



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

**Σχεδίαση Ελεγκτή για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης
Ισχύος Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Συστήματος υπό
Συνθήκες Μερικής Σκίασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Μ. Ντάκος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013



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

**Σχεδίαση Ελεγκτή για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης
Ισχύος Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Συστήματος υπό
Συνθήκες Μερικής Σκίασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Μ. Ντάκος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Χ^η Σεπτεμβρίου 2013.

.....

Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Σ. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Σ. Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

.....

Παναγιώτης Μ. Ντάκος

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

Copyright © Παναγιώτης Μ. Ντάκος, 2013

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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ελεγκτής δύο σταδίων για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος υπό συνθήκες μερικής σκίασης.

Το πρώτο στάδιο του ελεγκτή βασίζεται στην τεχνική ελέγχου της Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου, όπου μια γραμμική εξίσωση της τάσης, συναρτήσει του ρεύματος, μεταφέρει τη λειτουργία του συστήματος κοντά στην περιοχή του σημείου μέγιστης ισχύος, ενώ το δεύτερο στάδιο αποτελείται από τον αλγόριθμο Στοιχειώδους Αγωγιμότητας, ο οποίος αναλαμβάνει την ακριβή εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.

Επίσης, αναπτύσσεται μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος, με τη χρήση του λογισμικού Simulink[®]/Matlab[®], για την προσομοίωση της λειτουργίας του Προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχου, καθώς και των αλγορίθμων Διαταραχής και Παρατήρησης, Στοιχειώδους Αγωγιμότητας και τον αλγόριθμο Τοποθέτησης Σημείας, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του πρώτου.

Τέλος, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα και για συγκεκριμένη μεταβολή στο επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και από τον τρόπο σκίασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, προέκυψε ότι η Προτεινόμενη τεχνική ελέγχου επιτυγχάνει την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος με την εμφάνιση ελάχιστων ταλαντώσεων.

Λέξεις Κλειδιά

Σημείο μέγιστης ισχύος, μερική σκίαση, φωτοβολταϊκό σύστημα, αλγόριθμος δύο σταδίων, ελεγκτής δύο σταδίων.

ABSTRACT

This diploma thesis develops a two stages maximum power point tracking controller for the operation of a photovoltaic system under partially shaded conditions.

The first stage is based on the Load Line control technique, where a linear equation of the voltage with the current transfer the operation of the system in the vicinity of the maximum power point, and the second stage is composed of the Incremental Conductance algorithm, which is responsible to converge the operation of the system on the maximum power point.

In addition, it is developed a model of a photovoltaic system with the use of Simulink[®]/Matlab[®] software. The model is used to simulate the operation of the Proposed algorithm, as well as the operation of the Perturb and Observe algorithm, the Incremental Conductance algorithm and the Flag Locating algorithm in order to determine the efficiency of the former.

Finally, the simulation results on a real photovoltaic system under certain change in the irradiance level and on the way that the photovoltaic panels are shaded show that the Proposed control technique tracks the maximum power point with minimum oscillations.

Key Words

Maximum power point, partially shaded, photovoltaic system, two stages algorithm, two stages controller

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με αυτή την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ιδιαίτερος, ευχαριστώ τον διδάκτορα κύριο Χαράλαμπο Πάτσιο για την πολύπλευρη στήριξη του, την ευχάριστη και άψογη συνεργασία αλλά και για τις ποικίλες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ τους καθηγητές μου κύριο Στέφανο Μανιά και κύριο Σταύρο Παπαθανασίου για τις επισημάνσεις τους και τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της εργασίας.

Τέλος, έχω την ανάγκη να ευχαριστήσω και να αφιερώσω αυτή τη διπλωματική εργασία στην αγαπημένη μου Οικογένεια που τόσα χρόνια με στηρίζει ηθικά, ψυχολογικά και οικονομικά να φέρω εις πέρας τις σπουδές μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1.....	14
Εισαγωγή.....	14
1.1 Γενικά	14
1.2 Σκοπός	16
1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	17
Κεφάλαιο 2.....	18
Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου και Τεχνικές Ελέγχου για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Ομοιόμορφης Ηλιακής Ακτινοβολίας	18
2.1 Εισαγωγή.....	18
2.2 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος	19
2.2.1 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου Σύμφωνα με τα Βασικά τους Προβλήματα	19
2.2.2 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου Σύμφωνα με τις Συνθήκες της Ηλιακής Ακτινοβολίας	21
2.3 Τεχνικές Ελέγχου για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Ομοιόμορφης Ηλιακής Ακτινοβολίας	22
2.3.1 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb & Observe).....	22
2.3.2 Αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητα (Incremental Conductance).....	25
2.3.3 Αλγόριθμος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος ως Ποσοστό της Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος V_{ακ} (Open Voltage, OV).....	28
2.3.4 Αλγόριθμος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος ως Ποσοστό του Ρεύματος Βραχυκυκλώματος I_{βρ} (Short Current, SC)	28
2.3.5 Αλγόριθμος Ελέγχου με Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic).....	29
2.3.6 Αλγόριθμος Νευρωνικών Δικτύων (Neural Networks)	32
2.3.7 Αλγόριθμος Ελέγχου με Συσχέτιση της Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control)	33
2.3.8 Αλγόριθμος Σάρωσης Ρεύματος (Current Sweep)	35
2.3.9 Αλγόριθμος DC Link Capacitor Droop Control (DC LCDC)	36
2.3.10 Αλγόριθμος Μεγιστοποίησης Ρεύματος ή Τάσης Φορτίου (Load Current or Load Voltage Maximization).....	37
2.3.11 Αλγόριθμος dP_{dV} ή dP_{dI} Ελέγχου Ανατροφοδότησης (Feedback Control).....	38
2.3.12 Άλλοι Αλγόριθμοι Εύρεσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος.....	39

2.4	Συμπεράσματα.....	40
-----	-------------------	----

Κεφάλαιο 3.....	44
Τεχνικές Ελέγχου και Κυκλωματικές Τεχνικές για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης.....	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Φαινόμενο Μερικής Σκίασης.....	45
3.2.1 Φωτοβολταϊκά Κύτταρα Συνδεδεμένα σε Σειρά υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης	45
3.2.2 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης.....	47
3.2.3 Επίδραση των Διόδων Παράκαμψης στις Χαρακτηριστικές Καμπύλες των Φωτοβολταϊκών Κυττάρων	49
3.2.4 Προβλήματα Φωτοβολταϊκών Συστοιχιών υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης.....	52
3.3 Αλγοριθμικές Τεχνικές Ελέγχου για την εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης.....	53
3.3.1 Κλίση της Καμπύλης Ισχύος (Power Curve Slope).....	53
3.3.2 Γραμμική Εξίσωση Φορτίου (Load Line MPPT).....	54
3.3.3 Χωρισμός σε Ορθογώνια (Dividing Rectangles Technique)	56
3.3.4 Τεχνική Αύξησης Ισχύος (Power Increment Technique).....	57
3.3.5 Στιγμιαία Βελτιστοποίηση Ισχύος Λειτουργίας (Instantaneous Operating Power Optimization).....	58
3.3.6 Αναζήτηση Fibonacci (Fibonacci Search).....	60
3.3.7 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks).....	61
3.3.8 Particle Swarm Optimization (PSO).....	62
3.4 Συνδεσμολογίες Φ/Β Συστοιχίας (Array Configuration).....	63
3.5 Αρχιτεκτονικές Φωτοβολταϊκών Συστημάτων (PV System Architectures)	65
3.6 Κυκλωματικές Τοπολογίες (Circuit Topologies).....	66
3.6.1 Μετατροπείς Πολλών Επιπέδων (Multilevel Converters).....	66
3.6.2 Έγχυση Τάσης (Voltage Injection)	67
3.6.3 Κύκλωμα Ελέγχου Παραγωγής (Generation Control Circuits)	69
3.6.4 Ενσωματωμένοι Μετατροπείς Πλαισίου (Module Integrated Converters)	71
3.6.5 Μετατροπείς Πολλαπλών Εισόδων (Multiple Input Converters).....	72
3.7 Συμπεράσματα.....	73

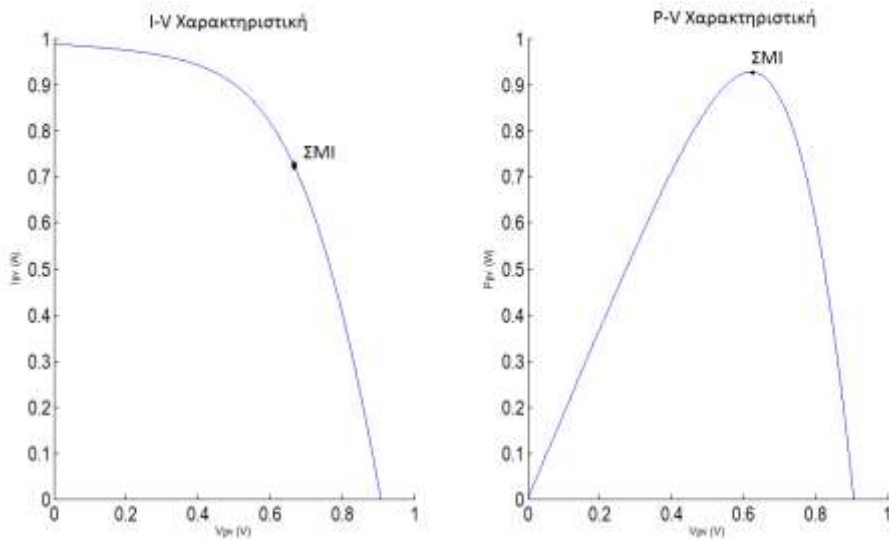
Κεφάλαιο 4.....	76
Σχεδίαση Τεχνικής Ελέγχου για την Αναζήτηση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης.....	76
4.1 Εισαγωγή.....	76
4.2 Κριτήρια Κατασκευής.....	77
4.3 Προτεινόμενος Αλγόριθμος.....	78
4.3.1 Πρώτο στάδιο.....	79
4.3.2 Δεύτερο Στάδιο.....	82
4.4 Παράδειγμα Λειτουργίας Προτεινόμενου Αλγορίθμου.....	84
4.5 Διαφοροποίηση του Προτεινόμενου αλγορίθμου.....	85
4.6 Επίλογος.....	85
Κεφάλαιο 5.....	86
Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Συστήματος.....	86
5.1 Εισαγωγή.....	86
5.2 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας.....	87
5.2.1 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Κυττάρου.....	87
5.2.2 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	89
5.3 Μοντελοποίηση DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης.....	90
5.4 Μοντελοποίηση Πραγματικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος.....	94
5.5 Προσομοίωση του Πραγματικού Τρόπου Σκίασης του Φωτοβολταϊκού Συστήματος.....	95
5.6 Αξιολόγηση Αλγορίθμων Προσομοίωσης.....	98
5.6.1 Αξιολόγηση Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης (ΔΠ).....	98
5.6.2 Αξιολόγηση Αλγορίθμου Στοιχειώδης Αγωγιμότητα (ΣΑ).....	101
5.6.3 Αξιολόγηση Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημαίας (ΤΣ).....	102
5.7 Παράμετροι Δίκαιης Σύγκρισης.....	105
5.8 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	106
5.8.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Προτεινόμενου Αλγορίθμου.....	107
5.8.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημαίας.....	109
5.8.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης.....	111
5.8.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αλγορίθμου Στοιχειώδης Αγωγιμότητα.....	113
5.8.5 Συνολικά Αποτελέσματα.....	115
5.9 Επίλογος.....	116

Κεφάλαιο 6.....	118
Συμπεράσματα.....	118
6.1 Γενικά	118
6.2 Συμπεράσματα Εργασίας	119
6.3 Συμβολή Εργασίας.....	120
6.4 Προτεινόμενα Θέματα προς Μελέτη.....	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	126

1.1 Γενικά

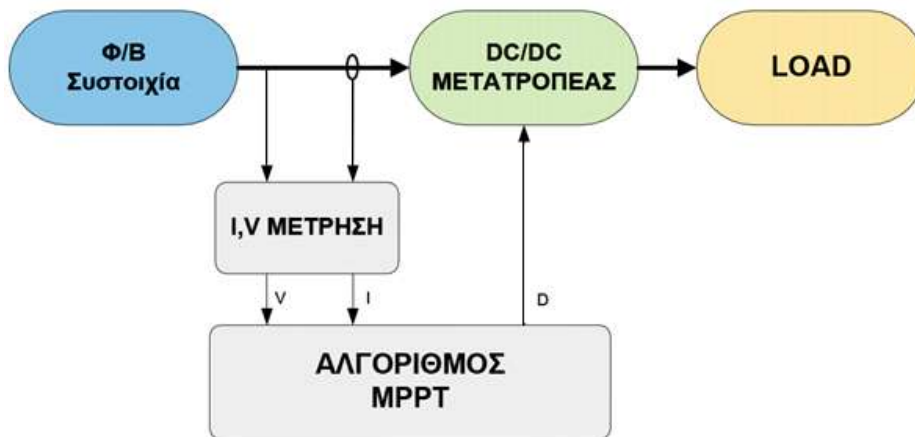
Η συνεχόμενη αύξηση της ζήτησης για χαμηλού κόστους ενέργεια και η ευαισθητοποίηση για περιβαλλοντικά θέματα, έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για μη-συμβατικές μορφές ενέργειας όπως είναι η ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια είναι ελεύθερη και απεριόριστα διαθέσιμη και μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκών (φ/β) κυττάρων. Μια φ/β πηγή έχει τα εξής πλεονεκτήματα: χαμηλό κόστος συντήρησης, έλλειψη κινούμενων εξαρτημάτων και μηδενικές εκπομπές ενέργειας. Στον αντίποδα, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή έως και μηδενική απόδοση ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας ή ακόμη κατά την διάρκεια συνθηκών μερικής σκίασης (ΣΜΣ). Επίσης, το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι ένας ακόμη λόγος για το μικρό ενδιαφέρον των επενδυτών [1]. Παρά την ύπαρξη αυτών των δυσκολιών, τα φ/β συστήματα είναι τα πιο δημοφιλή σε χρήση, έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών πηγών ενέργειας, κυρίως λόγω της προόδου της τεχνολογίας τους και των ευνοούμενων κυβερνητικών ρυθμίσεων από διάφορες χώρες.

Η πιο σημαντική πρόκληση στη χρήση των φ/β είναι η μη γραμμική σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης (I-V χαρακτηριστική), η οποία οδηγεί στην ύπαρξη ενός μόνο μεγίστου στη χαρακτηριστική σχέση μεταξύ ισχύος και τάσης (P-V χαρακτηριστική), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο περίπλοκο λόγω της συσχέτισης των προηγούμενων χαρακτηριστικών με το επίπεδο της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Η μεταβολή αυτών των παραμέτρων μεταβάλλει και τη θέση του σημείου μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ). Λαμβάνοντας υπόψη το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης και τη χαμηλή απόδοση των φ/β, η λειτουργία του φ/β συστήματος στο ΣΜΙ είναι καίριας σημασίας για την εξαγωγή της μέγιστης δυνατής ενέργειας [2].



Σχήμα 1.1: I-V και P-V χαρακτηριστικές με ένα σημείο μέγιστης ισχύος.

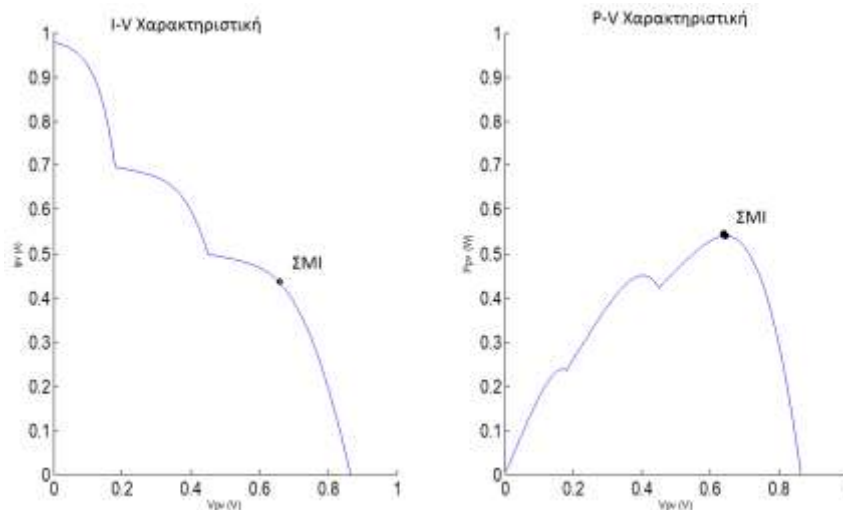
Στη γενικότητα, μια φ/β γεννήτρια λειτουργεί συνδεδεμένη με ένα DC-DC μετατροπέα ισχύος, του οποίου το duty cycle καθορίζεται από μια τεχνική ελέγχου για την εύρεση του ΣΜΙ της γεννήτριας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Έχουν προταθεί πολλές τεχνικές ελέγχου στη βιβλιογραφία. Μεταξύ αυτών, οι πιο δημοφιλείς είναι ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb and Observed) και ο αλγόριθμος Στοιχειώδους Αγωγιμότητας (Incremental Conductance).



Σχήμα 1.2: Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Οι περισσότερες τεχνικές ελέγχου είναι αρκετά αποδοτικές υπό συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας, όπου οι P-V χαρακτηριστικές των φ/β πλαισίων παρουσιάζουν μόνο ένα ΣΜΙ για συγκεκριμένη θερμοκρασία και επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση όμως που τα φ/β πλαίσια είναι υπό ΣΜΣ, τότε οι απώλειες ισχύος μπορεί να φθάσουν έως και 70% [3]. Υπό ΣΜΣ, όπου η φ/β συστοιχία δε δέχεται σε όλη την έκτασή της την ίδια ηλιακή ακτινοβολία, η P-V χαρακτηριστική γίνεται πολύ περίπλοκη, παρουσιάζοντας πολλαπλά μέγιστα, όπου μόνο ένα από αυτά είναι το ολικό μέγιστο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.

Η παρουσία πολλαπλών κορυφών στην P-V χαρακτηριστική μειώνει την αποτελεσματικότητα των περισσότερων τεχνικών ελέγχου, οι οποίες υποθέτουν ότι υπάρχει μόνο ένα ΣΜΙ στην καμπύλη ισχύος. Η εμφάνιση ΣΜΣ είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο που συμβαίνει λόγω γειτονικών εμποδίων όπως δέντρα, κτήρια κ.α. ή από το πέρασμα σύννεφων ή ακόμη και από τα ίδια τα πλαίσια μεταξύ τους. Τέλος, το φαινόμενο των ΣΜΣ δημιουργεί την ανάγκη κατασκευής τεχνικών εύρεσης του ΣΜΙ υπό αυτές τις συνθήκες.



Σχήμα 1.3: I-V και P-V χαρακτηριστικές υπό συνθήκες μερικής σκίασης.

1.2 Σκοπός

Στην εργασία αυτή θα μελετηθούν και θα αναπτυχθούν όλες οι τεχνικές ελέγχου για την αναζήτηση του ΣΜΙ των φ/β συστοιχιών, τόσο για ομοιόμορφες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας όσο και για ΣΜΣ. Πιο συγκεκριμένα, απώτερος στόχος της εργασίας είναι η μοντελοποίηση ενός αλγορίθμου δύο σταδίων ο οποίος θα ανταποκρίνεται αποτελεσματικά σε ΣΜΣ. Το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου θα βασίζεται στην τεχνική ελέγχου της Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου [4] [5], όπου μια γραμμική εξίσωση της τάσης, συναρτήσε του ρεύματος, θα μεταφέρει τη λειτουργία του συστήματος κοντά στην περιοχή του ΣΜΙ, και το δεύτερο στάδιο θα αποτελείται από τον αλγόριθμο Στοιχειώδους Αγωγιμότητας [4] [6] [7], που θα αναλαμβάνει την ακριβή εύρεση του ΣΜΙ.

1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Παρακάτω δίδεται μια σύντομη επισκόπηση των κεφαλαίων που θα ακολουθήσουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια κατηγοριοποίηση των τεχνικών ελέγχου σύμφωνα με τα βασικά τους προβλήματα και σύμφωνα με τις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, γίνεται μια περιγραφή των βασικών αλγόριθμων που βρίσκουν αποτελεσματικά το ΣΜΙ υπό ομοιόμορφες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και ο τρόπος που αυτές οι τεχνικές ανταποκρίνονται στα προαναφερόμενα προβλήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης των φ/β, οι παράγοντες που το προκαλούν, τα προβλήματα που προκαλεί στη λειτουργία του συστήματος και οι τρόποι αντιμετώπισής του. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι αλγοριθμικές τεχνικές ελέγχου που αναζητούν το ΣΜΙ υπό ΣΜΣ καθώς και κάποιες κυκλωματικές, τοπολογικές και αρχιτεκτονικές διατάξεις που λειτουργούν επικουρικά στο έργο των αλγοριθμικών τεχνικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, σχεδιάζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου δύο σταδίων για την αναζήτηση του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κριτήρια πάνω στα οποία χτίστηκε αυτή η τεχνική ελέγχου και στη συνέχεια, αναπτύσσεται η λογική λειτουργίας ενός τέτοιου αλγορίθμου καθώς και η βιβλιογραφική έρευνα στην οποία στηρίχτηκε η κατασκευή του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται προσομοίωση της λειτουργίας του προηγούμενου αλγορίθμου σε πραγματικό σύστημα. Με τη χρήση του λογισμικού Simulink[®]/Matlab[®] γίνεται μοντελοποίηση του φ/β συστήματος και των συστημάτων ελέγχου. Επίσης, για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, μοντελοποιούνται οι αλγόριθμοι Διαταραχής και Παρατήρησης [6], Στοιχειώδους Αγωγιμότητας και ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημείας που είναι ευρέως γνωστός στη βιβλιογραφία [2].

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας και εξάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα.

Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου και Τεχνικές Ελέγχου για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Ομοιόμορφης Ηλιακής Ακτινοβολίας

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα γίνει μια προσπάθεια να κατηγοριοποιηθούν οι τεχνικές ελέγχου σύμφωνα με τα βασικά προβλήματα τους. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι κλασικές τεχνικές ελέγχου που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την εύρεση του ΣΜΙ υπό συνθήκες ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και θα μελετηθεί η απόκρισή τους στα προαναφερόμενα προβλήματα. Μια τεχνική ελέγχου είναι ουσιαστικά ένας αλγόριθμος που επεξεργάζεται κάποια στοιχεία του φ/β συστήματος για να αποφανθεί για την τιμή του ρεύματος και της τάσης λειτουργίας που μεγιστοποιούν την εξαγόμενη ισχύ του συστήματος, δηλαδή να βρει το ΣΜΙ. Τα στοιχεία εισόδου των αλγορίθμων είναι τις περισσότερες φορές η τρέχουσα τιμή του ρεύματος και της τάσης και πιο σπάνια η θερμοκρασία και το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος

2.2.1 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου Σύμφωνα με τα Βασικά τους Προβλήματα



Σχήμα 2.1: Κατηγοριοποίηση των τεχνικών ελέγχου σύμφωνα με τα βασικά τους προβλήματα.

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι αλγόριθμοι αναζήτησης του ΣΜΙ υπό ομοίμορφες συνθήκες λειτουργίας. Οι παράγοντες αυτοί παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στην επιλογή της σωστής τεχνικής ελέγχου όσο και στη λειτουργία τους. Πολλές τεχνικές καταφέρνουν να είναι πιο αποδοτικές στην αντιμετώπιση κάποιων προβλημάτων και να υστερούν σε κάποια άλλα. Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη βιβλιογραφία δε βρέθηκε αλγόριθμος που να ικανοποιεί τέλεια όλες τις παραμέτρους. Έτσι, η επιλογή έγκειται καθαρά στο είδος της εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος εύρεσης του ΣΜΙ. Παρακάτω αναλύονται ξεχωριστά όλα τα προβλήματα και οι παράμετροι που τα επηρεάζουν.

Κόστος: Είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί το χρηματικό κόστος κάθε τεχνικής αν δεν έχει κατασκευαστεί προηγουμένως. Μια καλή εκτίμηση του κόστους των τεχνικών

μπορεί να γίνει γνωρίζοντας αν η τεχνική είναι αναλογική η ψηφιακή, αν χρειάζεται προγραμματισμό, καθώς και τον αριθμό των αισθητήρων. Οι αναλογικές τεχνικές είναι φθηνότερες από τις ψηφιακές, οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούν μικροϋπολογιστή που χρειάζεται προγραμματισμό. Τέλος, το κόστος των αισθητήρων, ιδιαίτερα των αισθητήρων ρεύματος, είναι πολύ μεγάλο. Έτσι η χρήση τέτοιων αισθητήρων αυξάνει σημαντικά το συνολικό κόστος της τεχνικής ελέγχου.

Κυκλωματική Υλοποίηση: Η ευκολία υλοποίησης είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή της σωστής τεχνικής και εξαρτάται κυρίως από τον τελικό χρήστη. Μερικοί χρησιμοποιούν τεχνικές που υλοποιούνται από αναλογικά κυκλώματα και άλλοι τεχνικές που απαιτούν ψηφιακούς μικροϋπολογιστές που χρειάζονται λογισμικό και προγραμματισμό. Τέλος, υπάρχουν επίσης ελάχιστες τεχνικές που απαιτούν συγκεκριμένες τοπολογίες για την υλοποίησή τους.

Αλγοριθμική Πολυπλοκότητα: Η καρδιά κάθε τεχνικής ελέγχου είναι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό του ΣΜΙ και αποτελεί τον κυριότερο λόγο διαφοροποίησης των τεχνικών. Αυξημένη πολυπλοκότητα μιας τεχνικής ελέγχου απαιτεί γρήγορους και ακριβούς μικροϋπολογιστές για την υλοποίηση του ελέγχου, πράγμα που αυξάνει τόσο το συνολικό κόστος, όσο και τα πιθανά σφάλματα του συστήματος. Επίσης, ένα πολύπλοκο σύστημα δε μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό από τον τελικό χρήστη και έτσι μπορεί να μην επιλεγεί ποτέ προς χρήση. Στον αντίποδα, οι πολύπλοκοι αλγόριθμοι είναι συνήθως ακριβέστεροι και ταχύτεροι στην εύρεση του ΣΜΙ και χρησιμοποιούνται κυρίως σε τεχνικές εύρεσης ΣΜΙ υπό ΣΜΣ.

Πολλαπλά Μέγιστα: Η εμφάνιση πολλαπλών μεγίστων λόγω της ύπαρξης ΣΜΣ στη φ/β συστοιχία μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα στη σωστή λειτουργία του αλγορίθμου. Οι απώλειες ισχύος μπορεί να είναι σημαντικές αν ο αλγόριθμος εγκλωβιστεί σε ένα τοπικό μέγιστο και δε βρει το πραγματικό ΣΜΙ. Τέλος, στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί λεπτομερώς το πρόβλημα της εμφάνισης της μερικής σκίασης καθώς και οι τεχνικές οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του.

Σύγκλιση: Η σύγκλιση είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την αξία μιας τεχνικής ελέγχου. Με τον όρο σύγκλιση εννοούμε τόσο την ταχύτητα σύγκλισης στο ΣΜΙ, όσο και την ακρίβεια σύγκλισης. Και οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την εξαγόμενη ισχύ της φ/β συστοιχίας. Συνήθως οι τεχνικές με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια σύγκλισης είναι πιο ακριβές και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που το κόστος δε παίζει σημαντικό ρόλο π.χ. δορυφόροι. Οι τεχνικές που είτε αργούν να συγκλίνουν στο ΣΜΙ, είτε αποκλίνουν αρκετά από αυτό, μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες ισχύος.

Αισθητήρες: Η επιλογή μιας τεχνικής επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό των αισθητήρων που χρησιμοποιεί. Τις περισσότερες φορές είναι πιο εύκολο και πιο ακριβές να γίνεται υπολογισμός του ρεύματος και της τάσης. Επίσης, οι αισθητήρες ρεύματος είναι ογκώδεις και όπως ήδη προαναφέρθηκε, η τιμή τους είναι πολύ υψηλή. Αυτό δεν είναι καθόλου πρακτικό και οικονομικό για μεγάλες φ/β συστοιχίες που αποτελούνται από

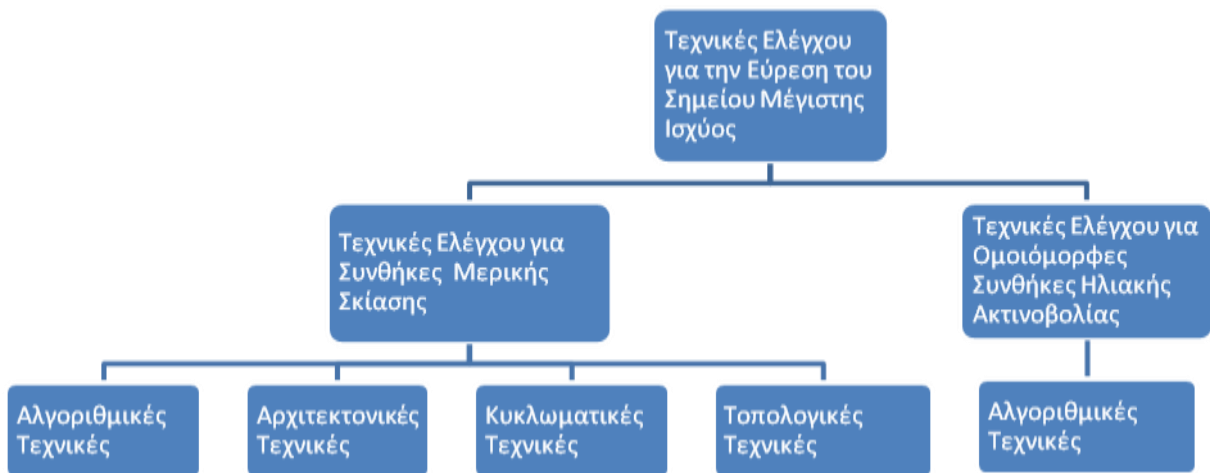
πολλούς μετατροπείς/αντιστροφείς. Σε αυτή την περίπτωση είναι πιο πιθανό να επιλεγεί μια τεχνική που απαιτεί τη χρήση μόνο ενός αισθητήρα ή μια τεχνική που κάνει εκτίμηση του ρεύματος μέσω της τάσης. Τέλος, μερικές τεχνικές απαιτούν τη χρήση αισθητήρων που μετρούν το επίπεδο της ακτινοβολίας ή τη θερμοκρασία.

Περιοδική Ρύθμιση: Μερικές τεχνικές χρήζουν περιοδικής ρύθμισης για να μπορούν να λειτουργήσουν σωστά και αποδοτικά. Ο λόγος που κάνουν τους αλγόριθμους αυτούς να απαιτούν συχνές ρυθμίσεις είναι η αλλαγή της θέσης του ήλιου από χειμώνα σε καλοκαίρι, η γήρανση, η εμφάνιση αντικειμένων που προκαλούν σκίαση κ.α. Οι τεχνικές αυτές είναι ακατάλληλες για απομακρυσμένες εγκαταστάσεις και μπορεί να αυξήσουν το συνολικό κόστος της εγκατάστασης λόγω της συχνής επίσκεψης του τεχνικού.

Εξάρτηση από Συστοιχία: Πολλοί αλγόριθμοι απαιτούν τη γνώση κάποιων παραμέτρων της φ/β συστοιχίας για τη σωστή λειτουργία τους. Οι παράμετροι αυτοί είναι συνήθως, η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς, το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοιχτού κυκλώματος και μερικές φορές η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών ώστε να μπορέσουν να αποφανθούν για το ΣΜΙ. Αν οι παράμετροι δε μετρούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας από το ίδιο το σύστημα ελέγχου, τότε πρέπει να γίνεται επίσης περιοδική αναβάθμιση του συστήματος ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα στην εύρεση του ΣΜΙ.

2.2.2 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Ελέγχου Σύμφωνα με τις Συνθήκες της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Μια άλλη δυνατή κατηγοριοποίηση των τεχνικών ελέγχου είναι σύμφωνα με τη δυνατότητα εύρεσης του ΣΜΙ υπό ομοιόμορφες και μη ομοιόμορφες συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συμβατικοί αλγόριθμοι αποτυγχάνουν να βρουν το ΣΜΙ όταν η φ/β συστοιχία είναι υπό ΣΜΣ, λόγω της δημιουργίας πολλαπλών μεγίστων στην καμπύλη ισχύος. Αυτό δημιούργησε την ανάγκη κατασκευής τεχνικών ελέγχου που να βρίσκουν το ΣΜΙ υπό οποιεσδήποτε συνθήκες σκίασης. Αν και στην περίπτωση των ομοιόμορφων συνθηκών προτείνονται μόνο αλγοριθμικές τεχνικές ελέγχου, αυτό δεν ισχύει και στην περίπτωση των μη ομοιόμορφων συνθηκών, όπου κυκλωματικές, τοπολογικές και αρχιτεκτονικές διατάξεις λειτουργούν επικουρικά στο έργο των αλγοριθμικών τεχνικών. Προφανώς βέβαια, βιβλιογραφικά η αντιμετώπιση του φαινομένου των ΣΜΣ επικεντρώνεται περισσότερο στην κατασκευή αποτελεσματικών αλγορίθμων. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν οι τεχνικές ελέγχου για ομοιόμορφη ακτινοβολία και στο επόμενο κεφάλαιο οι τεχνικές για εύρεση του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Τέλος, στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται η κατηγοριοποίηση που συζητήθηκε παραπάνω, μέσω διαγράμματος.

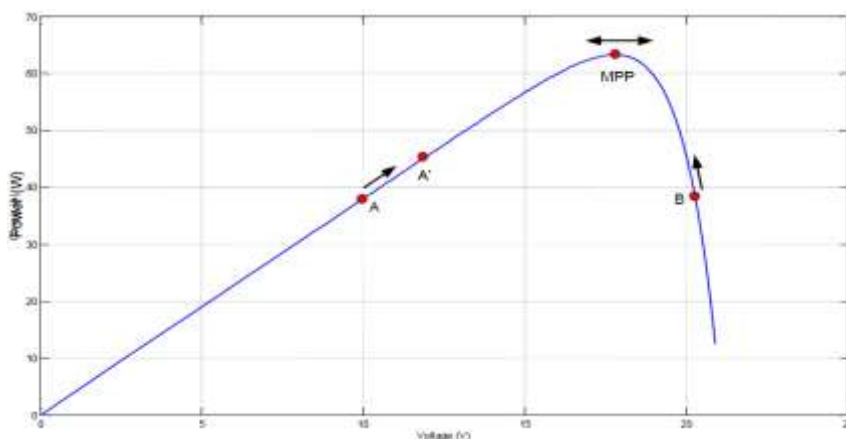


Σχήμα 2.2: Κατηγοριοποίηση τεχνικών ελέγχου σύμφωνα με τις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.3 Τεχνικές Ελέγχου για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Ομοιόμορφης Ηλιακής Ακτινοβολίας

2.3.1 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb & Observe)

Ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (ΔΠ) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την εύρεση το ΣΜΙ, στην οποία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος τύπου Hill climbing. Εν συντομία, ένας Hill climbing αλγόριθμος είναι μια μαθηματική τεχνική βελτιστοποίησης μέσω της οποίας μπορούν να λυθούν προβλήματα που έχουν πολλές λύσεις με κάποιες από αυτές να είναι καλύτερες από τις άλλες. Ο αλγόριθμος ξεκινά με μια τυχαία (πιθανή) λύση, για την οποία πραγματοποιούνται πολύ μικρές δοκιμές επαναληπτικά πάνω σε αυτή, επιχειρώντας τη βελτιστοποίησή της. Όταν ο αλγόριθμος αδυνατεί να τη βελτιστοποιήσει περαιτέρω, τότε προβάλλει την τελευταία λύση που προέκυψε ως τη βέλτιστη [8]. Ωστόσο, όπως θα φανεί και παρακάτω, δεν είναι απόλυτα σίγουρο το ότι η συγκεκριμένη λύση είναι όντως η βέλτιστη δυνατή.



Σχήμα 2.3: P-V χαρακτηριστική. Περιγραφή τρόπου λειτουργίας αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης.

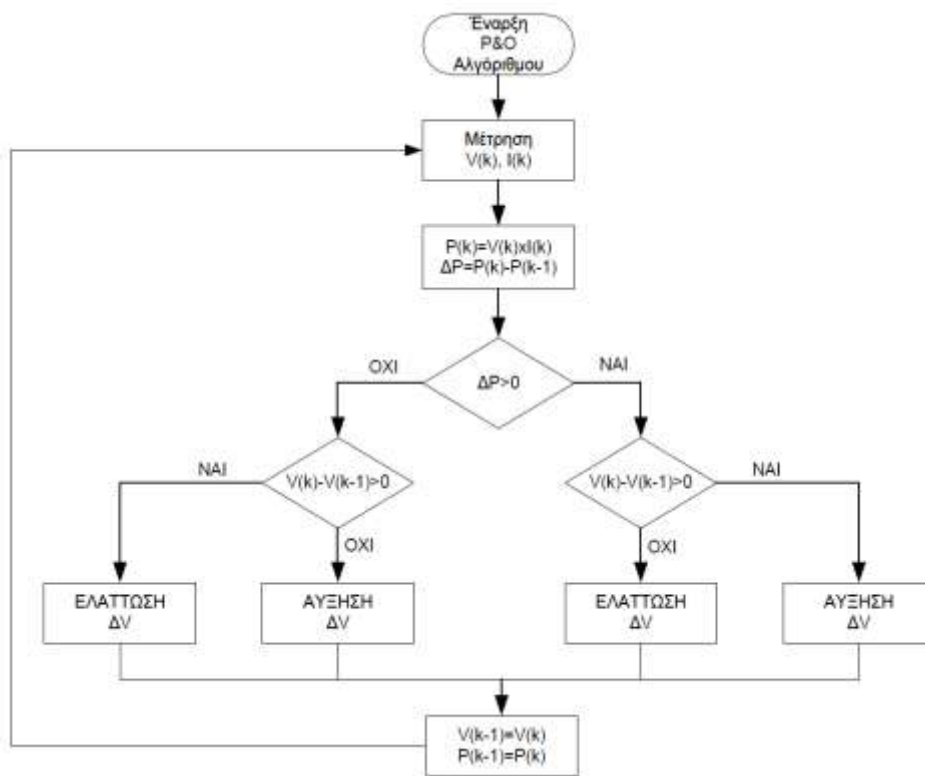
Σε ένα φ/β σύστημα όπως του Σχήματος 2.1, στο οποίο το φ/β πλαίσιο παρουσιάζει την P-V χαρακτηριστική του Σχήματος 2.2, η βασική εκδοχή της ΔΠ μεθόδου λειτουργεί ως εξής: Αρχικά λαμβάνεται σαν αφετηρία ένα τυχαίο σημείο A μέσω της μέτρησης του ρεύματος (I) και της τάσης (V) από την έξοδο του πλαισίου. Αυξάνοντας (διαταράσσοντας) τεχνητά την τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου με μεταβολή του duty ratio του μετατροπέα κατά ΔV , λαμβάνεται ένα ρεύμα I' και κατά συνέπεια η φ/β συστοιχία λειτουργεί σε νέο σημείο A' στη P-V χαρακτηριστική. Αν $\Delta P/\Delta V > 0$ τότε η συστοιχία λειτουργεί αριστερά του MPP (βλ. Σχήμα 2.2) και θα πρέπει να αυξηθεί η τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου περαιτέρω κατά ΔV προκειμένου να κινηθεί το σημείο λειτουργίας προς το MPP. Στον επόμενο κύκλο επαναλαμβάνεται η σύγκριση και αν $\Delta P/\Delta V < 0$, δηλαδή το σημείο λειτουργίας βρεθεί στα δεξιά του ΣΜΙ τότε θα πρέπει να μειωθεί η τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου. Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζεται ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου και στο Σχήμα 2.3 το διάγραμμα ροής.

Πίνακας 2.1

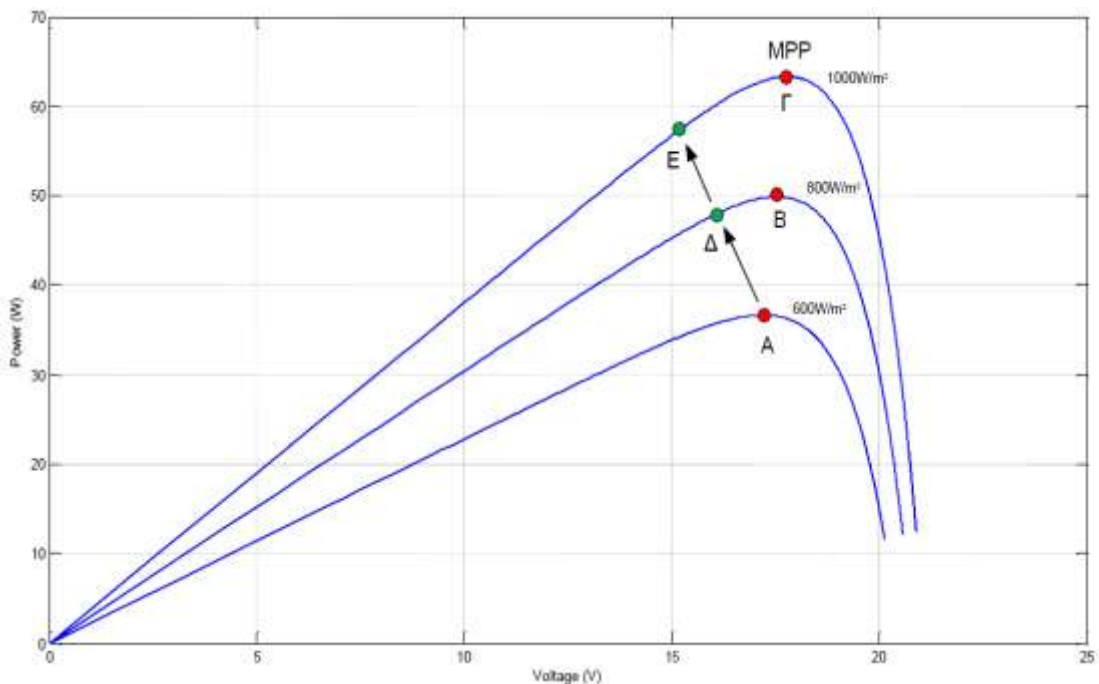
Προηγούμενη Διαταραχή ΔV	Αλλαγή ΔP	Επόμενη Διαταραχή ΔV
Θετική	Θετική	Θετική
Θετική	Αρνητική	Αρνητική
Αρνητική	Θετική	Αρνητική
Αρνητική	Αρνητική	Θετική

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου, που ταυτόχρονα υποβαθμίζει την απόδοση όλου του συστήματος αναζήτησης του ΣΜΙ, είναι η αδυναμία τερματισμού του όταν προσεγγιστεί η περιοχή του ΣΜΙ, με αποτέλεσμα τη διαρκή ταλάντωση γύρω από αυτό. Το εύρος της ταλάντωσης έχει να κάνει με το βήμα όπου είναι προγραμματισμένη να μεταβάλλεται η τάση ΔV , σε συνδυασμό πάντα με την ταχύτητα μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Μια πρόταση για την μείωση της ταλάντωσης θα μπορούσε να είναι η μείωση του βήματος μεταβολής της τάσης ΔV . Κάτι τέτοιο όμως, θα καθιστούσε τη συγκεκριμένη τεχνική αργή στην εύρεση του ΣΜΙ. Τελικά προκύπτει ότι η καλύτερη λύση για το πρόβλημα της ταλάντωσης γύρω από το ΣΜΙ είναι το βήμα μεταβολής της τάσης ΔV να είναι μεταβλητό και να μειώνεται σταδιακά όσο προσεγγίζει το ΣΜΙ [9].

Ένα ακόμα πρόβλημα της ΔΠ τεχνικής είναι η πιθανότητα λανθασμένης μετακίνησης του σημείου λειτουργίας της φ/β συστοιχίας σε αντίθετη κατεύθυνση από το ΣΜΙ, κάτω από ραγδαίες αλλαγές των ατμοσφαιρικών συνθηκών [9]. Αυτό φαίνεται με τη βοήθεια του Σχήματος 2.4.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης



Σχήμα 2.5: Πρόβλημα λειτουργίας αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης σε απότομες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ας υποθέσουμε ότι ένα φ/β σύστημα, στο οποίο εφαρμόζεται η τεχνική ΔΠ, κάποια χρονική στιγμή λειτουργεί ταλαντευόμενο στη στενή περιοχή του σημείου Α όπου βρίσκεται το ΣΜΙ για τις παρούσες συνθήκες περιβάλλοντος (βλ. Σχήμα 2.4). Αν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξηθεί ξαφνικά, τότε ο αλγόριθμος Δ&Π θα υπολογίσει $\Delta P > 0$. Αυτό έχει σαν συνέπεια, για την περίπτωση που το ΔV είναι αρνητικό (δηλαδή κίνηση προς τα αριστερά του ΣΜΙ), το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας να μετακινηθεί στο Δ αντί στο Β. Αυτό συμβαίνει διότι η συγκεκριμένη τεχνική εύρεσης του ΣΜΙ δεν μπορεί να αποφανθεί αν το θετικό ΔP προκύπτει λόγω αύξησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ερμηνεύει ως κίνηση του σημείου λειτουργίας κοντύτερα στο ΣΜΙ. Όμως, επειδή η κίνηση του σημείου λειτουργίας τη στιγμή της ξαφνικής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν προς τα αριστερά, ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται ότι το ΣΜΙ θα βρίσκεται πιο αριστερά του Δ και θα προχωρήσει με αρνητικό ΔV . Αν η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας συνεχιστεί με ταχύ ρυθμό, το σημείο λειτουργίας θα μεταφέρεται περαιτέρω προς τα αριστερά (π.χ. στο Ε), απομακρύνοντας το ακόμα πιο πολύ από το ΣΜΙ. Κατά συνέπεια, συμπεραίνεται ότι ο αλγόριθμος ΔΠ δεν είναι αξιόπιστος στις περιπτώσεις που οι μεταβολές στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (αλλά και των συνθηκών περιβάλλοντος γενικότερα) λαμβάνουν χώρα με ρυθμό που είναι συγκρίσιμος με την ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων ρεύματος και τάσης της φ/β συστοιχίας [9]. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό λύνεται σε κάποιες βελτιωμένες εκδοχές του αλγορίθμου με σύγκριση του τρέχοντος σημείου λειτουργίας με τουλάχιστον δύο προηγούμενα. Έτσι, η απόφαση που θα ληφθεί για το πρόσημο του ΔV θα είναι περισσότερο ασφαλής [8].

Γενικά, ο συγκεκριμένος MPPT αλγόριθμος είναι εξαιρετικά δημοφιλής λόγω της ευκολίας στην υλοποίηση του. Εντούτοις, όπως αναφέρθηκε, για ταχέως μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες η συγκεκριμένη τεχνική δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλές τεχνικές που έχουν βελτιώσει τα μειονεκτήματα του βασικού ΔΠ, με τις περισσότερες να εστιάζουν σε τρόπους βελτιστοποίησης της δειγματοληψίας, κι άλλες να χρησιμοποιούν Adaptive Hill Climbing αλγορίθμους. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι για την υλοποίησης της τεχνικής ΔΠ χρειάζονται δύο αισθητήρες για την μέτρηση της τάσης λειτουργία και του ρεύματος που εξάγεται από τη φ/β συστοιχία. Έτσι υπολογίζεται το τρέχον σημείο P και το πλάτος (όπου υπάρχει η δυνατότητα μεταβλητού πλάτους) και το πρόσημο του ΔV [8]. Από τα παραπάνω είναι φανερό πως η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείτε κυρίως με μικροεπεξεργαστή, δεδομένου του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου.

2.3.2 Αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητα (Incremental Conductance)

Ο αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητα (ΣΑ) βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της P-V χαρακτηριστικής στο ΣΜΙ είναι μηδέν (βλ. Σχήμα 2.2), αριστερά του ΣΜΙ θετική και δεξιά του ΣΜΙ αρνητική [10]. Όπως στη παρακάτω Εξίσωση 2.1:

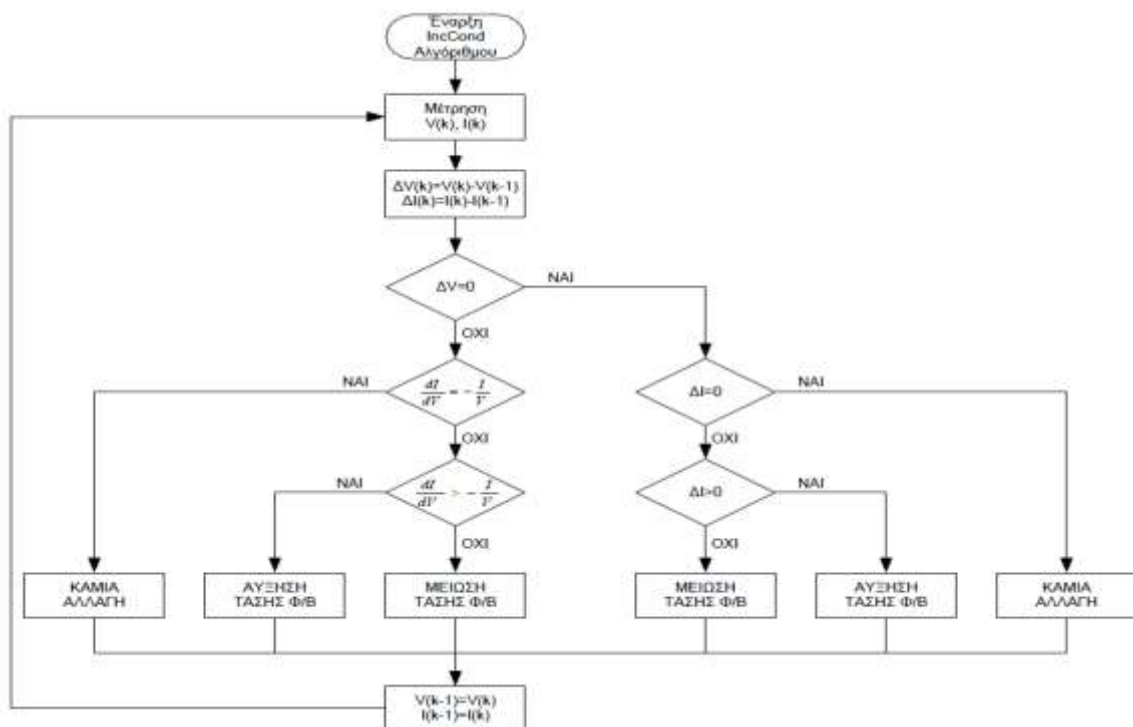
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} = 0, \text{ στο } \Sigma MI \\ \frac{dP}{dV} > 0, \text{ αριστερά του } \Sigma MI \\ \frac{dP}{dV} < 0, \text{ δεξιά του } \Sigma MI \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Επειδή $\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$ η Εξίσωση 2.1 ξαναγράφεται ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ στο } \Sigma MI \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ αριστερά του } \Sigma MI \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ δεξιά του } \Sigma MI \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

Επομένως, το ΣMI προσεγγίζει συγκρίνοντας διαδοχικά η στιγμιαία αγωγιμότητα (I/V) με τη στοιχειώδη ($\Delta I/\Delta V$). Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου.

