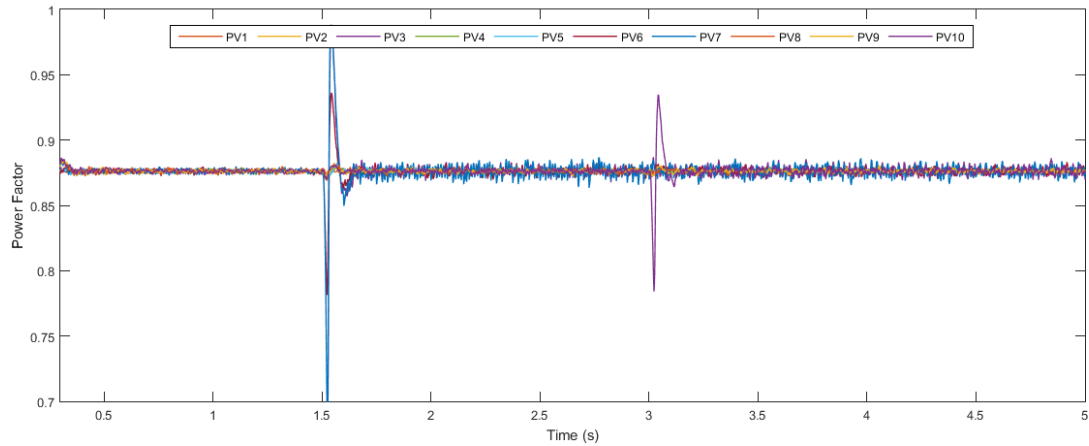
Η προσομοίωση του ελέγχου σταθερού ΣΙ γίνεται για το στιγμιότυπο των Σχημάτων 5.3 και 5.4. Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζεται η κατανάλωση άεργου ισχύος των ΦΒ μονάδων. Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται ο ΣΙ λειτουργίας όλων των ΦΒ μονάδων. Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η τάση των τεσσάρων τελευταίων κόμβων του κλάδου με τα ΦΒ. Όπως και στην περίπτωση του ελέγχου droop, ο έλεγχος σταθερού ΣΙ προσφέρει άμεση απόκριση στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας άρα και της παραγωγής ενεργού ισχύος.



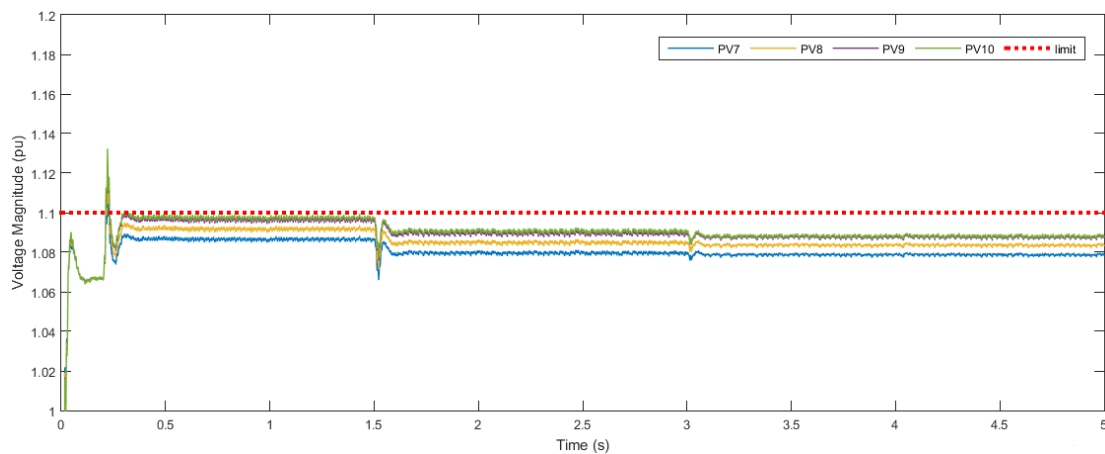
Σχήμα 5.13 : Κατανάλωση άεργου ισχύος των μονάδων ΦΒ1, ΦΒ2, ΦΒ3, ΦΒ4, ΦΒ5



Σχήμα 5.14 : Κατανάλωση άεργου ισχύος των μονάδων ΦΒ6, ΦΒ7, ΦΒ8, ΦΒ9, ΦΒ10



Σχήμα 5.15 : Συντελεστής ισχύος



Σχήμα 5.16 : Μέτρο τάσης (αμ) των κόμβων 7, 8, 9 και 10

5.2.4 Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

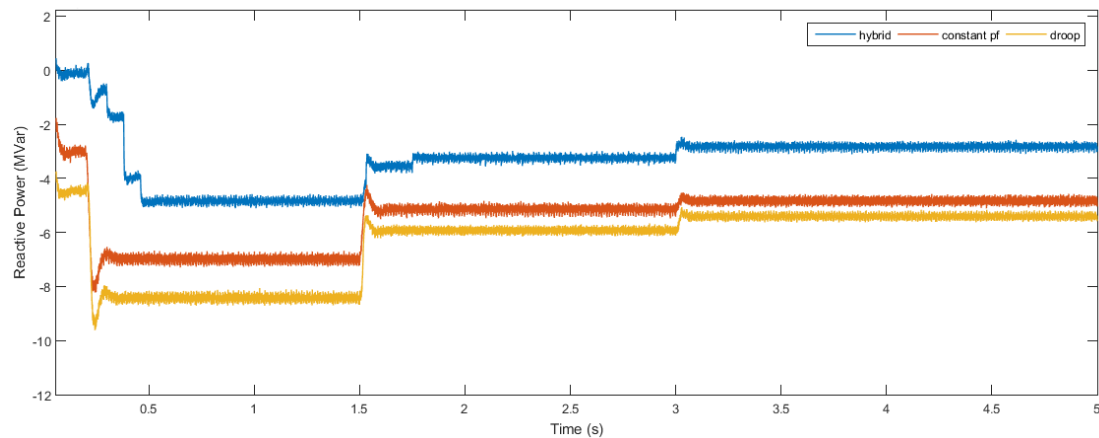
Οι τρεις τεχνικές ρύθμισης τάσης που προσομοιώθηκαν θα συγκριθούν ως προς τις απώλειες ενεργού ισχύος και ως προς το μέγιστο ρεύμα που ρέει στη γραμμή διανομής. Οι απώλειες ενεργού ισχύος σε έναν κλάδο υπολογίζονται από την εξίσωση (4.36) και είναι ανάλογες του τετραγώνου της ενεργού ισχύος και του τετραγώνου της αέργου ισχύος που ρέει στον κλάδο. Δεδομένου πως οι προσομοιώσεις των τριών ελέγχων έγιναν για το ίδιο στιγμιότυπο παραγωγής ενεργούς ισχύος των ΦΒ, για τη σύγκριση των απωλειών κατά μήκος της γραμμής, αρκεί να συγκριθεί η συνολική αέργος ισχύς Q που ρέει στη γραμμή διανομής (Σχήμα 5.1).

Η συνολική αέργος ισχύς που καταναλώνεται από τη γραμμή διανομής με τις ΦΒ μονάδες για τους τρεις ελέγχους απεικονίζεται στο Σχήμα 5.17. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17, λιγότερη αέργος ισχύς για τη ρύθμιση της τάσης, απαιτείται από τον υβριδικό αλγόριθμο και ως συνέπεια ο υβριδικός αλγόριθμος έχει τις χαμηλότερες απώλειες ενεργού ισχύος σε σχέση με τους άλλους δύο αυτόνομους ελέγχους. Μέχρι τα 0.2s, ο υβριδικός αλγόριθμος δεν απαιτεί άεργο ισχύ για τη ρύθμιση της τάσης, ενώ οι δύο αυτόνομοι έλεγχοι καταναλώνουν άεργο ισχύ, καθώς η κατανάλωση αέργου ισχύος είναι συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας η αντίδραση των αυτόνομων ελέγχων είναι άμεση σε αντίθεση με τον υβριδικό αλγόριθμο όπου η ρύθμιση της τάσης ενεργοποιείται σταδιακά

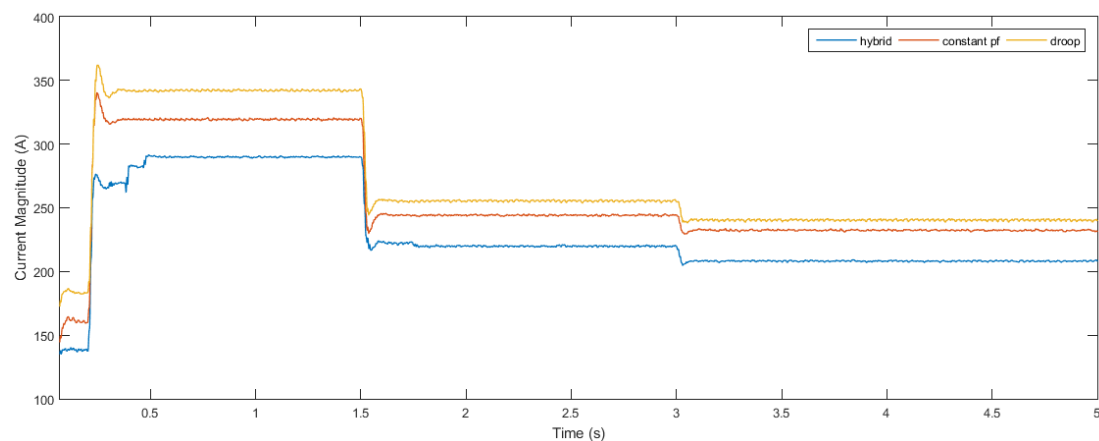
μεταξύ των γειτονικών κόμβων και με χρονική καθυστέρηση. Τέλος, ο έλεγχος σταθερού ΣΙ συγκριτικά με τον έλεγχο droop δημιουργεί λιγότερες απώλειες ενεργού ισχύος κατά μήκος της γραμμής διανομής.

