



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

**Σύγκριση Αλγορίθμων MPPT για Φωτοβολταϊκά
Συστήματα σε Συνθήκες Μερικής Σκίασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καλομοίρης Δ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων

Σταύρος Παπαθανασίου, Αν. Καθηγητής

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σύγκριση Αλγορίθμων ΜΡΡΤ για Φωτοβολταϊκά
Συστήματα σε Συνθήκες Μερικής Σκίασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καλομοίρης Δ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων

Σταύρος Παπαθανασίου, Αν. Καθηγητής

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την^η Ιουλίου 2017.

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

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....
ΚΑΛΟΜΟΙΡΗΣ Δ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

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

Copyright © ΚΑΛΟΜΟΙΡΗΣ Δ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται το ζήτημα του ελέγχου φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων σε συνθήκες μερικής σκίασης, με τη χρήση αλγορίθμων MPPT (Maximum Power Point Tracking). Πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων οι οποίες έχουν δημιουργηθεί έως σήμερα, ενώ στη συνέχεια επιλέγονται, προσομοιώνονται και συγκρίνονται έξι από αυτές, σε τρία πρότυπα σενάρια σκίασης. Είναι η πρώτη εργασία στη βιβλιογραφία που παρουσιάζει μεθοδευμένη και τεκμηριωμένη σύγκριση αλγορίθμων MPPT σε συνθήκες σκίασης σε βάση προσομοιώσεων.

Αρχικά, παρουσιάζεται πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση των αλγορίθμων MPPT. Ο διαχωρισμός των μεθόδων έγινε σε βάση η οποία περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες: τους ντετερμινιστικούς και τους ευριστικούς αλγόριθμους, και υποκατηγορίες μικρότερης κλίμακας. Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση διευκολύνει τη μελέτη των αλγορίθμων, ενώ αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται και αναλύεται το μοντέλο λειτουργίας των τριών σταδίων, το οποίο ακολουθείται από την πλειοψηφία των μεθόδων.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα κριτήρια επιλογής των αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση, ενώ γίνεται ενδελεχής μελέτη όλων των επιμέρους χαρακτηριστικών τους. Για το λόγο αυτό δίνονται λεπτομερή διαγράμματα ροής για την κάθε μέθοδο, τα οποία συνοδεύονται από επεξηγηματικά γραφήματα για ένα επιτυχημένο και ένα αποτυχημένο σενάριο λειτουργίας τους. Έτσι, καλύπτεται πλήρως το κομμάτι της κατανόησης της δομής τους, ώστε να συγκριθούν με επιτυχία στη συνέχεια.

Επιπλέον, οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι MPPT δοκιμάζονται σε τρία πρότυπα και ρεαλιστικά σενάρια σκίασης. Τα συγκεκριμένα σενάρια παρουσιάζονται λεπτομερώς ξεχωριστά, ενώ αμέσως μετά δίνονται, για το καθένα, τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του κάθε αλγορίθμου σε αυτά. Εξετάζονται χαρακτηριστικά όπως η απόδοση MPPT, η ταχύτητα σύγκλισης και η μέγιστη διακύμανση ισχύος των αλγορίθμων στο κάθε σενάριο. Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά συγκριτικά γραφήματα για όλους τους αλγορίθμους MPPT και εξάγονται πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την αποδοτικότητα των μεθόδων σε συνάρτηση με τις συνθήκες σκίασης.

Τέλος, γίνεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων που έχουν προκύψει για τον κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά, γενικεύοντας σε ορισμένα σημεία, ανάλογα με τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά μερικών. Προτείνεται η βέλτιστη λύση ελέγχου ενός υπό-μελέτη ΦΒ συστήματος με βάση τα χαρακτηριστικά του χώρου εγκατάστασης και τις απαιτήσεις του δικτύου, ενώ προτείνονται θέματα για περαιτέρω μελέτη του ερευνητικού αντικειμένου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αλγόριθμος MPPT, σύγκριση, βιβλιογραφική ανασκόπηση, σενάρια σκίασης, μερική σκίαση, σημείο μέγιστης παραγωγής (MPP), φωτοβολταϊκό (ΦΒ) σύστημα.

ABSTRACT

This diploma thesis contributes to the control of photovoltaic (PV) systems under partial shading conditions, using MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms. There is a bibliography review of all the methods that have been proposed to date, while six of them are selected, simulated and compared to three shadow scenarios. It is the first bibliographic work that presents methods and documented comparisons of MPPT algorithms in shadowing conditions based on simulations.

Firstly, complete bibliography review of the MPPT algorithms is presented. The methods are separated into two basic categories: the deterministic and the heuristic ones, and into lower scale sub-categories. This specific categorization facilitates the study of the MPPT algorithms and emphasizes the pros and the cons of each. Furthermore, the analytical operation model of the three stages, which is used by the majority of the algorithms, is presented.

Subsequently, the criteria of selection of the six compared MPPT algorithms are analyzed, while all the individual characteristics of them are thoroughly investigated. For this reason, detailed flowcharts are given for each method, which are accompanied with illustrative graphics for one successful and one unsuccessful scenario of them. In this way, the understanding of the structure of the algorithms is fully covered in order to compare them successfully afterwards.

Thereafter, the selected six MPPT methods are simulated into three realistic shading scenarios. The characteristics of these scenarios and the results of the application of each MPPT algorithm to them are analytically presented. This analysis includes elements of the simulations like: the MPPT efficiency of each method, the convergence speed and the maximum power fluctuation for each shading scenario. Aggregated comparative graphics are presented and very interesting conclusions are drawn for the performance of the MPPT algorithms depending on the shading conditions.

Finally, a summary of the conclusions which have been drawn for each algorithm is presented, whereas a general conjecture is made in some points depending on the objective characteristics of some algorithms. The optimal control solution of a PV system under construction is proposed, based on the characteristics of the installation place and the requirements of the electronic grid, while new subjects for further study of the research object are introduced.

KEYWORDS

MPPT algorithm, comparison, bibliography review, shading scenarios, partial shading, maximum power point (MPP), photovoltaic (PV) system

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως επίσης και για την απαραίτητη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της.

Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Δρ. Στρατή Μπατζέλη για την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η συμβολή του σε καίρια ζητήματα που προέκυψαν ήταν στοχευμένη και με διδακτικό χαρακτήρα και κατέστησε δυνατή την περάτωσή της εργασίας.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδελφό μου που είναι αρωγοί στις προσπάθειές μου όλα αυτά τα χρόνια, όπως επίσης και όλους τους φίλους και συναδέλφους μου που με έχουν στηρίξει.

Αφιερώνεται στους γονείς μου,

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή..... 1

1.1	Ιστορική Αναδρομή.....	2
1.2	Αρχή λειτουργίας Φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	3
1.2.1	Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών.....	5
1.3	Κυριότερες ΦΒ διατάξεις.....	6
1.3.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου-στοιχείων.....	7
1.4	Σκοπός και Πρωτοτυπία της Διπλωματικής.....	9
1.5	Δομή της Εργασίας.....	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Μοντελοποίηση, Λειτουργία, Έλεγχος..... 11

2.1	Το μοντέλο των πέντε παραμέτρων.....	12
2.1.1	Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V.....	12
2.1.2	Επέκταση ανάλυσης σε ΦΒ συστοιχία.....	14
2.2	Επίδραση της σκίασης στην απόδοση του ΦΒ συστήματος.....	15
2.2.1	Γενικά περί σκίασης.....	16
2.2.2	Ηλεκτρική απόκριση σε συνθήκες σκίασης.....	16
2.3	Μετατροπέας Ισχύος ΦΒ συστήματος.....	18
2.3.1	DC/DC Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter).....	19
2.3.2	Αλγόριθμοι MPPT.....	22
2.4	Μοντέλο προσομοιώσεων.....	23
2.4.1	Το κύκλωμα ισχύος του μοντέλου.....	24
2.4.2	Το κύκλωμα ελέγχου του μοντέλου.....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση αλγορίθμων MPPT..... 27

3.1	Εισαγωγή.....	28
3.2	Ντετερμινιστικοί Αλγόριθμοι MPPT(Deterministic MPPT Algorithms).....	33
3.2.1	Μέθοδοι MPPT στηριζόμενες σε εμπειρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών του συστήματος(System Characteristic Curve MPPT Methods-SCCMM).....	34
3.2.2	Μέθοδοι MPPT περιορισμένης σάρωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V(Restricted Scan MPPT Methods-RSMM).....	36
3.2.3	Μέθοδοι MPPT διαχωρισμού της χαρακτηριστικής P-V σε τμήματα με μαθηματικές ή άλλες μεθόδους(Segmental Search MPPT Methods-SSMM).....	40
3.3	Ευριστικοί Αλγόριθμοι MPPT(Heuristic MPPT Algorithms).....	43
3.3.1	Νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks).....	43
3.3.2	Βελτιστοποίηση Ασαφούς Λογικής(Fuzzy Logic Controller Optimization-FLC)	46

3.3.3	Η τεχνική της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων(Particle Swarm Optimization-PSO).....	50
3.3.4	Η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων(Genetic Algorithms-GA).....	55
3.4	Άλλες μέθοδοι MPPT.....	59
3.4.1	Μέθοδος ελέγχου ακραίας αναζήτησης MPPT(Extreme seeking control method-ESC).....	59
3.4.2	Μέθοδος MPPT προβλεπτικού ελέγχου(Model predictive control MPPT method-MPC).....	60
3.5	Συγκεντρωτική συγκριτική μελέτη αλγορίθμων MPPT και συμπεράσματα.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ανάλυση των επιλεγμένων αλγορίθμων MPPT..... 64

4.1	Επιλογή αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση.....	65
4.2	Αναλυτική παρουσίαση των επιλεγμένων Αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση..	66
4.2.1	Ο αλγόριθμος των Patel, Agarwal.....	66
4.2.2	Ο αλγόριθμος των Tey, Mekhilef.....	69
4.2.3	Ο αλγόριθμος των Kouchaki, Iman-Eini, Asaei.....	71
4.2.4	Ο αλγόριθμος των Bozterpe, Guinjoan, Quesada, Silvestre, Chouder, Karatepe.....	74
4.2.5	Ο αλγόριθμος των Qi, Zhang, Chen.....	78
4.2.6	Ο αλγόριθμος των Μπατζέλη, Παπαθανασίου.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων..... 84

5.1	Πρώτο Σενάριο σκίασης: Σενάριο ανοικτού χώρου.....	85
5.1.1	Ανάλυση του σεναρίου σκίασης ανοικτού χώρου.....	85
5.1.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.....	88
5.1.3	Συνοπτική σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.....	104
5.2	Δεύτερο σενάριο σκίασης: Σενάριο σκίασης οροφής.....	105
5.2.1	Ανάλυση του σεναρίου σκίασης οροφής.....	105
5.2.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης οροφής	109
5.3	Τρίτο σενάριο σκίασης: Σενάριο κινούμενου σύννεφου.....	118
5.3.1	Ανάλυση του σεναρίου σκίασης κινούμενου σύννεφου.....	118
5.3.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.....	121
5.4	Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα τρία σενάρια σκίασης.....	134
5.4.1	Η απόδοση MPPT των αλγορίθμων.....	134
5.4.2	Ο χρόνος σύγκλισης των αλγορίθμων MPPT.....	136

5.4.3	Η μέγιστη τιμή διακύμανσης ισχύος κατά το τρίτο στάδιο λειτουργίας των αλγορίθμων MPPT	137
-------	--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα 139

6.1	Σύνοψη Συμπερασμάτων και σημείων καινοτομίας.....	140
6.1.1	Τα τρία στάδια λειτουργίας	140
6.1.2	Διαχωρισμός των αλγορίθμων MPPT σε υποκατηγορίες.....	140
6.1.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Αλγορίθμων MPPT	140
6.1.4	Η επιλογή των αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση	141
6.1.5	Τα τρία σενάρια σκίασης.....	141
6.1.6	Αξιολόγηση συγκρινόμενων αλγορίθμων MPPT.....	141
6.1.7	Επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου MPPT για ένα υπό-μελέτη ΦΒ σύστημα	144
6.2	Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	145
6.2.1	Πειραματική επιβεβαίωση των εξεταζόμενων αλγορίθμων MPPT και αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες	146
6.2.2	Σαφής προσδιορισμός και εντοπισμός της σκίασης	146
6.2.3	Βελτίωση του σταδίου αναζήτησης του GMPP	146
6.2.4	Υλοποίηση και αξιολόγηση ευριστικών αλγορίθμων MPPT	146
6.2.5	Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά σύγκρισης των αλγορίθμων	146
6.2.6	Επέκταση της μελέτης και ανάλυσης των σεναρίων σκίασης.....	147

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Στις μέρες μας, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) αναπτύσσεται ραγδαία και αποτελεί μια σημαντική εναλλακτική προσέγγιση στην παραγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές που αποτελούνται κυρίως από ορυκτά καύσιμα. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογία των ΦΒ συστημάτων αποτελεί μια από τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς οι πρώτες ΦΒ διατάξεις έκαναν την εμφάνισή τους τη δεκαετία του 1960 [1].

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φαινόμενο δηλαδή κατά το οποίο η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική με τη χρήση ηλιακών κυψελών (solar cells), παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από το φυσικό Edmond Becquerel κατά τη διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν οι Adams και Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παράγονταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το πρώτο ηλιακό στοιχείο πυριτίου κατασκευάστηκε στα εργαστήρια της Bell από τους Chapmin, Fuller και Pearson το 1954. Η απόδοσή του ήταν μόλις 6%, ενώ σύντομα έφτασε το 10% [1].

Όπως προαναφέρθηκε, πάντως, η έρευνα και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων έλαβε την πρώτη μεγάλη ώθηση της τη δεκαετία του 1960, όταν τα ΦΒ χρησιμοποιήθηκαν στη διαστημική βιομηχανία που απαιτούσε τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας μακριά από την εξάρτηση του ηλεκτρικού δικτύου για δορυφορικές εφαρμογές. Βέβαια, οι ηλιακές κυψέλες που χρησιμοποιήθηκαν τότε δεν είχαν καμία σχέση με τις σημερινές και ήταν πολύ πιο ακριβές. Η ανάγκη για τη χρήση ΦΒ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα διοχετευόταν στο ηλεκτρικό διασυνδεδεμένο δίκτυο, απείχε μόλις μια δεκαετία [1].

Η πετρελαϊκή κρίση του 1970, καθώς και οι πρώτες εμφανείς επιπτώσεις των συμβατικών πηγών ενέργειας στο περιβάλλον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι αποτελούσε επιτακτική ανάγκη η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας των εναλλακτικών πηγών ενέργειας [1].

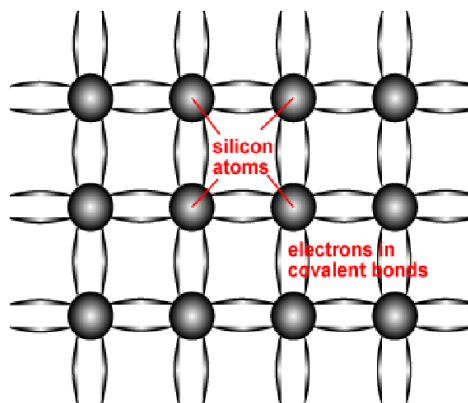
Παρά το γεγονός ότι η πετρελαϊκή κρίση αποδείχτηκε βραχύβια και το οικονομικό κίνητρο για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών πλέον δεν υπήρχε, αυτά είχαν εδραιωθεί ως μια νέα, ιδιαίτερα υποσχόμενη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας [1].

Τη δεκαετία του 1980, η έρευνα στην περιοχή των ηλιακών κυψελών πυριτίου είχε πλέον φτάσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο, με αποτέλεσμα η απόδοσή τους να αρχίσει να αυξάνεται. Το 1985 οι ηλιακές κυψέλες πυριτίου φτάνουν το ορόσημο απόδοσης του 20%. Μέσα στην επόμενη δεκαετία η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών είχε ένα σταθερό ρυθμό ανάπτυξης, κοντά στο 15% με 20%, που σε μεγάλο βαθμό προωθούνταν από τις ενεργειακές ανάγκες απομονωμένων αγορών [1].

Το 1997 ο ρυθμός ανάπτυξης έφτασε το 38%. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά αναγνωρίζονται ως μέσο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής αυτών που δεν έχουν την ευχέρεια να συνδεθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, αποτελούν μέσο σημαντικής μείωσης των βλαβερών επιπτώσεων που αποφέρουν στο περιβάλλον οι συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ανεπτυγμένες βιομηχανικές χώρες [1].

1.2 Αρχή λειτουργίας Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Διάφορες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί με προγενέστερη την κρυσταλλική, η οποία και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Η μικρότερη δομική μονάδα είναι η ΦΒ κυψέλη (ή ΦΒ στοιχείο ή ΦΒ κύτταρο), η οποία συνίσταται σε μια λεπτή φέτα πυριτίου με κατάλληλες προσμίξεις, ώστε η πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια της να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας συνεπάγεται εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στις δύο όψεις της κυψέλης της τάξης των 0,5 – 1,0 V στην ανοιχτοκύκλωση, και ροή ρεύματος της τάξης των 20 – 40 $\frac{mA}{cm^2}$ σε λειτουργία βραχυκύκλωσης [1], [2].



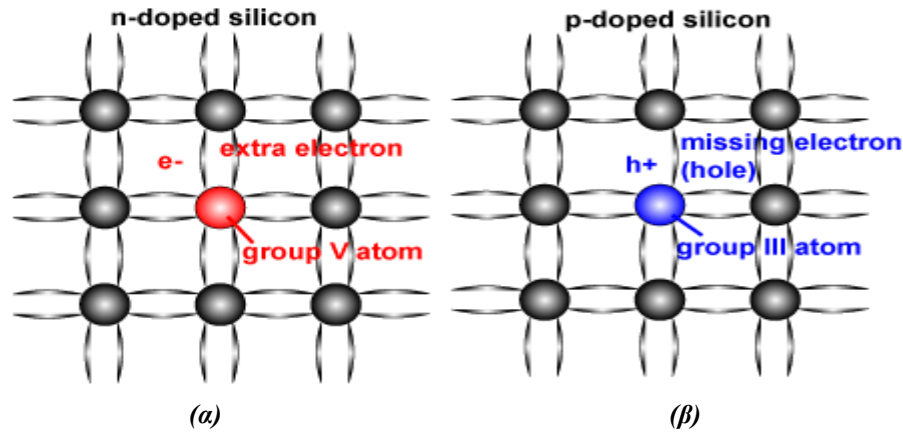
Κύριο κατασκευαστικό υλικό μιας ΦΒ κυψέλης είναι τα ημιαγωγά στοιχεία που τυπικά ανήκουν στην τέταρτη στήλη του περιοδικού πίνακα. Το πυρίτιο (Si) είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο υλικό λόγω της ευρείας διάθεσης του στη φύση αλλά και της συσσωρευμένης τεχνογνωσίας που υπάρχει για την επεξεργασία του, στον τομέα της ηλεκτρονικής. Ημιαγωγοί μπορούν, επίσης, να κατασκευαστούν από συνδυασμό υλικών από την τρίτη και πέμπτη στήλη του περιοδικού πίνακα (ημιαγωγοί III-V) ή από συνδυασμό υλικών από τη δεύτερη και έκτη στήλη του περιοδικού πίνακα (ημιαγωγοί II-VI) [3].

Για να έχει το πυρίτιο, αλλά και κάθε άλλος κρυσταλλικός ημιαγωγός, ικανοποιητικές ιδιότητες για ΦΒ και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα πυριτίου σχηματίζουν μια σταθερή τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Κάθε άτομο γειτονιάζει με 8 ηλεκτρόνια και δημιουργεί 4 ομοιοπολικούς δεσμούς (τετρασθενές στοιχείο). Τα ηλεκτρόνια των δεσμών αυτών είναι ασθενώς συγκρατημένα και απελευθερώνονται εύκολα με απορρόφηση ενέργειας, κινούμενα άτακτα στο κρύσταλλο. Τα κενά που αφήνουν πίσω τους στους ομοιοπολικούς δεσμούς αποκαλούνται 'οπές' και ισούνται σε πλήθος με τα ηλεκτρόνια σε συνθήκες σταθερής ενεργειακής κατάστασης, παρουσιάζοντας, έτσι, συνολικά ουδέτερο φορτίο. Η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στον κρύσταλλο βάζει σε τάξη την άτακτη κίνηση των φορέων, προσδίδοντας έτσι αγωγικές ιδιότητες στο υλικό [3].

Όταν στον κρύσταλλο προστεθούν προσμίξεις πεντασθενών στοιχείων (νόθευση πυριτίου), όπως το As, δημιουργούνται ασθενώς συγκρατημένα ηλεκτρόνια, τα οποία ελευθερώνονται εύκολα χωρίς να αφήνουν

III	IV	V	VI	VII	VIII
13	14	15	16	17	18
					2 He 4.003
5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
49 In 114.82	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29
81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)

πίσω τους σπές. Ένα τέτοιο υλικό καλείται αγωγός προσμίξεως τύπου n (Σχ. 1. 1) και περιέχει πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ η αντίστοιχη πρόσμιξη τρισθενών στοιχείων, όπως το B, δημιουργεί πληθώρα σπών στον κρύσταλλο και οδηγεί σε ημιαγωγό τύπου p (Σχ. 1. 1). Στο υλικό που έχει προκύψει από την πρόσμιξη (είτε p είτε n) τα ελεύθερα φορτία που μόλις περιγράφηκαν δεν έχουν κάποια καθορισμένη κατεύθυνση στην κίνηση τους [3].

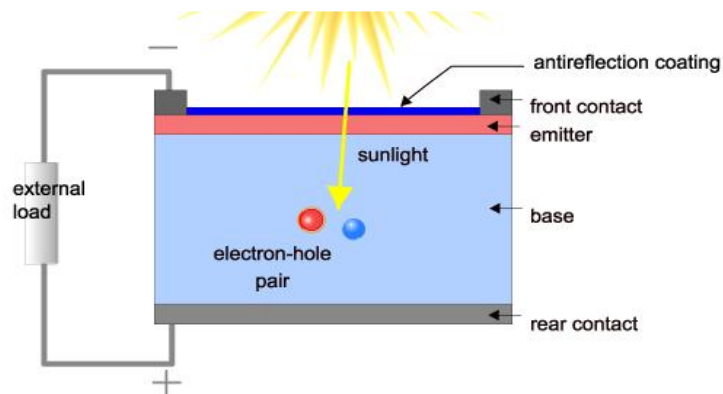


Σχ. 1. 1. Κρυσταλλική δομή του πυριτίου (α) με προσμίξεις τύπου n, (β) με προσμίξεις τύπου p [1].

Εάν οι ημιαγωγοί τύπου p και τύπου n έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, είναι δυνατόν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μιας ένωσης p-n (positive-negative). Στην ένωση αυτή, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n διαχέονται προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p. Δημιουργείται με αυτό τον τρόπο μια περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη αραίωσης (ή απογύμνωσης). Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο παραμένουν στην περιοχή n και τα αρνητικά στην p. Έτσι δημιουργείται ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον [3].

Εάν ο ημιαγωγός p-n (ΦΒ στοιχείο) εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια είναι δυνατόν να απορροφήσουν φωτόνια με επαρκή ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη διάσπαση των χημικών δεσμών και την απελευθέρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή n. Παρόμοια συμπεριφορά εκδηλώνουν οι σπές στο τμήμα p του ημιαγωγού υλικού. Η εν λόγω διαδικασία, σαν σύνολο, καλείται, όπως έχει αναφερθεί, ΦΒ φαινόμενο. Η διάχυση φορέων αγωγιμότητας στις ηλεκτρικές επαφές δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στο στοιχείο, η οποία, με την εφαρμογή εξωτερικής πηγής τάσης, προκαλεί τη ροή ρεύματος [3].

Εντούτοις, ορισμένος αριθμός ηλεκτρονίων επανασυνδέονται με σπές προτού φτάσουν στις επαφές. Το λεγόμενο μήκος διάχυσης αναφέρεται στο μέσο μήκος που διανύει ένα ηλεκτρόνιο μέχρι να επανασυνδεθεί με μία σπή. Το μήκος αυτό εξαρτάται από τη συγκέντρωση των προσμίξεων

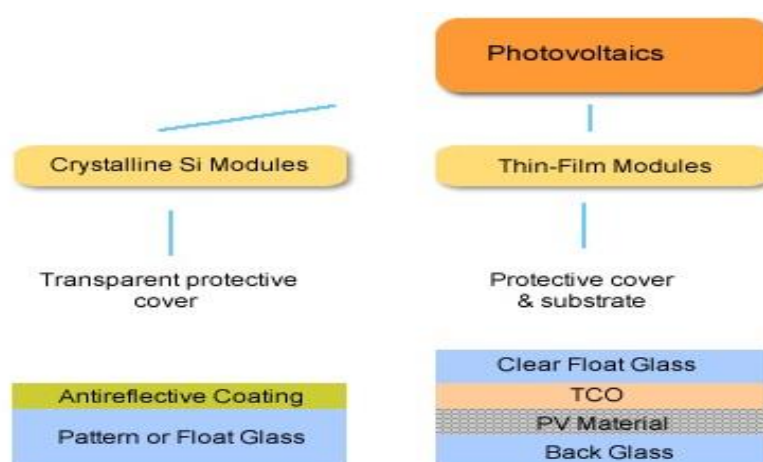


στον κρύσταλλο και προκειμένου εύλογος αριθμός φορέων αγωγιμότητας να φτάνει απερίσπαστος στις ηλεκτρικές επαφές του στοιχείου, το μήκος αυτό θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο [4], [5].

1.2.1 Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών

Η τεχνολογία των ΦΒ εκμεταλλεύτηκε τη μεγάλη πρόοδο των τεχνολογιών πυριτίου που είχαν αρχικά εφαρμοστεί στα τρανζίστορ και αργότερα στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Τα πρώτα χρόνια, χρησιμοποιούνταν μόνο στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου στις εφαρμογές των ΦΒ, που είχαν προκύψει με τη μέθοδο Czochralski (Cz). Καθώς το κόστος των στοιχείων πυριτίου αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους των εφαρμογών ΦΒ, έγιναν σημαντικές προσπάθειες μείωσής του. Αποτέλεσμα αυτών, η τεχνική χύτευσης τμημάτων (block casting), η οποία παρουσίαζε μειωμένο κόστος και είχε ως προϊόν στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Οι δύο αυτές τεχνολογίες, μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς φτάνοντας σε ποσοστό το 90% [6].

Η κρυσταλλική τεχνολογία είναι αυτή με τη μεγαλύτερη εμπορική διείσδυση μέχρι σήμερα, και η πρώτη που αναπτύχθηκε ιστορικά. Φυσικά, με τον καιρό αναπτύχθηκαν δεκάδες άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες ΦΒ, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: την κρυσταλλική (crystalline) και την τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), όπως φαίνεται στο Σχ. 1. 2.



Σχ. 1. 2. Ταξινόμηση των διαφόρων ΦΒ τεχνολογιών [6].

1.2.1.A Τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου (crystalline)

Το πιο σημαντικό υλικό στα κρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία είναι το πυρίτιο, το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στη γη μετά το οξυγόνο και, ως εκ τούτου είναι διαθέσιμο σε σχεδόν απεριόριστες ποσότητες. Πρωτογενώς, βέβαια, το πυρίτιο δε βρίσκεται στη φύση σε καθαρή μορφή, αλλά κυρίως σε χημικές ενώσεις με οξυγόνο σε μορφή χαλαζία ή άμμου. Η εξαγωγή πυριτίου σε καθαρή μορφή, απαραίτητη για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές, απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 1800 °C [7].

Θερμαίνοντας πολυπυρίτιο σε θερμοκρασία 1400 °C, με την τεχνική Czochralski (crucible drawing process), κατασκευάζονται οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες σε μορφή, συνήθως, δισκίων πάχους 0.3 mm. Η υψηλή ομοιομορφία τους τις καθιστά από τις αποδοτικότερους εκπροσώπους των ΦΒ στοιχείων, με τυπικούς βαθμούς απόδοσης 15-18%. Έχουν μορφή

στρογγυλή, ημιστρόγγυλη ή τετραγωνική ανάλογα τον τρόπο κοπής, ομοιογενή εμφάνιση, και σκούρο μπλε ή μαύρο χρώμα (γκρι χωρίς ανακλαστικό στρώμα) [7].

Αντίθετα, οι *πολυκρυσταλλικές* κυψέλες (poly-crystalline) περιλαμβάνουν στο πλέγμα τους κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών, λόγω της λιγότερο ελεγχόμενης ψύξης του πυριτίου κατά την κατασκευή, μειώνοντας έτσι αισθητά το κόστος παραγωγής. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζουν χαμηλότερες αποδόσεις της τάξης 13-16%. Συνήθως έχουν τετραγωνικό σχήμα με ευδιάκριτη ανομοιογένεια στην εμφάνιση λόγω των μεμονωμένων κρυστάλλων [7].

Η τεχνολογία *ταινιών πυριτίου* (ribbon silicon), είναι κλάδος της κρυσταλλικής που διαφοροποιείται στον τρόπο κατασκευής, επιτυγχάνοντας λεπτότερο πάχος και οικονομία σε υλικό και ενέργεια. Οι τρεις κύριες εκδοχές της είναι: EFG (Edge-Defined Film-Fed Growth), String ribbon και APex, παρουσιάζοντας βαθμούς απόδοσης 14%, 12-13% και 9.5% αντίστοιχα [7].

1.2.1.B Τεχνολογία λεπτών υμενίων (*thin film*)

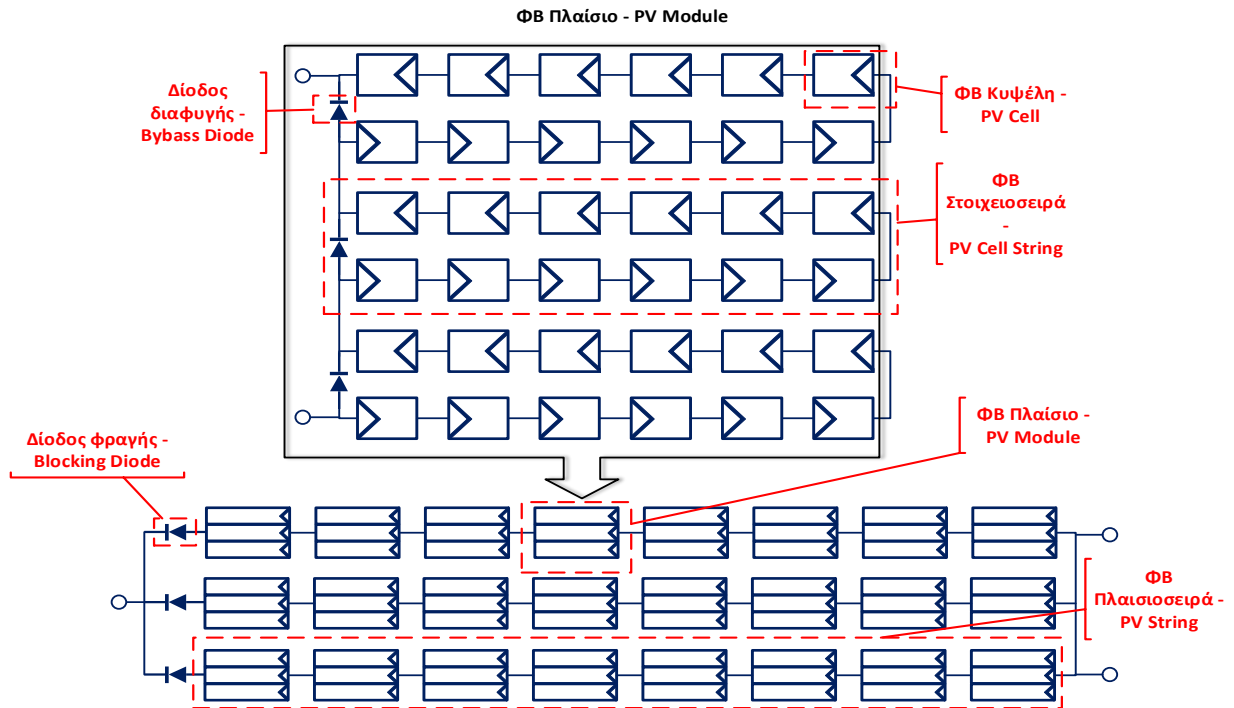
Οι κυριότερες διαφοροποιήσεις των ΦΒ πλαισίων λεπτών υμενίων σε σύγκριση με τα κρυσταλλικά, έγκειται τόσο στον τρόπο όσο και στο υλικό κατασκευής. Τα πλαίσια λεπτών υμενίων κατασκευάζονται, συνήθως, από άμορφο πυρίτιο (a-Si), από δισεληνιούχο χαλκό με ίνδιο (CIS) και από τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), ενώ εκτεταμένη έρευνα διεξάγεται για την ανεύρεση κι άλλων υλικών. Κατά την κατασκευή, το υλικό εναποτίθεται σε λεπτή ημιαγώγιμη μεμβράνη πάνω σε χαμηλού κόστους υπόστρωμα (συνήθως γυαλί), με μεθόδους όπως εναπόθεση ατμών (vapor deposition), ψεκασμό (sputter processes) ή ηλεκτρολυτικά λουτρά (electrolytic baths). Επιτυγχάνεται έτσι, πολύ μικρό πάχος της τάξης του 1 μm, ενώ η θερμοκρασία παραγωγής είναι της τάξης των 200-600 °C, σημαντικά μικρότερη των κρυσταλλικών τεχνολογιών. Οι κυψέλες λεπτών υμενίων δεν έχουν καθορισμένο σχήμα, όπως οι κρυσταλλικές, αλλά κατασκευάζονται συνήθως σε μακρόστενες λωρίδες πλάτους 0.5-2 cm και μήκους μέχρι και 1 m [7].

Η τεχνολογίες λεπτών υμενίων εμφανίζουν καλύτερη αξιοποίηση της διάχυτης και χαμηλής ακτινοβολίας, ενώ παρουσιάζουν πιο ευνοϊκούς θερμοκρασιακούς συντελεστές από τις κρυσταλλικές. Επίσης, είναι λιγότερο ευαίσθητες σε σκίαση. Το κυριότερο όμως μειονέκτημά τους, που περιορίζει ακόμη την ευρεία εμπορική τους διάδοση, είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης. Οι πιο γνωστές τεχνολογίες λεπτών υμενίων με τις αντίστοιχες αποδόσεις είναι: *άμορφου πυριτίου* (a-Si) με 5-7%, *δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού* (Copper Indium diSelenide, CIS) με 9-11%, *τελλουριούχου καδμίου* (Cadmium Telluride, CdTe) με 8.5%, *μικροκρυσταλλικού ή μικρόάμορφου πυριτίου* (a-Si/μc-Si) με 8-9% και *κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί* (Crystalline Silicon on Glass, CSG) με 9% [7].

1.3 Κυριότερες ΦΒ διατάξεις

Καθώς οι περισσότερες εφαρμογές των ΦΒ έχουν εύλογες ενεργειακές απαιτήσεις, είναι προφανές ότι η ΦΒ κυψέλη δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνη της, καθώς αναπτύσσει διαφορά δυναμικού της τάξης των 0.5-1 V. Οπότε, σε ΦΒ συστήματα διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, πολλές κυψέλες συνδέονται σε σειρά για την επίτευξη τάσης λίγων εκατοντάδων Volts. Συνολικά, πολλές ΦΒ κυψέλες και δίοδοι συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα αποτελούν μια ΦΒ διάταξη, όπου η τελευταία αντιστοιχεί και στη μονάδα που δέχεται σαν είσοδο του ο μετατροπέας ισχύος. Παρακάτω, στο Σχ. 1. 3 παρουσιάζονται οι ΦΒ υπομονάδες και διατάξεις που χρησιμοποιούνται συνήθως.

Εμπορικά, η μικρότερη δομική μονάδα μιας ΦΒ διάταξης είναι το ΦΒ πλαίσιο (PV module), το οποίο αποτελείται από πολλές ΦΒ κυψέλες (PV cells), συνδεδεμένες εν σειρά. Το ΦΒ πλαίσιο είναι υδατοστεγές και προστατεύει τις κυψέλες από το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ αναπτύσσει τάση της τάξης των λίγων δεκάδων Volts. Στο εσωτερικό κάθε πλαισίου και ανά κάποιο αριθμό ΦΒ κυψελών, που καθορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε πλαισίου, συνδέονται παράλληλα δίοδοι για λόγους προστασίας της ΦΒ διάταξης σε ανομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες αποκαλούνται δίοδοι διαφυγής (Bypass diodes). Η μονάδα που περιλαμβάνει N_s το πλήθος κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα με μια δίοδο διαφυγής, ονομάζεται ΦΒ στοιχειοσειρά (PV cell string). Τελικά, το ΦΒ πλαίσιο αποτελείται από N_{cs} το πλήθος τέτοιες στοιχειοσειρές συνδεδεμένες εν σειρά, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει N_s κυψέλες. Τυπικές τιμές για τις ποσότητες αυτές είναι $N_s = 12-36$ και $N_{cs} = 1-6$, συνιστώντας ΦΒ πλαίσια με συνήθως 36-72 κυψέλες.



Σχ. 1. 3. Δομή τυπικών ΦΒ διατάξεων

Αν, τώρα, συνδεθούν σε σειρά N_m ΦΒ πλαίσια σχηματίζουν τη ΦΒ πλαίσιοσειρά (PV string), ενώ N_p πλαίσιοσειρές συνδεδεμένες παράλληλα σχηματίζουν μια ΦΒ συστοιχία (PV array). Συνήθως, ο αριθμός N_m κυμαίνεται από 10 έως 30 πλαίσια, ενώ το πλήθος N_p δεν ξεπερνά τις 4 πλαίσιοσειρές για συστήματα χαμηλής τάσης. Κάποιες φορές, τοποθετείται μια δίοδος φραγής (blocking diode) σε σειρά με κάθε πλαίσιοσειρά για αποφυγή ανάστροφων ρευμάτων σε καταστάσεις σφάλματος.

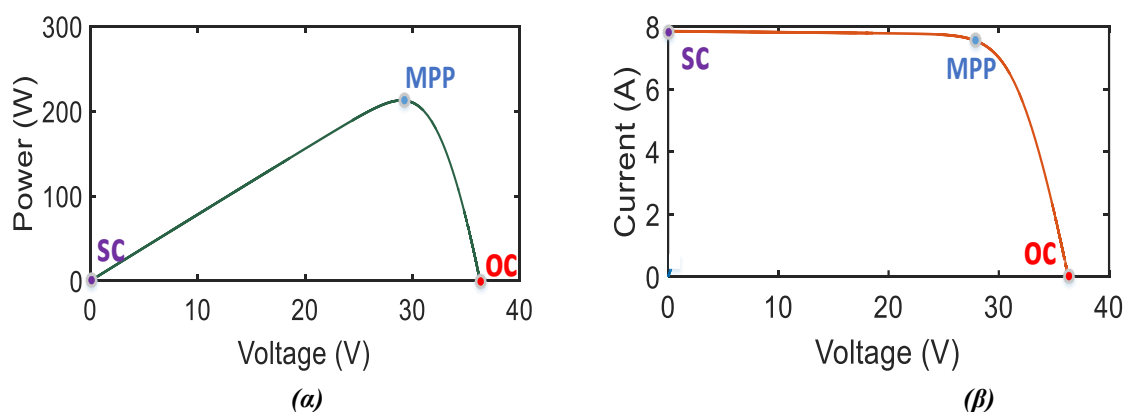
1.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου-στοιχείων

Στο τεχνικό φυλλάδιο (data sheet) ενός εμπορικού ΦΒ πλαισίου, εκτός από τα πλήθη N_s και N_{cs} των κυψελών και των δίοδων διαφυγής αντίστοιχα, αναγράφονται πάντα και τα χαρακτηριστικά τριών βασικών σημείων λειτουργίας. Αναλυτικά, τα σημεία αυτά είναι:

- Το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point – MPP), στο οποίο προσφέρεται η μέγιστη ισχύς P_{mp0} υπό τάση V_{mp0} και ρεύμα I_{mp0} .
- Το σημείο βραχυκύκλωσης (Short Circuit – SC), κατά το οποίο το ΦΒ πλαίσιο είναι βραχυκυκλωμένο και ως εκ τούτου διαρρέεται από το μέγιστο δυνατό ρεύμα I_{sc0} .

- c) Το σημείο ανοιχτοκύκλωσης (Open Circuit – OC), όπου το ΦΒ πλαίσιο είναι ανοιχτοκυκλωμένο και, επομένως δεν διαρρέεται από ρεύμα, ενώ η τάση του V_{oc0} είναι μέγιστη.

Στα γραφήματα του Σχ. 1. 4 παρουσιάζονται οι τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης, σημειώνοντας τα τρία προαναφερθέντα σημεία, σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), όπου η ακτινοβολία είναι ίση με 1000 W/m^2 , η θερμοκρασία είναι ίση με $25 \text{ }^\circ\text{C}$ και η αέριος μάζα ίση με 1.5. Σε κάποια τεχνικά φυλλάδια (data sheets) τα εν λόγω μεγέθη αναφέρονται και σε συνθήκες φυσιολογικής θερμοκρασίας κυμέλης (NOCT), δηλαδή 800 W/m^2 και $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Συνήθως, η τιμή του I_{mp0} είναι ελαφρώς μικρότερη του I_{sc0} , ενώ η τάση στο σημείο μέγιστης παραγωγής V_{mp0} είναι κοντά στο 80%-85% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc0} , χωρίς αυτό να αποτελεί κανόνα.



Σχ. 1. 4. Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες (α) ισχύος-τάσης P-V και (β) ρεύματος-τάσης I-V. Σημειώνονται τα κύρια σημεία των δύο χαρακτηριστικών: σημείο ανοιχτοκύκλωσης (OC), σημείο βραχυκύκλωσης (SC) και σημείο μέγιστης παραγωγής (MPP).

1.3.1.A Συνθήκες πρότυπης λειτουργίας (STC)

Όπως προαναφέρθηκε, για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα ΦΒ στοιχεία ή πλαίσια, έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές P-V και I-V καμπύλες. Αυτές είναι οι εξής:

- Ακτινοβολία ίση με $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία στοιχείων ίση με $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Καθορισμένο ηλιακό φάσμα που χαρακτηρίζεται από $AM = 1.5$.