Όπως και στην περίπτωση του $\Delta \Pi$, ο αλγόριθμος ΣA ξεκινά μετρώντας την τρέχουσα τιμή του ρεύματος και της τάσης της φ/β συστοιχίας. Κατόπιν, υπολογίζονται οι στοιχειώδεις μεταβολές dI και dV (χρησιμοποιώντας τις αμέσως προηγούμενες τιμές ρεύματος και τάσης της φ/β συστοιχίας) προκειμένου να γίνουν οι έλεγχοι της Εξίσωσης 2.2. βάσει αυτών των ελέγχων θα ληφθεί η απόφαση για το πρόσημο και το πλάτος του βήματος μεταβολής της τάσης της φ/β συστοιχίας. Σχηματικά τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Στοιχειώδους Αγωγιμότητας

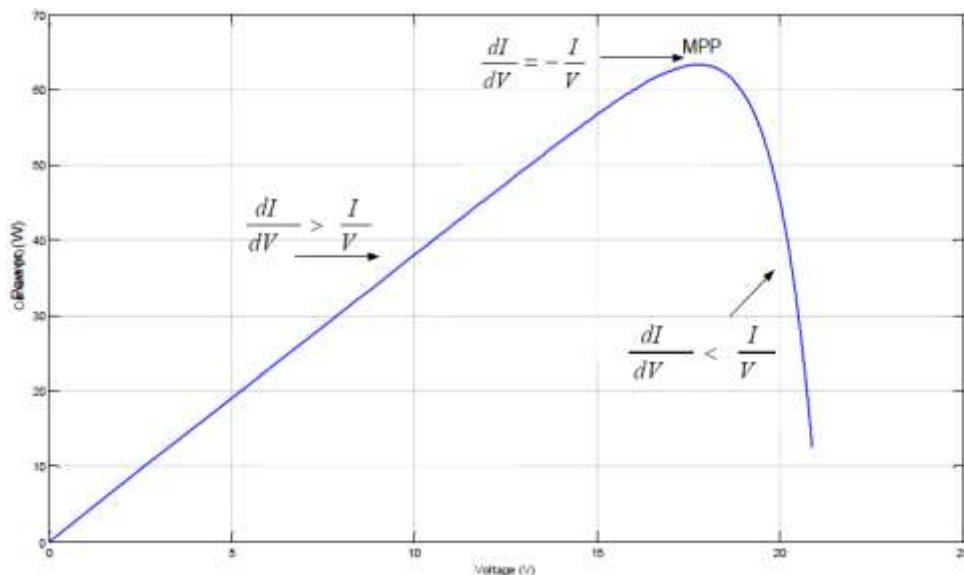
Το μεγάλο πλεονέκτημα που υπαισέρχεται σε αυτόν τον αλγόριθμο είναι ότι όταν προσεγγιστεί το ΣΜΙ, τότε το σημείο λειτουργίας τη φ/β συστοιχίας παραμένει αμετάβλητο δίχως να ταλαντώνεται. Οι μηχανισμοί μεταβολής του σημείου λειτουργίας θα ενεργοποιηθούν ξανά μόλις η διαφορά στιγμιαίας και στοιχειώδους αγωγιμότητας γίνει διάφορη του μηδέν, κάτι που θα συμβεί όταν μεταβληθούν οι συνθήκες του περιβάλλοντος που λειτουργεί η φ/β συστοιχία [10].

Το βήμα της στοιχειώδους μεταβολής της τάσης καθορίζει και το πόσο γρήγορα ο αλγόριθμος προσδιορίζει το ΣΜΙ. Ωστόσο, υπερβολική αύξηση του βήματος ενέχει τον κίνδυνο το ΣΜΙ να μην μπορεί να προσεγγιστεί επακριβώς, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ταλαντώσεων γύρο από αυτό (ότι δηλαδή συμβαίνει και στην περίπτωση του ΔΠ) [4]. Όπως και στην περίπτωση του ΔΠ, έτσι και στον αλγόριθμο ΣΑ έχουν βρεθεί τρόποι ώστε να αποφεύγεται η ταλάντωση, είτε έχοντας μεταβλητό βήμα ή βελτιώνοντας τα συγκεκριμένα σημεία του αλγορίθμου ή εντάσσοντάς στο βρόχο ελέγχου του συστήματος έναν ΠΙ ελεγκτή. Αυτό γίνεται αν θεωρηθεί σαν σήμα σφάλματος η παρακάτω ποσότητα:

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (2.3)$$

Η Εξίσωση 2.3 τείνει στο μηδέν όσο το σημείο λειτουργίας προσεγγίζει το ΣΜΙ. Επομένως, εντάσσοντας στο βρόχο ελέγχου ένα ΠΙ ελεγκτή, το e προοδευτικά μηδενίζεται και έτσι προσεγγίζει το ΣΜΙ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική της ΣΑ έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε γρήγορες μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Για να λειτουργήσει χρειάζεται μόνο δύο αισθητήρες, έναν για τη μέτρηση της τάσης και έναν για τη μέτρηση του ρεύματος της φ/β συστοιχίας. Λόγω του αλγορίθμου ελέγχου, η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται με μικροεπεξεργαστή [7].



Σχήμα 2.7: Τρόπος λειτουργίας αλγορίθμου Στοιχειώδους Αγωγιμότητας

2.3.3 Αλγόριθμος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος ως Ποσοστό της Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος $V_{\alpha\kappa}$ (Open Voltage, OV)

Η συγκεκριμένη τεχνική αφορά έναν απλό τρόπο εύρεσης του ΣΜΙ, ο οποίος στηρίζεται στην προσέγγιση ότι το ΣΜΙ αντιστοιχεί περίπου στο 70-80% της τάσης ανοιχτού κυκλώματος $V_{\alpha\kappa}$ της φ/β συστοιχίας. Ακόμα και στην περίπτωση που μεταβάλλεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η παραπάνω προσέγγιση δεν παύει να ισχύει [11]. Ποσοτικά, η συγκεκριμένη τεχνική περιγράφεται ως:

$$V_{\Sigma\text{ΜΙ}} = \kappa V_{\alpha\kappa} \quad (2.4)$$

Όπου κ είναι ο συντελεστής ποσόστωσης, κυμαίνεται μεταξύ 0.7-0.8 και προσδιορίζεται εξαρχής, συνήθως για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό της εκάστοτε φ/β συστοιχίας που χρησιμοποιείται. Η τεχνική αυτή λειτουργεί ως εξής: από τη στιγμή που έχει προσδιοριστεί το κ , διακόπτοντας τη φ/β συστοιχία περιοδικά (συνήθως κάθε 30 sec) για μερικά ms μετράται το $V_{\alpha\kappa}$. Έτσι, το ΣΜΙ υπολογίζεται από την προσεγγιστική Εξίσωση 2.4 και αμέσως δίνεται εντολή στο κύκλωμα ελέγχου του DC-DC μετατροπέα να οδηγήσει το σημείο λειτουργίας της φ/β γεννήτριας στο νέο αυτό σημείο [12].

Είναι φανερό ότι αυτή η τεχνική έχει ως σοβαρότερο μειονέκτημα την περιοδικά στιγμιαία διακοπή της λειτουργίας της φ/β συστοιχίας για την μέτρηση του $V_{\alpha\kappa}$. Όπως και σε όλες τις τεχνικές προσδιορισμού του ΣΜΙ, έτσι και σ' αυτή έχουν γίνει προσπάθειες βελτίωσης. Κάποιες από αυτές χρησιμοποιούν ένα κύτταρο της φ/β συστοιχίας (κύτταρο πιλότος) για την μέτρηση του $V_{\alpha\kappa}$, ενώ σε κάποιες άλλες προσδιορίζεται το $V_{\alpha\kappa}$ (και κατ' επέκταση το ΣΜΙ) με έμμεσο τρόπο, καθιστώντας αυτές ακόμα περισσότερο επισφαλείς [11].

Γενικά, η συγκεκριμένη τεχνική δεν εγγυάται την ιχνηλάτηση του ΣΜΙ με απόλυτη ακρίβεια. Ωστόσο, πρόκειται για μια απλή και αρκετά φθηνή τεχνική, η οποία απευθύνεται σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι σχετικά σταθερές.

2.3.4 Αλγόριθμος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος ως Ποσοστό του Ρεύματος Βραχυκυκλώματος $I_{\beta\rho}$ (Short Current, SC)

Η τεχνική αυτή είναι ανάλογη με την προηγούμενη. Σε αυτή την περίπτωση όμως προσδιορίζεται το $I_{\Sigma\text{ΜΙ}}$ ως ποσοστό του $I_{\beta\rho}$ σύμφωνα με την θεώρηση ότι κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος (κυρίως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας), τα $I_{\beta\rho}$ και $I_{\Sigma\text{ΜΙ}}$ μεταβάλλονται σχεδόν γραμμικά [13]. Ποσοτικά, η τεχνική αυτή περιγράφεται ως εξής:

$$I_{\beta\rho} \cong \alpha I_{\Sigma MI} \quad (2.5)$$

Όπως και στην OV τεχνική, υπάρχει ένας συντελεστής ποσόστωσης α , η τιμή του οποίου προσδιορίζεται πειραματικά και κυμαίνεται μεταξύ 0.78 – 0.92.

Η μέτρηση του $I_{\beta\rho}$ κατά τη λειτουργία της φ/β συστοιχίας είναι μια σχετικά δύσκολη διαδικασία. Συνήθως, πραγματοποιείται με την τοποθέτηση ενός κυκλώματος βραχυκύκλωσης, με στατικό διακόπτη στην έξοδο της φ/β συστοιχίας που έχει και αισθητήρα μέτρησης ρεύματος. Περιοδικά βραχυκυκλώνεται η φ/β συστοιχία και μετράται έτσι το $I_{\beta\rho}$. Κατόπιν, μέσω της Εξίσωσης 2.5 προσδιορίζεται το ΣΜΙ, στο οποίο μεταβαίνει η φ/β συστοιχία μέσω του DC-DC μετατροπέα. Εδώ φαίνεται και μια σοβαρή διαφοροποίηση σε σχέση με την OV τεχνική, για την οποία απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός κυκλωμάτων, αυξάνοντας έτσι το κόστος. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά τους δεν είναι σημαντική, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να υλοποιείται και από αναλογικά κυκλώματα [12].

Οι προσπάθειες βελτίωσης της συγκεκριμένης τεχνικής εστίασαν περισσότερο στο να ενσωματώσουν στον DC-DC μετατροπέα τη δυνατότητα βραχυκύκλωσης ώστε να μην διακόπτεται η λειτουργία της φ/β συστοιχίας. Επίσης, άλλες προσπάθειες εστίασαν στη συνεχή βελτιστοποίηση του α , λόγω του ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται με ταχύτερο ρυθμό όταν αλλάζει η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (συγκρινόμενο με την τάση ανοικτού κυκλώματος που προκαλείται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας). Αν το α παραμένει σταθερό, τότε το μεγάλο σφάλμα είναι αναπόφευκτο. Τέλος, υπήρξαν και προσπάθειες όπου το σύστημα αναζήτησης του ΣΜΙ χρησιμοποιούσε ταυτόχρονα στοιχεία των OV και SC [13].

2.3.5 Αλγόριθμος Ελέγχου με Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic)

Λόγω τις ευρείας διάδοσης των μικροεπεξεργαστών και των ενσωματωμένων συστημάτων, αναπτύχθηκαν διατάξεις ελεγκτών για την εύρεση του ΣΜΙ βασισμένες στην ασαφή λογική. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ασαφής λογική (λειτουργία σε ασαφείς εισόδους, μη απαίτηση για ακριβές μαθηματικό μοντέλο και εύκολος χειρισμός της μη γραμμικότητας), είναι σημαντικής σημασίας για την εύρεση του ΣΜΙ λόγω ακριβώς της μη προβλέψιμης συμπεριφορά των συνθηκών περιβάλλοντος [14].

Ως ασαφή λογική εννοείται εκείνο το υπερσύνολο της συμβατικής λογικής που επεκτάθηκε για να διαχειριστεί την έννοια της «μερικής αλήθειας», δηλαδή τις τιμές μεταξύ του «εντελώς αλήθεια» και του «εντελώς ψέμα», επιτρέποντας τη μερική συμμετοχή σε ένα σύνολο αντί της ολοκληρωματικής ή καθόλου συμμετοχής σ' αυτό [14]. Ο έλεγχος με ασαφή λογική, γενικά, αποτελείται από τα εξής επίπεδα:

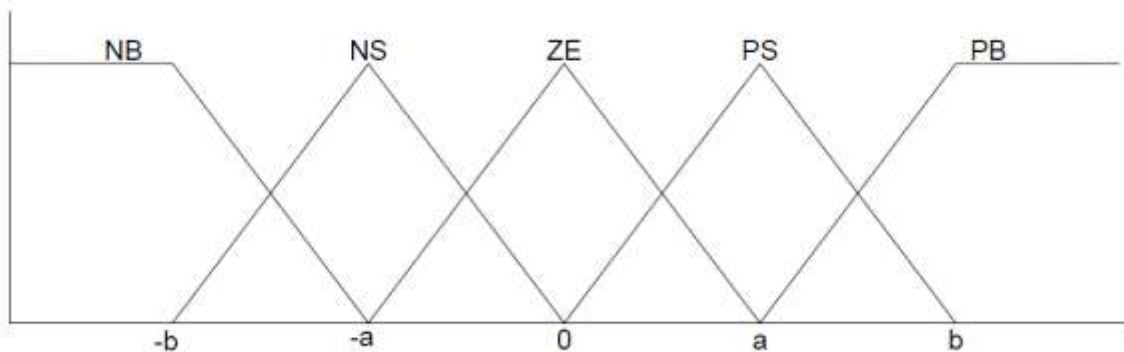
- Καθορισμός μεταβλητών
- Ασαφοποίηση (fuzzification) των δεδομένων εισόδου
- Ανάπτυξη πίνακα κανόνων

- Αποσαφοποίηση (de-fuzzification) των αποτελεσμάτων

Κατά το στάδιο της ασαφοποίησης, οι αριθμητικές μεταβλητές εισόδου μετατρέπονται σε αλφαβητικές (linguistic) μεταβλητές σύμφωνα με μια συνάρτηση ιδιοτήτων όπως του Σχήματος 2.11.

Στη περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται πέντε επίπεδα ασαφούς λογικής: NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small) και PB (Positive Big). Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο περισσότερα επίπεδα χρησιμοποιούνται, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στα αποτελέσματα. Στη συνάρτηση του Σχήματος 2.11, τα a , b και 0 φαίνονται να είναι τοποθετημένα συμμετρικά, ωστόσο η συμμετρία αυτή μπορεί να διαταραχθεί προκειμένου να δοθεί ιδιαίτερη σημασία σε συγκεκριμένα επίπεδα ασαφούς λογικής [14].

Η γενική δομή ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής για την εύρεση του ΣΜΙ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.8: Συνάρτηση ιδιοτήτων για τις μεταβλητές εισόδου εξόδου.



Σχήμα 2.9: Γενική δομή ελεγκτή Ασαφούς Λογικής για την Εύρεση του ΣΜΙ.

Οι εισοδοί είναι συνήθως το σφάλμα E και η μεταβολή του σφάλματος ΔE . Στο ΣΜΙ, ως γνωστόν, το dP/dV μηδενίζεται, επομένως οι εξισώσεις υπολογισμού για E και ΔE είναι:

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (2.6)$$

και

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \quad (2.7)$$

όπου $P(n)$ είναι η στιγμιαία ισχύς της φ/β συστοιχίας την χρονική στιγμή n . Επομένως, η είσοδος $E(n)$ υποδηλώνει αν το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας είναι αριστερά ή δεξιά του ΣΜΙ τη χρονική στιγμή n , ενώ η είσοδος $\Delta E(n)$ δείχνει την κατεύθυνση που κινείται το τρέχον σημείο λειτουργίας την ίδια χρονική στιγμή. Δεδομένου ότι υπάρχει ευελιξία στον τρόπο υπολογισμού των E και ΔE , θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο κύκλωμα που να υλοποιεί την Εξίσωση 2.3 ή και κάποια άλλη σχέση.

Από τη στιγμή που τα E και ΔE θα υπολογιστούν και θα μετατραπούν σε αλφαβητικές μεταβλητές, η έξοδος του ελεγκτή ασαφούς λογικής (που είναι η μεταβολή στο duty ratio D του μετατροπέα DC) θα αναζητείται σε ένα πίνακα κανόνων σαν αυτόν του Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2

E \ ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	ZS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Οι αλφαβητικές μεταβλητές που επιδρούν στη μεταβολή του duty ratio για τους διαφόρους συνδυασμούς των E και ΔE είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον τύπο του DC-DC μετατροπέα που χρησιμοποιείται. Ο Πίνακας 2.2 αναφέρεται σε μετατροπέα ανύψωσης. Ο τρόπος λειτουργίας έχει ως εξής: αν για παράδειγμα το σημείο της φ/β συστοιχίας είναι μακριά από το ΣΜΙ και προς τα αριστερά του, τότε το E είναι PB, το ΔE αναγκαστικά είναι ZE (αφού τώρα ξεκινάει η αναζήτηση) και θα πρέπει να αυξηθεί το duty ratio D . Δεδομένου ότι το ΣΜΙ είναι μακριά, το D σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να είναι όσο πιο μεγάλο γίνεται, δηλαδή PB [14].

Στη φάση της αποσαφoιποίησης, οι μεταβλητές της εξόδου του ελεγκτή ασαφούς λογικής μετατρέπονται από αλφαβητικές σε αριθμητικές, μέσω της συνάρτησης ιδιοτήτων. Αυτή η πληροφορία μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα που ελέγχει το duty ratio του DC-DC μετατροπέα.

Οι ελεγκτές που στηρίζονται στην ασαφή λογική παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά/απόκριση σε γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα ενός τέτοιου ελεγκτή στηρίζεται πάντα στη σωστή επιλογή της συνάρτησης ιδιοτήτων των μεταβλητών εισόδου εξόδου και στη σχέση του υπολογισμού των E και ΔE που θα χρησιμοποιηθεί. Οι προτάσεις βελτίωσης πάνω στη συγκεκριμένη τεχνική εύρεσης του ΣΜΙ εστιάζουν στη διαρκεί ρύθμιση της συνάρτησης ιδιοτήτων και του πίνακα κανόνων την ώρα ακριβώς που το φ/β σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία. Υπάρχουν επίσης αναφορές για χρήση περισσότερων των δύο

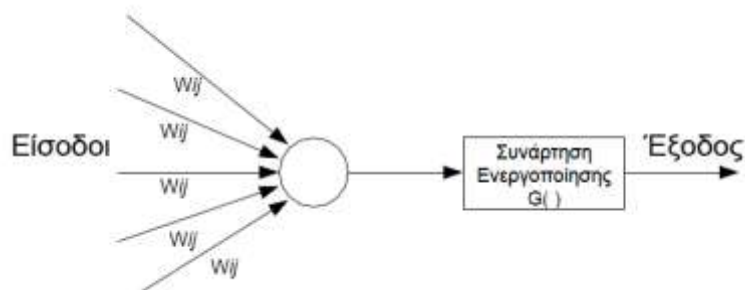
συναρτήσεων ιδιοτήτων έτσι ώστε, ανάλογα με τις μεταβολές των συνθηκών περιβάλλοντος, να χρησιμοποιείται πάντα η βέλτιστη δυνατή [14].

2.3.6 Αλγόριθμος Νευρωνικών Δικτύων (Neural Networks)

Η αναζήτηση του ΣΜΙ με διατάξεις τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ή απλά νευρωνικών δικτύων) φαίνεται τα τελευταία χρόνια να κερδίζει συνεχώς έδαφος (μαζί με τη fuzzy logic) ανάμεσα στις τεχνικές που συναγωνίζονται τις κλασσικές ώριμες μεθόδους (ΔΠ, ΣΑ). Σε αυτό συντέλεσε η ευρεία διάδοση των μικροεπεξεργαστών. Γενικά, ως Νευρωνικό Δίκτυο χαρακτηρίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την επεξεργασία πληροφορίας, το οποίο προσεγγίζει την υπολογιστική και αναπαραστατική δυνατότητα μέσω συνάψεων [15]. Το μοντέλο είναι εμπνευσμένο από τα βιοηλεκτρικά δίκτυα που δημιουργού στον εγκέφαλο ανάμεσα στους νευρώνες και τα σημεία επαφής των νευρωνικών απολήξεων. Σε αυτό υπάρχουν κομβικά σημεία (nodes), στα οποία καταλήγουν συνδέσεις από άλλους κόμβους του δικτύου και τις οποίες συνήθως αποδίδεται κάποιο βάρος w . Δομικός λίθος ενός νευρωνικού δικτύου είναι το Τεχνητό Νευρόνιο το οποίο εικονίζεται στο Σχήμα 2.7. Υπάρχουν δύο είδη νευρώνων: τα νευρώνια εισόδου και τα υπολογιστικά νευρώνια. Τα νευρώνια εισόδου δεν πραγματοποιούν υπολογισμούς, αλλά απλά μεσολαβούν ανάμεσα στις εισόδους του δικτύου και τα υπολογιστικά νευρώνια [15]. Τα υπολογιστικά νευρώνια πολλαπλασιάζουν τις εισόδους τους με τα συναπτικά βάρη και υπολογίζουν το άθροισμα του γινομένου. Το άθροισμα που προκύπτει είναι το όρισμα της συνάρτησης ενεργοποίησης. Εάν x_{kj} είναι η j -οστή είσοδος του k νευρωνίου, w_{kj} το j -οστό συναπτικό βάρος του k νευρωνίου και Φ η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρωνικού δικτύου, τότε η έξοδος y_k του k νευρωνίου θα δίνεται από την εξίσωση:

$$y_k = \Phi \left(\sum_{j=0}^N x_{kj} w_{kj} \right) \quad (2.8)$$

Η συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να είναι βηματική, γραμμική, μη-γραμμική ή στοχαστική.

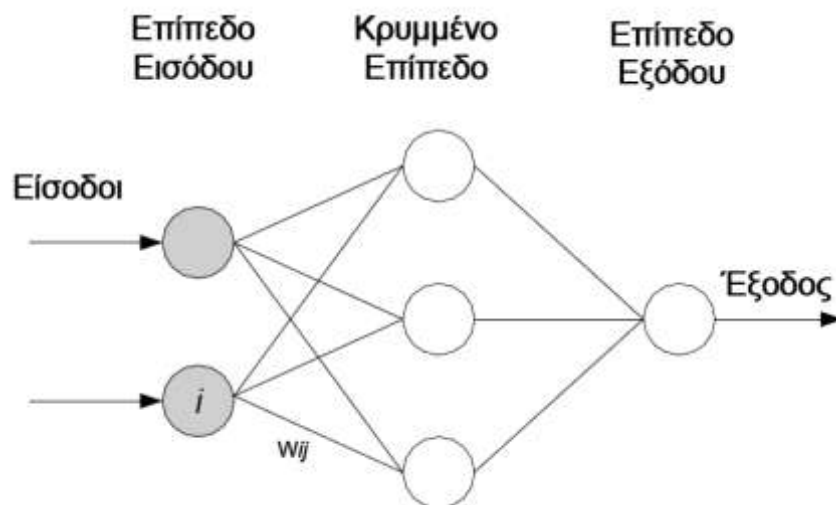


Σχήμα 2.10: Τεχνητό Νευρόνιο.

Μια τυπική διάταξη νευρωνικού δικτύου ευθείας τροφοδότησης αποτελείται από τρία επίπεδα: το επίπεδο εισόδου, το κρυμμένο επίπεδο και το επίπεδο εξόδου (βλ.

Σχήμα 2.8). ο αριθμός των κόμβων (δηλαδή των νευρώνων) του κάθε επιπέδου εξαρτάται κάθε φορά από την εφαρμογή. Στην περίπτωση ελέγχου φ/β συστοιχίας, οι εισοδοί του δικτύου θα είναι κάποιος συνδυασμός των παραμέτρων της συστοιχίας, δηλαδή της τάσης ανοικτού κυκλώματος, του ρεύματος βραχυκύκλωσης, των συνθηκών θερμοκρασίας και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η έξοδος θα είναι το duty cycle του μετατροπέα έτσι ώστε να επιτευχθεί η εύρεση του ΣΜΙ [15].

Το κατά πόσο επιτυχώς θα βρεθεί το ΣΜΙ εξαρτάται από τους αλγόριθμους που υλοποιούνται στο κρυμμένο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου, καθώς και το κατά πόσο καλά έχει «εκπαιδευτεί». Ο όρος «εκπαίδευση» ενός νευρωνικού δικτύου σημαίνει ότι σε αυτό υφίσταται μια εσωτερική διαδικασία διάρκειας αρκετών μηνών, στο τέλος της οποίας «μαθαίνει» να παράγει τις επιθυμητές εξόδους για συγκεκριμένες εισόδους. Αυτό γίνεται μέσω διαρκούς αναπροσαρμογής των βαρών του δικτύου (με βάση πάντα μια προκαθορισμένη διαδικασία/αλγόριθμο) ώστε οι τελικές τιμές τους να επιφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή την επιτυχή εύρεση του ΣΜΙ [15].



Σχήμα 2.11: Παράδειγμα Νευρωνικού Δικτύου

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου, δηλαδή η χρονοβόρα διαδικασία της σωστής εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Επίσης, λόγω του ότι τα φ/β πλαίσια έχουν συνήθως διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, πρέπει η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου να γίνεται για το καθένα ξεχωριστά. Τέλος, σοβαρό μειονέκτημα είναι το ότι λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών των πλαίσιο με το χρόνο, θα πρέπει το νευρωνικό δίκτυο να εκπαιδεύεται περιοδικά εκ νέου ώστε να είναι αξιόπιστη η εύρεση του ΣΜΙ.

2.3.7 Αλγόριθμος Ελέγχου με Συσχέτιση της Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control)

Όταν μια φ/β συστοιχία συνδέεται με ένα DC-DC μετατροπέα, ο διακοπτικός τρόπος λειτουργίας του έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κυμάτωσης στη DC τάση εξόδου της συστοιχίας και κατά συνέπεια, στην ισχύ. Ο Έλεγχος με Συσχέτιση της Κυμάτωσης (ΕΣΚ) στηρίζεται στη πληροφορία της διαφοράς φάσης της κυμάτωσης προκειμένου να βρεθεί το ΣΜΙ. Πιο συγκεκριμένα, συσχετίζεται η χρονική παράγωγος της (χρονικά μεταβαλλόμενης) ισχύος εξόδου της φ/β συστοιχίας \dot{p} με τη χρονική παράγωγο του (χρονικά μεταβαλλόμενου) ρεύματος εξόδου της φ/β συστοιχίας \dot{i} ή της τάσης \dot{v} , προκειμένου η κλίση της καμπύλης P-V να γίνει μηδέν, δηλαδή να προσεγγίσει το ΣΜΙ [16].

Στο Σχήμα 2.2 εικονίζεται η τυπική μορφή της καμπύλης ισχύος. Παρατηρούμε ότι αν η τάση v ή το ρεύμα i αυξάνονται, δηλαδή $\dot{v} > 0$ και $\dot{i} > 0$, και η ισχύς p επίσης θα αυξάνεται ($\dot{p} > 0$), τότε το σημείο λειτουργίας της φ/β γεννήτριας είναι αριστερά του ΣΜΙ. Αντίθετα, η τάση v ή το ρεύμα i αυξάνονται αλλά η ισχύς μειώνεται, δηλαδή $\dot{p} < 0$, τότε το σημείο λειτουργίας είναι δεξιά του ΣΜΙ. Επομένως, το γινόμενο $\dot{p}\dot{v}$ ή $\dot{p}\dot{i}$ είναι θετικό στα αριστερά του ΣΜΙ, αρνητικό στα δεξιά του ΣΜΙ και μηδέν επάνω στο ΣΜΙ [16].

Όταν χρησιμοποιείται DC-DC μετατροπέας ανύψωσης, η αύξηση του duty ratio αυξάνει και το ρεύμα του πηνίου (στην περίπτωση μας το ρεύμα εξόδου της φ/β συστοιχίας) μειώνοντας ταυτόχρονα την τάση. Επομένως, το σήμα ελέγχου του duty ratio θα είναι:

$$d(t) = -k \int \dot{p}\dot{v} dt \quad (2.9)$$

$$\text{ή} \quad d(t) = k \int \dot{p}\dot{i} dt \quad (2.10)$$

Όπου k είναι μια θετική σταθερά. Άρα, ελέγχοντας το duty ratio μέσω των παραπάνω σχέσεων, το ΣΜΙ θα βρίσκεται συνεχώς. Μάλιστα, το μέγεθος της σταθεράς k φέρεται να είναι καθοριστικός παράγοντας για την ταχύτητα εύρεσης το ΣΜΙ.

Απλοποιώντας περεταίρω τον τρόπο ελέγχου του duty ratio, έτσι όπως περιγράφεται από τις Εξισώσεις 2.7 και 2.8, εξάγεται η πληροφορία της φάσης, είτε εισάγοντας τα μεγέθη της τάσης ή του ρεύματος και της ισχύος μέσω ac σύζευξη ή χρησιμοποιώντας υπερπερατό φίλτρο. Στο υπερπερατό φίλτρο θα πρέπει να επιλεγεί η συχνότητα αποκοπής υψηλότερη από τη συχνότητα της κυμάτωσης προκειμένου να εξαχθεί σωστά η πληροφορία της φάσης [16].

Η παραπάνω μέθοδος εύρεσης του ΣΜΙ υλοποιείται σχετικά απλά με αναλογικά κυκλώματα χαμηλού κόστους (π.χ. φίλτρα). Πρόκειται για τεχνική που συμπεριφέρεται πολύ καλά κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος, αρκεί η διακοπτική συχνότητα του DC-DC μετατροπέα και το κέρδος k να είναι προσεκτικά επιλεγμένα. Επίσης, δεν χρειάζεται εκμάθηση της καμπύλης της φ/β συστοιχίας.

Όπως σε όλες τις τεχνικές εύρεσης του ΣΜΙ υπάρχουν παραλλαγές, έτσι και για την ΕΣΚ έχουν εμφανιστεί προτάσεις που εστιάζουν στην εύρεση της πληροφορίας της φάσης ρεύματος ή τάσης και ισχύος, επηρεάζοντας έτσι τις ποσότητες που ολοκληρώνονται στις Εξισώσεις 2.7 και 2.8. απώτερος σκοπός είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ταχύτητας στην αναζήτηση του ΣΜΙ [16].

2.3.8 Αλγόριθμος Σάρωσης Ρεύματος (Current Sweep)

Η λογική της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η παραγωγή τεχνητά της I-V χαρακτηριστικής μια φ/β συστοιχίας σε καθορισμένες χρονικές στιγμές. Από τη χαρακτηριστική αυτή υπολογίζεται εύκολα το ΣΜΙ, το οποίο και προσεγγίζεται μεταβάλλοντας κατάλληλα το duty ratio του DC-DC μετατροπέα. Ο τεχνητός προσδιορισμός της I-V χαρακτηριστικής γίνεται «σαρώνοντας» από τη φ/β συστοιχία ρεύμα συγκεκριμένης κυματομορφής που χαρακτηρίζεται ως «κυματομορφή σάρωσης» [17]. Η συνάρτηση που επιλέγεται για την κυματομορφή σάρωσης πρέπει να είναι απευθείας ανάλογη της χρονικής παραγωγού της, δηλαδή:

$$f(t) = k \frac{df(t)}{dt} \quad (2.11)$$

Όπου k είναι μια σταθερά. Η ισχύς της φ/β συστοιχίας θα είναι:

$$p(t) = v(t)i(t) = v(t)f(t) \quad (2.12)$$

Στο ΣΜΙ θα ισχύει:

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t) \frac{df(t)}{dt} + f(t) \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας την 2.9 στη 2.11, προκύπτει:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left[v(t) + k \frac{dv(t)}{dt} \right] \frac{df(t)}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

Η γενική μορφή της λύσης της διαφορικής εξίσωσης 2.12 είναι:

$$f(t) = C e^{t/k} \quad (2.15)$$

Το C επιλέγεται να είναι ίσο με το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει η φ/β συστοιχία I_{max} και k, που έχει διαστάσεις σταθεράς χρόνου, επιλέγεται να είναι αρνητικό ώστε η 2.13 να φθίνει με το χρόνο, δηλαδή:

$$f(t) = I_{max} e^{-t/T} \quad (2.16)$$

Δεδομένου ότι η παράγωγος της εξίσωσης 2.14 είναι διάφορη του μηδενός, διαιρώντας και τα δύο μέλη της Εξίσωσης 2.12 με $\frac{df(t)}{dt}$ και θέτοντας $f(t) = i(t)$ (το ρεύμα που σαρώνει από τη φ/β συστοιχία), προκύπτει:

$$\frac{dp(t)}{di(t)} = v(t) + k \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad (2.17)$$

Από τη στιγμή που μέσω της κυματομορφής σάρωσης έχει προσδιοριστεί το ΣΜΙ (άρα και το $V_{\Sigma MI}$), η Εξίσωση 2.15 χρησιμεύει στο να επιβεβαιωθεί αν πράγματι το υπολογισμένο σημείο είναι σωστό και, αν όχι, να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.

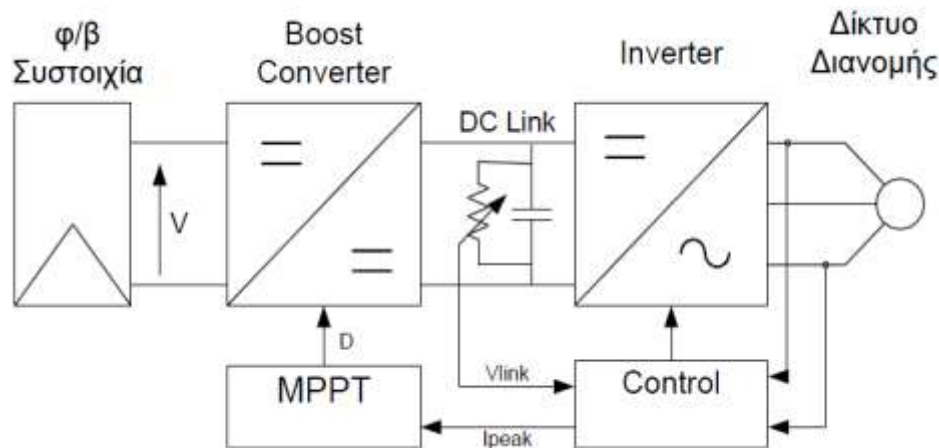
Ο έλεγχος με σάρωση ρεύματος είναι μια τεχνική που υλοποιείται εύκολα με αναλογικά κυκλώματα. Το βασικότερο μειονέκτημά της είναι η απώλεια ισχύος από τη φ/β συστοιχία για όσο χρόνο διαρκεί η σάρωση ρεύματος και ο υπολογισμός του ΣΜΙ. Γενικά, η καθυστέρηση στον υπολογισμό του ΣΜΙ είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνική όχι ιδιαίτερα ελκυστική για περιπτώσεις γρήγορων μεταβολών στις συνθήκες περιβάλλοντος [17].

2.3.9 Αλγόριθμος DC Link Capacitor Droop Control (DC LCDC)

Η συγκεκριμένη τεχνική εύρεσης του ΣΜΙ βρίσκει εφαρμογή σε φ/β συστήματα που λειτουργούν εγχέοντας την παραγόμενη ενέργεια του σε ac δίκτυο (on grid), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9. Το duty ratio ενός ιδανικού μετατροπέα ανύψωσης είναι:

$$D = 1 - \frac{V}{V_{link}} \quad (2.18)$$

όπου V είναι η τάση της φ/β συστοιχίας και V_{link} η τάση στην έξοδο του DC-DC μετατροπέα (βλ. Σχήμα 2.9). Αν, διατηρώντας τη V_{link} σταθερή, αυξηθεί το ρεύμα που εισρέει στον αντιστροφέα, θα αυξηθεί το ρεύμα που εξέρχεται από τον DC-DC μετατροπέα (ανύψωσης στο συγκεκριμένο παράδειγμα) και, κατά συνέπεια, θα αυξηθεί η ισχύς εξόδου της φ/β συστοιχίας. Ενώ το ρεύμα αυξάνει, η V_{link} μπορεί να παραμείνει σταθερή όσο η απαιτούμενη από τον αντιστροφέα ισχύς δεν θα χρειαστεί να υπερβεί τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει η φ/β συστοιχία [18]. Αν οι απαιτήσεις του αντιστροφέα αυξηθούν η V_{link} θα αρχίσει να μειώνεται. Ακριβώς πριν η V_{link} ρίξει τη τιμή της, η εντολή ελέγχου ρεύματος I_{peak} του αντιστροφέα αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της εισερχόμενης σε αυτό ισχύς, με συνέπεια η φ/β συστοιχία να λειτουργεί στο ΣΜΙ. Η ανατροφοδότηση από το βρόχο ελέγχου της εξόδου του αντιστροφέα προλαβαίνει τη V_{link} από το να μειώσει τη τιμή της, μεταβάλλοντας το duty ratio του DC-DC μετατροπέα. Έτσι με αυτό τον τρόπο το I_{peak} ανακτά τη μέγιστη τιμή του και διατηρείται το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας στο ΣΜΙ [18].



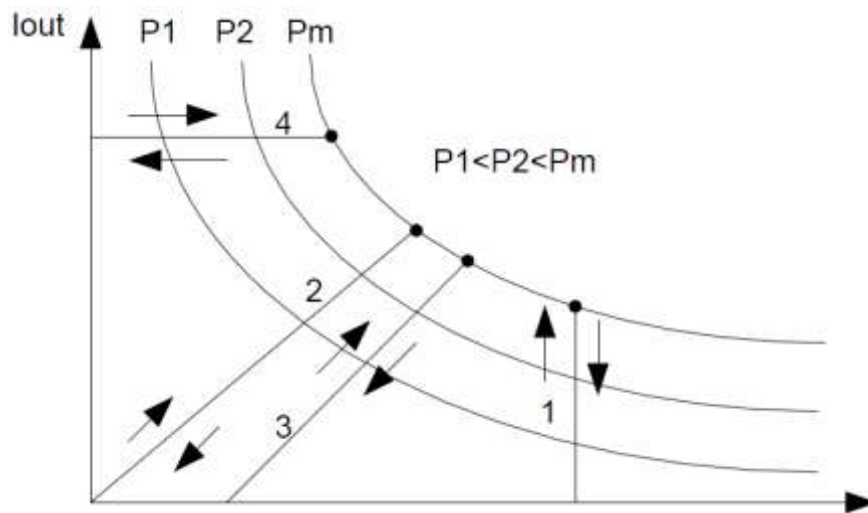
Σχήμα 2.12: Τοπολογία DC Link Capacitor Droop Control

Όπως είναι προφανές, η τεχνική DC LCDC δεν χρειάζεται να χαρτογραφήσει καμία από τις χαρακτηριστικές I-V ή P-V, όπως η τεχνική σάρωσης ρεύματος, προκειμένου να ληφθούν οι αποφάσεις για το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας. Λειτουργεί προσπαθώντας συνεχώς να ικανοποιεί τις απαιτήσεις εξόδου του αντιστροφέα, άρα του φορτίου. Η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται σχετικά εύκολα με αναλογικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών και λογικά κυκλώματα για τη λήψη αποφάσεων [18].

2.3.10 Αλγόριθμος Μεγιστοποίησης Ρεύματος ή Τάσης Φορτίου (Load Current or Load Voltage Maximization)

Ο σκοπός αυτής της τεχνικής είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου μιας φ/β συστοιχίας. Όταν μια φ/β συστοιχία είναι συνδεδεμένη σε ένα μετατροπέα ισχύος, η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου της μεγιστοποιεί επίσης και την ισχύ εξόδου του μετατροπέα που διοχετεύεται στο φορτίο του. Με την ίδια λογική, μεγιστοποιώντας την ισχύ εξόδου του μετατροπέα θα πρέπει να μεγιστοποιείται και η ισχύς εξόδου της φ/β συστοιχίας (με την προϋπόθεση ότι ο μετατροπέας είναι ιδανικός) [19].

Για να αποδοθούν κυκλωματικές ιδιότητες στα φορτία, είναι δυνατόν να γίνει η παραδοχή ότι τα περισσότερα είναι τύπου πηγής τάσης, πηγής ρεύματος, αντίστασης ή συνδυασμός των παραπάνω (βλ. Σχήμα 2.10). από το σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι για το φορτίο τύπου πηγή τάσης, το ρεύμα φορτίου i_{out} θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ισχύς στην έξοδο. Για το φορτίο τύπου πηγής ρεύματος, η τάση φορτίου v_{out} θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Για τους άλλους τύπους φορτίων, η μεταβολή μπορεί να συμπεριλάβει είτε το v_{out} ή το i_{out} [19]. Τα παραπάνω ισχύουν και για μη γραμμικά φορτία, αρκεί να μην επιδεικνύουν χαρακτηριστικά αρνητικής (σύνθετης) αντίστασης.



Σχήμα 2.13: Διαφορετικοί τύποι φορτίου: 1: Πηγή Τάσης, 2: Αντίσταση, 3: Πηγή Τάσης και Αντίσταση, 4: Πηγή Ρεύματος

Επομένως, για σχεδόν όλα τα φορτία ενδιαφέροντος, είναι αρκετό να επιχειρείται επαύξηση είτε του ρεύματος φορτίου ή της τάσης προκειμένου να αυξηθεί η ισχύς του φορτίου. Για παράδειγμα, στα αυτόνομα φ/β συστήματα γίνεται χρήση συσσωρευτών, στους οποίους το στάδιο της φόρτισης ο συσσωρευτής έχει το ρόλο του φορτίου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο συσσωρευτής μπορεί να θεωρηθεί ως φορτίο τύπου πηγής τάσης. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα φορτίου μπορεί να χρησιμεύσει ως μεταβλητή ελέγχου. Με την χρήση κατάλληλου κυκλώματος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι δυνατόν το ρεύμα φορτίου να μεγιστοποιηθεί και, έτσι, το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας να οδηγηθεί κοντά στο ΣΜΙ. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την συγκεκριμένη τεχνική, το ΣΜΙ είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί με ακρίβεια διότι η τεχνική θεωρεί μετατροπέα χωρίς απώλειες, κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα [19].

2.3.11 Αλγόριθμος dP/dV ή dP/dI Ελέγχου Ανατροφοδότησης (Feedback Control)

Η λογική της συγκεκριμένης τεχνικής στηρίζεται στην ευρεία χρήση των μικροεπεξεργαστών, ώστε να γίνεται απευθείας ο υπολογισμός της κλίσης dP/dV ή dP/dI της καμπύλης του Σχήματος 2.2 και η ανατροφοδότηση αυτής της πληροφορίας απευθείας στο duty cycle του DC-DC μετατροπέα. Σκοπός είναι η κλίση να γίνει μηδέν ώστε να οδηγηθεί η φ/β συστοιχία στο ΣΜΙ [20].

Ουσιαστικά, πρόκειται για μια τεχνική αμιγώς ψηφιακή που εκμεταλλεύεται την ικανότητα των μικροεπεξεργαστών για γρήγορο υπολογισμό των πράξεων. Επομένως, ιδιαίτερα σημαντικά είναι η ταχύτητα δειγματοληψίας, η πολυπλοκότητα και η ταχύτητα του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται κάθε φορά για τον υπολογισμό. Επίσης, το κύκλωμα ελέγχου του DC-DC μετατροπέα δεν είναι δεδομένο και εξαρτάται από απαιτήσεις, όπως duty ratio σταθερού ή μεταβλητού βήματος κλπ. Γενικά, λόγω της

χρήσης αποκλειστικά μικροεπεξεργαστών, η συγκεκριμένη τεχνική εγγυάται ταχύτητα και ακρίβεια εύρεσης του ΣΜΙ [20].

2.3.12 Άλλοι Αλγόριθμοι Εύρεσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος

Σύμφωνα με το άρθρο [21] κάποιες άλλες λιγότερο διαδεδομένες τεχνικές είναι οι παρακάτω.

Μια τεχνική που στηρίζεται στην τοπολογία της φ/β συστοιχίας, δηλαδή στους διάφορους τρόπους σύνδεσης των πλαίσιο σε σειρά ή/και παράλληλα έτσι ώστε τα ΣΜΙ που προκύπτουν να ικανοποιούν το διασυνδεδεμένο φορτίο. Η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα και η εύρεση του ΣΜΙ δεν είναι πάντα σίγουρη.

Η μέθοδος του Γραμμικού Ελέγχου Ρεύματος (Linear Current Control) στηρίζεται στο γεγονός ότι υπάρχει μια γραμμική εξίσωση μεταξύ του ρεύματος στο ΣΜΙ ($I_{\Sigma MI}$) και του επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι το $I_{\Sigma MI}$ υπολογίζεται με την χρήση ενός αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας και ενός PI ελεγκτή έτσι ώστε ρεύμα τις φ/β συστοιχίας να ακολουθεί το $I_{\Sigma MI}$.

Σε κάποιες τεχνικές ο υπολογισμός του ρεύματος ($I_{\Sigma MI}$) και της τάσης ($V_{\Sigma MI}$) στο σημείο μέγιστης ισχύος υπολογίζεται ως συνάρτηση του επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, τα οποία δεν είναι πάντα εύκολο να μετρηθούν. Όταν το $I_{\Sigma MI}$ και το $V_{\Sigma MI}$ υπολογιστούν τότε με την βοήθεια ενός ελεγκτή η φ/β συστοιχία καλείτε να λειτουργήσει στο ΣΜΙ.

Εν συνεχεία, μια λιγότερο γνωστή τεχνική για την εύρεση του ΣΜΙ είναι η «State Base». Στην τεχνική αυτή το σύστημα αναπαριστάτε από ένα μοντέλο στο χώρο κατάστασης και ένας δυναμικός, μη γραμμικός μεταβαλλόμενος με το χρόνο ελεγκτής ανατροφοδότησης χρησιμοποιείτε για την εύρεση του ΣΜΙ. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις η τεχνική αυτή παρουσιάζει ευρωστία και δεν είναι καθόλου ευαίσθητη σε αλλαγές των παραμέτρων του συστήματος. Έτσι το ΣΜΙ μπορεί να βρεθεί ακόμα και σε μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες και υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Παρόλα αυτά δεν υπάρχει πειραματική επιβεβαίωση της τεχνικής.

Σε αντίθεση με τις γνωστές τοπολογίες που αποτελούνται από δύο στάδια ισχύος (συνήθως ένας DC-DC μετατροπέα που ακολουθείτε από ένα αντιστροφέα), ένας αντιστροφέας ενός σταδίου μπορεί να κάνει ταυτόχρονα αναζήτηση του ΣΜΙ και ρύθμιση του ρεύματος εξόδου. Ανάλογα με τη τάση της φ/β συστοιχίας, ένας έλεγχος ενός κύκλου (one cycle control) χρησιμοποιείτε για να προσαρμόσει το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα ενός σταδίου έτσι ώστε να βρεθεί το ΣΜΙ. Το κύκλωμα ελέγχου αποτελείτε από διακριτά ψηφιακά εξαρτήματα αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ένας φθηνός DSP. Η λειτουργία του δείχνει να είναι κοντά στο ΣΜΙ σε ημερήσια

βάση. Η μικρή απόκλιση οφείλετε στην αδυναμία του ελεγκτή να παρακολουθεί τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Ο αλγόριθμος Καλύτερης Σταθερής Τάσης (Best Fixed Voltage) στηρίζεται στη συλλογή στατιστικών στοιχείων για τα επίπεδα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στην περιοχή εγκατάστασης του φ/β συστήματος. Η καταγραφή γίνεται για περίοδο μεγαλύτερη του ενός έτους με σκοπό την εύρεση της Καλύτερης Σταθερής Τάσης (ΚΣΤ), δηλαδή αυτής που προσεγγίζει το ΣΜΙ. Ο αλγόριθμος ελέγχου που εφαρμόζεται έχει δύο επιλογές: η μία είναι να θέσει τη τάση της φ/β συστοιχίας ίση με τη ΚΤΣ, και η άλλη να δώσει στη τάση εξόδου την ονομαστική τάση του φορτίου. Πρακτικά με τον έλεγχο αυτό το σύστημα δε λειτουργεί ποτέ στο ΣΜΙ. Ένα άλλο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι απαιτεί συλλογή δεδομένων για διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Η μέθοδος του Γραμμικού Αναπροσδιορισμού Συντεταγμένων (ΓΑΣ, Linear Reoriented Coordinates Method) προσπαθεί να βρει επαναληπτικά μια προσεγγιστική λύση για τη χαρακτηριστική εξίσωση της φ/β συστοιχίας ώστε να υπολογίσει το ΣΜΙ. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη μέτρηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ($I_{\beta\beta}$) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ($V_{\alpha\kappa}$) για τον υπολογισμό της λύσης. Επίσης, πρέπει να είναι γνωστά και άλλες σταθερές της χαρακτηριστικής καμπύλης. Το μέγιστο σφάλμα αυτής της μεθόδου είναι 0.3% αλλά δεν έχει αποδειχτεί πειραματικά.