Το μέγιστο ρεύμα I της γραμμής διανομής με τις ΜΔΠ ρέει στον πρώτο κλάδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Το ρεύμα I για τους τρεις ελέγχους παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18. Το θερμικό όριο της γραμμής διανομής είναι 296Α. Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα πως ο έλεγχος σταθερού ΣΙ και ο έλεγχος droop ξεπερνούν το θερμικό όριο της γραμμής στο διάστημα 0.2–0.5s, όπου όλες οι μονάδες παράγουν μέγιστη ενεργό ισχύ. Αντίθετα, ο υβριδικός αλγόριθμος λειτουργεί εντός του επιτρεπτού θερμικού ορίου.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα πως ο έλεγχος droop και ο έλεγχος σταθερού ΣΙ δεν μπορούν να εφαρμοστούν στο δίκτυο του Σχήματος 5.1 για ονομαστική ισχύ των ΦΒ μονάδων του Πίνακα 5.2. Για την εφαρμογή τους, απαιτείται μείωση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ΔΠ.



Σχήμα 5.17 : Συνολική άεργος ισχύς που καταναλώνεται στη γραμμή διανομής με ΦΒ



Σχήμα 5.18 : Ρεύμα γραμμής διανομής I

5.3 Ανάλυση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ανάλυση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Συγκεκριμένα, για χρονική διάρκεια μιας ημέρας θα συγκριθεί ως προς τις απώλειες ενεργού ισχύος ο υβριδικός αλγόριθμος, ο έλεγχος droop, ο έλεγχος σταθερού ΣΙ και η βέλτιστη ροή

ισχύος (Optimal Power Flow – OPF). Αρχικά, θα προσδιοριστεί η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς του δικτύου, του οποίου η τάση μπορεί να ρυθμιστεί από τον έλεγχο droop, τον έλεγχο σταθερού ΣΙ και την μέθοδο OPF, έτσι ώστε να μην παραβιάζονται τα θερμικά όρια των γραμμών διανομής.

Για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου του Σχήματος 5.1 με τον έλεγχο droop, χωρίς να ξεπεραστεί το θερμικό όριο της γραμμής, απαιτείται η μείωση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς ΔΠ κατά 15%. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της ονομαστικής ισχύος κάθε ΜΔΠ κατά 15%. Αυτή η μείωση αντιστοιχεί σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ ΔΠ 9.01 MW. Όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από ΔΠ είναι 9.01 MW, το ρεύμα I (Σχήμα 5.1) στο κρίσιμο σημείο είναι 289 A. Η ονομαστική ισχύς κάθε μονάδας, ο παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης των αντιστροφών και τα δεδομένα για τον έλεγχο droop αναγράφονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 : Δεδομένα ελέγχου droop για δίκτυο εγκατεστημένης ισχύος 9.01 MW

Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς = 9.01 MW				
ΦΒ μονάδα	P_{Nom} (MW)	m_i	P_{th} (MW)	D
ΦΒ 1	0.68	-1.0466	0.118	1.32
ΦΒ 2	0.425	-1.0466	-1.37	1.71
ΦΒ 3	1.28	-1.0466	0.713	1.10
ΦΒ 4	0.425	-1.0466	-0.137	1.71
ΦΒ 5	0.425	-1.0466	-0.137	1.71
ΦΒ 6	0.85	-1.0466	0.288	1.22
ΦΒ 7	1.28	-1.0466	0.713	1.10
ΦΒ 8	1.28	-1.0466	0.713	1.10
ΦΒ 9	1.70	-1.0466	1.14	1.06
ΦΒ 10	0.68	-1.0466	0.118	1.32

Για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου του Σχήματος 5.1 με τον έλεγχο σταθερού ΣΙ, χωρίς να ξεπεραστεί το θερμικό όριο της γραμμής, απαιτείται η μείωση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ΔΠ κατά 8.5%. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της ονομαστικής ισχύος κάθε ΜΔΠ κατά 8.5%. Αυτή η μείωση, αντιστοιχεί σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ ΔΠ 9.7 MW. Όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από ΔΠ είναι 9.7 MW, το ρεύμα I (Σχήμα 5.1) στο κρίσιμο σημείο είναι 293 A. Η ονομαστική ισχύς, ο συντελεστής ισχύος λειτουργίας των ΦΒ μονάδων και ο παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης κάθε αντιστροφή αναγράφονται στον Πίνακα 5.6

Η μέθοδος OPF έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, κατανέμοντας κατάλληλα την άεργο ισχύ ανάμεσα στις ΦΒ μονάδες, θεωρώντας το ανώτατο όριο τάσης ως μοναδικό περιορισμό [16]. Αυτό το μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται με την Μέθοδο Εσωτερικού Σημείου (Interior Point Method) από το MATPOWER. Η εφαρμογή της μεθόδου OPF διασφαλίζει ότι δεν παραβιάζεται το ανώτατο όριο της τάσης στη γραμμή διανομής. Συνεπώς, η διεύθυνση ΜΔΠ μπορεί να αυξηθεί έχοντας σαν περιορισμό το θερμικό όριο της γραμμής διανομής [16].

Όταν εφαρμόζεται για τη ρύθμιση της τάσης η βέλτιστη κατανομή αέργου ισχύος στις ΜΔΠ από την μέθοδο OPF, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται κατά 9%. Συνεπώς, η ονομαστική ισχύς κάθε ΜΔΠ αυξάνεται κατά 9%. Αυτό αντιστοιχεί σε συνολική

εγκατεστημένη ισχύ 11.55 MW. Το ρεύμα στο κρίσιμο σημείο είναι 295A. Η ονομαστική ισχύς και ο παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης κάθε ΜΔΠ του δικτύου του Σχήματος 5.1 αναγράφονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.6 : Δεδομένα ελέγχου σταθερού ΣΙ για δίκτυο εγκατεστημένης ισχύος 9.7 MW

Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς = 9.7 MW			
ΦΒ μονάδα	P_{Nom} (MW)	ΣΙ	D
ΦΒ 1	0.732	0.88	1.136
ΦΒ 2	0.458	0.88	1.136
ΦΒ 3	1.37	0.88	1.136
ΦΒ 4	0.458	0.88	1.136
ΦΒ 5	0.458	0.88	1.136
ΦΒ 6	0.915	0.88	1.136
ΦΒ 7	1.37	0.88	1.136
ΦΒ 8	1.37	0.88	1.136
ΦΒ 9	1.83	0.88	1.136
ΦΒ 10	0.732	0.88	1.136

Πίνακας 5.7 : Δεδομένα δικτύου όταν εφαρμόζεται OPF για τη ρύθμιση της τάσης

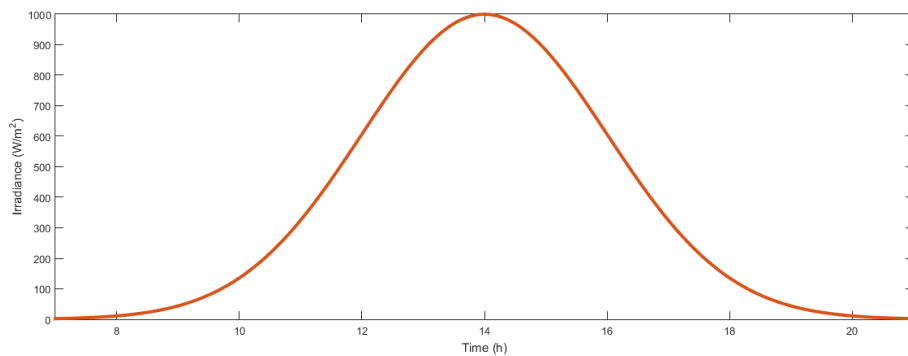
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς = 11.55 MW		
ΦΒ μονάδα	P_{Nom} (MW)	D
ΦΒ 1	0.87	1.36
ΦΒ 2	0.55	1.82
ΦΒ 3	1.64	1.06
ΦΒ 4	0.55	1.23
ΦΒ 5	0.55	1.42
ΦΒ 6	1.09	1.08
ΦΒ 7	1.64	1.27
ΦΒ 8	1.64	1.37
ΦΒ 9	2.18	1.42
ΦΒ10	0.87	1.49

Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα πως η διείσδυση ΔΠ στο δίκτυο του Σχήματος 5.1, είναι η μικρότερη όταν εφαρμόζεται ο έλεγχος droop για τη ρύθμιση της τάσης.