Εδώ, θα πρέπει να τονιστεί ότι, φυσικά, τα εκάστοτε ΦΒ πλαίσια ή στοιχεία λειτουργούν σε τυχαίες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, σε μια συγκεκριμένη στιγμή, οι οποίες διαφέρουν από τις πρότυπες ή τις συνθήκες φυσιολογικές συνθήκες. Οι αντίστοιχοι θερμοκρασιακοί συντελεστές χρησιμοποιούνται για να αναγάγουν τα μεγέθη I_{sc0} , V_{oc0} και P_{mp0} με τη θερμοκρασία. Οι συντελεστές αυτοί, καθώς και η ακτινοβολία G , χρησιμοποιούνται για πρακτικούς λόγους σε κανονικοποιημένες p.u. μορφές και όχι απόλυτες.

Επίσης, ο βαθμός απόδοσης της κυμέλης η_{cell} αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες, συνήθως STC, που σημαίνει ότι διαφοροποιείται σημαντικά σε άλλες καταστάσεις. Αναλογικά, ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου η_{mod} είναι μικρότερος, κυρίως λόγω της νεκρής επιφάνειας που μεσολαβεί μεταξύ των κυμελών που απαρτίζουν το κάθε πλαίσιο.

1.4 Σκοπός και Πρωτοτυπία της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνεισφέρει στην πλήρη βιβλιογραφική ανασκόπηση των MPPT αλγορίθμων σε συνθήκες μερικής σκίασης και στην εξαγωγή ενδιαφερόντων και χρήσιμων συμπερασμάτων, κατόπιν σύγκρισης των έξι πιο αντιπροσωπευτικών και δημοφιλών εξ' αυτών.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε είναι ενδελεχής και πλήρης, αφού εξετάστηκαν και καταγράφηκαν όλα τα πιθανά είδη MPPT αλγορίθμων που υπάρχουν. Οι διαφορές, οι ομοιότητες και οι πιθανές καινοτομίες των αλγορίθμων παρουσιάζονται στη συνέχεια της διπλωματικής με συγκριτικούς πίνακες και γραφήματα. Μέσα από τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από αυτή τη μελέτη, έγινε η επιλογή έξι συγκεκριμένων αλγορίθμων προς σύγκριση. Η σύγκριση των αλγορίθμων έγινε στο περιβάλλον του Simulink/Matlab κάτω από απολύτως όμοιες συνθήκες μεθόδου μοντελοποίησης. Όλοι οι αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν σε τρία σενάρια μερικής σκίασης του ίδιου ΦΒ συστήματος. Έγινε προσπάθεια ώστε τα σενάρια να είναι όσο πιο ρεαλιστικά και αντιπροσωπευτικά των καθημερινών συνθηκών που υπόκειται μια ΦΒ διάταξη μέσης ισχύος σχεδιασμένη για ένα ανοιχτό ΦΒ πάρκο, αλλά και μια ΦΒ διάταξη μικρής ισχύος σε μια στέγη κτηρίου. Ο κάθε αλγόριθμος εφαρμόζεται ξεχωριστά για την οδήγηση του μετατροπέα ισχύος του ΦΒ συστήματος σε κάθε σενάριο σκίασης, ώστε να ελεγχθεί, τελικά, η αποδοτικότητα του καθενός στην εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Ακόμα, εξετάζονται οι πιθανές απώλειες στην ηλεκτρική απόκριση του ΦΒ συστήματος, κατά τη διαδικασία εύρεσης του GMPP που χρησιμοποιεί ο κάθε αλγόριθμος.

Τα αποτελέσματα και η σύγκριση που προέκυψε από τις προσομοιώσεις έχουν αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον και συμβάλλουν στην ουσιαστική ξεδιάλυνση των προτερημάτων και των μειονεκτημάτων που έχουν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι και κατ' επέκταση οι παρόμοιοι τους. Επίσης, παρά τη πρόσφατη εμφάνιση κι άλλων ανασκοπήσεων MPPT αλγορίθμων στη βιβλιογραφία, η παρούσα εργασία είναι η πρώτη που υλοποιεί ουσιαστική σύγκριση των αλγορίθμων στο Simulink σε, όσο το δυνατόν, πιο ρεαλιστικά σενάρια σκίασης με μεθοδευμένη διαδικασία. Μέσω των κεκτημένων από τη σύγκριση αυτή, γίνεται σαφές ποια χαρακτηριστικά θα πρέπει να συνδυάζει ένας MPPT αλγόριθμος ώστε να είναι αποδοτικός και χρήσιμος στο μέλλον.

1.5 Δομή της Εργασίας

Η **Εισαγωγή** ξεκινάει με μια σύντομη ιστορική αναδρομή των ΦΒ συστημάτων. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βασικά δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας ΦΒ διάταξης. Γίνεται μια εισαγωγή στο φαινόμενο της μερικής σκίασης και το πως αυτό επηρεάζει την ηλεκτρική απόκριση ενός ΦΒ συστήματος.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται συνοπτικά το βασικό κύκλωμα ισχύος ενός διασυνδεδεμένου ΦΒ συστήματος, με εστίαση στον DC-DC μετατροπέα ισχύος και στην οδήγηση του από τους MPPT αλγόριθμους για τη μέγιστη απόδοση του συστήματος κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες, και κυρίως κάτω από συνθήκες μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, αναλύεται το μοντέλο στο Simulink, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές για τη σύγκριση των επιλεγμένων αλγορίθμων.

Στο **Κεφάλαιο 3**, γίνεται η παρουσίαση της πλήρους βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε πάνω στο κομμάτι των MPPT αλγορίθμων. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των διαφόρων ειδών αλγορίθμων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία,

καθώς και αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών κάθε αλγορίθμου. Περιλαμβάνονται συγκριτική πίνακες και διαγράμματα, τα οποία βοηθούν τον αναγνώστη να αντιληφθεί καλύτερα όλο το φάσμα των ΜΡΡΤ αλγορίθμων που υπάρχουν έως σήμερα.

Λεπτομερής θεωρητική σύγκριση και μελέτη των έξι αλγορίθμων που επιλέχθηκαν προς σύγκριση, καθώς και ανάλυση των κριτηρίων επιλογής, γίνεται στο **Κεφάλαιο 4**. Παρουσιάζεται, επίσης, ένα επιτυχημένο κι ένα αποτυχημένο σενάριο δοκιμής για τον κάθε αλγόριθμο με αναλυτικά σχήματα, για την πλήρη κατανόηση των λειτουργιών τους..

Στο **Κεφάλαιο 5**, γίνεται, αναλυτική παρουσίαση των σεναρίων μερικής σκίασης που επιλέχθηκαν για να συγκρίνουμε τους αλγόριθμους. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά και δίνονται συνδυαστικά διαγράμματα για την καλύτερη αντίληψη των διαφορών και ομοιοτήτων που παρουσιάστηκαν μεταξύ των αλγορίθμων κατά τη δοκιμή τους κάτω από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ συστήματος.

Το **Κεφάλαιο 6** ασχολείται, αποκλειστικά, με την παρουσίαση και ανάλυση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη συνολική έρευνα που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία, και κυρίως των αποτελεσμάτων από την πρακτική σύγκριση των αλγορίθμων. Επίσης, βάσει των συμπερασμάτων αυτών, προτείνονται κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης νέων τεχνικών ΜΡΡΤ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

**Μοντελοποίηση, Λειτουργία,
Έλεγχος**

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια ανάλυση στα βασικά στοιχεία της μοντελοποίησης ενός ΦΒ συστήματος, της επίδρασης της σκίασης σε αυτό, καθώς και του συστήματος ελέγχου το οποίο, συνήθως, χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Επίσης, θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις για τη σύγκριση των αλγορίθμων.

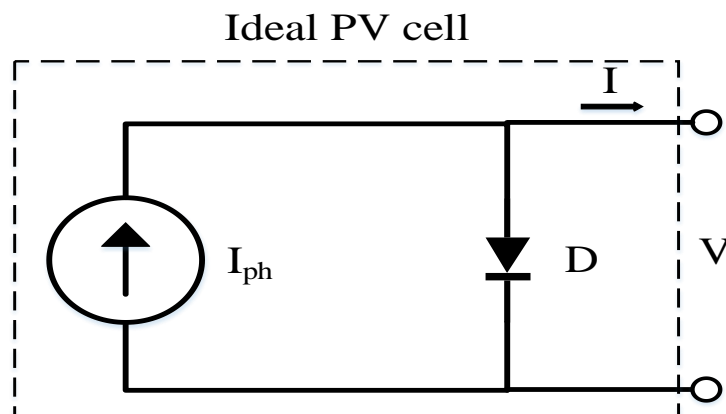
2.1 Το μοντέλο των πέντε παραμέτρων

Η μοντελοποίηση του ΦΒ στοιχείου και κατ' επέκταση της ΦΒ διάταξης είναι αντικείμενο μελέτης και έχει απασχολήσει αρκετά τους ερευνητές. Αρκετά μοντέλα έχουν προταθεί. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, υιοθετείται το μοντέλο της μιας διόδου (single-diode model) ή μοντέλο των πέντε παραμέτρων (five parameters model), το οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά σε αυτή την υποενότητα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί μια ΦΒ κυψέλη κατασκευάζεται από ημιαγώγιο υλικό και αποτελείται από μια δίοδο p-n. Έτσι μπορεί να προσομοιωθεί με όρους ηλεκτρονικής επιστήμης μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, βασισμένο στην αρχή λειτουργίας της διόδου.

2.1.1 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V

Όπως έχει ήδη αναφερθεί μια ΦΒ κυψέλη κατασκευάζεται από ημιαγώγιο υλικό και αποτελεί μια δίοδο p-n. Έτσι μπορεί να προσομοιωθεί με όρους ηλεκτρονικής επιστήμης μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, βασισμένο στην αρχή λειτουργίας της διόδου.



Σχ. 2. 1. Μοντέλο μιας διόδου της ιδανικής ΦΒ κυψέλης.

Στο Σχ. 2. 1, φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας ιδανικής ΦΒ κυψέλης. Η βασική εξίσωση από τη θεωρία των ημιαγωγών που εκφράζει την I-V χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας ιδανικής ΦΒ κυψέλης είναι:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{V}{a}} - 1 \right) \quad [2. 1]$$

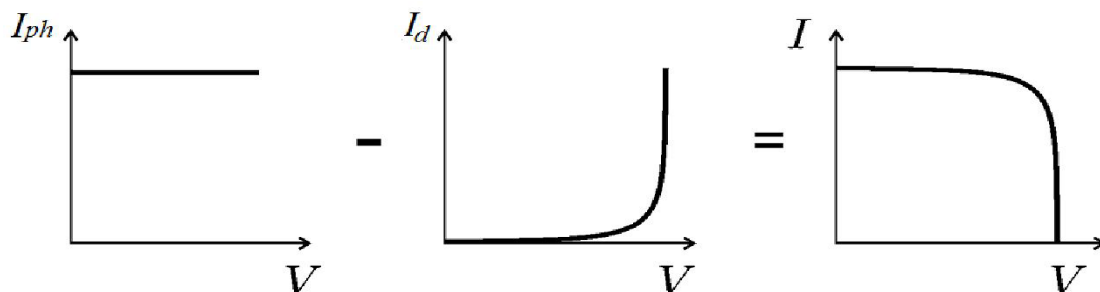
Όπου:

- a ο τροποποιημένος συντελεστής της διόδου, ο οποίος συμπίπτει ουσιαστικά με τη θερμική τάση $\frac{k \cdot T_c}{q}$ προσαυξημένη με το συντελεστή ιδανικότητας n της διόδου:

$$a = \frac{n \cdot k \cdot T_c}{q} \quad [2.2]$$

- n ο συντελεστής της διόδου που κυμαίνεται από 1 έως 2
- k η σταθερά Boltzmann με τιμή ίση με $1.38066 \cdot 10^{-23}$ (J/K)
- q το φορτίο του ηλεκτρονίου $1.60218 \cdot 10^{-19}$ (Cb)
- T_c η θερμοκρασία της κυψέλης (Kelvin)
- I_s το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου (A), που είναι χαρακτηριστικό της διόδου και εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία
- I_{ph} το φωτορεύμα (A), που είναι η ένταση της πηγής ρεύματος άμεσα εξαρτώμενη (αναλογικά) από το επίπεδο ακτινοβολίας

Παρακάτω, στο Σχ. 2. 2, φαίνεται γραφικά πως προκύπτει η I-V χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας ιδανικής ΦΒ κυψέλης από τις επιμέρους καμπύλες λειτουργίας του φωτορεύματος και της διόδου.



Σχ. 2. 2. Σύνθεση της χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας I-V ιδανικής ΦΒ κυψέλης. Το ρεύμα στην έξοδο της κυψέλης είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης του φωτορεύματος I_{ph} και του ρεύματος της διόδου I_d [8].

Παρ' όλα αυτά, η βασική εξίσωση που περιγράφηκε παραπάνω δεν περιγράφει την πραγματική λειτουργία μιας ΦΒ οντότητας που αποτελείται από ένα σύνολο ΦΒ κυψελών, και κατ' επέκταση η χαρακτηριστική λειτουργίας της δεν είναι η ιδανική. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες ΦΒ διατάξεις αποτελούνται από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό ΦΒ κυψελών, και η παρατήρηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας στην περίπτωση αυτή απαιτεί την προσθήκη κάποιων επιμέρους παραμέτρων στη βασική εξίσωση, η οποία εν γένει τροποποιείται για την κυψέλη ως εξής:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad [2.3]$$

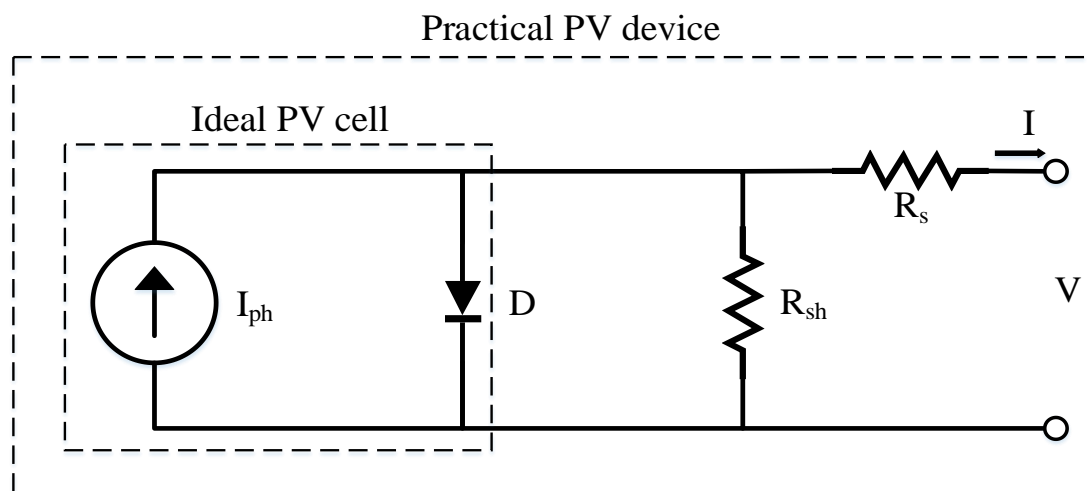
Όπου:

- R_s η σειριακή αντίσταση (Ω), που επηρεάζει τη λειτουργία έντονα στο σημείο μέγιστης παραγωγής
- R_{sh} η εγκάρσια αντίσταση (Ω), που επηρεάζει την απόκριση της ΦΒ κυψέλης κυρίως σε υψηλές τιμές ρεύματος
- I είναι το ρεύμα της κυψέλης (A)
- V είναι η τάση στους ακροδέκτες της κυψέλης (V)

Παρακάτω, στο Σχ. 2. 3, παρουσιάζεται το κυκλωματικό ισοδύναμο του μοντέλου πέντε παραμέτρων. Τα βασικά του στοιχεία είναι:

- a) Η πηγή φωτορεύματος I_{ph} που αντιστοιχεί στο ρεύμα που παράγεται από την προσπίπτουσα ροή φωτονίων.
- b) Η διόδος D , η οποία μοντελοποιεί την επαφή p-n και χαρακτηρίζεται από το ρεύμα κορεσμού I_s και τον τροποποιημένο συντελεστή διόδου a . Η παράμετρος a αντιστοιχεί ουσιαστικά στη θερμική τάση V_T προσαυξημένη κατά το συντελεστή διόδου n : $a = n \cdot V_T = \frac{n \cdot k \cdot T}{q}$, όπου k είναι η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία κυψέλης και q το φορτίο του ηλεκτρονίου.
- c) Η σειριακή R_s και εγκάρσια αντίσταση R_{sh} που εισάγονται για τη μοντελοποίηση των ωμικών απωλειών και των ρευμάτων διαρροής, αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές I_{ph} , I_s , a , R_s , και R_{sh} αποκαλούνται πέντε παράμετροι του μοντέλου και ενσωματώνουν τις κατασκευαστικές ιδιότητες και συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν αγνοηθούν οι δύο αντιστάσεις R_s και R_{sh} , τότε το κύκλωμα που θα προκύψει αντιστοιχεί στο ιδανικό μοντέλο μιας διόδου ή μοντέλο τριών παραμέτρων, το οποίο περιγράφηκε πιο πάνω. Συνεπώς, στο πλήρες κύκλωμα του **Error! Reference source not found.**, το τμήμα που περιλαμβάνεται στο εσωτερικό διακεκομμένο πλαίσιο ονομάζεται *ιδανική συνιστώσα*.



Σχ. 2. 3. Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου πέντε παραμέτρων.

2.1.2 Επέκταση ανάλυσης σε ΦΒ συστοιχία

Το μοντέλο των 5 παραμέτρων δεν περιορίζεται μόνο σε μια ΦΒ κυψέλη, αλλά περιγράφει οποιαδήποτε ΦΒ διάταξη (πλαίσιο, πλαίσιοσειρά, συστοιχία κλπ.) αρκεί να λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Στη γενική περίπτωση μιας ΦΒ συστοιχίας, οι παράμετροι της συνδέονται με τις παραμέτρους της κυψέλης ως εξής:

$$\begin{aligned}
 I_{ph,array} &= N_p \cdot I_{ph,cell} \\
 I_{s,array} &= N_p \cdot I_{s,cell} \\
 a_{array} &= N_m \cdot N_{cs} \cdot N_s \cdot a_{cell} \\
 R_{s,array} &= N_m \cdot N_{cs} \cdot N_s \cdot R_{s,cell} \\
 R_{sh,array} &= N_m \cdot N_{cs} \cdot N_s \cdot R_{sh,cell}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

όπου οι παράμετροι που περιέχουν το δείκτη «array» αναφέρονται στη συστοιχία και με «cell» στην κυψέλη. Αντίστοιχα συνδέονται και οι παράμετροι των υπολοίπων ΦΒ διατάξεων τόσο με την κυψέλη, όσο και μεταξύ τους.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι μέσω της ενδελεχούς έρευνας πάνω στο μοντέλο των πέντε παραμέτρων, που αναλύθηκε συνοπτικά παραπάνω, έχουν προκύψει διαφορετικής φιλοσοφίας μοντέλα που εξάγουν σχέσεις, από τις οποίες υπολογίζονται άμεσα τα 3 κύρια σημεία λειτουργίας μιας συστοιχίας (σημείο βραχυκύκλωσης, σημείο ανοιχτοκύκλωσης και σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος) μέσω των πέντε παραμέτρων. Η εκτεταμένη ανάλυση των σχέσεων αυτών δεν ενδιαφέρει την παρούσα διπλωματική, οπότε παραλείπεται.

2.2 Επίδραση της σκίασης στην απόδοση του ΦΒ συστήματος

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός ΦΒ πλαισίου ή ενός ΦΒ σταθμού δε λαμβάνει υπ' όψη μια σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Ως γνωστόν, η ισχύς που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων (derating factors), οι οποίοι θα πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση σχεδιασμού του εκάστοτε συστήματος. Οι παράγοντες αυτοί κατανέμονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: *τις αιτίες μείωσης της παραγόμενης ΦΒ ισχύος και τις ηλεκτρικές απώλειες κατά τη μετατροπή και μεταφορά της.*

Ακολουθεί μια σύνοψη των κυριότερων από τους παράγοντες αυτούς:

- *Αθροιστική ηλιακή ακτινοβολία.* Χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας μακράς διάρκειας σχετίζονται άμεσα με τον προσανατολισμό της επιφάνειας των συλλεκτών και ενδεχομένως με τη διάταξη ανάγνωσης του ηλίου. Ο συγκεκριμένος παράγοντας εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης.
- *Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (STC).* Ανάλυση αρκετών ΦΒ τεχνολογιών έχει αποδείξει ότι για την ίδια περίπτωση ονομαστική ισχύ, όλες οι τεχνολογίες είναι ισοδύναμες αναφορικά με την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή τους απόδοση, με σφάλμα υπολογισμού μέχρι και 5%.
- *Μεταβολές ηλιακού φάσματος.* Έχει βρεθεί ότι οι ωριαίες μεταβολές του ηλιακού φάσματος εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Η τεχνολογία άμορφου πυριτίου έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στο συγκεκριμένο φαινόμενο, ωστόσο οι μετρηθείσες επιπτώσεις δεν ξεπερνούν συνήθως το 3%.
- *Οπτικές απώλειες σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης (AOI).* Τέτοιες απώλειες οφείλονται στα αυξημένα επίπεδα ανάκλασης της γυάλινης επιφάνειας που καλύπτει το ΦΒ πλαίσιο, για γωνίες πρόσπτωσης τυπικά μεγαλύτερες των 60°.
- *Ρύπανση πλαισίων.* Ο παράγοντας της ρύπανσης, που εξετάζεται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο, μπορεί να προκαλέσει μείωση στην ετήσια ενεργειακή απόδοση σε ποσοστό μέχρι και 10% περίπου.
- *Γήρανση.* Τυπικά, η απόδοση ενός ΦΒ πλαισίου μειώνεται με ρυθμό 0.5-1.0% το χρόνο, λόγω φυσικής φθοράς.
- *Μερική σκίαση.* Η ανομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια μιας ΦΒ διάταξης επιφέρει σημαντικά δυσανάλογη μείωση στην ηλεκτρική της παραγωγή. Αποτελεί ίσως τον κυριότερο και δυσκολότερο αντιμετωπίσιμο παράγοντα μείωσης της απόδοσης ενός ΦΒ

συστήματος. Ένας, συνεχώς, εξελισσόμενος και μελετώμενος τρόπος αντιμετώπισης της μερικής σκίασης είναι η ανάπτυξη των MPPT (Maximum Power Point Tracking) αλγορίθμων.

Η δεύτερη κατηγορία, περιλαμβάνει τις απώλειες κατά τη μετατροπή και μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από τη ΦΒ διάταξη έως το σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οφείλονται κυρίως στις *καλωδιώσεις* στο dc και ac τμήμα, σε *διόδους και λοιπό διακοπικό εξοπλισμό*, στον *μετατροπέα ισχύος*, στον *μετασχηματιστή* (αν υπάρχει), σε *μικροδιαφοροποιήσεις των ΦΒ πλαϊσίων* μεταξύ τους κ.α. [3].

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ανάλυση και σύγκριση των MPPT αλγορίθμων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση του πολυπλοκότερου και πιο κρίσιμου παράγοντα μείωσης της απόδοσης ενός ΦΒ συστήματος: *της μερικής σκίασης*. Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή του φαινομένου και των δυσκολιών που προξενεί.

2.2.1 Γενικά περί σκίασης

Η συνολική ακτινοβολία που δέχεται μια ΦΒ διάταξη από τον ήλιο μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες:

- Την *άμεση ακτινοβολία* που αποτελεί την κάθετη συνιστώσα του τμήματος της συνολικής ακτινοβολίας που διέρχεται στην ατμόσφαιρα χωρίς να επηρεαστεί από αυτήν.
- Τη *διάχυτη ακτινοβολία* που αποτελεί το σύνολο της ηλιακής ενέργειας που υποδέχεται η κεκλιμένη επιφάνεια από τον ουράνιο θόλο και από διάφορες κατευθύνσεις.
- Την *ανακλώμενη ακτινοβολία* που αποτελεί το τμήμα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο συλλέκτη καθώς ανακλάται από το έδαφος και από παραπλήσια αντικείμενα.

Όπως είναι αναμενόμενο, το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ακτινοβολίας που δέχεται μια ΦΒ διάταξη αποτελείται από την *άμεση ακτινοβολία*.

Τυπικά, με τον όρο σκίαση καλούμε τις συνθήκες μειωμένης ή ανομοιόμορφης ακτινοβολίας στις οποίες υπόκειται μια επιφάνεια λόγω παρεμπόδισης πρόσπτωσης κυρίως της άμεσης ακτινοβολίας σε τμήμα της από παρεμβάλλον αντικείμενο. Μερική σκίαση μιας ΦΒ γεννήτριας μπορεί να προκληθεί από ένα πλήθος αντικειμένων όπως σύννεφα, κτίρια, δέντρα, ζώα αλλά και από τμήμα της ίδιας της εγκατάστασης όταν τα ΦΒ πλαίσια είναι τοποθετημένα σε μικρές αποστάσεις διαδοχικών σειρών κ.ο.κ. Η ένταση και έκταση του φαινομένου εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ΦΒ διατάξεων, οι διαστάσεις τους, και γενικά η τρισδιάστατη χωροταξία τους σε συνδυασμό με το γεωγραφικό πλάτος. Δεδομένου ότι η σκίαση επηρεάζεται από την ώρα και μέρα του χρόνου, κατά τη σχεδίαση ενός ΦΒ σταθμού πρέπει τα ΦΒ πλαίσια να κατανέμονται κατάλληλα στον χώρο, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειές της μεσοσταθμικά κατά τη διάρκεια του έτους [9].

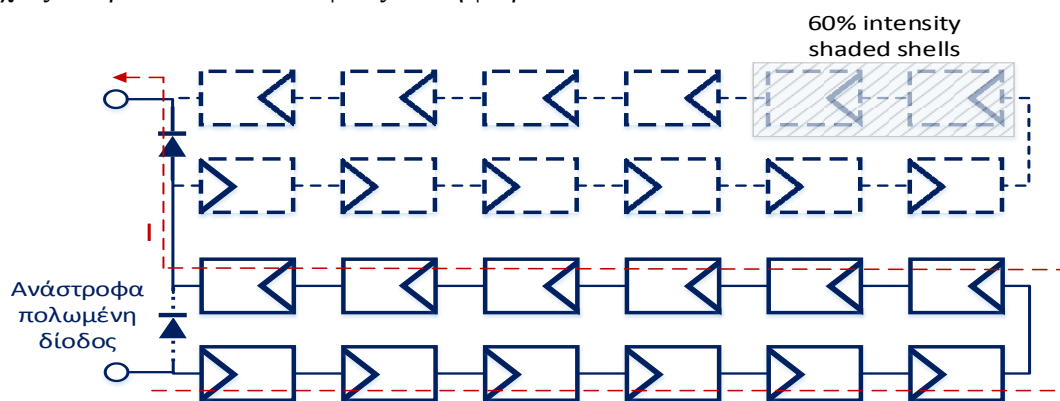
Η επίδραση, τώρα, που έχει η μερική σκίαση στην ηλεκτρική απόκριση του ΦΒ συστήματος είναι ένα αρκετά περίπλοκο ζήτημα με το οποίο ασχολούνται οι MPPT αλγόριθμοι που θα δούμε στη συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Παρακάτω, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στις βασικές έννοιες του θέματος.

2.2.2 Ηλεκτρική απόκριση σε συνθήκες σκίασης

Το κυριότερο πρόβλημα που δημιουργείται σε μια ΦΒ διάταξη, η οποία λειτουργεί υπό συνθήκες μερικής σκίασης, πηγάζει από τη σύνδεση σε σειρά της μικρότερης δομικής μονάδας του συστήματος, της ΦΒ κυψέλης. Η σειριακή σύνδεση μεταξύ των κυψελών συνεπάγεται κοινό ρεύμα. Όταν μια ή περισσότερες

κυψέλες υπόκεινται σε διαφορετική ακτινοβολία από τις υπόλοιπες, η δυνατότητα της/τους σε ρεύμα μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ολόκληρη η συστοιχία να προσαρμόζεται στις μειωμένες ανάγκες ρεύματος των περισσότερων σκιασμένων κυψελών.

Η παραπάνω κατάσταση οδηγεί σε δυσανάλογη μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής σε επίπεδο στοιχειοσειράς και ανάπτυξη αρνητικής τάσης στις σκιασμένες κυψέλες με αποτέλεσμα την απορρόφηση ισχύος. Το φαινόμενο αυτό, στην ακραία του μορφή, οδηγεί στην εμφάνιση θερμικών κηλίδων (hot spot effect) και σημαντική φθορά, έως και καταστροφή (cracking) των αντίστοιχων κυψελών. Για να αντιμετωπιστεί η το φαινόμενο των θερμικών κηλίδων, τοποθετούνται εμπορικά διάοδοι διαφυγής ανά συγκεκριμένο αριθμό κυψελών μέσα στο κάθε πλαίσιο, ώστε να απομονωθούν οι αντίστοιχες στοιχειοσειρές σε περίπτωση μερικής σκίασης. Με τον τρόπο αυτό διασώζεται ένα μεγάλο μέρος της ισχύος και προστατεύονται οι κυψέλες από τη φθορά.

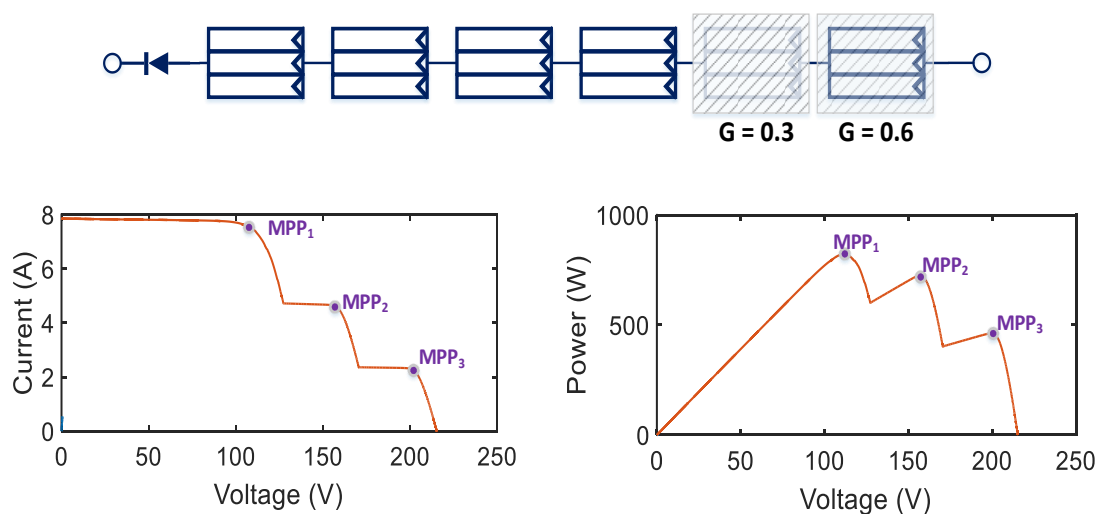


Σχ. 2. 4. Λειτουργία ενός μερικώς σκιασμένου πλαισίου. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η ροή του ρεύματος.

Στο Σχ. 2. 4, παρουσιάζεται μια σχηματική επεξήγηση του φαινομένου. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο σκιάζονται 2 κυψέλες από τις συνολικά 12 της στοιχειοσειράς. Η διάοδος διαφυγής της συγκεκριμένης στοιχειοσειράς ενεργοποιείται και όλες οι κυψέλες της απομονώνονται και δεν διαρρέονται από το ρεύμα του πλαισίου. Αν δεν υπήρχαν οι διάοδοι διαφυγής, όλες οι κυψέλες όλων των στοιχειοσειρών θα περιορίζονταν από το μειωμένο ρεύμα των σκιασμένων κυψελών. Αντίθετα, τώρα, οι πλήρως ασκίαστες στοιχειοσειρές προσφέρουν όσο ρεύμα μπορούν, το οποίο διαρρέει τη σκιασμένη στοιχειοσειρά μέσω της διάοδου διαφυγής που άγει. Με αυτό τον τρόπο απορρίπτεται πλήρως η ενέργεια της σκιασμένης στοιχειοσειράς, αλλά διασώζεται η ενέργεια της υπόλοιπης διάταξης.

Το κόστος της χρήσης των διόδων διαφυγής σαν μέσο προστασίας του ΦΒ συστήματος, είναι η ποιοτική τροποποίηση των χαρακτηριστικών I-V και P-V και συγκεκριμένα η εμφάνιση περισσότερων του ενός τοπικών μεγίστων στις καμπύλες αυτές (Local Maximum Power Points – LMPPs). Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα του προβλήματος αυτού δίνεται, παρακάτω, στο Σχ. 2. 5, όπου στις χαρακτηριστικές της συγκεκριμένης διάταξης εμφανίζονται τρία τοπικά μέγιστα, σαν αποτέλεσμα της μερικής σκίασης που υπόκεινται κάποια πλαίσια της συστοιχίας.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο, δημιουργεί ιδιαίτερες δυσκολίες τόσο κατά τη μελέτη, όσο και κατά τη λειτουργία του ΦΒ. Με την ύπαρξη πολλών LMPPs, η εξαγωγή της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος από το σύστημα καθίσταται αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Συνεπώς, τα περισσότερα λογισμικά και αλγόριθμοι εγκατάστασης και μελέτης των ΦΒ συστημάτων λαμβάνουν υπεραπλουστευτικές παραδοχές και οδηγούνται σε ανακριβή αποτελέσματα όταν υπάρχει έντονη σκίαση.



Σχ. 2. 5. Παράδειγμα εμφάνισης τριών τοπικών μεγίστων στις χαρακτηριστικές P-V και I-V.

Αντίστοιχο πρόβλημα εμφανίζεται και στους αλγόριθμους εντοπισμού του μέγιστου σημείου λειτουργίας ενός ΦΒ συστήματος (Maximum Power Point Tracking – MPPT) που εκτελούνται από τον μετατροπέα ισχύος, όπου συχνά οι αλγόριθμοι αυτοί εγκλωβίζονται σε ένα υποβέλτιστο τοπικό μέγιστο σημείο λειτουργίας και έτσι δεν εξάγουν από το σύστημα τη πραγματική μέγιστη δυνατή ενέργεια.

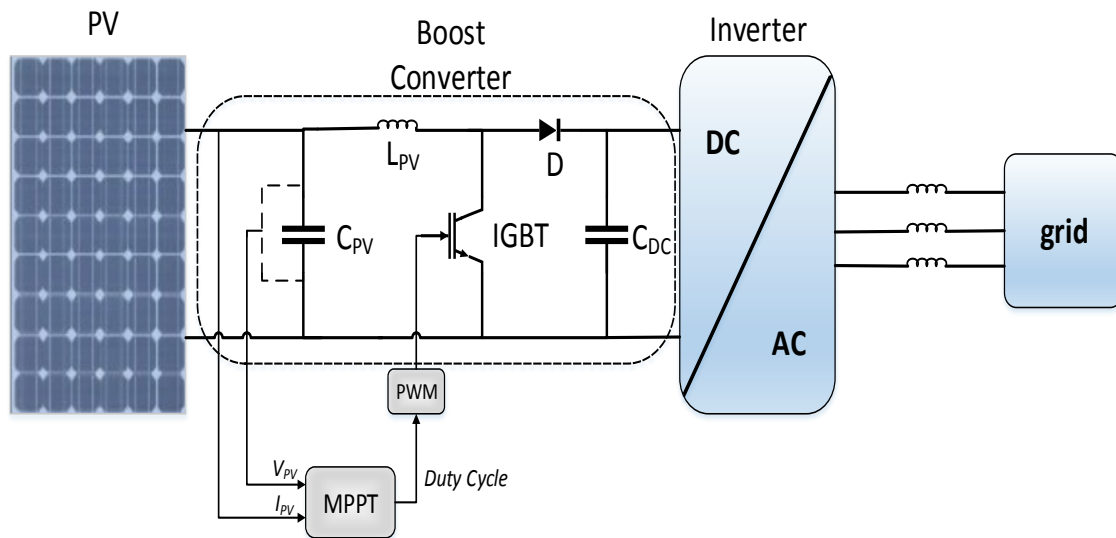
Η πολυπλοκότητα του φαινομένου αυτού είναι που το καθιστά δημοφιλές και ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας. Ιδιαίτερα, τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή MPPT αλγορίθμων οι οποίοι εκμεταλλεύονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των χαρακτηριστικών λειτουργίας και προσπαθούν να παρουσιάσουν καινοτομίες έχει γίνει βασική προτεραιότητα αρκετών ερευνητών του κλάδου. Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση όλων των ειδών των MPPT αλγορίθμων που υπάρχουν μέχρι σήμερα, η διαλογή κάποιων συγκεκριμένων δημοφιλών εξ' αυτών, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια που αναλύονται στη συνέχεια, και η σύγκριση μεταξύ τους σε ρεαλιστικά σενάρια μερικής σκίασης [10], [11].

2.3 Μετατροπέας Ισχύος ΦΒ συστήματος

Εν γένει, τα ΦΒ συστήματα, όπως γνωρίζουμε, δεν συνδέονται απευθείας στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να γίνει σύνδεση αυτών στο δίκτυο, είναι απαραίτητη η παρουσία συγκεκριμένων διατάξεων ισχύος. Στο Σχ. 2. 6, που ακολουθεί, φαίνεται η τυπική συνδεσμολογία ενός ΦΒ συστήματος, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα κυκλώματα ισχύος που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση του ΦΒ συστήματος στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

Ο μετατροπέας ισχύος του συστήματος αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες: τον DC/DC μετατροπέα (boost converter στο Σχ. 2. 6) και τον αντιστροφέα (inverter), που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά (τοπολογία δύο επιπέδων – two stage topology). Με τη βοήθεια του αλγορίθμου MPPT, το πρώτο υποσύστημα παίζει το ρόλο του ρυθμιστή του σημείου λειτουργίας ώστε να εξάγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς από το σύστημα και, επίσης, είτε ανυψώνει είτε υποβιβάζει την τάση της ΦΒ διάταξης σε κατάλληλα επίπεδα για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου.

Ο μετατροπέας ισχύος σε ένα σύστημα αναλαμβάνει, εν γένει, να ανυψώσει ή να υποβιβάσει την DC τάση ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Υπάρχουν τρεις τύποι μετατροπέων ισχύος [12], [13]:



Σχ. 2. 6. Σχηματική αναπαράσταση τυπικού κυκλώματος ισχύος ενός ΦΒ συστήματος για ομαλή σύνδεση στο δίκτυο.

- Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (Boost DC-DC Converter) στον οποίο η τάση εξόδου, η οποία είναι συνεχής, μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από την τάση εισόδου – πραγματοποιείται, δηλαδή, ανύψωση τάσης. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι έως τέσσερις φορές υψηλότερη από την τάση εισόδου ανάλογα με την τιμή του πηνίου εισόδου και του βαθμού χρησιμοποίησης του διακόπτη ισχύος.
- Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buck ή Step-down DC-DC Converter) στον οποίο η τάση εξόδου μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως και την τιμή της τάσης εισόδου.
- Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης (Buck – Boost Converter) ο οποίος δίνει τη δυνατότητα στην τάση εξόδου του να παίρνει τιμές μικρότερες, ίσες ή μεγαλύτερες από τις τιμές της τάσης εισόδου του. Επομένως, ο συγκεκριμένος μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει ως μετατροπέας υποβιβασμού και ως μετατροπέας ανύψωσης ανάλογα με την απαίτηση της κάθε εφαρμογής.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει χρησιμοποιηθεί στο κύκλωμα ισχύος, στην έξοδο του ΦΒ συστήματος, ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter). Στη συνέχεια, για λόγους πληρότητας, αναλύεται, συνοπτικά, η λειτουργία του συγκεκριμένου μετατροπέα.

2.3.1 DC/DC Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter)

Τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης είναι: α) ένας ημιαγωγικός διακόπτης S (συνήθως IGBT ή MOSFET), β) ένα πηνίο L_{DC} , γ) μία διάδος D και δ) μια συστοιχία πυκνωτών C_{PV} στην είσοδο και C_{DC} στην έξοδο (Σχ. 2. 6). Ο ημιαγωγικός διακόπτης S παλμοδοτείται από τη μονάδα διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM (Pulse Width Modulation), με τη βοήθεια της οποίας επιτυγχάνεται διαδοχική έναυση και σβέση του S , ώστε να ανυψωθεί η τάση εισόδου V_{PV} στο κατάλληλο επίπεδο της τάσης εξόδου V_{DC} . Ο ημιαγωγικός διακόπτης που χρησιμοποιείται μπορεί να βρεθεί σε δύο καταστάσεις λειτουργίας, στην κατάσταση αγωγής ή στην κατάσταση αποκοπής. Όταν

δοθεί παλμός οδήγησης στην πύλη του ημιαγωγικού στοιχείου τότε αυτός μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής και παραμένει εκεί καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού, ενώ μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής όταν ο παλμός στην πύλη του πάρει ξανά μηδενική τιμή. Το ποσοστό της διακοπτικής περιόδου στο οποίο ο S βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, αποκαλείται βαθμός χρησιμοποίησης (duty cycle) [12], [13].