Μια ακόμα μέθοδος για την εύρεση του ΣΜΙ είναι η Μέθοδος Ελέγχου Ολίσθησης (ΜΕΟ, Slide Control Method), η οποία κάνει χρήση ενός DC μετατροπέα υποβιβασμού του οποίου η διακοπτική συνάρτηση u ορίζεται σύμφωνα με τη Εξίσωση 2.19

$$\begin{cases} u = 0, & S \geq 0 \\ u = 1, & S < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

όπου για $u=0$, ο διακόπτης του μετατροπέα είναι ανοικτός και για $u=1$, ο διακόπτης είναι κλειστός, ενώ το S δίνεται από την Εξίσωση 2.20.

$$S = \frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} \quad (2.20)$$

Επομένως, ο ελεγκτής που πραγματοποιεί αυτή η μέθοδος εύρεσης του ΣΜΙ χρησιμοποιεί ένα μικροεπεξεργαστή που τρέχει τον παραπάνω αλγόριθμο, λαμβάνοντας τις τιμές του ρεύματος και της τάσης της φ/β συστοιχίας από αισθητήρες.

2.4 Συμπεράσματα

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του ΣΜΙ. Από την έρευνα στη βιβλιογραφία βρέθηκαν διάφοροι τρόποι εύρεσης του ΣΜΙ με τους περισσότερους από αυτούς να έχουν υποστεί τροποποιήσεις για βελτίωση. Παραπάνω παρουσιάστηκαν οι πλειοψηφία

των τεχνικών με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στους αλγόριθμους Διαταραχής και Παρατήρησης και Στοιχειώδης Αγωγιμότητας, καθώς είναι οι κύριοι αλγόριθμοι που ενσωματώνονται στα περισσότερα συστήματα. Γενικά, τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης τεχνικής έχουν να κάνουν με παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα υλοποίησης ο αριθμός των αισθητήρων που χρησιμοποιούν, οι συνθήκες περιβάλλοντος που θα εγκατασταθούν, το κόστος υλοποίησης και η εφαρμογή τους.

Πιο συγκεκριμένα, ο παράγοντας της ευκολίας υλοποίησης μιας τεχνικής εύρεσης του ΣΜΙ είδος του συστήματος που χρησιμοποιεί. Έτσι, υπάρχουν τεχνικές που υλοποιούνται αποκλειστικά με αναλογικά κυκλώματα όπως π.χ. οι ΟV, SC, ΕΣΚ και τεχνικές που υλοποιούνται μόνο με μικροϋπολογιστές όπως π.χ. οι ΔΠ, ΣΑ και τεχνικές που υλοποιούνται με τον συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Επίσης, ο αριθμός και το είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας λόγω του ότι τις περισσότερες φορές είναι πιο εύκολο και αξιόπιστο να γίνεται μέτρηση της τάσης της φ/β συστοιχίας παρά του ρεύματος. Να σημειωθεί ότι οι συνήθεις αισθητήρες ρεύματος είναι ακριβοί. Αν λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι μερικές τεχνικές απαιτούν αισθητήρα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας (πυρανόμετρο). Τότε το κόστος ανεβαίνει πιο πολύ. Στα περισσότερα συστήματα που ενσωματώνουν διάταξη για την εύρεση του ΣΜΙ, για να είναι το κόστος χαμηλό, επιλέγεται η χρήση ενός μόνο αισθητήρα τάσης ή ρεύματος με την πρόβλεψη ότι η δεύτερη παράμετρος εισόδου να υπολογίζεται με έμμεσο τρόπο.

Σημαντικός παράγοντας επιλογής της τεχνικής εύρεσης του ΣΜΙ είναι η δυνατότητα διάκρισης του ΣΜΙ από τα τοπικά μέγιστα της καμπύλης ισχύος μιας φ/β συστοιχίας υπό συνθήκες μερικής σκίασεως. Δεδομένου ότι οι περισσότεροι από τους παραπάνω αλγόριθμους δεν μπορούν από μόνοι τους να βρουν το ολικό μέγιστο οι παράμετρος αυτή δεν αποτελεί σημείο σύγκρισης. Ακόμη, καθοριστικός παράγοντας επιλογής τεχνικής εύρεσης του ΣΜΙ είναι η εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος, σε συνδυασμό πάντα με το διαθέσιμο κόστος υλοποίησης. Για παράδειγμα, στους δορυφόρους ή τους διαστημικούς σταθμούς όπου χρειάζεται ένα σύστημα εξαιρετικά αξιόπιστο και αποδοτικό, το κόστος υλοποίησης δεν είναι καθοριστικός παράγοντας. Τέλος, στον Πίνακα 2.3 Συνοψίζονται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνικών ελέγχου για την εύρεση του ΣΜΙ που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 2.3

ΔΠ	Όχι	Ναι	Και τα δύο	Όχι	Όχι Σταθερή	Χαμηλή	Τάσης/ Ρεύματος
ΣΑ	Όχι	Ναι	Ψηφιακό	Όχι	Όχι Σταθερή	Μέτρια	Τάσης/ Ρεύματος
ΟV	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	Μέτρια	Χαμηλή	Τάσης
SC	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	Μέτρια	Μέτρια	Ρεύματος
Ασαφής Λογική	Ναι	Ναι	Ψηφιακό	Ναι	Γρήγορη	Υψηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Νευρωνικά	Ναι	Ναι	Ψηφιακό	Ναι	Γρήγορη	Υψηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Δίκτυα							
ΕΣΚ	Όχι	Ναι	Αναλογικό	Όχι	Γρήγορη	Χαμηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Σάρωση	Ναι	Ναι	Ψηφιακό	Ναι	Αργή	Υψηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Ρεύματος							
DC LCDC	Όχι	Όχι	Και τα δύο	Όχι	Μέτρια	Χαμηλή	Τάσης
Μεγ. Ρεύματος ή	Όχι	Όχι	Αναλογικό	Όχι	Γρήγορη	Χαμηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Τάσης Φορτίου							
dP/dV ή dP/dI	Ναι	Ναι	Ψηφιακό	Όχι	Γρήγορη	Μέτρια	Τάσης/ Ρεύματος
Συνδεσμολογία	Ναι	Όχι	Ψηφιακό	Ναι	Αργή	Υψηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Φ/Β Συστοιχίας							
Γραμμικός	Ναι	Όχι	Ψηφιακό	Ναι	Γρήγορη	Μέτρια	Ακτινοβολίας
Έλεγχος							
Φορτίου							
Υπολογισμός	Ναι	Ναι	Ψηφιακό	Ναι	-	Μέτρια	Ακτινοβολίας/ Θερμοκρασίας
<i>I_{ΣΜΙ} και V_{ΣΜΙ}</i>							
State - Based	Ναι	Ναι	Και τα δύο	Ναι	Γρήγορη	Υψηλή	Τάσης/ Ρεύματος
Έλεγχος ενός	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	Γρήγορη	Μέτρια	Ρεύματος
Κύκλου							
ΚΣΤ	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	-	Χαμηλή	Κανένα
ΓΑΣ	Ναι	Όχι	Ψηφιακό	Όχι	-	Υψηλή	Τάσης/ Ρεύματος
MEO	Όχι	Ναι	Ψηφιακό	Όχι	Γρήγορη	Μέτρια	Τάσης/ Ρεύματος

Τεχνικές Ελέγχου και Κυκλωματικές Τεχνικές για την Εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

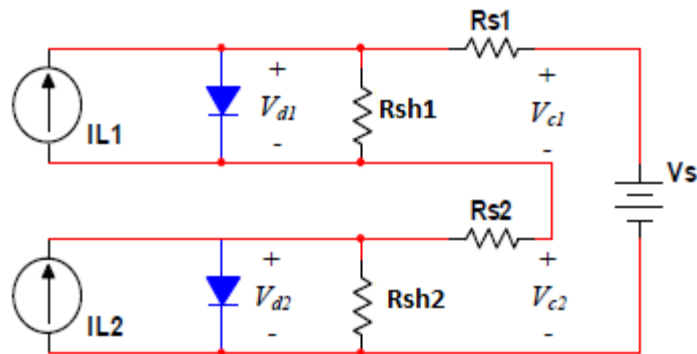
3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε τις τεχνικές εύρεσης του ΣΜΙ για συνθήκες ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα όμως οι συνθήκες λειτουργίας μιας φ/β συστοιχίας είναι μη ομοιόμορφες. Οι κυριότεροι παράγοντες που δημιουργούν μη ομοιόμορφες συνθήκες και οδηγούν στην αποτυχία προσεγγίσεις του ΣΜΙ είναι η γήρανση της φ/β συστοιχίας, η σκόνη που εναποτίθεται επάνω στα φ/β πλαίσια και η μερική σκίαση της φ/β συστοιχίας. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί πως επηρεάζει το φαινόμενο της μερικής σκίασης τη λειτουργία του φ/β κυττάρου και καθ' επέκταση τη λειτουργία των φ/β πλαισίων και συστοιχιών. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν και θα συγκριθούν νέες τεχνικές ελέγχου που έχουν προταθεί για την εύρεση του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Τέλος, θα αναπτυχθούν κυκλωματικές τεχνικές που βοηθούν τόσο τις απλές τεχνικές ελέγχου, του δεύτερου κεφαλαίου, όσο και αυτές που θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο. Οι κυκλωματικές τεχνικές σχετίζονται με τη συνδεσμολογία των φ/β πλαισίων, με την αρχιτεκτονική του φ/β συστήματος και με διάφορες κυκλωματικές τοπολογίες.

3.2 Φαινόμενο Μερικής Σκίασης

3.2.1 Φωτοβολταϊκά Κύτταρα Συνδεδεμένα σε Σειρά υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα δύο φ/β κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά. Σύμφωνα με τα άρθρα [22] [23], στην περίπτωση όπου τα δύο κύτταρα είναι τα ίδια και λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, τότε η συγκέντρωση των φωτοδιεγερμένων φορέων φορτίου τους είναι η ίδια. Έτσι, το φωτόρρευμα στο ένα κύτταρο μπορεί να περνάει από το άλλο και στη συνέχεια στο φορτίο. Επίσης, η τάση εξόδου των δύο κυττάρων είναι το άθροισμα της φωτοπαραγόμενης τάσης και των δύο.



Σχήμα 3.1: Κύκλωμα δύο φ/β κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά.

Στην περίπτωση όμως που τα δύο φ/β κύτταρα λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως το ένα να δέχεται πλήρη ακτινοβολία ενώ το άλλο να είναι σκιασμένο, τότε το φωτοδιεγερμένο φορτίο του ασκίαστου κυττάρου είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του σκιασμένου. Τώρα, το φωτόρρευμα του ασκίαστου φ/β κυττάρου δε μπορεί να περάσει όλο από το σκιασμένο κύτταρο λόγω της μικρότερης συγκέντρωσης των φορέων φορτίου, αναγκάζοντας τους υπόλοιπους φορείς να συγκεντρώνονται στα p- και n- άκρα του σκιασμένου φ/β κυττάρου. Έτσι, η τάση εξόδου του μη σκιασμένου φ/β κυττάρου αυξάνεται προκαλώντας, πρώτον, αύξηση του ρεύματος διάχυσης στην pn επαφή του μη σκιασμένου κυττάρου και δεύτερον, μέρος του φωτορρεύματος του μη σκιασμένου κυττάρου να αναγκάζεται να περάσει μέσα από την αντίσταση διακλάδωσης του σκιασμένου κυττάρου.

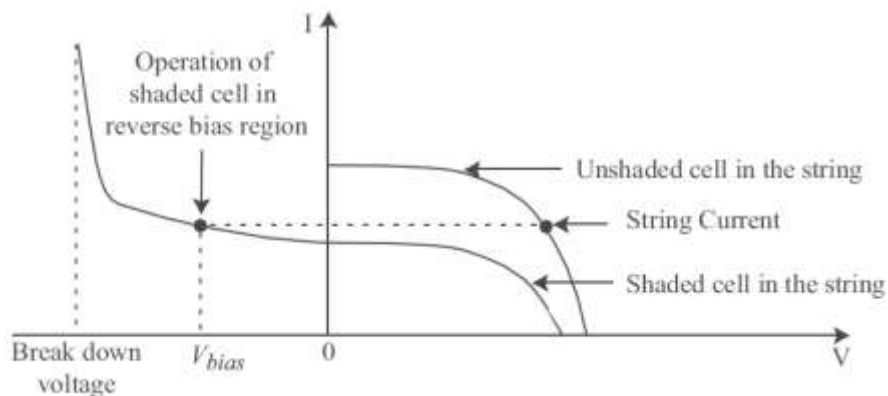
Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι I-V και P-V χαρακτηριστικές των δύο φ/β κυττάρων σε σειρά (βλ. Σχήμα 3.1) για ποσοστά σκίασης 0, 50% και 100% όπου το μηδέν είναι η μη σκιασμένη κατάσταση και το 100% η εντελώς σκιασμένη. Από τα διαγράμματα και σύμφωνα με το άρθρο [23] προκύπτουν τα παρακάτω σημαντικά στοιχεία για το φαινόμενο της μερικής σκίασης.

- Όταν και τα δύο φ/β κύτταρα λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο οι φωτοπαραγόμενες τάσεις τους (βλ. Σχήμα 3.3 b,c) όσο και οι P-V χαρακτηριστικές (βλ. Σχήμα 3.3 d,e) είναι ίδιες. Συγκριτικά με ένα μόνο κύτταρο, η τάση εξόδου και η ισχύς στο ΣΜΙ είναι διπλάσια .

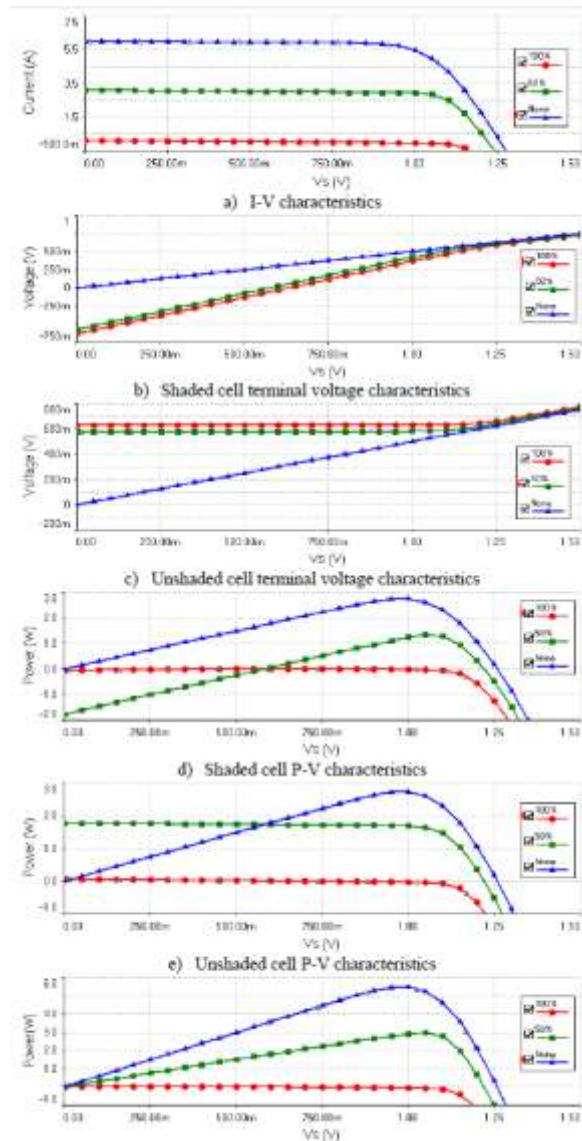
- Αν το ένα κύτταρο είναι 100% σκιασμένο ενώ το άλλο όχι, το φωτόρρευμα του μη σκιασμένου πρέπει να περάσει από την αντίσταση διακλάδωσης του σκιασμένου. Για να συμβεί αυτό η φωτοπαραγόμενη τάση του μη σκιασμένου κυττάρου πρέπει να είναι πολύ μεγάλη (βλ. Σχήμα 3.3 c), πράγμα το οποίο αυξάνει το ρεύμα διάχυσης της διόδου στο μη σκιασμένο κύτταρο και μειώνει το συνολικό παραγόμενο ρεύμα σημαντικά, έτσι και παραγόμενη ισχύς είναι πολύ μικρή (βλ. Σχήμα 3.3 e,f).

- Αν ένα από τα κύτταρα είναι μερικώς σκιασμένο ενώ το άλλο σε πλήρη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, τότε το πρώτο συγκεντρώνει περισσότερους φορείς φορτίου από ότι το δεύτερο. Άρα, μέρος των φορέων του μη σκιασμένου κυττάρου θα περάσει από το σκιασμένο κύτταρο και το υπόλοιπο από την αντίσταση διακλάδωσης του σκιασμένου. Έτσι, το σκιασμένο κύτταρο να λειτουργεί στην περιοχή ανάστροφης τάσης πόλωσης (βλ. Σχήμα 3.3), με αποτέλεσμα το μη σκιασμένο κύτταρο να παράγει ισχύ και το άλλο να απορροφάει (βλ. Σχήμα 3.3 b,c) ανάλογα με την εξωτερική επιβαλλόμενη τάση. Με τον ίδιο τρόπο, για να περάσει το ρεύμα από τη μεγάλη αντίσταση διακλάδωσης, η φωτοπαραγόμενη τάση του ασκίαστου κυττάρου θα πρέπει να είναι μεγάλη (βλ. Σχήμα 3.3 c), αυξάνοντας έτσι το ρεύμα διάχυσης της διόδου του μη σκιασμένου κυττάρου και το συνολικό ρεύμα που περνάει από την αντίσταση διακλάδωσης του σκιασμένου είναι πολύ μικρό.

- Υπό ΣΜΣ, η ισχύ που απορροφάται από το σκιασμένο κύτταρο επηρεάζεται από την εξωτερική τάση που επιβάλλεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική τάση, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα του μη σκιασμένου κυττάρου που περνάει από την αντίσταση διακλάδωσης του σκιασμένου. Άρα η ανάστροφη τάση πόλωσης στα άκρα του δεύτερου και η απορρόφηση ισχύς είναι μικρότερη. Όταν η εξωτερική τάση είναι μεγαλύτερη από την τάση ορθής πόλωσης της διόδου του ασκίαστου κυττάρου, το σκιασμένο κύτταρο αρχίζει να παράγει (βλ. Σχήμα 3.3 d). Δηλαδή, η αύξηση της εξωτερικής τάσης μπορεί να προστατέψει το σκιασμένο κύτταρο από το να μετατραπεί σε θερμή κηλίδα (hot spot) όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης.



Σχήμα 3.2: I-V χαρακτηριστική σκιασμένου φ/β κυττάρου που λειτουργεί στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης.

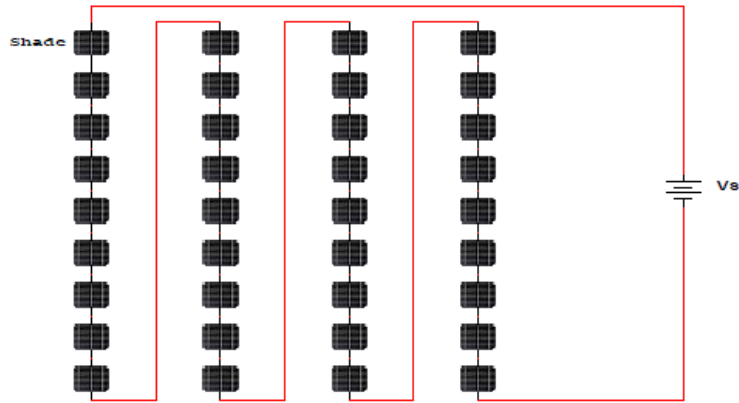


Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικές Καμπύλες των δύο φ/β κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά.

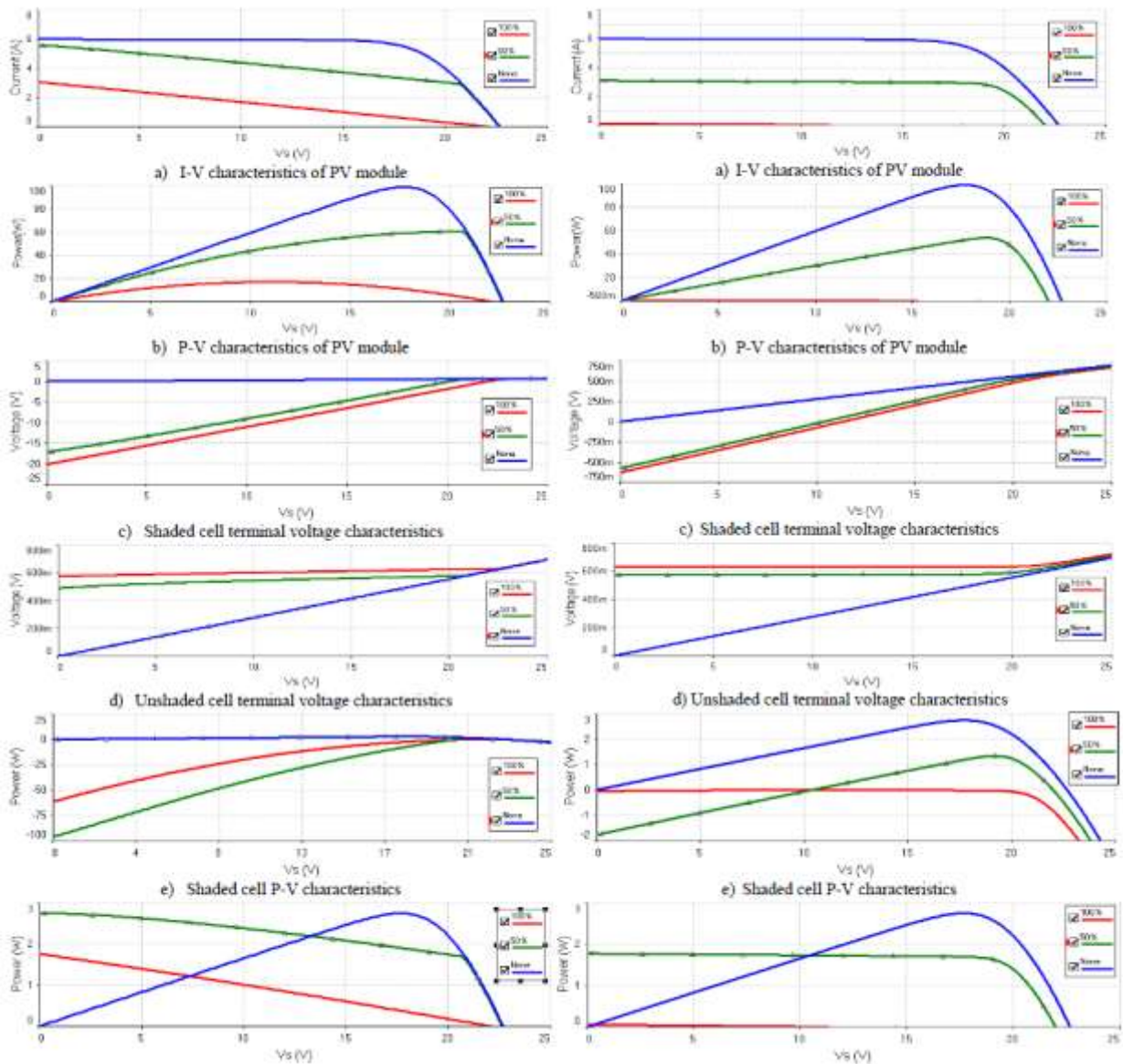
3.2.2 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Συνήθως, τα φ/β κύτταρα συνδέονται σε σειρά για να δημιουργήσουν ένα πλαίσιο που δίνει μια καθορισμένη σταθερή τάση (DC), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Στη συνέχεια τα πλαίσια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά για να δώσουν μεγαλύτερες τάσεις ανάλογα με την εφαρμογή τους.

Οι P-V και I-V χαρακτηριστικές των φ/β πλαισίων υπό συνθήκες μερικής σκίασης είναι πιο περίπλοκες, ανάλογα των αριθμό των σκιασμένων κυττάρων και το ποσοστό σκίασης του καθενός [22]. Στα Σχήματα 3.5 και 3.6 φαίνονται οι I-V και P-V χαρακτηριστικές ενός φ/β πλαισίου για την σκίαση ενός και 18 φ/β κυττάρων του, αντίστοιχα, με ποσοστά σκίασης 0, 50% και 100%.



Σχήμα 3.4: Συνδεσμολογία φ/β πλαισίου με 36 φ/β κύτταρα συνδεδεμένα σε σειρά.



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β πλαισίου με ένα μερικός σκιασμένο φ/β κύτταρο.

Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β πλαισίου με 18 μερικός σκιασμένα φ/β κύτταρα.

Από τα διαγράμματα και σύμφωνα με τα άρθρα [22] [23] προκύπτουν τα παρακάτω σημαντικά στοιχεία για το φαινόμενο της μερικής σκίασης σε ένα φ/β πλαίσιο.

- Όπως φαίνεται και στα παρακάτω Σχήματα, αν όλα τα φ/β κύτταρα βρίσκονται υπό συνθήκες πλήρης ηλιοφάνειας το ρεύμα κάθε κυττάρου είναι το ίδιο και η τάση εξόδου και η ισχύς του φ/β πλαισίου αυξάνεται σημαντικά λόγω των περισσότερων συνδεδεμένων κυττάρων. Αλλά, τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά όταν έστω και ένα φ/β κύτταρο είναι σκιασμένο. Σε αυτή την περίπτωση οι χαρακτηριστικές καμπύλες του φ/β πλαισίου επηρεάζονται σημαντικά, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 3.5 a και b. Η σκίαση του κυττάρων αναγκάζει ένα μέρος των φορέων φορτίου των μη σκιασμένων κυττάρων να περάσουν από την αντίσταση διακλάδωσης του πρώτου προκαλώντας ανάστροφη τάση πόλωσης στα άκρα του (βλ. Σχήμα 3.5 c). Έτσι, τα μη σκιασμένα κύτταρα παράγουν ισχύ ενώ το σκιασμένο απορροφάει, όπως και στην περίπτωση των δύο κυττάρων (Σχήματα 3.5 e και f). Με τον ίδιο τρόπο, για να περάσει το ρεύμα από τη μεγάλη αντίσταση διακλάδωσης, η φωτοπαραγόμενη τάση του κάθε ασκίαστου κυττάρου πρέπει να είναι μεγάλη (βλ Σχήματα 3.5 d). Όμως το συνολικό ρεύμα των μη σκιασμένων κυττάρων προκαλεί τη ροή μεγάλου ρεύματος μέσα από την αντίσταση διακλάδωσης του σκιασμένου κυττάρου (Σχήματα 3.5 a) και υψηλή ανάστροφη τάση στα άκρα του (Σχήματα 3.5 c), τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μεγάλων ποσών ενέργειας, ιδιαίτερα όταν η τάση που επιβάλλεται στα άκρα του πλαισίου είναι μικρή (Σχήματα 3.5 e). Αυτή η μεγάλη απορρόφηση ισχύς μπορεί να καταστρέψει το φ/β κύτταρο, κυρίως όταν η τάση που επιβάλλεται από έναν μετατροπέα ισχύος είναι πολύ χαμηλή.

- Στην περίπτωση του Σχήματος 3.6, όπου 18 από τα 36 φ/β κύτταρα είναι σκιασμένα, οι συνολική τάση εξόδου και η ισχύς εξόδου των μη σκιασμένων κυττάρων είναι μικρότερη από την περίπτωση του ενός σκιασμένου κυττάρου (βλ. Σχήματος 3.5) και εφαρμόζεται ομοιόμορφα στα σκιασμένα κύτταρα. Έτσι, η ανάστροφη τάση στα άκρα των σκιασμένων κυττάρων είναι μικρότερη (βλ. Σχήματος 3.6 c) και η αναρροφούμενη ισχύ του κάθε κυττάρου είναι μικρότερη (βλ. Σχήματος 3.6e). Συγκριτικά με την περίπτωση του Σχήματος 3.5 e, οι πιθανότητα ενός σκιασμένου κυττάρου να μετατραπεί σε θερμή κηλίδα μειώνεται. Τέλος, συμπεραίνεται ότι ένα σκιασμένο κύτταρο είναι πιο επικίνδυνο για την εμφάνιση θερμής κηλίδας και την καταστροφή της λειτουργίας του φ/β πλαισίου.

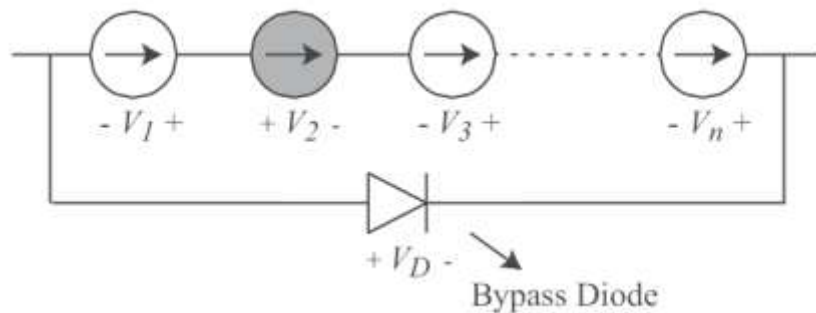
3.2.3 Επίδραση των Διόδων Παράκαμψης στις Χαρακτηριστικές Καμπύλες των Φωτοβολταϊκών Κυττάρων

Για την μείωση της επίδρασης του φαινομένου της μερικής σκίασης στην καμπύλη ισχύος, χρησιμοποιούνται διόδοι παράκαμψης (bypass diodes) συνδεδεμένοι παράλληλα με μια σειρά φ/β κυττάρων [22]. Η πολικότητα ης διόδου είναι ανάστροφη σε σχέση με αυτή του κυττάρου.

Η δίοδος παράκαμψης περιορίζει την υψηλή ανάστροφη τάση στα άκρα του σκιασμένου κυττάρου, ώστε να μην υπερβεί την τάση που καταστρέφει το φ/β κύτταρα και δημιουργεί θερμικές κηλίδες [22]. Για παράδειγμα, η δίοδος του Σχήματος 3.7 αρχίζει να άγει όταν ικανοποιείται η Εξίσωση 3.1,

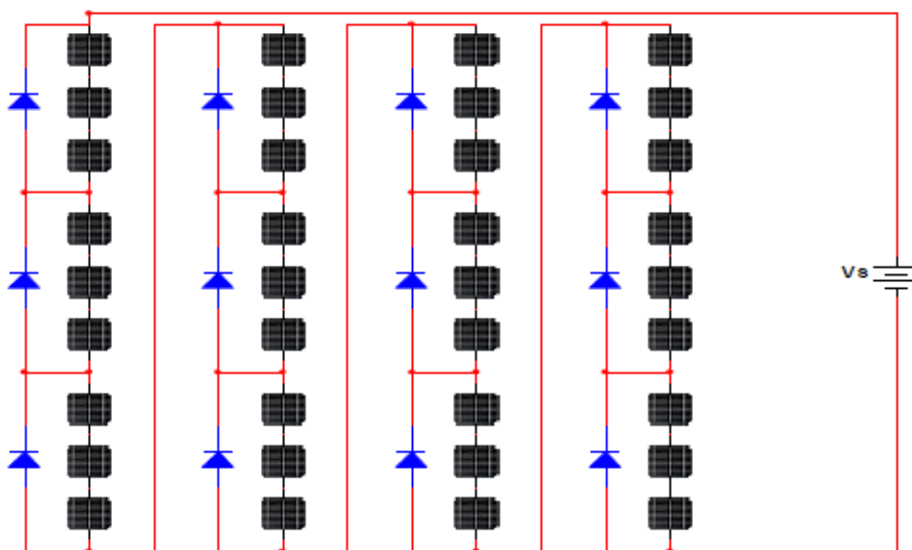
$$V_2 - \sum_{i=1}^n V_i \geq V_D, \quad i \neq 2 \quad (3.1)$$

όπου V_D είναι η ορθή τάση πόλωσης (διάχυσης) της διόδου. Επειδή η δίοδος παράκαμψης παρέχει μια εναλλακτική διαδρομή για το ρεύμα, τα κύτταρα του μερικώς σκιασμένου πλαισίου δε διαρρέονται πλέον όλα από το ίδιο ρεύμα.

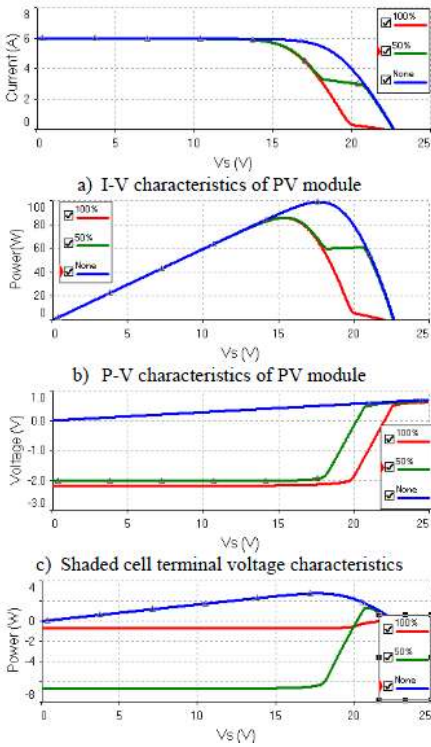


Σχήμα 3.7: Δίοδος Παράκαμψης παράλληλα των φ/β κυττάρων όταν ένα κύτταρο είναι σκιασμένο

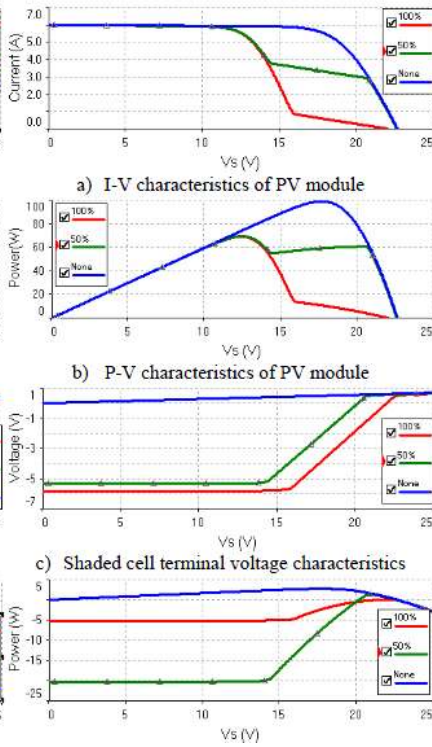
Συνήθως, μια δίοδος παράκαμψης συνδέεται ανά ένα φ/ πλαίσιο ή μια ομάδα φ/β κυττάρων. Ανάλογα τη χρήση χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι για την σύνδεση των διόδων. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται ένα φ/β πλαίσιο 36 κυττάρων, με μία δίοδο διαφυγής ανά 3 φ/β κύτταρα. Τα Σχήματα 3.9-3.11 δείχνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες όταν 3, 9 και 18 φ/β κύτταρα σκιάζονται με ποσοστά σκίασης 0, 50% και 100%.



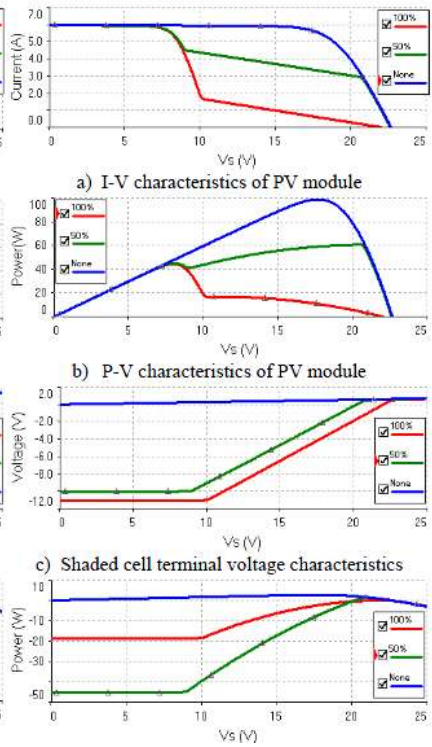
Σχήμα 3.8: Φ/Β πλαίσιο με μια δίοδο παράκαμψης ανά τρία φ/β κύτταρα.



Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β πλαισίου με τρία μερικώς σκιασμένα φ/β κύτταρα.



Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β πλαισίου με 9 μερικώς σκιασμένα φ/β κύτταρα.



Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β πλαισίου με 18 μερικώς σκιασμένα φ/β κύτταρα.

Από τα παραπάνω και σύμφωνα το άρθρο [22] διαγράμματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τη σκίαση φ/β πλαισίου με διόδους παράκαμψης:

- Όταν ένα φ/β κύτταρο είναι σκιασμένο τότε υπάρχουν δύο πιθανές διαδρομές για το ρεύμα που παράγεται από τα ασκίαστα κύτταρα. Μια είναι μέσω του σκιασμένου κυττάρου και της αντίστασης διακλάδωσης του και η άλλη μέσω της διόδου παράκαμψης. Η συνθήκη αγωγής της διόδου είναι αυτή της Εξίσωσης 3.1.

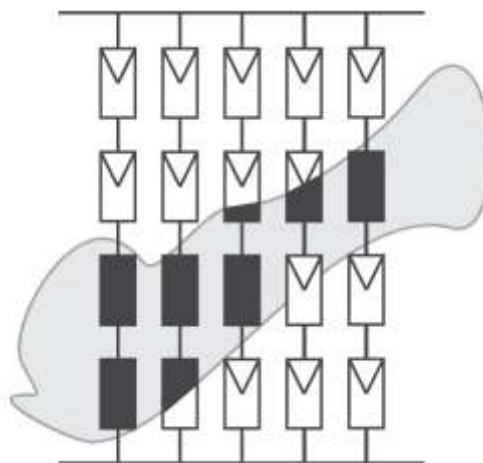
- Όταν η διάδος παράκαμψης άγει, η τάση που εφαρμόζεται στο σκιασμένο κύτταρο είναι ίση με την φωτοπαραγόμενη τάση των μη σκιασμένων κυττάρων μέσα στην τάση ορθής πόλωσης της διόδου. Άρα, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των κυττάρων που παρακάμπτονται από μια διάοδο τόσο μικρότερη είναι ανάστροφη τάση πόλωσης ενός σκιασμένου κυττάρου (βλ Σχήμα 3.9c, 3.10c και 3.11c) και τόσο λιγότερο ισχύ απορροφούν τα σκιασμένα κύτταρα (βλ Σχήμα 3.9d, 3.10d και 3.11d). Με άλλα λόγια για την αποφυγή δημιουργίας θερμικών κηλίδων θα πρέπει να ο αριθμός των κυττάρων ανά διάοδο παράκαμψης να επιλέγεται κατάλληλα.

- Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.7 και 3.8 με τα 3.9-3.11, παρατηρείται ότι οι διόδοι παράκαμψης μειώνουν την αναρροφούμενη ισχύ των σκιασμένων φ/β κυττάρων αυξάνοντας την απόδοση του φ/β συστήματος.

- Με την χρήση διόδων παράκαμψης, οι I-V και P-V χαρακτηριστικές καμπύλες του φ/β πλαισίου είναι πιο περίπλοκες και διαφορετικές από τις κλασσικές χαρακτηριστικές. Ένας σημαντικό πρόβλημα είναι ότι οι P-V χαρακτηριστικές μπορεί να έχουν πολλές κορυφές, όπως φαίνονται στα Σχήματα 3.9b, 3.10b και 3.11b. Έτσι η χρήση των κλασσικών τεχνικών ελέγχου για την εύρεση του ΣΜΙ μπορεί να αποτύχει, επειδή μπορεί να εγκλωβιστούν σε ένα τοπικό μέγιστο, μειώνοντας σημαντικά την απόδοση του φ/β πλαισίου.

3.2.4 Προβλήματα Φωτοβολταϊκών Συστοιχιών υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Η μερική σκίαση φ/β συστοιχιών είναι ένα συχνό φαινόμενο που συμβαίνει όταν μερικά πλαίσια από την ίδια φ/β συστοιχία σκιάζονται από γειτονικά αντικείμενα κτήρια, δέντρα, σκεπές κ.α. ή από κινούμενα αντικείμενα όπως σύννεφα, πουλιά κ.α. ή από αντικείμενα που εναποτίθενται στα φ/β πλαίσια όπως σκόνη, λάσπη, φύλλα, χιόνι κ.α. (βλ. Σχήμα 3.12). Το φαινόμενο αυτό σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του φ/β συστήματος, με το κυριότερο να είναι η δραματική μείωση της παραγόμενης ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε, οι ΣΜΣ δημιουργούν πολλαπλά μέγιστα στην καμπύλη ισχύος ενός φ/β πλαισίου και καθ' επέκταση στις P-V χαρακτηριστικές των φ/β συστοιχιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κλασσικές τεχνικές εύρεσης του ΣΜΙ, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, να μην λειτουργούν σωστά και να εγκλωβίζονται σε τοπικά μέγιστα. Έχει υπολογιστεί ότι η αστοχία εύρεσης του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ μπορεί να προκαλέσει και 70% μείωση της δυνατής παραγόμενης ισχύος υπό αυτές τις συνθήκες [3].

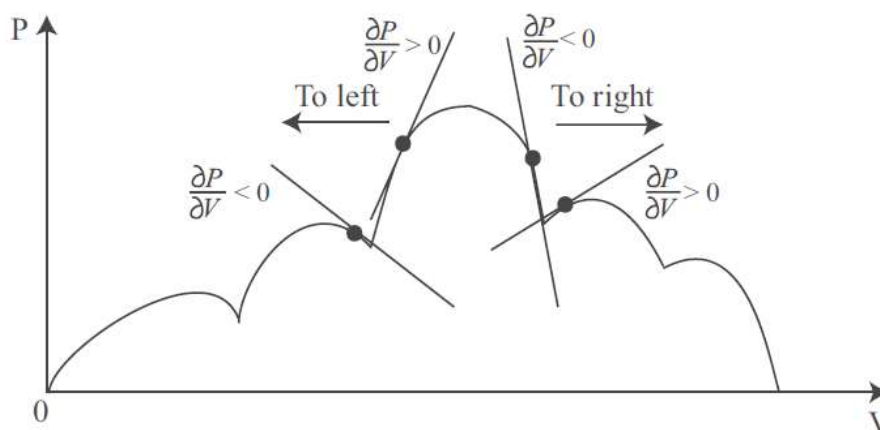


Σχήμα 3.12: Φ/Β συστοιχία υπό συνθήκες μερικής σκίασης

3.3 Αλγοριθμικές Τεχνικές Ελέγχου για την εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

3.3.1 Κλίση της Καμπύλης Ισχύος (Power Curve Slope)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί το πρόσημο του λόγου dP/dV , σε διαφορετικά σημεία, για να βρει του ολικό μέγιστο που είναι και το ΣΜΙ. Έτσι, εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η εμφάνιση ενός νέου μέγιστου στα αριστερά του υπάρχοντος μεγίστου ενδείκνυται από την αλλαγή πρόσημου του dP/dV από θετικό σε αρνητικό (βλ. Σχήμα 3.5). Με τον ίδιο τρόπο η αλλαγή πρόσημου του dP/dV από αρνητικό σε θετικό δείχνει την ύπαρξη μεγίστου στα δεξιά του ήδη υπάρχοντος μεγίστου [2].



Σχήμα 3.13: Μεταβολή πρόσημου του dP/dV και από τις δύο πλευρές ενός τοπικού μεγίστου.

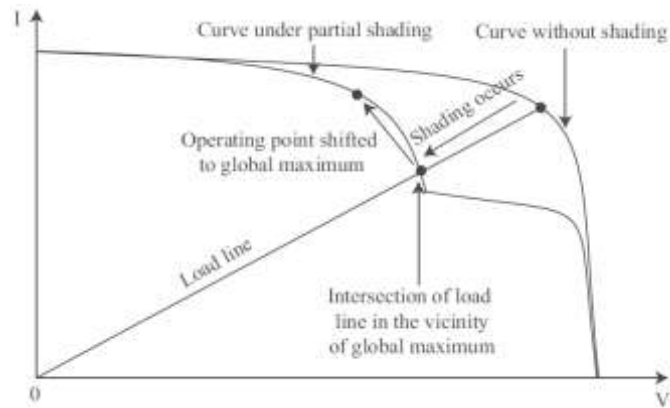
Επίσης, η αναζήτηση για το ολικό μέγιστο γίνεται από τις δύο πλευρές του τελευταίου αποθηκευμένου μεγίστου. Αρχικά, η αναζήτηση ξεκινάει στη περιοχή όπου θα υπήρχε το ΣΜΙ υπό ομοιόμορφες συνθήκες σκίασης. Αν εκεί βρεθεί ένα τοπικό μέγιστο, λόγω της αλλαγής πρόσημου του dP/dV , αυτό συγκρίνεται με το αποθηκευμένο μέγιστο. Αν το τοπικό μέγιστο που βρέθηκε είναι μεγαλύτερο από το αποθηκευμένο, τότε το τελευταίο αντικαθίσταται. Αλλιώς, η αναζήτηση προς αυτή την κατεύθυνση σταματάει. Έτσι λοιπόν, αφού βρεθεί ένα τοπικό μέγιστο μικρότερο από το αποθηκευμένο, τότε δεν υπάρχει μεγαλύτερο μέγιστο προς αυτή την πλευρά και η αναζήτηση συνεχίζεται από την άλλη πλευρά. Αυτό μειώνει σημαντικά το χρόνο εύρεσης του ολικού μεγίστου. Η υπορουτίνα σταματάει την αναζήτηση προς μια κατεύθυνση μέχρι να βρεθεί ένα μικρότερο τοπικό μέγιστο ή να φθάσει την τάση κατωφλίου. Η τάση κατωφλίου είναι μικρότερη τιμή της τάσης, κάτω από την οποία δεν είναι πιθανό να βρεθεί το ολικό μέγιστο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί το ΣΜΙ (βλ. Σχήμα 3.5) [2].

Η τεχνική της Κλίσης της Καμπύλης Ισχύος λειτουργεί σε συνδυασμό με ένα DC-DC μετατροπέα και μπορεί πολύ απλά να υλοποιηθεί από έναν φθηνό

μικροεπεξεργαστή, έναν αισθητήρα ρεύματος και έναν αισθητήρα τάσης. Συχνά τα παραπάνω συμπεριλαμβάνονται στον DC-DC μετατροπέα. Η τεχνική αυτή έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά στο άρθρο [2]. Η πειραματική εγκατάσταση αποτελείται από φ/β συστοιχία τριών σειρών με έξι φ/β πλαίσια ανά σειρά. Η μέγιστη ισχύ του κάθε πλαισίου είναι 38W. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν μια αποδεκτή ακρίβεια της τεχνικής για την εύρεση του ΣΜΙ της φ/β συστοιχίας. Το σφάλμα σύγκλισης του πραγματικού ΣΜΙ είναι μικρότερο του 0.5% και η ταχύτητα σύγκλισης είναι κοντά στα 2s. Παρόλα αυτά, η τεχνική αυτή δεν είναι αρκετά γρήγορη για φορητές φ/β εφαρμογές όπου πραγματοποιούνται απότομες μεταβολές στις ΣΜΣ. Η τεχνική αυτή είναι αποτελεσματική στην περίπτωση της ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και υπό ΣΜΣ.

3.3.2 Γραμμική Εξίσωση Φορτίου (Load Line MPPT)

Στην βιβλιογραφία εντοπίστηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις της τεχνικής της Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου (ΓΕΦ) και ονομάστηκαν Τύπου I και Τύπου II. Στην κατηγορία Τύπου I η κλίση ΓΕΦ προσδιορίζεται από το λόγο του $V_{\Sigma MI}$ προς το $I_{\Sigma MI}$. Η κλίση μπορεί να υπολογιστεί από την μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος $V_{\alpha\kappa}$ και το ρεύμα βραχυκυκλώματος $I_{\beta\rho}$ της φ/β συστοιχίας υπό συνθήκες ομοιόμορφης σκίασης. Το $V_{\Sigma MI}$ και το $I_{\Sigma MI}$ είναι συνήθως το 80% του $V_{\alpha\kappa}$ και το 90% του $I_{\beta\rho}$, αντίστοιχα [4]. Μετά την εμφάνιση των ΣΜΣ, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει στη κοντά στη περιοχή του ολικού μεγίστου που είναι η τομή της ΓΕΦ με την I-V χαρακτηριστική (βλ. Σχήμα 3.6). Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος Στοιχειώδους Αγωγιμότητας, που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναλαμβάνει να βρει το ΣΜΙ. Η τεχνική αυτή μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με την χρήση ενός φθηνού μικροεπεξεργαστή ή μπορεί να συμπεριλαμβάνεται στον ελεγκτή του μετατροπέα ισχύος. Μαζί με τους αισθητήρες ρεύματος και τάσης απαιτείται και ένα επιπλέον κύκλωμα για την μέτρηση των $V_{\alpha\kappa}$ και $I_{\beta\rho}$. Σύμφωνα με το άρθρο [4] η τεχνική αυτή βρίσκει το ΣΜΙ σε χρονικό διάστημα 0.2-0.3s και το σφάλμα απόκλισης από το πραγματικό ΣΜΙ είναι 4.8%. Η ΓΕΦ βασίζεται στην υπόθεση ότι το σημείο τομής θα είναι κοντά στη περιοχή του ολικού μεγίστου. Παρόλα αυτά, οι ΣΜΣ μπορεί να δημιουργήσουν πιο περίπλοκες καμπύλες ισχύος. Συμπερασματικά, αυτή η τεχνική μπορεί να βρει το ΣΜΙ μόνο υπό συγκεκριμένες ΣΜΣ [4] [5].