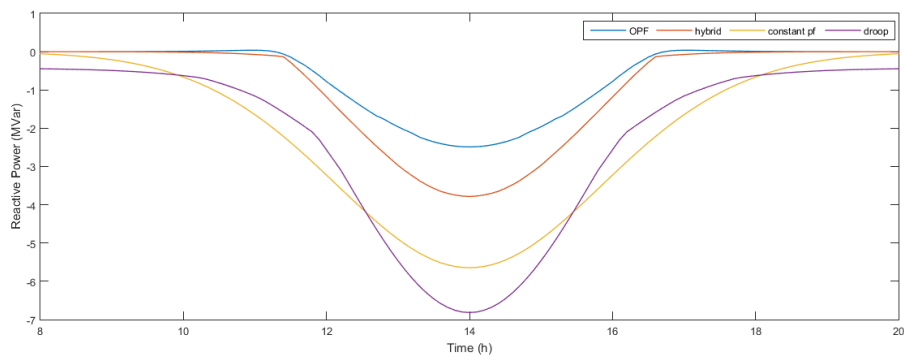
Η σύγκριση των τεσσάρων μεθόδων θα γίνει για το δίκτυο συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 9.01 MW. Η ονομαστική ισχύς των ΦΒ μονάδων αναγράφεται στον Πίνακα 5.5. Για την ανάλυση στο διάστημα μιας ημέρας, θεωρείται πως η κατανάλωση των φορτίων των κόμβων 11-20 παραμένει σταθερή καθόλη την διάρκεια της ημέρας στα ονομαστικά μεγέθη του Πίνακα 5.2 με ΣΙ 0.95 επαγωγικό. Επίσης, η ημερήσια καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας για όλα τα ΦΒ λαμβάνεται από το Σχήμα 5.19.

Για την σύγκριση των απωλειών ενεργού ισχύος, θα συγκριθεί η άεργος ισχύς Q της γραμμής διανομής του δικτύου του Σχήματος 5.1. Η κατανάλωση άεργου ισχύος της γραμμής διανομής, για τις τέσσερις μεθόδους ρύθμισης τάσης, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.20. Το προφίλ της τάσης του κόμβου 10 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20, τη λιγότερη άεργο ισχύ για την ρύθμιση της τάσης άρα και τις λιγότερες απώλειες ενεργού

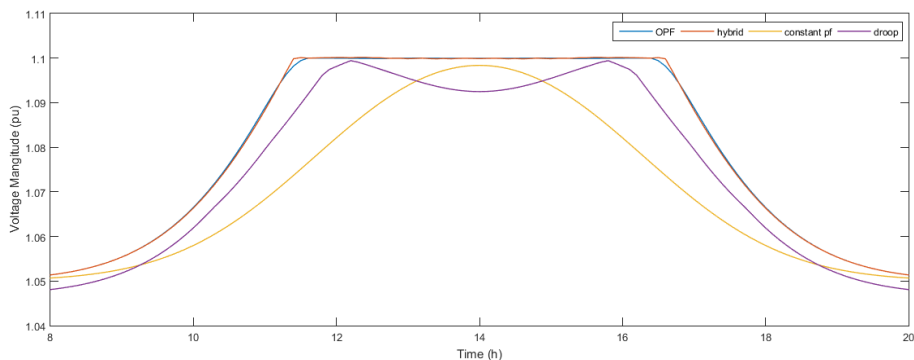
ισχύος, απαιτεί η μέθοδος OPF, καθώς κατανέμει βέλτιστα την άεργο ισχύ στις ΜΔΠ. Όμως, η μέθοδος OPF, αφενός για την εφαρμογή της απαιτεί την επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης και ένα εκτενές σύστημα επικοινωνίας ανάμεσα στις ΜΔΠ και αφετέρου απαιτεί την υπερδιαστασιολόγηση όλων των αντιστροφών των ΦΒ. Όπως εξάγεται από το Σχήμα 5.20, η κατανάλωση άεργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης του υβριδικού αλγορίθμου είναι κοντά στην μέθοδο OPF, σε αντίθεση με τους δύο αυτόνομους ελέγχους. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.21, τόσο η μέθοδος OPF όσο και ο υβριδικός αλγόριθμος, ρυθμίζουν την τάση, έτσι ώστε η τάση του κόμβου 10 να βρίσκεται στο ανώτατο όριο $V_{up_lim}=1.1$ αμ. Αντίθετα, οι δύο αυτόνομοι έλεγχοι, ρυθμίζουν την τάση καταναλώνοντας άεργο ισχύ ανάλογα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ και δεν λαμβάνουν υπόψη την τάση των κόμβων.



Σχήμα 5.19 : Ημερήσια καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας



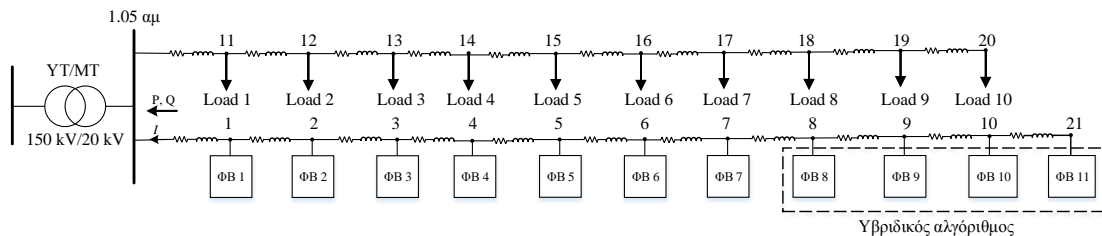
Σχήμα 5.20 : Κατανάλωση άεργου ισχύος της γραμμής διανομής με ΦΒ



Σχήμα 5.21 : Προφίλ της τάσης του κόμβου 10 (αμ)

5.4 Αύξηση διείσδυσης ΔΠ

Στην συνέχεια, αυξάνεται η διείσδυση ΦΒ στο δίκτυο του Σχήματος 5.1. Συγκεκριμένα, τοποθετείται μια ΦΒ μονάδα ονομαστικής ισχύος 0.5 MW, σε απόσταση 1km από τον κόμβο 10. Το δίκτυο συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ΔΠ 11.1MW παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.22. Η μονάδα ΦΒ11 τοποθετείται στον κόμβο 21. Τα ονομαστικά μεγέθη των φορτίων και των υπολοίπων ΦΒ μονάδων λαμβάνονται από τον Πίνακα 5.2.



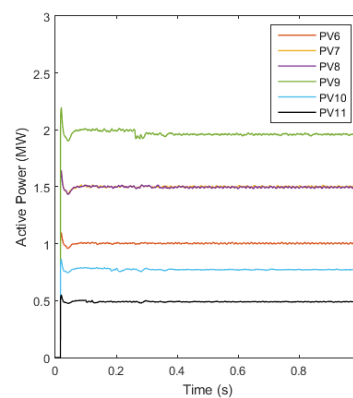
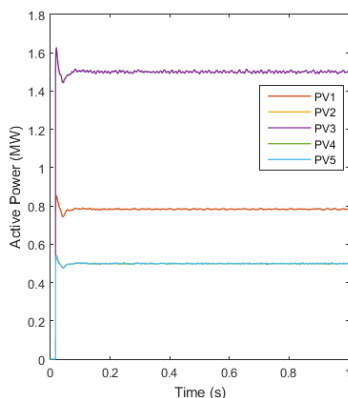
Σχήμα 5.22 : Ακτινικό δίκτυο διανομής 21 κόμβων

5.4.1 Προσομοίωση υβριδικού αλγορίθμου

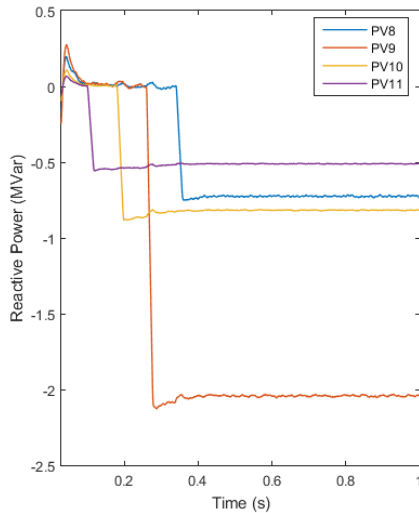
Ακολουθώντας την ανάλυση της Ενότητας 5.2.1, αποδεικνύεται πως ο υβριδικός αλγόριθμος εφαρμόζεται στο δίκτυο του Σχήματος 5.22 από τις τέσσερις τελευταίες ΦΒ μονάδες (ΦΒ8, ΦΒ9, ΦΒ10, ΦΒ11). Συνεπώς, απαιτείται η υπερδιαστασιολόγηση των αντιστροφών των τεσσάρων τελευταίων ΦΒ μονάδων σύμφωνα με την εξίσωση (5.3).

Στα Σχήματα 5.23 και 5.24 απεικονίζεται η παραγόμενη ενεργός ισχύς των ΦΒ μονάδων. Και οι 11 μονάδες παράγουν ονομαστική ενεργό ισχύ. Η άεργος ισχύς των τεσσάρων τελευταίων μονάδων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.25 και ο συντελεστής ισχύος στο Σχήμα 5.26. Η τάση των τεσσάρων τελευταίων κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 5.27. Το ρεύμα I του Σχήματος 5.22 φαίνεται στο Σχήμα 5.28. Η εφαρμογή του υβριδικού αλγορίθμου ξεκινάει από τη μονάδα ΦΒ11 η οποία απορροφά άεργο ισχύ μέχρι να φτάσει στον ελάχιστο ΣΙ. Στη συνέχεια, οι μονάδες ΦΒ10 και ΦΒ9 λειτουργούν αντίστοιχα. Τέλος, η μονάδα ΦΒ8 απορροφά την απαιτούμενη άεργο ισχύ μέχρι να εξισωθεί η τάση του κόμβου 8 με την τάση V_{up_lim} .