Ο μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης μπορεί να λειτουργήσει στις ακόλουθες τρεις πιθανές φάσεις [12], [13]:

1. Η πρώτη φάση λειτουργίας προκύπτει όταν εφαρμοστεί παλμός οδήγησης στην πύλη του ημιαγωγικού διακόπτη ισχύος. Κατά τη φάση αυτή το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχ. 2. 7b. Συγκεκριμένα, η τάση εισόδου του μετατροπέα εφαρμόζεται στο πηνίο εισόδου και κατά συνέπεια αυτό φορτίζεται. Κατά τη συγκεκριμένη φάση, ο πυκνωτής εξόδου του μετατροπέα ισχύος που είναι φορτισμένος από την προηγούμενη φάση λειτουργίας εκφορτίζεται. Η φάση αυτή λαμβάνει χώρα όσο ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής και τερματίζεται όταν ο παλμός στην πύλη του πάρει την τιμή 0.
2. Η δεύτερη φάση λειτουργίας προκύπτει όταν ο παλμός στην είσοδο του διακόπτη πάρει την τιμή 0. Κατά τη φάση αυτή ο διακόπτης μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής, ωστόσο η διόδος είναι ορθά πολωμένη, συνεπώς άγει. Έτσι, το πηνίο που είναι φορτισμένο από την προηγούμενη φάση λειτουργίας εκφορτίζεται ενώ, παράλληλα, φορτίζεται ο πυκνωτής εξόδου. Η φάση αυτή, το ισοδύναμο κύκλωμα της οποίας φαίνεται στο Σχ. 2. 7c, τερματίζεται όταν το πηνίο αποφορτιστεί πλήρως ή όταν δοθεί ξανά παλμός οδήγησης στην πύλη του διακόπτη. Αν δοθεί παλμός μη μηδενικής τιμής στην πύλη του διακόπτη ισχύος, ο μετατροπέας μεταβαίνει ξανά στην πρώτη φάση λειτουργίας, ενώ αν το πηνίο αποφορτιστεί πλήρως προτού δοθεί παλμός οδήγησης στην είσοδο του διακόπτη ο μετατροπέας μεταβαίνει στην Τρίτη φάση λειτουργίας.
3. Η τρίτη φάση λειτουργίας είναι, εν γένει, μια ανεπιθύμητη φάση λειτουργίας και δημιουργείται μόνο όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχές ρεύμα πηνίου, δηλαδή εάν το ρεύμα του πηνίου πάρει την τιμή 0. Η κατάσταση αυτή προκύπτει εάν αποφορτιστεί πλήρως το πηνίο, δηλαδή κατά την αποφόρτιση του δεν δοθεί παλμός στην πύλη του διακόπτη. Τότε δεν άγει κανένα ημιαγωγικό στοιχείο του κυκλώματος, καθώς το ισοδύναμο κύκλωμα διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχ. 2. 7d. Η συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας είναι ανεπιθύμητη καθώς όπως φαίνεται και από το κυκλωματικό ισοδύναμο η τάση εισόδου βγαίνει ουσιαστικά εκτός κυκλώματος. Προκειμένου, λοιπόν, να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση είναι σημαντική η σωστή διαστασιολόγηση των στοιχείων του μετατροπέα, δηλαδή του πηνίου και του πυκνωτή, καθώς και ο σωστός καθορισμός της διακοπτικής συχνότητας.

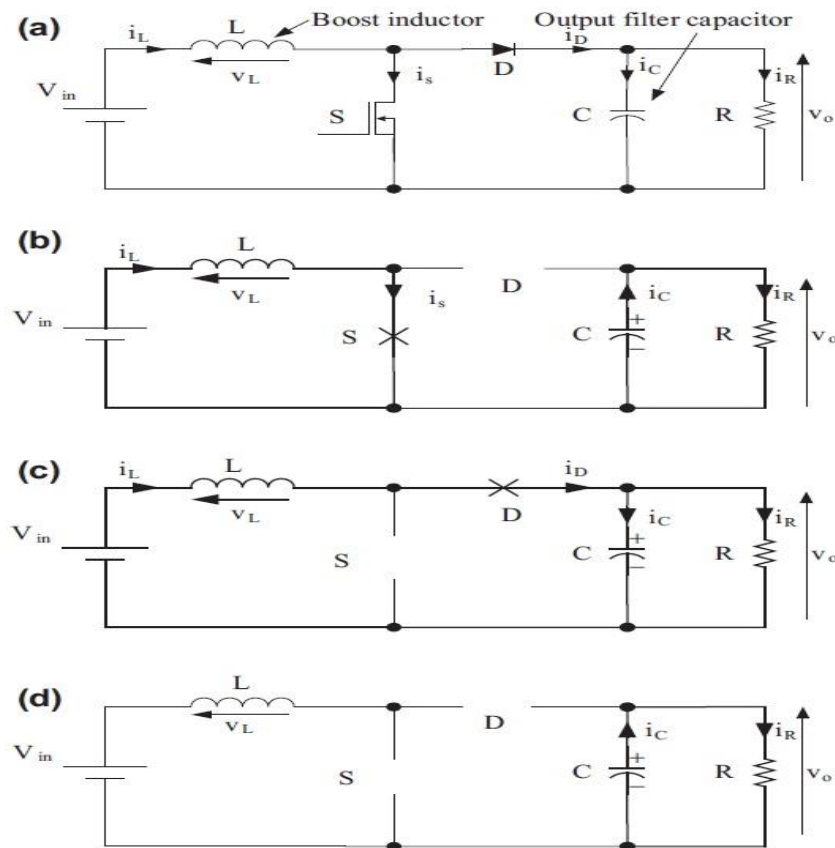
Σε ένα μετατροπέα ισχύος με συνεχές ρεύμα, οι τάσεις εισόδου και εξόδου, συνδέονται με το duty cycle D , ως εξής:

$$\frac{V_{PV}}{V_{DC}} = 1 - D \quad [2. 5]$$

Το duty cycle ορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, ως το ποσοστό της διακοπτικής περιόδου στο οποίο ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Οπότε:

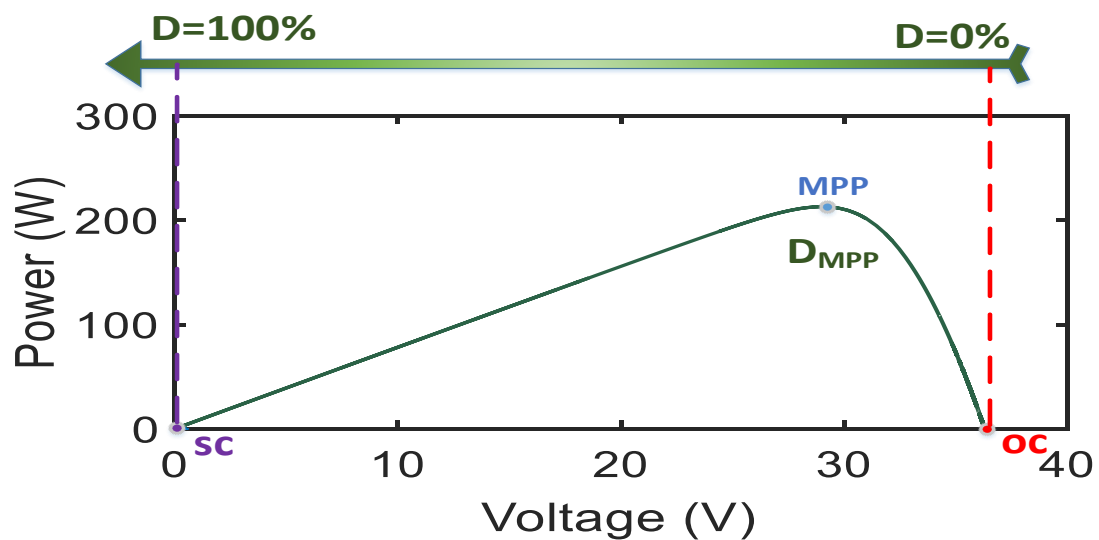
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad [2. 6]$$

Μεταβάλλοντας το duty cycle αλλάζει η τάση εισόδου V_{PV} , η οποία αντιστοιχεί στην τάση λειτουργίας της ΦΒ διάταξης. Δηλαδή, ο έλεγχος του σημείου λειτουργίας της τελευταίας επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση του duty cycle του DC-DC μετατροπέα [12], [13].



Σχ. 2. 7. Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης και λειτουργικές φάσεις αυτού.

a) Κύκλωμα ισχύος. b) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης άγει. c) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν άγει η διάοδος. d) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν δεν άγει κανένας ημιαγωγός [12].



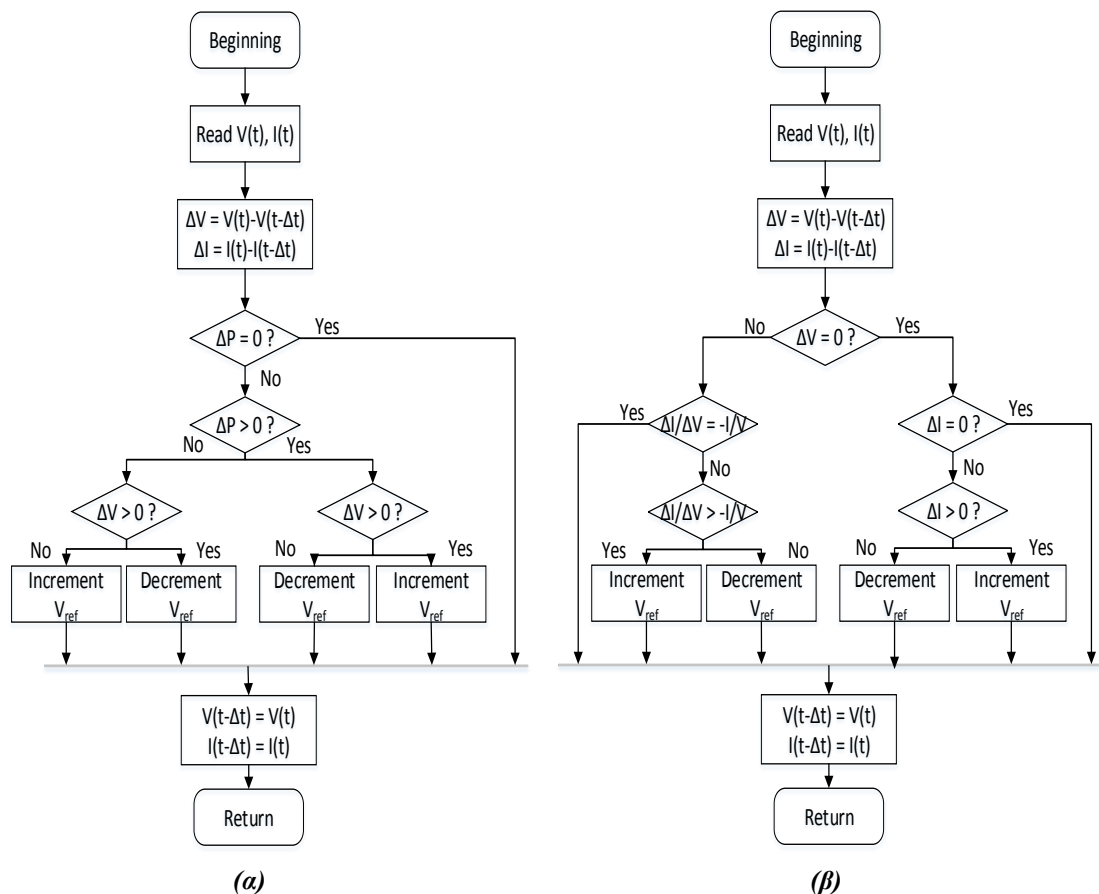
Σχ. 2. 8. Διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η κατεύθυνση μεταβολής του duty cycle, ανάλογα τη ρύθμιση που επιβάλλει ο MPPT αλγόριθμος στον DC-DC μετατροπέα.

Όταν $D = 100\%$ και ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει συνεχώς, το σύστημα λειτουργεί στη βραχυκύκλωση. Αντίθετα όταν $D = 0\%$ ο διακόπτης S βρίσκεται μονίμως σε αποκοπή και πρακτικά ο μετατροπέας παρακάμπτεται (Σχ. 2. 8). Αν η τάση εξόδου V_{DC} είναι μεγαλύτερη της τάσης της ΦΒ διάταξης V_{PV} , αυτή η κατάσταση συνεπάγεται ανοιχτοκύκλωση της τελευταίας. Συνεπώς οι λειτουργικές τιμές του duty cycle

είναι ανάμεσα σε 0% και 100%, και, προφανώς, η βέλτιστη τιμή του αντιστοιχεί στην τάση που βρίσκεται το MPP στις καμπύλες, όπου εξάγεται η μέγιστη ισχύς από τη ΦΒ γεννήτρια. Δεδομένου ότι η καμπύλη ισχύος αλλάζει από σύστημα σε σύστημα και μεταβάλλεται έντονα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, απαιτείται κατάλληλη στρατηγική ελέγχου που να ρυθμίζει το duty cycle ώστε να αντιστοιχεί πάντα στο GMPP (Global Maximum Power Point). Ο έλεγχος αυτός αποκαλείται αλγόριθμος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης παραγωγής (MPPT – Maximum Power Point Tracking).

2.3.2 Αλγόριθμοι MPPT

Όπως προαναφέρθηκε, οι αλγόριθμοι MPPT είναι αυτοί οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την σωστή ρύθμιση του duty cycle στην είσοδο του ημιαγωγικού στοιχείου του μετατροπέα, ώστε το σημείο λειτουργίας της ΦΒ διάταξης να είναι το βέλτιστο, κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες, και η εξαγόμενη ισχύς να είναι η μέγιστη δυνατή. Από τις πρώτες και πιο διαδεδομένες τεχνικές MPPT είναι οι αλγόριθμοι Perturb & Observe (P&O) και Incremental Conductance (INC). Βασική φιλοσοφία των εν λόγω αλγορίθμων είναι η δημιουργία συνεχούς διαταραχής περιορισμένου εύρους (1-5% περίπου) στο duty cycle, ώστε να ταλαντώνεται μονίμως το σημείο λειτουργίας σε ένα μικρό τμήμα της χαρακτηριστικής P-V, οδηγώντας το έτσι προς την κατεύθυνση που υπόσχεται μεγαλύτερη ισχύ. Τα αλγοριθμικά διαγράμματα (flowcharts) των δύο αυτών τεχνικών φαίνονται παρακάτω, στο Σχ. 2. 9.



Σχ. 2. 9. Αλγοριθμικά διαγράμματα των τεχνικών: α) P&O και β) INC

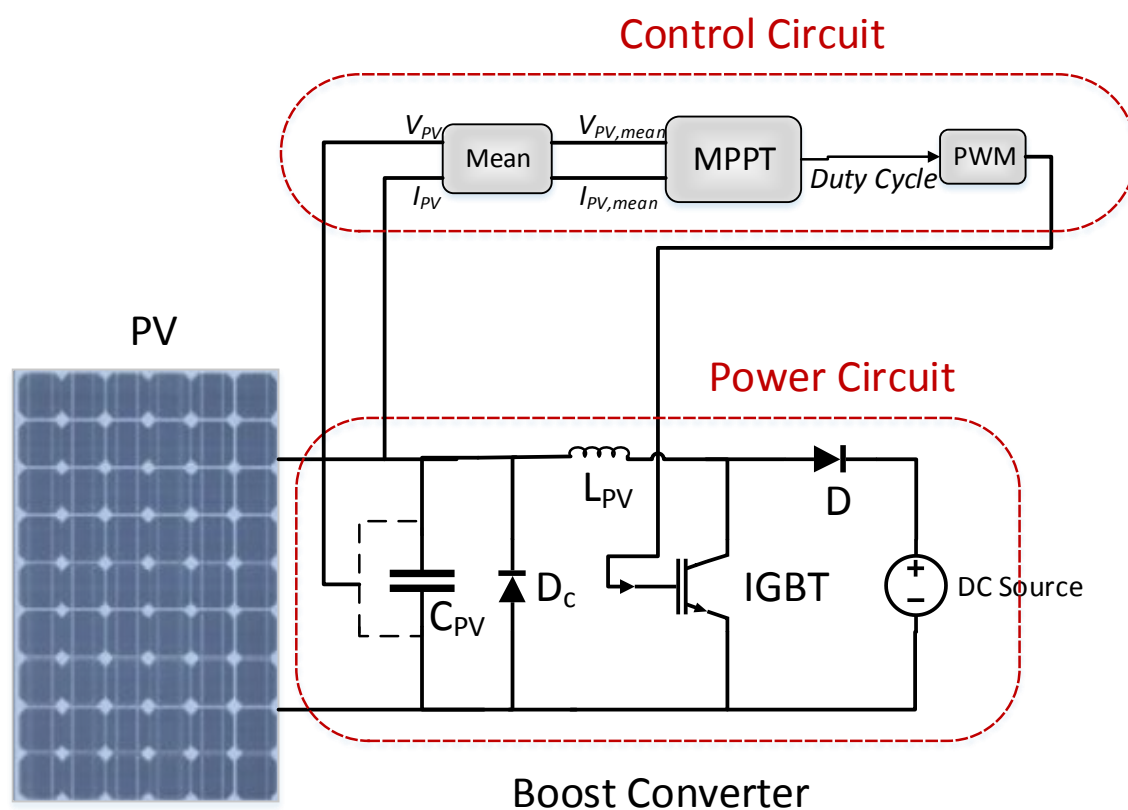
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν κι άλλες πιο περίπλοκες τεχνικές από τις παραπάνω, οι οποίες αξιοποιούν την ήδη υπάρχουσα κυμάτωση του σημείου λειτουργίας, λόγω διακοπτικής ταλάντωσης (switching ripple) ή διακύμανσης της στιγμιαίας ισχύος που απορροφάται από το δίκτυο (grid ripple), και δε χρειάζεται να

διαταράσσουν το duty cycle. Ακόμα, υπάρχουν αλγόριθμοι οι οποίοι εφαρμόζουν μαθηματικές σχέσεις για την εκτίμηση ενός μέρους της χαρακτηριστικής P-V, που περιλαμβάνει και το MPP, και οδηγούν το σημείο λειτουργίας προς εκείνη την κατεύθυνση.

Όλες οι ανωτέρω τεχνικές που περιγράφηκαν, αφορούν ΦΒ διατάξεις οι οποίες λειτουργούν κάτω από ομοιόμορφες συνθήκες. Όταν οι συνθήκες αυτές διαταράσσονται από το φαινόμενο της μερικής σκίασης, τότε οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συστήματος αλλοιώνονται ποιοτικά και καταλήγουν να περιέχουν δύο ή και περισσότερα LMPPs, ανάλογα με τη γεωμετρία της σκίασης, την έκταση της, τα επίπεδα ακτινοβολίας κ.α. Το γεγονός αυτό, όπως είναι λογικό, δημιουργεί πρόβλημα και κάνει τον εντοπισμό του GMPP εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη αλγορίθμων εντοπισμού του GMPP σε ανομοιόμορφες συνθήκες αποτελεί αντικείμενο ενδεδειγμένης έρευνας. Στη βιβλιογραφία, πλέον, υπάρχουν αρκετοί τέτοιοι αλγόριθμοι.

2.4 Μοντέλο προσομοιώσεων

Όλες οι δοκιμές των αλγορίθμων MPPT που επιλέχθηκαν προς σύγκριση στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον του Simulink/Matlab. Το ακριβές μοντέλο που δημιουργήθηκε για τις προσομοιώσεις παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 2. 10.

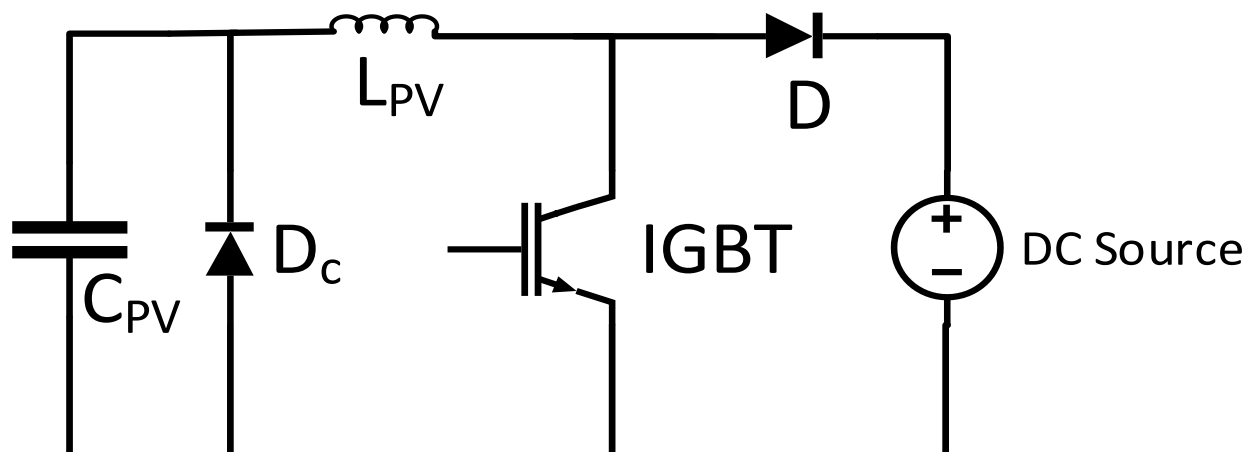


Σχ. 2. 10. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των αλγορίθμων MPPT.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 2. 10, το συνολικό κύκλωμα από το οποίο αποτελείται το μοντέλο μας θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο επιμέρους κυκλωματικές διατάξεις: **το κύκλωμα ισχύος** και **το κύκλωμα ελέγχου**. Στη συνέχεια θα αναλυθούν ξεχωριστά τα δύο αυτά κυκλώματα.

2.4.1 Το κύκλωμα ισχύος του μοντέλου

Το κύκλωμα ισχύος του μοντέλου μας αναπαριστά, ουσιαστικά, έναν εμπορικό DC/DC μετατροπέα ισχύος και φαίνεται στο Σχ. 2. 11



Σχ. 2. 11. Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος ισχύος του μοντέλου.

Ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από: ένα πυκνωτή εξομάλυνσης C_{PV} της τάξεως των 470 μF , μια διόδο D_c τοποθετημένη αντιπαράλληλα με τον πυκνωτή αυτό, το πηνίο εισόδου L_{PV} (πηνίο ανύψωσης) της τάξεως των 600 μH , τη διόδο του μετατροπέα D , το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα το οποίο είναι ένα απλό IGBT τρανζίστορ και μια σταθερή πηγή DC τάσης, 700 Volts, τοποθετημένη στην έξοδο του κυκλώματος η οποία αντικαθιστά τον κλασσικό πυκνωτή εξόδου που υπάρχει συνήθως.

Πιο αναλυτικά, ο πυκνωτής εισόδου του κυκλώματος συμβάλει στην εξομάλυνση της τάσεως εισόδου η οποία προέρχεται από τη ΦΒ συστοιχία. Είναι ένα βασικό στοιχείο κάθε εμπορικού DC/DC μετατροπέα ανύψωσης και αποτρέπει την εμφάνιση απότομων μεταβολών στις τιμές του σήματος της τάσης εισόδου. Πρακτικά, δηλαδή, εισάγει την απαραίτητη αδράνεια στο σύστημα μας. Η διόδος D_c η οποία έχει τοποθετηθεί αντιπαράλληλα στον πυκνωτή εξομάλυνσης και στο ημιαγωγικό στοιχείο, ουσιαστικά έχει σαν σκοπό την απορρόφηση των αναστροφών ρευμάτων που δημιουργούνται κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή σε ορισμένες φάσεις της λειτουργίας του συστήματος. Το δυναμικό φαινόμενο που δημιουργείται κατά την εκφόρτιση αυτή, αυξάνει την έγχυση ισχύος στο δίκτυο σε τιμές μη επιθυμητές. Ωστόσο, με την ύπαρξη της περιγραφόμενης διόδου, το φαινόμενο αυτό αποτρέπεται. Το πηνίο εισόδου (πηνίο ανύψωσης) φορτίζεται κατά τη φάση φόρτισης του κυκλώματος από τη τάση εισόδου. Το πηνίο, δηλαδή, λειτουργεί σαν αποθήκη της ενέργειας για την μετέπειτα μεταφορά της προς το φορτίο. Σε αυτό το σημείο συμβάλει η διόδος D , η οποία φαίνεται στο Σχ. 2. 11., η οποία όταν άγει μεταφέρει την ενέργεια αυτή. Στην έξοδο, τώρα, του κυκλώματος ισχύος αντί για τον κλασσικό πυκνωτή εξόδου ο οποίος μεταφέρει την ενέργεια του συστήματος στον αντιστροφέα και στη συνέχεια στο δίκτυο, έχει χρησιμοποιηθεί μια σταθερή πηγή τάσης DC της τάξεως των 700 Volts. Αυτό έχει συμβεί καθαρά για λόγους ευκολίας των προσομοιώσεων, καθώς δεν μας ενδιαφέρει η γενική λειτουργία του συστήματος, αλλά ο έλεγχος του ΦΒ. Η πηγή αυτή, λοιπόν, χρησιμοποιείται σαν σταθερή τάση αναφοράς για όλες τις προσομοιώσεις για τη ρύθμιση της εισαγόμενης τιμής του duty cycle, ανάλογα με τη τάση εξόδου του ΦΒ. Η εν λόγω σχεδιαστική επιλογή απλοποιεί ουσιαστικά το πραγματικό φαινόμενο, κατά το οποίο η τάση του πυκνωτή διατηρείται σταθερή από το P-Q control του αντιστροφέα. Τέλος, έχει χρησιμοποιηθεί σαν ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα ένα κλασσικό τρανζίστορ IGBT, με την παλμοδότηση του οποίου

ελέγχεται η παραγόμενη ισχύς της συστοιχίας. Αποτελεί, δηλαδή, τη σύνδεση του κυκλώματος ισχύος με το κύκλωμα ελέγχου του συνολικού συστήματος.

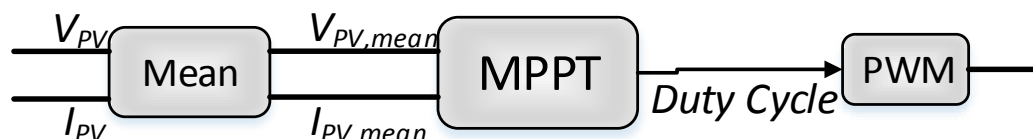
Η ΦΒ πλαισιοσειρά η οποία χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο προσομοιώσεων των αλγορίθμων MPPT απαρτίζεται από τα ΦΒ πλαίσια 1Soltech 1STH-215-P του Simulink/Matlab και τα επιμέρους ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 2. 1.

Πίνακας 2. 1. Χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου 1Soltech 1STH-215-P

Parameters of model	
Series Cells per Module	60
Maximum Power (P_{MAX})	231,15 W
Open Circuit Voltage (V_{OC})	36,3 V
MPP Voltage (V_{MPP})	29 V
Short Circuit Current (I_{SC})	7,84 A
MPP Current (I_{MPP})	7,35 A
Temperature Coefficient of V_{OC}	-0,361 %/°C

2.4.2 Το κύκλωμα ελέγχου του μοντέλου

Το κύκλωμα ελέγχου του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 2. 12.



Σχ. 2. 12. Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος ελέγχου του μοντέλου.

Το κύκλωμα ελέγχου του συστήματος αποτελείται από τρία μέρη: ένα *block* εξομάλυνσης των σημάτων τάσης και ρεύματος (*Mean Block*), ένα *block* εφαρμογής του εκάστοτε δοκιμαζόμενου αλγορίθμου MPPT (*MPPT Block*) και ένα *block* το οποίο περιέχει το κύκλωμα του PWM ελέγχου (*PWM Block*).

Αναλυτικότερα, το Mean Block είναι μια απλή εφαρμογή εξάλειψης των ακραίων τιμών που θα μπορούσαν να πάρουν τα σήματα ρεύματος και τάσης του ΦΒ. Τοποθετείται πριν από την εισαγωγή των στιγμιαίων τιμών τάσης και ρεύματος στο block ελέγχου MPPT, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του ελέγχου. Πρακτικά, κάνοντας χρήση του υπολογισμού της μέσης τιμής ενός προσαρμοσμένου αριθμού τιμών δειγματοληψίας των δύο αυτών σημάτων, δεν αφήνονται να εισαχθούν αυτούσιες οι εκάστοτε στιγμιαίες τιμές των δύο αυτών σημάτων, ώστε να αποτραπεί η εισαγωγή κάποιας ακραίας τιμής που θα μπορούσε να επηρεάσει τη λειτουργία των αλγορίθμων MPPT. Στη συνέχεια διακρίνουμε το MPPT Block, μέσα στο οποίο εισάγεται ο εκάστοτε MPPT αλγόριθμος που επιθυμούμε να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του συστήματος. Τέλος, υπάρχει το block ενός κλασσικού PWM

ελέγχου, ο οποίος δέχεται την εξαγόμενη τιμή duty cycle από τον εκάστοτε αλγόριθμο MPPT, μετατρέποντας την σε παλμό για την οδήγηση του IGBT του κυκλώματος ισχύος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλο το μοντέλο μας στο Simulink λειτουργεί με διακριτή δειγματοληψία τιμών. Η περίοδος παραγωγής σημάτων ελέγχου (control period) από το MPPT Block, που έχει χρησιμοποιηθεί, είναι ίση με 10 ms, χρόνος αρκετά μικρός που κάνει το σύστημα μας αρκετά ευέλικτο και άμεσα αποκρίσιμο. Η διακοπτική συχνότητα που έχει εφαρμοστεί στον PWM έλεγχο του συστήματος είναι ίση με 20 kHz (διακοπτική περίοδος ίση με 50 μ s), ενώ η περίοδος δειγματοληψίας τιμών στο ψηφιακό περιβάλλον των προσομοιώσεων, ορίστηκε στα 0.25 μ s. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με βάση την τιμή της διακοπτικής περιόδου, ώστε να καλύπτονται εύκολα όλα τα παραγόμενα σήματα, να θωρακίσει τα αποτελέσματά μας και να τα κάνει αξιόπιστα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Αλγορίθμων MRPT

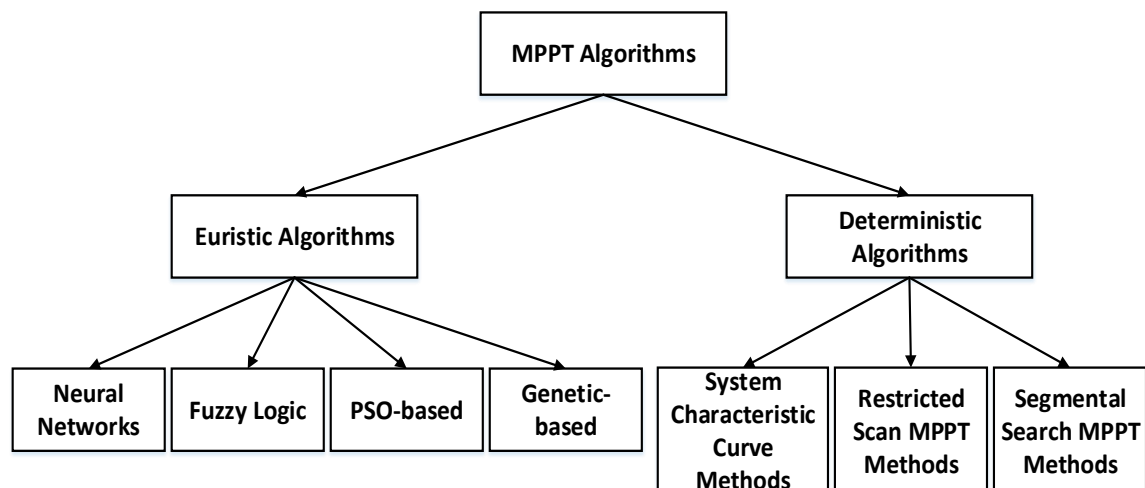
3.1 Εισαγωγή

Η σκίαση είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο, το οποίο δημιουργεί εν γένει δυσκολίες στη λειτουργία ενός ΦΒ συστήματος. Στην πλειονηφία των περιπτώσεων σκίασης σε μια συστοιχία, εμφανίζονται περισσότερα από ένα τοπικά μέγιστα στις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας. Μόνο ένα, όμως, είναι το ολικό μέγιστο. Οι επιδράσεις αυτές, της μερικής σκίασης, μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορους τρόπους. Ο πρώτος τρόπος έχει να κάνει με την κατάλληλη διάταξη των ΦΒ πλαισίων κατά την εγκατάσταση της συστοιχίας, ανάλογα με τα στοιχεία του εκάστοτε περιβάλλοντος χώρου που έχουν προκύψει από τη μελέτη που έχει προηγηθεί της εγκατάστασης. Η διάταξη μπορεί να είναι *σε σειρά-παράλληλα (series-parallel)*, *σε σταυρό (total-cross-tied)* ή *σε διάταξη σύνδεσης γέφυρας (bridge-linked)*. Ένας δεύτερος τρόπος έχει να κάνει με την αρχιτεκτονική σύνδεσης των ηλεκτρονικών ισχύος στη ΦΒ διάταξη. Μια αρχιτεκτονική σύνδεσης που επιτρέπει την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας σε επίπεδο ΦΒ πλαισίου είναι συνήθως πιο αποδοτική από την αντίστοιχη σε επίπεδο ΦΒ πλαισιοσειράς. Η τρίτη μέθοδος έχει να κάνει με την ανάπτυξη αλγορίθμων για την κατάλληλη οδήγηση των παλμών του ημιαγωγικού διακόπτη του DC-DC μετατροπέα, ώστε να επιτυγχάνεται η εύρεση του GMPP σε συνθήκες μερικής σκίασης. Με τη χρήση των MPPT αλγορίθμων η εύρεση του GMPP γίνεται πολύ πιο αποδοτική και ευέλικτη σε πραγματικό χρόνο, καθώς η μέθοδος αυτή προσαρμόζεται στις συνθήκες πιο εύκολα απ' ό,τι οι άλλες δύο. Επιπλέον, είναι αισθητά πιο οικονομική. Για τους λόγους αυτούς η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται σε αυτό το κεφάλαιο με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των αλγορίθμων MPPT σε συνθήκες μερικής σκίασης, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιεί συγκριτική μελέτη ορισμένων εξ' αυτών.

Πολυάριθμες μελέτες έχουν εκπονηθεί για την ανάπτυξη αλγορίθμων ανίχνευσης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας (MPP) στις χαρακτηριστικές καμπύλες ενός ΦΒ συστήματος που λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες. Μερικοί από τους πιο δημοφιλείς εξ' αυτών είναι: η μέθοδος *Perturbation and Observation (P&O)*, η μέθοδος *Incremental Conductance (INC)*, η μέθοδος *Hill Climbing (HC)*, οι μέθοδοι *short-circuit current*, *open-circuit voltage* και *ripple correlation*. Αναλυτική παρουσίαση και σύγκριση των αλγορίθμων αυτών γίνεται στο [14]. Τα κύρια πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η πολύ απλή πολυπλοκότητα υλοποίησης και εκτέλεσης τους, καθώς και η αρκετά γρήγορη σύγκλιση τους στο MPP. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνικές αυτές είναι αποδοτικές μόνο όταν στις χαρακτηριστικές καμπύλες υπάρχει ένα και μοναδικό MPP και, μόνο τότε, εξάγουν μια αξιόπιστη τιμή duty cycle για την σταθεροποίηση του συστήματος στο GMPP. Όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή της διπλωματικής, σε συνθήκες μερικής σκίασης εμφανίζονται περισσότερα από ένα LMPPs, λόγω των διόδων διαφυγής που χρησιμοποιούνται στη συνδεσμολογία των ΦΒ πλαισίων, και μόνο ένα αποτελεί το GMPP. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι εγκλωβίζονται συνήθως σε κάποιο τοπικό μέγιστο της χαρακτηριστικής καμπύλης αδυνατώντας να εντοπίσουν το GMPP και, έτσι, οι απώλειες ενέργειας του ΦΒ συστήματος αυξάνονται σημαντικά.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι σε συνθήκες σκίασης, τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη πιο εξελιγμένων αλγορίθμων για την αντιμετώπιση του φαινομένου είναι στο επίκεντρο της έρευνας. Οι δύο κύριες κατηγορίες αλγορίθμων MPPT σε συνθήκες μερικής σκίασης είναι: *οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης* και *οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι*. Στους πρώτους ανήκουν τα *νευρωνικά δίκτυα (Neural Network Algorithms-NNA)*, οι αλγόριθμοι που υλοποιούνται με την *τεχνική της ασαφούς λογικής (fuzzy logic controllers-FLC)*, αυτοί που υλοποιούνται με τεχνικές σμήνους σωματιδίων (*Particle Swarm Optimization-PSO*) και οι *γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)* Σχ. 3. 1. Ο διαχωρισμός αυτός πηγάζει τόσο από τον τρόπο υλοποίησης τους, όσο και από τη μεθοδολογία που χρησιμοποιούν οι διάφορες τεχνικές για τον εντοπισμό του εκάστοτε GMPP. Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης χρησιμοποιούν περισσότερο στοχαστικές μεθόδους για την εύρεση του

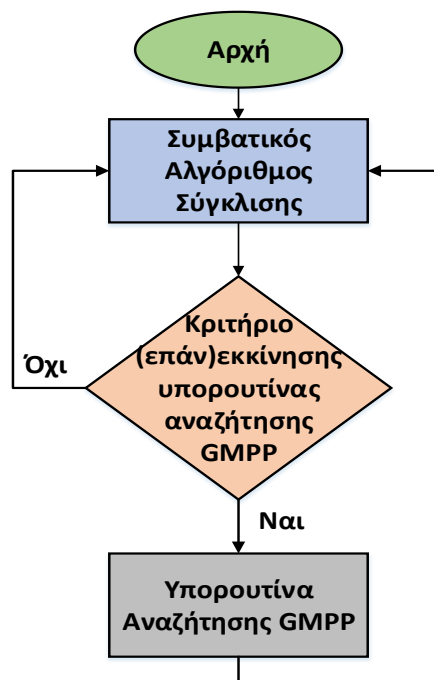
βέλτιστου σημείου λειτουργίας, ενώ οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι περιέχουν περισσότερο ευθείς υπολογισμούς για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ΦΒ συστήματος. Όπως είναι λογικό, οι πρώτοι έχουν μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος και μεσαία έως εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία υλοποίησης και εκτέλεσης, σε αντίθεση με τους δεύτερους, οι οποίοι μπορεί να υστερούν, πάντως, κάτω από κάποιες συγκεκριμένες περίπλοκες συνθήκες σκίασης ως προς την αξιοπιστία τους.



Σχ. 3. 1. Διαχωρισμός των αλγορίθμων MPPT σε κατηγορίες.

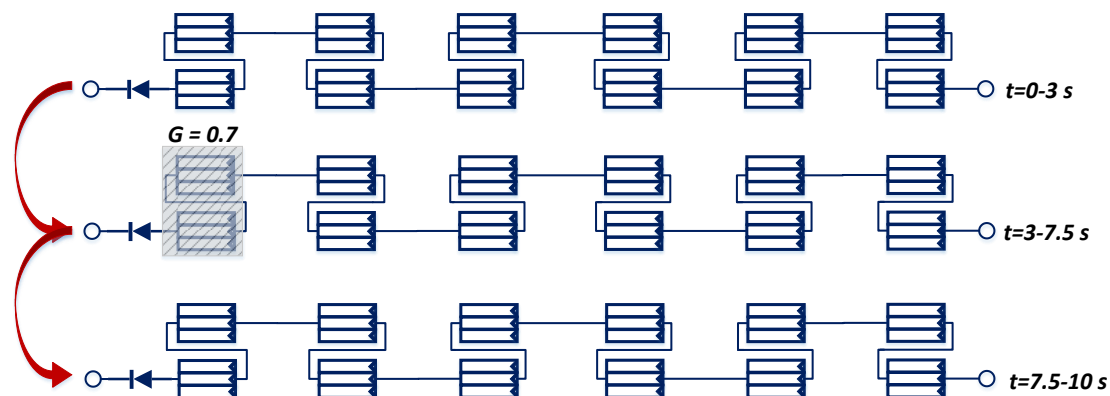
Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τους διάφορους αλγόριθμους που εξετάστηκαν, προέκυψε ότι υπάρχει ένα συγκεκριμένο μοτίβο λειτουργίας των αλγορίθμων στην πλειοψηφία τους, που χωρίζεται σε τρεις βασικούς άξονες:

1. Χρησιμοποιούν έναν *παραδοσιακό/συμβατικό αλγόριθμο (conventional algorithm)*, ο οποίος είναι σε συνεχή λειτουργία και χρησιμοποιείται για τη σύγκλιση του σημείου λειτουργίας σε μια υποδεδειγμένη περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης.
2. Έχουν μια συγκεκριμένη *υπορουτίνα επαναπροσδιορισμού του GMPP (GMPP search subroutine)*, όπου αυτό απαιτείται. Η υπορουτίνα αυτή, χρησιμοποιώντας κατάλληλη τεχνική η οποία συνάδει με τα επιμέρους χαρακτηριστικά του εκάστοτε αλγορίθμου, προσδιορίζει την περιοχή του βέλτιστου σημείου λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας.
3. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι διαθέτουν ένα *κριτήριο επανεκκίνησης* της παραπάνω υπορουτίνας προσδιορισμού του GMPP. Όταν αυτό το κριτήριο επαληθεύεται, τότε ο αλγόριθμος ξεκινά να ψάχνει για το GMPP, όπου αυτό μπορεί να είναι το ίδιο με την προηγούμενη κατάσταση του συστήματος ή να είναι διαφορετικό. Το κριτήριο επανεκκίνησης είναι είτε κάποια συνθήκη που έχει προκύψει από μια τεχνική αναγνώρισης της σκίασης (partial shading detection) που χρησιμοποιούν πολλοί αλγόριθμοι, είτε κάποιο περιοδικό χρονικό όριο (periodic timer interrupt) που είναι ρυθμισμένο από το χειριστή του συστήματος.



Σχ. 3. 2. Σχηματικό διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται, συνοπτικά, η γενική δομή της πλειοψηφίας των MPPT αλγορίθμων.