Σχήμα 3.14: Γραμμική Εξίσωση Φορτίου και καμπύλη ισχύος με και χωρίς μερικής σκίασης.

Στη Τύπου II ΓΕΦ, μια γραμμική εξίσωση φέρνει το σημείο λειτουργίας στη περιοχή του ολικού μεγίστου [5]. Η διαδικασία ξεκινάει όταν η ΣΜΣ ανιχνευτεί. Δηλαδή όταν οι Εξισώσεις 3.2 και 3.3 ικανοποιηθούν,

$$\Delta V = V[n] - V[n - 1] < \Delta V_{set} \quad (3.2)$$

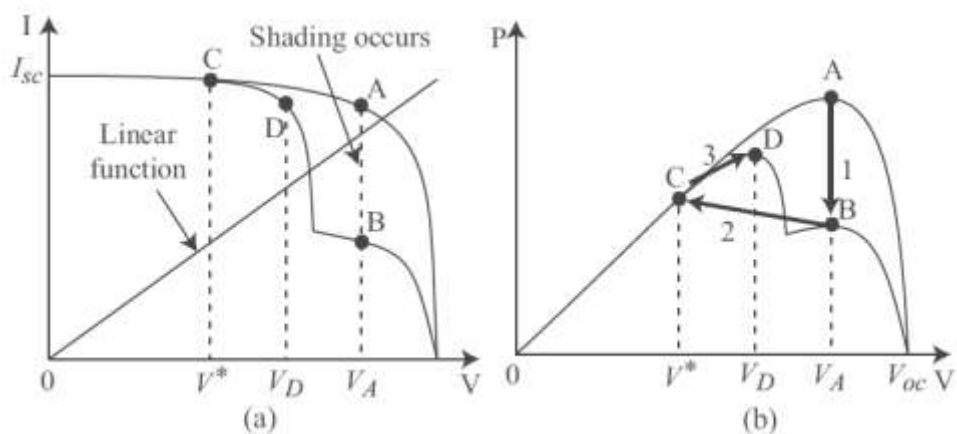
$$\frac{\Delta I}{I[n-1]} = \frac{I[n]-I[n-1]}{I[n-1]} < -\Delta I_{set} = -\frac{I[n]}{N_p} \quad (3.3)$$

όπου οι δείκτες n και $n-1$ αντιστοιχούν στα δύο τελευταία σημεία λειτουργίας της ϕ/β συστοιχίας και το N_p είναι ο αριθμός των σειρών που είναι παράλληλα συνδεδεμένες. Τα ΔV_{set} και ΔI_{set} είναι προκαθορισμένα κατώφλια.

Όταν εμφανιστούν οι ΣΜΣ, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται από το σημείο A στο B (βλ. Σχήμα 3.7). Στην συνέχεια, ο ελεγκτής μεταφέρει τη λειτουργία του μετατροπέα στην τάση αναφοράς (σημείου C) που υπολογίζεται από τη Εξίσωση 3.4,

$$V^* = \frac{N_s V_{oc}}{N_p I_{sc}} I[n] \quad (3.4)$$

όπου N_s είναι ο αριθμός των πλαισίων σε μία σειρά. Τέλος, ο αλγόριθμος της Στοιχειώδης Αγωγιμότητας προσεγγίζει το ΣΜΙ (σημείο D).



Σχήμα 3.15: Εύρεση του ολικού μεγίστου χρησιμοποιώντας τη γραμμική εξίσωση. α) I-V χαρακτηριστική και β) P-V χαρακτηριστική.

Η Τύπου II ΓΕΦ μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με έναν μικροεπεξεργαστή και αισθητήρες ρεύματος και τάσης. Η απόδοση αυτή της τεχνικής έχει επιβεβαιωθεί σε ένα φ/β σύστημα 3kW στο άρθρο [5]. Σύμφωνα με όσα δείχνουν τα πειραματικά αποτελέσματα, η τεχνική αυτή είναι σχετικά γρήγορη στην εύρεση του ΣΜΙ. Συγκριτικά με τον αλγόριθμο Στοιχειώδης Αγωγιμότητας, η τεχνική αυτή βελτιώνει την ισχύ εξόδου κατά 15% υπό συνθήκες ομοιόμορφης σκίασης. Ωστόσο, η ακρίβεια του Τύπου II μπορεί να μειωθεί λόγω της αλλαγής των ηλεκτρικών παραμέτρων που προκαλούνται από την γήρανση των φ/β πλαισίων [4].

3.3.3 Χωρισμός σε Ορθογώνια (Dividing Rectangles Technique)

Η Τεχνική Χωρισμού σε Ορθογώνια (ΤΧΟ) υλοποιεί τη συνθήκη του Lipschitz για την εύρεση του ΣΜΙ, ως συνάρτηση της τάσης της φ/β συστοιχίας [24]. Για την ομοιόμορφα οριοθετημένη συνάρτηση ισχύος $P(v)$ στο διάστημα τάσης $[a, b]$, προκύπτει η Εξίσωση 3.5,

$$P(v) \leq \max(P(v)) \leq P(v_1) + M \frac{b-a}{2} \quad (3.5)$$

όπου το v_1 είναι το κέντρο του $[a, b]$, και M είναι η μέγιστη τιμή του dP/dV στο $[a, b]$. Η ΤΧΟ χρησιμοποιεί την Εξίσωση 3.5 για να βρει το ΣΜΙ της φ/β συστοιχίας. Σε κάθε επανάληψη, το διάστημα της τάσης που βρίσκεται από την προηγούμενη επανάληψη $[a, b]$ χωρίζεται σε τρία ίσα υποδιαστήματα. Μεταξύ αυτών, το i -οστό διάστημα επιλέγεται ως το εν-δυνάμη βέλτιστο διάστημα αν υπάρχει σταθερά $k > 0$ τέτοια ώστε,

$$\left\{ \begin{array}{l} P(v_j) + k \frac{b_j - a_j}{2} \leq P(v_j) + k \frac{b_i - a_i}{2} \quad \forall j \\ P_{max} + \varepsilon |P_{max}| \leq P(v_i) + k \frac{b_i - a_i}{2} \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

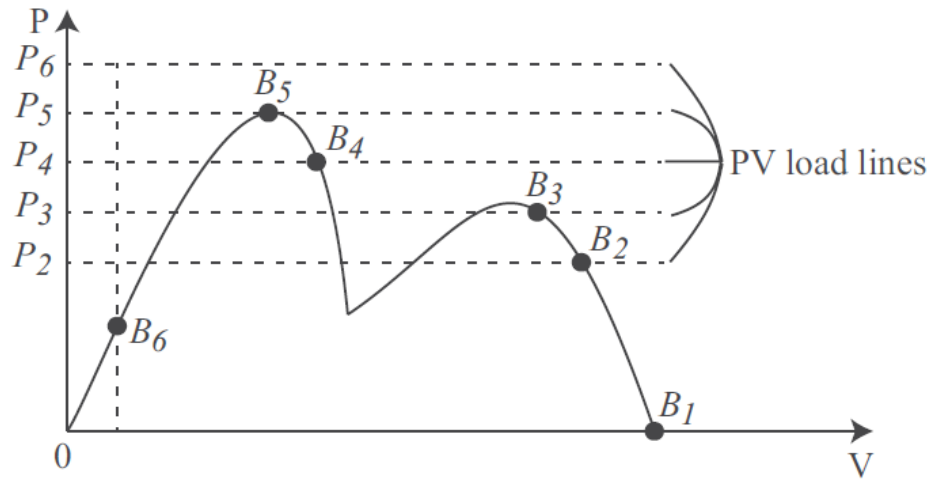
όπου P_{max} είναι η τρέχουσα μέγιστη ισχύ και ε μια θετική σταθερά. Τα a_i, b_i, a_j και b_j είναι τα τερματικά σημεία του i -οστού και j -οστού διαστήματος. Η πρώτη συνθήκη στη Εξίσωση 3.6 εξασφαλίζει το διάστημα με τη μεγαλύτερη πιθανότητα για το ΣΜΙ, να έχει επιλεγεί για περαιτέρω αναζήτηση. Με τη δεύτερη συνθήκη, εξασφαλίζεται το διάστημα, να οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του P_{max} , τουλάχιστον κατά $\varepsilon |P_{max}|$. Όταν αναζητείται το ΣΜΙ, επιλέγεται σχετικά μεγάλο ε (0.03 έχει επιλεγεί στο άρθρο [24]) προκειμένου να φέρει το σημείο λειτουργίας στην περιοχή του ολικού μεγίστου. Όταν η

αναζήτηση πλησιάζει το ΣΜΙ, το ε μειώνεται περισσότερο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να υπολογιστεί το ολικό μέγιστο της συνάρτησης.

Η τεχνική αυτή δεν εξαρτάται από το σχήμα της καμπύλης ισχύος και μπορεί να βρει το ΣΜΙ κάτω από διάφορες ΣΜΣ. Μέσω της εν λόγω τεχνικής, αποφεύγεται ο υπολογισμός της κλίσης dP/dV [25]. Έτσι λοιπόν, η ΤΧΟ μπορεί να υλοποιηθεί από έναν μικροεπεξεργαστή που θα ελέγχει έναν DC-DC μετατροπέα συνδεδεμένο στη φ/β συστοιχία. Επίσης, απαραίτητοι είναι οι αισθητήρες ρεύματος και τάσης. Η απόδοση αυτής της τεχνικής έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά σε φ/β συστοιχία 60 W. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική και ακριβής στην εύρεση το ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Η μέση απόδοση είναι πάνω από 95% και η ταχύτητα σύγκλισης γύρω στους 10 κύκλους λειτουργίας. Βέβαια, το αρχικό σημείο λειτουργίας πρέπει να επιλέγεται σωστά ώστε να μην παγιδεύεται σε τοπικά μέγιστα [24].

3.3.4 Τεχνική Αύξησης Ισχύος (Power Increment Technique)

Η τεχνική της Αύξησης Ισχύος εκμεταλλεύεται την αύξηση ισχύος του μετατροπέα σαν να είναι ένα ρυθμιζόμενο σταθερό φορτίο [25]. Η τεχνική αυτή υλοποιείται μέσω ενός απλού μικροεπεξεργαστή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, ο μετατροπέας ισχύος ελέγχεται, έτσι ώστε να τραβάει συνεχόμενα σταθερή ισχύ ξεκινώντας από τη κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος (σημείο B_1). Σε κάθε βήμα, η ενέργεια αυξάνεται καθώς πλησιάζει το ΣΜΙ (από το σημείο B_1 στο B_5), και η αντίστοιχη τάση αποθηκεύεται στη μνήμη του μικροεπεξεργαστή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το σημείο όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης μεγαλύτερης ισχύος επειδή έχει ξεπεραστεί το ΣΜΙ της φ/β συστοιχίας (φθάνοντας το σημείο B_6). Όταν φθάσουμε στο σημείο B_6 , ο DC-DC μετατροπέας ρυθμίζει την τάση εξόδου της φ/β συστοιχίας να αντιστοιχεί στην αποθηκευμένη τάση του σημείου B_5 . Έτσι ο μετατροπέας λειτουργεί κοντά στην περιοχή του ΣΜΙ. Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλαμβάνει να φθάσει το ΣΜΙ.



Σχήμα 3.16: Σταθερά φορτία της Τεχνικής Αύξησης Ισχύος.

Η τεχνική της Αύξησης Ισχύος μπορεί να βρει το ΣΜΙ είτε η φ/β συστοιχία είναι κατευθείαν συνδεδεμένη στο φορτίο, είτε συνδεδεμένη στο δίκτυο. Η τεχνική αυτή απαιτεί την χρήση αισθητήρων ρεύματος και τάσης και δεν απαιτεί προηγούμενη γνώση της καμπύλης ισχύος. Ακόμη, τα πειραματικά αποτελέσματα σε μια φ/β συστοιχία 15W δείχνουν ότι το σφάλμα σύγκλισης του ΣΜΙ είναι μικρότερο του 0.1% [25]. Τέλος, η ταχύτητα προσέγγισης είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα προσέγγισης της τεχνικής Particle Swarm Optimization που αναλύεται παρακάτω [26].

3.3.5 Στιγμαία Βελτιστοποίηση Ισχύος Λειτουργίας (Instantaneous Operating Power Optimization)

Η τεχνική της Στιγμαίας Βελτιστοποίησης της Ισχύος Λειτουργίας (ΣΒΙΑ) βασίζεται στο γεγονός ότι το ΣΜΙ της φ/β συστοιχίας εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία $E(t)$ και της θερμοκρασίας της p-n ένωσης $T(t)$ [27].

$$\Sigma MI(t) = \Sigma MI(T(t), E(t)) \quad (3.7)$$

Έτσι η Εξίσωση για το ΣΜΙ μπορεί να γραφτεί ως:

$$\Sigma MI(t) = a(T(t))b(E(t)) \quad (3.8)$$

όπου το $a(T(t))$ είναι ο παράγοντας τάσης και $b(E(t))$ είναι ο παράγοντας της ηλιακής ακτινοβολίας που καθορίζει και το $I_{\Sigma MI}$. Η θερμοκρασία της p-n ένωσης $T(t)$ εξαρτάται από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, το σημείο λειτουργίας του φ/β πλαισίου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες [27]. Ο παράγοντας τάσης $a(T(t))$ υπολογίζεται ως εξής: αν το $I_{\Sigma MI}$ είναι μικρότερο ενός προκαθορισμένου κατωφλίου, τότε $a(T(t)) = \alpha_0$, όπου

α_o είναι μια σταθερά. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος της Διαταραχής και Παρατήρησης αναλαμβάνει να υπολογίσει το $\alpha(T(t))$. Επειδή ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης μπορεί να βρει ένα τοπικό μέγιστο, χρειάζεται να λειτουργήσει γύρω από μια προσεγγιστική τιμή του μεγίστου $I_{\Sigma MI}, I_{\Sigma MI}^{προσ}$, για να εκτιμήσει τελικά το $\alpha(T(t))$. $I_{\Sigma MI}^{προσ}$ και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.9,

$$I_{\Sigma MI}^{προσ} = K_i P_{\muετρ}(t) \quad (3.9)$$

$$\text{όπου} \quad K_i = \frac{I_{τοπικά}^i}{I_{\Sigma MI}} \quad (3.10)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί το K_i , πρέπει να γίνει προεκτίμηση του ρεύματος στα τοπικά μέγιστα $I_{τοπικά}^i$ και του ρεύματος στο ολικό μέγιστο $I_{\Sigma MI}$.

Αφού υπολογιστεί το $\alpha(T(t))$, ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνει συνεχόμενα τη μετρούμενη φ/β ισχύ $P_{\muετρ}(t)$ με την ισχύ αναφοράς $P(t) = \alpha(T(t))I_{\muετρ}(t)$, όπου $I_{\muετρ}(t)$ είναι το μετρούμενο ρεύμα της φ/β συστοιχίας. Αν $P_{\muετρ}(t) < P(t)$, το $I_{\Sigma MI}$ αναζητείται μεταβάλλοντας το ρεύμα λειτουργίας,

$$I(t) = I_{\muετρ}(t) - \Delta I \quad (3.11)$$

όπου το ΔI διατηρείται σταθερό. $P_{\muετρ}(t) > P(t)$, το $I_{\Sigma MI}$ αναζητείται μεταβάλλοντας το ρεύμα λειτουργίας.

$$I(t) = \frac{P_{\muετρ}(t)}{\alpha(T(t))} \quad (3.12)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η Εξίσωση 3.13

$$\frac{P_{\muετρ}(t) - \alpha(T(t))I_{\muετρ}(t)}{P_{\muετρ}(t)} < \varepsilon. \quad (\text{Error! No text of specificie} \quad 3.13)$$

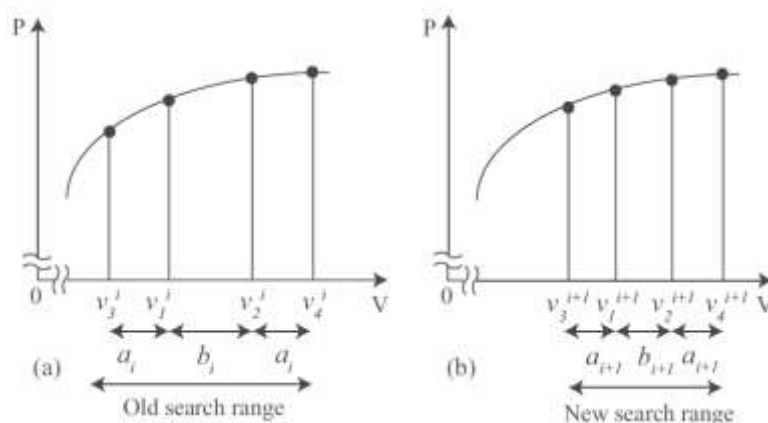
Η τεχνική ΣΒΙΛ λειτουργεί και για P-V χαρακτηριστικές με πολλά τοπικά μέγιστα. Παρόλα αυτά, μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι αυτή απαιτεί προμελέτη για τη γνώση του ρεύματος στα τοπικά μέγιστα, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το K_i . Η υλοποίηση της τεχνικής αυτής απαιτεί αισθητήρες ρεύματος και τάσης και τη χρήση ενός μικροεπεξεργαστή. Η επίδοση αυτής της τεχνικής έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά στο άρθρο. Στη φ/β συστοιχία που χρησιμοποιήθηκε, ο μικροεπεξεργαστής έλεγχε έναν DC-DC μετατροπέα που συνδεόταν σε μια συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η συσκευή αποθήκευσης ήταν συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω DC-AC αντιστροφέα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταχύτητα σύγκλισης είναι 0.2 s και το σφάλμα σύγκλισης του ΣΜΙ μικρότερο του 1% [27].

3.3.6 Αναζήτηση Fibonacci (Fibonacci Search)

Η τεχνική αναζήτησης Fibonacci μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του ΣΜΙ κάτω από ομοιόμορφες και μη ομοιόμορφες συνθήκες σκίασης [28]. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί την ακολουθία αριθμών Fibonacci.

$$\left\{ \begin{array}{l} c_0 = 0 \\ c_1 = 1 \\ c_n = c_{n-2} + c_{n-1}, n \geq 2 \end{array} \right\} \quad (3.14)$$

Η αναζήτηση βασίζεται στη στρατηγική ολίσθησης και περιορισμού (βλ. Σχήμα 3.9). Ο δείκτης i αναπαριστά τον αριθμό της επανάληψης. Σε κάθε επανάληψη, η καμπύλη αξιολογείται σε δύο σημεία ελέγχου (π.χ. v_1^i και v_2^i) μέσα στο ίδιο διάστημα. Στο Σχήμα 3.9, το a_i δείχνει την απόσταση μεταξύ του σημείου ελέγχου και των ορίων του διαστήματος, το v_3^i και το v_4^i , και το b_i δείχνει την απόσταση μεταξύ δύο ακόλουθων σημείων ελέγχου. Τα a_i και b_i καθορίζονται από τον κανόνα του Fibonacci.



Σχήμα 3.17: Στρατηγική ολίσθησης και περιορισμού για την εύρεση του ολικού μεγίστου. α) Παλαιό διάστημα αναζήτησης β) νέο διάστημα αναζήτησης.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i = c_{n+1} \\ b_i = c_n \\ a_{i+1} = c_n \\ b_{i+1} = c_{n-1} \end{array} \right\} \quad (3.15)$$

Το διάστημα αναζήτησης για την επόμενη επανάληψη ολισθαίνει είτε προς τα αριστερά είτε προς τα δεξιά σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha v P(v_1^i) < P(v_2^i) \Rightarrow v_3^{i+1} = v_1^i, v_4^{i+1} = v_4^i \\ \alpha v P(v_1^i) > P(v_2^i) \Rightarrow v_3^{i+1} = v_3^i, v_4^{i+1} = v_2^i \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

Η αναζήτηση σταματάει όταν ικανοποιείται η Εξίσωση 3.17,

$$\left\{ \begin{array}{l} |v_4^i - v_3^i| \leq \delta \\ |P(v_4^i) - P(v_3^i)| \leq \varepsilon \end{array} \right\} \quad (3.17)$$

όπου δ και ε είναι προκαθορισμένα επιτρεπτά όρια.

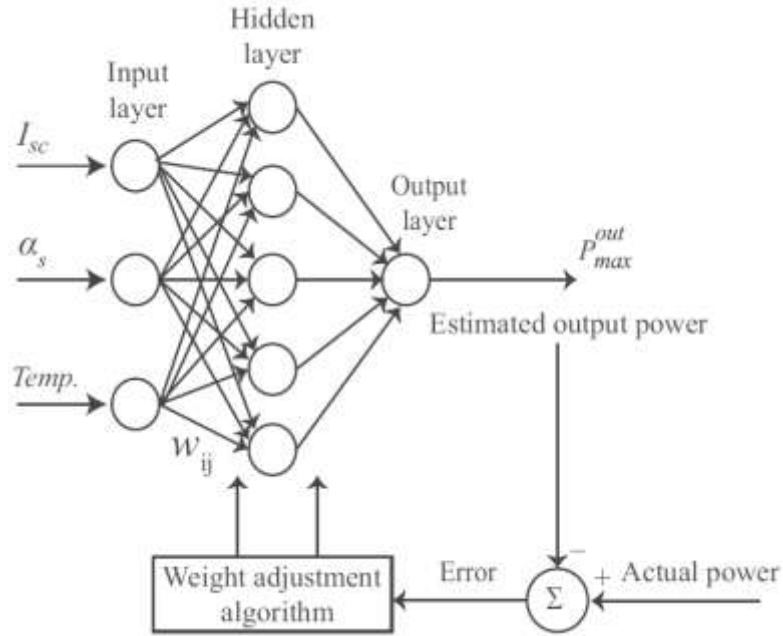
Η τεχνική της αναζήτησης Fibonacci είναι παρόμοια με τον αλγόριθμο Διαταραχής και Παρατήρησης. Όμως, εδώ το βήμα είναι μεταβλητό και καθορίζεται από την ακολουθία Fibonacci στη Εξίσωση 3.14. Πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτή η τεχνική μπορεί να βρει ένα τοπικό μέγιστο αντί για το ολικό μέγιστο, όταν η καμπύλη ισχύος έχει πολλές κορυφές. Η τεχνική αυτή έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά σε μια φ/β συστοιχία 300 W που αποτελούνταν από έξι φ/β πλαίσια σε σειρά [28]. Η ταχύτητα σύγκλισης του ΣΜΙ είναι αποδεκτή αν δεν εγκλωβιστεί σε ένα τοπικό μέγιστο. Η τεχνική αυτή μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί μέσω ενός μικροεπεξεργαστή και αισθητήρων ρεύματος και τάσης [28].

3.3.7 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks)

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) μπορούν να προβλέψουν το ΣΜΙ μιας φ/β συστοιχίας κάτω από συνθήκες ομοιόμορφης και μη ομοιόμορφης σκίασης [29]. Ο τρόπος λειτουργίας των ΤΝΔ υπό συνθήκες μερικής σκίασης είναι ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για ομοιόμορφες συνθήκες σκίασης, με τη μόνη διαφορά ότι εδώ το Νευρωνικό Δίκτυο πρέπει να εκπαιδευτεί και για τις συνθήκες μερικής σκίασης.

Συνήθως η τεχνική αυτή θεωρεί ότι τα κινούμενα αντικείμενα (π.χ. σύννεφα) δημιουργούν ομοιόμορφη σκίαση και προσπαθεί να προσδιορίσει το αποτέλεσμα των ΣΜΣ μόνο μέσω της θέσης του ήλιου. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα ότι απαιτεί λιγότερα δεδομένα εισόδου για την εκπαίδευση του συστήματος. Αλλά η θεώρηση της ομοιόμορφης σκίασης δεν είναι πάντα σωστή. Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας επιπλέον ελεγκτής ασαφούς λογικής για την εύρεση του ΣΜΙ [29]. Ο ελεγκτής αναζητά την τάση αναφοράς που παράγεται από το ΤΝΔ. Επίσης, συνήθως κοντινά φ/β πλαίσια ομαδοποιούνται και η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται ως εισοδοί για να εκπαιδευθούν το ΤΝΔ. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες σκίασης.

Η τεχνική των ΤΝΔ παρουσιάζει αποδεκτή ακρίβεια και ταχύτητα σύγκλισης στην εύρεση του ΣΜΙ κάτω από ΣΜΣ. Επίσης, μπορεί να υλοποιηθεί με έναν μικροεπεξεργαστή και αισθητήρες ρεύματος και θερμοκρασίας. Ακόμη, ο παράγοντας της ηλιακής ακτινοβολίας χρειάζεται να μετρηθεί ως είσοδος του ΤΝΔ. Αυτή η τεχνική είναι συγκεκριμένη για κάθε σύστημα και μπορεί να μην έχει τα ίδια αποτελέσματα κάτω από όλες τις ΣΜΣ αν δεν πραγματοποιείται συχνή ρύθμιση του συστήματος.



Σχήμα 3.18: Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα για τον υπολογισμό του ΣΜΙ υπό συνθήκες μερικής σκίασης.

3.3.8 Particle Swarm Optimization (PSO)

Η τεχνική PSO χρησιμοποιείται για να προσεγγιστεί η βέλτιστη λύση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών. Η τεχνική αυτή αποτελείται από συνεργαζόμενους συντελεστές (cooperating agents) που διατρέχουν το χώρο αναζήτησης σύμφωνα με γνωστές πληροφορίες για να βρουν την βέλτιστη τιμή της συνάρτησης. Η ταχύτητα vel_i^k , όπου ο i -οστός συντελεστής περνάει στην k -οστή επανάληψη, καθορίζεται από την προηγούμενη βέλτιστη λύση του συντελεστή p_{best}^i και τη βέλτιστη λύση της ομάδας των συντελεστών g_{best} [26]. Η ταχύτητα vel_i^k και η θέση s_i^k του κάθε συντελεστή ενημερώνονται ως εξής:

$$vel_i^{k+1} = wvel_i^k + c_1r_1p_{best}^i + c_2r_2g_{best} \quad (3.18)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + vel_i^{k+1} \quad (3.19)$$

όπου w είναι ο συντελεστής ορμής. Τα c_1 και c_2 είναι θετικές σταθερές. Τα $0 < r_1, r_2 < 1$ είναι τυχαίοι αριθμοί. Το p_{best}^i ενημερώνεται μόνο αν η τρέχον θέση του συντελεστή δίνει καλύτερη λύση.

Η τεχνική PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του ΣΜΙ, χωρίζοντας την φ/β συστοιχία σε ομάδες πλαισίων, όπου η κάθε ομάδα θα ελέγχεται από έναν DC-DC μετατροπέα. Η τάση των φ/β πλαισίων θα είναι το διάνυσμα θέσης του κάθε συντελεστή στον PSO αλγόριθμο, όπως φαίνεται στη Εξίσωση 3.20

$$s^k = [v_1^k, v_2^k, \dots, v_N^k] \quad (3.20)$$

όπου v_i^k είναι ο j-οστός πίνακας τάσης στην k-οστή επανάληψη και N είναι ο αριθμός των φ/β πλαισίων. Το διάνυσμα ταχύτητας είναι το

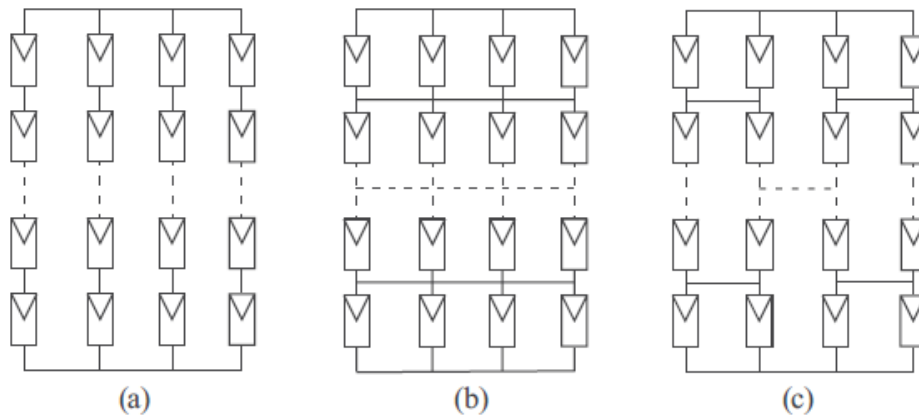
$$vel^k = [v_1^k - v_1^{k-1}, v_2^k - v_2^{k-1}, \dots, v_N^k - v_N^{k-1}] \quad (3.21)$$

Η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση είναι η συνολική ισχύς της φ/β συστοιχίας.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα σε φ/β συστοιχία 200 W, η τεχνική αυτή έχει ταχύτητα σύγκλισης στο ΣΜΙ σε 2s και το σφάλμα σύγκλισης είναι λιγότερο του 4% [26]. Αλλά, επειδή ο αλγόριθμος είναι περίπλοκος στην υλοποίηση του, απαιτεί έναν πολύ καλό μικροεπεξεργαστή για την ψηφιακή του υλοποίηση. Τέλος, η απόδοση της τεχνικής δεν εξαρτάται από την μορφή της P-V χαρακτηριστικής.

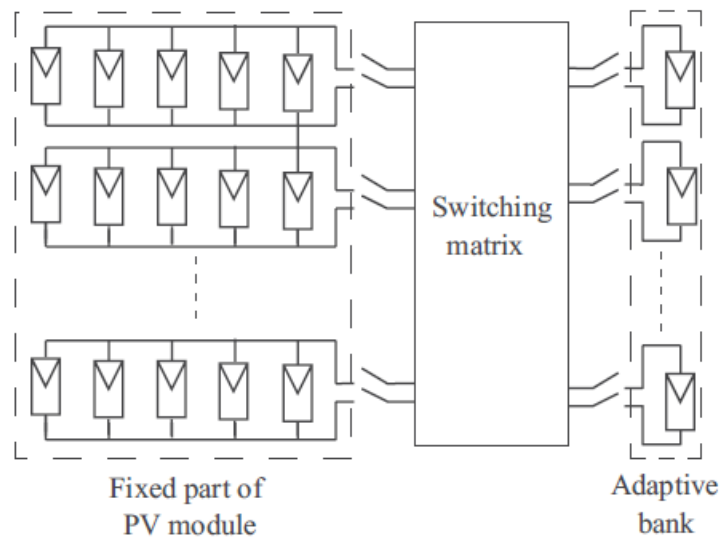
3.4 Συνδεσμολογίες Φ/Β Συστοιχίας (Array Configuration)

Το φαινόμενο της μερικής σκίασης μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση διαφορετικών τρόπων διασύνδεσης των φ/β πλαισίων [30]. Οι συνδεσμολογίες απεικονίζονται στο Σχήμα 3.11 (Σειρά – Παράλληλα (Series Parallel - SP), Σταυρωτή Συνδεσμολογία (Total Cross Tied - TCT), Συνδεσμολογία Γέφυρας (Bridged Linked - BL)). Οι διασυνδέσεις των φ/β σειρών διευκολύνουν τη διέλευση του ρεύματος στις περιπτώσεις της Σταυρωτής Συνδεσμολογίας (ΣΣ) και της Συνδεσμολογίας Γέφυρας (ΣΓ). Αυτό μπορεί να μειώσει το ρεύμα που διαρρέει τα σκιασμένα κύτταρα και να διατηρήσει τη λειτουργία τους στην περιοχή της ορθής πόλωσης. Έτσι λοιπόν, η ΣΣ και η ΣΓ μπορούν να βοηθήσουν στην εύρεση του ΣΜΙ κάτω από ΣΜΣ σε Εξίσωση με την κλασική Συνδεσμολογία Σειράς-Παράλληλα (ΣΣΠ). Στο άρθρο [30], η φ/β συστοιχία 2.2 kW σκιάζεται τεχνητά, δημιουργώντας δύο κορυφές στην P-V χαρακτηριστική. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι η ΣΓ και η ΣΣ αύξησαν κατά 2.3% και 3.8% το ΣΜΙ σε Εξίσωση με την ΣΣΠ, αντίστοιχα. Παρόμοιες μελέτες έχουν δείξει ότι η ΣΣ παράγει το μεγαλύτερο ΣΜΙ. Ακόμη, από πλευράς διασυνδέσεων, η ΣΣΠ χρειάζεται της λιγότερες καλωδιώσεις, ενώ τη ΣΣ χρειάζεται τον μεγαλύτερο αριθμό καλωδίων. Όπως είναι γνωστό, ο μεγάλος αριθμός καλωδιώσεων αυξάνει τις απώλειες ισχύος επάνω στα καλώδια.



Σχήμα 3.19: Συνδεσμολογίες φ/β συστοιχίας για την μείωση των απωλειών ισχύος υπό συνθήκες μερικής σκίασης. α) Σειρά – Παράλληλα β) Σταυρωτή Συνδεσμολογία γ) Συνδεσμολογία Γάρυρας.

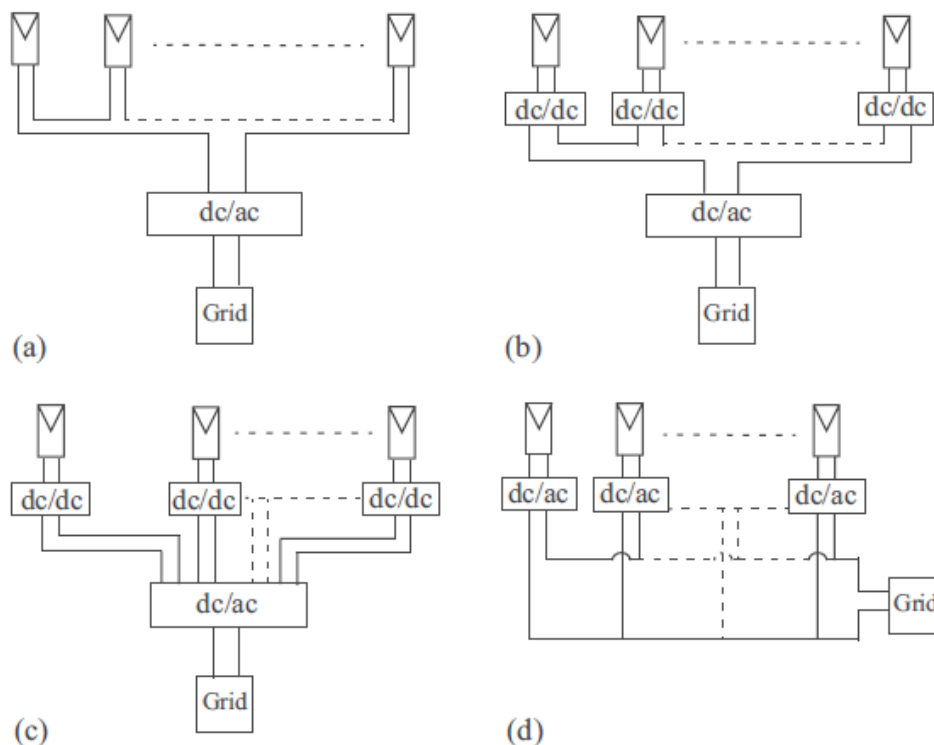
Μια ακόμη πιο ευέλικτη λύση είναι οι Ανασυνδεόμενες φ/β συστοιχίες, οι οποίες μειώνουν τις απώλειες ισχύος λόγω των ΣΜΣ [30]. Για παράδειγμα, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.12, το φ/β σύστημα αποτελείται από δύο μέρη, το σταθερό και το ευέλικτο. Το δεύτερο χρησιμοποιείται για τη μείωση των απωλειών. Όταν εμφανιστούν ΣΜΣ, η μήτρα μεταγωγής (switching matrix) ανασυνδεολογεί τη φ/β συστοιχία ώστε τα σκιασμένα πλαίσια στο σταθερό μέρος να αντισταθμίζονται από αυτά στο ευέλικτο μέρος. Έτσι, η φ/β συστοιχία παράγει σταθερή ισχύ ακόμη και όταν είναι μερικώς σκιασμένη. Η μελέτη μιας 3X3 φ/β συστοιχίας σε ΣΣ και με 3X3 ευέλικτο μέρος, έδειξε ότι το ΣΜΙ μπορεί να αυξηθεί κατά 60% [30]. Επομένως, η ανασυνδεόμενη φ/β συστοιχία είναι καλύτερη από τη ΣΣ και τη ΣΓ. Ωστόσο, η τεχνική αυτή δεν είναι καθόλου οικονομική εξαιτίας του περίπλοκου συστήματος ελέγχου και των επιπλέον φ/β πλαισίων. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η λειτουργία της υπό συνθήκες μεγάλης σκίασης, όπου τα φ/β πλαίσια του ευέλικτου μέρους δε μπορούν να αντισταθμίσουν όλα τα σκιασμένα φ/β πλαίσια του σταθερού μέρους. Τέλος, ένα μεγάλο ευέλικτο μέρος αυξάνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και απαιτεί έναν περίπλοκο αλγόριθμο ελέγχου [30].



Σχήμα 3.20: Σύνθεση Ανασυνδεόμενης φ/β συστοιχίας.

3.5 Αρχιτεκτονικές Φωτοβολταϊκών Συστημάτων (PV System Architectures)

Οι βασικές αρχιτεκτονικές διασύνδεσης μιας φ/β συστοιχίας στο δίκτυο είναι (βλ. Σχήμα 2.13): ο κεντρικός αντιστροφέας, οι μικρο-μετατροπείς συνδεδεμένοι σε σειρά, μικρο-μετατροπείς συνδεδεμένοι παράλληλα και οι μικρο-αντιστροφείς. Η αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί κεντρικό αντιστροφέα (Σχήμα 2.13 (α)), είναι η πιο γνωστή και χρησιμοποιείται ευρέως. Στην αρχιτεκτονική αυτή, το ΣΜΙ του κάθε πλαισίου δεν μπορεί να υπολογιστεί ξεχωριστά, γι' αυτό και είναι λιγότερο αποτελεσματική υπό ΣΜΣ [31]. Η αρχιτεκτονική των μικρο-μετατροπέων συνδεδεμένων σε σειρά (Σχήμα 2.13 (b)), χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογιστεί το ΣΜΙ του κάθε φ/β πλαισίου ξεχωριστά, και οι έξοδοί τους συνδέονται σε έναν κεντρικό αντιστροφέα. Ακόμη, στους παράλληλα συνδεδεμένους μικρο-μετατροπείς (Σχήμα 2.13 (c)) τα φ/β πλαίσια, συνδέονται σε έναν κεντρικό αντιστροφέα χρησιμοποιώντας DC-DC μετατροπείς. Εναλλακτικά, η αρχιτεκτονική των μικρο-αντιστροφέων (Σχήμα 2.13 (d)), αποφεύγει τον κεντρικό αντιστροφέα και βρίσκει το ΣΜΙ για κάθε φ/β πλαίσιο. Τέλος, εκτός από την αρχιτεκτονική κεντρικού αντιστροφέα, οι υπόλοιπες αρχιτεκτονικές επιτρέπουν την αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β πλαίσιο και είναι κατάλληλες για ΣΜΣ.

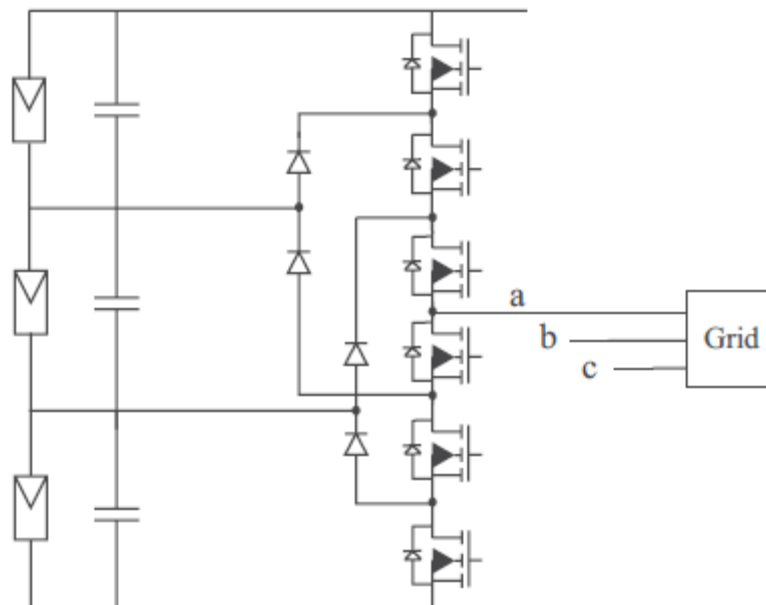


Σχήμα 3.21: Αρχιτεκτονικές φ/β συστημάτων. α) Κεντρικός Αντιστροφέας, β) Μικρο-μετατροπείς συνδεδεμένοι σε σειρά, γ) Μικρο-μετατροπείς συνδεδεμένοι παράλληλα και δ) Μικρο-αντιστροφείς.

3.6 Κυκλωματικές Τοπολογίες (Circuit Topologies)

3.6.1 Μετατροπείς Πολλών Επιπέδων (Multilevel Converters)

Οι μετατροπείς πολλών επιπέδων με διόδους σύσφιξης (diode clamped) αποτελούν μια ελαφρά τροποποιημένη αρχιτεκτονική κεντρικού αντιστροφέα [32]. Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται ένας τεσσάρων επιπέδων μετατροπέας, συνδεδεμένος σε τρεις φ/β συστοιχίες. Κάθε φ/β συστοιχία είναι συνδεδεμένη παράλληλα με ένα πυκνωτή. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε συστοιχία, ελέγχοντας την τάση λειτουργίας της αντίστοιχης συστοιχίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει 30% αύξηση της ισχύς εξόδου όταν χρησιμοποιείται μετατροπέας τεσσάρων επιπέδων, αντί για έναν απλό αντιστροφέα. Ωστόσο, σε ένα τέτοιο σύστημα δεν μπορεί να προστεθεί μια νέα φ/β συστοιχία γιατί πρέπει να αυξηθούν τα επίπεδα του μετατροπέα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συστοιχιών, τόσο περισσότερο αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος κατασκευής και η πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου. Επιπλέον, οι απώλειες των διακοπτικών (switches) σε ένα μετατροπέα πολλών επιπέδων είναι υψηλές, λόγω του μεγάλου αριθμού ημιαγωγικών στοιχείων [32].



Σχήμα 3.22: Τεσσάρων επιπέδων μετατροπέα με διόδους σύσφιξης συνδεδεμένο σε τρεις φ/β συστοιχίες.

Ακόμη, κάθε φ/β συστοιχία μπορεί να χωριστεί σε δύο όμοιες και ανεξάρτητες υποσυστοιχίες που θα συνδέονται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα νεκρού σημείου σύσφιξης (neutral point-clamped), με λειτουργία αναζήτησης του ΣΜΙ για κάθε υποσυστοιχία. Η λειτουργία αναζήτησης του ΣΜΙ για κάθε υποσυστοιχία μπορεί, επίσης, να υλοποιηθεί και με έναν μετατροπέα μισής-γέφυρας (half-bridge converter). Ακόμα, λόγω του ότι η αναζήτηση του ΣΜΙ μπορεί να χωριστεί, είναι πιο

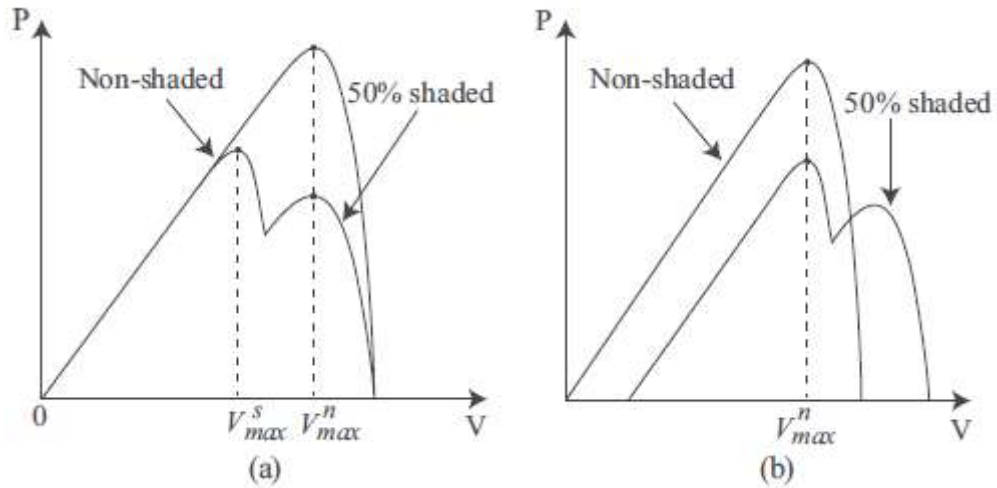
πιθανό να υπολογιστεί το σωστό ΣΜΙ. Ως εκ τούτου, αυτή η κυκλωματική τοπολογία είναι πιο αποτελεσματική από την τοπολογία μετατροπέων πολλών επιπέδων με διόδους σύσφιξης. Ωστόσο, αυτή δεν μπορεί να υπολογίσει το ΣΜΙ για κάθε φ/β πλαίσιο, επομένως θα συνεχίσουν να υπάρχουν απώλειες εξαιτίας των ΣΜΣ. Τέλος, η αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε υποσυστοιχία θα αυξήσει το κόστος υλοποίησης και την πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου [32].

3.6.2 Έγχυση Τάσης (Voltage Injection)

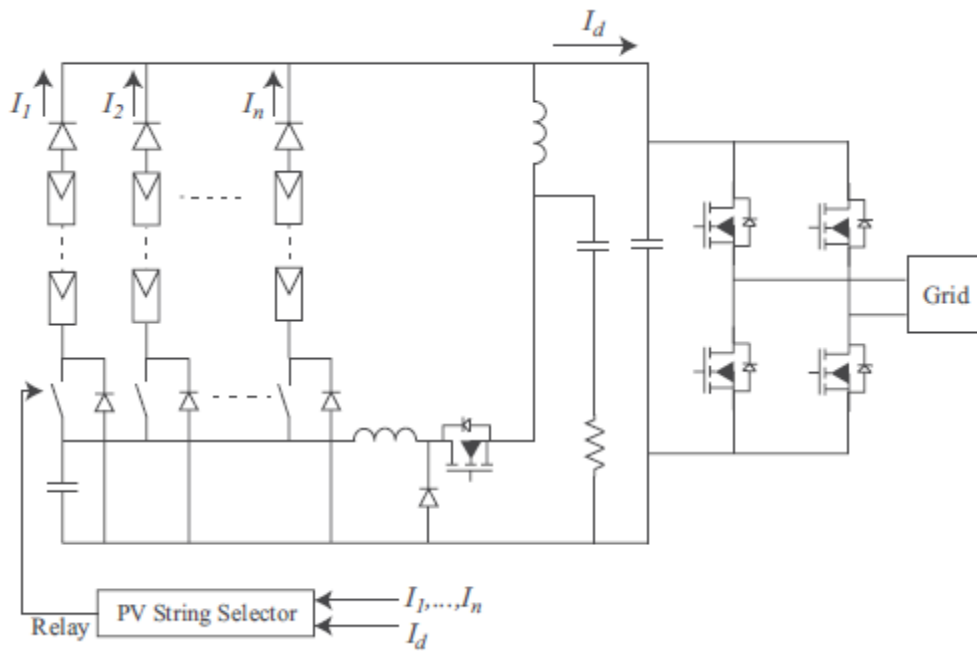
Στην τοπολογία Έγχυσης Τάσης, η εξαγόμενη μέγιστη ισχύς του φ/β συστήματος βελτιώνεται μέσω της έγχυσης τάσης στα σκιασμένα φ/β πλαίσια ή σειρές [33].

Στην πρώτη μέθοδο (Τύπου I), η τάση εγχέεται για να ευθυγραμμιστεί το ΣΜΙ της σκιασμένης σειράς με αυτό της μη σκιασμένης. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται για δύο παράλληλες σειρές όπου η μια είναι 50% σκιασμένη. Οι P-V χαρακτηριστικές των φ/β σειρών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.15 (α). Τα V_{max}^n και V_{max}^s είναι οι τάσεις στα ΣΜΙ στις περιπτώσεις της μη σκιασμένης και σκιασμένης φ/β σειράς, αντίστοιχα. Όπως μπορεί κανείς να συμπεράνει από στο Σχήμα 3.15 (b), το ΣΜΙ της σκιασμένης σειράς ευθυγραμμίζεται με το αντίστοιχο της μη σκιασμένης σειράς. Η τάση μπορεί να εγχυθεί συνδέοντας τη σκιασμένη φ/β σειρά σε σειρά με έναν πυκνωτή.