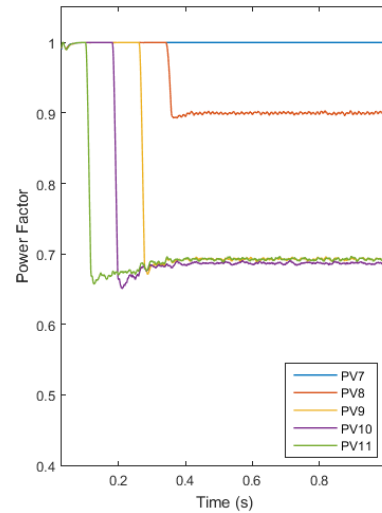
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.28, κατά τη ρύθμιση της τάσης, το ρεύμα I υπερβαίνει το θερμικό όριο της γραμμής διανομής, το οποίο είναι 296A. Ως αποτέλεσμα, ο υβριδικός αλγόριθμος δεν μπορεί να εφαρμοστεί στο δίκτυο του Σχήματος 5.22, καθώς υπερφορτώνονται οι γραμμές από τη ροή ενεργού και άεργου ισχύος.



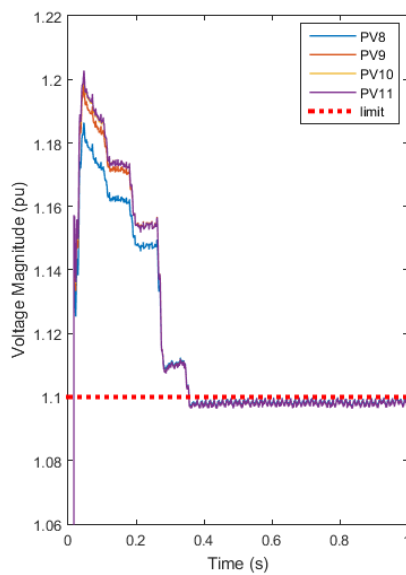
Σχήμα 5.23 : Παραγωγή ενεργού ισχύος (α) Σχήμα 5.24 : Παραγωγή ενεργού ισχύος (β)



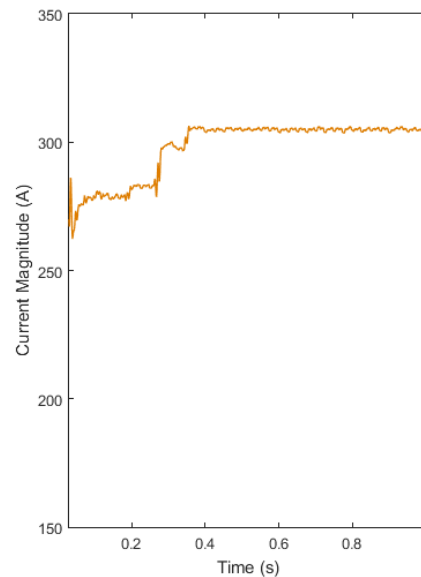
Σχήμα 5.25 : Κατανάλωση αέργου ισχύος



Σχήμα 5.26 : Συντελεστής ισχύος



Σχήμα 5.27 : Μέτρο τάσης (αμ)

Σχήμα 5.28 : Ρεύμα γραμμής διανομής I

5.4.2 Προσομοίωση συνδυασμού αποκοπής ενεργού ισχύος και ελέγχου αέργου ισχύος

Στο δίκτυο του Σχήματος 5.22, όπως αποδείχθηκε, η αυξημένη ροή ενεργού και αέργου ισχύος, προκαλεί υπερφόρτωση της γραμμής. Συνεπώς, για τη ρύθμιση της τάσης, θα εφαρμοστεί η μεθοδολογία της Ενότητας 4.6.3, κατά την οποία αποκόπεται ενεργός ισχύς από τις ΦΒ μονάδες και παράλληλα ελέγχεται η αέργος ισχύς. Ο έλεγχος αέργου ισχύος επιτυγχάνεται με σταθερό συντελεστή ισχύος. Παράλληλα, ο ελάχιστος ΣΙ της κάθε ΦΒ μονάδας συναρτήσει του συντελεστή αποκοπής c , έτσι ώστε να μην απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση του αντιστροφέα, λαμβάνεται από την εξίσωση (4.80).

Για την εύρεση του ελάχιστου συντελεστή αποκοπής, θα γίνει ανάλυση ροής ισχύος για τα δεδομένα του Πίνακα 5.8. Σκοπός είναι η εύρεση του ελάχιστου συντελεστή αποκοπής ώστε να ρυθμίζεται η τάση και να μην υπερφορτώνεται το δίκτυο όταν η ακτινοβολία είναι μέγιστη. Για τον παραπάνω λόγο, η ανάλυση γίνεται για ποσοστό αποκοπής της μέγιστης ισχύος (εξίσωση (4.81)).

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα ΦΒ μονάδων

ΦΒ μονάδα	Ονομαστική ισχύς (MW)	Παραγόμενη ενεργός ισχύς (MW)	ΣΙ	D
ΦΒ 1	0.8	(1-c)·0.8	$g(c)$	1
ΦΒ 2	0.5	(1-c)·0.5	$g(c)$	1
ΦΒ 3	1.5	(1-c)·1.5	$g(c)$	1
ΦΒ 4	0.5	(1-c)·0.5	$g(c)$	1
ΦΒ 5	0.5	(1-c)·0.5	$g(c)$	1
ΦΒ 6	1	(1-c)·1	$g(c)$	1
ΦΒ 7	1.5	(1-c)·1.5	$g(c)$	1
ΦΒ 8	1.5	(1-c)·1.5	$g(c)$	1
ΦΒ 9	2	(1-c)·2	$g(c)$	1
ΦΒ 10	0.8	(1-c)·0.8	$g(c)$	1
ΦΒ 11	0.5	(1-c)·0.5	$g(c)$	1

Εφαρμόζοντας ροή ισχύος από το MATPOWER για $c \in (0,1)$ λαμβάνεται η γραφική παράσταση του Σχήματος 5.29 για το μέτρο της τάσης του κόμβου 21 συναρτήσει του συντελεστή αποκοπής c . Στο Σχήμα 5.30 απεικονίζεται ο συντελεστής αποκοπής c συναρτήσει του ΣΙ και στο Σχήμα 5.31 απεικονίζεται η τάση του κόμβου 21 συναρτήσει του ΣΙ.

Από τις γραφικές παραστάσεις εξάγεται το συμπέρασμα πως όταν αποκόπεται το 12.7% της ενεργού ισχύος από όλες τις ΦΒ μονάδες και παράλληλα λειτουργούν με ΣΙ 0.873 επαγωγικό, η τάση του κόμβου 21 είναι κάτω από το ανώτατο όριο. Το μέγιστο ρεύμα I λαμβάνεται από την ανάλυση ροής ισχύος και ισούται με 295A. Συνεπώς, αποκόπτοντας ενεργό ισχύ από όλες τις ΜΔΠ και ελέγχοντας την άεργο ισχύ είναι εφικτή η ρύθμιση τάσης χωρίς να παραβιάζονται τα θερμικά όρια της γραμμής διανομής.

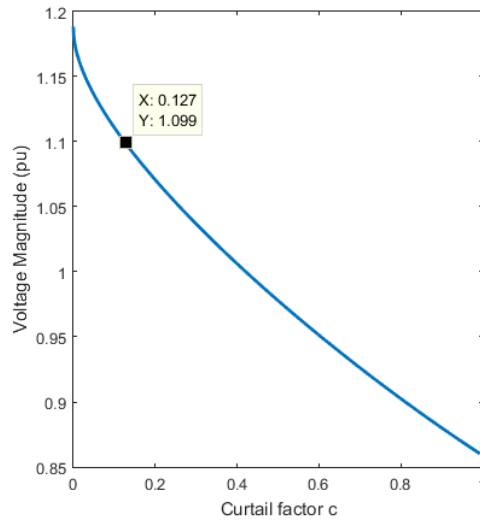
Η αποκοπή ενεργού ισχύος επιτυγχάνεται μετατοπίζοντας την τάση λειτουργίας της κάθε ΦΒ μονάδας δεξιά του σημείου μέγιστης ισχύος (Σχήμα 3.3). Η τάση κατά την οποία η ΦΒ μονάδα παράγει το 87.3% της διαθέσιμης ενεργού ισχύος, δηλαδή αποκόπτει το 12.7%, μπορεί να βρεθεί κατά προσέγγιση θεωρώντας πως αντιστοιχεί στο 0.92 της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Η παραπάνω μέθοδος εύρεσης του σημείου λειτουργίας περιγραφεται από την σχέση:

$$V_{curt} = k \cdot V_{OC} \quad (5.7)$$

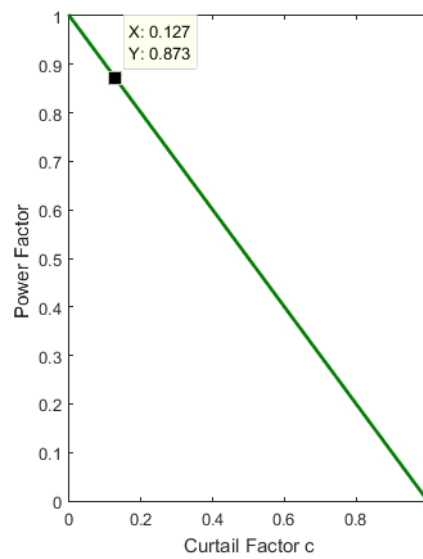
$$k = 0.92$$

Η παραπάνω προσέγγιση ισχύει ακόμα και όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. Στο Σχήμα 5.32 φαίνεται πως αλλάζει ο συντελεστής k για τις διάφορες μεταβολές της θερμοκρασίας του ΦΒ πλαισίου και πως είναι κοντά στην τιμή 0.92. Το σημείο MPP είναι το σημείο μέγιστης ισχύος ενώ το σημείο PP (Power Point) είναι το σημείο όπου αποκόπεται το 12.7%. Επίσης, για τις καμπύλες P-V του Σχήματος 5.32, ισχύει :