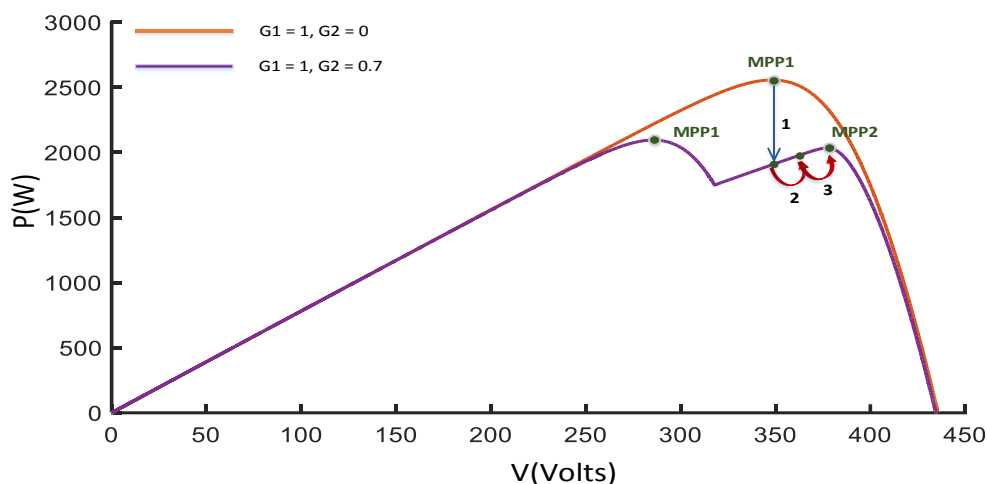
Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η χρήση των τριών αυτών σταδίων, τα οποία φαίνονται σαν δομή και στο Σχ. 3. 2, θα εξετάσουμε την εφαρμογή ενός απλού αλγορίθμου σε ένα σενάριο μερικής σκίασης σε μια ΦΒ πλαισιοσειρά, αποτελούμενη από 12 πλαίσια. Ο αλγόριθμος, που έχει χρησιμοποιηθεί στο παράδειγμα μας, κάνει χρήση, κατά το πρώτο στάδιο λειτουργίας του, του συμβατικού αλγορίθμου P&O, ο οποίος είναι σε συνεχή λειτουργία. Η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP περιλαμβάνει μια απλή σάρωση της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V του συστήματος, χρησιμοποιώντας σαν μεταβλητή ελέγχου το duty cycle, με βήμα σάρωσης 5%. Το τρίτο στάδιο της δομής του αλγορίθμου αποτελείται από το κριτήριο επανεκκίνησης της παραπάνω σάρωσης. Σαν συνθήκη επανεκκίνησης, εδώ, έχει επιλεγεί ένα περιοδικό χρονικό όριο των δύο δευτερολέπτων. Παρακάτω, στο Σχ. 3. 3 διακρίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου, ενώ στα Σχ. 3. 4, Σχ. 3. 5, Σχ. 3. 6 και Σχ. 3. 7, διακρίνονται αναλυτικά τα στάδια λειτουργίας της εφαρμογής του αλγορίθμου MPPT, που χρησιμοποιήθηκε.



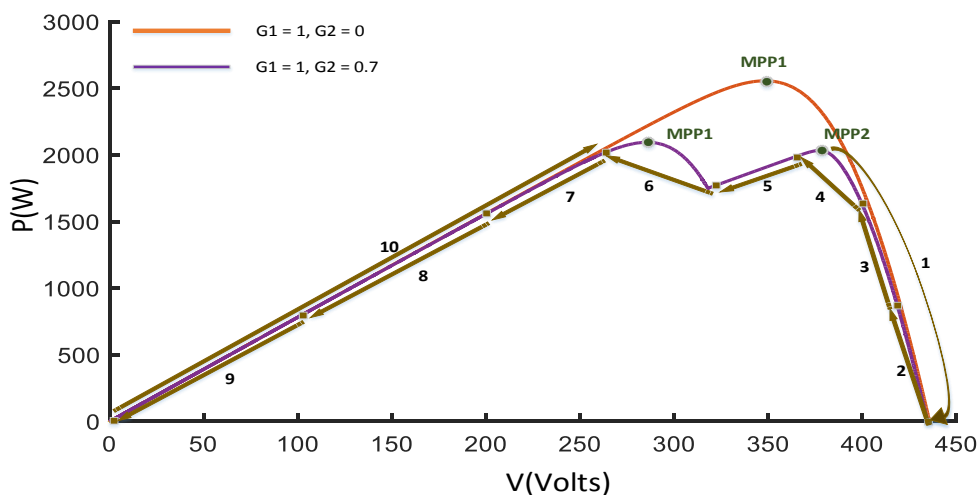
Σχ. 3. 3. Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης στη ΦΒ πλαισιοσειρά.

Αναλυτικότερα, στο Σχ. 3. 4, διακρίνεται η στιγμή κατά την εμφάνιση της μερικής σκίασης, έντασης 700 W/m^2 , σε δύο, από τα συνολικά δώδεκα, πλαίσια της συστοιχίας. Το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει κάθετα, στη νέα καμπύλη λειτουργίας, στην περιοχή του MPP2 (που δεν αποτελεί το GMPP) και συγκλίνει

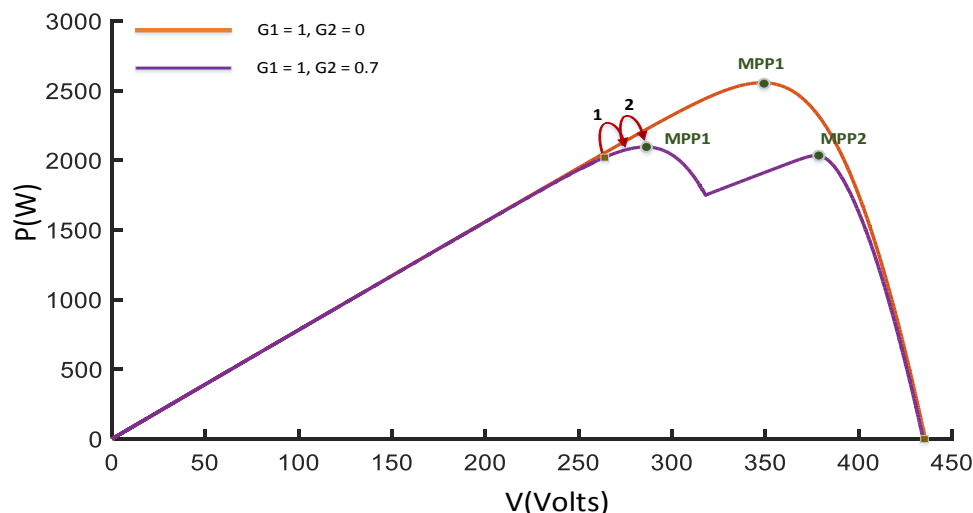
σε αυτό, μέσω του συνεχώς εκτελούμενου αλγορίθμου P&O. Το περιοδικό χρονικό όριο που έχει ρυθμιστεί από το χειριστή του συστήματος ενεργοποιείται κάθε 2 δευτερόλεπτα και πραγματοποιείται η σάρωση της καμπύλης P-V, για τον εντοπισμό του σωστού σημείου βέλτιστης λειτουργίας. Όταν συμβαίνει η σκίαση, για κάποιο χρονικό διάστημα ο αλγόριθμος συγκλίνει στο λάθος τοπικό μέγιστο και μόνο όταν η συνθήκη αυτή ενεργοποιείται γίνεται σύγκλιση στο σωστό, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3. 7. Τελικά, αφού εντοπιστεί η περιοχή του σωστού GMPP, που στην περίπτωσή μας είναι το MPP1, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει εκεί και μπαίνει εκ νέου σε λειτουργία ο αλγόριθμος P&O, για τη σύγκλιση σε αυτό. Το στάδιο αυτό φαίνεται στο Σχ. 3. 6, ενώ τα βήματα του σταδίου της σάρωσης φαίνονται στο Σχ. 3. 5. Για την πληρότητα κατανόησης του παραδείγματος, τα παραπάνω τρία βασικά στάδια λειτουργίας του αλγορίθμου MPPT, φαίνονται και στο Σχ. 3. 7, μέσω της καμπύλης της ισχύος του συστήματος.



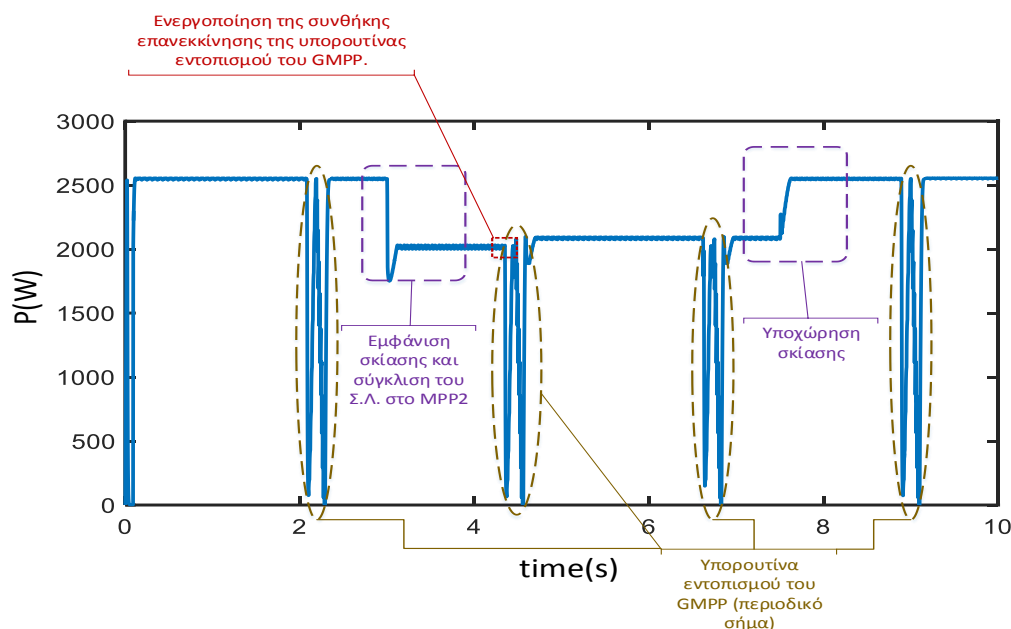
Σχ. 3. 4. Σχηματική παρουσίαση της κάθετης μετάπτωσης του σημείου λειτουργίας και της σύγκλισης του στο MPP2, κατά τη στιγμή εμφάνισης του φαινομένου της σκίασης στη ΦΒ πλαισιοσειρά.



Σχ. 3. 5. Σχηματική παρουσίαση του σταδίου εντοπισμού του GMPP με τη σάρωση της καμπύλης. Το στάδιο αυτό μπαίνει σε λειτουργία, όταν επαληθεύεται η συνθήκη του περιοδικού χρονικού ορίου.



Σχ. 3. 6. Σχηματική παρουσίαση του σταδίου επανενεργοποίησης του συμβατικού αλγορίθμου P&O, για τη σύγκλιση στο σωστό GMPP, που είναι το MPP1.



Σχ. 3. 7. Παρουσίαση των τριών βασικών σταδίων λειτουργίας του αλγορίθμου MPPT, μέσω της καμπύλης της ισχύος του ΦΒ συστήματος.

Εξετάζοντας προσεκτικά τη βιβλιογραφία και επεκτείνοντας την παραπάνω ανάλυση των τριών βασικών σταδίων, μπορεί κανείς να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το κύριο μερίδιο ενδιαφέροντος εστιάζεται στη διαφορετικότητα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιούν οι αλγόριθμοι κατά το στάδιο εντοπισμού του GMPP. Η παρατήρηση αυτή παρουσιάζει λογική, καθώς αν αξιολογήσουμε τα επιμέρους στάδια των αλγορίθμων διακριτά, θα δούμε ότι:

1. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιούνται οι γνωστοί συμβατικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι απλοί, δοκιμασμένοι και δεν υπάρχει καμία πιθανότητα να αποτύχουν στη διεργασία για την οποία χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, είναι αρκετά παρόμοιοι μεταξύ τους. Για τους λόγους αυτούς δεν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον στην περαιτέρω βελτιστοποίηση του σταδίου αυτού.

2. Στο τρίτο στάδιο, που περιλαμβάνει το κριτήριο επανεκκίνησης της υπορουτίνας εντοπισμού του GMPP, χρησιμοποιείται, όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια, είτε κάποια τεχνική αναγνώρισης της σκίασης που σχετίζεται με τη μεταβολή κάποιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του συστήματος είτε κάποιο περιοδικό χρονικό όριο. Στο στάδιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένες διαφορές στη φιλοσοφία κάποιων αλγορίθμων, ωστόσο, όπως θα φανεί, μια απλή συνθήκη μπορεί να δώσει μια αρκετά καλή λύση στη λειτουργία αυτού του σταδίου. Επίσης, η βελτιστοποίηση του σταδίου αυτού δεν δίνει λύση στο εν γένει πρόβλημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι MPPT αλγόριθμοι. Έτσι, ενώ παρουσιάζει κάποιο ερευνητικό ενδιαφέρον, δεν αποτελεί ουσιαστικό μέτρο σύγκρισης και διαφοροποίησης μεταξύ των αλγορίθμων στη βιβλιογραφία.
3. Εξετάζοντας, τώρα, κανείς, το δεύτερο στάδιο λειτουργίας των αλγορίθμων, που επικεντρώνεται στο βασικό στόχο τους, δηλαδή τον εντοπισμό του GMPP σε συνθήκες μερικής σκίασης, διαπιστώνει ότι αποτελεί το θεμελιώδες αντικείμενο ερευνητικής ανάπτυξης των αλγορίθμων. Η προσπάθεια βελτιστοποίησης της λειτουργίας αυτού του σταδίου είναι που θα δώσει την ουσιαστική λύση στην αντιμετώπιση του φαινομένου της μερικής σκίασης των ΦΒ συστημάτων και απασχολεί τους ερευνητές του κλάδου, τα τελευταία χρόνια. Το στάδιο αυτό αποτελεί και τη βάση σύγκρισης των αλγορίθμων στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε, στην παρούσα εργασία.

Αξιοσημείωτες ερευνητικές μελέτες, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί τόσο σε θεωρητική όσο και σε πειραματική βάση, για τη σύγκριση των αλγορίθμων MPPT σε συνθήκες μερικής σκίασης παρουσιάζονται στα [15]–[29]

3.2 Ντετερμινιστικοί Αλγόριθμοι MPPT(Deterministic MPPT Algorithms)

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, θα εξετάσουμε τους αλγόριθμους MPPT, των οποίων η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP έχει μια δομή ντετερμινιστικής φύσης και στηρίζεται σε κάποια στοχαστική λογική, όπως συμβαίνει με τους αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, που αναλύθηκαν προηγουμένως. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι MPPT, μπορούμε να πούμε ότι χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: *τους αλγόριθμους που στηρίζονται σε εμπειρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών του συστήματος (System Characteristic Curve MPPT Methods-SCCMM)*, *τους αλγόριθμους περιορισμένης σάρωσης της χαρακτηριστικής P-V (Restricted Scan MPPT Methods-RSMM)* και *τους αλγόριθμους που βασίζονται σε μαθηματικές ή άλλες μεθόδους διαχωρισμού της καμπύλης P-V σε τμήματα (Segmental Search MPPT Methods-SSMM)*. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους αλγόριθμους, οι οποίοι στηριζόμενοι σε εμπειρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ συστήματος(κυρίως των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας του) εντοπίζουν την περιοχή όπου κείται το GMPP. Στη δεύτερη κατηγορία περιέχονται οι μέθοδοι εκείνες οι οποίες εκτελούν μια έξυπνη σάρωση ή/και εντοπισμό οριοθετημένης περιοχής πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη, για τον εντοπισμό του GMPP. Η τρίτη κατηγορία ντετερμινιστικών αλγορίθμων, στηρίζεται σε μαθηματικές σχέσεις ή/και μεθόδους, οι οποίες είτε προυπήρχαν είτε έχουν εξαχθεί από τους εκάστοτε ερευνητές, για τον εντοπισμό των κρίσιμων περιοχών ύπαρξης των διαφόρων LMPPs και, φυσικά, του επιθυμητού GMPP.

3.2.1 Μέθοδοι MPPT στηριζόμενες σε εμπειρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών του συστήματος (System Characteristic Curve MPPT Methods-SCCMM)

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας, όπως και όλοι οι αλγόριθμοι ντετερμινιστικής φύσης, χαρακτηρίζονται από την απλότητα τόσο στην υλοποίηση όσο και στην εκτέλεση τους. Οι απαιτήσεις λειτουργίας τους είναι περιορισμένες, σε αντίθεση με τους περισσότερους αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, ενώ η ακρίβεια και η ταχύτητα σύγκλισης τους διαφέρει ανάλογα με τα επιμέρους χαρακτηριστικά του καθενός.

Μια από τις πρώτες ερευνητικές εργασίες που παρουσίασαν έναν αλγόριθμο MPPT αυτής της κατηγορίας το 2006, είναι αυτή στο [30], όπου χρησιμοποιείται μια προκαθορισμένη γραμμική συνάρτηση για τον εντοπισμό της περιοχής του βέλτιστου σημείου λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική λειτουργίας I-V του συστήματος, σε συνθήκες μερικής σκίασης. Η γραμμική αυτή σχέση είναι η εξής:

$$R_{pm} = \frac{V_{pm}}{I_{pm}} \quad [3.1]$$

όπου το V_{pm} συμβολίζει το 80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης της συστοιχίας στις εκάστοτε συνθήκες και το I_{pm} το 90% του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Το βασικό μειονέκτημα, εδώ, είναι η συνεχής ανάγκη για ανανέωση των τιμών της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε κάθε προκύπτουσα αλλαγή των συνθηκών. Επίσης, η μέθοδος αυτή αποτυγχάνει όταν το ΦΒ σύστημα υπόκειται σε πολύπλοκες συνθήκες μερικής σκίασης. Λειτουργεί σχετικά σωστά όταν υπάρχουν μέχρι το πολύ 3 επίπεδα ακτινοβολίας. Το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχ. 3. 8.

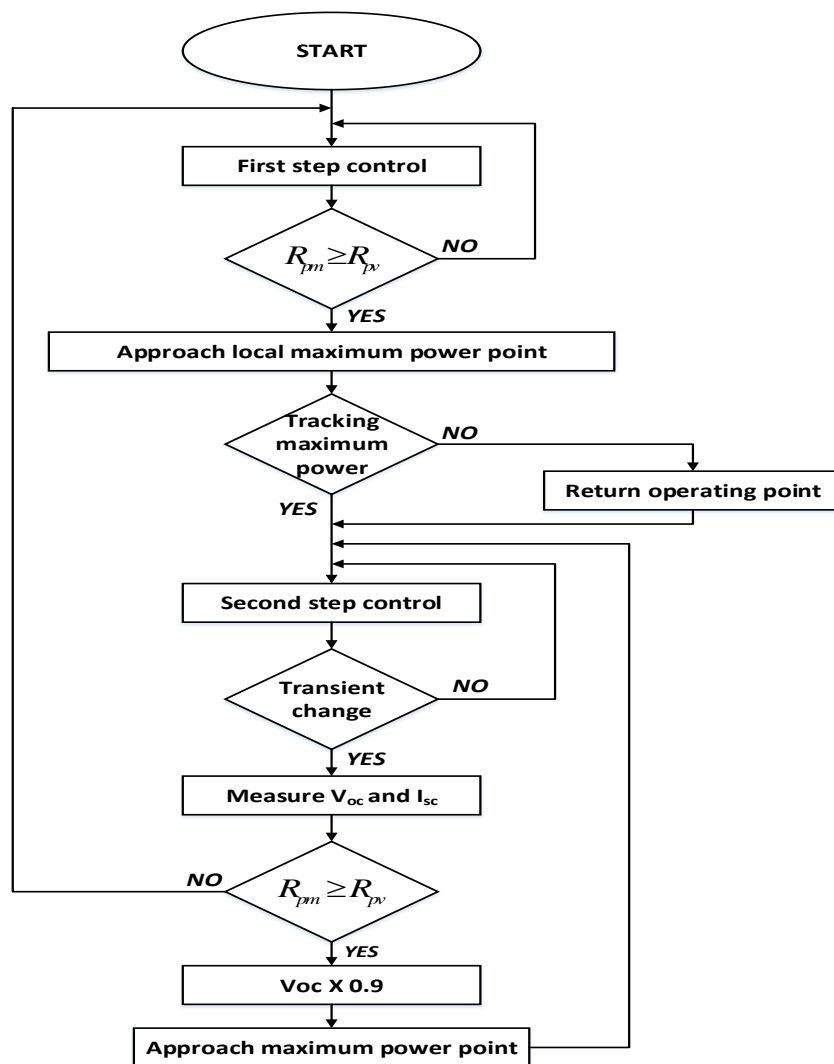
Παρόμοιο τρόπο λειτουργίας έχει και ο αλγόριθμος στο [31], όπου έχει γίνει η εμπειρική παρατήρηση ότι η περιοχή του βέλτιστου σημείου λειτουργίας σε συνθήκες μερικής σκίασης, σε ένα ΦΒ σύστημα, τέμνεται, συνήθως, με την ονομαστική γραμμή φορτίου σε ομοιόμορφες συνθήκες. Η γραμμική σχέση, η οποία χρησιμοποιείται εδώ, είναι η:

$$R = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad [3.2]$$

Σε αυτή τη μέθοδο δεν χρειάζεται συνεχής γνώση των τιμών της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες, καθώς ο αλγόριθμος στηρίζεται στις τιμές των μεγεθών αυτών σε ομοιόμορφες συνθήκες. Βέβαια, εύκολα διαπιστώνεται ότι και εδώ, όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, υπάρχει αποτυχία σύγκλισης στο βέλτιστο σημείο όταν οι συνθήκες γίνονται λίγο πιο περίπλοκες. Την ίδια διαδικασία σύγκλισης στο GMPP ακολουθεί και η μέθοδος στο [32], με τη μόνη διαφορά ότι, εδώ χρησιμοποιείται η γραμμική σχέση:

$$G_p = \frac{I_m}{K \cdot V_m} \quad [3.3]$$

όπου V_m και I_m είναι η καταγεγραμμένη τάση και ρεύμα του χρησιμοποιούμενου, από τους συγγραφείς, ΦΒ πλαισίου στην εκάστοτε ακτινοβολία.



Σχ. 3. 8. Σχηματικό διάγραμμα του αλγόριθμου στο [30].

Τα μεγέθη αυτά μετρούνται, όπως αναφέρεται με τη χρήση μιας πλατφόρμας προσομοίωσης. Στο [33] για τον εντοπισμό της περιοχής του GMPP, γίνεται χρήση της γραμμικής σχέσης:

$$P_{MPP}(t) = a \cdot [T(t)] \cdot I_{IMPP}[E(t)] \quad [3.4]$$

η οποία εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους του συστήματος, όπως η θερμοκρασία των πλαισίων. Στο [34], αντίστοιχα, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$V_{pv}^* = \left(\frac{V_{o,rms}}{I_{o,rms}}\right) \cdot I_{pv}[n] \approx \left(\frac{V_g}{I_{out}}\right) \cdot I_{pv}[n] \quad [3.5]$$

Το βασικό μειονέκτημα των τεσσάρων παραπάνω μεθόδων είναι η αποτυχία σωστής σύγκλισης, όταν οι συνθήκες σκίασης γίνονται πολύπλοκες. Επιπρόσθετα, σε κάποιες από αυτές, η ανάγκη ύπαρξης επιπλέον αισθητήρων για τη μέτρηση στιγμιαίων παραμέτρων του συστήματος, τις οποίες χρησιμοποιούν στις σχέσεις τους, αυξάνει το κόστος και την περιπλοκότητα του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, προσφέρουν κάτι σημαντικό: με τη χρήση γραμμικών σχέσεων απαιτούνται πολύ λίγα βήματα για τη μεταφορά του σημείου λειτουργίας στην καθορισμένη περιοχή του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Έτσι, η ταχύτητα

σύγκλισης μειώνεται δραματικά και γίνεται σχεδόν παρόμοια με την ταχύτητα των συμβατικών, απλών αλγορίθμων.

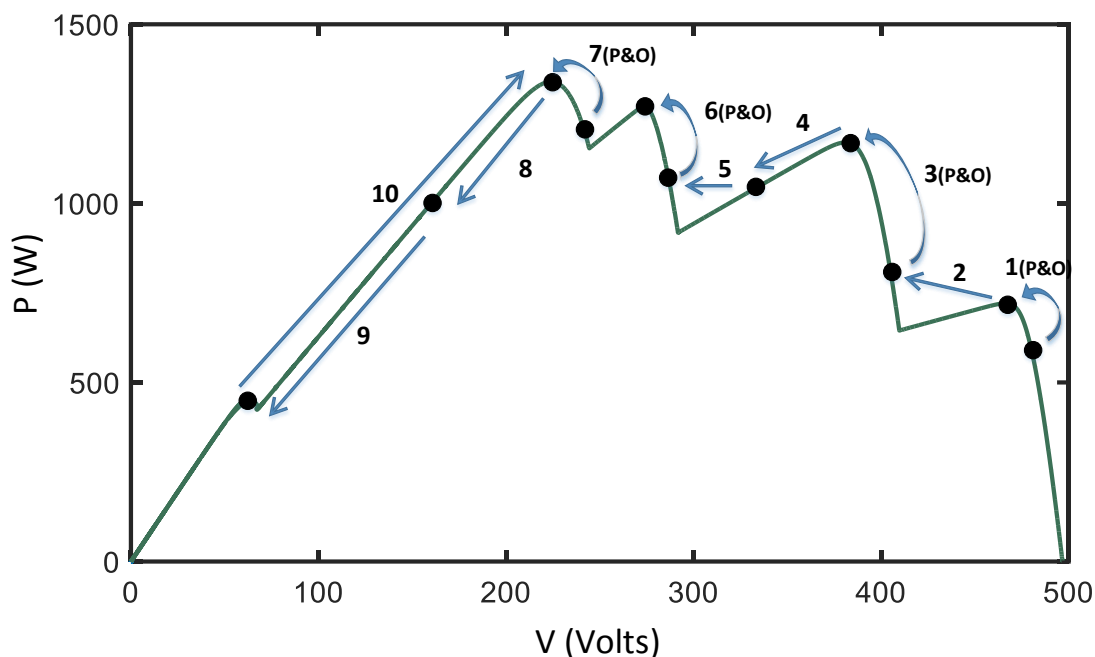
3.2.2 Μέθοδοι MPPT περιορισμένης σάρωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V (Restricted Scan MPPT Methods-RSMM)

Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους, υπάρχουν και αυτές, οι οποίες με τη βοήθεια κάποιων έξυπνων μεθόδων, πραγματοποιούν περιορισμένης κλίμακας σάρωση της χαρακτηριστικής λειτουργίας για την αναζήτηση του GMPP, σε συνθήκες σκίασης. Μια από τις πρώτες ερευνητικές μελέτες, που ανέπτυξε μια τέτοια μέθοδο και αποτελεί βάση για αρκετές μεταγενέστερες, είναι αυτή των Patel και Agarwal στο [35]. Εξετάζοντας τη συμπεριφορά του ΦΒ συστήματος σε αρκετά διαφορετικά σενάρια σκίασης, οι συγγραφείς έκαναν κάποιες παρατηρήσεις και με βάση αυτές προσπάθησαν να εντοπίσουν σε κάθε περίπτωση το βέλτιστο σημείο λειτουργίας, σαρώνοντας τη χαρακτηριστική καμπύλη P-V σε λιγότερο χρόνο με ένα συγκεκριμένο βήμα, βάσει κάποιων κανόνων, απ' ό,τι θα απαιτούσε μια ολοκληρωμένη σάρωση όλων των σημείων της καμπύλης. Οι κανόνες που χρησιμοποίησαν οι συγγραφείς για τη σάρωση είναι οι εξής:

1. Αφού μπει σε λειτουργία η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP, η σάρωση ξεκινά από το δεξί τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και συγκεκριμένα από το σημείο που αντιστοιχεί στο 85% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (το σημείο που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι το δεξί ακραίο σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης). Στη συνέχεια, μπαίνει σε λειτουργία ο παραδοσιακός αλγόριθμος P&O για τον εντοπισμό του πρώτου τοπικού μεγίστου της καμπύλης, το οποίο θα αποτελέσει βάση για την περαιτέρω αναζήτηση.
2. Αφού αποθηκευτούν οι τιμές που χαρακτηρίζουν το πρώτο μέγιστο που εντοπίστηκε, αυτό χρησιμοποιείται σαν βάση. Γίνεται σάρωση της χαρακτηριστικής προς τα δεξιά (από μεγαλύτερη προς μικρότερη τάση) με ένα προτεινόμενο βήμα κοντά στο 60-80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του κάθε πλαισίου ($V_{oc,module}$) και σε κάθε βήμα γίνεται εκτίμηση της κλίσης της χαρακτηριστικής. Αν η κλίση βρεθεί αρνητική, κατά τη μετακίνηση προς τα αριστερά, αυτό σημαίνει ότι στην περιοχή υπάρχει κάποιο τοπικό μέγιστο, οπότε μπαίνει σε λειτουργία ο αλγόριθμος P&O για να γίνει σύγκλιση σε αυτό. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται όσο η υπορουτίνα εντοπίζει τοπικά μέγιστα μεγαλύτερης ενεργειακής στάθμης από το μέγιστο προηγούμενο αποθηκευμένο.
3. Όταν εντοπιστεί τοπικό μέγιστο μικρότερο από το τελευταίο αποθηκευμένο μέγιστο, τότε επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία σάρωσης, αυτή τη φορά προς τη δεξιά πλευρά του τελευταίου μεγίστου, το οποίο έχει αποθηκευτεί σαν GMPP.

Η διαδικασία, που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 3. 9.

Το [35] είναι η παραπομπή, η οποία έχει περισσότερες ετεροαναφορές (citations) από κάθε άλλη στο κομμάτι των MPPT αλγορίθμων για ΦΒ συστήματα, σε συνθήκες μερικής σκίασης. Είναι μια μέθοδος κατανοητή, εύκολα υλοποιήσιμη και εφαρμόσιμη, ενώ δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά το κύκλωμα ελέγχου, στο οποίο εφαρμόζεται.



Σχ. 3. 9. Ενδεικτικό παράδειγμα για την επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας στο [35].

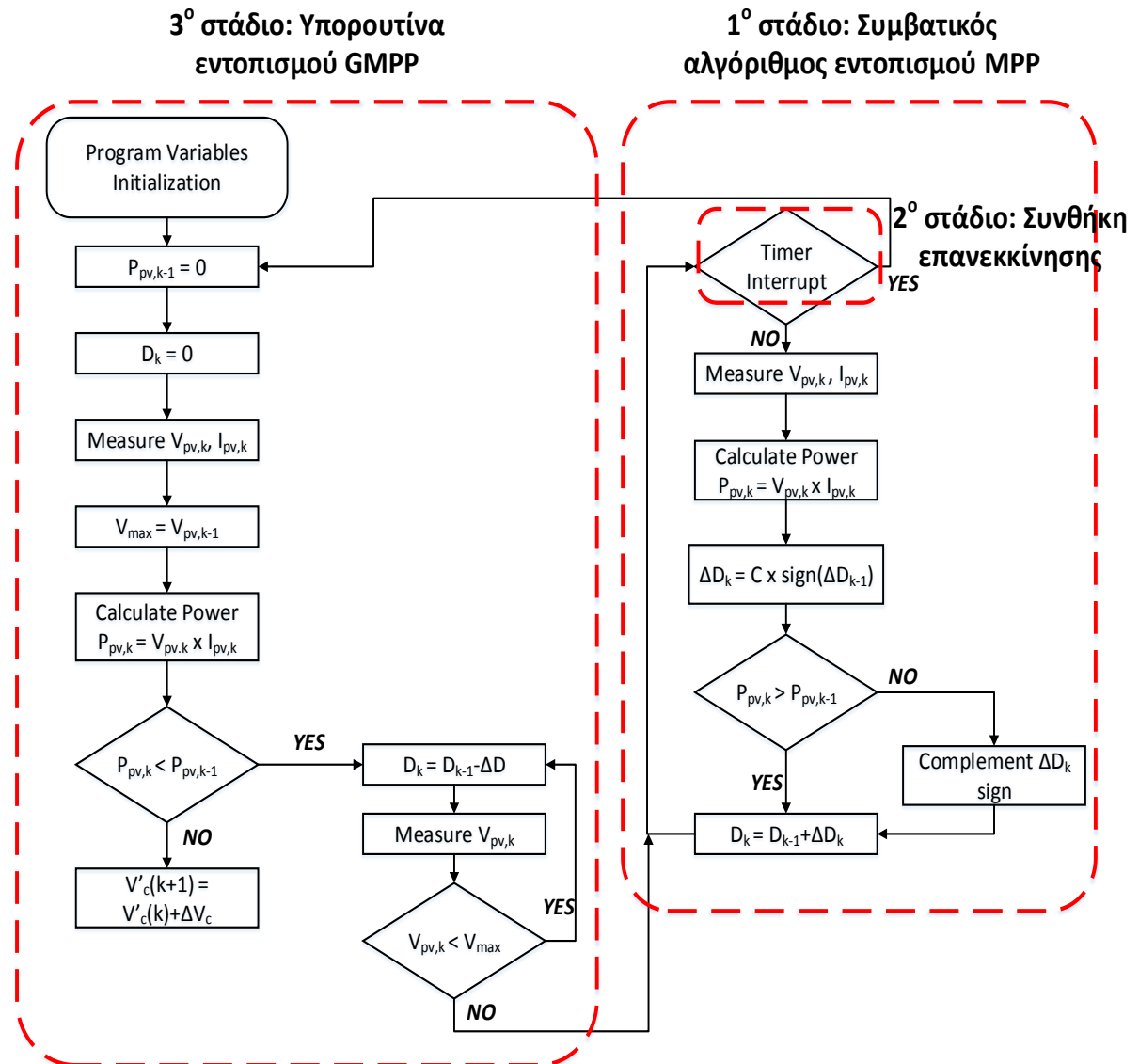
Παρ' όλα αυτά, είναι μια παλιά μέθοδος, η οποία παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία θα εξεταστούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Αρκετά παρόμοιες μέθοδοι με αυτή του Patel, είναι αυτές στα [36] και [37]. Η μια μέθοδος είναι εξέλιξη της άλλης και είναι αρκετά παρόμοιες. Και εδώ, όπως και πριν, σαν βάση για τη λειτουργία των μεθόδων χρησιμοποιείται η εμπειρική παρατήρηση ότι τα τοπικά μέγιστα μιας P-V χαρακτηριστικής σε ένα σύστημα υπό μερική σκίαση εμφανίζονται περίπου σε περιοχές τάσεων αναφοράς, οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια του 80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του συστήματος. Το βήμα που χρησιμοποιείται εδώ είναι αρκετά μεγαλύτερο, οπότε ο χρόνος εκτέλεσης και σύγκλισης είναι μικρότερος από την προηγούμενη μέθοδο. Παρ' όλα αυτά οι αλγόριθμοι είναι υλοποιημένοι και λογικά στηριγμένοι σε ΦΒ συστήματα, τα οποία υπόκεινται σε σενάρια σκίασης, όπου εμφανίζονται το πολύ τρία τοπικά μέγιστα στη χαρακτηριστική καμπύλη P-V. Οπότε, όταν το σενάριο σκίασης είναι λίγο πιο περίπλοκο, οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν μεγάλη πιθανότητα αποτυχίας.

Με βάση την ίδια λογική της έξυπνης σάρωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V για την εύρεση του GMPP έχουν δομηθεί και οι αλγόριθμοι, οι οποίοι παρουσιάζονται στα [38]–[44]. Στις μεθόδους αυτές, οι ερευνητές προσπαθούν να εφαρμόσουν την ιδέα της εύρεσης ενός συγκεκριμένου διαστήματος με περιορισμένο εύρος, πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη, όπου είναι πολύ πιθανό να βρίσκεται το GMPP. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο περιορισμός του παραθύρου σάρωσης και, άρα, ο μειωμένος χρόνος σύγκλισης των αλγορίθμων. Βέβαια, όπως θα δούμε, επειδή η διαδικασία εύρεσης του επιθυμητού διαστήματος αναζήτησης, και εδώ, στηρίζεται κατά βάση είτε σε εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις που αφορούν τα πλαίσια της ΦΒ συστοιχίας, είτε σε εμπειρικές παρατηρήσεις των χαρακτηριστικών του συστήματος σε συνθήκες μερικής σκίασης, εγκυμονείται ο κίνδυνος να μην περιλαμβάνεται το GMPP, τελικά, στο διάστημα αναζήτησης, όταν το σενάριο σκίασης είναι αρκετά περίπλοκο. Στα [38]–[40] γίνεται σάρωση ενός μόνο μέρους της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V με σταθερό βήμα αναζήτησης. Οι τιμές της ισχύος αποθηκεύονται/ανανεώνονται στη θέση μνήμης σε κάθε βήμα, και στο τέλος της σάρωσης το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει στην περιοχή, όπου έχει γίνει δειγματοληψία της μέγιστης τιμής ισχύος. Στο [39], για παράδειγμα, το βήμα a , το οποίο ορίζεται από το χειριστή του συστήματος, είναι η κλίση μιας ράμπας σάρωσης της τάσης κατά μήκος της χαρακτηριστικής P-V. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της ράμπας, τόσο πιο γρήγορα γίνεται η σάρωση, αλλά και τόσο λιγότερα σημεία λειτουργίας σαράνονται

από τον αλγόριθμο. Στο [40] χρησιμοποιείται η εμπειρική παρατήρηση εμφάνισης των τοπικών μεγίστων σε υποπολλαπλασιαστές τιμές του 80% της ολικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης του ΦΒ συστήματος και η σάρωση γίνεται σε τιμές τάσης από το 80% της τάσης αυτής και κάτω. Στο [38] υπάρχει η καινοτομία της χρήσης μιας μεταβλητής ισχύος(και όχι της τάσης ή του duty cycle) σαν βάση βήματος σάρωσης του αλγόριθμου. Παρ' όλο που η ιδέα αυτή είναι αρκετά λογική και μειώνει κατά πολύ το χρόνο σύγκλισης όταν η μέθοδος επιτυγχάνει, δημιουργεί την απαίτηση ύπαρξης DC-DC μετατροπέα στο σύστημα, ο οποίος να έχει ειδικό σχεδιασμό ώστε να δέχεται σαν είσοδο ελέγχου από τον αλγόριθμο τη μεταβλητή ισχύος. Αυτό, ίσως, αυξήσει το συνολικό κόστος του συστήματος. Το σχηματικό διάγραμμα του αλγόριθμου φαίνεται, παρακάτω, στο Σχ. 3. 10. Στο [42] εφαρμόζεται η ιδέα της χρήσης ενός ορθογωνίου τριγώνου το οποίο περικλύει τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας P-V και μεταβάλλεται, αναλόγως του επίπεδου ισχύος του σημείου λειτουργίας. Το τρίγωνο αυτό ορίζει το διάστημα αναζήτησης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Παρόμοιες μέθοδοι σε πιο απλουστευμένη μορφή, καθώς πραγματοποιούν απλή σάρωση της χαρακτηριστικής, είναι και αυτές στα [26], [30] και [31].

Το βασικό πλεονέκτημα των παραπάνω μεθόδων, οι οποίες στηρίζονται στη φιλοσοφία της έξυπνης σάρωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V για την εύρεση των τοπικών μεγίστων και, άρα, του GMPP, είναι η απλότητα υλοποίησης και εκτέλεσής τους. Μπορούν, επίσης, πολύ εύκολα, να ταιριάζουν με ένα απλό κύκλωμα ισχύος και ελέγχου του ΦΒ συστήματος, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις. Από την άλλη μεριά, όμως, θα μπορούσε κανείς να πει ότι, η βασική καινοτομία αυτών των αλγορίθμων, που είναι το διάστημα αναζήτησης και η επιλογή του βήματος σάρωσης, θα μπορούσε να γίνει και το βασικό μειονέκτημα τους. Αυτό συμβαίνει γιατί σε περίπλοκες συνθήκες σκίασης, όπου ίσως δημιουργηθούν στην καμπύλη P-V του συστήματος αρκετά τοπικά μέγιστα, το παράθυρο αναζήτησης και η επιλογή του βήματος σάρωσης επηρεάζουν σημαντικά την επιτυχία ή όχι των μεθόδων. Για παράδειγμα, όταν το βήμα σάρωσης είναι πολύ μικρό η πιθανότητα να βρεθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας αυξάνεται, αλλά αυξάνεται, παράλληλα, και ο χρόνος εύρεσης αυτού. Δηλαδή, η μέθοδος γίνεται αργή. Αντίθετα, αν το βήμα είναι αρκετά μεγάλο μειώνεται ο χρόνος που χρειάζεται ο αλγόριθμος για τη σύγκλιση του, αλλά μειώνεται, ίσως, η πιθανότητα εύρεσης του GMPP. Συμπερασματικά, για την επιτυχή χρήση αυτού του είδους μεθόδων, είναι αναγκαίος ένας σωστός συνδυασμός επιλογής μεγέθους βήματος αναζήτησης με την ανοχή ενός κανονικού χρόνου σύγκλισης.

Στα [43], [44], αναπτύσσονται δύο διαφορετικές μέθοδοι, οι οποίες με βάση τον αριθμό των ΦΒ πλαισίων, διάχωρίζουν τη χαρακτηριστική P-V σε τμήματα και, στη συνέχεια, αναζητούν τα τοπικά μέγιστα(και το GMPP) μέσα σε αυτά. Η ακρίβεια αναζήτησης είναι αυξημένη εδώ, αλλά, επίσης, αυξημένος είναι και ο χρόνος σύγκλισης των μεθόδων, καθώς η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους που είδαμε.



Σχ. 3. 10. Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου, η οποία παρουσιάζεται στο [38].

Μερικά τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων αλγορίθμων παρουσιάζονται συνοπτικά, παρακάτω, στον Πίνακα 3. 1.

Πίνακας 3. 1. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά όλων των παραπάνω εξεταζόμενων νετερμινιστικών αλγορίθμων των δύο πρώτων κατηγοριών.