Η συνδεσμολογία η οποία έχει προταθεί για την υλοποίηση της παραπάνω τοπολογίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.16, στο οποίο ένας πυκνωτής είναι συνδεδεμένος σε σειρά με τις φ/β σειρές και ο επιλογέας (PV string selector) συνδέει τις σκιασμένες σειρές με τον πυκνωτή ανάλογα με τα ρεύματα σειράς και το συνολικό ρεύμα. Σε πειραματική δοκιμή σε φ/β σύστημα 300 W η μέθοδος αυτή αύξησε κατά 20% την εξαγόμενη ισχύ κάτω από συγκεκριμένες ΣΜΣ [33]. Η τεχνική αυτή μπορεί εύκολα να ελεγχθεί από έναν απλό μικροεπεξεργαστή και μπορεί να αναβαθμιστεί καθώς ο αριθμός των φ/β σειρών αυξάνεται. Ένα πιθανό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι αν δύο σειρές σκιάζονται διαφορετικά, τότε κάθε σειρά χρειάζεται διαφορετική τάση έγχυσης. Επομένως, επειδή η προτεινόμενη κυκλωματική διάταξη δε μπορεί να προσφέρει διαφορετικές τάσεις ταυτόχρονα, η μέγιστη ισχύς της φ/β συστοιχίας δε μπορεί να εξαχθεί και η ενεργειακή απόδοση του συστήματος μειώνεται.



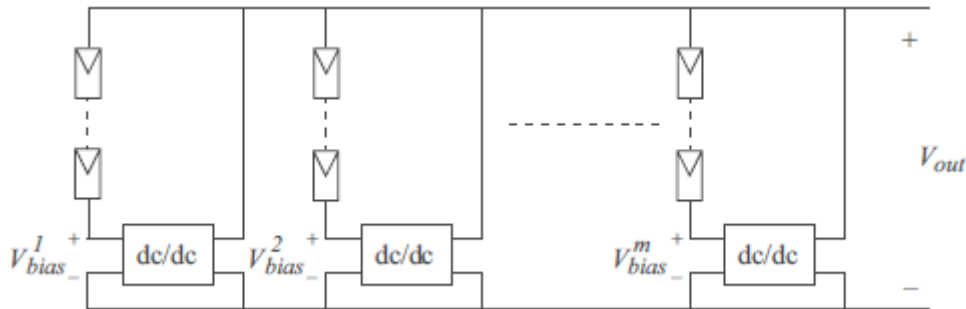
Σχήμα 3.23: Αλλαγή της P-V χαρακτηριστική λόγω έγχυσης τάσης. α) Χωρίς έγχυση τάσης και β) με έγχυση τάσης.



Σχήμα 3.24: Κυκλωματική διάταξη τεχνικής έγχυσης τάσης (Τύπου I).

Στη δεύτερη μέθοδο (Τύπου II), η εγχεόμενη τάση μπορεί να απενεργοποιήσει τα σκιασμένα φ/β πλαίσια της κάθε σειράς (βλ. Σχήμα 3.17). Σε αυτό το κύκλωμα, κάθε φ/β σειρά συνδέεται σε ένα DC-DC μετατροπέα που τροφοδοτεί την τάση εξόδου του συστήματος και παρέχει την τάση έγχυσης στη σειρά που είναι συνδεδεμένος. Τα σκιασμένα φ/β πλαίσια σε κάθε σειρά απενεργοποιούνται πολώνοντας ορθά την δίοδο διαφυγής. Ο αριθμός των πλαισίων που πρέπει να απενεργοποιηθούν καθορίζει την τιμή της τάσης έγχυσης σε κάθε σειρά. Για αυτό η τάση του κάθε πλαισίου πρέπει να παρακολουθείται και να συγκρίνεται με την τάση των άλλων πλαισίων για να υπολογίζεται ο αριθμός των σκιασμένων φ/β σε κάθε σειρά. Ακόμη, για τον έλεγχο των

DC-DC μετατροπέων απαιτείται ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου. Σε φ/β συστοιχία τριών σειρών με οκτώ πλαίσια σε κάθε σειρά (24.4 Wp το κάθε πλαίσιο), η μέθοδος Τύπου II αύξησε την ενεργειακή απόδοση της μερικώς σκιασμένης συστοιχίας από 23% στο 95% [33]. Σε αντίθεση με την Τύπου I, η Τύπου II λειτουργεί καλύτερα όταν δύο ή περισσότερες σειρές σκιάζονται διαφορετικά. Ένα από τα μειονεκτήματα της Τύπου II τοπολογίας είναι ότι δε μπορεί να βρει το ΣΜΙ αν δεν απενεργοποιηθούν τα σκιασμένα φ/β πλαίσια. Τέλος, το σύστημα μπορεί να αναβαθμιστεί άπλα προσθέτοντας νέους DC-DC μετατροπείς σε κάθε νέα σειρά, γεγονός όμως που αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης [33].

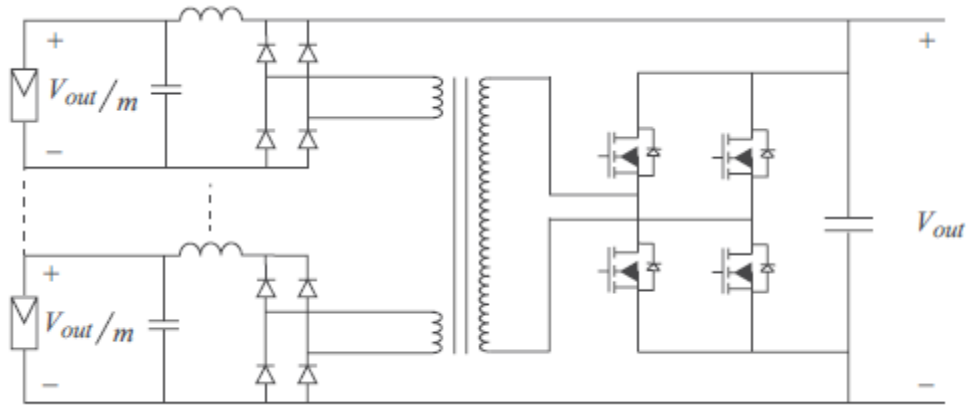


Σχήμα 3.25: Κυκλωματική διάταξη τεχνικής έγχυσης τάσης (Τύπου II) για την απενεργοποίηση των σκιασμένων φ/β πλαισίων.

3.6.3 Κύκλωμα Ελέγχου Παραγωγής (Generation Control Circuits)

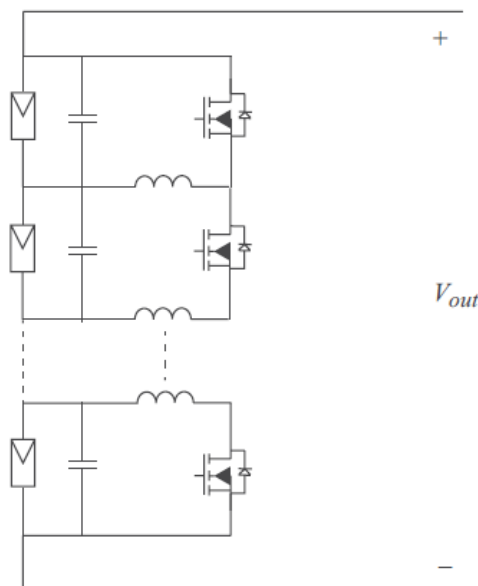
Το Κύκλωμα Ελέγχου Παραγωγής (ΚΕΠ) βελτιώνει την εξαγόμενη ισχύ της φ/β συστοιχίας ελέγχοντας την τάση λειτουργίας των φ/β πλαισίων [34]. Εδώ θα αναλυθούν δύο τοπολογίες ΚΕΠ.

Η πρώτη τοπολογία ονομάζεται DC-DC Μετατροπέας-Βάσης και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18 [34]. Σε αυτή την τοπολογία, η τάση λειτουργίας όλων των πλαισίων ελέγχεται με μια σταθερή τιμή (V_{out}/m), όπου V_{out} είναι η τάση εξόδου της σειράς και m ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε κάθε σειρά. Όταν ένα φ/β πλαίσιο σκιαστεί, τότε ο παράλληλος πυκνωτής παρέχει επιπλέον ρεύμα για να αντισταθμίσει τη διαφορά μεταξύ του ρεύματος σειράς και του σκιασμένου πλαισίου. Το ρεύμα αντιστάθμισης επιτρέπει τη λειτουργία του σκιασμένου φ/β πλαισίου στην ίδια τάση με τα υπόλοιπα πλαίσια. Η τοπολογία αυτή βελτιώνει την εξαγόμενη ισχύ των φ/β πλαισίων αλλά δεν είναι δυνατόν να γίνει έλεγχος της τάσης του κάθε πλαισίου ξεχωριστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση της σταθερής τάσης λειτουργίας μπορεί να βελτιώσει την παραγόμενη ισχύ της φ/β σειράς μέχρι κάποιο σημείο, όπου από εκεί και πέρα η ενεργειακή απόδοση περιορίζεται από το γεγονός ότι η αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β πλαίσιο δεν είναι εφικτή. Αυτό το μειονέκτημα έχει περιοριστεί με τη χρήση τοπολογίας multichopper όπως δείχνει το Σχήμα 3.19. Τα σύστημα ελέγχου μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με έναν απλό μικροεπεξεργαστή.

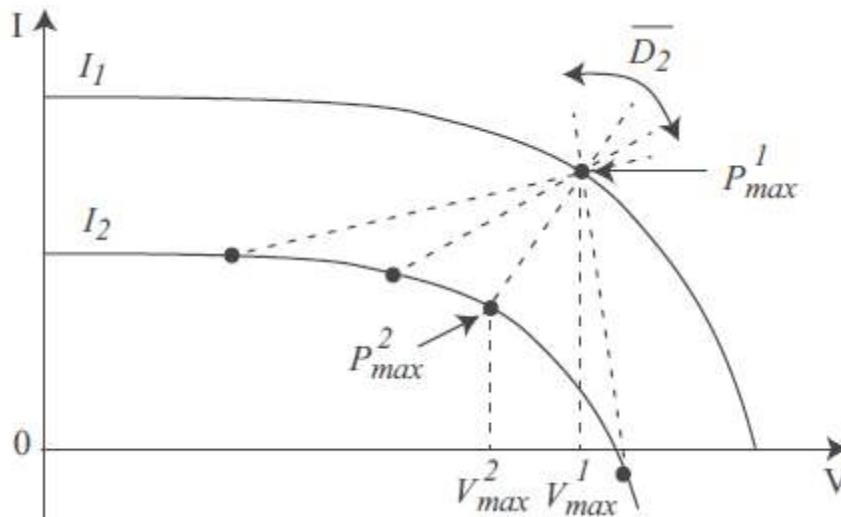


Σχήμα 3.26: DC-DC Μετατροπέας-Βάσης του Κυκλώματος Ελέγχου Παραγωγής.

Στην τοπολογία multichopper, το off-duty ratio του διακοπτικού που συσχετίζεται με το i -οστό φ/β πλαίσιο \bar{D}_i μπορεί από μόνο του να ελεγχθεί και να ρυθμίσει την τάση λειτουργίας του i -οστού πλαισίου. Η μέθοδος υλοποιήθηκε για φ/β σειρά δύο φ/β πλαισίων όπου το δεύτερο πλαίσιο ήταν σκιασμένο. Οι I-V χαρακτηριστικές καμπύλες αναπαρίστανται στο Σχήμα 3.20, όπου τα P_{max}^1 και P_{max}^2 είναι τα ΣΜΠ του πρώτου και του δεύτερου φ/β πλαισίου, αντίστοιχα. Η συνολική ισχύ εξόδου της φ/β σειράς δύναται να υπολογιστεί ανάγοντας το off-duty ratio του σκιασμένου πλαισίου \bar{D}_2 . Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση φ/β σειράς με m πλαίσια όπου ο κεντρικός ελεγκτής πρέπει να ανάγει το off-duty ratio όλων των διακοπτικών για να βεβαιώσει ότι όλα τα πλαίσια λειτουργούν στο ΣΜΠ τους. Αυτό ενδέχεται να αυξήσει την πολυπλοκότητα και το κόστος του ελεγκτή του φ/β συστήματος. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα σε φ/β σύστημα 600 W η τοπολογία multichopper αύξησε κατά 20% την ισχύ εξόδου κάτω από συγκεκριμένες ΣΜΣ. Τέλος, η τοπολογία αυτή δύναται να αναβαθμιστεί καθώς προσθέτονται νέα φ/β πλαίσια.



Σχήμα 3.27: Multichopper- Τοπολογία Κυκλώματος Ελέγχου Παραγωγής.



Σχήμα 3.28: Αποτέλεσμα αλλαγής του off-duty ratio των διακοπτικών (switches) για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος στη τοπολογία Multichopper.

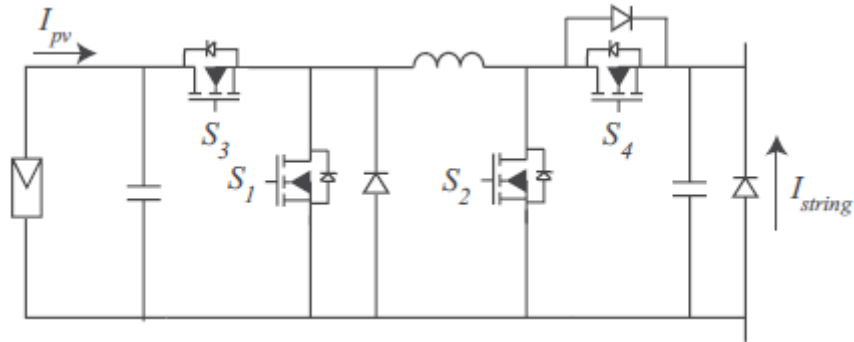
3.6.4 Ενσωματωμένοι Μετατροπείς Πλαισίου (Module Integrated Converters)

Οι Ενσωματωμένοι Μετατροπείς Πλαισίου (EMΠ) χρησιμοποιούν ένα μικρο-μετατροπέα συνδεδεμένο σε σειρά (βλ. Σχήμα 3.13 (b)). Σε αυτή την κυκλωματική τοπολογία ένας DC-DC μετατροπέας ενσωματώνεται σε κάθε φ/β πλαίσιο έτσι επιτρέπεται η λειτουργία του κάθε πλαισίου της ίδιας σειράς να λειτουργεί με διαφορετικό ρεύμα. Κάθε DC-DC μετατροπέας ελέγχεται από τοπικό ελεγκτή για την εύρεση του ΣΜΙ του πλαισίου. Επίσης, η αποκεντρωμένη πολιτική ελέγχου αυξάνει σημαντικά την ευρωστία και αξιοπιστία του φ/β συστήματος [35]. Σύμφωνα με το άρθρο [35] η κατάλληλη επιλογή DC-DC μετατροπέα (π.χ. υποβιβασμού τάσης (buck), ανύψωσης τάσης (boost), μικτός (buck-boost) και Cuk) για την εκάστοτε φ/β συστοιχία μπορεί να φθάσει την ενεργειακή απόδοση στο 95%. Σε 85 W φ/β σύστημα η EMΠ τοπολογία αύξησε την ισχύ εξόδου κατά 38%.

Η EMΠ τοπολογία μπορεί να υλοποιηθεί και με την αρχιτεκτονική μικρο-αντιστροφέα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14 (d). Σε αυτή την κυκλωματική συνδεσμολογία χρησιμοποιείτε ένα αντιστροφέα αντί για έναν DC-DC μετατροπέα και είναι γνωστή ως «ACPV module». Η χρήση αντιστροφέων δεν απαιτεί την ύπαρξη ενός κεντρικού DC-AC μετατροπέα και DC ζυγού υψηλής τάσης, οδηγώντας έτσι σε μικρότερου μεγέθους και ασφαλέστερες εγκαταστάσεις. Ωστόσο, εισάγει ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα και προβλήματα προστασίας.

Η τοπολογία αυτή απαιτεί τη χρήση γρήγορου και πολύπλοκου συστήματος ελέγχου για τη διαχείριση της λειτουργίας των μετατροπέων που είναι εγκατεστημένα σε κάθε φ/β πλαίσιο. Αυτό αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

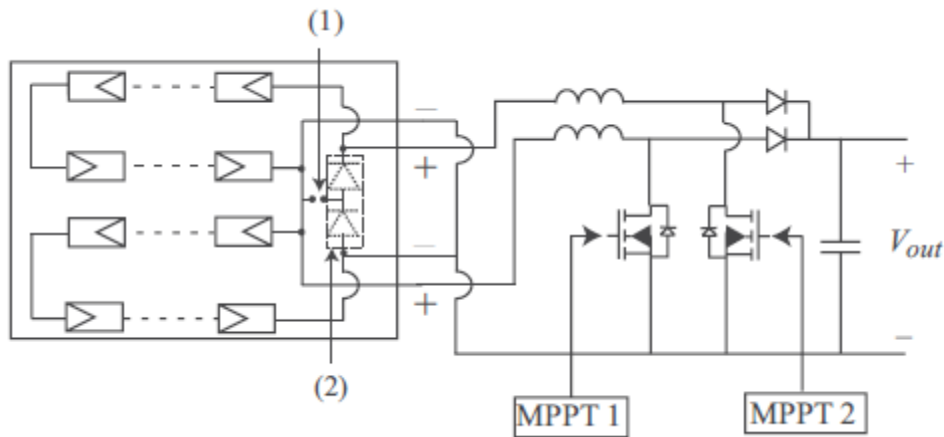
Τέλος, η ΕΜΠ τοπολογία μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί προσθέτοντας νέα φ/β πλαίσια.



Σχήμα 3.29: Τοπολογία Ενσωματωμένων Μετατροπέων Πλαισίου: τυπικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται στην αρχιτεκτονική μικρο-μετατροπέων συνδεδεμένων σε σειρά.

3.6.5 Μετατροπείς Πολλαπλών Εισόδων (Multiple Input Converters)

Ένας Μετατροπέας Πολλαπλών Εισόδων – Μιας Εξόδου (ΠΕΜΕ) μπορεί να κατασκευαστεί ως πρώτου σταδίου DC-DC μετατροπέας στην αρχιτεκτονική μικρο-μετατροπέων [31]. Στο φ/β πλαίσιο του Σχήματος 3.22, η ηλεκτρική επαφή διακόπτεται στο σημείο 1 και οι διόδοι παράκαμψης έχουν αφαιρεθεί από το σημείο 2. Η έξοδο των φ/β σειρών συνδέονται στους μετατροπείς και τα ρεύματα και οι τάσεις μετριοούνται για τον υπολογισμό του ΣΜΙ. Επειδή οι διόδοι παράκαμψης αφαιρέθηκαν από το φ/β πλαίσιο, η καμπύλη ισχύος τώρα έχει μόνο μια κορυφή. Έτσι, μια απλή τεχνική αναζήτησης μπορεί να βρει το ΣΜΙ. Σε πειραματική διάταξη σε ένα φ/β πλαίσιο 120 W, ο μετατροπέας ΠΕΜΕ αύξησε κατά 9.6% την ισχύ εξόδου σε Εξίσωση με έναν μετατροπέα μιας εισόδου. Η παραπάνω κυκλωματική τοπολογία δύναται να αναβαθμιστεί για τη σύνδεση περισσότερων φ/β σειρών. Ο μεγάλος αριθμός εισόδων αυξάνει επίσης τον αριθμό των ημιαγωγίμων στοιχείων και των πηνίων που με την σειρά τους αυξάνουν το κόστος και το μέγεθος της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.30: Τοπολογία Μετατροπείς Πολλαπλών Εισόδων με αλλαγμένα φ/β πλαίσια.

3.7 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού τεχνικών ελέγχου για την εύρεση του ΣΜΙ και των κυκλωματικών τοπολογιών που υπάρχουν, η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος για την φ/β συστοιχία αποτελεί δύσκολη απόφαση. Στον Πίνακα 3.1 καταγράφονται περιληπτικά οι τεχνικές εύρεσης του ΣΜΙ για ΣΜΣ. Η ακρίβεια και η ταχύτητα προσέγγισης είναι δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής. Ακόμα, η απλότητα της υλοποίησης και το κόστος κατασκευής αποτελούν εξίσου σημαντικοί παράγοντες και καθορίζονται κυρίως από τον αριθμό των αισθητήρων και την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Κάποιες τεχνικές όπως τα ΤΝΔ απαιτούν πολύπλοκα μετρητικά συστήματα και κάποιες άλλες όπως η ΤΧΟ και η ΡSO είναι σχετικά περίπλοκες και μη αποτελεσματικές. Για εφαρμογές όπου η απλότητα και το κόστος είναι σημαντικοί παράγοντες, η ΓΕΦ τεχνική είναι κατάλληλη. Ακόμη, η τεχνική Fibonacci είναι κατάλληλη για εφαρμογές που η καμπύλη ισχύος έχει συγκεκριμένη μορφή. Για σημαντικές εφαρμογές που απαιτείται γρήγορη και ακριβή εύρεση του ΣΜΙ η ΤΑΙ είναι η πιο κατάλληλη.

Τέλος, ο Πίνακας 3.2 προσφέρει μια περίληψη των κυριότερων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των κυκλωματικών τοπολογιών που αναλύθηκαν παραπάνω. Οι κυκλωματικές τοπολογίες διαφέρουν ως προς την υλοποίηση, την ενεργειακή απόδοση, τον αριθμό των ενεργητικών και παθητικών στοιχείων, την πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου, την δυνατότητα αναβάθμισης και την ικανότητα αναζήτησης του ΣΜΙ σε κάθε φ/β πλαίσιο.

Κλίση της Καμπύλης Ισχύος (Power Curve Slope)	Όχι	Μέτρια	Υψηλή Ακρίβεια	Μέτρια	Τάσης και Ρεύματος	Αυξάνεται το τοπικό μέγιστο μέχρι να βρεθεί το ολικό μέγιστο.
Γραμμική Εξίσωση Φορτίου (Load Line MPPT)	Τύπου I Ναι	Γρήγορη	Δεν είναι ακριβής για όλες τις συνθήκες μερικής σκιάσεως	Χαμηλή	Τάσης και Ρεύματος	Η γραμμική εξίσωση φορτίου πρέπει να τέμνει την τη I-V χαρακτηριστική στην περιοχή του ολικού μεγίστου. Η ακρίβεια αυτή της μεθόδου μπορεί να μειωθεί από την γήρανση των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων του φ/β συστήματος.
	Τύπου II Ναι	Γρήγορη	Ακριβής	Μέτρια	Τάσης και Ρεύματος	Η ακρίβεια αυτή της μεθόδου μπορεί να μειωθεί από την γήρανση των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων του φ/β συστήματος.
Τεχνική Χωρισμού σε Ορθογώνια (Dividing Rectangles Technique)	Όχι	Γρήγορη	Ακριβής	Μέτρια	Τάσης και Ρεύματος	Απαιτείτε κατάλληλη αρχικοποίηση του συστήματος ώστε να μην εγκλωβιστεί σε τοπικό μέγιστο.
Τεχνική Αύξησης Ισχύος (Power Increment Technique)	Όχι	Γρήγορη	Υψηλή Ακρίβεια	Μέτρια	Τάσης και Ρεύματος	Η σύγκλιση είναι πάντα σίγουρη.
Στιγμιαία Βελτιστοποίηση Ισχύος Λειτουργίας (Instantaneous Operating Power Optimization)	Όχι	Μέτρια	Υψηλή Ακρίβεια	Μέτρια	Τάσης και Ρεύματος	Απαιτείτε προ μελέτη για τον καθορισμό της τιμής των ρευμάτων σε κάθε τοπικό μέγιστο.
Αναζήτηση Fibonacci (Fibonacci Search)	Όχι	Μέτρια	Δεν είναι ακριβής για όλες τις συνθήκες μερικής σκιάσεως	Μέτρια	Τάσης και Ρεύματος	Η σύγκλιση δεν είναι βέβαιη στην περίπτωση ύπαρξης πολλών κορυφών στην καμπύλη ισχύος.
Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks)	Ναι	Γρήγορη	Ακριβής	Υψηλή	Θερμοκρασίας, Ηλιακής Ακτινοβολίας και Ρεύματος	Χρειάζεται συνεχώς εκπαίδευση του συστήματος.
Particle Swarm Optimization (PSO)	Όχι	Μέτρια	Ακριβής	Υψηλή	Τάσης και Ρεύματος	Η σύγκλιση είναι πάντα σίγουρη.

Μετατροπείς Πολλών Επιπέδων (Multilevel Converters)	Με Διόδους Σύσφιξης (Diode Champed)	<ul style="list-style-type: none"> • Εύρεση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β συστοιχία. • Αποδεκτή ενεργειακή απόδοση υπό ΣΜΣ. 	<ul style="list-style-type: none"> • Τα φ/β πλαίσια μπορεί να μην λειτουργούν στο ΣΜΙ. • Μεγάλες φ/β συστοιχίες απαιτούν πολλά ημιαγωγία στοιχεία αυξάνοντας έτσι το κόστος και την πολυπλοκότητα. • Υψηλές απώλειες ισχύος στα διακοπτικά. • Η φ/β συστοιχία δε μπορεί να αναβαθμιστεί. • Τα φ/β πλαίσια μπορεί να μην λειτουργούν στο ΣΜΙ. • Η φ/β συστοιχία δε μπορεί να αναβαθμιστεί.
	Μετατροπέας Μισής Γέφυρας (Half Bridge Converter)	<ul style="list-style-type: none"> • Εύρεση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β υποσυστοιχία. • Το φ/β σύστημα έχει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από τον μετατροπέα με διόδους σύσφιξης. • Μικρότερος αριθμός διακοπτικών άρα και μικρότερες απώλειες ισχύος σε Εξίσωση με τον μετατροπέα με διόδους σύσφιξης. 	
	Μετατροπές Νεκρού Σημείου Σύσφιξης (Neutral Point Champed)	<ul style="list-style-type: none"> • Εύρεση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β υποσυστοιχία. • Το φ/β σύστημα έχει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από τον μετατροπέα με διόδους σύσφιξης. 	<ul style="list-style-type: none"> • Τα φ/β πλαίσια μπορεί να μην λειτουργούν στο ΣΜΙ. • Η φ/β συστοιχία δε μπορεί να αναβαθμιστεί. • Μεγάλες απώλειες ισχύος στα διακοπτικά.
Έγχυση Τάσης (Voltage Injection)	Τύπου I	<ul style="list-style-type: none"> • Απλότητα του κυκλώματος και του συστήματος ελέγχου • Μπορεί να αναβαθμιστεί 	<ul style="list-style-type: none"> • Το ΣΜΙ δε μπορεί να βρεθεί όταν δύο οι περισσότερες φ/β σειρές είναι σκιασμένες μειώνοντας την ενεργειακή απόδοση.
	Τύπου II	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση σε Εξίσωση με την Τύπου I όταν σκιάζονται μερικώς περισσότερες από δύο σειρές. • Μπορεί να αναβαθμιστεί • Απλό σύστημα ελέγχου. • Μπορεί να αναβαθμιστεί. 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ πιο περίπλοκη από την Τύπου I. • Δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί τη μέγιστη ενέργεια της φ/β συστοιχίας επειδή τα σκιασμένα πλαίσια απενεργοποιούνται. • Τα σκιασμένα φ/β πλαίσια μπορεί να μην λειτουργήσουν ακριβώς στο ΣΜΙ προκαλώντας μείωση της ενεργειακής απόδοσης. • Πολύπλοκο σύστημα ελέγχου.
Κύκλωμα Ελέγχου Παραγωγής (Generation Control Circuits)	DC-DC μετατροπέας	<ul style="list-style-type: none"> • Αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β πλαίσιο. • Η φ/β συστοιχία έχει αποδεκτή ενεργειακή απόδοση υπό ΣΜΣ. • Μπορεί να αναβαθμιστεί. 	
	Multichopper	<ul style="list-style-type: none"> • Αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β πλαίσιο. • Υψηλή ενεργειακή απόδοση. • Μπορεί να αναβαθμιστεί. 	
Ενσωματωμένοι Μετατροπείς σε κάθε Πλαίσιο (Module Integrated Converters)	Αρχ. Σύνδεσης Μικρο-μετατροπέων σε Σειρά Αρχ. Μικρο - αντιστροφών	<ul style="list-style-type: none"> • Αναζήτηση του ΣΜΙ σε κάθε φ/β πλαίσιο. • Υψηλή ενεργειακή απόδοση. • Μικρότερο μέγεθος και ασφαλέστερη εγκατάσταση από μικρο-μετατροπέα σε σειρά. • Επέκταση του συστήματος. 	<ul style="list-style-type: none"> • Σχετικά μεγάλος αριθμός ενεργητικών και παθητικών στοιχείων ανά φ/β πλαίσιο. • Πολύπλοκο σύστημα ελέγχου. • Σχετικά μεγάλος αριθμός ενεργητικών και παθητικών στοιχείων ανά φ/β πλαίσιο. • Η AC σύνδεση στο δίκτυο προκαλεί ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. • Πολύπλοκο σύστημα ελέγχου.
Μετατροπείς Πολλαπλών Εισόδων (Multiple Input Converters)		<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ισχύ εξόδου από τους μετατροπείς μίας εισόδου. • Αποδεκτή ενεργειακή απόδοση υπό ΣΜΣ. • Μπορεί να αναβαθμιστεί. 	<ul style="list-style-type: none"> • Λόγο του μεγάλου αριθμού εισόδων, ο αριθμός των ημιαγωγίων στοιχείων και των πηνίων αυξάνεται έτσι αυξάνεται το μέγεθος και το κόστος του συστήματος.

Σχεδίαση Τεχνικής Ελέγχου για την Αναζήτηση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

4.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε εκτενής ανάλυση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις τεχνικές ελέγχου των φ/β συστοιχιών για συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας αλλά και για συνθήκες μερικής σκίασης. Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε αλγορίθμου καθώς και πιθανές εφαρμογές τους. Στο κεφάλαιο αυτό θα σχεδιαστεί ένας αλγόριθμος δύο σταδίων που θα αναζητά το ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου θα βασίζεται στην τεχνική ελέγχου της Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου, όπου μια γραμμική εξίσωση της τάσης συναρτήσει του ρεύματος θα μεταφέρει τη λειτουργία του συστήματος κοντά στη περιοχή του ΣΜΙ, και το δεύτερο στάδιο θα αποτελείται από τον αλγόριθμο Στοιχειώδης Αγωγιμότητα, όπου θα αναλαμβάνει την ακριβή εύρεση του ΣΜΙ.

4.2 Κριτήρια Κατασκευής

Τα κριτήρια κατασκευής ενός αλγόριθμου για την επίλυση του προβλήματος της μερικής σκίασης των φ/β συστοιχιών αποτελούν ουσιαστικά και το λόγο που οδήγησε στην κατασκευή του προτεινόμενου αλγόριθμου. Η συγκέντρωση των κριτηρίων έγινε έπειτα από μελέτη των βασικών προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι περισσότερες από τις υπάρχουσες τεχνικές ελέγχου και έρευνα των απαιτήσεων της αγοράς των φ/β. Τα νε λόγω κριτήρια έχουν ως εξής:

1. Ελαχιστοποίηση των ταλαντώσεων του συστήματος κατά την διάρκεια της αναζήτησης του ΣΜΙ. Οι περισσότερες τεχνικές ελέγχου που περιγράφηκαν παραπάνω σαρώνουν, αν όχι όλη, σίγουρα ένα μεγάλο μέρος της καμπύλης ισχύος για να μπορέσουν να αποφανθούν για το ΣΜΙ. Επίσης, υπάρχουν τεχνικές που χρειάζεται να αναγκάσουν το σύστημα να λειτουργήσει ακόμη και υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος ώστε να προσεγγίσουν το ΣΜΙ. Οι τεχνικές αυτές δημιουργούν δυναμικά προβλήματα στο φ/β σύστημα λόγω των ταλαντώσεων που προκαλούνται. Έτσι, αρκετά συχνά η φ/β συστοιχία μπορεί να οδηγηθεί εκτός δικτύου. Πολλές φορές, ακόμη και μια πολύ μικρή σκίαση μπορεί να οδηγήσει σε σάρωση ολόκληρης της καμπύλης και σε αποσύνδεση του συστήματος. Επίσης, η εμφάνιση ταλαντώσεων μειώνει την παραγόμενη ενέργεια κατά την μεταβατική φάση και το μέγεθος αυτό είναι σημαντικά μεγάλο για μεγάλα φ/β πάρκα. Βέβαια, η χρήση κυκλωματικών διατάξεων, γρήγορων ελεγκτών και πυκνωτών μπορεί να λύσει μερικώς το πρόβλημα, ιδιαίτερα για μικρού μεγέθους φ/β συστοιχίες, αλλά αυξάνει το κόστος του συστήματος. Τέλος, η ύπαρξη ταλαντώσεων είναι ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια που ο συγκεκριμένος αλγόριθμος πρέπει να περιορίσει.

2. Παραμετροποίηση του συστήματος για να μπορεί να προσαρμοστεί στις εκάστοτε απαιτήσεις της κάθε φ/β συστοιχίας. Από τη μελέτη των τεχνικών ελέγχου παρατηρήθηκε ότι οι περισσότερες τεχνικές προσπαθούν να κατασκευάσουν έναν αλγόριθμο που να βρίσκει το ΣΜΙ για όλες τις περιπτώσεις φ/β συστοιχιών υπό οποιοσδήποτε ΣΜΣ. Προφανώς, κάτι τέτοιο θα αποτελούσε τη βέλτιστη λύση, ωστόσο συνήθως μια τεχνική δε μπορεί να λειτουργήσει το ίδιο αποτελεσματικά για όλες τις περιπτώσεις των φ/β συστοιχιών. Στο πλαίσιο αυτό, πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες που είναι συγκεκριμένοι για κάθε σύστημα όπως, το μέγεθος του φ/β πάρκου, η συνδεσμολογία των φ/β πλαισίων, ο τρόπος σκίασης των πλαισίων κλπ. Για αυτό στον Προτεινόμενο αλγόριθμος θα επιχειρηθεί να περιλαμβάνει παραμέτρους που θα λαμβάνουν υπόψη τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του κάθε φ/β συστήματος.

3. Βελτιστοποίηση της αρχικής αναζήτησης για την εύρεση του ΣΜΙ ώστε να μειώνονται οι ταλαντώσεις. Η αρχικοποίηση του συστήματος είναι σημαντική για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, για την αποφυγή εγκλωβισμού σε τοπικό μέγιστο από την αρχή της λειτουργίας της φ/β συστοιχίας στην αρχή της ημέρας, ο οποίος θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ενέργειας μέχρι τη στιγμή εμφάνισης

ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας οπότε και η τεχνική ελέγχου θα οδηγούταν από μόνη της στο ΣΜΙ. Επίσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι σχεδόν όλες οι τεχνικές αντιλαμβάνονται τις ΣΜΣ από την πτώση ισχύος, ο εγκλωβισμός σε ένα τοπικό μέγιστο από την αρχή της ημέρας δε θα γινόταν ποτέ αντιληπτός από το σύστημα ελέγχου καθώς η ισχύς αυξάνεται συνεχώς κατά τις πρωινές ώρες. Η οποιαδήποτε μείωση της ισχύος που θα έθετε σε λειτουργία τον έλεγχο, θα ήταν από τυχαίο συμβάν. Έτσι η φ/β συστοιχία μπορεί να λειτουργούσε σε τοπικό μέγιστο για αρκετό χρόνο. Δεύτερον, κατά την αρχική αναζήτηση του ΣΜΙ προκαλούνται αρκετές ταλαντώσεις μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει. Οι ταλαντώσεις αυτές είναι επιθυμητό να μειώνονται για τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν. Εξαιτίας όλων των παραπάνω, ο Προτεινόμενος αλγόριθμος θα λειτουργεί επικουρικά στην αρχική αναζήτηση του ΣΜΙ.

4. Ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας κατά την αναζήτηση του ΣΜΙ. Η ικανοποίηση του κριτηρίου αυτού απαιτεί τη βελτιστοποίηση της σχέσεως μεταξύ της γρήγορης και ακριβής σύγκλισης στο ΣΜΙ. Προφανώς, η εξαγωγή της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ενέργειας κατά την διάρκεια της αναζήτησης του ΣΜΙ σχετίζεται άμεσα με τη μείωση των ταλαντώσεων και με τη βέλτιστη αρχική αναζήτηση. Η επιτυχής ικανοποίηση των δύο τελευταίων εγγυάται και τη μείωση των απωλειών ενέργειας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι απώλειες ενέργειας κατά την αναζήτηση δεν αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα, κυρίως αν αυτό είναι προς όφελος της επιτυχούς και ακριβούς εύρεσης του ΣΜΙ. Τέλος, το κριτήριο γίνεται σημαντικό, στην εφαρμογή του σε μεγάλα φ/β πάρκα όπου η συχνή εμφάνιση, έστω και μικρών σκιάσεων, έχει ως αποτέλεσμα τη σάρωση (έστω και μερικώς) της καμπύλης ισχύος από τις περισσότερες τεχνικές αναζήτησης του ΣΜΙ και τη σημαντική αύξηση των απωλειών ενέργειας.

5. Απλοποίηση της εφαρμογής και της υλοποίησης του. Το κριτήριο αυτό συνδέεται άμεσα με την πολυπλοκότητα τόσο του αλγορίθμου όσο και των ιδιαίτερων κυκλωματικών απαιτήσεων της τεχνικής ελέγχου. Τεχνικές οι οποίες είναι ιδιαίτερα περίπλοκες αποτυγχάνουν ευρείας χρήσης λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων τους και του υψηλού κόστους τους. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιχειρείται να είναι απλός στην υλοποίηση και τη λειτουργία του, έτσι ώστε να περιορίζεται το πιθανό εμπορικό του κόστος.

4.3 Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια προτάθηκε ένας αλγόριθμος δύο σταδίων, του οποίου το διάγραμμα ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Το πρώτο στάδιο είναι υπεύθυνο για να αντιληφθεί ότι το πάρκο βρίσκεται σε ΣΜΣ και στην συνέχεια να προσεγγίσει την περιοχή του ΣΜΙ. Στο δεύτερο στάδιο, μια συμβατική τεχνική εύρεσης του ΣΜΙ υπό ομοιόμορφες συνθήκες σκίασης θα συγκλίνει στο ΣΜΙ. Με αυτό τον τρόπο ο Προτεινόμενος αλγόριθμος θα συνδυάζει πλεονεκτήματα που προσφέρουν και οι δύο τύπου τεχνικές ελέγχου μέσω της αποκόμισης του μέγιστου δυνατού. Επιλέχθηκε

λοιπόν, το πρώτο στάδιο να στηρίζεται στην τεχνική έλεγχου της Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου [4][5], ενώ το δεύτερο στάδιο θα υλοποιείται από τον συμβατικό αλγόριθμο Στοιχειώδους Αγωγιμότητας [4][6][7].

4.3.1 Πρώτο στάδιο

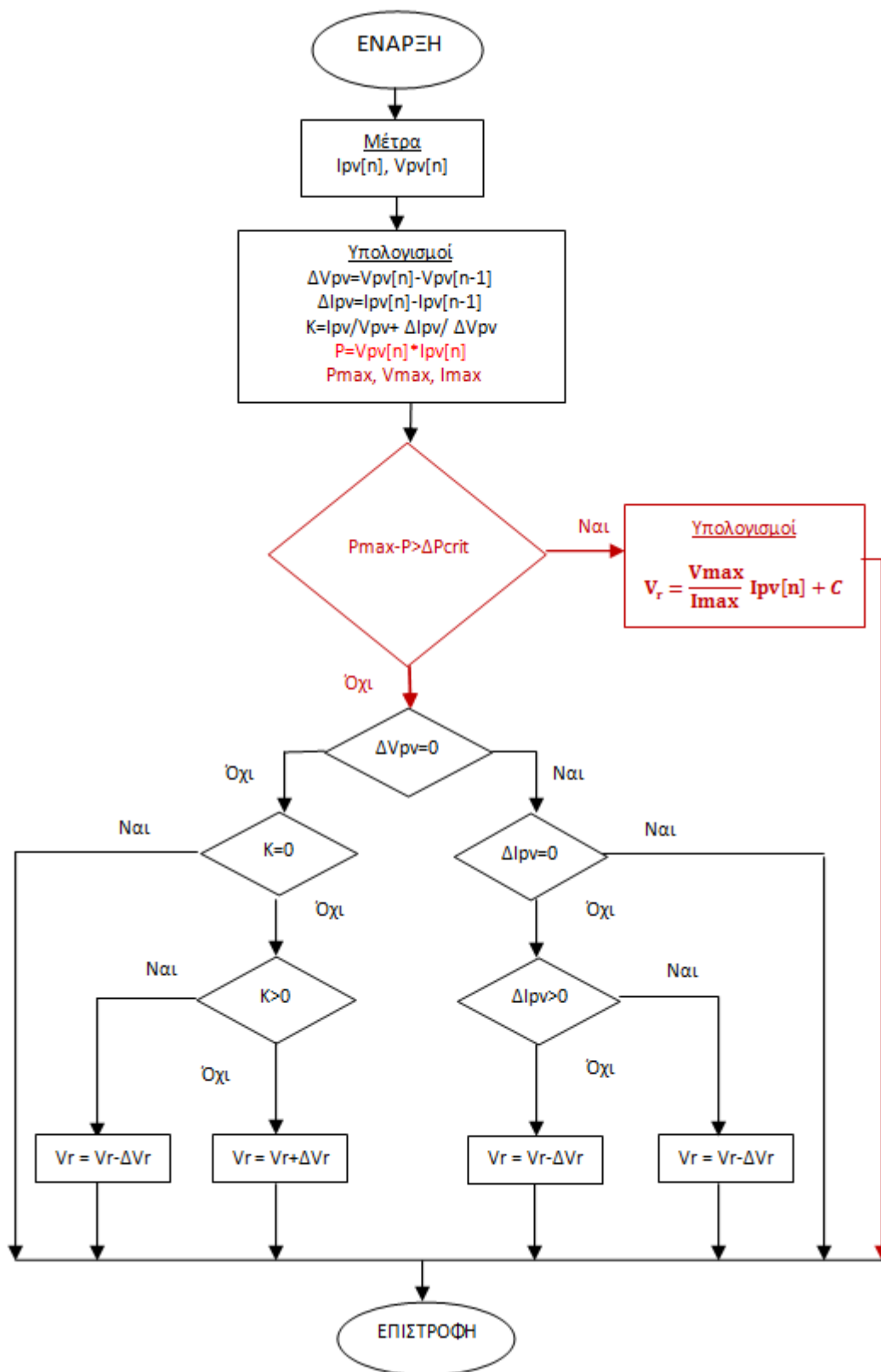
Όπως προαναφέρθηκε, ο ρόλος του πρώτου σταδίου είναι να αντιλαμβάνεται την ύπαρξη συνθηκών μερικής σκίασης και στη συνέχεια να ενεργοποιεί την προτεινόμενη τεχνική που θα φέρνει το σημείο λειτουργίας του φ/β συστήματος κοντά στην περιοχή του ΣΜΙ. Το πρώτο στάδιο παρίσταται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.1 με κόκκινο χρώμα. Ο αλγόριθμος στο στάδιο αυτό υπολογίζει και αποθηκεύει το μέγιστο σημείο λειτουργίας σε κάθε κύκλο λειτουργίας. Στη συνέχεια, ο εν λόγω αλγόριθμος εξετάζει αν η φ/β συστοιχία βρίσκεται υπό ΣΜΣ. Σε περίπτωση που βρίσκεται, ο έλεγχος παραμένει στο πρώτο στάδιο, διαφορετικά, ο έλεγχος περνάει ξανά στο δεύτερο στάδιο. Η ανίχνευση των ΣΚΣ γίνεται αντιληπτή από την απόκλιση της ισχύος λειτουργίας του συστήματος (P) από την τελευταία αποθηκευμένη μέγιστη ισχύ (P_{max}) κατά μια προκαθορισμένη τιμή (ΔP_{crit}) (βλ. Εξίσωση 4.1). Η μείωση ισχύος μπορεί να οφείλεται είτε στην επικράτηση συνθηκών μερικής σκίασης, είτε σε οποιαδήποτε περιβαλλοντική μεταβολή (θερμοκρασία, ακτινοβολία).

Σύμφωνα με το άρθρο [36] το ΔP_{crit} , καθορίζεται ανάλογα με το μέγεθος της φ/β συστοιχίας και την εμπειρική παρατήρηση ότι οι απότομες μεταβολές της ακτινοβολίας είναι μικρότερες του $\Delta G=270 \text{ W/m}^2$.

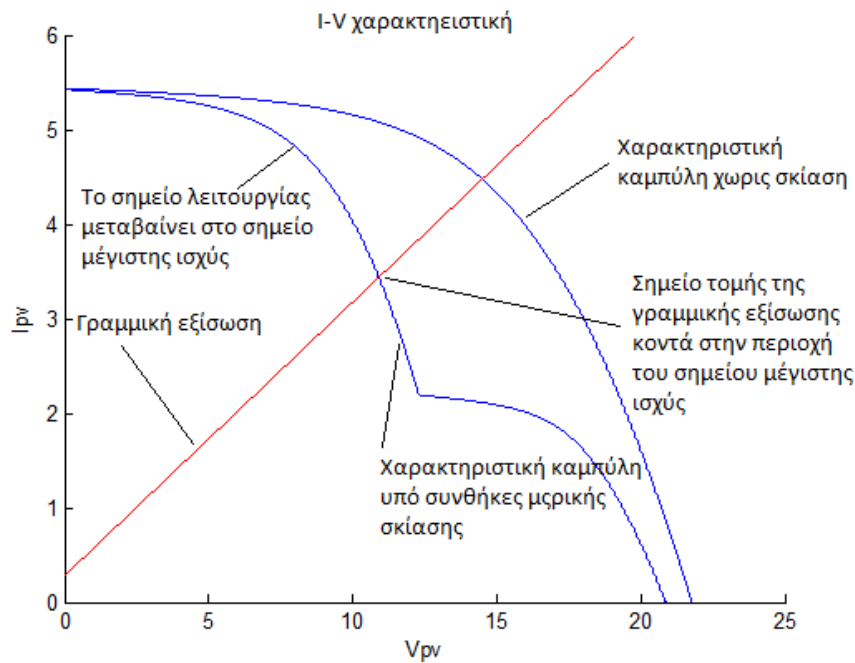
Αν ισχύει η Εξίσωση 4.1, τότε, όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος παραμένει στο πρώτο στάδιο, όπου η γραμμική συνάρτηση της Εξίσωσης 4.2 αναλαμβάνει να φέρει το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας κοντά στην περιοχή του ΣΜΙ. Η γραμμική συνάρτηση στηρίζεται στη λογική της τεχνικής έλεγχου Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου, η οποία περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Στην τεχνική αυτή μια γραμμική εξίσωση (βλ. Εξίσωση 3.4) χωρίς σταθερό μέρος υπολογίζει την τάση αναφοράς, η οποία φέρνει το σημείο λειτουργίας κοντά στο ΣΜΙ, ως συνάρτηση του ρεύματος λειτουργίας. Η κλίση της συνάρτησης είναι ο λόγος της μέγιστης τάσης λειτουργίας προς το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας υπό το συγκεκριμένο επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας, τα οποία υπολογίζονται ως ποσοστά της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκυκλώματος, αντίστοιχα. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος, συνήθως υπολογίζονται εν λειτουργία της φ/β συστοιχίας από κατάλληλα συστήματα.

$$\Delta P = P_{max} - P > \Delta P_{crit} \quad (4.1)$$

$$Vr = \frac{V_{max}}{I_{max}} Ipv + C \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Ροής Προτεινόμενου Αλγορίθμου.



Σχήμα 4.2: Τρόπος λειτουργία Προτεινόμενου αλγορίθμου.

Η γραμμική συνάρτηση υπολογίζει κάθε φορά τη πιθανή τάση (V_{Γ}) όπου βρίσκεται το ΣΜΙ ανάλογα με το παραγόμενο ρεύμα ($I_{\beta\nu}$) του Φ/Β πάρκου. Η κλίση της συνάρτησης είναι ο λόγος της μέγιστης τάσης λειτουργίας (V_{\max}) προς το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (I_{\max}) πριν την εμφάνιση των ΣΜΣ. Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει και αποθηκεύει τα δεδομένα αυτά για κάθε ΣΜΙ.

Επίσης, η γραμμική συνάρτηση αποτελείται από έναν σταθερό συντελεστή (C), του οποίου ο ρόλος του είναι κυρίως διορθωτικός για την σωστή τιμή της τάσης αναφοράς. Ο σταθερός συντελεστής εμπεριέχει εμπειρικές πληροφορίες ώστε το σημείο τομής της γραμμικής συνάρτησης με την I-V χαρακτηριστική να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο ΣΜΙ. Η τιμή της σταθεράς καθορίζεται κάθε φορά για την εκάστοτε φ/β συστοιχία και απαιτεί καλή γνώση της I-V χαρακτηριστικής σε όλες τις φάσεις σκίασης της συστοιχίας. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του C έχουν ως εξής:

- Ο τρόπος σκίαση της φ/β συστοιχίας.
- Η συνδεσμολογία της φ/β συστοιχίας
- Το μέγεθος της φ/β συστοιχίας
- Το παράθυρο τάσης (V -Window) του μετατροπέα

Οι δύο πρώτοι παράγοντες επηρεάζουν την πιθανότητα το ΣΜΙ να βρίσκεται στα αριστερά, δεξιά ή στο κέντρο της I-V χαρακτηριστικής. Έχοντας αυτή την πληροφορία επιλέγεται κατάλληλη τιμή της σταθεράς ώστε να πλησιάζει περισσότερο το ΣΜΙ. Μια πολύ σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι ο σταθερός συντελεστής επηρεάζεται σημαντικά και από τη συσχέτιση της σκίασης με τη συνδεσμολογία. Για παράδειγμα, η τιμή του συντελεστή αλλάζει σε περίπτωση που σκιάζονται φ/β πλαίσια τα οποία είναι

συνδεδεμένα σε σειρά σε σχέση με σκιασμένα φ/β πλαίσια που είναι σε παράλληλες σειρές. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις οι καμπύλες ισχύος είναι διαφορετικές. Επίσης, η συνδεσμολογία επηρεάζει και το επίπεδο της σταθεράς, καθώς πολλά φ/β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, αυξάνουν το επίπεδο της τάσης λειτουργίας σε σχέση με φ/β συνδεδεμένα παράλληλα. Ακόμη, το μέγεθος της φ/β συστοιχίας επηρεάζει το μέγεθος του σταθερού όρου. Συνήθως μεγάλες φ/β εγκαταστάσεις έχουν μεγαλύτερες τάσεις λειτουργίας άρα και η σταθερά θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με μικρές φ/β συστοιχίες. Το παράθυρο τάσης του μετατροπέα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη ώστε η τιμή της σταθεράς να είναι τέτοια που να μην οδηγεί την τάση αναφοράς έξω από τα όρια λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος. Τέλος, συνήθως η τιμή του σταθερού όρου είναι μικρή σε σχέση με την τάση λειτουργίας του φ/β συστήματος και χρησιμεύει για μικρές διορθώσεις που μερικές φορές μπορεί να είναι καθοριστικής σημασίας.