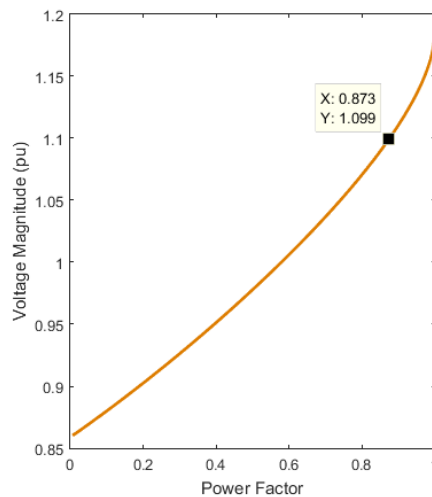
$$P_{PP,i} = 0.873 \cdot P_{MPP,i} \quad (5.8)$$



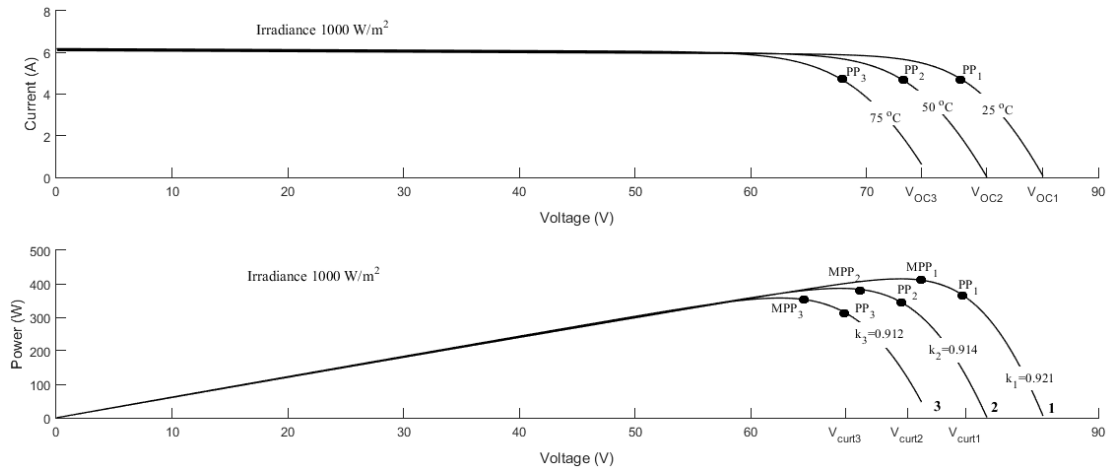
Σχήμα 5.29 : Μέτρο τάσης (αμ) του κόμβου 10 συναρτήσει του c



Σχήμα 5.30 : ΣΙ συναρτήσει του συντελεστή αποκοπής c



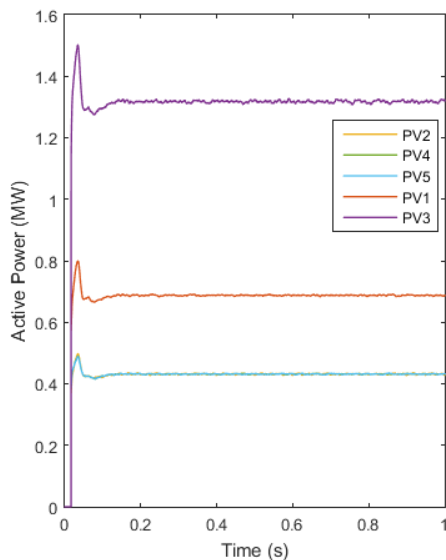
Σχήμα 5.31 : Μέτρο τάσης (αμ) του κόμβου 10 συναρτήσει του ΣΙ



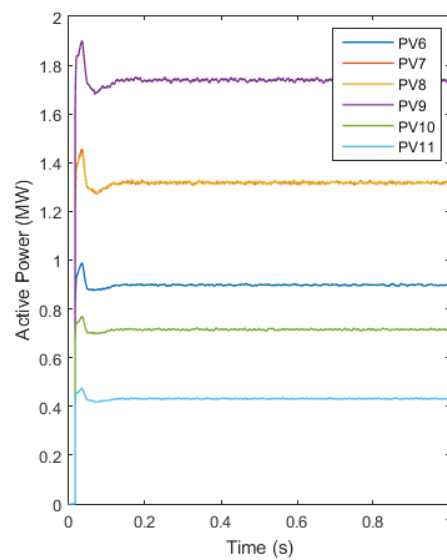
Σχήμα 5.32 : Χαρακτηριστικές I-V και P-V

Η προσομοίωση για το δίκτυο του Σχήματος 5.22, θα γίνει αποκόπτοντας το 13% ($c=13\%$) της παραγόμενης ισχύος από τις 11 ΦΒ μονάδες οι οποίες λειτουργούν με ΣΙ 0.88 επαγωγικό. Επίσης, η ακτινοβολία είναι μέγιστη, που σημαίνει ότι η διαθέσιμη ισχύς για την κάθε ΦΒ μονάδα προκύπτει από τη δεύτερη στήλη του Πίνακα 5.8. Η ενεργός ισχύς των μονάδων απεικονίζεται στα Σχήματα 5.33 και 5.34. Η άεργος ισχύς των μονάδων απεικονίζεται στα Σχήματα 5.35 και 5.36, ο ΣΙ στα Σχήματα 5.37 και 5.38, ενώ η τάση των τεσσάρων τελευταίων κόμβων στο Σχήμα 5.39. Τέλος, το ρεύμα γραμμής I του Σχήματος 5.22 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.40, όπου συγκρίνεται με το αντίστοιχο ρεύμα της προσομοίωσης του υβριδικού αλγορίθμου. Η εγγεόμενη ενεργός ισχύς στο δίκτυο (P στο Σχήμα 5.22), για τον συνδυασμό αποκοπής ενεργού ισχύος και ελέγχου αέργου ισχύος και για τον υβριδικό αλγόριθμο απεικονίζεται στο Σχήμα 5.41.

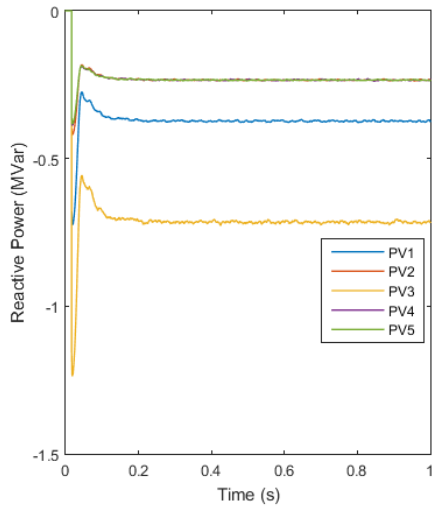
Στο Σχήματα 5.39 και 5.40 φαίνεται πως ο συνδυασμένος έλεγχος ρυθμίζει την τάση και δεν υπερβαίνει το θερμοκίριο της γραμμής, παρόλο που όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.41, η εγγεόμενη ενεργός ισχύς στο δίκτυο είναι χαμηλότερη λόγω της αποκοπής. Στα Σχήματα 5.37 και 5.38 φαίνεται πως όλα οι ΦΒ μονάδες λειτουργούν με ίδιο συντελεστή ισχύος.



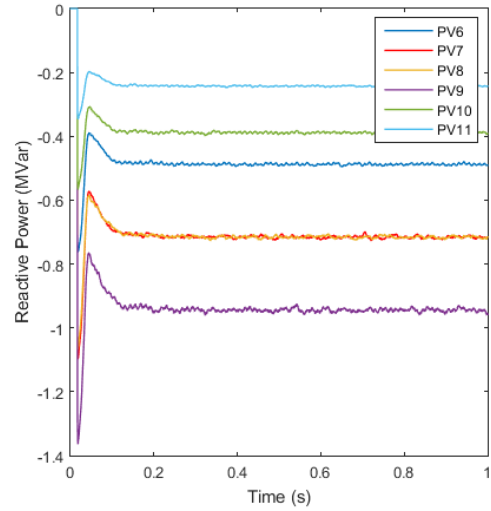
Σχήμα 5.33 : Παραγωγή ενεργού ισχύος (α)



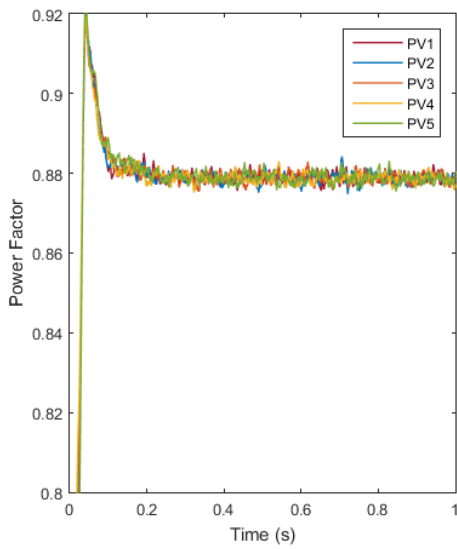
Σχήμα 5.34 : Παραγωγή ενεργού ισχύος (β)