Ref.	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track. time	Tr. Levels Supp.	PV System Dep.
[30]	V _{pv} , I _{pv}	V _{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Expensive	Fast	3	No
[31]	V _{pv} , I _{pv}	D _{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Fast	Any	No
[32]	V _{pv} , I _{pv}	V _{ref}	Boost	Digital	PIC16F873	Simple	Inexpensive	Medium	Any	No

[33]	V_{pv}, I_{pv}	I_{ref}	Boost	Digital	-	Simple	Inexpensive	Medium	Any	No
[34]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	DSP TMS320F2812	Simple	Inexpensive	Medium	3	No
[35]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Inexpensive	Slow	Any	No
[36]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	SEPIC	Digital	Software Impl.	Medium	Inexpensive	Slow - Medium	3	No
[37]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	SEPIC	Digital	Software Impl.	Medium	Inexpensive	Slow - Medium	3	No
[38]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Atmel AVR ATMEGA8535	Simple	Medium	Medium - Fast	Any	No
[39]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Medium - Fast	Any	No
[40]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Fast	Any	No
[42]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Fast	Any	No
[41]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Medium	Any	No
[45]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Medium	Any	No
[46]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Medium	Any	No
[43]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	DSP TMS320F2812	Medium	Inexpensive	Medium	Any	Yes
[44]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Inexpensive	Medium	Any	Yes

3.2.3 Μέθοδοι MPPT διαχωρισμού της χαρακτηριστικής P-V σε τμήματα με μαθηματικές ή άλλες μεθόδους (Segmental Search MPPT Methods-SSMM)

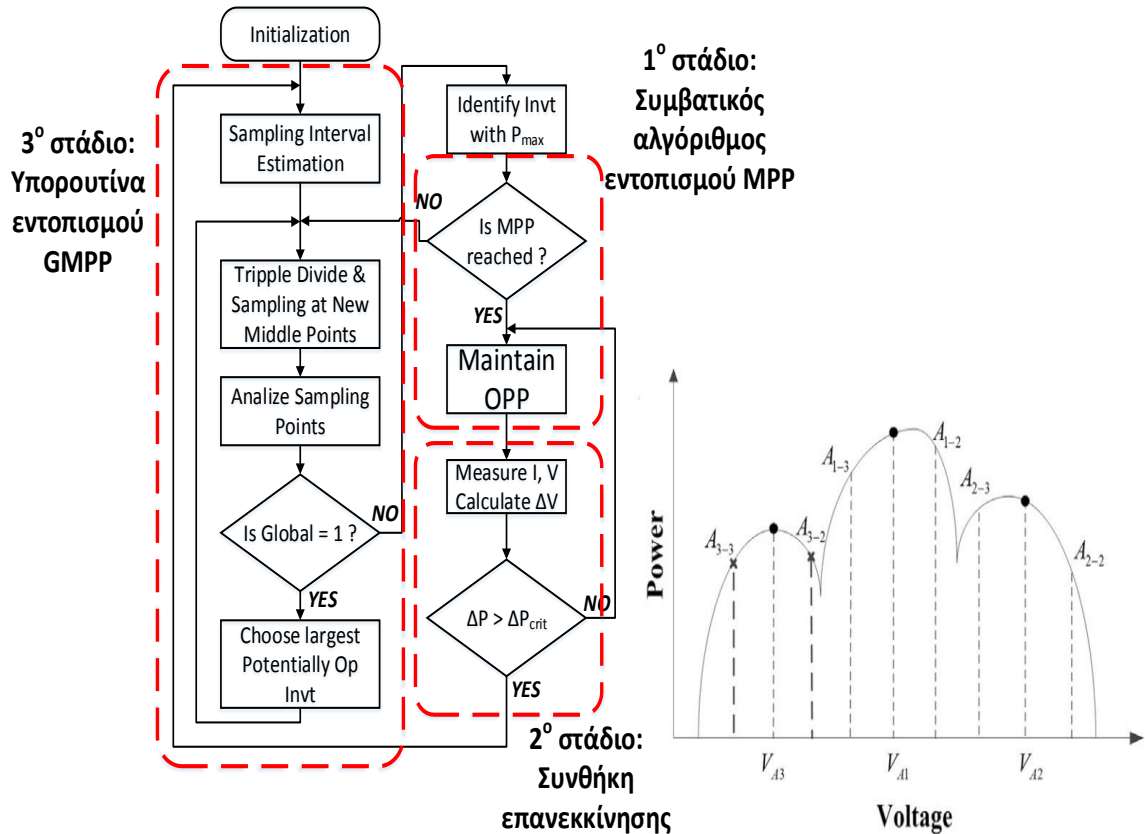
Η βασική δομή των μεθόδων MPPT διαχωρισμού, οι οποίες αναλύονται σε αυτή την υποενότητα, είναι παρόμοια με των προηγούμενων και στηρίζεται στη δομή των τριών σταδίων. Στο στάδιο αναζήτησης του GMPP, οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν γνωστές μαθηματικές μεθόδους ή/και μαθηματικές-εμπειρικά εξαγόμενες-σχέσεις, οι οποίες μπορεί να χαρακτηρίζουν είτε τις περιοχές στις οποίες εμφανίζονται τα τοπικά μέγιστα σε μια χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας είτε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ομάδων πλαισίων της ΦΒ συστοιχίας.

Μια τέτοια, πολύ γνωστή μέθοδος, παρουσιάζεται στο [47]. Η θεωρητική βάση της μεθόδου αυτής στηρίζεται στην παρατήρηση ότι η P-V χαρακτηριστική ενός ΦΒ συστήματος ακολουθεί τις προϋποθέσεις της μαθηματικής μεθόδου του Lipschitz. Ως εκ τούτου, σε ένα πρόβλημα εύρεσης του ολικού μεγίστου της χαρακτηριστικής, μπορεί να γίνει χρήση της τεχνικής διαχωρισμού των ορθογωνίων (dividing rectangle technique-DIRECT) για την εύρεση όλων των τοπικών μεγίστων. Η τεχνική αυτή χωρίζει το ολικό πεδίο αναζήτησης (καμπύλη P-V), αρχικά, σε τρεις όμοιες περιοχές χρησιμοποιώντας μαθηματικές μεθόδους και, στη συνέχεια, μαθηματικές σχέσεις για την εύρεση, ενδεχομένως, των βέλτιστων

διαστημάτων αναζήτησης (POIs) των τοπικών μεγίστων. Ο διαχωρισμός αυτός φαίνεται και στο Σχ. 3. 11. Οι βασικοί κανόνες για την εύρεση των βέλτιστων αυτών διαστημάτων είναι οι ακόλουθοι:

$$f(x_j) + \tilde{K} \cdot \frac{(a_j - b_j)}{2} \geq f(x_i) + \tilde{K} \cdot \frac{(a_i - b_i)}{2} \quad \forall i$$

$$f(c_j) + \tilde{K} \cdot \frac{(a_j - b_j)}{2} \geq f_{\max} + \varepsilon \cdot |f_{\max}|$$
[3. 6]

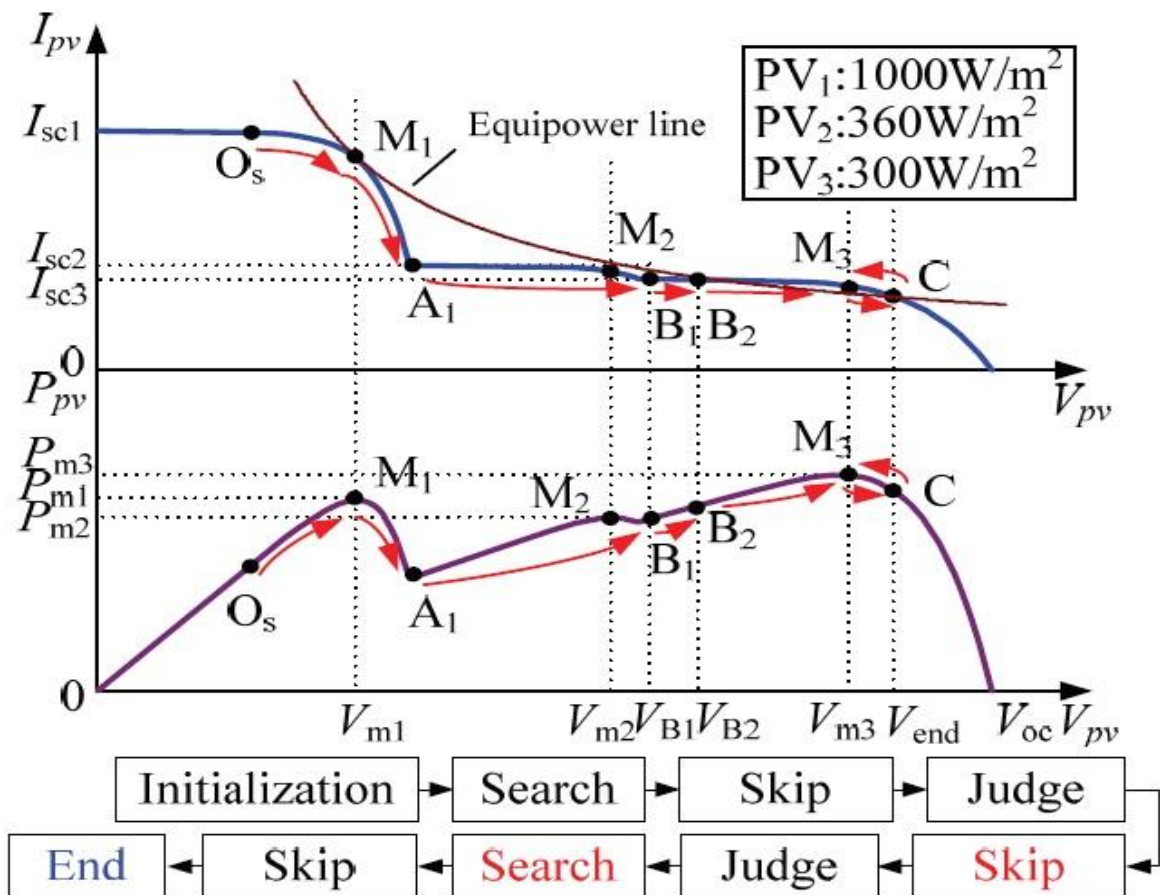


Σχ. 3. 11. Σχηματικό διάγραμμα και παράδειγμα διαχωριστικής λειτουργίας του αλγορίθμου DIRECT [47].

Μια άλλη μέθοδος διαχωρισμού της χαρακτηριστικής P-V σε τμήματα, αναφέρεται στο [48]. Η μέθοδος αυτή, στο στάδιο της αναζήτησης του GMPP διαχωρίζει την χαρακτηριστική καμπύλη σε τμήματα αναζήτησης των τοπικών μεγίστων της με βάση μια σταθερή και συγκεκριμένη μεταβλητή διαχωρισμού, η οποία εξαρτάται από το είδος των ΦΒ πλαισίων από τα οποία αποτελείται η συστοιχία, από τη διαμόρφωση του συστήματος (για παράδειγμα, ο αριθμός των εν σειρά/παράλληλα τοποθετημένων πλαισίων) και από τις ειδικές συνθήκες σκίασης στις οποίες υπόκειται το ΦΒ σύστημα. Με βάση κάποιες δοκιμές και συνδυασμούς των παραγόντων εξάρτησης, παρατίθενται από τους συγγραφείς κάποιοι πίνακες προσδιορισμού της μεταβλητής διαχωρισμού, που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος.

Στα [49], [50] παρουσιάζονται δύο μέθοδοι οι οποίες έχουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς δεν πραγματοποιούν ευθύ διαχωρισμό των καμπυλών λειτουργίας του συστήματος σε τμήματα, αλλά χρησιμοποιώντας εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες χαρακτηρίζουν τα τοπικά μέγιστα, τα οποία εμφανίζονται από τη σκίαση ορισμένων πλαισίων ή ομάδων πλαισίων, εντοπίζουν συγκεκριμένες περιοχές των καμπυλών, όπου μπορεί να κείται το GMPP. Ο αλγόριθμος είτε μετακινεί, στιγμιαία, το

σημείο λειτουργίας στις περιοχές αυτές και συγκρίνει τα επίπεδα ισχύος των τοπικών μεγίστων [50], είτε υπολογίζει και συγκρίνει τις ενεργειακές αυτές στάθμες και ύστερα αποφασίζει την μετάβαση του σημείου λειτουργίας ή όχι [49]. Η τελευταία μέθοδος είναι σχεδιασμένη για συστήματα, τα οποία δέχονται μέχρι 2 επίπεδα ακτινοβολίας. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα βήματα λειτουργίας του αλγόριθμου στο [50] για ένα σενάριο σκίασης, στο Σχ. 3. 12.



Σχ. 3. 12. Τρόπος λειτουργίας της μεθόδου που παρουσιάζεται στο [50], για ένα ενδεικτικό σενάριο σκίασης.

Το βασικότερο πλεονέκτημα των μεθόδων, που παρουσιάζονται σε αυτή την υποενότητα, είναι ο πολύ γρήγορος χρόνος σύγκλισης τους στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος. Οι μαθηματικές μέθοδοι ή σχέσεις που εκτελούν είναι ευθείς και έχουν άμεση απόκριση στην έξοδο του συστήματος. Από την άλλη, παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα, τα οποία είναι παρόμοια με αυτά τα οποία αναλύθηκαν για όλες τις προηγούμενες ντετερμινιστικές μεθόδους. Αρχικά, όπως και πριν, όταν τα σενάρια σκίασης γίνονται περίπλοκα και εμφανίζονται, ενδεχομένως, πάνω από δύο με τρία τοπικά μέγιστα στις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, οι αλγόριθμοι αυτοί δυσκολεύονται στον εντοπισμό του GMPP. Επίσης, παρ' ότι οι μαθηματικές μέθοδοι ή σχέσεις, οι οποίες εφαρμόζονται από τους συγκεκριμένους αλγόριθμους είναι απλές, οι δημιουργοί τους, σε πολλές περιπτώσεις, θέτουν αρκετούς περιορισμούς προκειμένου να είναι επιτυχώς εκτελέσιμες για τον έλεγχο της παραγωγής ενός ΦΒ συστήματος υπό μερική σκίαση. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς της μεθόδου στο [47] προτείνουν τον αρχικό διαχωρισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V, σε εννέα τμήματα. Όμως, εάν τα βέλτιστα τμήματα τα οποία περιέχουν τα δύο μεγαλύτερα ενεργειακά τοπικά μέγιστα δεν είναι γειτονικά μεταξύ τους, τότε θα πρέπει να γίνει επαναπροσδιορισμός των τμημάτων διαχωρισμού και να αυξηθεί ο αριθμός τους σε είκοσι επτά. Αντίθετα, εάν είναι γειτονικά μεταξύ τους, τότε ο αλγόριθμος συνεχίζει κανονικά και το σημείο

λειτουργίας μεταβαίνει στο τμήμα που περιέχει την υψηλότερη ενεργειακά περιοχή. Αυτού του τύπου οι εξαφάνσεις προσθέτουν πολυπλοκότητα εκτέλεσης στον αλγόριθμο και αυξάνουν το χρόνο σύγκλισης.

Στον Πίνακα 3. 2, παρατίθενται κάποια τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των αλγορίθμων MPPT, οι οποίοι χρησιμοποιούν την τεχνική διαχωρισμού της χαρακτηριστικής P-V σε τμήματα, μέσω μαθηματικών μεθόδων ή σχέσεων.

Πίνακας 3. 2. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων αλγορίθμων MPPT διαχωρισμού της χαρακτηριστικής P-V σε τμήματα.

Ref.	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track. time	Ir. Levels Supp.	PV System Dep.
[47]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	-	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Medium	Any	No
[49]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple	Inexpensive	Fast	2	No
[50]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple - Medium	Inexpensive	Medium - Fast	Any	No
[48]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Simple - Medium	Inexpensive	Medium	Any	Yes

3.3 Ευριστικοί Αλγόριθμοι MPPT (Heuristic MPPT Algorithms)

Τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με τους αλγόριθμους ντετερμινιστικής φύσης, έχουν αναπτυχθεί από αρκετούς ερευνητές αλγόριθμοι MPPT που στηρίζονται στην τεχνολογία της τεχνητής νοημοσύνης. Οι εν λόγω μέθοδοι παρουσιάζονται εκτεταμένα, χωρισμένες σε υποκατηγορίες, στη συνέχεια αυτής της ενότητας.

3.3.1 Νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks)

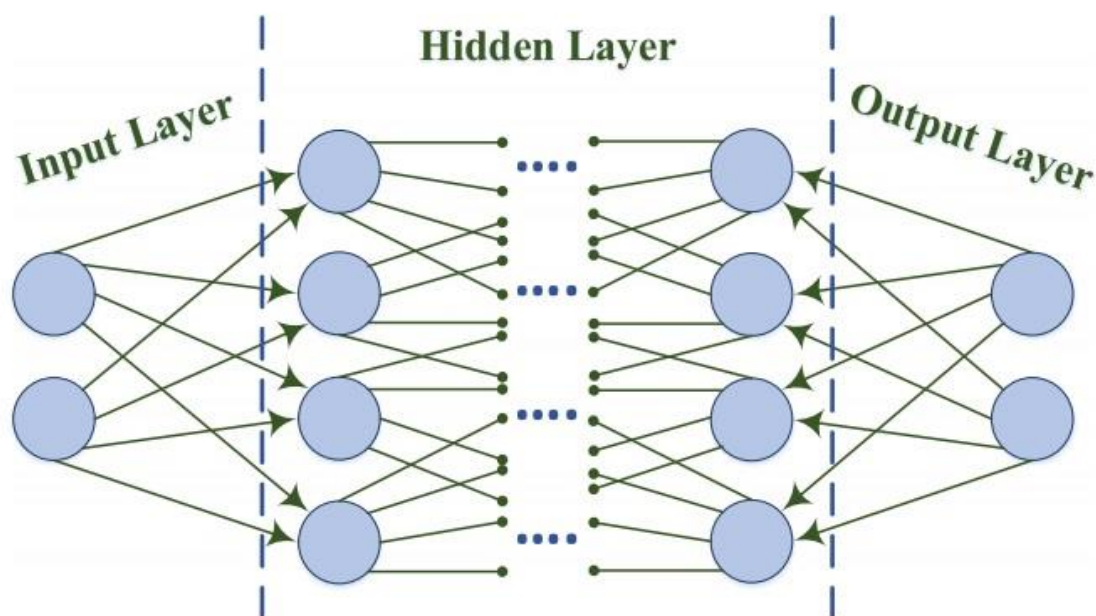
3.3.1.1 Θεωρητική ανάλυση

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) αποτελούν μια από τις πιο φημισμένες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και μοντελοποιούν τις διαδικασίες των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα, τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από πολλές διασυνδεδεμένες μονάδες επεξεργασίας που αποκαλούνται νευρώνες, μέσω των οποίων παίρνουν διάφορα σήματα και πληροφορίες. Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να περιγραφούν και ως το μαθηματικοποιημένο μοντέλο ενός «έξυπνου» συστήματος, το οποίο δρα σαν ένα παράλληλο δίκτυο επεξεργασίας σε ένα κύριο σύστημα. Το δίκτυο αυτό των νευρώνων, προκειμένου να λειτουργήσει σωστά, προϋποθέτει μια χρονοβόρα και προσεκτική εκπαιδευτική διαδικασία, ώστε να προσαρμοστεί στο εκάστοτε πραγματικό σύστημα και να μάθει να διαχειρίζεται τις παραμέτρους εισόδου του. Αξίζει να σημειωθεί ότι οποιοδήποτε νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται να λειτουργεί για ένα σύστημα με προκαθορισμένες παραμέτρους, επειδή οι νευρώνες, εκ φύσεως, ανταποκρίνονται μόνο σε συγκεκριμένα μοτίβα εισόδου-εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι, για οποιαδήποτε αλλαγή του κυρίου

συστήματος, το σχεδιασμένο νευρωνικό δίκτυο θα πρέπει να περάσει μια διαδικασία επανεκπαίδευσης, ώστε να προσαρμοστεί εκ νέου, προκειμένου να αποφευχθεί η παραγωγή τυχόν αναξιόπιστων και ανακριβών αποτελεσμάτων.

Τα νευρωνικά δίκτυα, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης που θα δούμε παρακάτω, δεν απαιτούν πολύπλοκες μαθηματικές συναρτήσεις και φυσικά μοντέλα για τη διαχείριση ενός ΦΒ συστήματος. Ένα νευρωνικό μπορεί να παράξει προβλεπτικές συναρτήσεις από πολυδιάστατους πόρους αρχικοποιημένων δεδομένων, και μόνο. Σήμερα, τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών μηχανικής, όπως η αναγνώριση προτύπων, η πρόβλεψη περιβαλλοντικών παραγόντων, η εκτίμηση παραγωγής ενέργειας, καθώς και η πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ιδανικά για τη διαχείριση ασαφών και περίπλοκων προβλημάτων, όπου υπάρχουν ελλιπείς πληροφορίες για την επίλυση τους και η απόφαση παίρνεται συνήθως με βάση τη διαίσθηση. Ωστόσο, προβλήματα τα οποία απαιτούν υψηλή ακρίβεια απόδοση είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με τη βοήθεια της συγκεκριμένης μεθόδου.

Η βασική δομή ενός νευρωνικού δικτύου αποτελείται, συνήθως από τα ακόλουθα τρία επίπεδα επεξεργασίας της πληροφορίας: επίπεδο εισόδου, κρυφό επίπεδο και επίπεδο εξόδου. Το σχηματικό διάγραμμα μιας πολυστρωματικής πρόσθιας τροφοδοτήσεως παρουσιάζεται στο Σχ. 3. 13. Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα, οι νευρώνες σε κάθε στρώση συνδέονται μέσω συνδετικών βαρών, με αυτούς που ανήκουν σε προηγούμενη στρώση. Η πληροφορία αποθηκεύεται, συνήθως, ως ένα σύνολο της γνώσης που περιέχουν τα βάρη σύνδεσης. Εκπαίδευση ορίζεται ως η μεθοδική διαδικασία τροποποίησης της σύνδεσης των βαρών για την προσαρμογή του δικτύου, χρησιμοποιώντας κατάλληλη μέθοδο εκμάθησης. Ένα δίκτυο χρησιμοποιεί μια λειτουργία εκμάθησης, όπου μια είσοδος συνδέεται μέσα στο δίκτυο με μια επιθυμητή έξοδο και τα βάρη σύνδεσης ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε να παραχθεί αυτή η έξοδος. Μετά την εκπαίδευση, τα βάρη περιέχουν σημαντικές πληροφορίες, ενώ πριν την εκπαίδευση περιέχουν τυχαίες πληροφορίες, χωρίς νόημα για το σύστημα.



Σχ. 3. 13. Σχηματικό διάγραμμα ενός νευρωνικού δικτύου, πολυστρωματικής πρόσθιας τροφοδοτήσεως [27].

3.3.1.B *Αλγόριθμοι MPPT βασισμένοι στα νευρωνικά δίκτυα (MPPT ANN-based algorithms)*

Στους MPPT αλγόριθμους αυτής της κατηγορίας, οι μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιούνται συχνότερα, είναι παράμετροι του ΦΒ συστήματος, όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτοκύκλωσης, το ρεύμα και η τάση εξόδου, ή περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως το επίπεδο ακτινοβολίας, η θερμοκρασία των πλαισίων και η ταχύτητα του ανέμου. Αυτές οι μεταβλητές λαμβάνονται στα στρώματα εισόδου (input layers), στη συνέχεια προωθούνται στα κρυμμένα στρώματα (hidden layers) και μετά από κατάλληλη επεξεργασία τους, εξάγονται τα επιθυμητά σήματα στα στρώματα εξόδου (output layers). Η σωστή επιλογή των μεταβλητών εισόδου και των αριθμών των κόμβων εξαρτάται, κυρίως, από την πολυπλοκότητα του ΦΒ συστήματος, τις ικανότητες του σχεδιαστή του αλγορίθμου, καθώς και από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων του συστήματος.

Η απόδοση και η ακρίβεια των αλγορίθμων MPPT βασισμένων σε νευρωνικά δίκτυα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στη λειτουργικότητα τους στο επίπεδο των κρυμμένων στρωμάτων επεξεργασίας και στην ποιότητα της εκπαίδευσης που έχουν υποστεί οι νευρώνες στην προπαρασκευαστική διαδικασία. Αρκετοί μήνες ή και χρόνια απαιτούνται, συνήθως, για την εκπαιδευτική διαδικασία ενός τέτοιου αλγορίθμου, ώστε να είναι σε θέση να αποδοσει τα μέγιστα κάτω από διαφορετικές και περίπλοκες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας με ακρίβεια, τα αντίστοιχα βάρη σύνδεσης των νευρώνων θα πρέπει να περάσουν και αυτά μια μακροχρόνια και περιεκτική εκπαίδευση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, οι νευρώνες σταθμίζονται σύμφωνα με τη σχέση εισόδου-εξόδου του συγκεκριμένου ΦΒ συστήματος, όπου εφαρμόζονται. Γι' αυτό το λόγο, ένας τέτοιος αλγόριθμος, του οποίου οι νευρώνες έχουν εκπαιδευτεί με βάση έναν ορισμένο τύπο ΦΒ συστήματος, το πιθανότερο είναι να μην ανταποκρίνεται με ακρίβεια σε άλλου τύπου συστήματα. Η μεταβλητή εξόδου αποτελείται από σήματα, με τη βοήθεια των οποίων το σημείο λειτουργίας προσεγγίζει το GMPP. Το πιο κοινό σήμα εξόδου, που επιλέγεται κατά κόρον στη βιβλιογραφία, ώστε να ελέγξει τον DC-DC μετατροπέα του κυκλώματος ισχύος του συστήματος είναι το duty cycle ή η τάση αναφοράς (V_{ref}).

Αρκετοί MPPT αλγόριθμοι βασισμένοι στην τεχνική των νευρωνικών δικτύων έχουν αναπτυχθεί για ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας ή για γρήγορες μεταβολές στην ακτινοβολία του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, οι αλγόριθμοι αυτοί αντιμετωπίζουν πρόβλημα στην απόδοσή τους σε συνθήκες μερικής σκίασης. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές, χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτικά χαρακτηριστικά που προσφέρουν τα νευρωνικά δίκτυα στην αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η σκίαση, βελτιστοποίησαν τους αλγόριθμους αυτούς, ώστε να ανταπεξέρχονται σε οποιοσδήποτε συνθήκες. Τα κύρια πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα νευρωνικά δίκτυα στους MPPT αλγόριθμους είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης της πλειοψηφίας των σεναρίων σκίασης μιας ΦΒ συστοιχίας, που ενδέχεται να προκύψουν, και η ακρίβεια στη λύση (σήμα εξόδου) που προσφέρουν από τη φύση τους. Για παράδειγμα, στο [51] παρουσιάζεται μια παραλλαγή της κλασσικής μεθόδου Incremental Conductance (INC), βασισμένη στη τεχνολογία των νευρώνων. Η μέθοδος αυτή επιβεβαιώνεται μέσω προσομοιώσεων. Η απόδοση του αλγορίθμου συγκρίνεται με την κλασσική μέθοδο P&O και με κάποιους αλγόριθμους που βασίζονται στην fuzzy logic τεχνολογία. Τα αποτελέσματα δείχνουν την αποδοτικότητα του συγκεκριμένου αλγορίθμου στον εντοπισμό του GMM σε συνθήκες σκίασης. Παρ' όλα αυτά, όπως έχει προειπωθεί, το σήμα εξόδου που θα προκύψει στις εκάστοτε συνθήκες εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από την εκπαιδευτική διαδικασία που έχουν υποστεί οι νευρώνες του συστήματος. Επίσης, ο αλγόριθμος δεν είναι σίγουρο ότι θα ανταποκριθεί σωστά σε απότομες αλλαγές των συνθηκών σκίασης. Στο [52] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος νευρωνικών δικτύων, ο οποίος χρησιμοποιεί μια πιο τοπικού χαρακτήρα μέθοδο, απ' ό,τι συνήθως, λειτουργίας εντοπισμού του GMPP στο ΦΒ σύστημα. Γίνεται μια εκτίμηση των LMPPs που αντιστοιχούν

στις διάφορες ΦΒ πλαισιοσειρές και στη συνέχεια επιλέγεται η βέλτιστη εξ' αυτών. Σαν είσοδους ο προτεινόμενος αλγόριθμος, εδώ, χρησιμοποιεί την εκάστοτε ακτινοβολία και θερμοκρασία. Στα [53], [54] γίνεται υλοποίηση κάποιων υβριδικών μεθόδων με τη βοήθεια των νευρωνικών δικτύων για τον εντοπισμό του GMPP. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν σαν είσοδο την τάση και το ρεύμα του ΦΒ συστήματος και εξάγουν την απαιτούμενη τιμή του duty cycle.

Οι παραπάνω μέθοδοι μαζί με κάποια επιμέρους ποιοτικά και τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακας 3. 3. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των αλγορίθμων MPPT που βασίζονται στην τεχνολογία των νευρωνικών δικτύων είναι η χρονοβόρα και απαιτητική προπαρασκευαστική διαδικασία εκπαίδευσης των νευρώνων, ώστε να είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν υπό οποιοσδήποτε συνθήκες σκίασης. Το απαιτούμενο αυτό φόντο πληροφοριών για τη λειτουργία των αλγορίθμων, όπως είναι λογικό, δημιουργεί μεγάλες απαιτήσεις και στη μνήμη του συστήματος, κάτι που κοστίζει. Επίσης, οι αλγόριθμοι αυτοί είναι αρκετά αργοί κατά τη διαδικασία εντοπισμού του GMPP, σε σύγκριση με άλλους που υπάρχουν σήμερα.

Πίνακας 3. 3. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων NN-based MPPT αλγορίθμων.

Ref.	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track. time	Int. Levels Supp.	PV System Dep.
[51]	I, T	V_{ref}	Buck-Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Slow	Any	Yes
[52]	V_{pv} , I_{pv}	D_{ref}	Buck-Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Slow	Any	Yes
[53]	I , V_{pv} , I_{pv}	D_{ref}	Buck-Boost	Digital	TMF-28335 DSP	Medium	Expensive	Slow	Any	Yes
[54]	I , V_{pv} , I_{pv}	D_{ref}	Buck-Boost	Digital	TMF-28335 DSP	Medium	Expensive	Slow	Any	Yes

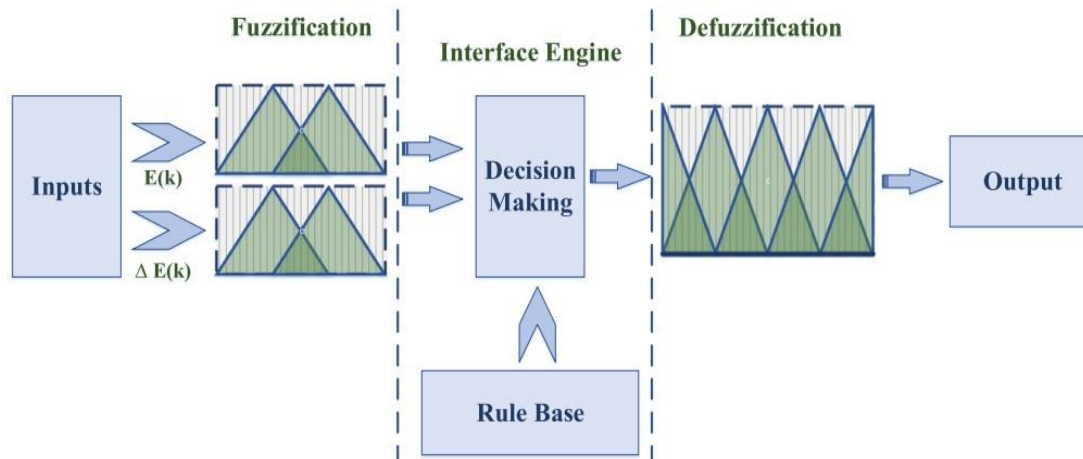
3.3.2 Βελτιστοποίηση Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Controller Optimization-FLC)

3.3.2.Α Θεωρητική ανάλυση

Ο έλεγχος κυκλωμάτων ισχύος με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής είναι από τις πιο διαδεδομένες πρακτικές στον κλάδο της μηχανικής, εξαιτίας της πολυποικίλης φύσης του. Η δομή του είναι ξεκάθαρη και απλή καθώς δεν περιλαμβάνει περίπλοκες και μακροσκελείς μαθηματικές φόρμουλες κατά την εκτέλεση του, ενώ δεν έχει υπερβολικές τεχνικές απαιτήσεις από ένα σύστημα ώστε να το υποστηρίξει. Κατά την εκτέλεση της FLC οι μεταβλητές διαχειρίζονται κάποιες γλωσσικές (μη αριθμητικές) πραγματικές τιμές, οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από απολύτως αληθείς έως απολύτως ψευδείς, όπως για παράδειγμα *πολύ* (high), *λίγο* (low), *μέτρια* (medium) και *συχνά* (often). Στην ασαφή βελτιστοποίηση, τα πάντα ορίζονται μέσω του μεγέθους τους σε ένα σύστημα βαθμίδων. Μαθηματικό μοντέλο δεν χρειάζεται, ενώ οι αποφάσεις λαμβάνονται μέσω εκτιμώμενων τιμών [55].

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τρία διαφορετικά στάδια επεξεργασίας: το στάδιο της *ασαφοποίησης* (fuzzification), το στάδιο του *διαγράμματος κανόνων παρεμβολής* (rule interference diagram) και το στάδιο της *αποασαφοποίησης* (defuzzification). Το σχηματικό διάγραμμα της FLC

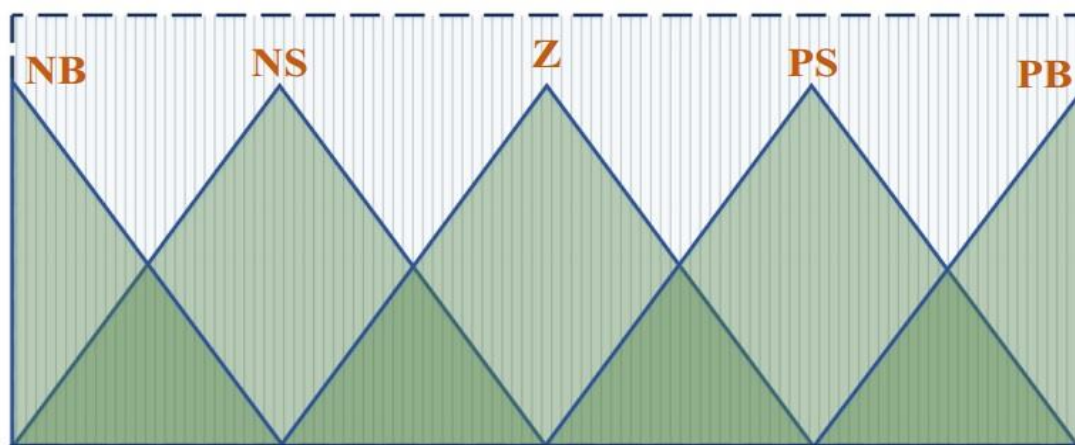
παρουσιάζεται παρακάτω, στο Σχ. 3. 14. Οι μεταβλητές εισόδου ενός αλγορίθμου ασαφούς λογικής εξαρτώνται, σε μεγάλο βαθμό, από το σχεδιασμό του συνολικού κυκλώματος που τον περιλαμβάνει. Παρ' όλα αυτά είναι, συνήθως, γνωστές σαν: *σφάλμα*(e) και *μεταβολή σφάλματος*(Δe). Οι μεταβλητές εισόδου αυτές, δοθέντων των συναρτήσεων μετατροπής που περιέχονται στο στάδιο της ασαφοποίησης και λαμβάνοντας υπ' όψη τα σήματα εξόδου του σταδίου της αποασαφοποίησης, προσδιορίζονται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος προς λύση.



Σχ. 3. 14. Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ασαφούς λογικής(FLC) [27].

Στη συνέχεια, περιγράφονται πιο αναλυτικά τα στάδια εκτέλεσης της τεχνικής ασαφούς βελτιστοποίησης:

- **Ασαφοποίηση(Fuzzification)**. Οι μεταβλητές εισόδου σε αυτό το επίπεδο του κυκλώματος αναλύονται με βάση κάποιες προκαθορισμένες συναρτήσεις. Η κύρια λειτουργία του σταδίου αυτού είναι η μετατροπή των εύθραυστων τιμών της εισόδου σε γλωσσικές τιμές, μέσω των συναρτήσεων μετατροπής(membership functions). Πολλές, διαφορετικές τέτοιες συναρτήσεις μπορεί να υπάρχουν, όπως η τραπέζοειδής, η Gauss και η τριγωνική, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3. 15. Τα αρκτικόλεξα “NB”, “NS”, “Z”, “PS” και “PB”, που φαίνονται στο Σχ. 3. 15, αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα: *πολύ αρνητικό σφάλμα*, *λιγότερο αρνητικό σφάλμα*, *μηδενικό σφάλμα*, *λιγότερο θετικό σφάλμα* και *πολύ θετικό σφάλμα* [56], [57]. Γενικότερα, η ποσότητα των συναρτήσεων προσδιορισμού είναι πιο αποδοτική από τον τύπο και τη μορφή τους, όσον αφορά τη ταχύτητα και την ακρίβεια του συστήματος. Έτσι, μεγαλύτερο εύρος τέτοιων προσδιορισμών, που συνίσταται για πολύπλοκα συστήματα, οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια λύσης και καλύτερη επεξεργασία των πληροφοριών.



Σχ. 3. 15. Παράδειγμα συναρτήσεων προσδιορισμού ενός συστήματος FLC [27].

- **Διάγραμμα κανόνων παρεμβολής (Rule interference diagram).** Αυτό το επίπεδο επεξεργασίας έχει σχεδιαστεί για τον έλεγχο των μεταβλητών εξόδου, σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο μηχανισμό. Ο μηχανισμός αυτός περιέχει τους απαραίτητους κανόνες, που θα χρησιμοποιηθούν από τις συναρτήσεις μετατροπής. Ο Πίνακας 3. 4 περιέχει ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κανόνων σε ένα σύστημα πέντε συναρτήσεων προσδιορισμού. Η σχεδίαση αυτών των κανόνων είναι βασισμένη στο μοτίβο «if-then» και απαιτεί άριστη γνώση του συστήματος από τον σχεδιαστή.

Πίνακας 3. 4. Πίνακας κανόνων ενός συστήματος FLC πέντε συναρτήσεων προσδιορισμού [27]

ΔE	E					
	NB	NS	Z	PS	PB	
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB	
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS	
Z	NS	ZE	ZE	ZE	PS	
PS	PS	PS	PD	ZE	ZE	
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE	

- **Αποασαφοποίηση (Defuzzification).** Σε αυτό το στάδιο, οι συναρτήσεις προσδιορισμού καλούνται και πάλι να μετατρέψουν τις γλωσσικές μεταβλητές εξόδου, που έχουν προκύψει, σε αριθμητικές τιμές. Παρ' όλα αυτά, το εύρος των συναρτήσεων, που χρησιμοποιούνται σε αυτό το στάδιο, ενδέχεται να διαφέρει σε σχέση με προηγουμένως. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές αποασαφοποίησης, όπως για παράδειγμα η τεχνική του σταθμισμένου μέσου και ο μέσος όρος των μεγίστων. Η τελευταία τεχνική είναι η πιο διαδεδομένη στις περισσότερες εφαρμογές μηχανικής.

3.3.2.B Αλγόριθμοι MPPT βασισμένοι στην τεχνική της βελτιστοποίησης ασαφούς λογικής (MPPT FLC-based Algorithms)

Στους MPPT αλγόριθμους, όπου χρησιμοποιείται η εξεταζόμενη τεχνική, οι μεταβλητές εισόδου του σταδίου της ασαφοποίησης (fuzzification step), μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$e(t) = \frac{\Delta P(t)}{\Delta V(t)} = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad [3. 7]$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1)$$

όπου t είναι ο χρόνος δειγματοληψίας, ενώ P(t) και V(t) αποτελούν την ισχύ και την τάση στο σημείο λειτουργίας, αντίστοιχα. Η τιμή $\Delta e(t)$ ορίζει την κατεύθυνση προς την οποία κινείται το σημείο λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη του συστήματος, ενώ η τιμή e(t) είναι η θέση του σημείου λειτουργίας πάνω στη P-V χαρακτηριστική καμπύλη, λαμβάνοντας υπ' όψη και το βέλτιστο σημείο λειτουργίας (GMPP). Στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας του αλγορίθμου, οι κανόνες παρεμβολής, όπως φαίνονται και, παραπάνω, στον Πίνακα 3. 4, χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν το GMPP. Ρυθμίζουν κατάλληλα την τιμή του duty cycle, ώστε να επιτευχθεί αυτό. Τέλος, κατά το στάδιο της αποασαφοποίησης, οι τιμές που έχουν φτάσει στην έξοδο και έχουν ασαφή γλωσσική μορφή μετατρέπονται εκ νέου σε κατάλληλη αριθμητική μορφή και εξάγονται από το σύστημα. Στις MPPT εφαρμογές ΦΒ συστημάτων, χρησιμοποιείται, συνήθως, η μέθοδος του κέντρου βάρους για τον προσδιορισμό του επιθυμητού εύρους του duty cycle.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει την τεχνική της ασαφούς βελτιστοποίησης για την ανάπτυξη αλγορίθμων MPPT, οι οποίοι να ανταπεξέρχονται σε συνθήκες μερικής σκίασης. Στο [58], η ασαφής λογική εφαρμόζεται για τον καθορισμό του μεγέθους της διαταραχής του P&O αλγόριθμου. Στο [59], η τεχνική της ασαφούς βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την απόδοση του κλασσικού Hill Climbing αλγόριθμου, σαρώνοντας και αποθηκεύοντας το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Οι συγγραφείς στο [60] βελτιστοποίησαν την κλασσική ασαφή τεχνική, κάνοντας χρήση της τεχνικής προσέγγισης της περιοχής του GMPP, η οποία έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε συνθήκες μερικής σκίασης. Στο [61], συνδυάζεται η τεχνική των νευρωνικών δικτύων με αυτή της ασαφούς βελτιστοποίησης για την εύρεση του GMPP. Σε αυτή τη μέθοδο, η προσπίπτουσα ακτινοβολία και οι στιγμιαίες θερμοκρασίες των ΦΒ κυψελών αποτελούν τις κύριες μεταβλητές εισόδου για την προεκπαίδευση των νευρώνων. Παρ' όλα αυτά, οι πληροφορίες αυτές δεν αρκούν για την αντιμετώπιση όλων, και ειδικά των πιο ακραίων, συνθηκών σκίασης. Στο [62], τέλος, χρησιμοποιείται μια κλασσική μέθοδος σάρωσης και αποθήκευσης της περιοχής όπου ανήκει το σημείο που προσφέρει τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ στο ΦΒ σύστημα, και η FLC τεχνική συντελεί στην τελική σύγκλιση στο GMPP, μέσα στην περιοχή αυτή.