Στην περίπτωση που η Εξίσωση 4.2 δεν ισχύει τότε ο έλεγχος περνάει στο δεύτερο στάδιο το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

4.3.2 Δεύτερο Στάδιο

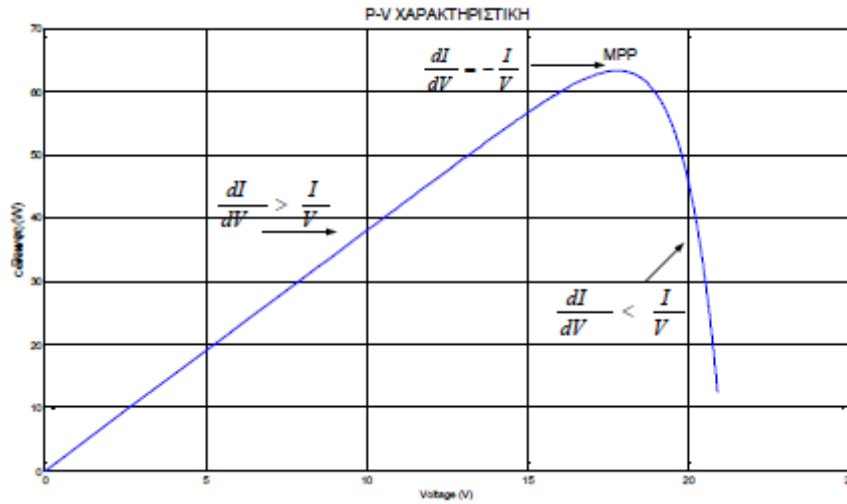
Στο στάδιο αυτό ένας συμβατικός αλγόριθμος (P&O, IncCond, Hill climbing) αναλαμβάνει να φέρει το σύστημα στο ακριβές ΣΜΙ. Για τον προτεινόμενο αλγόριθμο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητας (ΣΑ) γιατί σύμφωνα με τον συγκριτικό Πίνακα 2.3 του δεύτερου κεφαλαίου είναι ταχύτερος των υπολοίπων και παρουσιάζει λιγότερες ταλαντώσεις αφού τερματίζει όταν ανιχνεύσει το ΣΜΙ, βελτιστοποιώντας έτσι δύο από τα βασικά κριτήρια.

Ο αλγόριθμος ΣΑ βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης ισχύος του Φ/Β πάρκου στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι μηδενική, θετική στα αριστερά του και αρνητική στα δεξιά του (βλ. Εξίσωση 4.3). Η τεχνική ελέγχου ΣΑ ξεκινά μετρώντας την τρέχουσα τιμή του ρεύματος και της τάσης της φ/β συστοιχίας. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι στοιχειώδεις μεταβολές dI και dV (χρησιμοποιώντας τις αμέσως προηγούμενες τιμές ρεύματος και τάσης της φ/β συστοιχίας) προκειμένου να γίνουν οι έλεγχοι της Εξίσωσης 4.4. Σύμφωνα με αυτούς του ελέγχους θα ληφθεί η απόφαση για το πρόσημο και το πλάτος του βήματος μεταβολής της τάσης της φ/β συστοιχίας. Σχηματικά τα παραπάνω παρίστανται στο Σχήμα 4.3.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} = 0, \text{ στο } \Sigma MI \\ \frac{dP}{dV} > 0, \text{ αριστερά του } \Sigma MI \\ \frac{dP}{dV} < 0, \text{ δεξιά του } \Sigma MI \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

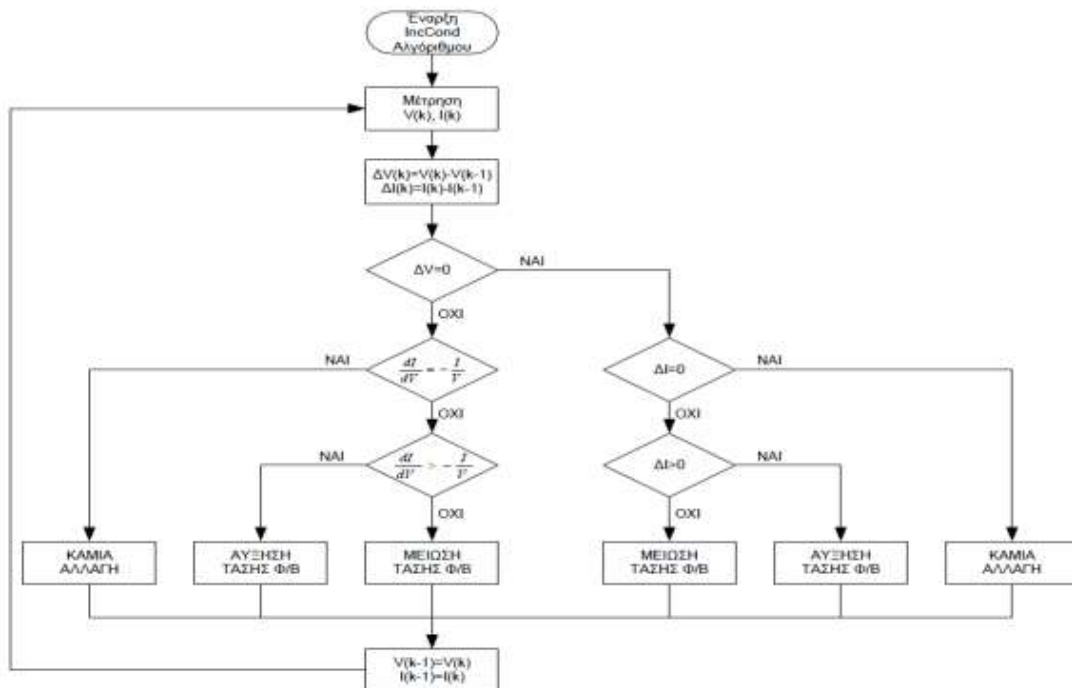
Επειδή $\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$ η Εξίσωση 4.3 ξαναγράφεται ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ στο } \Sigma MI \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ αριστερά του } \Sigma MI \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ δεξιά του } \Sigma MI \end{array} \right. \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.3: Τρόπος λειτουργίας αλγορίθμου Στοιχειώδους Αγωγιμότητας

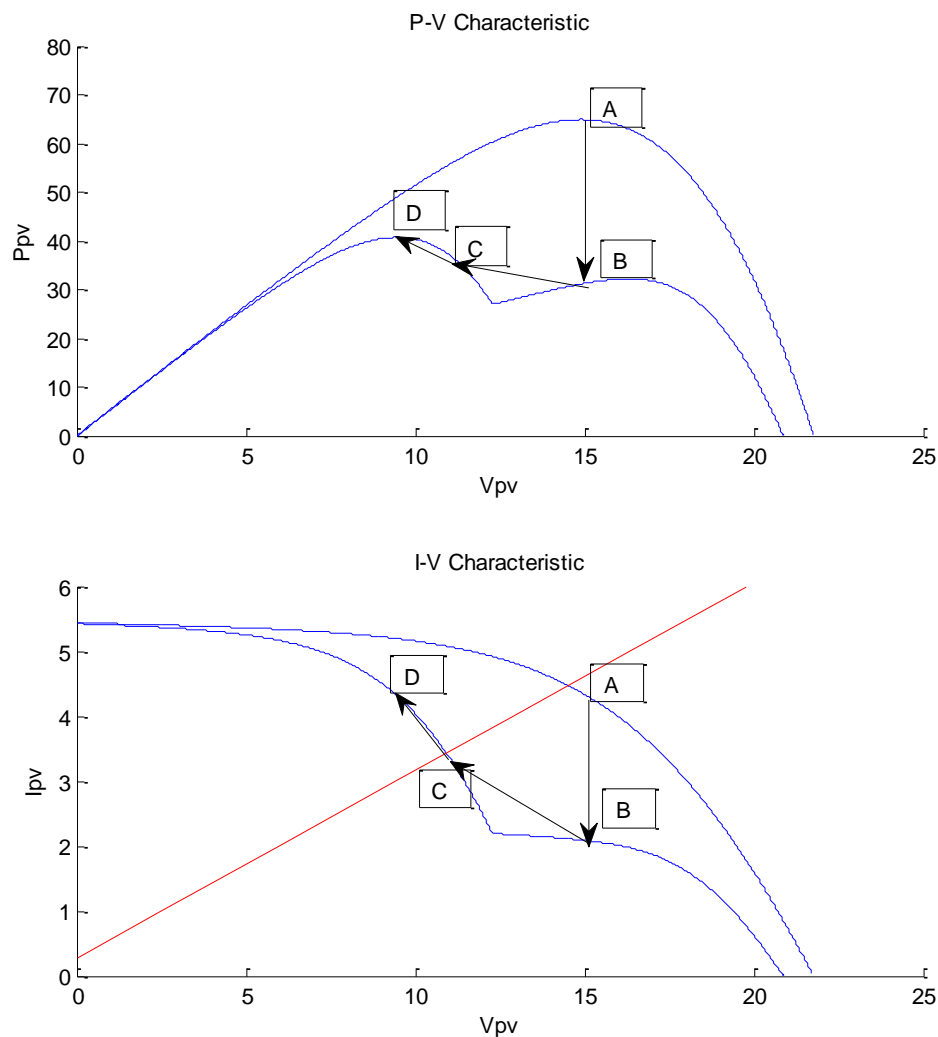
Ως αποτέλεσμα, το ΣΜΙ μπορεί να προσεγγιστεί συγκρίνοντας τη στιγμιαία αγωγιμότητα με την αυξητική αγωγιμότητα. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ΣΑ.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Στοιχειώδους Αγωγιμότητας

4.4 Παράδειγμα Λειτουργίας Προτεινόμενου Αλγορίθμου

Στο παρακάτω Σχήμα 4.3, περιγράφεται η λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου όταν μια φ/β συστοιχία σκιαστεί μερικώς. Αρχικά υποθέτουμε ότι το σύστημα λειτουργεί στο μοναδικό μέγιστο σημείο λειτουργίας το A. Όταν ξαφνικά εμφανιστεί η σκίαση, τότε η λειτουργία του συστήματος μεταβαίνει στο τοπικό μέγιστο B, ενώ το πραγματικό μέγιστο σημείο λειτουργίας είναι στο D. Η μετάβαση στο σημείο B γίνεται επειδή το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί με την ίδια τάση αλλά με χαμηλότερο ρεύμα. Η πτώση ισχύος από το A στο B γίνεται αντιληπτή από την Εξίσωση 4.1 του πρώτου σταδίου και με την παρέμβαση της γραμμικής συνάρτησης (Εξίσωση 4.2), η λειτουργία του συστήματος μεταβαίνει στο σημείο C, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του ΣΜΙ. Εν συνεχεία, ο έλεγχος περνάει ξανά στο δεύτερο στάδιο όπου ο αλγόριθμος ΣΑ αναλαμβάνει να προσεγγίσει ακριβώς το ΣΜΙ.



μα 4.5: Παράδειγμα Λειτουργίας Προτεινόμενου Αλγορίθμου

Σχή

4.5 Διαφοροποίηση του Προτεινόμενου αλγόριθμου

Τα βασικά σημεία διαφοροποίησης του Προτεινόμενου αλγόριθμου από τους αλγόριθμους αυτής της κατηγορίας είναι δύο:

Πρώτον, η κλίση της γραμμικής εξίσωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου αποτελεί το λόγο της μέγιστης τάσης προς το μέγιστο ρεύμα πριν την εμφάνιση της σκίασης. Συνήθως, η κλίση υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.5, όπου ο προσδιορισμός της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος υπολογίζεται εν λειτουργία (online) της φ/β συστοιχίας με κατάλληλο κύκλωμα [4] [5]. Στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται διακοπή της σύνδεσης της συστοιχίας με το υπόλοιπο σύστημα για τη μέτρηση του V_{av} , $I_{βρ}$. Σε ορισμένες όμως τεχνικές υπάρχει παράλληλο κύκλωμα πυκνωτών ώστε να αποφεύγεται η διακοπή της σύνδεσης [4].

$$V_{vr} = \frac{V_{\Sigma MI}}{I_{\Sigma MI}} I_{pv} = \frac{0.8 \cdot V_{av}}{0.9 \cdot I_{βρ}} I_{pv} \quad \text{Εξίσωση 4.5}$$

Επίσης, αρκετοί αλγόριθμοι υπολογίζουν την κλίση της ευθείας ως το λόγο της τάσης λειτουργίας προς το ρεύμα λειτουργίας ($V_{εξ}/I_{εξ}$) πριν από την εμφάνιση της σκίασης ή το λόγο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος προς το ρεύμα βραχυκυκλώματος ($V_{av}/I_{βρ}$) τη στιγμή της εμφάνισης της σκίασης [5]. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, η κλίση της γραμμικής εξίσωσης υπολογίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης προς το μέγιστο (V_{max}/I_{max}) ρεύμα πριν την εμφάνιση της σκίασης, που ουσιαστικά είναι η τάση και το ρεύμα του προηγούμενου ΣΜΙ. Το σημαντικό πλεονέκτημα της παραπάνω τροποποίησης είναι η αποφυγή του επιπλέον κυκλώματος για τον υπολογισμό της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκυκλώσεως που κάνει τη λειτουργία πιο περίπλοκη, εισάγει περισσότερες ταλαντώσεις και αυξάνει το οικονομικό κόστος και τις πιθανότητες εμφάνισης βλαβών.

Δεύτερον, οι αλγόριθμοι της κατηγορίας των Γραμμικών Εξισώσεων Φορτίου που μελετήθηκαν δεν έχουν τον σταθερό όρο C. Όπως προαναφέρθηκε, η σταθερά αυτή εμπεριέχει εμπειρικές πληροφορίες που μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην εύρεση του ΣΜΙ.

4.6 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό προτάθηκε ένας αλγόριθμος για την εύρεση του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Ο Προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελείται από δύο στάδια ελέγχου. Στο πρώτο στάδιο μια γραμμική εξίσωση της τάσης αναφοράς με το ρεύμα λειτουργίας, η οποία έχει κλίση το λόγο της μέγιστης τάσης προς το μέγιστο ρεύμα πριν την εμφάνιση των ΣΜΣ, είναι υπεύθυνη για την μεταφορά της λειτουργίας του συστήματος στη περιοχή του ΣΜΙ. Στο δεύτερο στάδιο ο αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητα αναλαμβάνει την ακριβή προσέγγιση του ΣΜΙ. Στο επόμενο κεφάλαιο θα κατασκευαστεί μοντέλο για την μελέτη της αποτελεσματικότητας του.

Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Συστήματος

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η προτεινόμενη τεχνική ελέγχου για την εύρεση του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μοντελοποίηση με τη χρήση του λογισμικού Simulink[®]/Matlab[®] του φ/β κυττάρου, των φ/β πλαισίων και του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Ακόμη, θα περιγραφεί το πραγματικό φ/β σύστημα που θα εξετασθεί και οι συνθήκες μερικής σκίασης του. Επίσης, θα γίνει μια σύντομη αξιολόγηση των αλγορίθμων Διαταραχής και Παρατήρησης και Στοιχειώδης Αγωγιμότητα και αναλυτικότερα θα περιγραφεί ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημαίας, οι οποίοι θα μοντελοποιηθούν για να συγκριθούν με τον Προτεινόμενο αλγόριθμο. Τέλος, θα καταγραφούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του φ/β συστήματος.

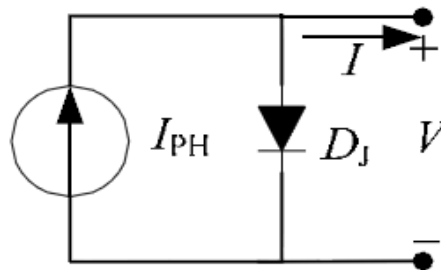
5.2 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας

Μια φ/β γεννήτρια είναι ένα σύνολο από φ/β κύτταρα, συνδέσεις, προστασίες κλπ. Σύμφωνα με τις εξισώσεις του άρθρου [36] θα μοντελοποιηθεί ένα φ/β κύτταρο και στη συνέχεια ένα φ/β πλαίσιο. Από εκεί και πέρα η μοντελοποίηση μιας φ/β συστοιχίας είναι θέμα επιλογής του συνδυασμού σύνδεσης των φ/β πλαισίων.

5.2.1 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Κυττάρου

Τα φ/β κύτταρα αποτελούν ουσιαστικά ημιαγωγικές διόδους. Λόγω του φ/β φαινομένου η ενέργεια που μεταφέρει το φως (ενέργεια των φωτονίων) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το ισοδύναμο κύκλωμα για το απλουστευμένο φ/β κύτταρο αποτελείται από μια δίοδο και μια πηγή ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα, όπως φανερώνει το Σχήμα 5.1. Η πηγή ρεύματος είναι ανάλογη της ηλιακής ακτινοβολίας και η δίοδος είναι μια pn επαφή. Του φ/β κυττάρου. Η συνάρτηση του ιδανικού φ/β κυττάρου, που αναπαριστά το ιδανικό μοντέλο του κυττάρου είναι:



Σχήμα 5.1: Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα φ/β κυττάρου.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{AV_t}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

Όπου:

I_{ph} : φωτόρρευμα (A),

I_0 : ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (A),

V : τάση διόδου (V),

A : ιδεατός παράγοντας διόδου,

V_t : θερμοκή τάση, $V_t = 27.5$ mV στους 25 °C.

Επίσης, η θερμοκή τάση μπορεί να υπολογιστεί και από τη Εξίσωση 5.2:

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (5.2)$$

Όπου:

k : σταθερά του Boltzmann, 1.38×10^{-23} J/K,

T : θερμοκρασία φ/β κυττάρου (K),

q : φορτίο ηλεκτρονίου, 1.6×10^{-19} C.

Ακόμη η θερμοκρασία του φ/β κυττάρου (T) δίνεται από τη Εξίσωση 5.3:

$$T = 3.12 + 0.25 G/G_{ref} + 0.899T_a - 1.3W_s + 273 \quad (5.3)$$

Όπου:

G : ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2),

G_{ref} : τιμή αναφοράς της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, $1000 W/m^2$,

T_a : θερμοκρασία περιβάλλοντος $^{\circ}C$,

W_s : τοπική ταχύτητα ανέμου (m/s)

Το φωτόρρευμα (I_{ph}) στη Εξίσωση 5.1 εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του φ/β κυττάρου, και περιγράφεται από τη Εξίσωση 5.4:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc,ref} + \mu_{I_{sc}}(T - T_{ref})] \quad (5.4)$$

Όπου:

$I_{sc,ref}$: ρεύμα βραχυκυκλώματος για συνθήκες αναφοράς ($G_{ref} = 1000 W/m^2$, $T_{ref} = 25^{\circ}C$, Air-Mass=1.5),

$\mu_{I_{sc}}$: συντελεστής θερμοκρασίας για το βραχυκυκλωμένο φ/β κύτταρο,

T_{ref} : θερμοκρασία αναφοράς, $25^{\circ}C$.

Από τη Εξίσωση 5.1 το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (I_0) περιγράφεται από τις παρακάτω Εξισώσεις 5.5 και 5.6:

$$I_0 = I_{o,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{A}} \exp \left[\frac{q E_g (1/T_{ref} - 1/T)}{kA} \right] \quad (5.5)$$

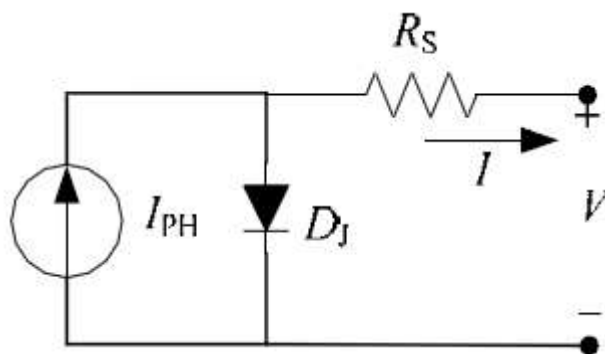
$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{[\exp(V_{oc,ref}/AV_t) - 1]} \quad (5.6)$$

Όπου:

$V_{oc,ref}$: τάση ανοιχτού κυκλώματος σε συνθήκες αναφοράς,

E_g : ενεργειακό διάκενο στο φ/β κύτταρο, (1.12-1.5 eV).

Στη μη ιδανική περίπτωση στην οποία έχουμε μια αντίσταση σειράς (R_s), το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ένα μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Σε αυτή την περίπτωση η I-V χαρακτηριστική εξίσωση του φ/β κυττάρου δίνεται από τη Εξίσωση 5.7:



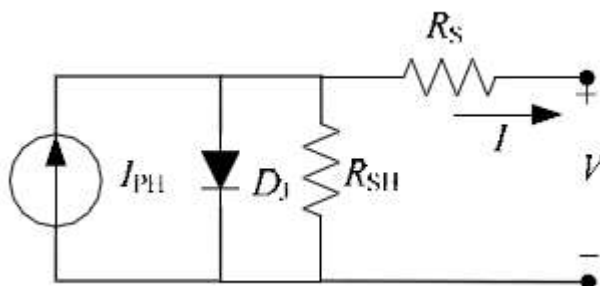
Σχήμα 5.2: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β κυττάρου με αντίσταση σειράς.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{AV_t}\right) - 1 \right] \quad (5.7)$$

Μια μετατροπή του ισοδύναμου κυκλώματος τεσσάρων παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσθήκη μιας αντίστασης διακλάδωσης (R_{sh}) παράλληλα με τη δίοδο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μοντέλου πέντε παραμέτρων, όπως υποδηλώνει το Σχήμα 5.3 [36]. Η I-V χαρακτηριστική εξίσωση του φ/β κυττάρου δίνεται από τη Εξίσωση 5.8:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{AV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (5.8)$$

Η τάση ενός μόνο φ/β κυττάρου είναι πάρα πολύ μικρή για να λειτουργήσει αυτό μόνο του, για αυτό συνήθως τα συναντάμε σε ομάδες συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, μαζί με προστασίες, δημιουργώντας έτσι ένα φ/β πλαίσιο.



Σχήμα 5.3: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β κυττάρου με αντίσταση σειράς και αντίσταση διακλάδωσης.

5.2.2 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

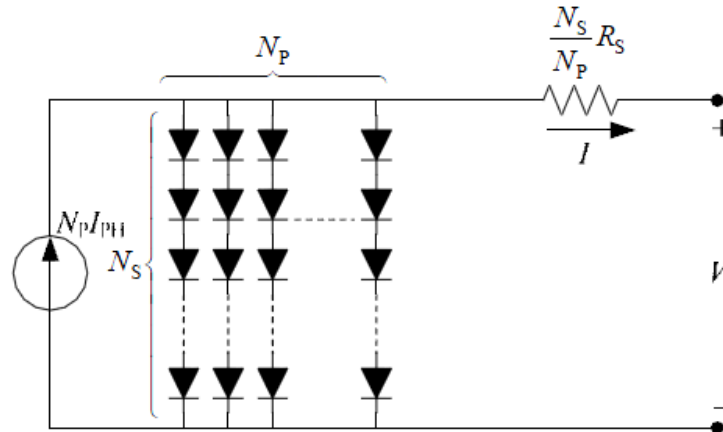
Η I-V χαρακτηριστική εξίσωση του ισοδύναμου φ/β πλαισίου με N_p παράλληλες και N_s σε σειρά συνδεδεμένα φ/β κύτταρα, δίνεται από τη Εξίσωση 5.9 [36]. Το ισοδύναμο κύκλωμα του πλαισίου αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.4.

$$I^M = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{V^M / N_s + I^M R_s / N_p}{A V_t} \right) - 1 \right] - \frac{(N_p / N_s) V^M + I^M R_s}{R_{sh}} \quad (5.9)$$

Όπου:

N_p : αριθμός φ/β κυττάρων συνδεδεμένων παράλληλα,

N_s : αριθμός φ/β κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά.



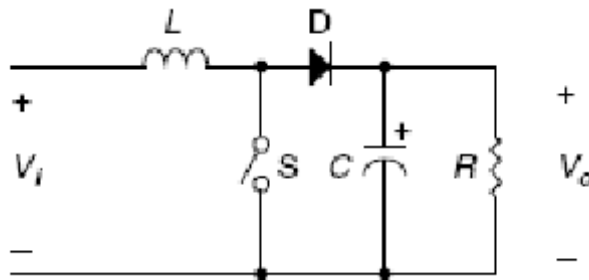
Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β πλαισίου με αντιστάσεις σειράς και διακλάδωσης.

5.3 Μοντελοποίηση DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης

Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost ή step up converter) ρυθμίζει τη μέση τιμή της τάσης εξόδου σε ένα επίπεδο υψηλότερο από αυτό της τάσης εισόδου [37]. Η DC πηγή εισόδου βρίσκεται πάντα συνδεδεμένη σε σειρά με ένα πηνίο, κατά κανόνα μεγάλης τιμής αυτεπαγωγής. Το πηνίο αυτό παίζει το ρόλο πηγής ρεύματος, η οποία θα ενεργοποιείται περιοδικά μέσω του διακόπτη S. Η περιοδική απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας του μαγνητικού πεδίου του πηνίου, σε συνδυασμό με την εφαρμογή της τάσης εισόδου, συμβάλουν στην ανύψωση της DC τιμή της τάσης εξόδου.

Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται το κύκλωμα του ιδανικού μετατροπέα ανύψωσης. Κατά το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα της πηγής V_i θα ρέει προς το πηνίο φορτίζοντάς το. Η δίοδος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας θα είναι αρνητικά πολωμένη, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ροή ρεύματος προς το φορτίο. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, θα υπάρξει ροή ρεύματος προς το φορτίο από την πηγή V_i , η οποία θα είναι ενισχυμένη και από το ρεύμα του πηνίου που δημιουργήθηκε από την ενέργεια που συσσωρεύσε όταν ο διακόπτης ήταν κλειστός. Έτσι, για όσο χρόνο ο διακόπτης είναι ανοικτός, η τάση στο φορτίο θα είναι μεγαλύτερη της τάσης εισόδου λόγω της πρόσθετης ενέργειας που προσφέρει το πηνίο. Το φορτίο αποτελείται από μια αντίσταση και έναν πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα. Η τάση του πυκνωτή θα είναι μεγαλύτερη από αυτή της εισόδου. Ο ρόλος του είναι η παροχή μιας

σταθεροποιημένης τάσης εξόδου, η οποία να έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτήν της τάσης εισόδου. Τέλος, ο μετατροπέας ανύψωσης μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας συνεχούς ή ασυνεχούς αγωγής ρεύματος.



Σχήμα 5.5: Κύκλωμα ιδανικού DC-DC μετατροπέα ανύψωσης.

Λειτουργία Συνεχούς Αγωγής Ρεύματος

Σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας συνεχούς αγωγής, το ρεύμα που διέρχεται από το πηνίο είναι πάντα συνεχές και μεγαλύτερο του μηδενός [37]. Στη μόνιμη κατάσταση, αυτός ο τρόπος λειτουργίας αποτελείται από δύο μέρη: το πρώτο, όπου ο διακόπτης είναι κλειστός και το ρεύμα από την πηγή φορτίζει το πηνίο (βλ. Σχήμα 5.6 (α)) και το δεύτερο, κατά το οποίο ο διακόπτης ανοίγει εκφορτίζοντας την ενέργεια του πηνίου στο φορτίο ταυτόχρονα με την εφαρμογή της τάσης εισόδου (βλ. Σχήμα 5.6(β)). Αυτό συμβάλει στην εμφάνιση τάσης στα άκρα του πυκνωτή C μεγαλύτερης τιμής από αυτής της εισόδου. Η τάση εξόδου παραμένει σταθερή αν η σταθερά χρόνου RC είναι πολύ μεγαλύτερη από το χρόνο που ο διακόπτης είναι κλειστός. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η μορφή που θα έχουν το ρεύμα και η τάση στο πηνίο και ο τρόπος λειτουργίας συνεχούς ρεύματος.

Εφόσον στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου πρέπει να ισούται με μηδέν, προκύπτει η παρακάτω Εξίσωση 5.10:

$$V_i t_{on} + (V_i - V_o) t_{off} = 0 \quad (5.10)$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη με το T_s και αναδιατάσσοντας τους όρους της Εξίσωσης 5.10 προκύπτει η Εξίσωση 5.11:

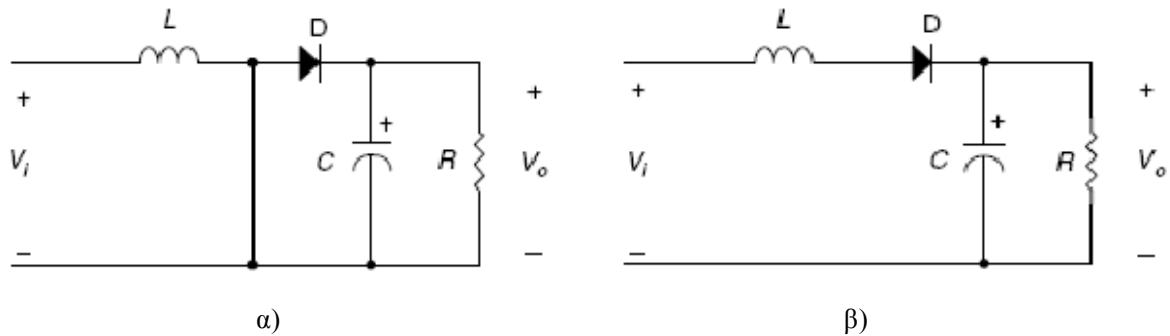
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (5.11)$$

Η DC συνάρτηση μεταφοράς θα προκύψει από την παραδοχή ότι στη μόνιμη κατάσταση η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο στο τέλος της περιόδου T_s θα ισούται με την ενέργεια στην του επόμενου κύκλου T_s , χωρίς απώλειες, όπως δείχνει η Εξίσωση 5.12:

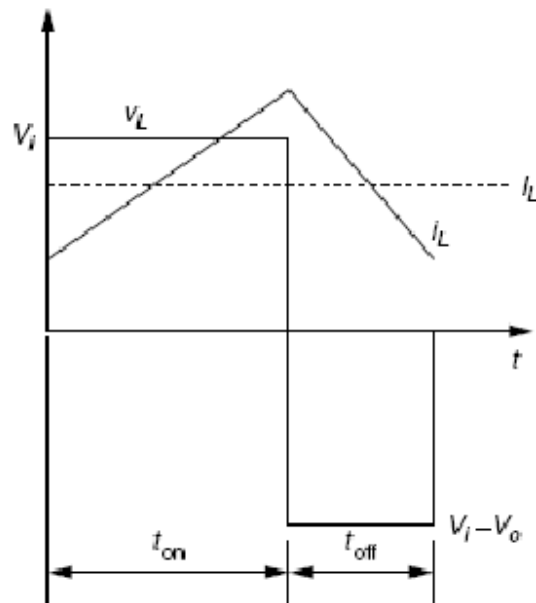
$$P_i = P_o \quad (5.12)$$

Από τις Εξισώσεις 5.11 και 5.12 προκύπτει η Εξίσωση 5.13:

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{1-D} \quad (5.13)$$



Σχήμα 5.6: Το κύκλωμα του ιδανικού DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης όταν α) ο διακόπτης είναι κλειστός και β) όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός.

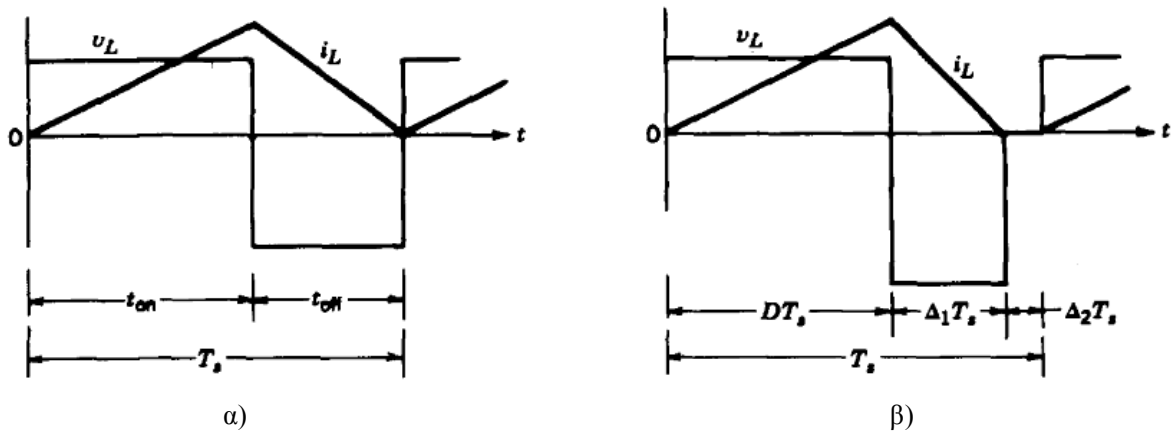


Σχήμα 5.7: Η μορφή του ρεύματος και της τάσης του πηνίου για DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος.

Λειτουργία Ασυνεχούς Αγωγής Ρεύματος

Στο τρόπο λειτουργίας ασυνεχούς ρεύματος, το ρεύμα στο πηνίο κατά τη διάρκεια μιας περιόδου T_s μπορεί να πάρει και μηδενική τιμή [37], όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8 (α). Το οριακό σημείο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς ρεύματος προκύπτει από την

παραδοχή ότι η μέση τιμή του ρεύματος πηνίου I_{LB} σε μια περίοδο T_s είναι το μισό της τιμής κορυφής του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8(β).



Σχήμα 5.8: Η μορφή του ρεύματος και της τάσης του πηνίου για DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης σε λειτουργία α) στο όριο συνεχούς- ασυνεχούς αγωγής και β) ασυνεχούς αγωγής ρεύματος.

Σύμφωνα με την παραδοχή αυτή, το ρεύμα στο σημείο αυτό δίνεται από τη Εξίσωση 5.14 :

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L(\text{peak})} = \frac{V_o T_s}{2L} D(1 - D) \quad (5.14)$$

Το ρεύμα εξόδου στο σημείο αυτό υπολογίζεται από τις Εξισώσεις 5.13 και 5.14:

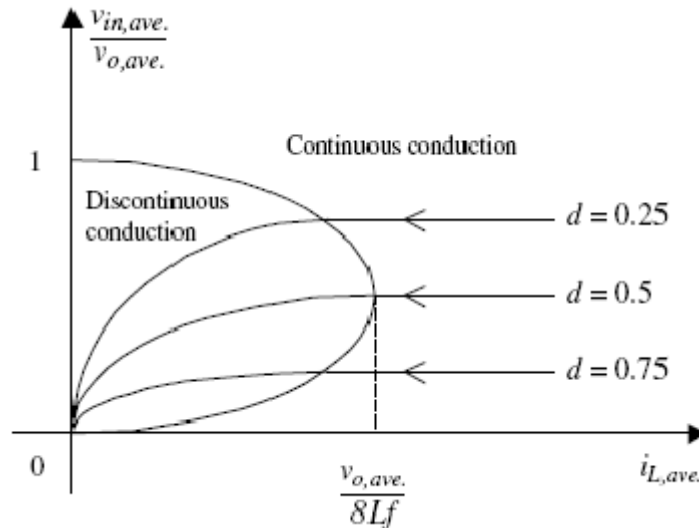
$$I_{oB} = \frac{V_o T_s}{2L} D(1 - D)^2 \quad (5.15)$$

Για το μετατροπέα ανύψωσης σε λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος, η τάση εξόδου V_o , διατηρείται συνήθως σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι το duty ratio θα μεταβάλλεται προκειμένου ο μετατροπέας να ακολουθήσει τις όποιες αλλαγές στην τιμή της τάσης εισόδου. Το duty ratio ορίζεται ως συνάρτηση του ρεύματος εξόδου και του λόγου τάσεων εισόδου-εξόδου, σύμφωνα με τη Εξίσωση 5.16:

$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_i} \left(\frac{V_o}{V_i} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB(\text{max})}} \right]^{1/2} \quad (5.16)$$

Όπου $I_{oB(\text{max})}$ το ρεύμα εξόδου όταν $D=0.5$.

Στο Σχήμα 5.9 εικονίζεται το διάγραμμα της κανονικοποιημένης τάσης V_{in}/V_o και του ρεύματος i_L , όπου η μη γραμμικότητα φαίνεται στην οριοθετημένη περιοχή της ασυνεχούς αγωγής.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα της κανονικοποιημένης V_{in}/V_o και του ρεύματος i_L .

5.4 Μοντελοποίηση Πραγματικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος

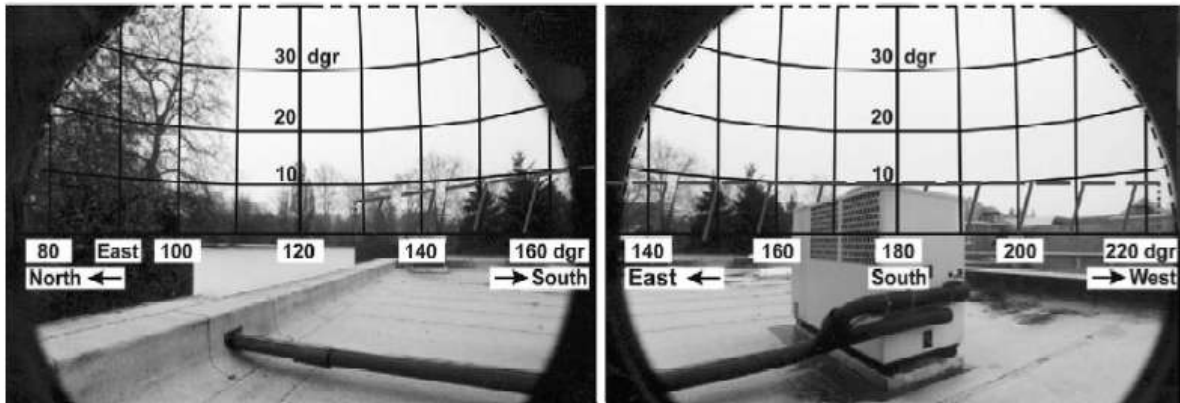
Η φ/β συστοιχία προς εξέταση είναι εγκατεστημένη στην οροφή του κτηρίου του Καθολικού Πανεπιστημίου του Λέουβεν στο Βέλγιο [38]. Η οροφή του κτιρίου είναι σε ύψος 30 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας με 4.7° και 50.9° γεωγραφικό πλάτος και μήκος, αντίστοιχα. Η συστοιχία έχει ισχύ αιχμής ίση με 5.16kW και αποτελείται από τρεις σειρές φ/β πλαισίων. Δύο από τις τρεις σειρές αποτελούνται από 14 φ/β πλαίσια και η τρίτη από 15φ/β. Τα χαρακτηριστικά των πλαισίων και της συστοιχίας παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1

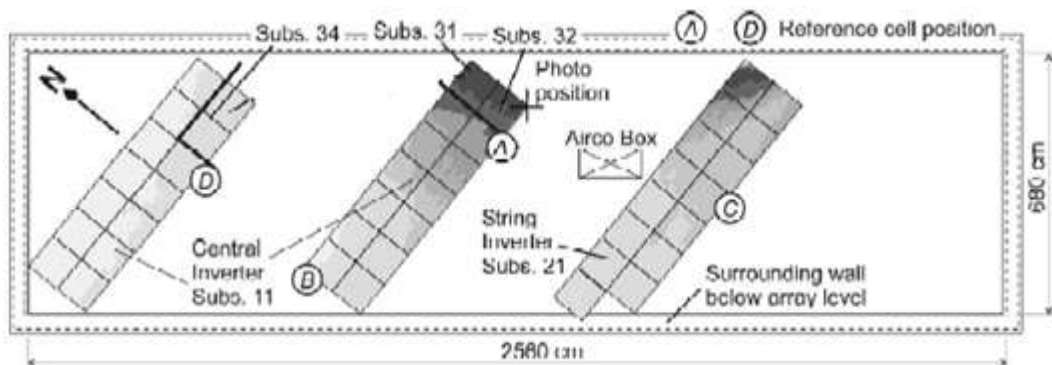
Ονομαστική Ισχύ	120 Wp	5.16 kWp
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύς	4.05 A	12.15 A
Τάση Μέγιστης Ισχύς	29.6 V	424.7 V
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	4.26 A	12.78 V
Τάση Ανοιχτοκύκλωσης	33 V	462 V
Αριθμός Φ/Β Κυττάρων	54 (3 δίοδοι ανά 18 κύτταρα)	

Η συστοιχία των φ/β πλαισίων σκιάζεται από το σύστημα εξαερισμού που βρίσκεται στην ταράτσα του κτιρίου, από τα γειτονικά κτίρια και από τα τριγύρω δέντρα [38]. Κάτω από αυτές τις μη βέλτιστες αλλά πολύ συνηθισμένες συνθήκες μερικής σκίασης η απόδοση της φ/β συστοιχίας μειώνεται και κυρίως κατά τους

χειμερινούς μήνες [38]. Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται μια φωτογραφία της οροφής του κτιρίου μέσα από fish-eye φακό που επιτρέπει την αναγνώριση των αντικειμένων που δημιουργούν σκίαση στο φ/β πλαίσιο. Η φωτογραφία είναι τραβηγμένη από τη θέση που θα τοποθετηθεί ένα από τα φ/β πλαίσια σε ύψος 45 εκατοστών πάνω από την κάτω άκρη του πλαισίου. Επάνω στη φωτογραφία έχουν τοποθετηθεί οι συντεταγμένες του ορατού ουράνιου θόλου, αριστερά: βόρειο-ανατολική κατεύθυνση και δεξιά βόρεια κατεύθυνση. Τέλος, το Σχήμα 5.11 απεικονίζει τον τρόπο εγκατάστασης της φ/β συστοιχίας στην οροφή του κτιρίου, τα σημεία σκίασης της κάθε φ/β σειράς καθώς και το σημείο όπου τραβήχτηκε η φωτογραφία του Σχήματος 5.10.



Σχήμα 5.10: Φωτογραφία της οροφής του κτηρίου, όπου θα εγκατασταθεί η φ/β συστοιχία, μέσα από fish-eye φακό. Τραβηγμένη 45 εκατοστά πάνω από την κάτω άκρη της φ/β συστοιχίας. Επάνω στη φωτογραφία έχουν τοποθετηθεί οι συντεταγμένες του ορατού ουράνιου θόλου, αριστερά: βόρειο-ανατολική κατεύθυνση και δεξιά βόρεια κατεύθυνση.



Σχήμα 5.11: Εγκατάσταση της φ/β συστοιχίας στην οροφή του κτηρίου με τα σημεία σκίασης της κάθε φ/β σειράς.

5.5 Προσομοίωση του Πραγματικού Τρόπου Σκίασης του Φωτοβολταϊκού Συστήματος

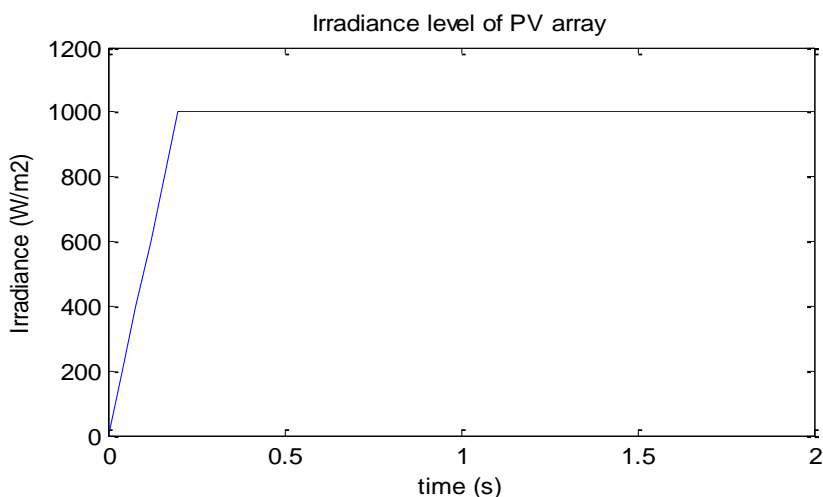
Για τη προσομοίωση του συστήματος επιλέχθηκαν συνθήκες σκίασης που να είναι όσο το δυνατόν ρεαλιστικές και να αντιπροσωπεύουν το πραγματικό πρόβλημα της προαναφερόμενης φ/β συστοιχίας. Αρχικά, η ηλιακή ακτινοβολία θα αυξάνεται σταδιακά από 0 μέχρι 1000 W/m^2 σε χρονικό διάστημα 0.2s, όπως απεικονίζεται στο

Σχήμα 5.12. Αφού το σύστημα σταθεροποιηθεί και μετά το πέρας μερικών δευτερολέπτων, τα φ/β πλαίσια που βρίσκονται δίπλα στα εμπόδια (δέντρα, κτήρια) θα αρχίσουν σταδιακά να σκιάζονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Δηλαδή θα υπάρχει συνεχής αύξηση του ποσοστού σκίασης αλλά και μετακίνηση της σκίασης προς το εσωτερικό της συστοιχίας (βλ. Σχήμα 5.14). Με τελικό αποτέλεσμα τα φ/β που βρίσκονται ακριβώς δίπλα στα εμπόδια να δέχονται το 50% (50% σκίαση) της ακτινοβολίας και τα αμέσως επόμενα το 75% (25% σκίαση). Στο Σχήμα 5.15 βλέπουμε τις P-V χαρακτηριστικές ανά 0.1s για τα 2s προσομοίωση. Η επιλογή της σταδιακής σκίασης και όχι της απότομης μεταβολής έγινε για τους παρακάτω λόγους:

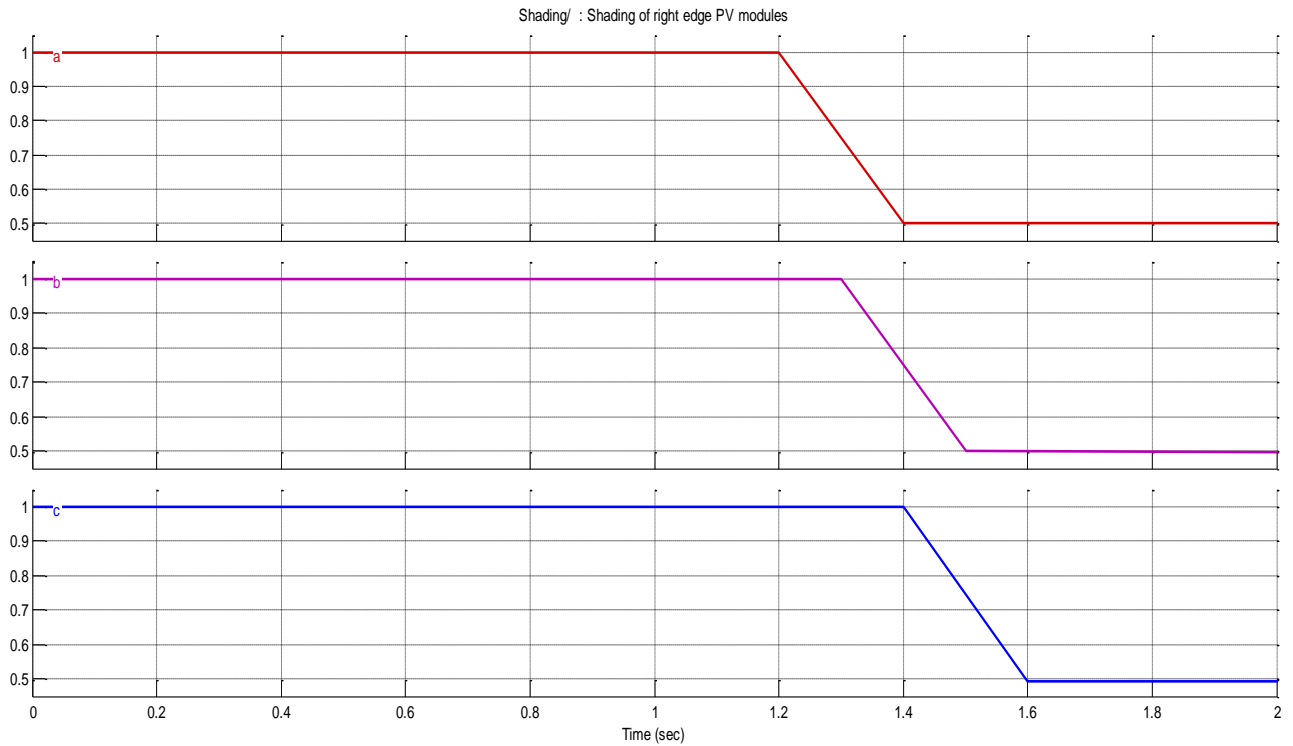
Πρώτον, οι απότομες μεταβολές εμφάνισης των ΣΜΣ αποτελούν ένα φαινόμενο σπάνιο που η παρουσία του συνήθως διαρκεί για μικρό χρονικό διάστημα π.χ. εμφάνιση σύννεφων [39]. Μετά το πέρας τέτοιων συνθηκών η λειτουργία του φ/β συστήματος επανέρχεται στο ΣΜΙ. Αντιθέτως, η σταδιακή εμφάνιση των ΣΜΣ από γειτονικά εμπόδια συμβαίνει καθημερινά και επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του φ/β συστήματος. Επίσης, επειδή η διάρκεια της σκίασης από γειτονικά αντικείμενα είναι μεγάλη, η λειτουργία σε τοπικό μέγιστο της καμπύλης ισχύος έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ενέργειας [39].