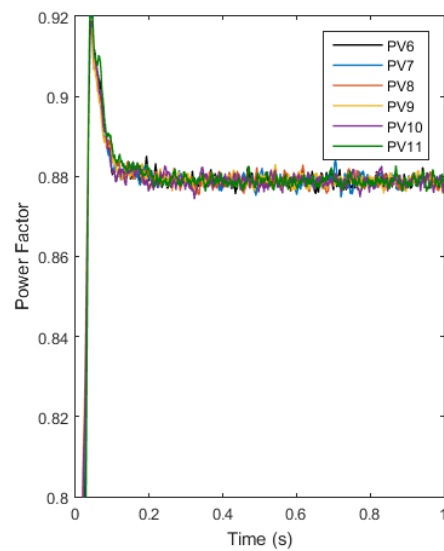
Σχήμα 5.35 : Κατανάλωση αέργου ισχύος (α)



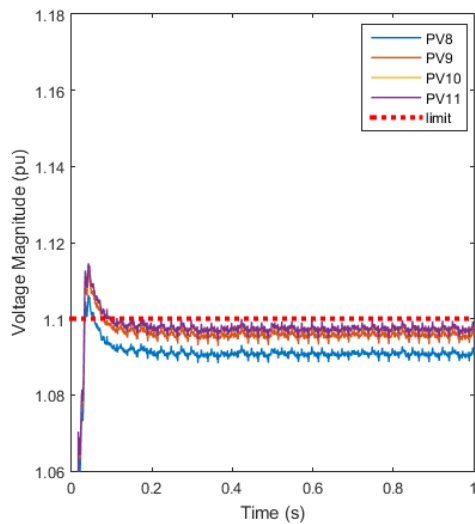
Σχήμα 5.36 : Κατανάλωση αέργου ισχύος (β)



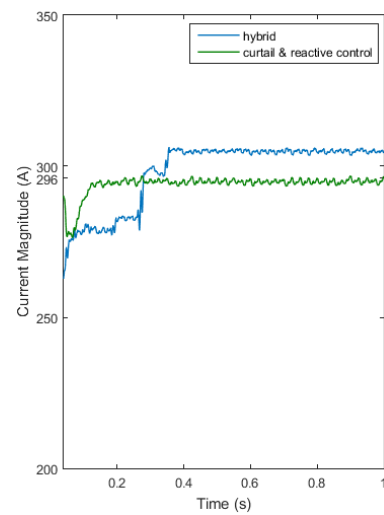
Σχήμα 5.37 : Συντελεστής ισχύος (α)



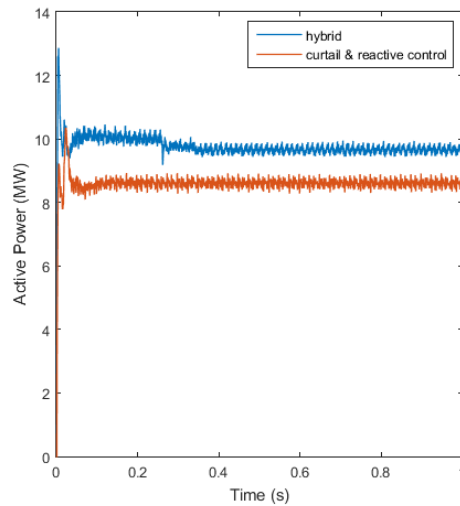
Σχήμα 5.38 : Συντελεστής ισχύος (α)



Σχήμα 5.39 : Μέτρο τάσης (αμ)



Σχήμα 5.40 : Ρεύμα γραμμής διανομής I



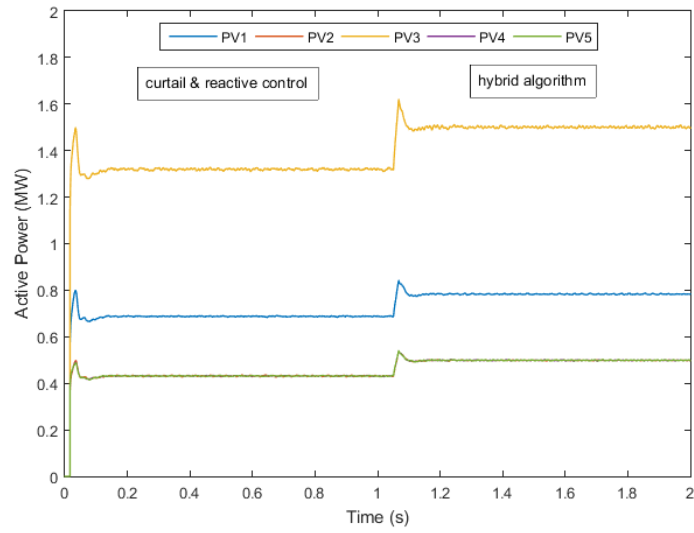
Σχήμα 5.41 : Εγχεόμενη ενεργός ισχύς στο δίκτυο

5.4.3 Προσομοίωση μεικτού σχήματος ρύθμισης τάσης

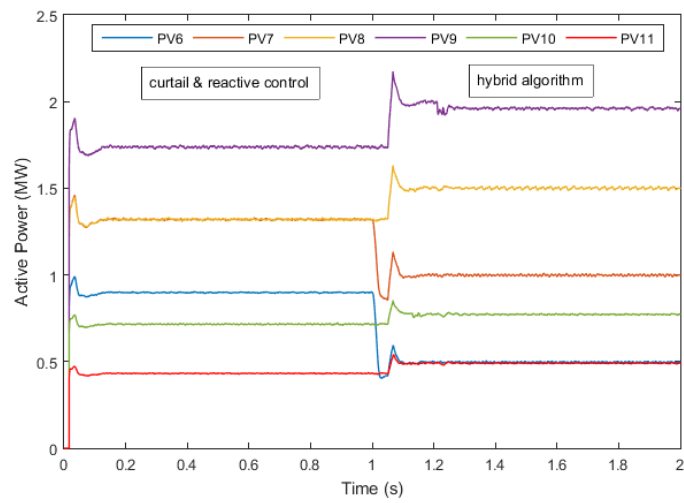
Σε αυτή την Ενότητα θα γίνει προσομοίωση του μεικτού σχήματος ρύθμισης τάσης που προτάθηκε στην Ενότητα 4.7. Η παραγωγή ενεργού ισχύος των 11 ΦΒ μονάδων φαίνεται στα Σχήματα 5.42 και 5.43. Το διάστημα 0-1s, η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη. Συνεπώς, όπως αποδείχτηκε από τις προηγούμενες προσομοιώσεις, ο υβριδικός αλγόριθμος δεν μπορεί να εφαρμοστεί και εφαρμόζεται ο συνδυασμένος έλεγχος. Τη χρονική στιγμή 1s, οι μονάδες ΦΒ6 και ΦΒ7 σκιάζονται με αποτέλεσμα να μειωθεί στο μισό η παραγόμενη ενεργός ισχύς. Ως αποτέλεσμα, ο ελεγκτής στην αρχή της γραμμής που παρακολουθεί το ρεύμα I , αντιλαμβάνεται τη μείωση του ρεύματος ($\Delta I < 0$) και στέλνει σήμα σε όλες τις ΦΒ μονάδες να εφαρμόσουν τον υβριδικό αλγόριθμο. Συνεπώς, όλες οι ΦΒ μονάδες παράγουν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ (MPPT) και οι τέσσερις τελευταίες μονάδες καταναλώνουν άεργο ισχύ σύμφωνα με τον υβριδικό αλγόριθμο. Εφόσον το ρεύμα δεν ξεπερνάει τα θερμικά όρια της γραμμής, ο υβριδικός αλγόριθμος συνεχίζει και εφαρμόζεται στο δίκτυο.

Στα Σχήματα 5.44 και 5.45 φαίνεται η άεργος ισχύς που καταναλώνεται από τις ΦΒ μονάδες. Στα Σχήματα 5.46 και 5.47 φαίνεται ο συντελεστής ισχύος των μονάδων. Από 0-1s, λόγω του συνδυασμένου ελέγχου, όλες οι μονάδες καταναλώνουν άεργο ισχύ με κοινό ΣΙ. Από 1-2s, οι μονάδες ΦΒ1-ΦΒ7 δεν καταναλώνουν άεργο ισχύ και λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Οι υπόλοιπες τέσσερις, υλοποιούν τον υβριδικό αλγόριθμο και αναλαμβάνουν τη ρύθμιση της τάσης. Οι μονάδες ΦΒ9, ΦΒ10 και ΦΒ11 φτάνουν στον ελάχιστο ΣΙ (0.69) και η μονάδα ΦΒ8 είναι η τελευταία που απορροφά άεργο ισχύ μέχρι να ρυθμιστεί η τάση στο ανώτατο όριο.