Οι εξεταζόμενες μέθοδοι MPPT παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3. 5. Πρέπει να τονιστεί ότι, ενώ οι μέθοδοι, των οποίων η υλοποίηση και η εκτέλεση στηρίζεται στην τεχνική της ασαφούς λογικής, έχουν μέτρια πολυπλοκότητα υλοποίησης και έχουν το προτέρημα ότι μπορούν και συνδυάζονται ομαλά με άλλες τεχνικές ελέγχου των ΦΒ συστημάτων (όπως οι κλασσικές τεχνικές P&O, INC ή τα νευρωνικά δίκτυα κ.α.), έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι έχουν αρκετά υψηλό κόστος ενώ δεν ανταποκρίνονται επαρκώς σε σενάρια σκίασης με πολλά επίπεδα ακτινοβολίας ή σε απότομες μεταβολές. Επίσης, οι κανόνες παρεμβολής, οι οποίοι είναι αυτοί που ουσιαστικά καθορίζουν τις εξαγόμενες τιμές του αλγόριθμου που θα οδηγήσουν στη λύση του προβλήματος, δεν παρέχουν τη δυνατότητα μεταβολής μετά την αρχική ρύθμιση τους. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν προσαρμόζεται σε τυχόν περιβαλλοντικές ή άλλες, εξωτερικές αλλαγές του ΦΒ συστήματος.

Πίνακας 3. 5. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων FLC-based MPPT αλγορίθμων

Ref.	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track. time	Irr. Levels Supp.	PV System Dep.
[61]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	AD-DA	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Medium	Not Any	No
[63]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	-	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Medium	Not Any	No
[60]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Step up-Step down	Digital	GWINSTE K GDS-1022	Medium	Expensive	Medium	Not Any	No
[59]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Medium	Not Any	No
[64]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Medium	Not Any	No
[62]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Medium	Expensive	Medium	Not Any	No

3.3.3 Η τεχνική της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων(Particle Swarm Optimization-PSO)

3.3.3.4 Θεωρητική ανάλυση

Η τεχνική της βελτιστοποίησης του σμήνους σωματιδίων είναι μια από τις τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές των μηχανικών και της πληροφορικής. Η μέθοδος αυτή, η οποία ανακαλύφθηκε και αναπτύχθηκε, αρχικά, από τους Kennedy και Ebrahat, είναι εμπνευσμένη από τη φυσική συμπεριφορά της κίνησης ενός σμήνους πουλιών. Οι αλγόριθμοι, οι οποίοι στηρίζονται στην PSO τεχνική, εξερευνούν μια συγκεκριμένη περιοχή, η οποία καλείται διάστημα λύσης(solution space). Σε αυτή την περιοχή, κάθε σημείο έχει ένα βαθμό πιθανότητας να αποτελεί τη λύση του δοθέντος προβλήματος. Κάθε σωματίδιο(particle) κινείται, μέσα στο διάστημα λύσης, για να εντοπίσει τη βέλτιστη δυνατή προσέγγιση στη λύση, λαμβάνοντας υπ' όψη τόσο την κίνηση του ίδιου όσο και τις κινήσεις των γειτονικών του σωματιδίων. Ως εκ τούτου, τα σωματίδια που χρησιμοποιούνται στη βελτιστοποίηση, χρησιμοποιούν τη μνήμη τους για να τροποποιούν κάθε φορά τη συμπεριφορά τους ακολουθώντας την κίνηση των περισσότερο επιτυχημένα κινούμενων σωματιδίων.

Η διαδικασία εύρεσης της λύσης ξεκινάει με μια τυχαία αρχικοποίηση σωματιδίων(initialization) και συνεχίζεται με την προσπάθεια για ανεύρεση της βέλτιστης κινησιολογίας, σύμφωνα με τις προηγούμενες επαναλήψεις του αλγορίθμου(movement). Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των θέσεων των σωματιδίων που έχουν προκύψει, με βάση τη συνάρτηση καταλληλότητας, η οποία υπάρχει εξ' αρχής(evaluation) [65]. Τα κύρια αυτά βήματα επεξεργασίας της συγκεκριμένης τεχνικής περιγράφονται πιο αναλυτικά, παρακάτω:

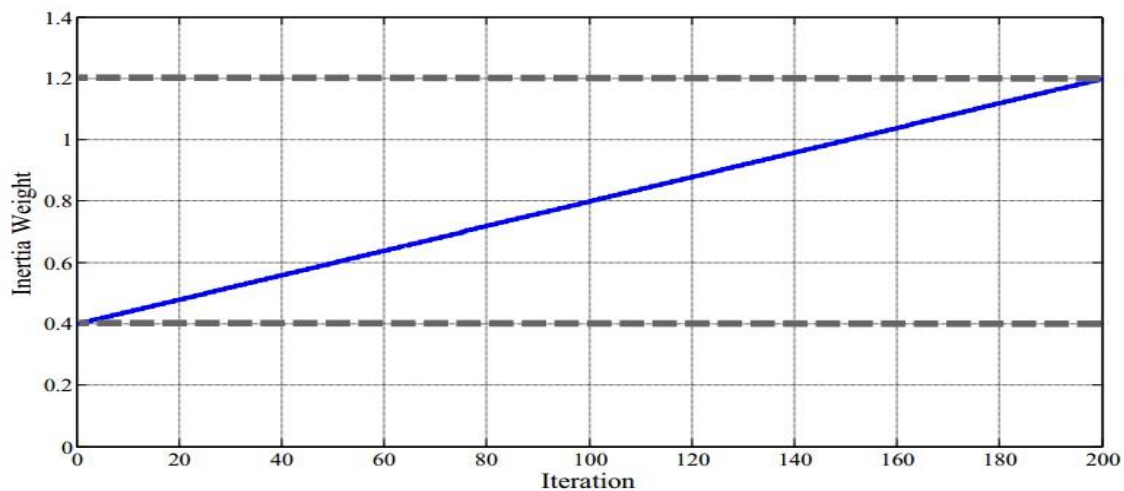
- **Αρχικοποίηση(Initialization).** Σε αυτό, το πρώτο στάδιο, ο αλγόριθμος ορίζει το πλήθος των μεταβλητών(σημείων ή σωματιδίων) που θα χρησιμοποιήσει, επιλέγοντας τυχαία τα σημεία αυτά, που θα συμμετάσχουν στη διαδικασία. Τα σημεία, τα οποία επιλέγονται, ανήκουν αναγκαστικά στο ορισμένο διάστημα της λύσης του προβλήματος. Λόγω της μη διαθεσιμότητας πολλών πληροφοριών για το τρόπο λειτουργίας του συστήματος, η αρχική επιλογή των σημείων-μεταβλητών είναι εντελώς τυχαία και η κίνησή τους βελτιστοποιείται, στη συνέχεια, με τη βοήθεια των περισσότερο επιτυχημένων από αυτά.
- **Μετακίνηση σημείων(Movement).** Το κάθε σωματίδιο έχει στη στιγμιαία θέση του(X_i) μια ταχύτητα(V_i) και κάνει στοχαστική εξερεύνηση του χώρου στον οποίο κινείται μέσα στο διάστημα λύσης του προβλήματος, με σκοπό να βελτιώσει την κίνηση του και να συγκλίνει στην επιθυμητή λύση. Οι μετακινήσεις των σημείων γίνονται σε συνάρτηση με την καλύτερη θέση(P_{bi}) και τη γενικά καλύτερη θέση σημείου(G_b). Συγκεκριμένα, η P_{bi} είναι η καλύτερη θέση του σημείου, στην i -στη επανάληψη του αλγορίθμου, όπως έχει προκύψει από όλες τις προηγούμενες επαναλήψεις, ενώ η G_b είναι η καλύτερη θέση που έχει προκύψει, λαμβάνοντας υπ' όψη το σύνολο των σημείων κατά τη διάρκεια όλων των προγενέστερων επαναλήψεων. Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, τα σωματίδια υιοθετούν τις τιμές που προκύπτουν από την αντικειμενική συνάρτηση που δίνει τη θέση τους σε κάθε επανάληψη, ενώ τα G_b και P_{bi} των σημείων καταγράφονται. Η βασική συνάρτηση, που δίνει σε κάθε επανάληψη τη βέλτιστη θέση που μπορεί να πάρει κάθε σωματίδιο στο χώρο, είναι η εξής:

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} &= w \cdot V_i^k + r_1 \cdot c_1 \cdot (P_{bi} - X_i^k) + r_2 \cdot c_2 \cdot (G_b - X_i^k) \\ X_i^{k+1} &= X_i^k + V_i^k \end{aligned} \quad [3. 8]$$

όπου το i , αναπαριστά το δείκτη βελτιστοποίησης, το k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, τα V_i^k και X_i^k αποτελούν τη στιγμιαία ταχύτητα και θέση της i -στης μεταβλητής μετά από k επαναλήψεις. Το w αναπαριστά τον δείκτη αδρανειακού βάρους, το c_1 το γνωστικό συντελεστή κάθε μεμονωμένου σωματιδίου, το c_2 είναι ο κοινός συντελεστής όλων των σωματιδίων, ενώ τα

r_1 και r_2 αποτελούν τυχαία επιλεγμένες μεταβλητές που πρέπει να κυμαίνονται στο διάστημα $[0,1]$. Οι τυχαίες αυτές παράμετροι αποσκοπούν, κυρίως, στη διατήρηση της λογικής της τυχαίας κίνησης των σωματιδίων σε κάθε επανάληψη. Επιπλέον, για να διατηρηθεί η περιοχή αναζήτησης της λύσης σε μια συγκεκριμένη περιοχή, οι τιμές των ταχυτήτων οριοθετούνται στο εύρος $[0, V_{\max}]$.

Στην τεχνική του σμήνους σωματιδίων, οι παράμετροι w , c_1 και c_2 είναι αρκετά ευμετάβλητες. Μια πολύ μικρή μεταβολή στις τιμές τους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο την ταχύτητα σύγκλισης, όσο και την ακρίβεια του αλγορίθμου. Η βελτιστοποίηση μπορεί να εντοπίσει κάποιο τοπικό μέγιστο αντί για το ζητούμενο ολικό, λόγω λανθασμένης παραμετροποίησης του δείκτη c_2 , ενώ η ακρίβεια του αλγορίθμου μπορεί να μειωθεί πολύ, εξαιτίας μιας ακατάλληλης αρχικοποίησης της παραμέτρου c_1 . Παρομοίως, ο δείκτης αδρανειακού βάρους επηρεάζει, ουσιαστικά, την ταχύτητα και τη σύγκλιση της τεχνικής PSO. Μια μεγάλη τιμή αυτής της παραμέτρου οδηγεί σε μικρότερη ακρίβεια σύγκλισης, ενώ μια μικρή τιμή της ενδέχεται να προκαλέσει πιο περιορισμένο πεδίο αναζήτησης της λύσης για τον αλγόριθμο. Συμπερασματικά, μια λανθασμένη επιλογή στον συγκεκριμένο δείκτη μπορεί να ενθαρρύνει την ανεξέλεγκτη διάχυση των σωματιδίων στο χώρο στις αρχικές επαναλήψεις του αλγορίθμου, ενώ σταδιακά ο χώρος αναζήτησης θα περιορίζεται, αποτέλεσμα την εντελώς άστοχη κίνηση των σωματιδίων. Η συμπεριφορά των τιμών του δείκτη αδρανειακού βάρους σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων του αλγορίθμου, φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 3. 16.



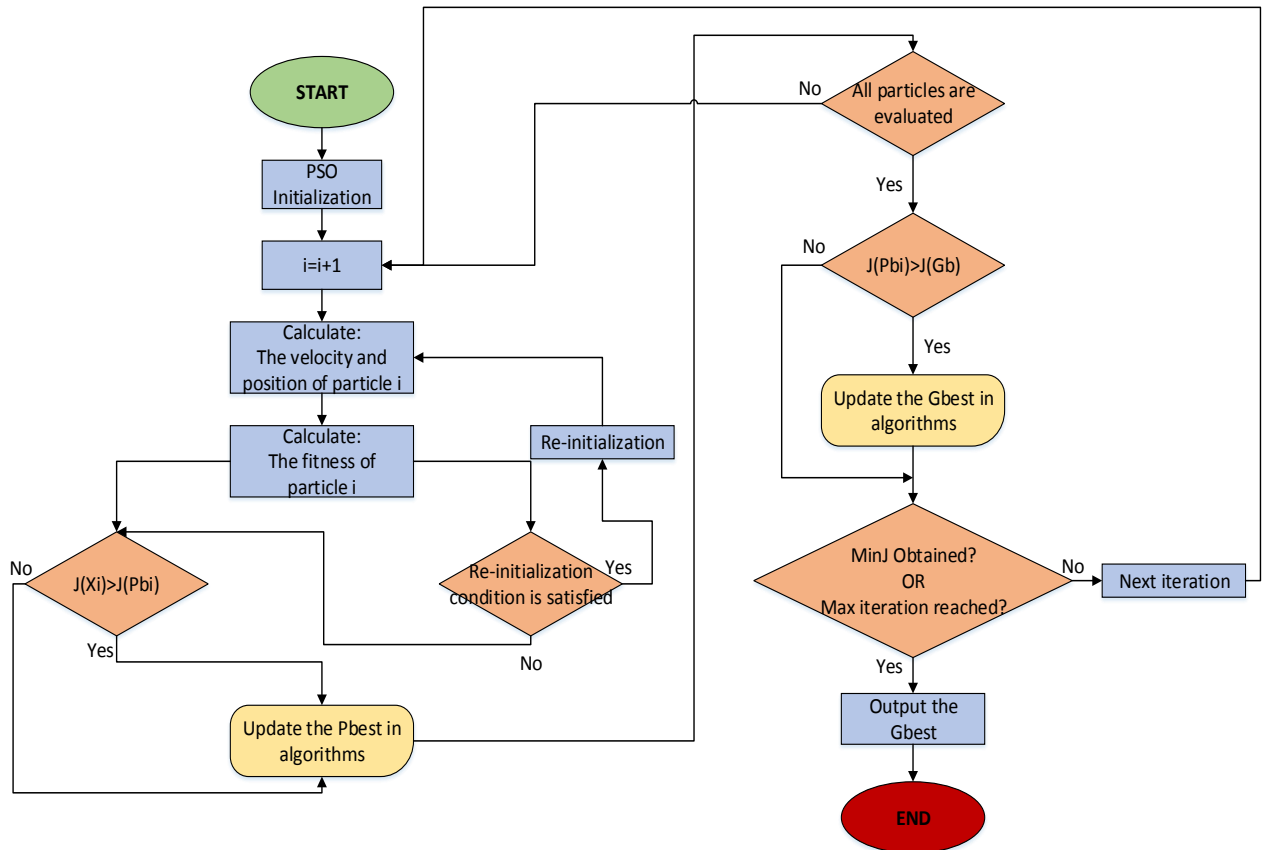
Σχ. 3. 16. Σχηματικό διάγραμμα για τη συμπεριφορά του δείκτη αδρανειακής μάζας της τεχνικής PSO [27].

- **Αξιολόγηση(Evaluation).** Η καταλληλότητα της νέας θέσης των σωματιδίων, σε κάθε επανάληψη, αξιολογείται και αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο ανατροφοδότησης για τη σωστή μετακίνησή τους, σε μελλοντικές εκτελέσεις του αλγορίθμου. Η καλύτερη θέση του κάθε σωματιδίου (P_{bi}), η οποία αντιπροσωπεύει, όπως έχει ειπωθεί, την καλύτερη καταγεγραμμένη τοποθεσία του i -στού σωματιδίου στην k -στη επανάληψη, ανανεώνεται, εάν η πρώτη από τις σχέσεις 2. 2, επαληθεύεται. Επιπρόσθετα, η μεταβλητή G_b , η οποία αντιπροσωπεύει την καλύτερη θέση, με βάση τη θέση που κατέχουν όλα τα σωματίδια, καταγράφεται και συγκρίνεται με τη μεταβλητή P_{bi} , σε κάθε επανάληψη. Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για την ανανέωση των τιμών, των δύο αυτών μεταβλητών, είναι οι εξής:

$$P_{bi} = X_i^k \quad \text{if} \quad F(X_i^k) \geq F(P_i) \quad [3.9]$$

$$G_b = P_{bi} \quad \text{if} \quad F(P_{bi}) \geq F(G_b)$$

Τα σωματίδια συνεχίζουν να κινούνται μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες τερματισμού του αλγορίθμου. Οι συνθήκες αυτές έχουν δημιουργηθεί με βάση τις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος που εφαρμόζεται η τεχνική PSO, την απαιτούμενη ακρίβεια και τυχόν περιορισμούς στο χρόνο σύγκλισης του κυκλώματος ελέγχου. Το σχηματικό διάγραμμα της τεχνικής της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων δίνεται, παρακάτω, στο Σχ. 3. 17.



Σχ. 3. 17. Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου PSO.

3.3.3.B Αλγόριθμοι MPPT βασισμένοι στην τεχνική της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (MPPT PSO-based Algorithms)

Στις αλγοριθμικές εφαρμογές αναζήτησης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας ενός ΦΒ συστήματος, το διάστημα αναζήτησης της λύσης του προβλήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση του συστήματος. Για παράδειγμα, εάν ένας MPPT αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος για να ελέγχει D στον αριθμό μετατροπείς ισχύος, τότε το διάστημα αυτό θα έχει D-διαστάσεις, όπου κάθε διάσταση θα αντιπροσωπεύει μια τιμή τάσης σαν λύση του προβλήματος. Η αξιολόγηση των θέσεων των σωματιδίων στο αντίστοιχο στάδιο επεξεργασίας γίνεται με βάση την εξαγόμενη ισχύ της ΦΒ συστοιχίας, η οποία σημαίνεται με το γράμμα F (fitness evaluator). Η σχέση 3. 10, παρακάτω, συμβολίζει τη μήτρα των θέσεων που πρέπει να έχουν τα σωματίδια σαν λύση του MPPT προβλήματος σε ένα D-διάστατο πεδίο αναζήτησης.

$$X_i^k = [X_1^k, X_2^k, X_3^k, \dots, X_i^k, \dots, X_{(N-1)}^k, X_N^k] \quad [3. 10]$$

όπου X_i^k είναι η τοποθεσία του i -στου σωματιδίου στην k -στη επανάληψη. Πρακτικά, η παραγόμενη ισχύς κυμαίνεται λόγω διακυμάνσεων στα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και στην έκταση της μερικής σκίασης πάνω στο ΦΒ. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να υπάρχει ένα κριτήριο ενεργοποίησης του αλγορίθμου, όπως για παράδειγμα η σχέση 3. 11, η οποία χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των συνθηκών σκίασης και λαμβάνει υπ' όψη της τη διακύμανση της ισχύος που υπάρχει σε πραγματικές συνθήκες.

$$\left| \frac{F(X_{i+1}) - F(X_i)}{F(X_i)} \right| > \Delta P \quad [3. 11]$$

Η μέθοδος PSO προτάθηκε για την εύρεση του GMPP από τις χαρακτηριστικές καμπύλες ενός ΦΒ συστήματος στα [66], [67]. Το σχεδιαστικό κόστος του συστήματος μειώθηκε σημαντικά, καθώς ο αριθμός των απαιτούμενων αισθητήρων μειώθηκε, στις πειραματικές δοκιμές. Παρ' όλα αυτά, χρησιμοποιώντας το κλασσικό αλγοριθμικό μοντέλο της μεθόδου του σμήνους σωματιδίων, εισήχθησαν αρκετοί περιορισμοί στον έλεγχο του συνολικού συστήματος εφαρμογής. Στην κλασσική μέθοδο, για τα σωματίδια που βρίσκονται μακριά από τα σωματίδια με την καλύτερη θέση (G_{best}), απαιτείται υψηλή ταχύτητα προσέγγισης. Επιπλέον, η τροχιά και ο χώρος κίνησης των σωματιδίων είναι περιορισμένος από την επιτάχυνση που επιτρέπεται από το σχεδιασμό του αλγορίθμου. Χαμηλή επιτάχυνση προκαλεί ομαλή τροχιά για τα σωματίδια, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε πολύ αργή σύγκλιση. Αντίθετα, υψηλού επιπέδου επιτάχυνση οδηγεί σε πολύ πιο γρήγορη υπολογιστική ταχύτητα, όμως, ενδέχεται να οδηγήσει ορισμένα σωματίδια σε λανθασμένη πορεία προς το άπειρο. Επιπρόσθετα, τυχόν τυχαία επιλογή των συντελεστών στις εξισώσεις, που αναλύθηκαν παραπάνω, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του αλγόριθμου, η οποία απαιτεί πολύ καλή γνώση του μοντέλου για σωστή παραμετροποίηση. Μια υποτιμημένη επιλογή συντελεστών, ίσως, έχει σαν αποτέλεσμα την περιορισμένη κίνηση των σωματιδίων και, ως εκ τούτου, θα είναι αναγκαίες περισσότερες επαναλήψεις για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Άρα, μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος και περισσότερος χρόνος εκτέλεσης. Από την άλλη πλευρά, υπερτιμημένοι συντελεστές οδηγούν σε μεγάλη αύξηση του βήματος κίνησης των σωματιδίων, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να υπερβαίνουν τα όρια κίνησης τους ή/και να συγκλίνουν σε κάποιο LMPP, αντί του επιθυμητού GMPP. Τέλος, η αρχικοποίηση της θέσης των σωματιδίων, που συμμετέχουν στην αναζήτηση, παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα της σύγκλισης και στην ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Τα τελευταία χρόνια, κάποιοι ερευνητές ασχολήθηκαν με την τροποποίηση του κλασσικού μοντέλου της μεθόδου PSO [68], [69]. Στο [68], οι συγγραφείς καταπιάστηκαν με την τροποποίηση της ακτίνας αντίληψης και της κατεύθυνσης της αναζήτησης του κάθε σωματιδίου, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης τους. Στη νέα αυτή τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου PSO, όλοι οι παράγοντες αναζήτησης, ξεχωριστά, έχουν τη δυνατότητα σάρωσης του δικού τους εύρους μέσα στο πεδίο της λύσης, ανάλογα με τις ανάγκες τους. Η προσαρμοστικότητα, αυτή, των σωματιδίων στην ακτίνα δράσης τους, οδηγεί τον αλγόριθμο, συνολικά, σε πολύ καλύτερη ακρίβεια υπολογισμού του GMPP. Παρ' όλα αυτά, σε αυτή τη μέθοδο, η επιπρόσθετη διαστασιολόγηση του πεδίου αναζήτησης προκαλεί την ανάγκη για την ύπαρξη περισσότερων σωματιδίων και, κατά συνέπεια, ενισχύει την υπολογιστική επιβάρυνση και πολυπλοκότητα της εφαρμογής. Στο [70] γίνεται χρήση του συμβατικού αλγορίθμου P&O, με στόχο τη βελτίωση της ταχύτητας σύγκλισης της μεθόδου PSO. Σε αυτό τον αλγόριθμο, παρατηρείται ένας παρόμοιος τρόπος λειτουργίας με αυτόν των τριών σταδίων, ο οποίος αναλύθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου και χρησιμοποιείται, ευρέως, από τους νεοτερμινιστικούς MPPT αλγόριθμους. Ουσιαστικά, ο P&O αλγόριθμος χρησιμεύει στο να γίνει σύγκλιση στο κοντινότερο LMPP και, στη συνέχεια, με τη βοήθεια της PSO μεθόδου γίνεται αναζήτηση του GMPP. Σαν αποτέλεσμα του συνδυασμού των δύο μεθόδων, το διάστημα αναζήτησης της λύσης μειώνεται κατά πολύ. Στο [71], οι ερευνητές παρουσιάζουν μια υβριδική μέθοδο που καλείται DEPSO, η οποία συνδυάζει δύο διαφορετικά είδη μεθόδων τεχνητής

νοημοσύνης, του PSO και της DE. Ο συνδυασμός των δύο γίνεται με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων της, αναγκαστικά, τυχαίας επιλογής των παραμέτρων στις συναρτήσεις υπολογισμού των θέσεων των σωματιδίων. Η συγκεκριμένη παραλλαγή του κλασσικού PSO αλγόριθμου αυξάνει την απόδοση κάτω από συνθήκες μερικής σκίασης. Παρ' όλα αυτά, το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι οι αυξημένες διακυμάνσεις κατά την αναζήτηση του GMPP. Οι συγγραφείς στο [72] ανέπτυξαν μια βελτιωμένη έκδοση της κλασσικής μεθόδου σμήνους σωματιδίων για συνθήκες μερικής σκίασης. Ο νέος αλγόριθμος έχει λίγο καλύτερη ταχύτητα σύγκλισης, μεγαλύτερη ακρίβεια και απόκριση σε απότομες αλλαγές, σε σχέση με την κλασσική μορφή του αλγόριθμου. Στο [73] παρουσιάζεται μια τεχνική ελέγχου του μετατροπέα του ΦΒ συστήματος η οποία στηρίζεται σε μια παραλλαγή, με πολλές ομοιότητες όμως, του κλασσικού PSO, η οποία ονομάζεται Cuckoo Search(CS). Ο αλγόριθμος είναι αποδοτικός στα περισσότερα σενάρια μερικής σκίασης που έχει δοκιμαστεί, καθώς και σε αφηνίδες μεταβολές των συνθηκών. Η πολυπλοκότητα του είναι στα ίδια επίπεδα, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις συγκλίνει λίγο γρηγορότερα στο επιθυμητό σημείο. Όλοι οι εξεταζόμενοι PSO αλγόριθμοι MPPT φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 3. 6.

Πίνακας 3. 6. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων PSO-based MPPT αλγορίθμων

Ref	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track .time	Irr. Levels Supp.	PV System Dep.
[68]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Buck-boost	Digital	MSP430FG461 8 microcontroller	Complex	Expensive	Slow	Any	No
[67]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	DSP	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[74]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Buck-boost	Digital	DSP TMS320F240	Complex	Medium	Medium	Any	No
[69]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Buck-boost	Digital	DSP TMS320F241	Complex	Medium	Medium	Any	No
[66]	V_{pvs} I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Microcontroller dsPIC33FJ16G S502	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[70]	V_{pvs} I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	DSP TMS320F2803 5	Complex	Expensive	Slow	Any	No
[75]	V_{pvs} I_{pv}	I_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Very expensive	Medium	Any	No
[76]	V_{pvs} I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Matlab/Simulink	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[77]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Microcontroller PIC16F876A	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[78]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	DSP TMS320F335	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[71]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	SEPIC	Digital	Microcontroller Atmega328P	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[72]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Microprocessor PIC181F8720	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[79]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[80]	V_{pvs} I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Digital Microprocessor	Complex	Expensive	Medium	Any	No

[73]	V_{pv} I_{pv}	V_{ref}	Buck-boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Fast	Any	No
------	----------------------	-----------	------------	---------	----------------	---------	-----------	------	-----	----

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, το βασικό μειονέκτημα των αλγορίθμων, οι οποίοι στηρίζονται στη λογική της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα εκτέλεσης τους, η οποία προκαλείται από την τυχαία αρχικοποίηση των παραμέτρων των συναρτήσεων οδήγησης των σωματιδίων. Επίσης, η υπολογιστική πολυπλοκότητα, όταν χρησιμοποιούνται πολλά σωματίδια για την αναζήτηση, αυξάνεται κατακόρυφα, κάνοντας πιο αργή την εκτέλεση του αλγόριθμου.

3.3.4 Η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων(Genetic Algorithms-GA)

3.3.4.1 Θεωρητική ανάλυση

Η τεχνική των γενετικών αλγορίθμων είναι μια ακόμα μέθοδος τεχνητής νοημοσύνης για την εύρεση λύσεων σε πολύπλοκα προβλήματα, στηριγμένη στην εξελικτική βιολογία. Αναπτύχθηκε στην αρχική της μορφή από τον ερευνητή-βιολόγο Holland το 1975, βασισμένη στη γνωστή αρχή επιβίωσης του ισχυρότερου στην εξελικτική αλυσίδα. Γενικά, σε ένα σύστημα, οι γενετικοί αλγόριθμοι μοντελοποιούν τις υποψήφιες λύσεις, γνωστές και ως χρωμοσώματα(chromosomes), μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα αναζήτησης. Ένα χρωμόσωμα αποτελείται από ένα σταθερό πληθυσμό γονιδίων, τα οποία μπορούν να αναπαρασταθούν τόσο από πραγματικούς, όσο και από δυαδικούς κώδικες. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου, ο πληθυσμός των χρωμοσωμάτων εξελίσσεται σταδιακά με την πάροδο των γενεών. Αυτή η εξελικτική διαδικασία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της εκτέλεσης συγκεκριμένων διεργασιών στους γενετικούς αλγόριθμους: τη διαδικασία της *επιλογής(selection)*, τη διαδικασία της *διασταύρωσης(crossover)* και αυτή της *μετάλλαξης(mutation)*. Μέσω αυτής της διαδικασίας εξέλιξης, το ισχυρότερο χρωμόσωμα(αυτό που παρέχει την καλύτερη λύση στο εκάστοτε πρόβλημα) επιβιώνει και μεταβιβάζεται από γενιά σε γενιά(από τη μια επανάληψη στην επόμενη). Με άλλα λόγια, η γενετική μέθοδος είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος περιέχει ένα πληθυσμό αρχικοποιημένων παραγόντων(χρωμοσώματα) οι οποίοι αναπτύσσονται και εξελίσσονται, ανάλογα τις ανάγκες του προβλήματος, με την πάροδο των γενεών(επανάληψεων). Σε κάθε γενιά, επιλέγονται τα χρωμοσώματα αναπαραγωγής(parents) από τον υπάρχοντα πληθυσμό και παράγουν τα χρωμοσώματα που θα περάσουν στην επόμενη γενιά. Η αντικειμενική συνάρτηση του αλγόριθμου είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ισχυροποίηση του πληθυσμού. Η διαδικασία και ο κύκλος ζωής του πληθυσμού φαίνονται, παρακάτω, στο Σχ. 3. 18, και τα βασικά βήματα εκτέλεσης ενός γενετικού αλγόριθμου, αναλύονται στη συνέχεια:

- **Αρχικοποίηση(Initialization).** Αρχικά, η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το κύριο εργαλείο του αλγόριθμου για την ιεράρχηση της σημαντικότητας των υποψήφιων λύσεων(χρωμοσωμάτων). Η επιλογή και η μορφοποίηση της συνάρτησης αυτής γίνεται με βάση τις απαιτήσεις και την πολυπλοκότητα του εκάστοτε συστήματος, που εφαρμόζεται ο αλγόριθμος. Μόλις γίνει η επιλογή, ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός χρωμοσωμάτων μέσω τυχαίας επιλογής. Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγόριθμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του πληθυσμού. Παρόμοια με κάθε αλγόριθμο τεχνητής νοημοσύνης, όσο πολυπλοκότερο είναι το πρόβλημα προς αντιμετώπιση, τόσο μεγαλύτερος πληθυσμός υποψήφιων λύσεων, απαιτείται. Παρ' όλα αυτά, όπως είναι λογικό, σε αυτή την περίπτωση μειώνεται δραματικά η ταχύτητα σύγκλισης του αλγόριθμου.
- **Επιλογή(Selection).** Όπως προειπώθηκε, ο αρχικός πληθυσμός χρωμοσωμάτων επιλέγεται τυχαία. Οι τιμές καταλληλότητας(fitness values) των αρχικών χρωμοσωμάτων υπολογίζονται

μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης του αλγόριθμου. Στη συνέχεια, με βάση την αξιολόγηση καταλληλότητας, η οποία πραγματοποιείται ανά επανάληψη, γίνεται η επιλογή των ισχυρότερων χρωμοσωμάτων, που θα παραμείνουν στον πληθυσμό. Γενικά, τα χρωμοσώματα με τον μεγαλύτερο δείκτη καταλληλότητας (fitness value) έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να συμπεριληφθούν στην επόμενη γενιά (επανάληψη) της μεθόδου.

- **Διασταύρωση (Crossover).** Δύο επιλεγμένα χρωμοσώματα συνδυάζονται σε αυτό το βήμα. Η εφαρμογή αυτού του βήματος εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, στον τρόπο κωδικοποίησης των γονιδίων μέσα στα χρωμοσώματα. Η φυσιολογική τεχνική διασταύρωσης (normal crossover) μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν τα γονίδια είναι σε δυαδική μορφή. Τότε, ένας τυχαίος ακέραιος αριθμός, ο οποίος είναι μικρότερος από τον αριθμό των γονιδίων των χρωμοσωμάτων αναπαραγωγής (parent chromosomes), χρησιμοποιείται για τον αρχικό διαχωρισμό των δύο χρωμοσωμάτων και την ένωση των δύο κομματιών που προκύπτουν (ένα από το κάθε αρχικό χρωμόσωμα) για την παραγωγή του απογόνου (**Error! Reference source not found.**). Εάν τα χρωμοσώματα είναι κωδικοποιημένα σε συνεχή μορφή, και το a συμβολίζει το ρυθμό διασταύρωσης (crossover rate), ο απόγονος θα σχηματιστεί όπως φαίνεται από τις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

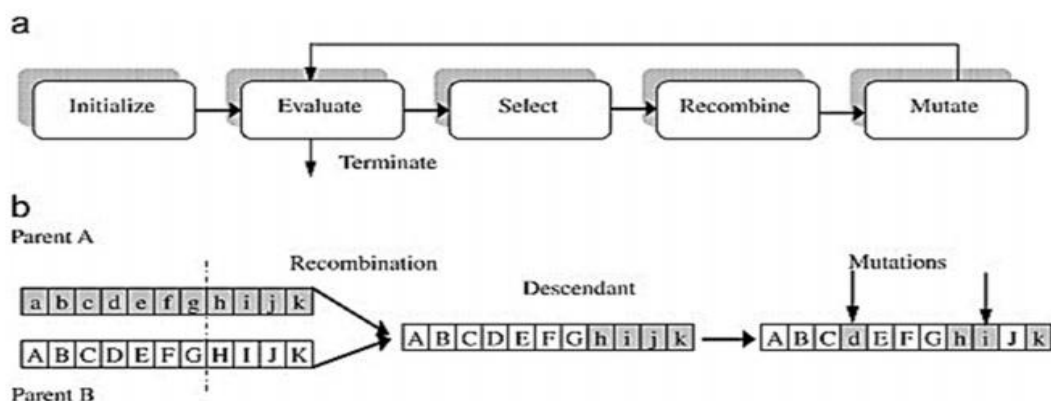
$$Offspring_1 = a \cdot parent_1 + (1 - a) \cdot parent_2 \quad [3.12]$$

$$Offspring_1 = (1 - a) \cdot parent_1 + a \cdot parent_2$$

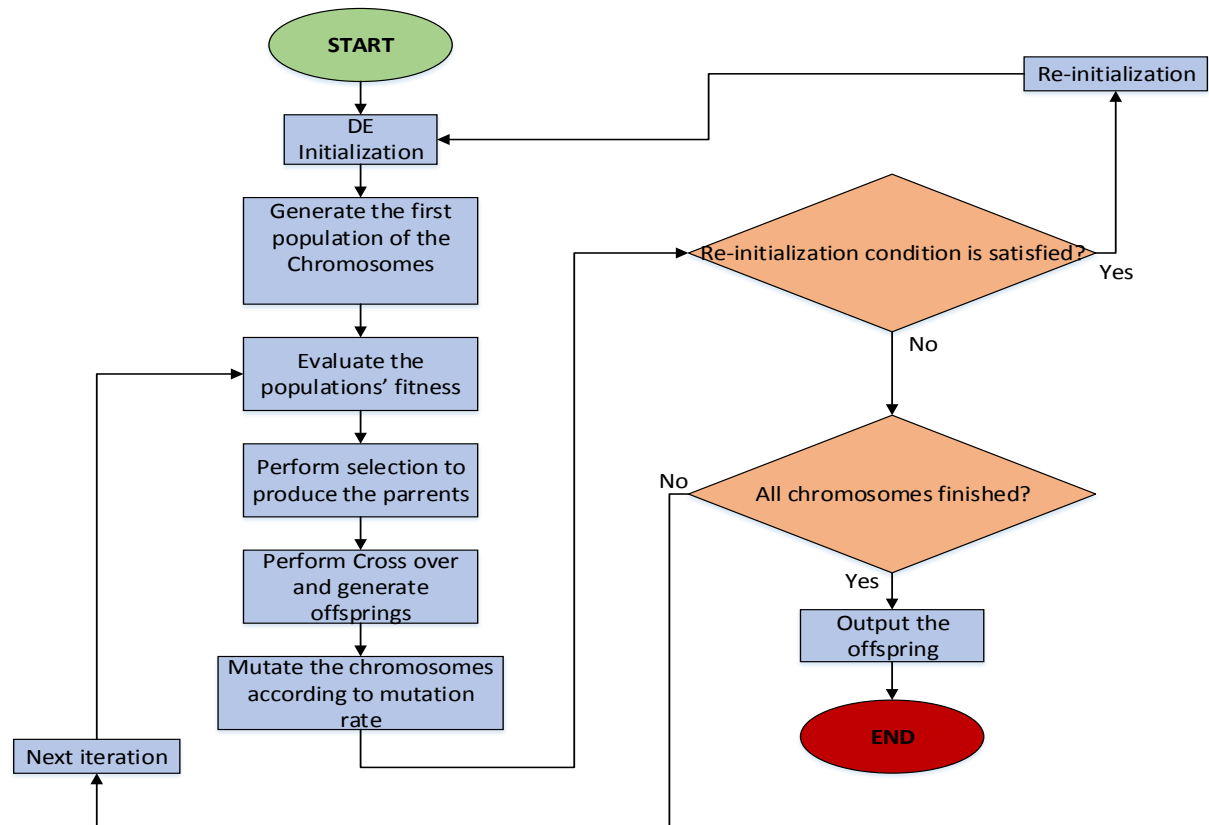
- **Μετάλλαξη (Mutation).** Η διαδικασία της μετάλλαξης είναι αυτή που διατηρεί τη στοχαστική φύση των γενετικών αλγορίθμων, μεταλαμπαδεύοντας τη γενετική ποικιλία της μιας γενιάς στην επόμενη. Το στάδιο της μετάλλαξης παρέχει κάποιες πιθανότητες για πιθανές υπονήφιες λύσεις του προβλήματος, οι οποίες δεν προκύπτουν από τη χρήση της διαδικασίας της διασταύρωσης. Η μετάλλαξη, τυχαία, παραποιεί το χρωμόσωμα με ένα συγκεκριμένο ρυθμό β (mutation rate). Για τα χρωμοσώματα, τα οποία είναι κωδικοποιημένα με συνεχή μορφή, η μετάλλαξη γίνεται ως εξής:

$$Offspring_1 = \pm \beta \cdot Offspring + Offspring \quad [3.13]$$

Ο αλγόριθμος συνεχίζει να λειτουργεί μέχρι να ενεργοποιηθεί κάποια συνθήκη τερματισμού. Η συνθήκη αυτή, συνήθως, δημιουργείται με βάση τις απαιτήσεις και την πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης. Το σχηματικό διάγραμμα των γενετικών αλγορίθμων φαίνεται στο Σχ. 3. 19.



Σχ. 3. 18. Ο κύκλος ζωής του πληθυσμού και η διασταύρωση των χρωμοσωμάτων αναπαραγωγής [27].



Σχ. 3. 19. Σχηματικό διάγραμμα γενετικών αλγόριθμων.

3.3.4.B Αλγόριθμοι MPPT βασισμένοι στη λογική των Γενετικών Αλγόριθμων(MPPT GA-based Algorithms)

Η λογική των γενετικών αλγόριθμων έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, που υπήρχε ανάγκη βελτιστοποίησης, στον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως στην εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας σε μια ΦΒ εγκατάσταση, τόσο σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας όσο και σε συνθήκες μερικής σκίασης. Έχει παρατηρηθεί ότι η μέθοδος των γενετικών αλγόριθμων προσφέρει γρήγορες ταχύτητες σύγκλισης στην επιθυμητή λύση, ενώ μειώνει την πιθανότητα παγίδευσης του συστήματος σε κάποιο LMPP. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή δεν προτείνεται για εφαρμογή σε μεγάλα και πολύπλοκα ΦΒ συστήματα, καθώς η πολυπλοκότητα εκτέλεσης της και η απαιτούμενη μνήμη για την αρχικοποίησή της αυξάνονται ραγδαία, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση του συστήματος. Η αρχικοποίηση του πληθυσμού των χρωμοσωμάτων αναπαραγωγής στους γενετικούς αλγόριθμους σε MPPT εφαρμογές, γίνεται ως εξής:

$$X_i = [Parent^1 \cdot Parent^2 \cdot \dots \cdot Parent^N] \quad [3. 14]$$

όπου το N παριστάνει το μέγεθος του πληθυσμού και κάθε μεταβλητή $parent$ αναπαριστά μια αρικοποιημένη τιμή τάσης, από τις οποίες ο αλγόριθμος ξεκινά τη διαδικασία αξιολόγησης σε κάθε επανάληψή του. Η αντικειμενική συνάρτηση $f(x')$ δίνει την παραγόμενη ισχύ στην έξοδο της ΦΒ συστοιχίας. Οι τιμές, που δείχνουν πόσο ισχυρό και αξιόπιστο είναι το κάθε χρωμόσωμα (fitness values), αξιολογούνται από την αντικειμενική συνάρτηση και χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του πληθυσμού και για την βελτίωση της δύναμης του, από επανάληψη σε επανάληψη. Στις MPPT εφαρμογές, επίσης, ο αλγόριθμος χρειάζεται να επαναρχικοποιείται συνεχώς, εξαιτίας των συνεχών αλλαγών που προκύπτουν στο φορτίο, στην ηλιακή ακτινοβολία ή στις συνθήκες σκίασης. Ως εκ τούτου, και μελετώντας τη

βιβλιογραφία, οι συνθήκες οι οποίες χρησιμοποιούνται, συνήθως, και πρέπει να ικανοποιούνται για την επανεκκίνηση της υπορουτίνας του γενετικού αλγορίθμου για την ανεύρεση του GMPP είναι οι εξής:

$$|V(k+1) - V| < \Delta V$$

$$\left| \frac{P(k+1) - P(k)}{P(k)} \right| > \Delta P \quad [3. 15]$$

Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης που αναλύθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί πολύ λιγότερο για την αναζήτηση του GMPP σε συνθήκες σκίασης. Ως εκ τούτου, η βιβλιογραφία, η οποία είναι διαθέσιμη για αυτό το είδος, είναι περιορισμένη. Στα [81] και [82], παρουσιάζεται μια κλασική μορφή αλγορίθμου γενετικής λογικής σαν το κύριο μέσο επίλυσης των προβλημάτων που δημιουργούνται από τη μερική σκίαση. Στο [83] ο έλεγχος του ημιαγωγικού διακόπτη του μετατροπέα ισχύος γίνεται με έναν γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος δοκιμάζεται σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις σεναρίων μερικής σκίασης. Παρ' όλα αυτά οι δοκιμές γίνονται μόνο μέσω προσομοιώσεων και η απόδοση του αλγορίθμου δεν επαληθεύεται σε πραγματικές συνθήκες σκίασης. Σε μια άλλη ερευνητική εργασία, στο [84], η οποία είναι από τις πρώτες που προτείνουν μια μέθοδο τεχνητής νοημοσύνης σε εφαρμογή MPPT, γίνεται σύγκριση του αλγορίθμου MPPT, που προτείνεται, με τις κλασικές μεθόδους P&O και INC, σε δύο σενάρια σκίασης. Παρ' όλα αυτά, και εδώ όπως και πριν, η επαλήθευση περιορίζεται σε θεωρητικό επίπεδο προσομοιώσεων, και δε γίνεται πρακτική εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικές συνθήκες. Στο [85], ο Daraban, συνδυάζει το συμβατικό αλγόριθμο P&O με έναν αλγόριθμο γενετικής λογικής. Ο αλγόριθμος αυτός κάνει χρήση μειωμένου πληθυσμού χρωμοσωμάτων, ενώ ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται, είναι αυξημένος. Η σύγκλιση γίνεται πιο γρήγορα και η ακρίβεια της είναι μεγαλύτερη σε ένα ΦΒ σύστημα, το οποίο υπόκειται σε ποικίλα και διαφορετικά σενάρια σκίασης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί πολύ και σε υβριδικές μεθόδους (σε συνδυασμό με άλλες). Για παράδειγμα, στο [86], για τη ρύθμιση των παραμέτρων ενός αλγορίθμου ασαφούς λογικής, χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος, σε συνθήκες μερικής σκίασης. Η απόδοση του αλγορίθμου ασαφούς βελτιστοποίησης δείχνει βελτιωμένη, καθώς οι παράμετροι του ρυθμίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια, με τη βοήθεια της γενετικής λογικής. Σε μια άλλη μελέτη, στο [87], η γενετική λογική γίνεται το εργαλείο για την εκπαίδευση των νευρώνων ενός νευρωνικού δικτύου. Οι εξεταζόμενοι αλγόριθμοι φαίνονται παρακάτω, στον Πίνακα 3. 7.