Δεύτερον, η εύρεση του ΣΜΙ υπό απότομη εμφάνιση των ΣΜΣ είναι πιο εύκολη διαδικασία γιατί το ΣΜΙ σταθεροποιείται σε ένα σημείο. Αντιθέτως, υπό συνθήκες συνεχώς μεταβαλλόμενης σκίασης, η εύρεση του ΣΜΙ είναι δύσκολη διαδικασία γιατί το ολικό μέγιστο αλλάζει συνεχώς θέση (βλ. Σχήμα 5.15) [39]. Έτσι, ενώ κάποια τεχνική μπορεί να νομίζει ότι βρήκε το ΣΜΙ, στο χρονικό διάστημα της αναζήτησης το ΣΜΙ μπορεί να έχει μετακινηθεί σε άλλο σημείο. Το ΣΜΙ σταθεροποιεί τη θέση του μόνο αν επικρατήσουν σταθερές συνθήκες σκίασης.

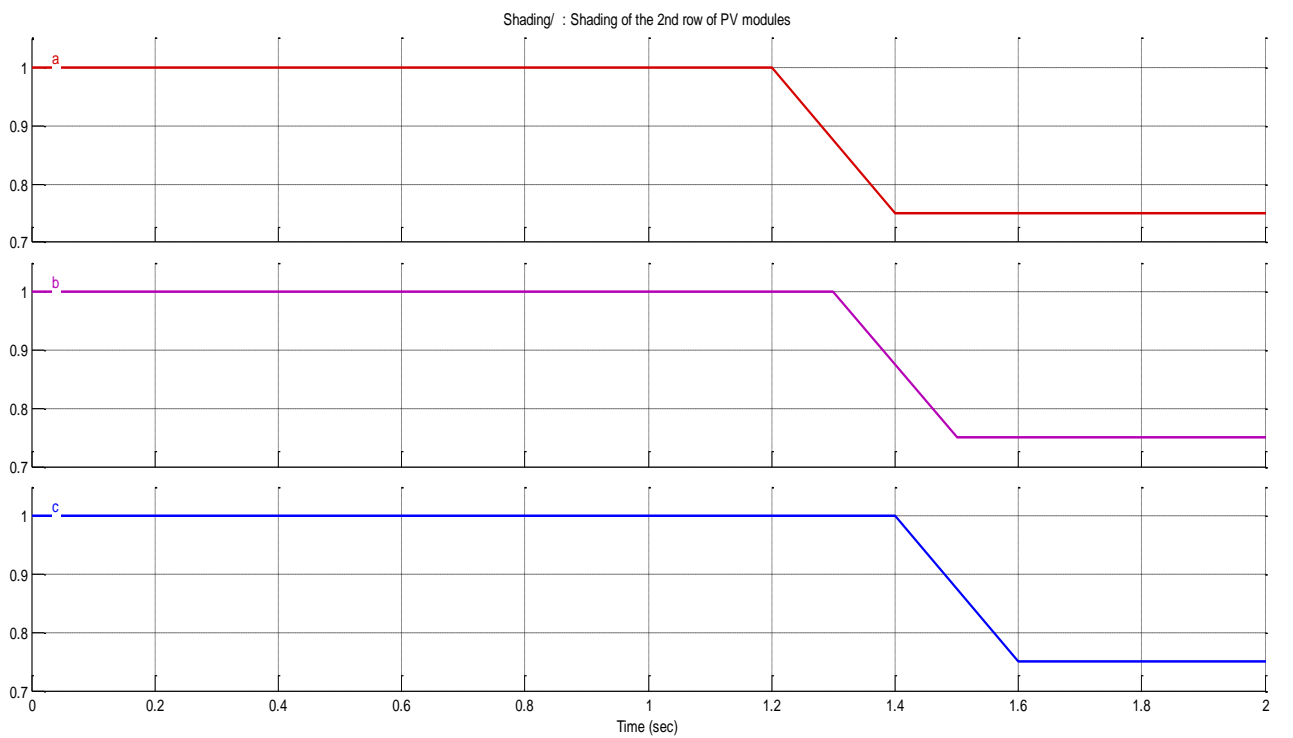
Τρίτον, η φ/β εγκατάσταση που θα εξεταστεί και περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, σκιάζεται με σταδιακό τρόπο λόγω της ύπαρξης των γειτονικών αντικειμένων [38]. Με αυτό τον τρόπο θα προσομοιωθούν πιο ρεαλιστικές συνθήκες σκίασης που θα παρέχουν πιο έγκυρα αποτελέσματα.



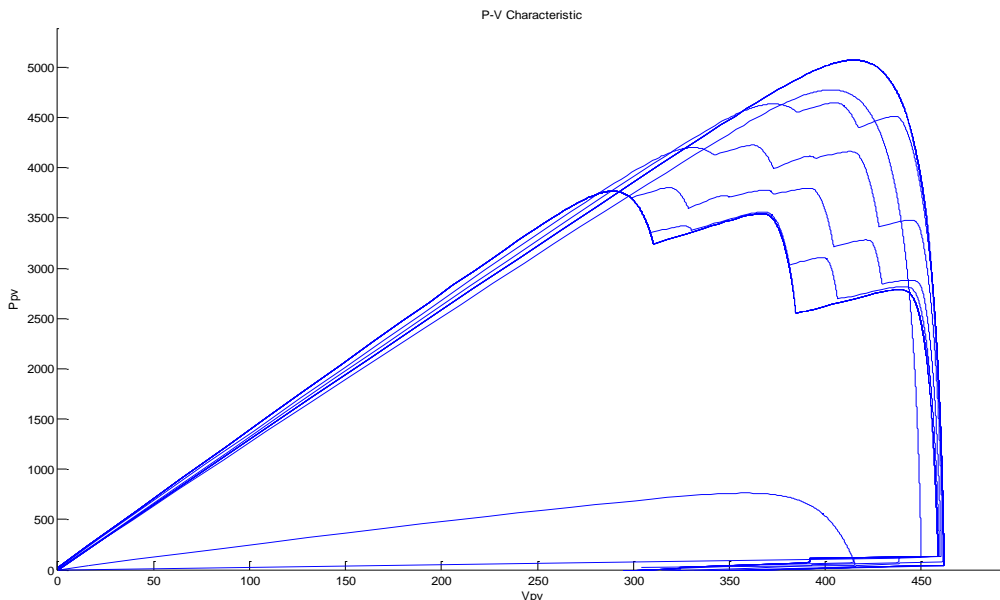
Σχήμα 5.12: Επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας της φ/β συστοιχίας προς εξέταση.



Σχήμα 5.13: Στάδια σκίασης τμημάτων της σειράς των φ/β πλαισίων που βρίσκονται στην πάνω δεξιά άκρη της φ/β συστοιχίας κοντά στα εμπόδια (βλ Σχήμα 5.11), με τελική σκίαση 50%. α) Πρώτο τμήμα των φ/β πλαισίων που αρχίζει να σκιάζεται, β) δεύτερο τμήμα και γ) τρίτο τμήμα.



Σχήμα 5.14: Στάδια σκίασης τμημάτων της δεύτερης σειράς των φ/β πλαισίων που βρίσκονται στην πάνω δεξιά άκρη της φ/β συστοιχίας κοντά στα εμπόδια (βλ Σχήμα 5.11), με τελική σκίαση 25%. α) Πρώτο τμήμα των φ/β πλαισίων που αρχίζει να σκιάζεται, β) δεύτερο τμήμα και γ) τρίτο τμήμα.



Σχήμα 5.15: P-V χαρακτηριστικές της λειτουργίας της φ/β συστοιχίας ανά 0.1s για χρονικό διάστημα 2s, σύμφωνα με τις συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και σκίασης που φαίνονται στα Σχήματα 5.12-5.14.

5.6 Αξιολόγηση Αλγορίθμων Προσομοίωσης

Για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου αλλά και για να προσδιοριστούν τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του, θα συγκριθεί με τον αλγόριθμό Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb and Observed), με τον αλγόριθμο Στοιχειώδης Αγωγιμότητας (Incremental Conductance) και με τον Αλγόριθμο Τοποθέτησης Σημαίας, που είναι ένας αλγόριθμος δύο σταδίων ευρέως διαδεδομένος στη βιβλιογραφία.

5.6.1 Αξιολόγηση Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης (ΔΠ)

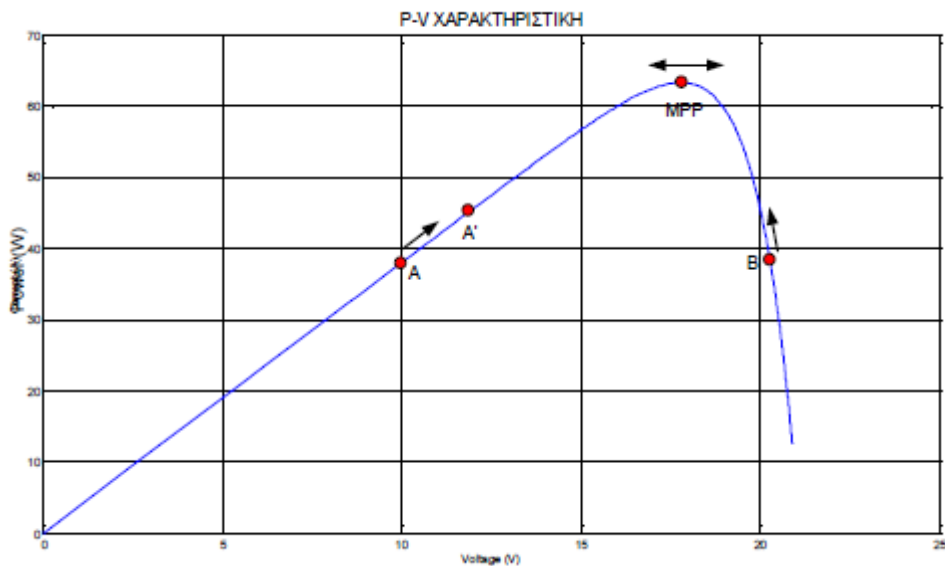
Λόγοι Σύγκρισης με Αλγόριθμο ΔΠ

Ο αλγόριθμος ΔΠ επιλέχθηκε να συγκριθεί με τον Προτεινόμενο αλγόριθμο κυρίως λόγω της ευρείας εμπορικής χρήσης, η οποία προκύπτει από την απλότητα υλοποίησης του. Έτσι η σύγκριση θα προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την δυνατότητα αύξησης της απόδοσης των υπαρχόντων σκιασμένων εγκαταστάσεων. Επίσης, ο ΔΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αλγόριθμος αναφοράς απλότητας υλοποίησης ώστε να αξιολογηθεί ο Προτεινόμενος αλγόριθμος ως προς το αντίστοιχο κριτήριο που έχει τεθεί.

Περιγραφή Λειτουργίας Αλγορίθμου ΔΠ

Ο αλγόριθμος ΔΠ έχει ήδη συζητηθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, για αυτό το λόγο, στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση του τρόπου λειτουργίας του. Στο Σχήμα 5.16 απεικονίζεται διαγραμματικά ένα παράδειγμα λειτουργίας του πάνω στην καμπύλη ισχύος, ο Πίνακας 5.2 δείχνει τη λογική αναζήτησης του ΣΜΙ και στο Σχήμα 5.17 φαίνεται το διάγραμμα ροής του.

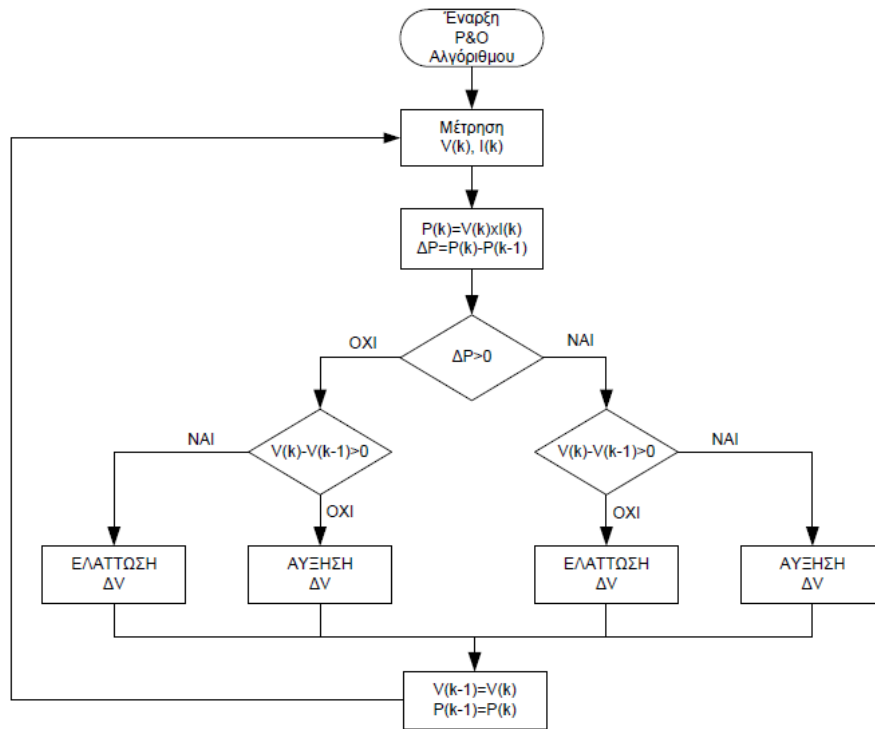
Αρχικά ο αλγόριθμος ξεκινάει από ένα τυχαίο σημείο λειτουργίας Α μέσω της μέτρησης του ρεύματος (I) και της τάσης (V) από την έξοδο του Φ/B πάρκου (βλ. Σχήμα 6.16). Αυξάνοντας (διαταράσσοντας) τεχνητά την τάση λειτουργίας του Φ/B πάρκου με μεταβολή του duty ratio του μετατροπέα από έναν ελεγκτή, λαμβάνεται ένα νέο ρεύμα (I') με αποτέλεσμα το πάρκο να λειτουργεί σε ένα νέο σημείο Α'. Αν η αύξηση της τάσης κατά ΔV έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος (P) τότε το Φ/B πάρκο λειτουργεί αριστερά του ΣΜΙ και η τάση θα πρέπει να συνεχίσει να αυξάνεται. Αν όμως η αύξηση της τάσης προκαλεί μείωση της ισχύος τότε το Φ/B πάρκο λειτουργεί δεξιά του ΣΜΙ και η τάση θα πρέπει να μειωθεί.



Σχήμα 5.16: P-V χαρακτηριστική με παράδειγμα λειτουργίας του αλγόριθμου ΔΠ.

Πίνακας 5.2

Θετική	Θετική	Θετική
Θετική	Αρνητική	Αρνητική
Αρνητική	Θετική	Αρνητική
Αρνητική	Αρνητική	Θετική



Σχήμα 5.17: Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου ΔΠ

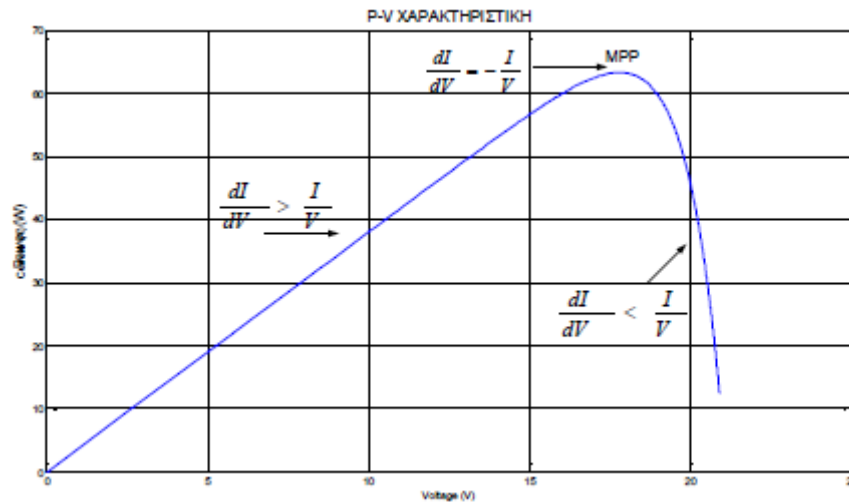
Αξιολόγηση Αλγορίθμου ΔΠ

Ο αλγόριθμος ΔΠ, όπως προαναφέρθηκε, έχει ως βασικό πλεονέκτημα την απλότητα υλοποίησης και λειτουργίας του, πράγμα που τον καθιστά ευρέως διαδεδομένο για εμπορική χρήση. Ωστόσο, παρουσιάζει κάποια βασικά μειονεκτήματα ιδιαίτερα για περιπτώσεις μερικής σκίασης όπως τα παρακάτω:

- Αδυναμία τερματισμού όταν προσεγγίζει το ΣΜΙ, με αποτέλεσμα να μειώνει την απόδοση λειτουργίας του πάρκου και να δημιουργεί αισθητές ταλαντώσεις αν το βήμα ΔV είναι μεγάλο. Από την άλλη, μικρό βήμα θα καθιστούσε αργή την προσέγγιση του ΣΜΙ [9].
- Στην περίπτωση αύξησης της ισχύος λόγω συνεχόμενης αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας και ενώ πραγματοποιείται μείωση της τάσης, η μέθοδος αντιλαμβάνεται ότι βρίσκεται δεξιά του ΣΜΙ και συνεχίζει να μειώνει την τάση απομακρύνοντας το σημείο λειτουργίας από το ΣΜΙ [9].
- Σε συνθήκες μερικής σκίασης όπου η καμπύλη ισχύος έχει περισσότερα μέγιστα, ο αλγόριθμος θα σταματήσει στο πρώτο τοπικό μέγιστο που θα συναντήσει [8].

5.6.2 Αξιολόγηση Αλγόριθμου Στοιχειώδους Αγωγιμότητα (ΣΑ)

Ο αλγόριθμος Στοιχειώδους Αγωγιμότητας έχει ήδη αναλυθεί δύο φορές, μια στο δεύτερο κεφάλαιο και μια στο τέταρτο κεφάλαιο, ως προς το δεύτερο στάδιο του προτεινόμενου αλγορίθμου. Για αυτό το λόγο, στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν μόνο οι λόγοι σύγκρισης με τον ΣΑ και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του. Επίσης, στο Σχήμα 5.18 φαίνεται διαγραμματικά επάνω στην καμπύλη ισχύος ο τρόπος λειτουργίας του.



Σχήμα 5.18: P-V χαρακτηριστική με παράδειγμα λειτουργίας του αλγόριθμου ΣΑ.

Λόγοι Σύγκρισης με Αλγόριθμο ΣΑ

Ο αλγόριθμος ΣΑ αποτελεί το δεύτερο στάδιο του Προτεινόμενου αλγορίθμου. Έτσι, η σύγκρισή του με τον ΣΑ θα προσφέρει πληροφορίες για το πώς επηρέασε το πρώτο στάδιο της λειτουργίας του Προτεινόμενου αλγορίθμου υπό ΣΜΣ. Επίσης, θα αξιολογηθεί η συμβολή του ΣΑ στον Προτεινόμενο.

Αξιολόγηση Αλγορίθμου ΣΑ

Τα βασικά πλεονεκτήματα του εν λόγω αλγορίθμου, που τον καθιστούν επίσης καλύτερο από τον αλγόριθμο ΔΠ επαναλαμβάνονται εδώ και έχουν ως εξής:

- Τερματίζει και δεν ταλαντώνεται γύρω από το ΣΜΙ, όταν γίνει ανίχνευση του ΣΜΙ ο αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος ξαναμπαίνει σε λειτουργία όταν υπάρξει μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας [10].
- Προσεγγίζει το ΣΜΙ σε μικρότερο χρόνο από άλλους συμβατικούς αλγορίθμους [7].
- Συμπεριφέρεται πολύ καλά σε γρήγορες μεταβολές των καιρικών συνθηκών [10].
- Μεταβαίνει απευθείας στο ΣΜΙ χωρίς να υπάρχουν παράγοντες απομάκρυνσης από αυτό [21].

Στον αντίποδα, μερικά από τα βασικά μειονεκτήματα του είναι τα εξής:

- Είναι περίπλοκος στην υλοποίηση του, ιδιαίτερα έναντι του κύριου ανταγωνιστή του, τον αλγόριθμο ΔΠ [8].
- Μπορεί να οδηγηθεί σε ταλαντώσεις αν δεν γίνει σωστή επιλογή του βήματος και επιλεχθεί πολύ μεγάλο βήμα [10].
- Αποτυγχάνει να βρει το ΣΜΙ σε συνθήκες μερικής σκίασης, αφού σταματά την αναζήτηση στο πρώτο μέγιστο που ανιχνεύει [21].

5.6.3 Αξιολόγηση Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημαίας (ΤΣ)

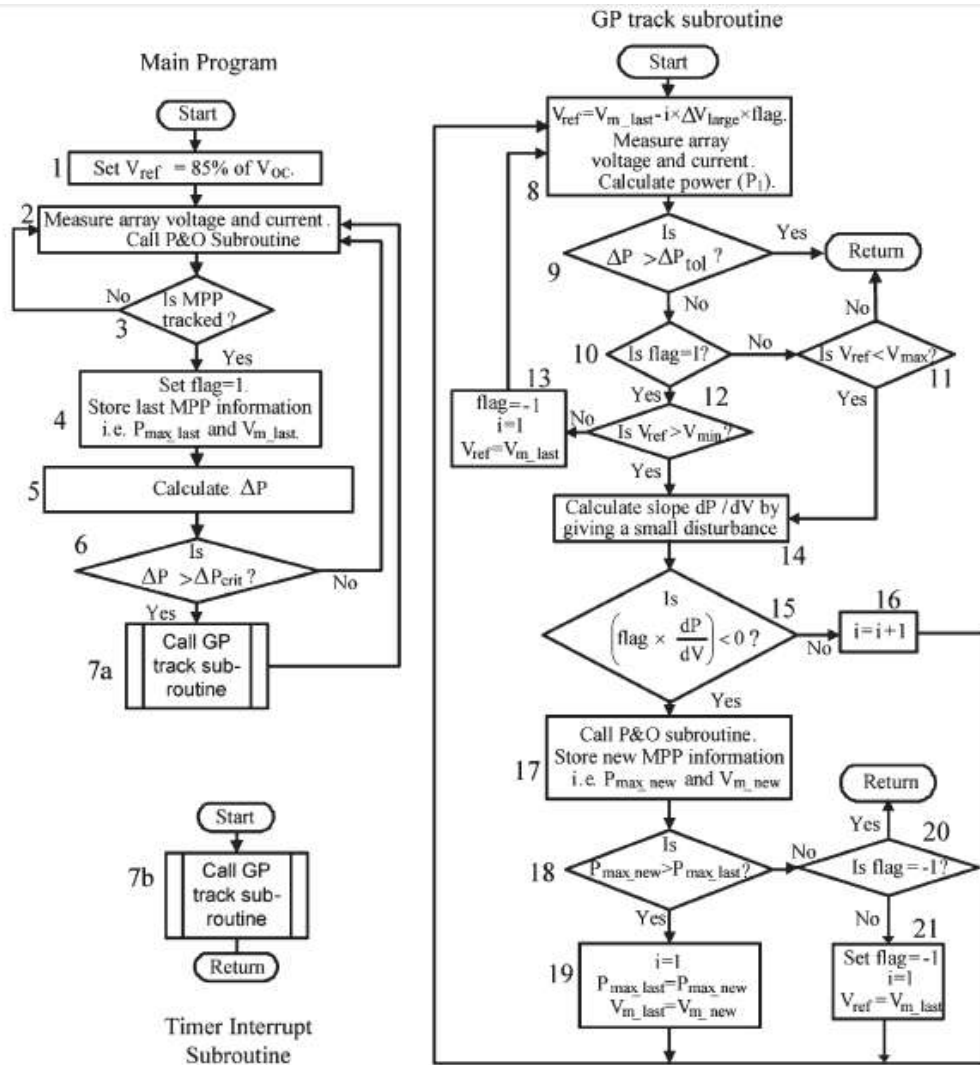
Λόγοι Σύγκρισης με Αλγόριθμο ΤΣ

Η επιλογή του αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημαίας για σύγκριση με τον προτεινόμενο αλγόριθμο έγινε για δύο κύριους λόγους. Πρώτον, και οι δύο αλγόριθμοι λειτουργούν με την λογική των δύο σταδίων, πράγμα που δίνει τη δυνατότητα αντικειμενικής αξιολόγησης του Προτεινόμενου αλγορίθμου. Δεύτερον, αποτελεί έναν από τους πιο επιτυχημένους αλγόριθμους εύρεσης του ΣΜΙ υπό ΣΜΣ, καθιστώντας τον ευρέως γνωστό στην βιβλιογραφία.

Περιγραφή Λειτουργίας Αλγορίθμου ΤΣ

Ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημαίας είναι ουσιαστικά μία βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης για να μπορεί να ανταποκρίνεται στην εύρεση του σημείου μέγιστης λειτουργίας υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Η λειτουργία του περιγράφεται στο [2].

Στο Σχήμα 5.19 διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ΤΑ. Ο αλγόριθμος ξεκινάει πάντα με τάση αναφοράς (V_{ref}) ίση με το 85% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}) της φ/β συστοιχίας (block 1) του κυρίου προγράμματος. Μέχρι να συμβεί κάποια μεταβολή στις καιρικές συνθήκες, ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης είναι σε λειτουργία διατηρώντας το φ/β σύστημα στο ΣΜΙ (blocks 2,3). Η απότομη μεταβολή των καιρικών συνθηκών ή των συνθηκών σκίασης ή λειτουργίας του χρονοδιακόπτη που ανιχνεύονται από το κυρίως πρόγραμμα (blocks 4-6), μεταφέρουν τον έλεγχο στην υπορουτίνα εντοπισμού του ΣΜΙ (block 7a). Η υπορουτίνα αυτή είναι υπεύθυνη για την εύρεση του ΣΜΙ υπό συνθήκες μερικής σκίασης και αφού προσδιορίσει το σημείο επιστρέφει τον έλεγχο ξανά στο Κυρίως Πρόγραμμα.



Flowchart for the proposed MPPT control.

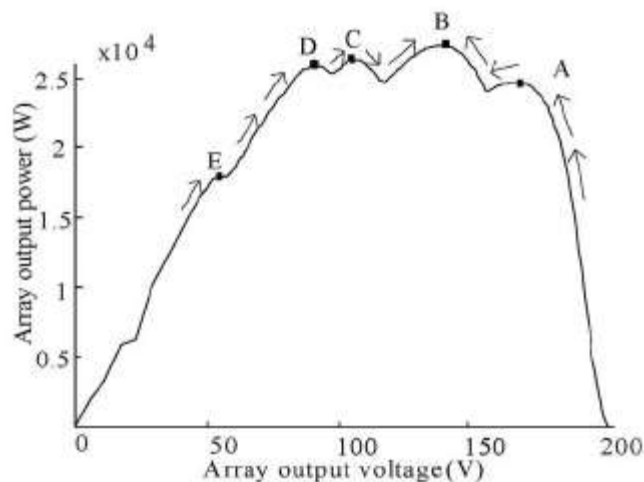
Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημείας.

Έστω ότι ο αλγόριθμος ΔP έχει βρει το ΣΜΙ και το σύστημα λειτουργεί γύρω από αυτό. Η ξαφνική μεταβολή στην ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει την θέση του ΣΜΙ και ένα νέο σημείο παίρνει την θέση του. Το Σχήμα 5.20 απεικονίζει την P-V χαρακτηριστική καμπύλη της φ/β συστοιχίας μετά την εμφάνιση των συνθηκών σκίασης. Αρχικά, ο αλγόριθμος ΔP θα αναζητήσει ένα νέο μέγιστο (σημείο D) το οποίο μόλις βρεθεί, αποθηκεύεται (τιμή ισχύος (P_{m_last}) και τάσης V_{m_last}). Επίσης, η τιμή της σημαίας (flag) γίνεται $flag=1$. Αυτό σημαίνει ότι η αναζήτηση του ΣΜΙ θα γίνει στα αριστερά του αποθηκευμένου τοπικού μεγίστου (block 4). Ακόμη, η μεταβολή στο επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας (ΔG) προκαλεί μεταβολή στο επίπεδο της παραγόμενης ισχύος (ΔP). Αν η μεταβολή της ισχύος (ΔP) είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή (ΔP_{crit}), τότε η υπορουτίνα GP καλείται για την αναζήτηση του ΣΜΙ (blocks 5,6). Η σάρωση ξεκινά με την εφαρμογή μίας διαταραχής (ΔV_{large}). Η τιμή της διαταραχής πρέπει να είναι μικρότερη από την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών τοπικών μεγίστων (block 8).

Για να εξασφαλιστεί ότι θα ελεγχθούν όλα τα τοπικά μέγιστα, η τιμή της διαταραχής (ΔV_{large}) είναι περίπου το 60-70% της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος ενός φ/β πλαισίου. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του βήματος, τόσο αυξάνεται ο χρόνος για την εύρεση του ΣΜΙ, αλλά μειώνονται οι πιθανότητες αστοχίας του αλγορίθμου.

Η αρχική διαταραχή είναι προς τα αριστερά (σημείο E) και φαίνεται από την τιμή της σημαίας (flag = 1, block 10). Αν δεν υπάρχουν συνθήκες ομοιόμορφης σκίασης (block 9) και τα όρια (blocks 11, 12) δεν έχουν ξεπεραστεί, τότε υπολογίζεται η κλίση στο νέο σημείο λειτουργίας (block 14). Αν η κλίση είναι θετική, τότε η διαταραχή συνεχίζεται προς την ίδια κατεύθυνση (blocks 15, 16) μέχρι η τιμή της τάσης να φθάσει στο κάτω όριο V_{min} (block 12). Αν η κλίση είναι αρνητική, τότε σημαίνει ότι υπάρχει κάποιο τοπικό μέγιστο, και καλείται ο αλγόριθμος ΔΠ να το βρει (σημείο E, block 17). Αν η ισχύς που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό είναι μικρότερη από την ισχύ του προηγούμενου τοπικού μεγίστου, τότε η λειτουργία μετατοπίζεται στο αμέσως προηγούμενο μέγιστο που είχε βρεθεί (σημείο D). Επίσης, η αναζήτηση συνεχίζεται προς την άλλη πλευρά (blocks 18, 20, 21). Η κατεύθυνση προς τα δεξιά φαίνεται από την τιμή της σημαίας ίση με -1 (flag = -1, block 21).

Αν η ισχύς στο νέο μέγιστο είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη, τότε αποθηκεύεται το νέο σημείο (block 19), και η αναζήτηση συνεχίζεται προς την ίδια κατεύθυνση μέχρι να βρεθεί ένα τοπικό μέγιστο με μικρότερη ισχύ ή να επιτευχθεί το κάτω όριο V_{min} (block 12). Όταν αυτό συμβεί, η αναζήτηση συνεχίζεται προς τα δεξιά με τον ίδιο τρόπο (block 13). Η κλίση της καμπύλης ισχύος υπολογίζεται μετά από κάθε διαταραχή, και αν είναι θετική, σημαίνει ότι ένα τοπικό μέγιστο είναι κάπου κοντά. Το μέγιστο βρίσκεται και αν η ισχύς του είναι μεγαλύτερη από του προηγούμενου και η αναζήτηση συνεχίζεται προς τα δεξιά. Αλλά, κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας αν κάποια μέγιστο με μικρότερη ισχύ (σημείο A) βρεθεί, η λειτουργία επανέρχεται στο προηγούμενο μέγιστο (σημείο B). Η λειτουργία του φ/β συστήματος επανέρχεται στο σημείο B αν η αναζήτηση φθάσει το άνω όριο V_{max} ($V_{max} = 0.85V_{AK \text{ πλαισίου}}$, block 11). Άρα το ΣΜΙ βρέθηκε και είναι το σημείο B.



Σχήμα 5.20: P-V χαρακτηριστική υπό ΣΜΣ για το παράδειγμα λειτουργίας του αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημαίας.

Αξιολόγηση Αλγορίθμου ΤΣ

Ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημαίας παρουσιάζει τα παρακάτω βασικά πλεονεκτήματα:

- Βρίσκει το ΣΜΙ χωρίς πάντα να χρειάζεται να σαρώσει ολόκληρη την καμπύλη [5].
- Μπορεί να γίνει εκκίνηση της υπορουτίνας με ρύθμιση του χρονοδιακόπτη ή με εξωτερική παρέμβαση [2].
- Είναι πολύ γρήγορος όταν οι κορυφές της καμπύλης είναι σε κοντινά επίπεδα ισχύος [2].

Από την άλλη, κάποια βασικά μειονεκτήματα του αλγορίθμου είναι τα παρακάτω:

- Προκαλεί πολλές ταλαντώσεις μέχρι την εύρεση του ΣΜΙ, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει το Φ/Β πάρκο σε αποσύνδεση από το υπόλοιπο σύστημα ακόμη και λόγω μιας πολύ μικρής μεταβολής των καιρικών συνθηκών [24].
- Σαρώνει ολόκληρη την καμπύλη όταν ο αλγόριθμος δεν αντιλαμβάνεται ότι η μεταβολή στην ισχύ προήλθε από ομοιόμορφη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας [5].
- Σαρώνει σχεδόν πάντα το 80% της καμπύλης [5].
- Αδυνατεί να βρει το ΣΜΙ όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά ισχύος μεταξύ δύο γειτονικών τοπικών μεγίστων [24].
- Είναι αργός λόγω εύρεσης και σύγκρισης σχεδόν όλων των τοπικών μεγίστων [2].
- Αποτυγχάνει να βελτιώσει τα υπόλοιπα προβλήματα του αλγορίθμου ΔΠ που σχετίζονται με τις ταλαντώσεις στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και την απόκλιση από το ΣΜΙ κατά την ομοιόμορφη αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας [5].

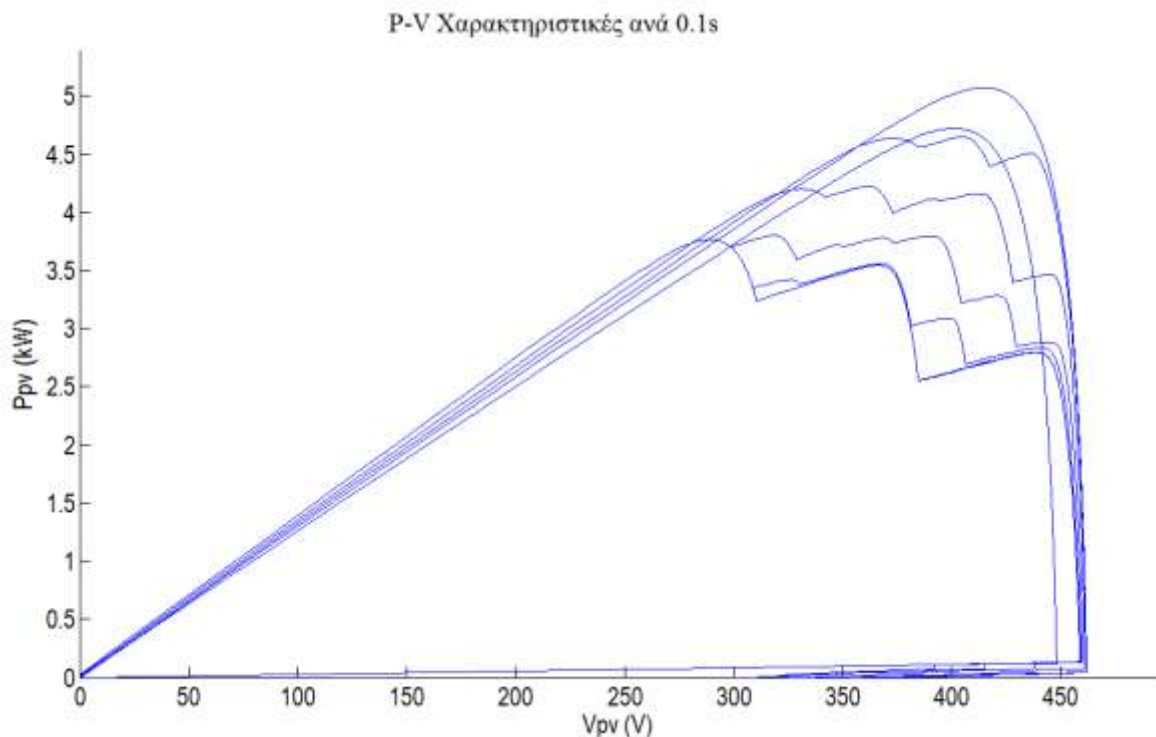
5.7 Παράμετροι Δίκαιης Σύγκρισης

Για την αντικειμενικότητα των αποτελεσμάτων, οι προσομοιώσεις των παραπάνω αλγορίθμων θα πρέπει να γίνουν υπό ίσους όρους. Δηλαδή, κάποιοι παράμετροι των συστημάτων πρέπει να είναι ίδιες. Έτσι λοιπόν, και τα τέσσερα μοντέλα θα έχουν τον ίδιο χρόνο δειγματοληψίας (t_s) ίσο με $t_s = 1 \times 10^{-4}$ s. Επίσης, το βήμα μεταβολής της τάσης αναφοράς (dv) του κάθε αλγορίθμου θα είναι ίσο με $dv=0.5V$. Ακόμη, οι αναλογικοί-ολοκληρωτικοί ρυθμιστές (PI) που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του duty cycle του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης θα έχουν αναλογικό κέρδος (K_p) ίσο με $K_p = -6.56 \times 10^{-7}$ και ολοκληρωτικό κέρδος (K_I) ίσο με $K_I = -0.013$. Όπως έχει προαναφερθεί, ο Προτεινόμενος αλγόριθμος και ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημαίας, για την ανίχνευση των ΣΜΣ, χρησιμοποιούν μια κρίσιμη τιμή της πτώσης ισχύος (ΔP_{crit}). Η τιμή αυτή επιλέχθηκε να είναι ίδια για τους δύο αλγορίθμους και καθορίστηκε σύμφωνα με το άρθρο [39], ίση με $\Delta P_{crit} = -50 W$.

Τέλος, το φορτίο (R_{Load}) στην έξοδο του μετατροπέα θεωρείται σταθερό και ίσο με $R_{Load} = 32 \Omega$, ώστε η μέγιστη δυνατή τάση εξόδου του DC-DC μετατροπέα να είναι $V_{out,max,dc} = 400 Vdc$.

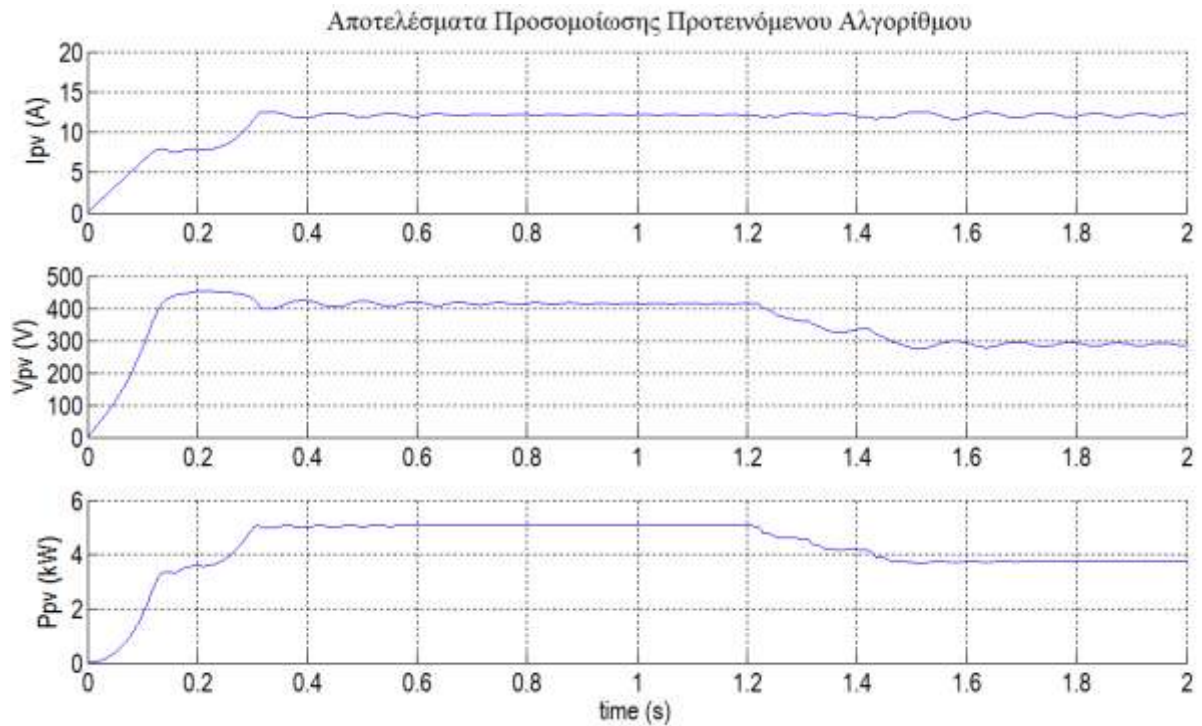
5.8 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στα Σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των τεσσάρων αλγορίθμων (Προτεινόμενος, Τοποθέτησης Σημείας, Διαταραχής και Παρατήρησης και Στοιχειώδους Αγωγιμότητας). Τα Σχήματα 5.22, 5.22 και 5.26 απεικονίζουν τα διαγράμματα χρόνου του ρεύματος (I_{PV}), της τάσης (V_{PV}) και της ισχύς (P_{PV}) εξόδου της φ/β γεννήτριας. Επίσης, στο Σχήμα 5.21 βλέπουμε τις P-V χαρακτηριστικές καμπύλες της μεταβολής των ΣΜΣ ανά 0.1s και στα Σχήματα 5.23, 5.25 και 5.27 βλέπουμε την τοποθέτηση των σημείων λειτουργίας πάνω στις P-V χαρακτηριστικές, κατά την διάρκεια της αναζήτησης και της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της φ/β συστοιχίας.

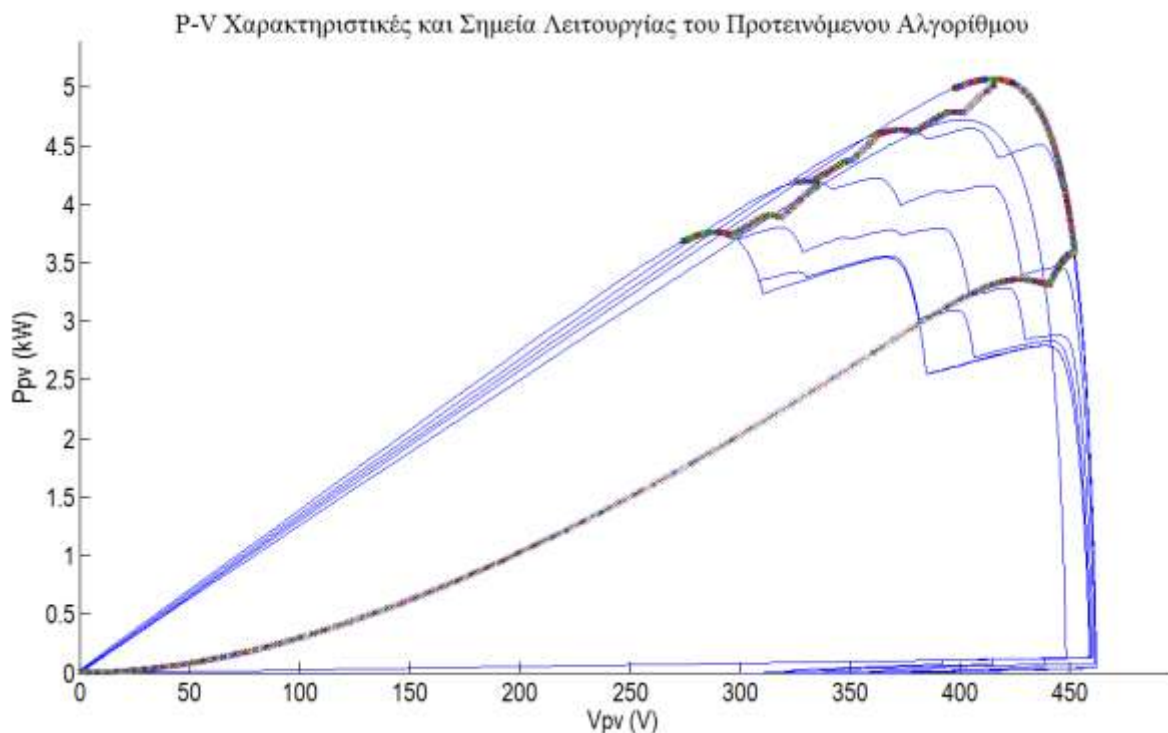


Σχήμα 5.21: P-V χαρακτηριστικές της λειτουργίας της φ/β συστοιχίας ανά 0.1s για χρονικό διάστημα 2s, σύμφωνα με τις συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και σκίασης που φαίνονται στα Σχήματα 5.12-5.14.

5.8.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Προτεινόμενου Αλγορίθμου



Σχήμα 5.22: Αποτελέσματα προσομοίωσης του Προτεινόμενου Αλγορίθμου. Διαγράμματα χρόνου α) του ρεύματος (I_{PV}), β) της τάσης (V_{PV}) και γ) της ισχύς (P_{PV}) εξόδου της φ/β γεννήτριας.



Σχήμα 5.23: P-V χαρακτηριστικές και σημεία λειτουργίας του Προτεινόμενου Αλγορίθμου.

Συμπεράσματα

Στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί φαίνονται συνομίζονται τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης του Προτεινόμενου αλγορίθμου. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βρίσκει το ΣΜΙ κατά την αρχικοποίηση, σε χρόνο 0.3s και παράγοντας 5.32 kWh ενέργεια στα πρώτα 1.2s. Στη συνέχεια, από την εμφάνιση των ΣΜΣ, η εύρεση του ΣΜΙ πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα 0.25 s και η παραγόμενη ενέργεια μέχρι τα 2s είναι 3.17kWh. Τέλος, οι ταλαντώσεις του συστήματος κατά τη διάρκεια όλης της λειτουργίας είναι ελάχιστες και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος.