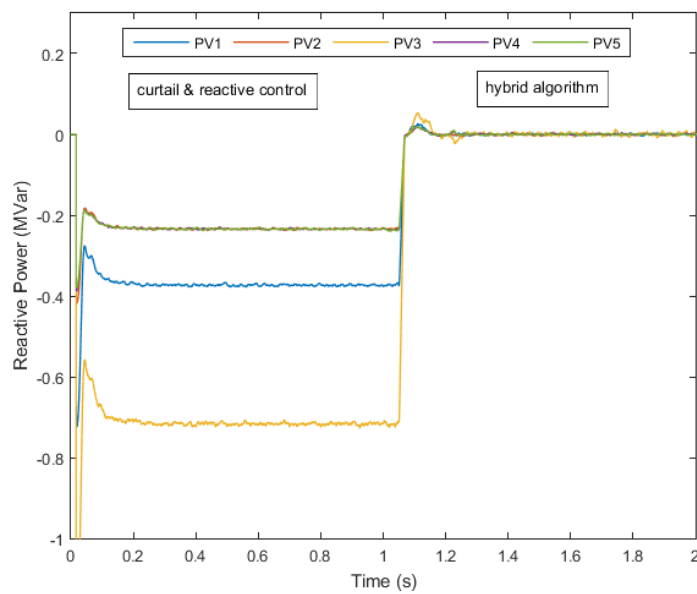
Στο Σχήμα 5.48 απεικονίζεται το μέτρο της τάσης των πέντε τελευταίων κόμβων. Στο Σχήμα 5.49 φαίνεται το ρεύμα γραμμής I του Σχήματος 5.22. Στο Σχήμα 5.50 φαίνεται η εγχεόμενη ισχύς P (Σχήμα 5.22) στο δίκτυο και η κατανάλωση αέργου ισχύος Q (Σχήμα 5.22) της γραμμής διανομής με τις ΦΒ μονάδες. Όπως διακρίνεται από το Σχήμα 5.49 το ρεύμα κατά την εφαρμογή του μεικτού ελέγχου δεν υπερβαίνει το θερμικό όριο της γραμμής διανομής.



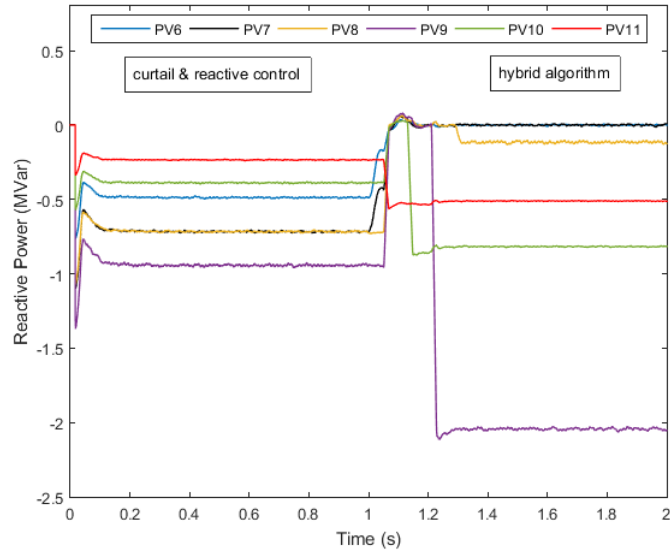
Σχήμα 5.42 : Παραγωγή ενεργού ισχύος (α)



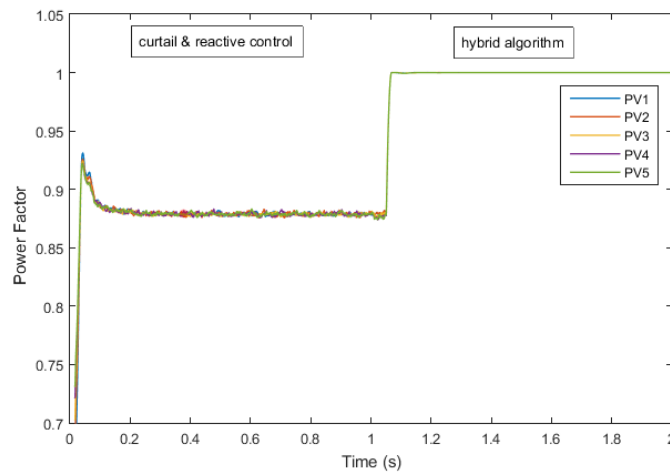
Σχήμα 5.43 : Παραγωγή ενεργού ισχύος (β)



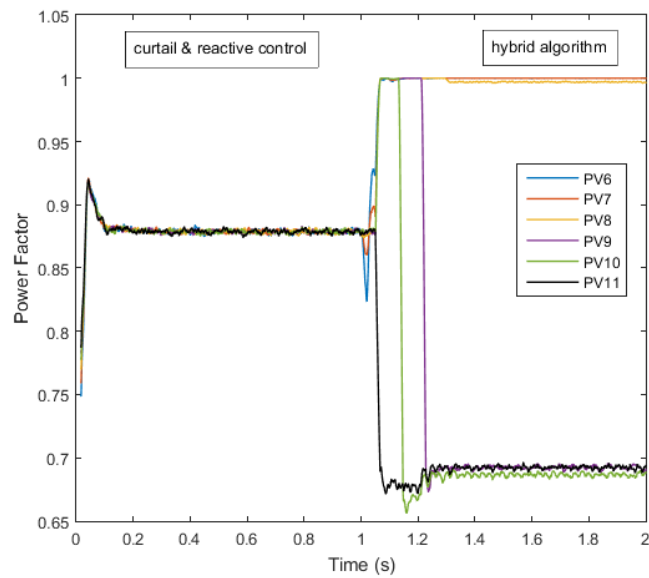
Σχήμα 5.44 : Κατανάλωση αέργου ισχύος (α)



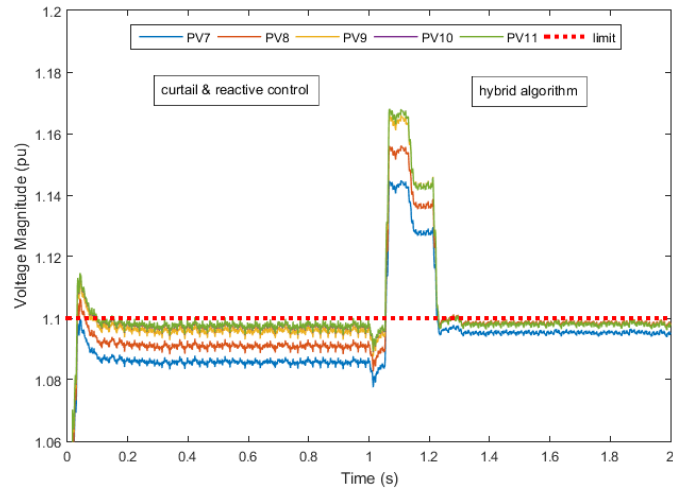
Σχήμα 5.45 : Κατανάλωση αέργου ισχύος (β)



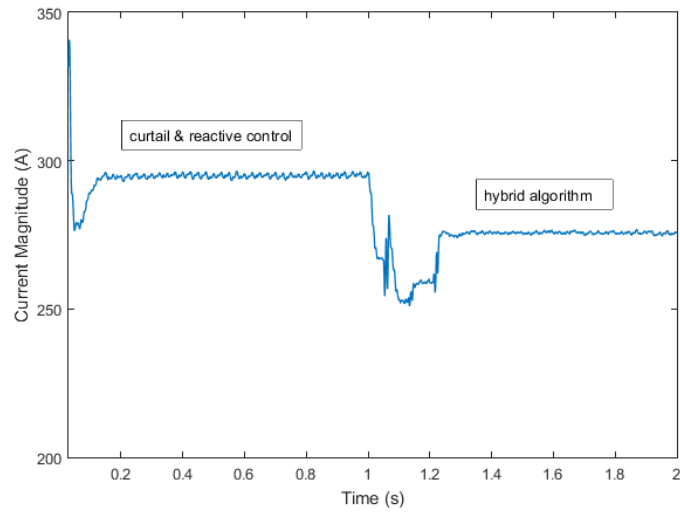
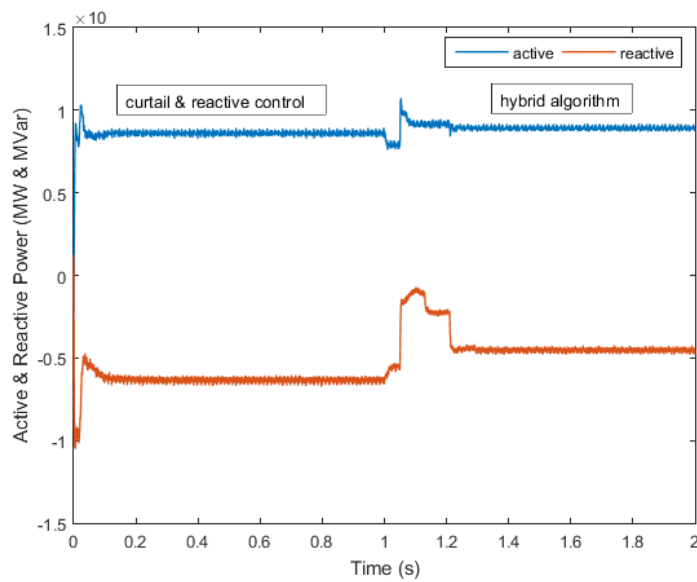
Σχήμα 5.46 : Συντελεστής ισχύος (α)



Σχήμα 5.47 : Συντελεστής ισχύος (β)



Σχήμα 5.48 : Μέτρο τάσης (αμ)

Σχήμα 5.49 : Ρεύμα γραμμής διανομής I 

Σχήμα 5.50 : Εγχεόμενη ενεργός ισχύς και καταναλισκόμενη άεργος ισχύς

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένας υβριδικός αλγόριθμος ρύθμισης τάσης, ο οποίος κάνει χρήση της δυνατότητας κατανάλωσης αέργου ισχύος των ΜΔΠ ώστε να μετριάζεται η ανύψωση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Η ανύψωση τάσης είναι ένα συχνό φαινόμενο στα δίκτυα διανομής τα οποία περιλαμβάνουν ΔΠ λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος. Η ανύψωση τάσης είναι ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες που δυσχεραίνουν την περαιτέρω διείσδυση ΔΠ.

Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, ο υβριδικός αλγόριθμος επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Ο υβριδικός αλγόριθμος έχει μικρές απαιτήσεις επικοινωνίας ανάμεσα στις ΜΔΠ ώστε να είναι εύρωστος και ευέλικτος. Συγκεκριμένα, απαιτείται η αποστολή του μέτρου της τάσης της ΜΔΠ που είναι στον τελευταίο κόμβο της γραμμής διανομής, στις υπόλοιπες ΜΔΠ που συμμετέχουν στη ρύθμιση τάσης. Η αποστολή της τάσης μπορεί να επιτευχθεί με PLC ώστε να μην απαιτούνται περαιτέρω υποδομές επικοινωνίας.

Στην συνέχεια, αναπτύχθηκαν τρεις τεχνικές ρύθμισης τάσης κατά τις οποίες οι αποφάσεις λαμβάνονται ανεξάρτητα για την κάθε ΜΔΠ. Οι δύο αυτόνομοι έλεγχοι, ο έλεγχος Q(P) και ο έλεγχος σταθερού ΣΙ υπολογίζουν την άεργο ισχύ, που πρέπει να καταναλωθεί από την κάθε μονάδα, συναρτήσει της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Κατά τον τρίτο αυτόνομο έλεγχο, εφαρμόζεται συνδυασμός αποκοπής ενεργού ισχύος και κατανάλωσης αέργου ώστε να ρυθμίζεται η τάση και να μην υπερφορτώνεται το δίκτυο. Επιπλέον, προτάθηκε ένα μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης, το οποίο περιλαμβάνει τον συνδυασμένο έλεγχο και τον υβριδικό αλγόριθμο, με στόχο την αποκοπή ενεργού ισχύος μόνο σε περιπτώσεις όπου το ρεύμα υπερβαίνει τα θερμικά όρια της γραμμής διανομής.

Οι προσομοιώσεις των σχημάτων ρύθμισης τάσης που αναλύθηκαν, γίνονται σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής ΜΤ δύο κλάδων. Ο πρώτος κλάδος περιλαμβάνει μόνο φορτία και ο δεύτερος κλάδος περιλαμβάνει μόνο φωτοβολταϊκές μονάδες. Στο ακτινικό δίκτυο, για την ρύθμιση της τάσης, εφαρμόστηκε επίσης βέλτιστη ροή ισχύος μέσω του MATPOWER. Η βέλτιστη ροή ισχύος (OPF) αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και περιορισμό το όριο της τάσης των κόμβων και κατανέμει βέλτιστα την άεργο ισχύ στις ΜΔΠ. Η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς ΔΠ για το κάθε σχήμα ρύθμισης τάσης αναγράφεται στον Πίνακα 6.1. Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση του μεικτού σχήματος, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, όμως θα απαιτείται μεγαλύτερο ποσοστό αποκοπής ενεργού ισχύος, το οποίο μπορεί να αποτελεί μη επιθυμητή λύση.

Το πλεονέκτημα του υβριδικού αλγορίθμου και του μεικτού σχήματος έναντι των δύο αυτόνομων ελεγχων είναι ότι αφενός επιτρέπουν μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ΔΠ και αφετέρου για την εφαρμογή τους απαιτείται η υπερδιαστασιολόγηση μόνο των τελευταίων

ΜΔΠ. Οι αυτόνομοι έλεγχοι απαιτούν υπερδιαστασιολόγηση όλων των ΜΔΠ και οι παράγοντες υπερδιαστασιολόγησης αναγράφονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6. Επιπρόσθετα, οι αυτόνομοι έλεγχοι παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες ενεργού ισχύος.

Παρόλο που με την μέθοδο OPF αυξάνεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΔΠ και ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενεργού ισχύος, για την εφαρμογή της απαιτείται ένα εκτενές σύστημα επικοινωνίας και ένας κεντρικός ελεγκτής ο οποίος επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης και αποστέλει τις αποφάσεις στις ΜΔΠ. Επιπρόσθετα, απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση όλων των μονάδων και οι παράγοντες υπερδιαστασιολόγησης αναγράφονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 6.1 : Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΔΠ κάθε τεχνικής ρύθμισης τάσης

Ρύθμιση τάσης	Έλεγχος droop	Έλεγχος σταθερού ΣΙ	Υβριδικός αλγόριθμος	Μεικτό σχήμα	OPF
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΔΠ (MW)	9.01	9.7	10.6	11.1	11.55

6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί ως ακολούθως:

- Ο υβριδικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, εφαρμόζεται σε γραμμές διανομής που περιλαμβάνουν μόνο διανεμημένη παραγωγή. Συνεπώς, μπορεί να επεκταθεί και να τροποποιηθεί έτσι ώστε να εφαρμόζεται σε γραμμές διανομής που περιλαμβάνουν φορτία και ΜΔΠ.
- Ενσωμάτωση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας έτσι ώστε η ενεργός ισχύς που αποκόπτεται από τις ΦΒ μονάδες να αποθηκεύεται σε συσσωρευτές.
- Η αποκοπή ενεργού ισχύος στο προτεινόμενο μεικτό σχήμα ρύθμισης τάσης επιτυγχάνεται αποκόπτοντας ένα σταθερό ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος. Μπορεί να εφαρμοστεί αποκοπή τύπου droop, ώστε η εγγεόμενη ισχύς των ΦΒ μονάδων να υπολογίζεται από την εξίσωση [26]:

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{MPPT} - m(V - V_{th}) & V > V_{th} \\ P_{MPPT} & V < V_{th} \end{cases} \quad (6.1)$$

όπου P_{MPPT} είναι η μέγιστη διαθέσιμη ενεργός ισχύ της ΦΒ μονάδας, m είναι ο συντελεστής κλίσης και V_{th} είναι το κατώφλι (threshold) της τάσης από την οποία και πάνω θα ξεκινάει η αποκοπή ενεργού ισχύος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [2] Π. Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [3] T. Aderafati and R. C. Bansal, "Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no 7, pp. 873-884, July 2016.
- [4] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. IEEE Press, Piscataway, NJ, 2011.
- [5] S. Z. Islam, N. Marium, H. Hizam, M. L. Othman, M. A. Radzi, M. Hanif and I. Z. Abidin, "Communication for Distributed Renewable Generations (DRGs): A Review on the Penetration to Smart Grids (SGs)," 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, Dec. 2012.
- [6] J. M. Morales, A. J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson and M. Zugno, *Integrating Renewables in Electricity Markets*. Springer, 2014.
- [7] J. Jaturacherdchaiskul and S. Thongkeaw, "Planning and Operation for Power System with Wind Power Generators: A Review", 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Sept. 2012.
- [8] Κωσταντίνος Θ. Δέρβος, *Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από την Θεωρία στην Πράξη*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2013.
- [9] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς και Κ. Ντελκής, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Έλεγχος και Ενστάθεια Συστήματος*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2011.
- [10] V. Arcidiacono, M. Chiandone and G. Sulligoi, "Voltage control in distribution networks using smart control devices of the Distributed Generators," 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), June 2011.
- [11] R. A. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke and L. A. Kojovic, "Summary of distributed resources impact on power delivery systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no.3, pp. 1636-1644, July 2008.
- [12] Σ. Ν. Μανιάς, *Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρίας, 2013.
- [13] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Wiley and IEEE Press, NJ, 2010.
- [14] C. Schauder, *Advanced inverter technology for high penetration levels of PV generation in distribution systems*, NREL, March 2014.
- [15] Γ. Σ. Περαντζάκης, *Ανάλυση και σχεδίαση μιας νέας τοπολογίας υβριδικού αντιστροφέα πολλαπλών επιπέδων με πηγή τάσης*. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2007.

- [16] G. Kryonidis, C. S. Demoulias and G. K. Papagiannis, "A nearly decentralized voltage regulation algorithm for loss minimization in radial MV networks with high distributed generation penetration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1430-1439, April 2016.
- [17] M. Tahir, M. E. Nassar, R. El-Shatshat, M. M. A. Salama, "A review of Volt/Var control techniques in passive and active power distribution networks," 2016 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Aug. 2016.
- [18] M. Brenna, E. De Berardinis, L. D. Carpinì, F. Foiadelli, P. Paulon, P. Petroni, G. Sapienza, G. Scrosati, D. Zaninelli, "Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 877-885, Sept. 2012.
- [19] Z. Wang, H. Chen, J. Wang, M. Begovic, "Inverter-less hybrid Voltage/Var control for distribution circuits with photovoltaic generators," *IEEE Transactions of Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2718-2728, Nov. 2014.
- [20] A. Samadi, R. Eriksson, L. Soder, B. G. Rawn and J. C. Boemer "Coordinated active power-dependent voltage regulation in distribution grids with PV systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1454-1464, June 2014.
- [21] N. Baldenko and S. Behzadirafi, "Determination of photovoltaic hosting capacity on radial electric distribution feeders," 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 28 Sept. - 1 Oct. 2016.
- [22] M. Ishimaru, H. Tamachi and S. Komami, "Positive effect of constant leading power factor operation of PV in Power System," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 190, no. 1, 2015.
- [23] S. Weckw, C. Gonzalez and J. Driesen, "Combined central and local active and reactive power control of PV inverters," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 776-784, July 2014.
- [24] E. Dall'Anese, S. V. Dhople and G. B. Giannakis, "Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp.487-497, April 2014.
- [25] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [26] R. Tonkoski, L. A. C. Lopez and T. H. M. El-Fouly, "Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 2, pp.139-147, April 2011.