Πίνακας 3. 7. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων GA-based MPPT αλγορίθμων

Ref.	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track. time	Ir. Levels Supp.	PV System Dep.
[84]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[86]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[81]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[87]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.(PSIM)	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[82]	V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Medium	Any	No

[85]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	PIC 16F876A	Complex	Expensive	Medium	Any	No
[83]	V_{pv}, I_{pv}	D_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Complex	Expensive	Medium	Any	No

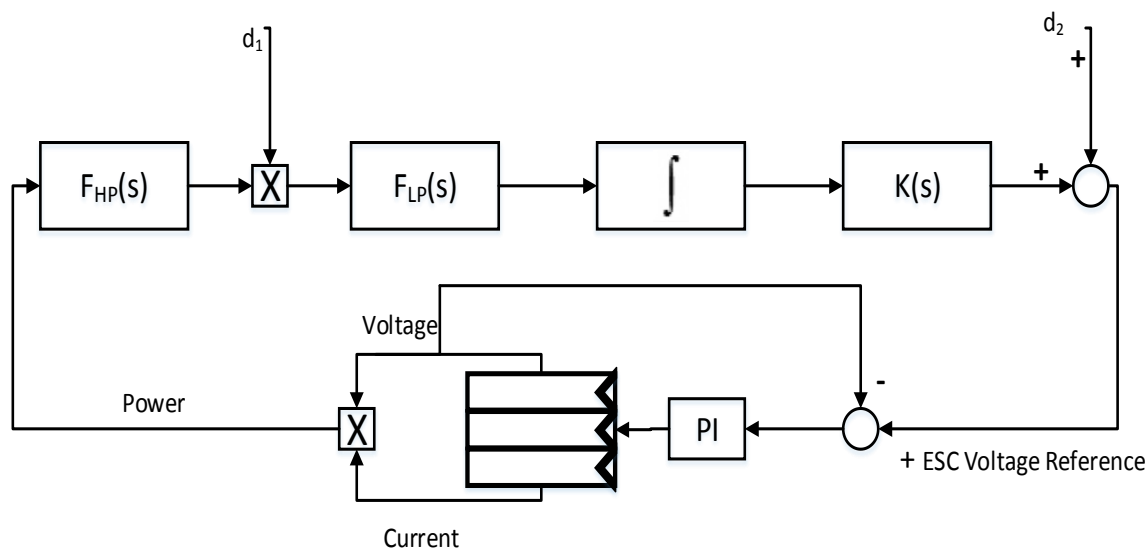
3.4 Άλλες μέθοδοι MPPT

Σε αυτή την υποενότητα θα παρουσιαστούν κάποιες μέθοδοι MPPT, οι οποίες δεν κατηγοριοποιούνται στις προηγούμενες υποενότητες.

3.4.1 Μέθοδος ελέγχου ακραίας αναζήτησης MPPT (Extreme seeking control method-ESC)

Γενικά, η μέθοδος ελέγχου ακραίας αναζήτησης είναι μια προσαρμοστική μέθοδος κλειστού βρόχου, η οποία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ακραίων τιμών στην επίλυση ενός προβλήματος. Πρακτικά, αυτού του τύπου οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ένα μαθηματικοποιημένο κυκλωματικό μοντέλο με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνάρτησης εξόδου του συστήματος, μέσω της μεταβλητής εισόδου που δέχονται. Στην περίπτωση μας, στόχος είναι η αναζήτηση της βέλτιστης τιμής τάσης αναφοράς στην χαρακτηριστική καμπύλη P-V, όπου το ΦΒ σύστημα παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, σε συνθήκες μερικής σκίασης. Στο Σχ. 3. 20 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού κυκλώματος ελέγχου ESC σε μια ΦΒ συστοιχία.

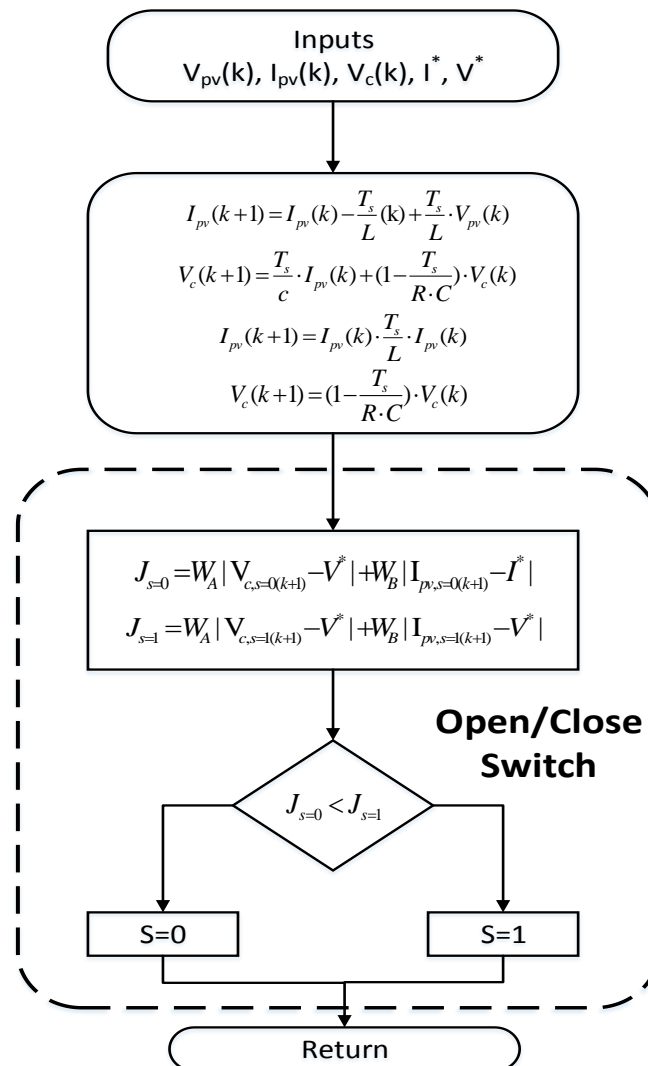
Για ΦΒ σε συνθήκες μερικής σκίασης, στο [88] αναπτύσσεται μια μέθοδος ESC, παρόμοια με αυτή των Patel, Agarwal που είδαμε προηγουμένως, για τον εντοπισμό του GMPP. Η διαφορά, εδώ, είναι ότι χρησιμοποιείται η μεθοδολογία λογικής ESC, αντί του συμβατικού αλγορίθμου P&O, σαν βάση. Στο [89] παρουσιάζεται μια ακόμη μέθοδος αναζήτησης ακραίων τιμών παρόμοιας λογικής με αυτή στο [34], στην οποία η ταχύτητα σύγκλισης φαίνεται βελτιωμένη, σε σύγκριση με την απλή μορφή της μεθόδου. Πρέπει να τονιστεί, πάντως, ότι οι μέθοδοι αυτής της μορφής έχουν αρκετά αυξημένη πολυπλοκότητα, το υπερπλεονάζον φίλτρο που χρησιμοποιούν είναι αρκετά ευαίσθητο σε θορύβους και η πρακτική εφαρμογή τους σε ένα πραγματικό ΦΒ σύστημα είναι αρκετά δύσκολη και ακριβή.



Σχ. 3. 20. Σχηματικό διάγραμμα ενός βασικού κυκλώματος ελέγχου αναζήτησης ακραίων τιμών (ESC) σε ΦΒ σύστημα.

3.4.2 Μέθοδος ΜΡΡΤ προβλεπτικού ελέγχου (Model predictive control ΜΡΡΤ method-MPC)

Η μέθοδος προβλεπτικού ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει μελλοντικά γεγονότα βάση κάποιων δεδομένων, τα οποία δέχεται. Μέσω αυτών των προβλέψεων, στη συνέχεια, έχει τη δυνατότητα να παρέχει τον απαιτούμενο έλεγχο σε ένα σύστημα και να δώσει τις επιθυμητές λύσεις σε ένα πρόβλημα, στο οποίο εφαρμόζεται. Στο [90], παρουσιάζεται μια τέτοια κλασική μέθοδος προβλεπτικού ελέγχου, η οποία συνδυαζόμενη με μια συμβατική μέθοδο σύγκλισης από τις γνωστές, εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση του φαινομένου της σκίασης σε ένα ΦΒ σύστημα. Η μέθοδος προβλεπτικού ελέγχου παρέχει πολύ ικανοποιητική ταχύτητα σύγκλισης και ακρίβεια, αλλά η υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και πολυπλοκότητα υλοποίησης της, την καθιστούν δύσχρηστη. Συν τοις άλλοις, η εφαρμογή της μεθόδου αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα επιμέρους σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα ισχύος, οπότε η πρακτική εφαρμογή της σε ένα οποιοδήποτε σύστημα δεν είναι απλή υπόθεση. Στο Σχ. 3. 21, παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας, το επιμέρους σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου προβλεπτικού ελέγχου, που εφαρμόζεται στο [90].



Σχ. 3. 21. Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου προβλεπτικού ελέγχου, η οποία παρουσιάζεται στο [90].

Ορισμένα τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων MPPT ακραίας αναζήτησης(ESC) και του αλγόριθμου προβλεπτικού ελέγχου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. 8.

Πίνακας 3. 8. Τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των τριών παραπάνω μεθόδων MPPT.

Ref.	MPP Est. In.	Est. Out.	Conv Type	Hardware Implem.	Contr. Implem.	MPP Comp. Complexity	Implem. Cost	Track. time	Ir. Levels Supp.	PV System Dep.	Ref.
[88]		V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	-	Digital	Software Impl.	Medium - Complex	Inexpensive	Slow - Medium	Any	No
[89]		V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}	Boost	Digital	Software Impl.	Medium - Complex	Inexpensive	Medium	Any	No
[90]		V_{pv}, I_{pv}	V_{ref}, I_{ref}	Boost + DC motor load	Digital	Software Impl.	Complex	Medium	Medium	Any	Yes

3.5 Συγκεντρωτική συγκριτική μελέτη αλγορίθμων MPPT και συμπεράσματα

Το φαινόμενο της μερικής σκίασης σε ένα ΦΒ σύστημα μπορεί να γίνει αρκετά περίπλοκο. Το γεγονός αυτό, από μόνο του, κάνει πολύ δύσκολη τη διαδικασία ανεύρεσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος. Μελετώντας κανείς, προσεκτικά, την παραπάνω εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση αυτού του κεφαλαίου, καταλήγει εύκολα στο συμπέρασμα ότι η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων ειδών αλγορίθμων MPPT σε συστήματα υπό μερική σκίαση, δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση. Οι άξονες αξιολόγησης ενός αλγόριθμου MPPT, όπως προδίδουν και οι συγκριτικοί πίνακες των προηγούμενων υποενοτήτων, είναι αρκετοί. Οι σημαντικότεροι εξ' αυτών είναι:

1. **Εκτελεστική/υπολογιστική πολυπλοκότητα.** Είναι αρκετά δύσκολη η ιεράρχηση των αλγορίθμων, με βάση την υπολογιστική τους πολυπλοκότητα. Παρ' όλα αυτά, στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης, λαμβάνοντας υπ' όψη τον αριθμό των βημάτων εκτέλεσης κάθε επανάληψης του αλγόριθμου και της ποσότητας των υπολογισμών που απαιτούνται. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι, στο σύνολό τους, υπερτερούν σε αυτή την κατηγορία έναντι των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Η διαδικασία εκτέλεσης κάθε επανάληψης των πρώτων έχει μια δομή ευθείας επίλυσης απλών μαθηματικών σχέσεων, συνήθως. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι έχουν στοχαστική φύση, περιέχουν αρκετές περισσότερες παραμέτρους και έχουν αυξημένες απαιτήσεις υπολογισμών, ενώ τα βήματα εκτέλεσης τους είναι πολύ περισσότερα.
2. **Πολυπλοκότητα υλοποίησης.** Η κατηγορία αυτή σύγκρισης εξαρτάται ως ένα βαθμό από την προηγούμενη. Όπως προειπώθηκε, οι ντετερμινιστικές μέθοδοι, στην πλειοψηφία τους, δεν περιέχουν μεγάλη ποσότητα παραμέτρων, ενώ οι σχέσεις και οι διαδικασίες υπολογισμού που χρησιμοποιούν είναι απλές και έχουν ξεκάθαρη δομή. Από την άλλη, δεν μπορούμε να πούμε το ίδιο για τους αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε

διάφορα στάδια της υλοποίησής τους. Όπως, για παράδειγμα, στην αρχικοποίηση τους ή στην εκπαίδευση τους, αν πρόκειται για νευρωνικά δίκτυα.

3. **Ταχύτητα σύγκλισης.** Σε πραγματικό χρόνο, τα χαρακτηριστικά ενός ΦΒ συστήματος υπό μερική σκίαση αλλάζουν δυναμικά και, κατά συνέπεια, το σημείο βέλτιστης λειτουργίας μετακινείται πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη, σχεδόν συνέχεια. Ως εκ τούτου, κάθε επιτυχής αλγόριθμος MPPT πρέπει να είναι ικανός να προσαρμόζεται άμεσα στις συνθήκες και να συγκλίνει στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας, σε εύλογο χρόνο. Εξετάζοντας τη βιβλιογραφία, διαπιστώνεται ότι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούν γραμμικές σχέσεις ευθείας επίλυσης ή διάφορες μαθηματικές μεθόδους ή σχέσεις εντοπισμού των διαφορών τοπικών μεγίστων στη χαρακτηριστική P-V, έχουν σαφές πλεονέκτημα στην ταχύτητα σύγκλισης τους, έναντι των άλλων. Γενικότερα, όσο πιο απλό είναι το σενάριο σκίασης, στο οποίο υπόκειται ένα σύστημα, τόσο πιο γρήγορη είναι και μια μέθοδος.
4. **Υποστήριξη πολλών επιπέδων σκίασης/αποτελεσματικότητα σε ακραίες μεταβολές σκίασης.** Η μερική σκίαση ενός ΦΒ συστήματος μπορεί να εξαρτάται από πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να μεταβάλλονται συνεχώς και ραγδαία κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο πρόβλημα, το οποίο καλούνται να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι MPPT. Η συντριπτική πλειοψηφία των μεθόδων της βιβλιογραφίας, υστερούν σε αυτό το κομμάτι, ανάλογα την εκάστοτε περίπτωση και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των μεθόδων.
5. **Εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του συστήματος.** Η υλοποίηση και εκτέλεση κάποιων μεθόδων έχουν άμεση εξάρτηση από τα ηλεκτρικά ή άλλα χαρακτηριστικά του ΦΒ συστήματος, στο οποίο εφαρμόζονται αρχικά. Για παράδειγμα, τα νευρωνικά δίκτυα, ο έλεγχος ασαφούς λογικής και η προβλεπτική μέθοδος δεν δύναται να προσαρμοστούν επιτυχώς σε, τυχόν, αλλαγές στα αρχικά χαρακτηριστικά του συστήματος, στο οποίο εφαρμόζονται. Το γεγονός αυτό, είναι ένα μειονέκτημα για τους αλγόριθμους αυτούς, που τους καθιστούν μη ευέλικτους.
6. **Απαιτήσεις εκτέλεσης/Κόστος εκτέλεσης.** Σε ρεαλιστικές-εμπορικές συνθήκες, ένας σημαντικός παράγοντας που καθιστά εύχρηστο ή δύσχρηστο έναν αλγόριθμο MPPT, είναι το κόστος του. Αλγόριθμοι, οι οποίοι απαιτούν την ύπαρξη επιπρόσθετων(από τα συνηθισμένα) αισθητήρων ή/και ολόκληρων κυκλωμάτων, για τη σωστή τους εκτέλεση, ανεβάζουν κατακόρυφα το κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος. Τέτοιοι αλγόριθμοι είναι, για παράδειγμα, κάποιοι ντετερμινιστικοί, οι οποίοι χρειάζονται μετρήσεις ηλεκτρικών παραμέτρων του ΦΒ συστήματος, οι οποίες μεταβάλλονται με τις συνθήκες, σε πραγματικό χρόνο και οι περισσότεροι από τους αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης.

Παρακάτω, στον Πίνακα 3. 9, παρουσιάζονται, συνοπτικά, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλγορίθμων όλων των κατηγοριών που εξετάστηκαν σε αυτή την ενότητα.

Πίνακας 3. 9. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όλων των εξεταζόμενων κατηγοριών αλγορίθμων MPPT.

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ντετερμινιστικές Μέθοδοι		
System Characteristic Curve MPPT Methods-SCCMM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εύκολη υλοποίηση 2. Γρήγορη και απλή εκτέλεση 3. Γρήγορη σύγκλιση 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αδυναμία εντοπισμού του GMPP σε πολύπλοκες συνθήκες σκίασης(αποτυχία, ακόμα και με 3 επίπεδα ακτινοβολίας ορισμένες φορές) 2. Απαιτήση ύπαρξης επιπρόσθετων αισθητήρων ή κυκλωμάτων σε μερικές περιπτώσεις

Restricted Scan MPPT Methods- RSMM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εύκολη υλοποίηση 2. Απλή εκτέλεση 3. Επιτυχία υποστήριξης αρκετά περίπλοκων σεναρίων σκίασης 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Σχετικά αργός χρόνος σύγκλισης σε κάποιες περιπτώσεις 2. Αρκετά μεγάλες απώλειες ισχύος κατά την αναζήτηση του GMPP
Segmental Search MPPT Methods- SSMM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εύκολη υλοποίηση 2. Πολύ γρήγορη σύγκλιση 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Δύσκολη αρχικοποίηση παραμέτρων σε ορισμένες μεθόδους 2. Αποτυχία σύγκλισης σε πολύπλοκα σενάρια με πολλά επίπεδα ακτινοβολίας ή αργές μεταβολές ακτινοβολίας
Μέθοδοι Τεχνητής Νοημοσύνης Fuzzy Logic Control	<ol style="list-style-type: none"> 1. Πολύ συμπαγής δομή 2. Ακριβής ανίχνευση σφαλμάτων 3. Αποτελεσματική όταν συνεργάζεται με άλλες μεθόδους για τον εντοπισμό του GMPP 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αποτυχία σύγκλισης σε δυναμικές μεταβολές της ακτινοβολίας 2. Υψηλή εξάρτηση από το σύστημα εφαρμογής. Οι κανόνες της δεν μπορούν να αλλάξουν, μετά την αρχικοποίηση τους για ένα δεδομένο σύστημα 3. Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης
Neural Networks	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αποτελεσματικότητα σε μεγάλο εύρος σεναρίων σκίασης 2. Υψηλή ακρίβεια σύγκλισης χωρίς διακυμάνσεις 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αρκετά υψηλός υπολογιστικός χρόνος κατά την εκτέλεση 2. Μεγάλη απαίτηση σε μνήμη συστήματος 3. Απαιτούμενη προ-εκπαίδευση των νευρώνων για ένα δεδομένο σύστημα. Υψηλή εξάρτηση από το αρχικό σύστημα
Genetic Algorithms	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ευρύ φάσμα αναζήτησης πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη 2. Επιτυχής υποστήριξη γρήγορων μεταβολών στην ακτινοβολία 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Η απαίτηση σε μνήμη συστήματος είναι αρκετά μεγάλη 2. Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης 3. Υψηλή πολυπλοκότητα εκτέλεσης-αυξημένος υπολογιστικός χρόνος
PSO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μεγάλη αποτελεσματικότητα στην αναζήτηση του GMPP 2. Σχετικά απλή υλοποίηση συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης 3. Πολύ αποτελεσματική στην αντιμετώπιση της μη γραμμικών προβλημάτων, όπως η αναζήτηση του GMPP 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Πολύ δύσκολη αποτελεσματική αρχικοποίηση παραμέτρων 2. Υψηλός χρόνος υπολογισμών και εκτέλεσης σε περίπλοκα σενάρια σκίασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση των επιλεγμένων αλγορίθμων ΜΡΡΤ

4.1 Επιλογή αλγορίθμων ΜΡΡΤ προς σύγκριση

Όπως γίνεται αντιληπτό, με την ανάγνωση και του προηγούμενου κεφαλαίου, μέχρι σήμερα, έχουν γίνει αξιολογικές προσπάθειες από τους ερευνητές για την αντιμετώπιση του φαινομένου της μερικής σκίασης ΦΒ συστημάτων. Ωστόσο, η οξεία πολυπλοκότητα του φαινομένου, σε ορισμένες περιπτώσεις, δημιουργεί πολύ μεγάλες απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές μπορεί να αφορούν το κόστος, την υπολογιστική ή δομική πολυπλοκότητα και άλλα επιμέρους χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου ΜΡΡΤ. Τα βασικά χαρακτηριστικά των αλγορίθμων φαίνεται να διαφοροποιούνται σημαντικά, ανάλογα την κατηγορία στην οποία ανήκουν και τις επιλογές που έχουν γίνει από τους δημιουργούς τους. Παρ' όλα αυτά, οι αλγόριθμοι ΜΡΡΤ για συνθήκες σκίασης, οι οποίοι υπάρχουν έως τις μέρες μας στη βιβλιογραφία και εξετάστηκαν λεπτομερώς προηγουμένως, φαίνεται να δίνουν λύσεις σε κάποια κοινά, σχετικά απλά σενάρια σκίασης, αλλά σε καμία περίπτωση σε όλο το ρεαλιστικό εύρος του προβλήματος. Έτσι, λαμβάνοντας υπ' όψη και την εμπορική διάσταση αντιμετώπισης του φαινομένου, η επιλογή των αλγορίθμων προς μεθοδική σύγκριση σε ρεαλιστικά σενάρια σκίασης έγινε με συγκεκριμένα κριτήρια. Το βασικό κριτήριο επιλογής των αλγορίθμων που προκύπτει, στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η υπολογιστική και δομική πολυπλοκότητα του κάθε αλγορίθμου. Οι αλγόριθμοι οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη υπολογιστική ή/και δομική πολυπλοκότητα, και ανήκουν ως επί το πλείστον στους ευριστικούς αλγόριθμους, αυξάνουν υπερβολικά το εμπορικό και χρονικό κόστος σε αναλογία με το αποτέλεσμα που προσφέρουν σε σύγκριση με τους απλούστερους αλγόριθμους. Στην ουσία, δηλαδή, δεν παρουσιάζουν κάποια επαναστατική θεωρητική μεθοδολογία αντιμετώπισης του φαινομένου της σκίασης, που να δικαιολογεί πλήρως τις αυξημένες τους απαιτήσεις, συγκριτικά πάντα με τους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους. Για τους λόγους αυτούς, αποφασίστηκε στο πρώτο στάδιο της διαλογής των αλγορίθμων προς σύγκριση, να αποκλειστούν οι ευριστικοί αλγόριθμοι ΜΡΡΤ. Έτσι, η επιλογή έγινε από τους αλγόριθμους ντετερμινιστικής φύσης, οι οποίοι διαθέτουν πιο απλά δομικά και υπολογιστικά χαρακτηριστικά, ενώ το αποτέλεσμα που δίνουν σε απλά σενάρια σκίασης είναι συχνά το ίδιο ικανοποιητικό με τους αντίστοιχους ευριστικούς.

Επικεντρώνοντας την επιλογή των αλγορίθμων, τώρα, στους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους, έγινε η προσπάθεια εκπροσώπησης και των τριών επιμέρους υποκατηγοριών των ντετερμινιστικών μεθόδων ΜΡΡΤ, που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο: των μεθόδων που στηρίζονται σε εμπειρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών λειτουργίας του συστήματος (*System Characteristic Curve MPPT Methods-SCCMM*), των μεθόδων που κάνουν χρήση έξυπνης-περιορισμένης σάρωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης *P-V* (*Restricted Scan MPPT Methods-RSMM*) και των μεθόδων που χρησιμοποιούν μαθηματικές σχέσεις ή μεθόδους για τον διαχωρισμό της χαρακτηριστικής *P-V* σε τμήματα με σκοπό τον εντοπισμό των διαφόρων *LMPPs* (*Segmental Search MPPT Methods-SSMM*).

Από την πρώτη κατηγορία, των μεθόδων, δηλαδή, που χρησιμοποιούν εμπειρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών λειτουργίας αποτυπωμένα σε γραμμικές σχέσεις και παρουσιάζονται στα [30]–[34] επιλέχθηκε η μέθοδος των Qi, Zhang και Chen. Η μέθοδος αυτή αντιπροσωπεύει σε βάθος, τη φιλοσοφία της μεθοδολογίας που ακολουθούν οι αλγόριθμοι αυτής της υποκατηγορίας. Παράλληλα, είναι μια μέθοδος απλή στη δομή και τους υπολογισμούς της, που σε απλά σενάρια σκίασης, όπως θα δούμε και παρακάτω, είναι αποδοτική. Στη δεύτερη κατηγορία, των μεθόδων που κάνουν χρήση τεχνικών για έξυπνη/περιορισμένη-και όχι ολική-σάρωση της χαρακτηριστικής *P-V* για τον εντοπισμό του *GMPP*, ανήκουν οι περισσότερες ντετερμινιστικές μέθοδοι, στα [35]–[46]. Έτσι, θεωρήθηκε σωστό, να επιλεγούν όσες μέθοδοι από αυτές ξεχωρίζουν είτε για την πρωτοτυπία τους είτε για την δημοφιλία τους. Οι αλγόριθμοι, οι οποίοι επιλέχθηκαν από αυτή την κατηγορία είναι οι [35], [36], [40], [42]. Από την τρίτη

κατηγορία των αλγορίθμων, οι οποίοι χρησιμοποιούν μαθηματικές σχέσεις ή/και μεθόδους για το διαχωρισμό της καμπύλης P-V σε τμήματα, με σκοπό την αναγνώριση των διαφόρων LMPPs, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος στο [49]. Ο αλγόριθμος επιλέχθηκε με βάση την πρωτοτυπία, την οποία παρουσιάζει στη μεθοδολογία του και την εξαιρετική του απόδοση σε απλά σενάρια σκίασης.

4.2 Αναλυτική παρουσίαση των επιλεγμένων Αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση

Όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πλειοψηφία των αλγορίθμων(και ειδικότερα των νετερμινιστικών) κάνει χρήση της δομής των τριών σταδίων. Στην υποενότητα αυτή, θα δούμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά κάθε επιμέρους σταδίου λειτουργίας για τον κάθε επιλεγμένο αλγόριθμο. Επιπλέον, θα εξεξηγηθεί η διαδικασία επιλογής του καθενός, με τη βοήθεια συνοπτικής σύγκρισης με τους υπόλοιπους αλγόριθμους των αντίστοιχων υποκατηγοριών στις οποίες ανήκουν.

4.2.1 Ο αλγόριθμος των Patel, Agarwal

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος MPPT είναι, ίσως, ο διασημότερος όλων για ΦΒ συστήματα σε συνθήκες μερικής σκίασης. Παρουσιάστηκε το 2008, και από τότε μέχρι και σήμερα μετρά πάνω από 400 ετεροαναφορές (scopus) από άλλες παραπομπές, περισσότερες από κάθε άλλον αλγόριθμο. Παράλληλα, αρκετοί μεταγενέστεροι αλγόριθμοι βασίστηκαν στη φιλοσοφία δόμησης της μεθόδου και την εξέλιξαν με διάφορους τρόπους, καθώς είναι αρκετά απλή και στοχευμένη. Είναι λογικό, βέβαια, λόγω της παλαιότητας της κυρίως, η συγκεκριμένη μέθοδος να αποτυγχάνει αρκετά συχνά σε-μέτριας περιπλοκότητας και πάνω-σενάρια σκίασης. Δε θα μπορούσε, παρ' όλα αυτά, να μην συμπεριληφθεί στην προσπάθεια σύγκρισης που γίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

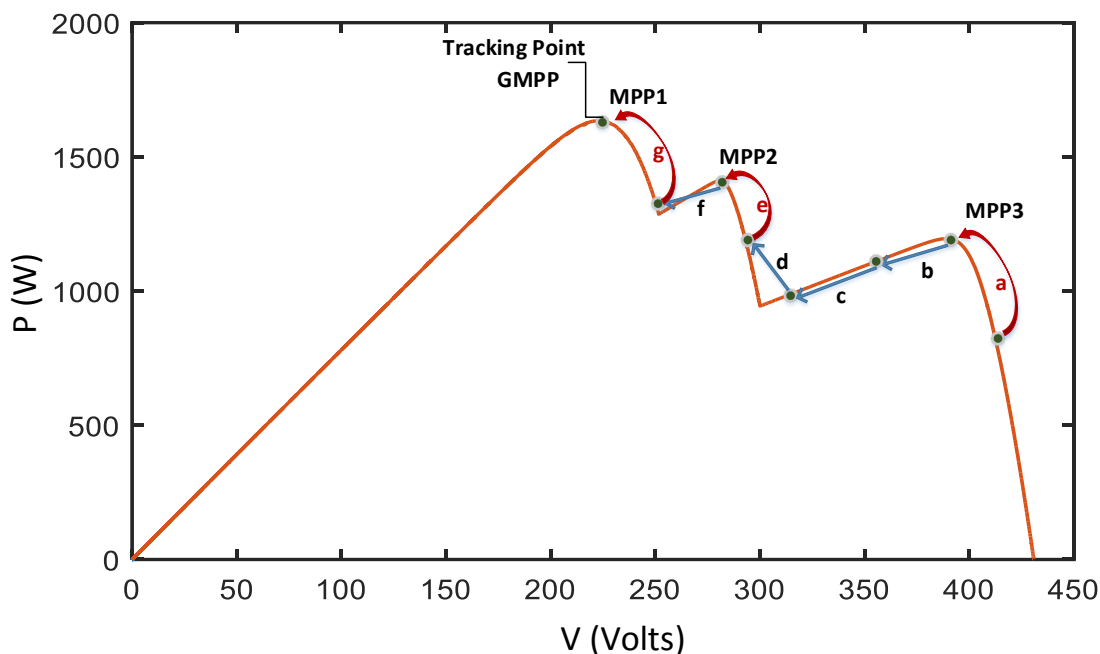
Η μέθοδος στο [35] ακολουθεί, όπως οι περισσότερες, το μοντέλο των τριών σταδίων που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα στάδια αυτά αναλύονται λεπτομερώς, στη συνέχεια, με τη βοήθεια του Σχ. 4. 1, ενώ το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο Σχ. 4. 2.

- **1^ο Στάδιο: Συμβατικός αλγόριθμος σύγκλισης.** Στο στάδιο αυτό, το οποίο χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές για την απαιτούμενη σύγκλιση στο εκάστοτε LMPP που εντοπίζεται, αλλά και στο GMPP τελικά, γίνεται χρήση του κλασσικού αλγόριθμου P&O.
- **2^ο Στάδιο: Συνθήκη επανεκκίνησης υπορουτίνας εντοπισμού GMPP.** Κατά το στάδιο αυτό, ο αλγόριθμος στο [] έχει διττό μηχανισμό. Κάνει χρήση τόσο μιας απλής συνθήκης ελέγχου της μεταβολής ισχύος:

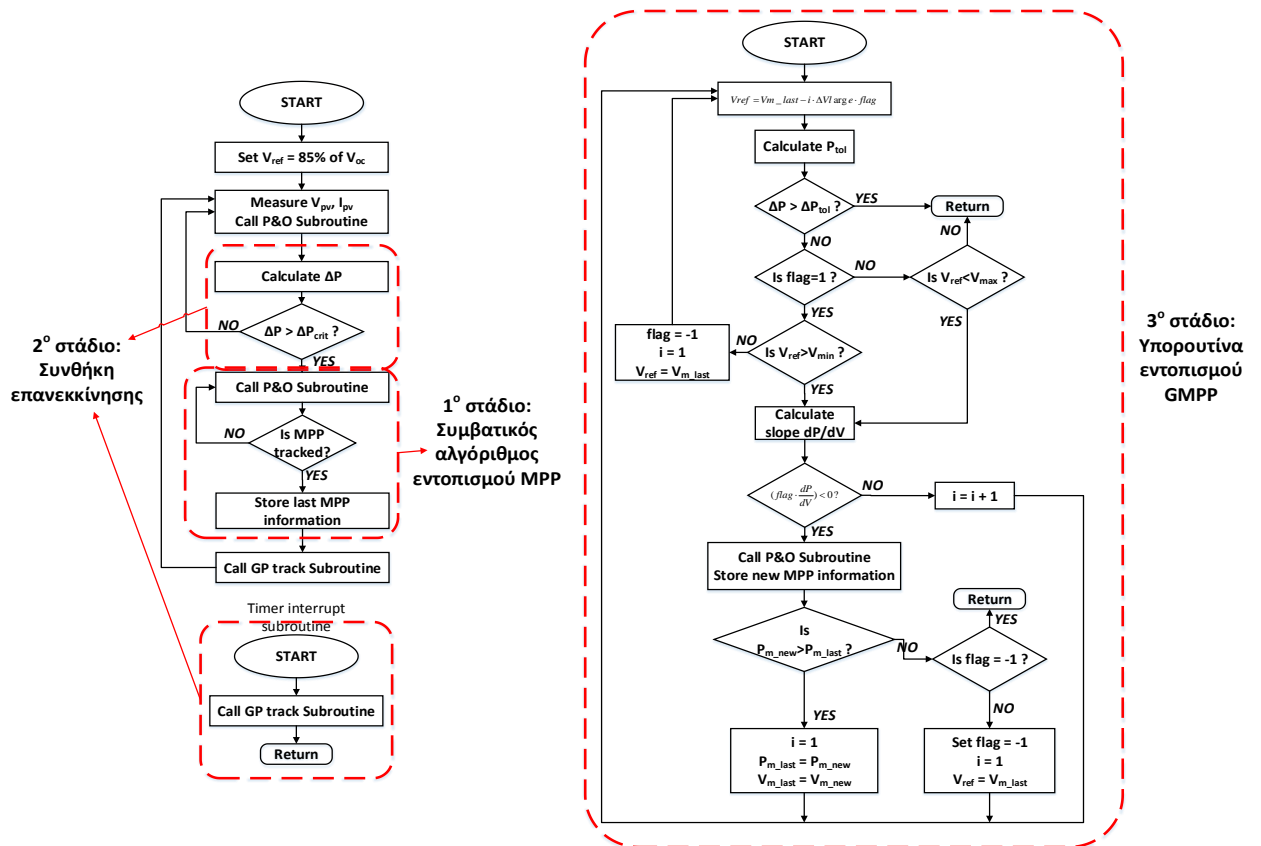
$$|P(k+1) - P(k)| > \Delta P_{crit} \quad [3. \quad 1]$$

όσο και ενός χρονικού ορίου, που ρυθμίζεται από το χειριστή του συστήματος, και όταν υπερβαίνεται τότε μπαίνει σε λειτουργία η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP. Η συνθήκη αφορά την μεταβολή της ισχύος, η οποία όταν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο(το οποίο ρυθμίζεται συνήθως ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του ΦΒ συστήματος), τότε μπαίνει σε λειτουργία και πάλι η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP.

- **3^ο Στάδιο: Υπορουτίνα εντοπισμού GMPP.** Το στάδιο αυτό είναι ο βασικός κορμός τόσο αυτού, όσο και των υπόλοιπων αλγορίθμων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει τα εξής βήματα:
- Ξεκινά μια σάρωση από το δεξί τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και συγκεκριμένα από το σημείο που αντιστοιχεί στο 85% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (το σημείο που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι το δεξί ακραίο σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης). Στη συνέχεια, μπαίνει σε λειτουργία ο παραδοσιακός αλγόριθμος P&O για τον εντοπισμό του πρώτου τοπικού μεγίστου της καμπύλης, το οποίο θα αποτελέσει βάση για την περαιτέρω αναζήτηση [Σχ. 4. 1, (a)].
 - Αφού αποθηκευτούν οι τιμές που χαρακτηρίζουν το πρώτο μέγιστο που εντοπίστηκε, αυτό χρησιμοποιείται σαν βάση. Γίνεται σάρωση της χαρακτηριστικής προς τα αριστερά (προς μικρότερη τάση) με ένα προτεινόμενο βήμα κοντά στο 60-80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του κάθε πλαισίου ($V_{oc,module}$) και σε κάθε βήμα γίνεται εκτίμηση της κλίσης της χαρακτηριστικής. Αν η κλίση βρεθεί αρνητική, κατά τη μετακίνηση προς τα αριστερά, αυτό σημαίνει ότι στην περιοχή υπάρχει κάποιο τοπικό μέγιστο, οπότε μπαίνει σε λειτουργία ο αλγόριθμος P&O για να γίνει σύγκλιση σε αυτό. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται όσο η υπορουτίνα εντοπίζει τοπικά μέγιστα μεγαλύτερης ενεργειακής στάθμης από το μέγιστο προηγούμενο αποθηκευμένο [Σχ. 4. 1, (b) – (g)].
 - Όταν εντοπιστεί τοπικό μέγιστο μικρότερο από το τελευταίο αποθηκευμένο μέγιστο, τότε επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία σάρωσης, αυτή τη φορά προς τη δεξιά πλευρά του τελευταίου μεγίστου, το οποίο έχει αποθηκευτεί σαν GMPP.

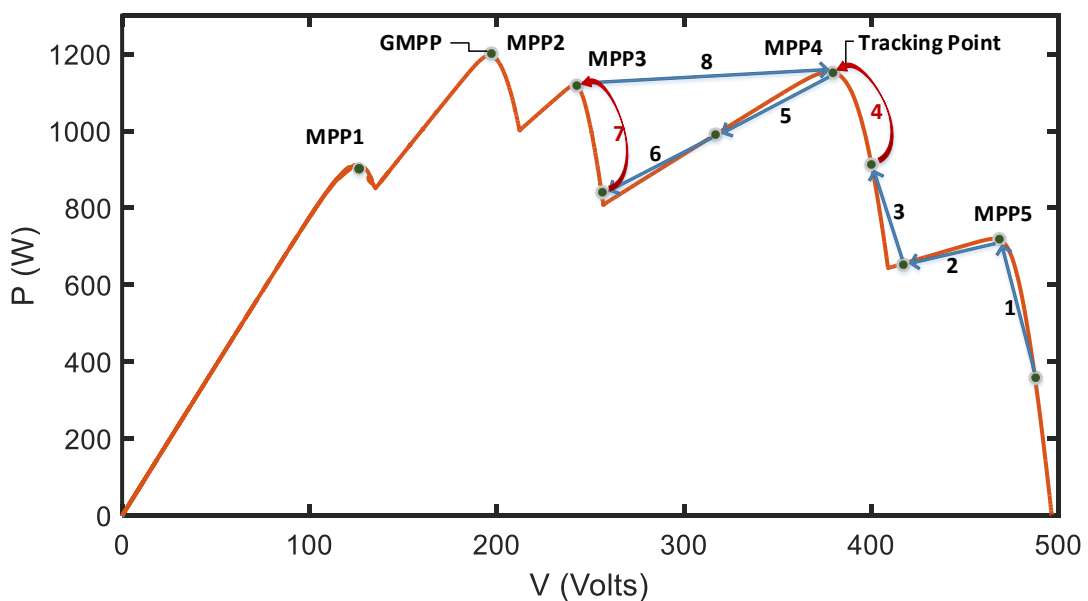


Σχ. 4. 1. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [35] λειτουργεί σωστά.



Σχ. 4. 2. Σχηματικό διάγραμμα του αλγορίθμου στο [35].

Εξετάζοντας κανείς προσεκτικά τη βασική φιλοσοφία λειτουργίας του αλγορίθμου, δηλαδή τα βήματα αναζήτησης του GMPP που περιγράφονται παραπάνω, καταλήγει εύκολα στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος αυτή δεν καλύπτει μεγάλο εύρος περιπτώσεων σκίασης ενός ΦΒ συστήματος. Μια τέτοια περίπτωση αποτυχίας της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχ. 4. 3.