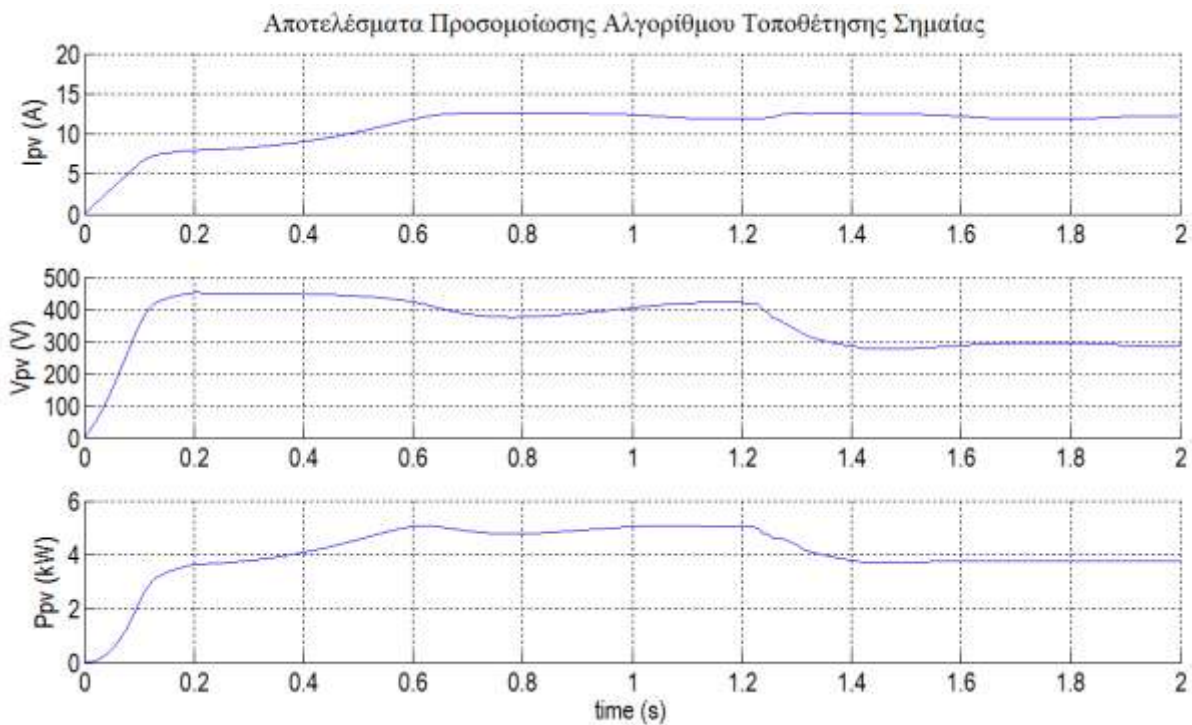
Πίνακας 5.3

Αποτελέσματα Αρχικής Αναζήτησης	
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 415 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 12.1 A, P_{ΣΜΙ} = 5072 W$
Χρόνος ανύψωσης (s)	0.3
Παραγόμενη Ενέργεια (μέχρι t=1.2s)	5.32 kWh
Αποτελέσματα Αναζήτησης Υπό Συνθήκες Μερική Σκίαση	
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 289 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 13 A, P_{ΣΜΙ} = 3766 W$
Εύρεση ΣΜΙ	Ναι

Απόκλιση από ΣΜΠ	0
Συνολικός Χρόνος εύρεσης ΣΜΠ (s)	0.25
Παρ. Ενέργεια κατά τη Σκίαση*	3.17 kWh
Συνολικά Αποτελέσματα	
Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια	8.49 kWh
Ταλαντώσεις	Ελάχιστες

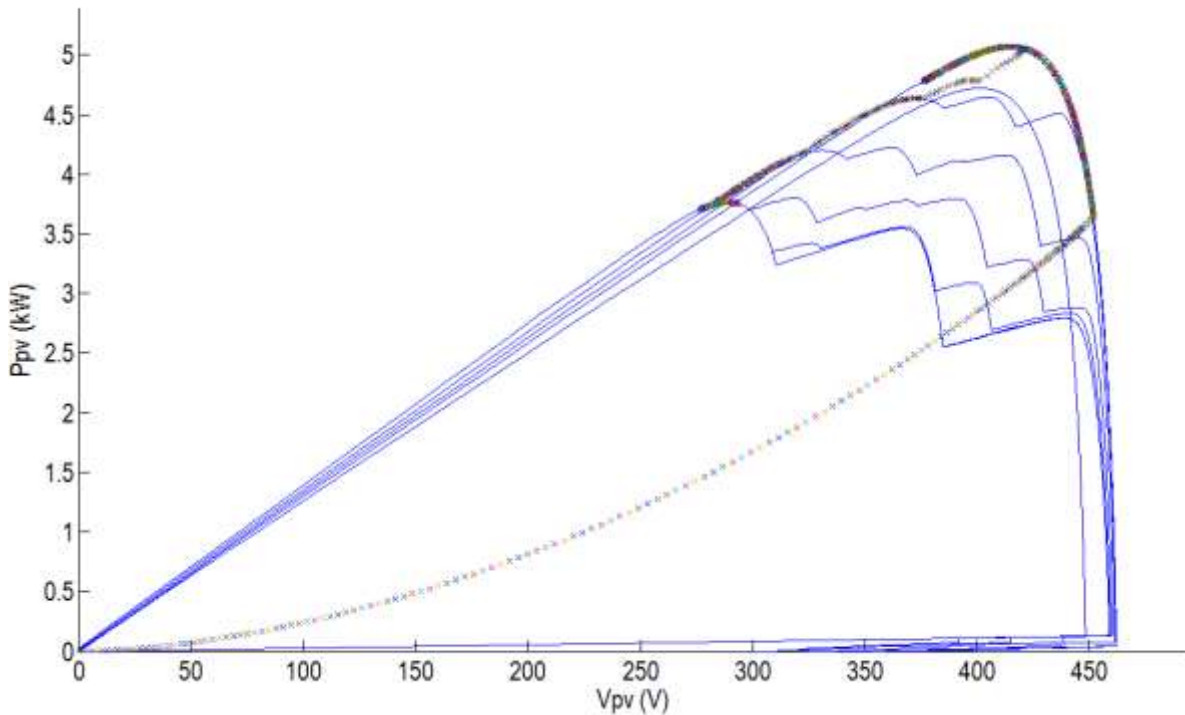
*Από $t=1.2s$ που ξεκινάει οι συνθήκες μερικής σκίασης μέχρι $t=2s$.

5.8.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημείας



Σχήμα 5.24: Αποτελέσματα προσομοίωσης του Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημείας. Διαγράμματα χρόνου α) του ρεύματος (I_{pV}), β) της τάσης (V_{pV}) και γ) της ισχύς (P_{pV}) εξόδου της φ/β γεννήτριας.

P-V Χαρακτηριστικές και Σημεία Λειτουργίας του Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημιαίας



Σχήμα 5.25: P-V χαρακτηριστικές και σημεία λειτουργίας του Αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημιαίας.

Συμπεράσματα

Στον Πίνακα 5.4 που ακολουθεί συγκρίνονται τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης του αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημιαίας με τον Προτεινόμενο αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημιαίας βρίσκει το ΣΜΙ κατά την αρχικοποίηση, σε χρόνο 0.9s και παράγοντας 5.04 kWh ενέργεια στα πρώτα 1.2s. Σημαντικά καθυστερημένα σε Εξίσωση με τον Προτεινόμενο Αλγόριθμο, όπου ολοκληρώνει την αρχική αναζήτηση σε 0.3s και αποδίδει 5.32 kWh. Στη συνέχεια, από την εμφάνιση των ΣΜΣ, η εύρεση του ΣΜΙ πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα 0.25 s και η παραγόμενη ενέργεια μέχρι τα 2s είναι 3.13kWh. Κατά τη λειτουργία σε ΣΜΣ οι δύο αλγόριθμοι είναι σχεδόν το ίδιο αποτελεσματική. Τέλος, οι ταλαντώσεις του συστήματος που προκαλεί η ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημιαίας κατά τη διάρκεια όλης της λειτουργίας, είναι ελαφρά περισσότερες από τις αντίστοιχες του Προτεινόμενου και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος.

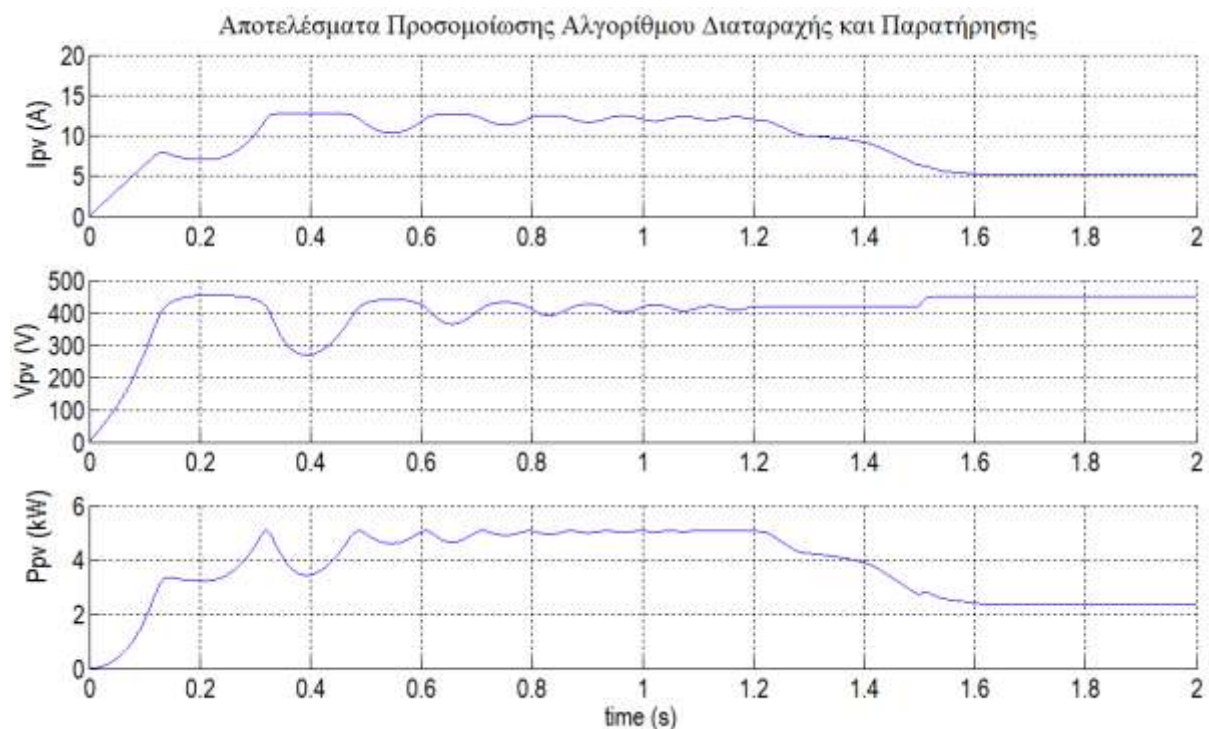
Πίνακας 5.4

Αποτελέσματα Αρχικής Αναζήτησης		
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 415 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 12.1 A, P_{ΣΜΙ} = 5072 W$	
Χρόνος ανύψωσης (s)	0.3	0.9

Παραγόμενη Ενέργεια (μέχρι t=1.2s)	5.32 kWh	5.04 kWh
Αποτελέσματα Αναζήτησης Υπό Συνθήκες Μερική Σκίαση		
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 289 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 13 A, P_{ΣΜΙ} = 3766 W$	
Εύρεση ΣΜΙ	Ναι	Ναι
Απόκλιση από ΣΜΙ	0	0
Συνολικός Χρόνος εύρεσης ΣΜΙ (s)	0.25	0.25
Παρ. Ενέργεια κατά τη Σκίαση*	3.17 kWh	3.13 kWh
Συνολικά Αποτελέσματα		
Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια	8.49 kWh	8.17 kWh
Ταλαντώσεις	Ελάχιστες	Λίγες

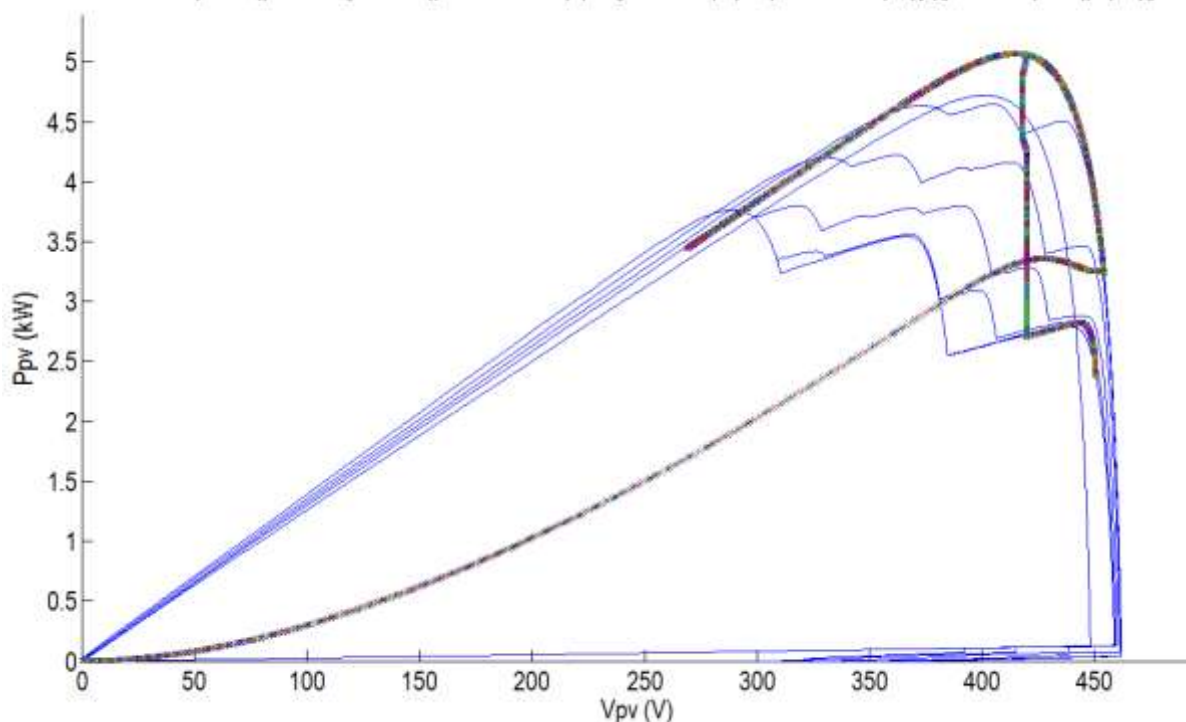
*Από t=1.2s που ξεκινάει η συνθήκη μερικής σκίασης μέχρι t=2s.

5.8.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης



Σχήμα 5.26: Αποτελέσματα προσομοίωσης του Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης. Διαγράμματα χρόνου α) του ρεύματος (I_{PV}), β) της τάσης (V_{PV}) και γ) της ισχύς (P_{PV}) εξόδου της φ/β γεννήτριας.

P-V Χαρακτηριστικές και Σημεία Λειτουργίας του Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης



Σχήμα 5.27: P-V χαρακτηριστικές και σημεία λειτουργίας του Αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί συγκρίνονται τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης του αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης με τον Προτεινόμενο αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης βρίσκει το ΣΜΙ, κατά την αρχικοποίηση, σε χρόνο 0.7s και παράγοντας 5.04 kWh ενέργεια στα πρώτα 1.2s. Αρκετά καθυστερημένα σε Εξίσωση με τον Προτεινόμενο Αλγόριθμο, όπου ολοκληρώνει την αρχική αναζήτηση σε 0.3s και αποδίδει 5.32 kWh. Στη συνέχεια, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτυγχάνει να βρει το ΣΜΙ έπειτα από την εμφάνιση των ΣΜΣ και η παραγόμενη του ενέργεια είναι σημαντικά μειωμένη έναντι του Προτεινόμενου, 2.42 kWh και 3.13kWh αντίστοιχα. Τέλος, οι ταλαντώσεις του συστήματος που προκαλεί η ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης κατά τη διάρκεια όλης της λειτουργίας, είναι πολύ περισσότερες από τις αντίστοιχες του Προτεινόμενου και επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος.

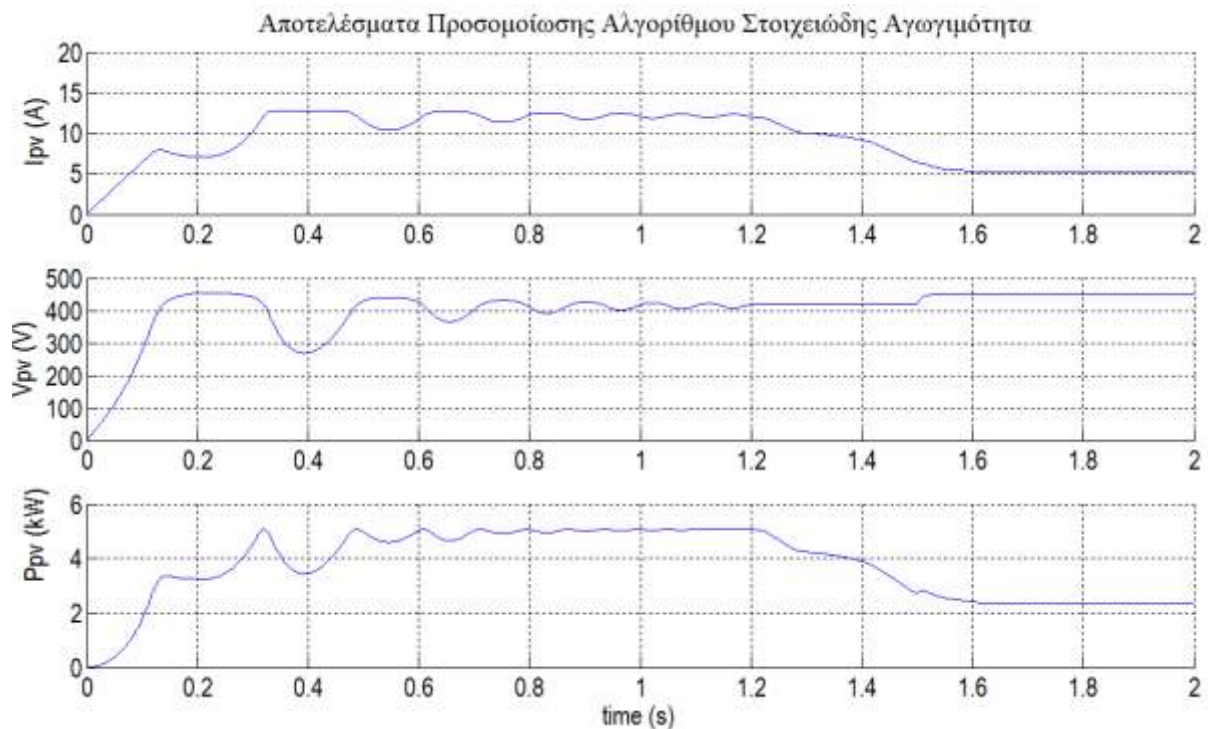
Πίνακας 5.5

Αποτελέσματα Αρχικής Αναζήτησης	
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,\Sigma MI} = 415 V, I_{PV,\Sigma MI} = 12.1 A, P_{\Sigma MI} = 5072 W$

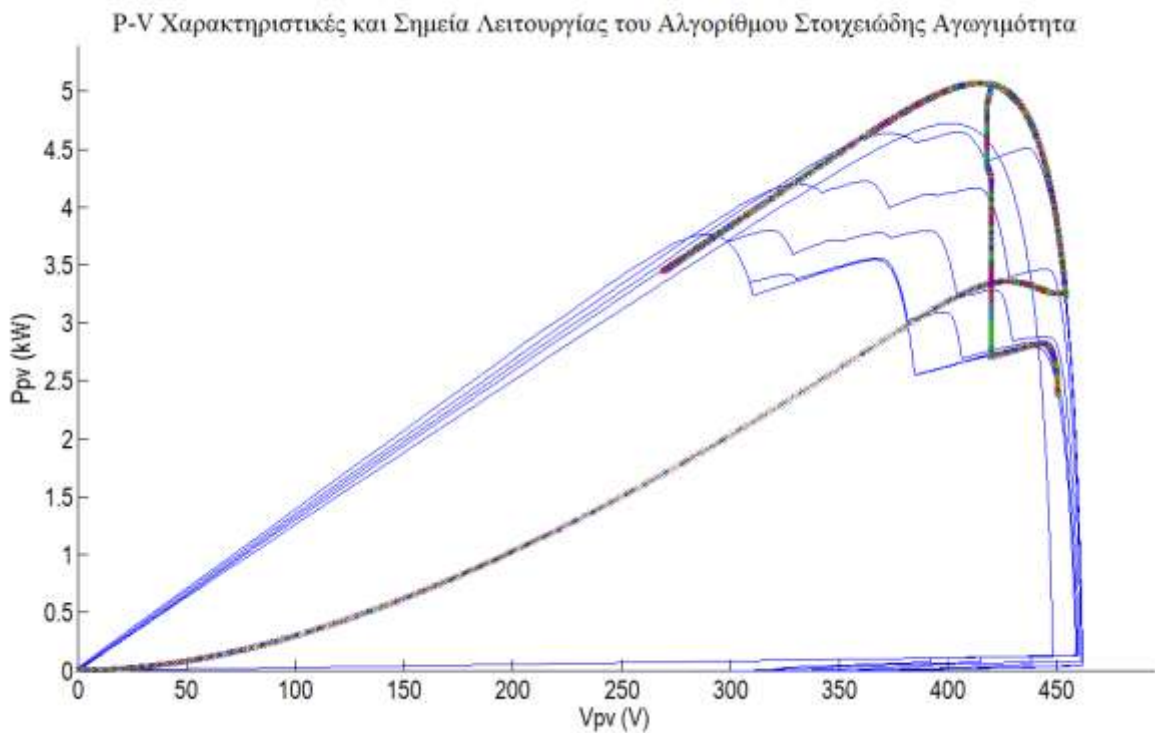
Χρόνος ανύψωσης (s)	0.3	0.7
Παραγόμενη Ενέργεια (μέχρι t=1.2s)	5.32 kWh	5.04 kWh
Αποτελέσματα Αναζήτησης Υπό Συνθήκες Μερική Σκίαση		
Σημείο Μέγιστης Ισχύος: $V_{PV,ΣΜΙ} = 289 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 13 A, P_{ΣΜΙ} = 3766 W$		
Εύρεση ΣΜΙ	Ναι	Όχι
Απόκλιση από ΣΜΙ	0	1393W
Συνολικός Χρόνος εύρεσης ΣΜΙ (s)	0.25	-
Παρ. Ενέργεια κατά τη Σκίαση*	3.17 kWh	2.42 kWh
Συνολικά Αποτελέσματα		
Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια	8.49 kWh	7.46 kWh
Ταλαντώσεις	Ελάχιστες	Πολλές

*Από t=1.2s που ξεκινάει η συνθήκη μερικής σκίασης μέχρι t=2s.

5.8.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αλγορίθμου Στοιχειώδης Αγωγιμότητα



Σχήμα 5.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης του Αλγορίθμου Στοιχειώδης Αγωγιμότητα. Διαγράμματα χρόνου α) του ρεύματος (I_{PV}), b) της τάσης (V_{PV}) και c) της ισχύς (P_{PV}) εξόδου της φ/β γεννήτριας.



Σχήμα 5.29: P-V χαρακτηριστικές και σημεία λειτουργίας του Αλγορίθμου Στοιχειώδης Αγωγιμότητα.

Συμπεράσματα

Στον Πίνακα 5.6 που ακολουθεί συγκρίνονται τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης του αλγορίθμου Στοιχειώδης Αγωγιμότητα με τον Προτεινόμενο αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητα βρίσκει το ΣΜΙ, κατά την αρχικοποίηση, σε χρόνο 0.7s και παράγοντας 5.04 kWh ενέργεια στα πρώτα 1.2s. Αρκετά καθυστερημένα σε Εξίσωση με τον Προτεινόμενο Αλγόριθμο, όπου ολοκληρώνει την αρχική αναζήτηση σε 0.3s και αποδίδει 5.32 kWh. Στη συνέχεια, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτυγχάνει να βρει το ΣΜΙ έπειτα από την εμφάνιση των ΣΜΣ και η παραγόμενη του ενέργεια είναι σημαντικά μειωμένη έναντι του Προτεινόμενου, 2.42 kWh και 3.13kWh αντίστοιχα. Τέλος, οι ταλαντώσεις του συστήματος που προκαλεί η ο αλγόριθμος Στοιχειώδης Αγωγιμότητα κατά τη διάρκεια όλης της λειτουργίας, είναι πολύ περισσότερες από τις αντίστοιχες του Προτεινόμενου και επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος.

Πίνακας 5.6

Αποτελέσματα Αρχικής Αναζήτησης
--

Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 415 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 12.1 A, P_{ΣΜΙ} = 5072 W$	
Χρόνος ανύψωσης (s)	0.3	0.7
Παραγόμενη Ενέργεια (μέχρι t=1.2s)	5.32 kWh	5.04 kWh
Αποτελέσματα Αναζήτησης Υπό Συνθήκες Μερική Σκίαση		
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 289 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 13 A, P_{ΣΜΙ} = 3766 W$	
Εύρεση ΣΜΙ	Ναι	Όχι
Απόκλιση από ΣΜΙ	0	1393W
Συνολικός Χρόνος εύρεσης ΣΜΙ (s)	0.25	-
Παρ. Ενέργεια κατά τη Σκίαση*	3.17 kWh	2.42 kWh
Συνολικά Αποτελέσματα		
Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια	8.49 kWh	7.46 kWh
Ταλαντώσεις	Ελάχιστες	Πολλές

*Από t=1.2s που ξεκινάει οι συνθήκες μερικής σκίασης μέχρι t=2s.

5.8.5 Συνολικά Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 5.7, παρατηρείται ότι μόνο ο Προτεινόμενος αλγόριθμος και ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημείας κατάφεραν να βρουν το ΣΜΙ, υπό αυτές τις ΣΜΣ. Ξεκινώντας από την αρχική αναζήτηση για το ΣΜΙ, κατά την οποία επικρατούν συνθήκες ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας, ο Προτεινόμενος αλγόριθμος βρίσκει το ΣΜΙ σε χρόνο 0.3s, ο αλγόριθμος ΤΣ σε τριπλάσιο χρόνο 0.9s και οι αλγόριθμοι ΔΠ και ΣΑ σε 0.7s. Εξαιτίας κυρίως αυτής της καθυστέρησης, οι τρεις τελευταίοι παράγαν περίπου τη ίδια ενέργεια και ίση με 5.04kWh, ενώ ο Προτεινόμενος παράγαγε 5.32kWh για το χρονικό διάστημα από 0 έως 1.2s. Επίσης, κατά την αναζήτηση του ΣΜΙ, όπως προαναφέρθηκε, οι αλγόριθμοι ΔΠ και ΣΑ απέτυχαν να βρουν το ΣΜΙ. Από την άλλη πλευρά, ο Προτεινόμενος και ο ΤΣ βρίσκουν το ΣΜΙ στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα των 0.25s από την εμφάνιση των ΣΜΣ. Το γεγονός αυτό, επέφερε κάποιες διαφορές στην παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της αναζήτησης του ΣΜΙ, 3.17kWh ο Προτεινόμενος, 3.13kWh ο ΤΣ και 2.42 ο ΔΠ και ο ΣΑ. Τέλος, οι αλγόριθμοι ΔΠ και ΣΑ παρουσίασαν σημαντικές ταλαντώσεις κατά την αναζήτηση των ΣΜΙ, ο αλγόριθμος ΤΣ λίγες και ο Προτεινόμενος αλγόριθμος πολύ λίγες.

Πίνακας 5.7

Αποτελέσματα Αρχικής Αναζήτησης				
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 415 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 12.1 A, P_{ΣΜΙ} = 5072 W$			
Χρόνος ανύψωσης (s)	0.3	0.9	0.7	0.7
Παραγόμενη Ενέργεια (μέχρι t=1.2s)	5.32 kWh	5.04 kWh	5.04 kWh	5.04 kWh
Αποτελέσματα Αναζήτησης Υπό Συνθήκες Μερική Σκίαση				
Σημείο Μέγιστης Ισχύος:	$V_{PV,ΣΜΙ} = 289 V, I_{PV,ΣΜΙ} = 13 A, P_{ΣΜΙ} = 3766 W$			
Εύρεση ΣΜΙ	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
Απόκλιση από ΣΜΙ	0	0	1393W	1393W
Συνολικός Χρόνος εύρεσης ΣΜΙ (s)	0.25	0.25	-	-
Παρ. Ενέργεια κατά τη Σκίαση*	3.17 kWh	3.13 kWh	2.42 kWh	2.42 kWh
Συνολικά Αποτελέσματα				
Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια	8.49 kWh	8.17 kWh	7.46 kWh	7.46 kWh
Ταλαντώσεις	Ελάχιστες	Λίγες	Πολλές	Πολλές

*Από t=1.2s που ξεκινάνε οι συνθήκες μερικής σκίασης μέχρι t=2s.

5.9 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μοντελοποίηση του φ/β κυττάρου, των πλαισίων, του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, με την χρήση του λογισμικού Simulink[®]/Matlab[®]. Ακόμη, μοντελοποιήθηκε η φ/β συστοιχία που θα εξετασθεί και οι συνθήκες μερικής σκίασης της. Επίσης, αναπτύχθηκαν σύντομα και αξιολογήθηκαν οι αλγόριθμοι Διαταραχής και Παρατήρησης και Στοιχειώδης Αγωγιμότητας και αναλυτικότερα μελετήθηκε ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημείας. Ο τρόπος λειτουργίας των αλγορίθμων προσομοιώθηκε και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα του Προτεινόμενου αλγορίθμου.

6.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε μοντέλο μιας τεχνικής ελέγχου για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Αρχικά, έγινε μια κατηγοριοποίηση των τεχνικών ελέγχου της βιβλιογραφίας σύμφωνα με τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν και σύμφωνα με τις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας που λειτουργούν. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα, αναλύθηκαν οι αλγόριθμοι για την αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος για λειτουργία υπό ομοιόμορφες συνθήκες ηλιοφάνειας. Επίσης, αφού περιγράφηκε το φαινόμενο της μερικής σκίασης, το οποίο δημιουργεί πολλαπλά μέγιστα στην καμπύλη ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναπτύχθηκαν οι αλγοριθμικές, οι αρχιτεκτονικές, οι κυκλωματικές και οι τοπολογικές τεχνικές αναζήτησης του ολικού μέγιστου για λειτουργία υπό αυτές τις συνθήκες.

Η καρδιά της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση του ελεγκτή δύο σταδίων για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος υπό συνθήκες μερικής σκίασης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου βασίζεται στην τεχνική ελέγχου της Γραμμικής Εξίσωσης Φορτίου, όπου μια γραμμική εξίσωση της τάσης συναρτήσει του ρεύματος μεταφέρει τη λειτουργία του συστήματος κοντά στην περιοχή του σημείου μέγιστης ισχύος, και το δεύτερο στάδιο αποτελείται από τον αλγόριθμο Στοιχειώδους Αγωγιμότητας, που αναλαμβάνει την ακριβή εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.

Επίσης, αναπτύχθηκε μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος, με τη χρήση του λογισμικού Simulink[®]/Matlab[®], για την προσομοίωση της λειτουργίας του παραπάνω αλγορίθμου, καθώς και των αλγορίθμων Διαταραχής και Παρατήρησης, Στοιχειώδους Αγωγιμότητας και ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημαίας σε πραγματικό σύστημα, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του πρώτου.

Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα για κάθε έναν από τους τέσσερις αλγόριθμους και για συγκεκριμένη μεταβολή στο επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και στον τρόπο σκίασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

6.2 Συμπεράσματα Εργασίας

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε συνδυασμό με τη βιβλιογραφική έρευνα είναι τα παρακάτω:

- Ο Προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος υπό τις παραπάνω συνθήκες μερικής σκίασης, το ίδιο και ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημαίας. Αντιθέτως, οι αλγόριθμοι Διαταραχής και Παρατήρησης και Στοιχειώδους Αγωγιμότητας αποτυγχάνουν. Μάλιστα, οι δύο πρώτοι βρίσκουν το σημείο μέγιστης ισχύος στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα των 0.25s και κατά την αναζήτηση του παράγουν περίπου την ίδια ενέργεια των 3.17 kWh και 3.13 kWh, αντίστοιχα.
- Ο Προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει ελάχιστες ταλαντώσεις στην ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος τόσο κατά τη διάρκεια της αρχικής αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος, όσο και στην αναζήτηση υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Η ισχύς εξόδου του αλγορίθμου Τοποθέτησης Σημαίας ταλαντώνεται πολύ λίγο, ενώ οι αλγόριθμοι Στοιχειώδους Αγωγιμότητας και Διαταραχής και Παρατήρησης προκαλούν αρκετές ταλαντώσεις.
- Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος προσεγγίζει πολύ γρήγορα το σημείο μέγιστης ισχύος κατά την αρχική αναζήτηση. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι Τοποθέτησης Σημαίας, Διαταραχής και Παρατήρησης και Στοιχειώδους Αγωγιμότητας υστερούν σημαντικά, βρίσκοντας το σημείο μέγιστης ισχύος σε 0.9s, 0.7s και 0.7s αντίστοιχα, έναντι 0.3s του

Προτεινόμενου. Αυτό έχει, επίσης, ως αποτέλεσμα η παραγόμενη ενέργεια του πρώτου, κατά την αρχική αναζήτηση, να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τους υπόλοιπους.

- Ο Προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιώνει σημαντικά τον αλγόριθμο Στοιχειώδους Αγωγιμότητας τόσο κατά την αρχική αναζήτηση, αλλά κυρίως κατά την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος υπό συνθήκες μερικής σκίασης.

- Ο Προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα απλός στην υλοποίηση του. Πιο συγκεκριμένα, απαιτεί τις ίδιες κυκλωματικές διατάξεις, μικροεπεξεργαστή και αισθητήρες όπως ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης, που είναι ο πλέον απλός στην υλοποίηση του. Επίσης, η πολυπλοκότητα του Προτεινόμενου είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτήν του αλγορίθμου Διαταραχής και Παρατήρησης, αναλογιζόμενη τη μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας του πρώτου.

- Ο Προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να αποτύχει στην εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος όταν αυτό δε βρίσκεται κοντά στο σημείο τομής της γραμμικής εξίσωσης με τη V-I χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού συστήματος.

- Ο αλγόριθμος Τοποθέτησης Σημείας μπορεί να αποτύχει να βρει το σημείο μέγιστης ισχύος όταν η σκίαση γίνεται σταδιακά, διότι κατά τη διάρκεια της αναζήτησης του μπορεί νέα μέγιστα να δημιουργηθούν στην περιοχή την οποία είχε κάνει αναζήτηση.

6.3 Συμβολή Εργασίας

Οι κύριοι άξονες συμβολής της παρούσας εργασίας στην προαγωγή της επιστήμης είναι οι παρακάτω:

- Αξιολόγηση ενός αλγορίθμου δύο σταδίων για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας υπό συγκεκριμένο τρόπο σκίασης της.

- Βελτιστοποίηση του αλγορίθμου Στοιχειώδους Αγωγιμότητας για την επιτυχή εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος υπό συνθήκες μερικής σκίασης, μέσω της προσθήκης ενός νέου σταδίου αναζήτησης.

6.4 Προτεινόμενα Θέματα προς Μελέτη

Η ενασχόληση με την παρούσα έρευνα ανέδειξε κάποια επιπλέον θέματα που ενδεχομένως να προτείνονται για περαιτέρω μελέτη. Αυτά έχουν ως εξής:

- Εξέταση της λειτουργίας των κυκλωματικών τεχνικών υπό συνθήκες μερικής σκίασης, με χρήση κλασσικών αλγορίθμων ελέγχου για τον υπολογισμό του σημείου μέγιστης ισχύος.

- Οικονομική αξιολόγηση κάποιων πιο αποτελεσματικών τεχνικών ελέγχου σε σχέση με τον εμπορικά δημοφιλή αλγόριθμο Διαταραχής και Παρατήρησης, ώστε να γίνει οικονομική εκτίμηση των πραγματικών κερδών που αποκομίζει ο χρήστης, στην περίπτωση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων όπου η μερική σκίαση είναι αναπόφευκτη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. H. R. Enslin, M. S. Wolf, D. B. Snyman and W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 6, pp. 769-773, December 1997.
- [2] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1689-1698, April 2008.
- [3] R. Bruendinger, B. Bletterie, M. Milde and H. Oldenkamp, "Maximum power point tracking performance under partially shaded PV array conditions," in *21st Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC)*, Dresden, Germany, Sep. 2006.
- [4] K. Kobayashi, I. Takano and Y. Sawada, "A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions," *Solar Energy Mater. Solar Cells*, vol. 90, pp. 2975-2988, Nov 2006.
- [5] J. Young-Hyok, J. Doo-Yong, W. Chung-Yuen, L. Byoung-Kuk and K. Jin-Wook, "A real Maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1001-1009, Apr 2011.
- [6] O. Wasyncuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, pp. 3031-3037, Sept 1983.
- [7] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, I. Choy, H. J. Song and G. S. Kim, "A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms," in *Conf. Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2002.
- [8] L. L. Buciarelli, B. L. Grossman, E. F. Lyon and N. E. Rasmussen, "The energy balance associated with the use of a MPPT in a 100 kW peak power system," in *IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 1980.
- [9] W. Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *35th Annual IEEE Power Electron. Specialists Conf.*, pp. 1957-1963, 2004.
- [10] Y. C. Kuo, J. T. Liang and J. F. Chen, "Novel maximum power point tracking controller for photovoltaic energy conversion system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, pp. 594-601, June 2001.
- [11] G. W. Hart, H. M. Branz and C. H. Cox, "Experimental tests of open loop maximum power point tracking techniques," *Solar Cells*, vol. 13, pp. 185-195, 1984.
- [12] M. A. S. Masoum, H. Dehbonei and E. F. Fuchs, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current based maximum power point tracking," *IEEE*

Trans. Energy Conversion, vol. 17, pp. 514-522, Dec 2002.

- [13] T. Noguchi, S. Togashi and R. Nakamoto, "Short-current pulse based adaptive maximum power point tracking for photovoltaic power generation system," in *Proc. 2000 IEEE International Symp. on Ind. Electron.*, pp. 157-162, 2000.
- [14] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, "Neural network based maximum power point tracking of coupled inductor interleaved boost converter supplied PV system using fuzzy controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, pp. 749-758, Aug 2003.
- [15] K. Ro and S. Rahman, "Two-loop controller for maximizing performance of a grid-connected photovoltaic-fuel cell hybrid power plant," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 13, pp. 276-281, Sept 1988.
- [16] Y. H. Lim and D. C. Hamill, "Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays," *Electron Lett*, vol. 36, pp. 997-999, May 2000.
- [17] M. Bodur and M. Ermis, "Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels," in *Proc. 7th Mediterranean Electrotechnical Conf.*, pp. 758-761, 1994.
- [18] T. Kitano, M. Matsui and H. D. Xu, "Power sensor-less MPPT control scheme utilizing power balance at DC link system design to ensure stability and response," in *27th Annual Conf. of the IEEE Ind. Electron. Society*, pp. 1309-1314, 2001.
- [19] J. Arias, F. F. Linera, J. Martin-Ramos, A. M. Pernia and J. Cambroner, "A modular PV regulator based on microcontroller with maximum power point tracking," in *Conf. Record of the 2004 IEEE Ind. Applicat. Conf*, pp. 1178-1184, 2004.
- [20] S. J. Chiang, K. T. Chang and C. Y. Yen, "Residential photovoltaic energy storage system," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 45, pp. 385-394, June 1998.
- [21] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, pp. 439-449, June 2007.
- [22] L. Shuhui and Z. Huiying, "Energy extraction characteristic study of solar photovoltaic cells and modules," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pp. 1-7, July 2011.
- [23] S. Dezso and B. Yahia, "On the impact of partial shading on PV output power," *2nd WSEAS/IASME International Conference on Renewable Energy Sources (RES'08)*, October 2008.
- [24] T. L. Nguyen and K. S. Low, "A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 2, no. 2, pp. 184-190, Oct 2010.
- [25] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 2, no. 2, pp.

184-190, Apr 2012.

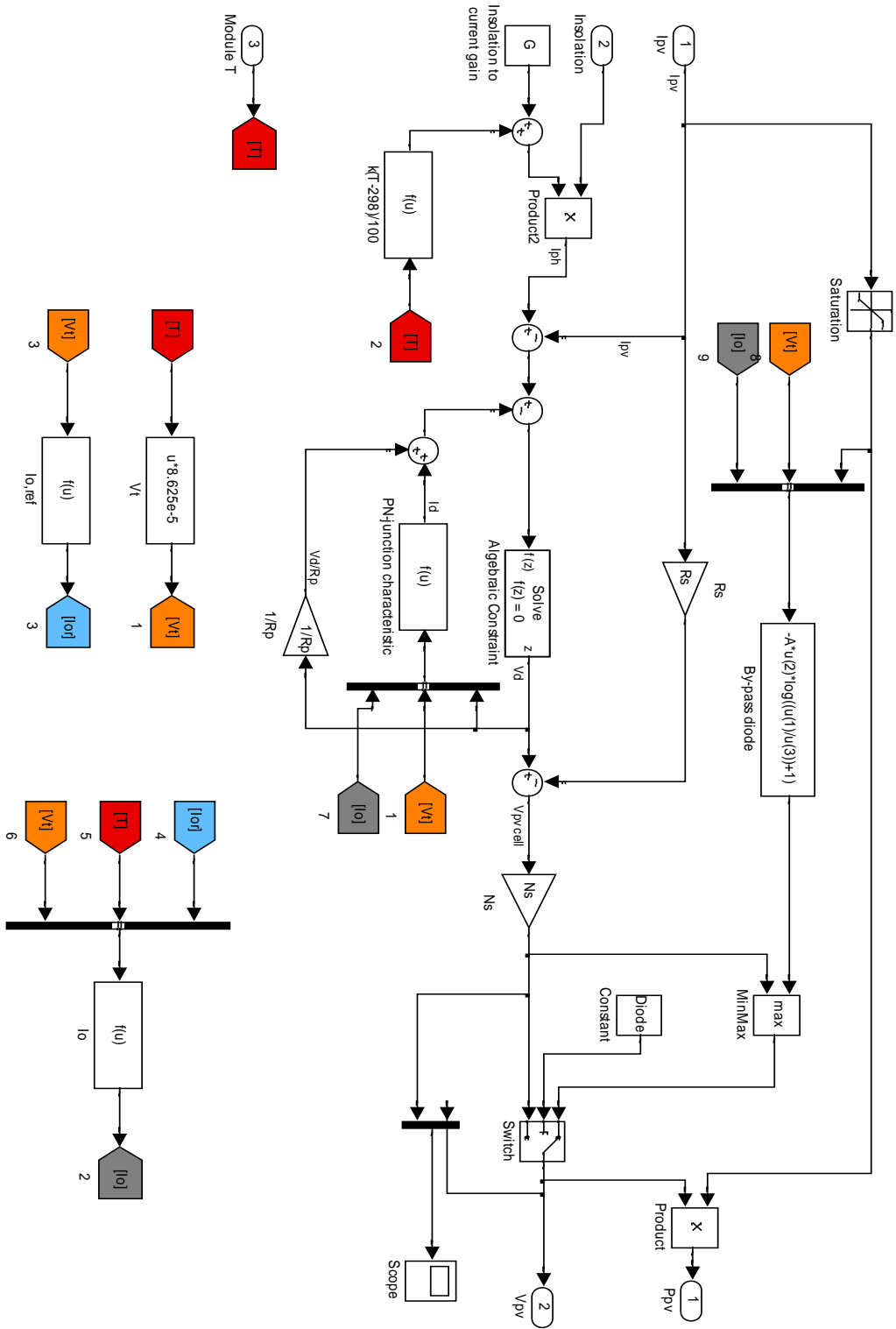
- [26] M. Miyatake, M. Veerachary, F. Toriumi, N. Fujii and H. Ko, "Maximum Power point tracking of multiple photovoltaic arrays: A PSO approach," *IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 367-380, Jan 2011.
- [27] N. Mutoh, M. Ohno and T. Inoue, "A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1055-1065, Apr 2006.
- [28] M. Miyatake, T. Inada, I. Hiratsuka, Z. Hongyan, H. Otsuka and M. Nakano, "Control characteristics of a fibonacci-search-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded," in *Proc. Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 816-821, 2004.
- [29] D. D. Nguyen, B. Lehman and S. Kamarthi, "Solar photovoltaic array's shadow evaluation using neural network with on-Site measurement," in *Proc. Electr. Power Conf.*, pp. 44-49, 2007.
- [30] D. Dzung and B. Lehman, "An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2644-2654, Jul 2008.
- [31] S. V. Dhople, J. L. Ehlmann, A. Davoudi and P. L. Chapman, "Multiple input boost converter to minimize power losses due to partial shading in photovoltaic modules," in *Proc. Energy Convers. Congr. Expo.*, 2010.
- [32] S. Busquets-Monge, J. Rocabert, P. Rodriguez, S. Alepuz and J. Bordonau, "Multilevel diode-clamped converter for photovoltaic generators with independent voltage control of each solar array," *IEEE Trans. Ind.*, vol. 55, no. 7, pp. 2713-2723, July 2008.
- [33] T. Mishima and T. Ohnishi, "A power compensation and control system for a partially shaded PV array," *Electr. Eng. Jpn.*, vol. 146, pp. 74-82, Sep 2004.
- [34] T. Shimizu, M. Hirakata, T. Kamezawa and H. Watanabe, "Generation control circuit for photovoltaic modules," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 3, pp. 293-300, May 2001.
- [35] E. Roman, V. Martinez, J. C. Jimeno, R. Alonso, P. Ibanez and S. Elorduizapatarietxe, "Experimental results of controlled PV module for building integrated PV systems," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 471-480, May 2008.
- [36] Q. Chen and M. Zhu, "Photovoltaic Module Simulink Model for a Stand-alone PV System," *Physics Procedia*, vol. 24, pp. 94-100, 2012.
- [37] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, Inc.
- [38] A. Woyte, J. Nijs and R. Belmans, "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results," *Solar Energy*, vol. 74, pp. 217-

233, Apr 2003.

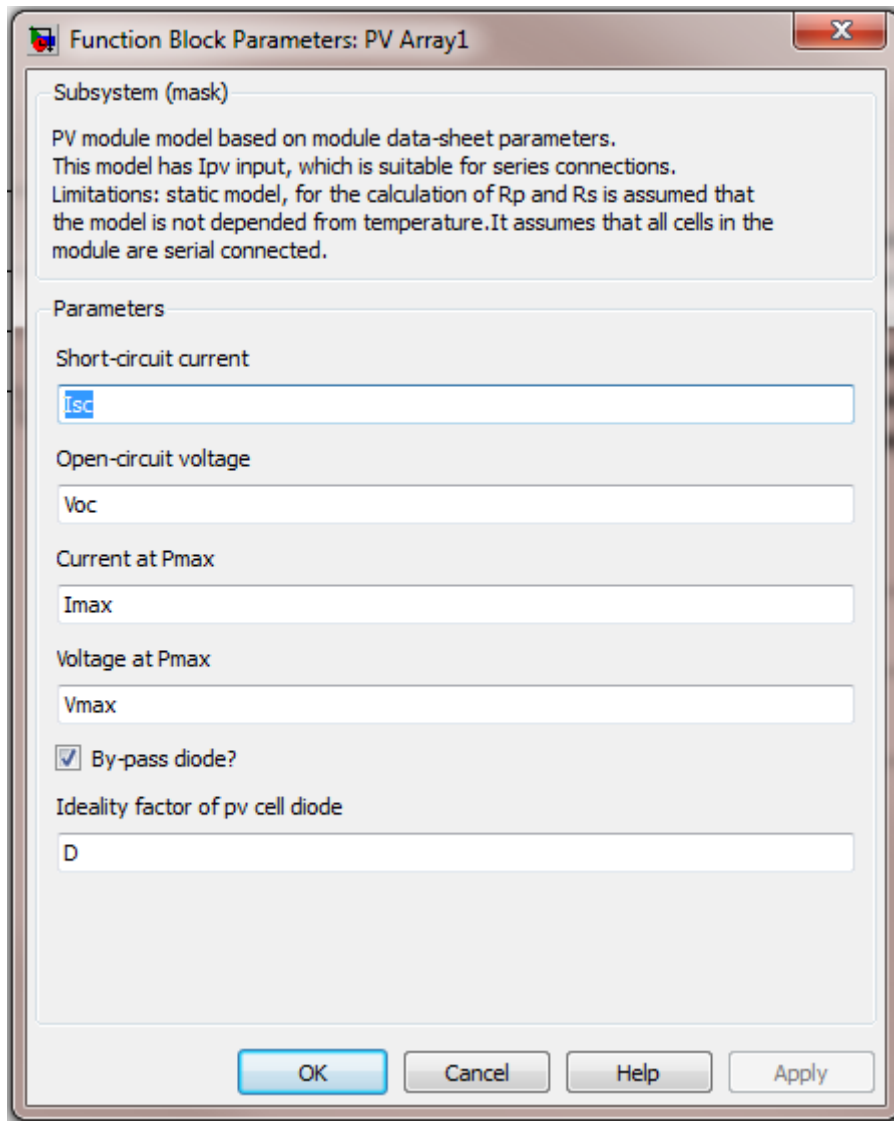
- [39] B. Bletterie and R. Bruendinger, "Quantifying dynamic MPPT performance under realistic conditions-First test results: The way forward," in *Proc. 21st Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhib*, Dresden, Germany, Sep. 2006.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

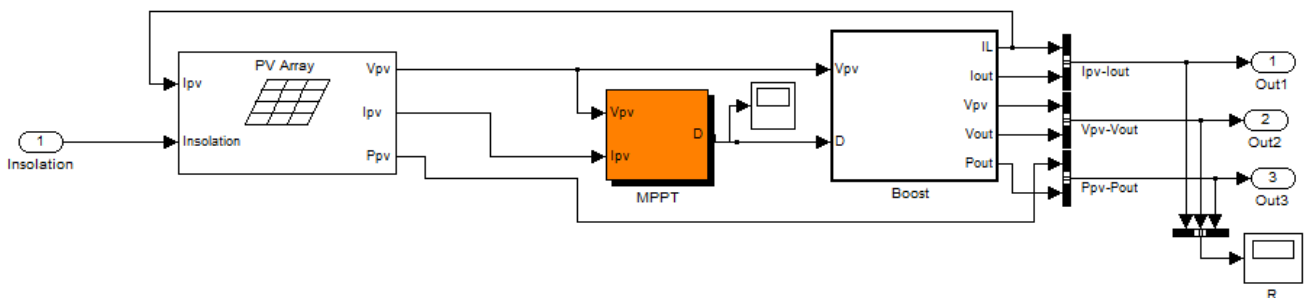
Μοντέλο φ/β πλαισίου.



Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου ως παράμετροι εισόδου.



Μοντέλο φ/β συστήματος.



Κώδικας Προτεινόμενου αλγορίθμου

```
function Prop = Proposed(IV)

global Io1;
global Vo1;
global vr1;
global f;
global k;
global Pmax;
global DPmax;
global Im1;
global Vm1;
global dv;

if IV(3)==1
    Io1=0;
    Vo1=0;
    Pmax=0;
    f=0;
    k=0;
    vr1=0;
end

%%%%%%%%%%%% Algorithm Parameters %%%%%%%%%%
DPcrit=-50;
C=-100;

%%%%%%%%%%%% Calculations %%%%%%%%%%

dI=IV(1)-Io1;
dV=IV(2)-Vo1;
l=IV(1)/IV(2);
dd=dI/dV;

%%%%%%%%%%%%%% Max %%%%%%%%%%%%%%%
if IV(1)*IV(2)>Pmax
    Pmax=IV(1)*IV(2);
    Im1=IV(1);
    Vm1=IV(2);
end

DPmax=IV(1)*IV(2)-Pmax;

if k==10
    Pmax=0;
end

%***** STAGE 1*****
if DPmax<DPcrit && k>10

    disp('Proposed PSC at time');f
    vr1=Vm1/Im1*IV(1)+C;
    k=0;

%*****STAGE 2*****
```



```
elseif dV==0
    if dI==0
        vr1=vr1;
    elseif dI>0
        vr1=vr1+dv;
    else
        vr1=vr1-dv;
    end
else
    if dd+1==0
        vr1=vr1;
    elseif dd>-1
        vr1=vr1+dv;
    else
        vr1=vr1-dv;
    end
end

Io1=IV(1);
Vo1=IV(2);
f=f+1;
k=k+1;

Prop = vr1;
end
```