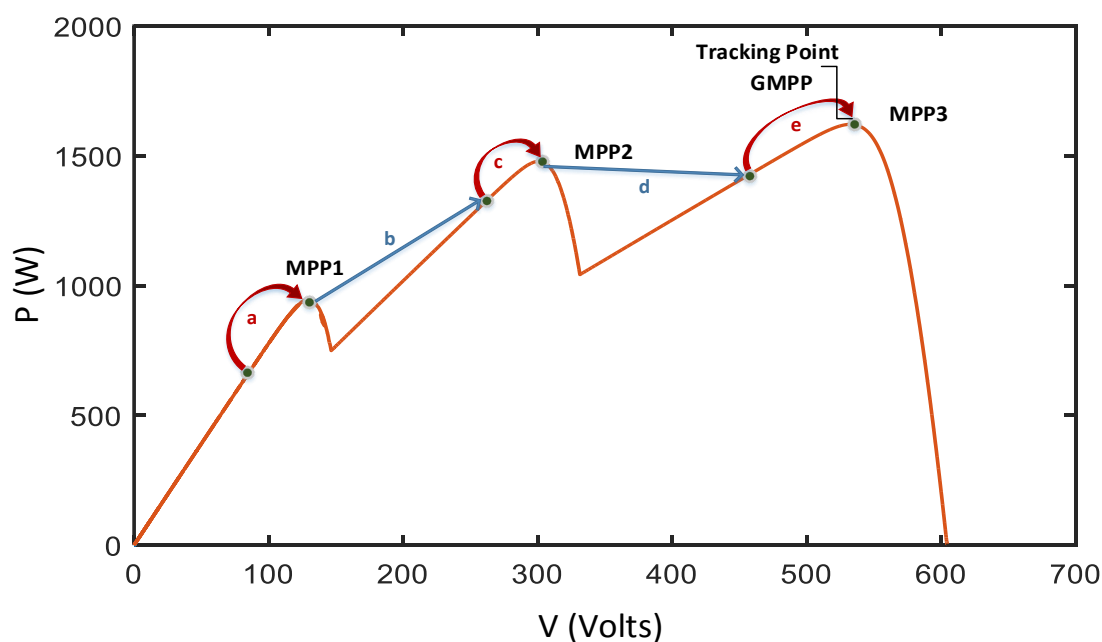


Σχ. 4. 3. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [35] αποτυγχάνει.

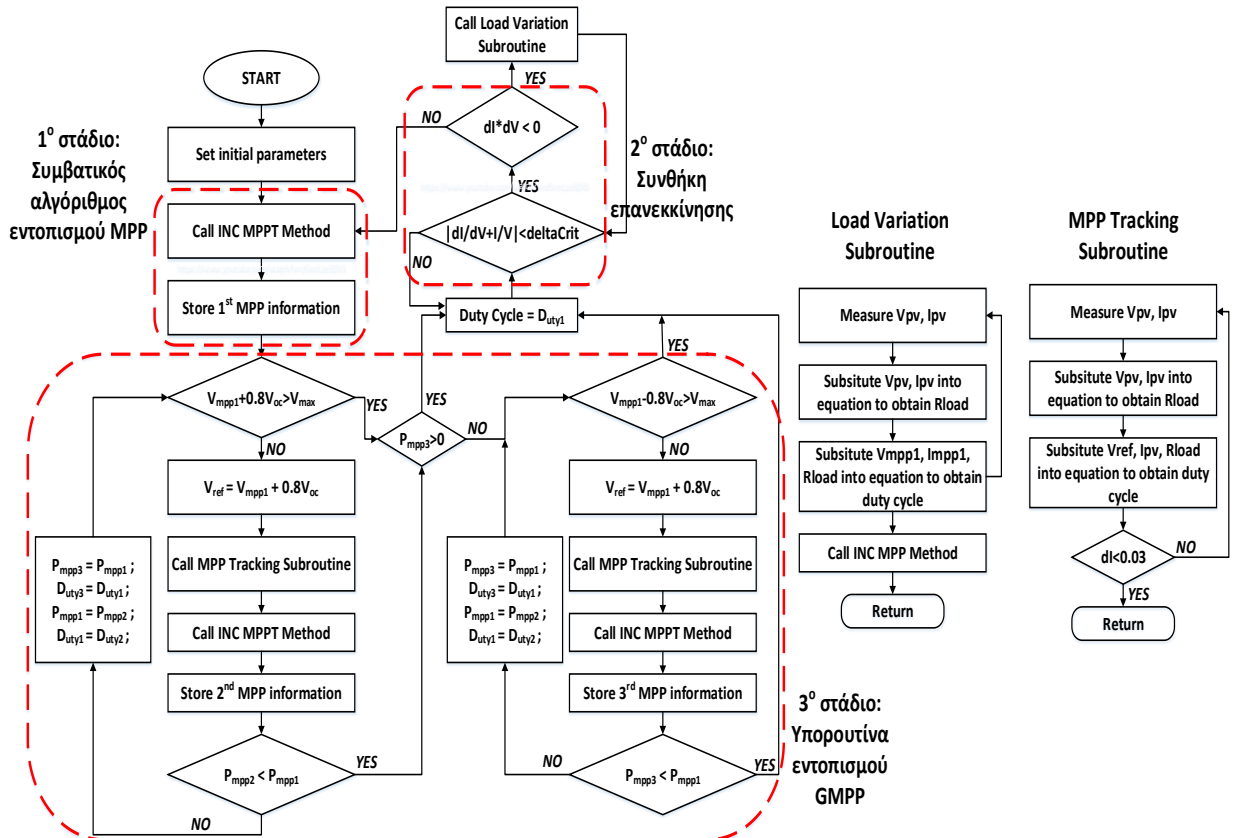
Στο συγκεκριμένο σενάριο σκίασης εμφανίζονται 5 τοπικά μέγιστα (LMPPs) στη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του συστήματος. Μόνο ένα εξ' αυτών, όμως, το σημείο MPP2, είναι το GMPP. Παρ' όλα αυτά, ο αλγόριθμος, ξεκινώντας από το σημείο MPP5 και κάνοντας τα απαραίτητα βήματα συγκλίνει στα σημεία MPP4 και MPP3 (1) – (7), επίσης. Φτάνοντας στο σημείο MPP3, και καθώς αυτό είναι χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης από το αμέσως προηγούμενο του σημείο MPP4, δεν συνεχίζει την αναζήτηση προς το αριστερό μέρος της καμπύλης. Επιστρέφει και συγκλίνει στο σημείο MPP4 (8), το οποίο είναι το υψηλότερο ενεργειακά μέχρι εκείνη τη στιγμή. Έτσι, δεν εντοπίζει ποτέ το σημείο MPP2, που αποτελεί το πραγματικό GMPP του συστήματος.

4.2.2 Ο αλγόριθμος των Tey, Mekhilef

Ο αλγόριθμος στο [36] δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 2014 και στη συνέχεια παρουσιάστηκε μια βελτιωμένη έκδοση του το 2015 [37], με μικρές διαφορές. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανήκει, όπως και η προηγούμενη, σε εκείνες οι οποίες πραγματοποιούν περιορισμένη σάρωση της χαρακτηριστικής P-V. Παρουσιάζει πολλές ομοιότητες στην κεντρική μεθοδολογική δομή της με τον αλγόριθμο των Patel, Agarwal, με κάποιες, όμως, βασικές διαφορές σε κρίσιμα σημεία που καθιστούν ενδιαφέρουσα την επιλογή της, στην παρούσα εργασία. Η διαδικασία αναζήτησης του GMPP βασίζεται κι εδώ στην εμπειρική παρατήρηση της ύπαρξης των διαφόρων LMPPs στις περιοχές που αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια του 0.8Voc, πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη P-V, ενώ επικεντρώνεται αποκλειστικά σε σενάρια σκίασης που παρουσιάζουν μέχρι το πολύ τρία τοπικά μέγιστα στις χαρακτηριστικές του συστήματος. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιορίζει τη χρήση της μεθόδου σε εύρος περιπτώσεων, αλλά, παράλληλα, της δίνει μια εξειδίκευση από τους δημιουργούς της που βοηθά στην καλύτερη διαχείριση της από τον εκάστοτε χειριστή του συστήματος. Πρέπει να τονιστεί, επίσης, ότι ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένα, μοναδικά στοιχεία και στο στάδιο της συνθήκης επανεκκίνησης της υπορουτίνας αναζήτησης του GMPP, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Πέρα από την ομοιότητα που παρουσιάζει σαν γενική φιλοσοφία με τον αλγόριθμο στο [35], η μέθοδος αυτή δε μοιάζει ιδιαίτερα με καμία από τις [23]–[31] και γι' αυτό επιλέχθηκε. Τα τρία δομικά στάδια της μεθόδου, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια, φαίνονται στο Σχ. 4. 4, ενώ το σχηματικό της διάγραμμα στο Σχ. 4. 5.



Σχ. 4. 4. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [36] λειτουργεί σωστά.



Σχ. 4. 5. Σχηματικό διάγραμμα του αλγορίθμου στο [36].

- **1^ο Στάδιο: Συμβατικός αλγόριθμος σύγκλισης.** Στο στάδιο αυτό, το οποίο χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές για την απαιτούμενη σύγκλιση στο εκάστοτε LMPP που εντοπίζεται, αλλά και στο GMPP τελικά, γίνεται χρήση του κλασσικού αλγορίθμου Incremental Conductance.
- **2^ο Στάδιο: Συνθήκη επανεκκίνησης υπορουτίνας εντοπισμού GMPP.** Κατά το στάδιο αυτό, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια συνθήκη, η οποία ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της κλίσης της καμπύλης λειτουργίας στο σημείο που έχει συγκλίνει ο αλγόριθμος. Όταν η μεταβολή της κλίσης ξεπερνά ένα όριο, το οποίο ρυθμίζεται ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος, τότε έχει συμβεί κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη λειτουργία του συστήματος:

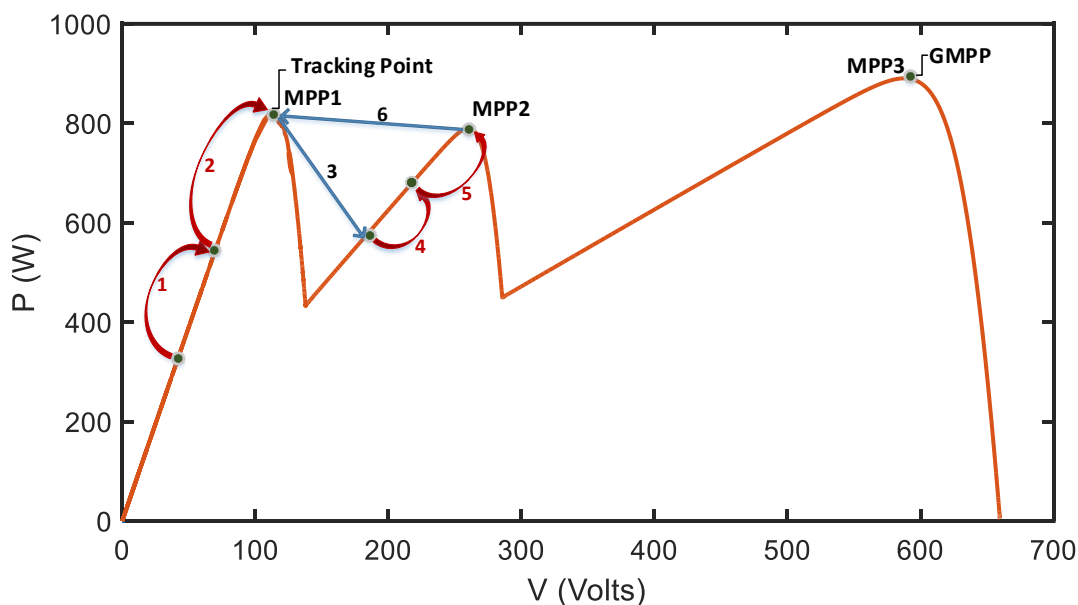
$$\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| < \delta_{crit} \quad [3.2]$$

Η ιδιαιτερότητα, εδώ, είναι ότι όταν η συνθήκη επαληθεύεται, ο αλγόριθμος δε μεταβαίνει αμέσως σε εκ νέου αναζήτηση του GMPP, αλλά η διαδικασία που θα ακολουθήσει αξιολογείται από το αν η μεταβολές ρεύματος και τάσης είναι προς την ίδια κατεύθυνση ή όχι. Αν οι μεταβολές είναι ομόσημες τότε έχουμε, όντως, επανεκκίνηση της υπορουτίνας αναζήτησης του GMPP, ενώ αν είναι ετερόσημες η συγκεκριμένη μέθοδος αναγνωρίζει μια απλή αλλαγή φορτίου σαν την αιτία διατάραξης της ομαλής λειτουργίας.

- **3^ο Στάδιο: Υπορουτίνα εντοπισμού GMPP.** Όπως προαναφέρθηκε, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος υποστηρίζει μέχρι το πολύ τρία τοπικά μέγιστα στην καμπύλη P-V, κατά την

αναζήτησή του. Η σάρωση που πραγματοποιεί, στο στάδιο αυτό, βασίζεται σε βήμα σάρωσης το οποίο αποτελεί ένα πολλαπλάσιο του 80% της V_{oc} , η οποία αντιστοιχεί σε κάθε ομάδα πλαισίων που δέχονται όμοια ακτινοβολία. Έτσι, το βήμα, εδώ, είναι αρκετά μεγαλύτερο από τον προηγούμενο αλγόριθμο. Η σάρωση ξεκινά από τα αριστερά προς τα δεξιά (από μικρή προς μεγαλύτερη τάση) και αν βρεθεί τοπικό μέγιστο με μικρότερη ενέργεια από το αμέσως προηγούμενο του, τότε η σάρωση αλλάζει κατεύθυνση και κατευθύνεται προς τα αριστερά [Σχ. 4. 4, (a) – (e)].

Προφανώς, λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου της σκίασης, ακόμα και με την εφαρμογή του αλγορίθμου αποκλειστικά σε σενάρια με το πολύ τρία τοπικά μέγιστα, και αυτή η μέθοδος έχει πιθανότητες αποτυχίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτυχίας της μεθόδου παρουσιάζεται, σχηματικά, παρακάτω, στο Σχ. 4. 6.



Σχ. 4. 6. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [36] αποτυγχάνει.

Στο παραπάνω παράδειγμα, το GMPP είναι το σημείο MPP3, ενώ το πρώτο τοπικό μέγιστο που εντοπίζεται είναι το MPP1 (1) – (2). Μετά τον εντοπισμό του MPP1, η σάρωση συνεχίζεται στα δεξιά του (3) και ο αλγόριθμος συγκλίνει στο σημείο MPP2 (4) – (5). Επειδή, όμως, το σημείο MPP2 είναι χαμηλότερο ενεργειακά από το MPP1, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο σημείο MPP1 (6) και συνεχίζει τη σάρωση προς τα αριστερά αυτού. Έτσι, δεν εντοπίζεται ποτέ το πραγματικό ολικό μέγιστο του συστήματος, που είναι το σημείο MPP3.

4.2.3 Ο αλγόριθμος των Kouchaki, Iman-Eini, Asaei

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα της απλότητας. Για την αναζήτηση του GMPP χρησιμοποιείται μια απλή σάρωση της χαρακτηριστικής P-V αριθμό βημάτων που εξαρτάται από τον αριθμό των πλαισίων της ΦΒ συστοιχίας και βασίζεται στην παρατήρηση ύπαρξης των LMPPs στις περιοχές των υποπολλαπλασίων του 80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Εδώ, επίσης, γίνεται και η παρατήρηση ότι σπανίως εμφανίζεται τοπικό μέγιστο σε τάση αναφοράς μεγαλύτερη από το 80-85% της συνολικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης του συστήματος σε ομοιόμορφες συνθήκες με ακτινοβολία

1000 W/m². Έτσι, η σάρωση περιορίζεται σε ένα βαθμό, σε τάσης μικρότερες από την προαναφερόμενη. Παράλληλα, παρ' ότι η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει ομοιότητες με άλλες απλές μεθόδους σάρωσης, όπως αυτές στα [38], [39], [41], [43]–[46], επιλέχθηκε λόγω και μιας ιδιαιτερότητας που παρουσιάζει στο στάδιο της συνθήκης επανεκκίνησης της υπορουτίνας εντοπισμού του GMPP. Ουσιαστικά είναι η μοναδική μέθοδος που φέρνει στο προσκήνιο, κατά μια έννοια, της απαίτησης επιπλέον ελέγχου σε αρχικό στάδιο για το αν το σύστημα μας μεταβαίνει σε ομοιόμορφες ή ανομοιόμορφες συνθήκες όταν επηρεάζεται από το φαινόμενο της σκίασης. Με την προϋπόθεση, φυσικά, ότι στην αρχική του κατάσταση είναι εντελώς ασκίαστο και με ομοιόμορφη ακτινοβολία 1000 W/m². Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί καλύτερα, στη συνέχεια.

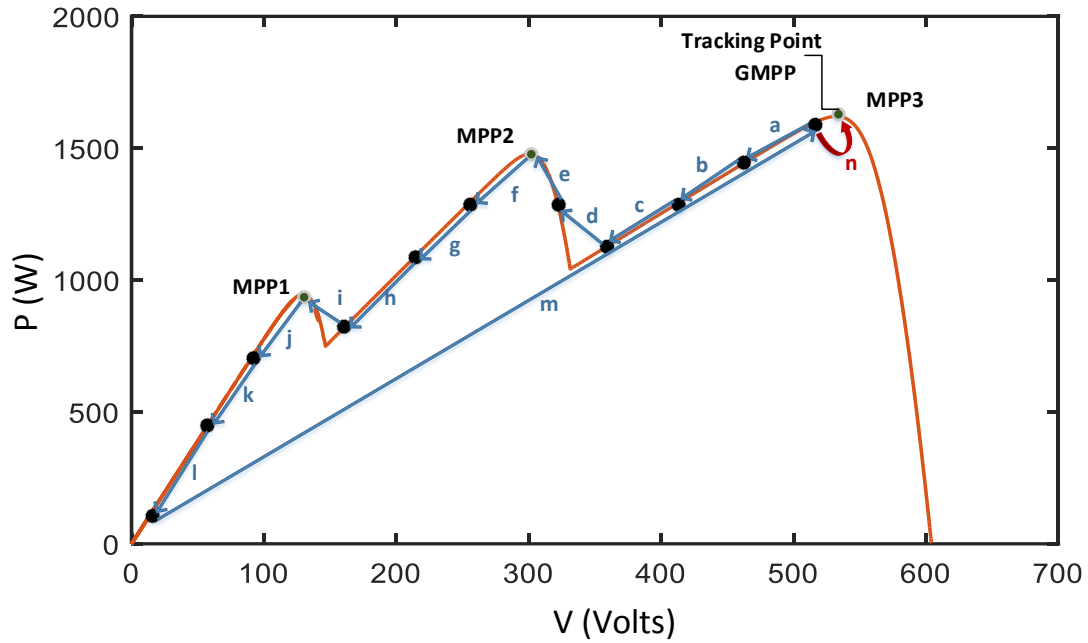
Τα τρία δομικά στάδια του αλγορίθμου, όπου αναλύονται στη συνέχεια, φαίνονται στο Σχ. 4. 7, ενώ το σχηματικό του διάγραμμα στο Σχ. 4. 8.

- **1^ο Στάδιο: Συμβατικός αλγόριθμος σύγκλισης.** Στο στάδιο αυτό, στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται ο συμβατικός αλγόριθμος Hill Climbing (H.C.), ο οποίος μοιάζει πολύ με τους αλγόριθμους P&O και INC, και είναι αρκετά αποτελεσματικός.
- **2^ο Στάδιο: Συνθήκη επανεκκίνησης υπορουτίνας εντοπισμού GMPP.** Όπως και στον αλγόριθμο στο [Patel], έτσι κι εδώ χρησιμοποιείται μια απλή συνθήκη μεταβολής της ισχύος σαν κριτήριο επανεκκίνησης της υπορουτίνας αναζήτησης του GMPP. Η ιδιαιτερότητα, όμως, εδώ είναι ότι εφ' όσον αναγνωριστεί κάποια μεταβολή στην ομαλή λειτουργία του συστήματος που αρχικά λειτουργεί με ομοιόμορφη ακτινοβολία 1000 W/m², γίνεται εκ νέου έλεγχος για το αν το σύστημα μεταβαίνει σε ομοιόμορφες ή όχι συνθήκες λειτουργίας. Αυτό γίνεται ελέγχοντας τις τιμές του ρεύματος στη χαρακτηριστική I-V, τόσο στο σημείο που αντιστοιχεί σε τάση 0.8V_{oc}, όσο και στο σημείο που αντιστοιχεί σε τάση 0.8V_{oc}+ΔV. Ελέγχοντας τη διαφορά των δύο αυτών τιμών, δηλαδή ουσιαστικά την καμπυλότητα στη συγκεκριμένη περιοχή, έχει αποδειχθεί μετά από δοκιμές των συγγραφέων ότι μπορεί κανείς να προσδιορίσει με αρκετή ακρίβεια αν το σύστημα λειτουργεί σε ομοιόμορφες ή όχι συνθήκες. Η διαφορά των δύο τιμών αξιολογείται σύμφωνα με την κρίσιμη τιμή που προκύπτει από τη σχέση:

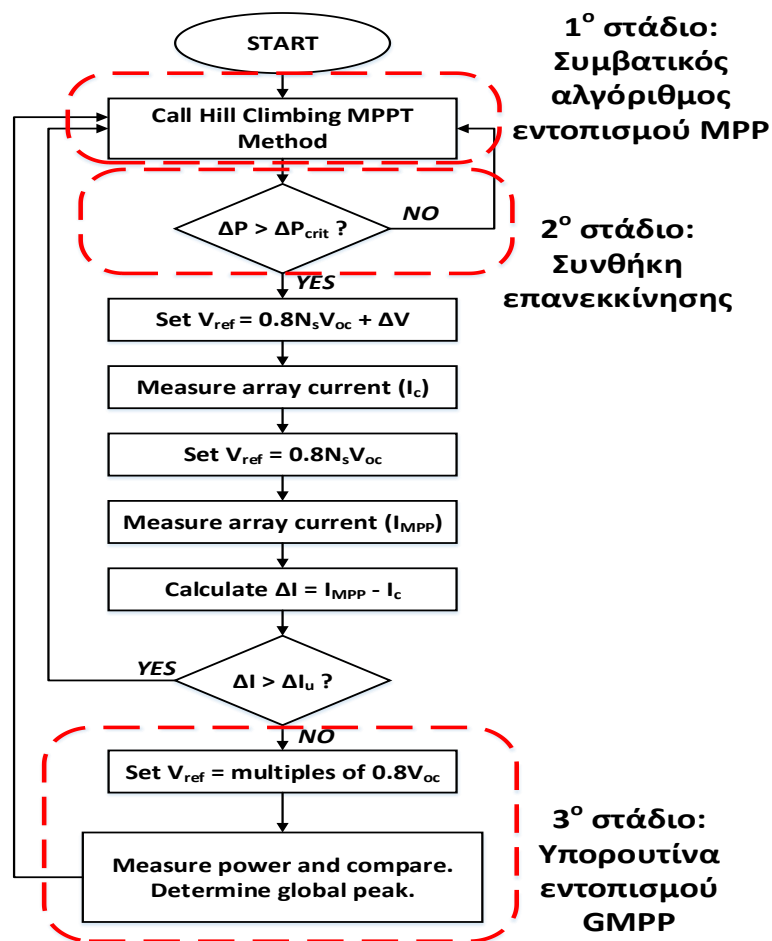
$$\Delta I_u = I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{MPP}}{a \cdot N_s \cdot V_t}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{\Delta V}{a \cdot N_s \cdot V}\right) - 1\right] \quad [3. 3]$$

όπου I_0 είναι το ρεύμα κορεσμού για τον εκάστοτε τύπο πλαισίων της εγκατάστασης, V_{MPP} είναι η τάση MPP για το κάθε πλαίσιο, a είναι ο ιδεατός συντελεστής διόδου, N_s είναι ο αριθμός των εν σειρά πλαισίων και V_t είναι η θερμοκή τάση διόδου. Σκοπός αυτού του επιπλέον ελέγχου είναι η αποφυγή της άσκοπης απώλειας ενέργειας που προκύπτει από μια επανεκκίνηση της υπορουτίνας αναζήτησης του GMPP, στην περίπτωση που μεταβαίνουμε σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας και όχι ανομοιόμορφες με πολλά τοπικά μέγιστα.

- **3^ο Στάδιο: Υπορουτίνα εντοπισμού GMPP.** Στο στάδιο αυτό, ο αλγόριθμος στο [40] δεν κάνει χρήση κάποια εξεζητημένης λειτουργίας. Πραγματοποιεί μια απλή σάρωση της χαρακτηριστικής P-V, με βήμα ανάλογο των υποπολλαπλασίων του 80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Αποθηκεύει τις τιμές της ισχύος στις περιοχές που μεταβαίνει και, στη συνέχεια, τις συγκρίνει επιστρέφοντας στο υψηλότερο ενεργειακό σημείο από αυτά που σάρωσε [Σχ. 4. 7, (a) – (n)].

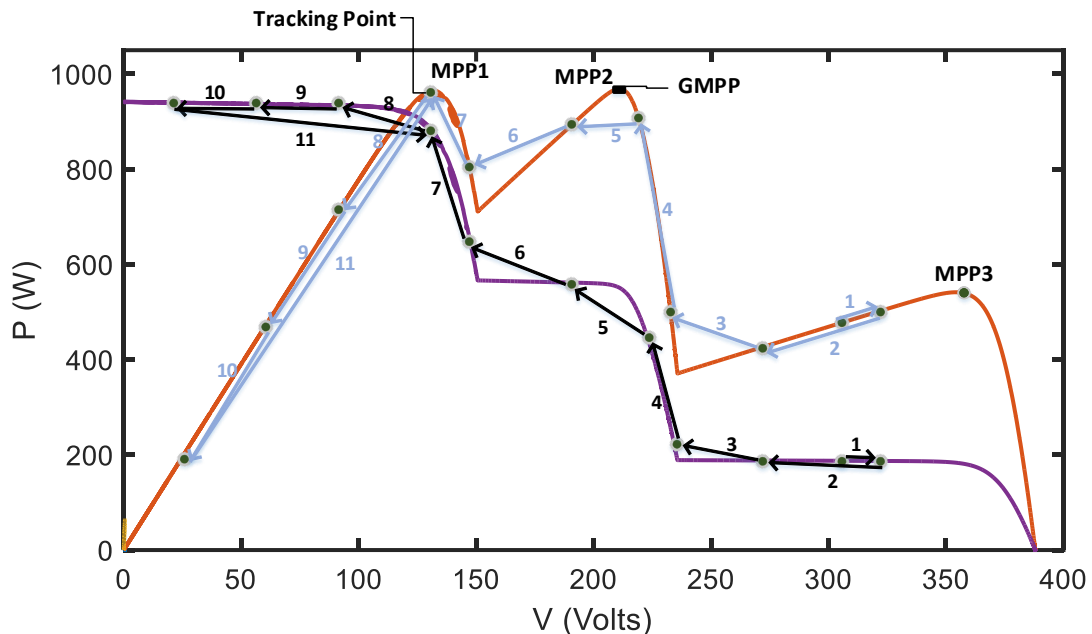


Σχ. 4. 7. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [40] λειτουργεί σωστά.



Σχ. 4. 8. Σχηματικό διάγραμμα του αλγορίθμου στο [40].

Όπως και πριν, όπως γίνεται κατανοητό, η μέθοδος αυτή είναι αρκετά πιθανό να αποτύχει σε ορισμένες περιπτώσεις σκίασης. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχ. 4. 9. Στο παράδειγμα αυτό, το ολικό μέγιστο της καμπύλης είναι το σημείο MPP2. Παρ' όλα αυτά, το επιλεγμένο βήμα σάρωσης είναι τέτοιο ώστε προσπερνά το την κορυφή του σημείου MPP2 και δειγματοληπτεί ενεργειακές τιμές εκατέρωθεν αυτού (4) – (5). Συνεχίζοντας, δειγματοληπτεί, επίσης, και την τιμή του σημείου MPP1 (7), το οποίο έχει πολύ κοντινή ισχύ με το σημείο MPP2. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο αλγόριθμος να αναγνωρίσει σαν βέλτιστο σημείο λειτουργίας το σημείο MPP1 και όχι το MPP2 (11). Έτσι, χάνεται το πραγματικό GMPP.



Σχ. 4. 9. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [40] αποτυγχάνει.

4.2.4 Ο αλγόριθμος των Boztepe, Guinjoan, Quesada, Silvestre, Chouder, Karatepe

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο [42] ανήκει κι αυτός στην υποκατηγορία των ντετερμινιστικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τεχνάσματα για περιορισμένη σάρωση της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V με σκοπό τον εντοπισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε καθώς παρουσιάζει κάποιες καινοτομίες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, με τη βοήθεια των οποίων μειώνει αισθητά το παράθυρο σάρωσης της καμπύλης και, άρα, το χρόνο σύγκλισης στο GMPP, θεωρητικά. Η καινοτομία που παρουσιάζει, αναλύεται στα επόμενα.

Το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου, όπου φαίνονται καθαρά τα κλασσικά τρία στάδια λειτουργίας της, παρουσιάζεται στο Σχ. 4. 12, ενώ ένα επιτυχημένο σενάριο λειτουργίας της μεθόδου στο Σχ. 4. 11.

- **1^ο Στάδιο: Συμβατικός αλγόριθμος σύγκλισης.** Στο στάδιο αυτό, ο αλγόριθμος κάνει χρήση της συμβατικής μεθόδου P&O, για τη σύγκλιση στο εκάστοτε τοπικό μέγιστο που εντοπίζει.
- **2^ο Στάδιο: Συνθήκη επανεκκίνησης υποροουτίνας εντοπισμού GMPP.** Η επιλογή που γίνεται, εδώ, είναι η χρήση μιας συνθήκης που αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης P-V. Όταν η κλίση ξεπεράσει μια οριοθετημένη τιμή, τότε σημαίνει ότι έχουμε αλλαγή κατάστασης για το

σύστημά μας, οπότε μπαίνει σε λειτουργία η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP. Η συνθήκη αυτή είναι η εξής:

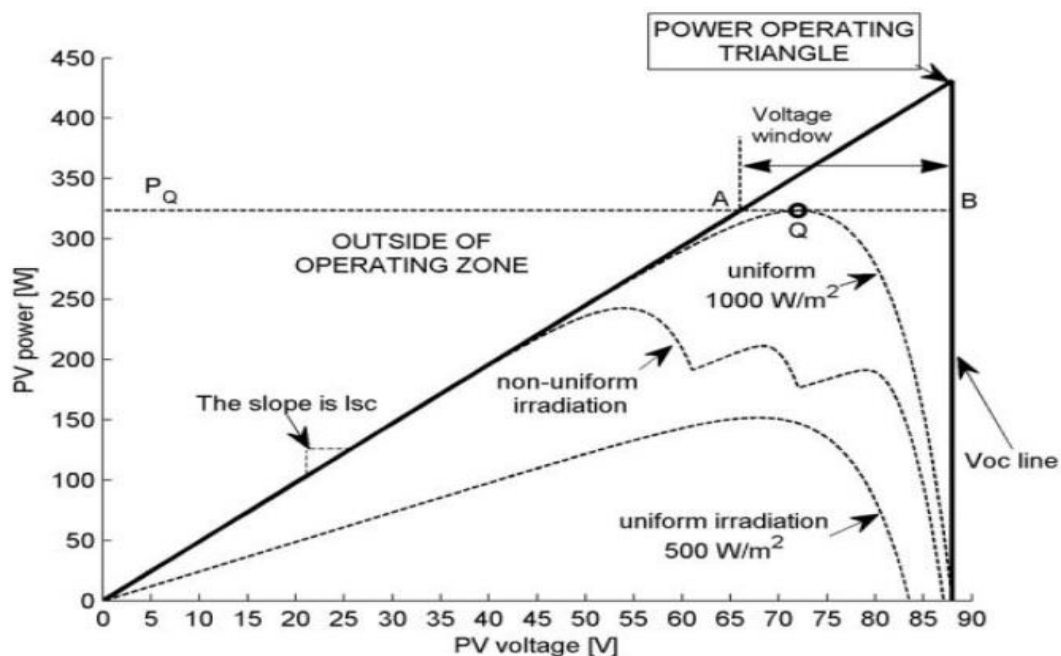
$$\left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right| > threshold \quad [3.4]$$

Επιπρόσθετα, στο στάδιο αυτό χρησιμοποιείται και ένα-ρυθμιζόμενο ανάλογα τις ανάγκες του συστήματος-χρονικό όριο, με τη βοήθεια του οποίου εκκινεί η υπορουτίνα εντοπισμού του GMPP, περιοδικά.

- **3^ο Στάδιο: Υπορουτίνα εντοπισμού GMPP.** Στο 3^ο και βασικότερο στάδιο, η μέθοδος στο [42] χρησιμοποιεί μια μεθοδολογία για τον περιορισμό της περιοχής σάρωσης της χαρακτηριστικής, την οποία δεν συναντάμε σε άλλες μεθόδους της βιβλιογραφίας. Η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται σε τρία βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος είναι, φυσικά, το βήμα μετακίνησης του σημείου λειτουργίας (ΔV_{STEP}), το οποίο επιλέγεται μετά από δοκιμές των συγγραφέων ανάμεσα σε $0.5-1V_{oc_module}$. Το δεύτερο μέρος είναι το λεγόμενο τρίγωνο ισχύος (Power Operating Triangle-POT) και το τρίτο μέρος είναι το παράθυρο της τάσης (Voltage Window-VW), τα οποία αλληλοσυνδέονται στην παραμετροποίησή τους. Το POT, γενικά, ορίζεται στην καμπύλη P-V από τον άξονα x και δύο ευθείες γραμμές, οι οποίες ονομάζονται: ευθεία τάσης και ευθεία ρεύματος. Για παράδειγμα, στο Σχ. 4. 10, η ευθεία φορτίου και η ευθεία ρεύματος σε STC συνθήκες τοποθετούνται πάνω στην καμπύλη με τη βοήθεια της V_{oc} και του I_{sc} , αντίστοιχα, και μπορούν να εκφραστούν σαν:

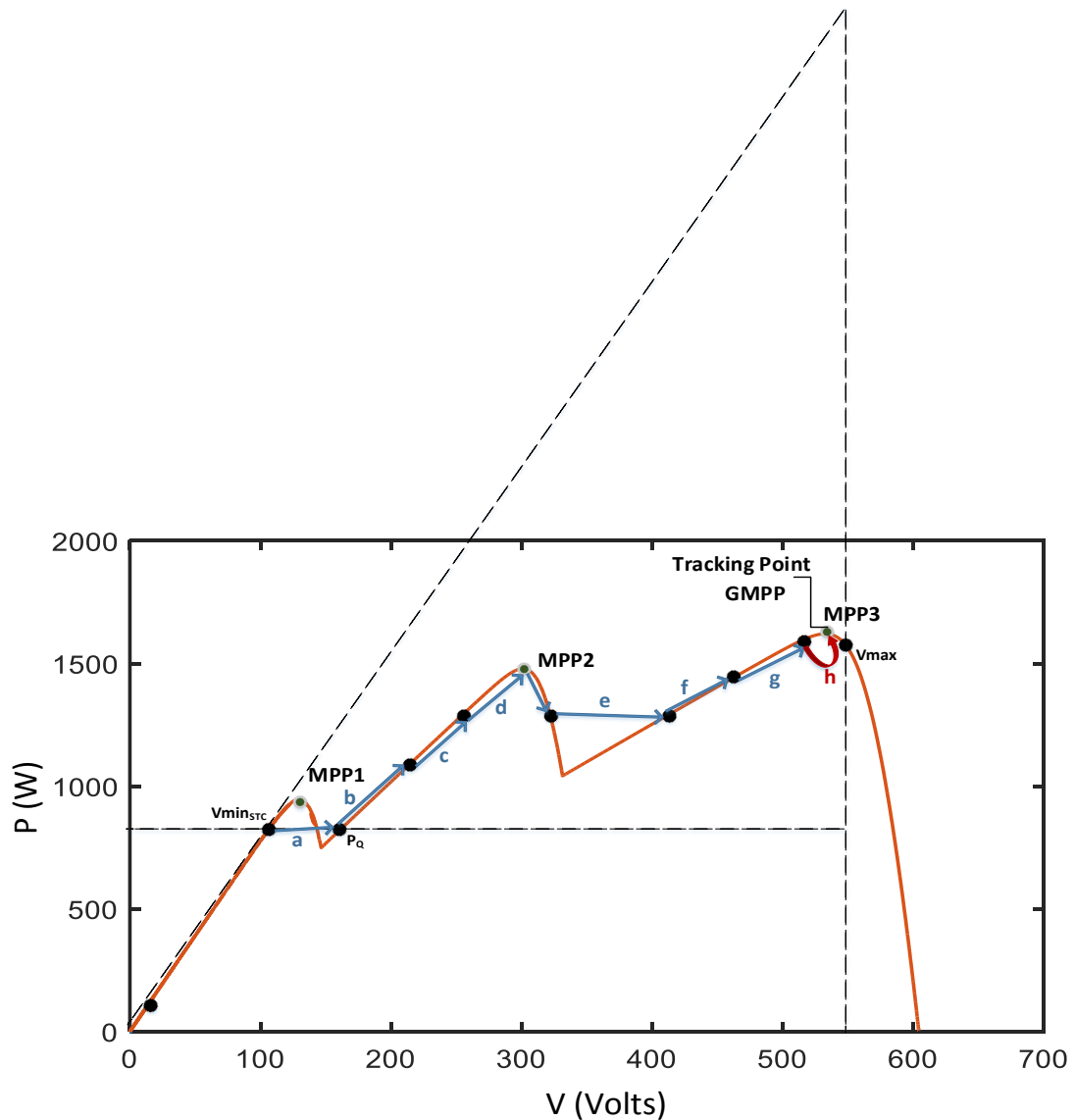
$$p = I_{sc} \cdot v \quad [3.5]$$

$$v = V_{oc}$$

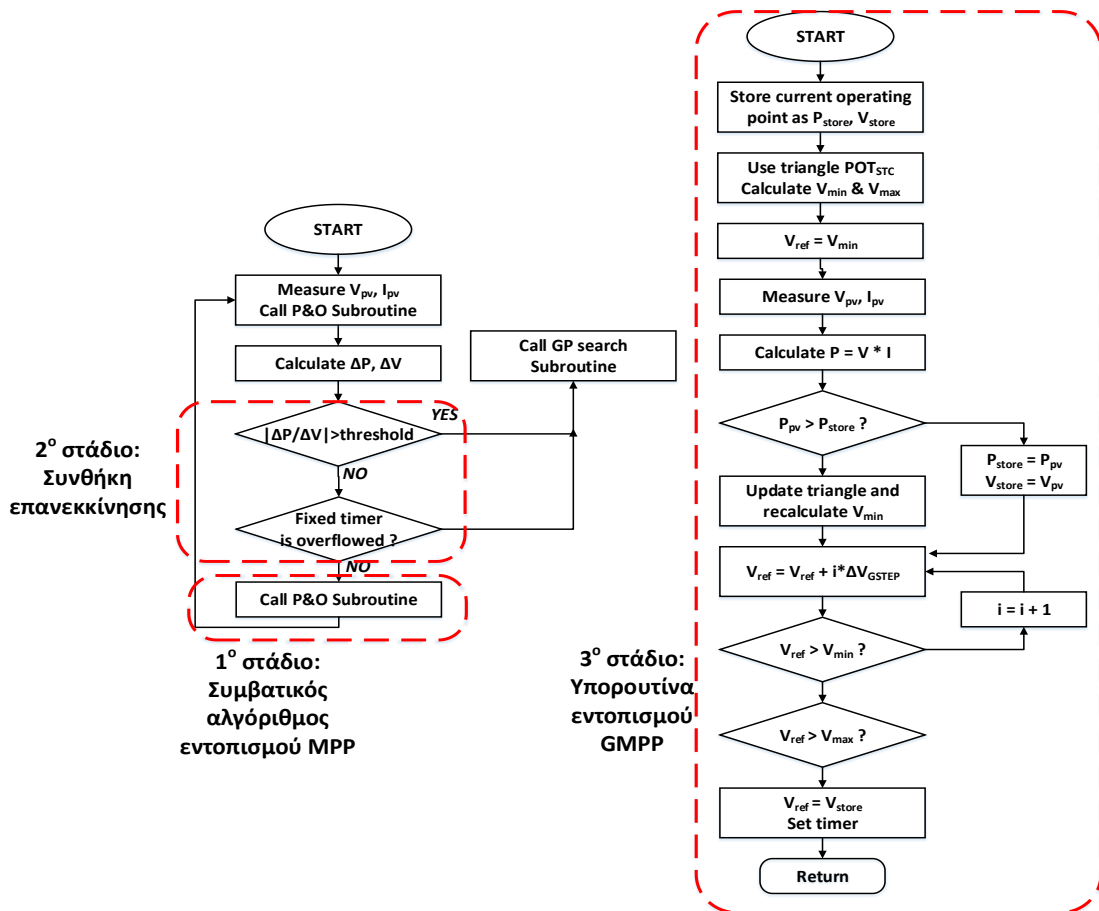


Σχ. 4. 10. Σχηματική επεξήγηση του τριγώνου ισχύος σε STC συνθήκες, για ένα ΦΒ σύστημα [42].

Το VW ορίζεται σαν το διάστημα $[V_{\min}, V_{\max}]$. Σαν V_{\max} τοποθετείται, συνήθως, σαν όριο το 90% της συνολικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε συνθήκες πρότυπης λειτουργίας. Το στάδιο, λοιπόν, αυτό ξεκινά δημιουργώντας το POI_{STC} και μεταφέροντας το σημείο λειτουργίας εκεί. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας σαν ελάχιστο όριο αυτή την τάση το σημείο λειτουργίας μετακινείται με μεταβαλλόμενο βήμα μέσα στο οριοθετημένο παράθυρο αναζήτησης δειγματοληπτώντας τιμές ισχύος [Σχ. 4. 11, (a) – (h)]. Με αυτό τον τρόπο, εντοπίζεται εν τέλει το GMPP.

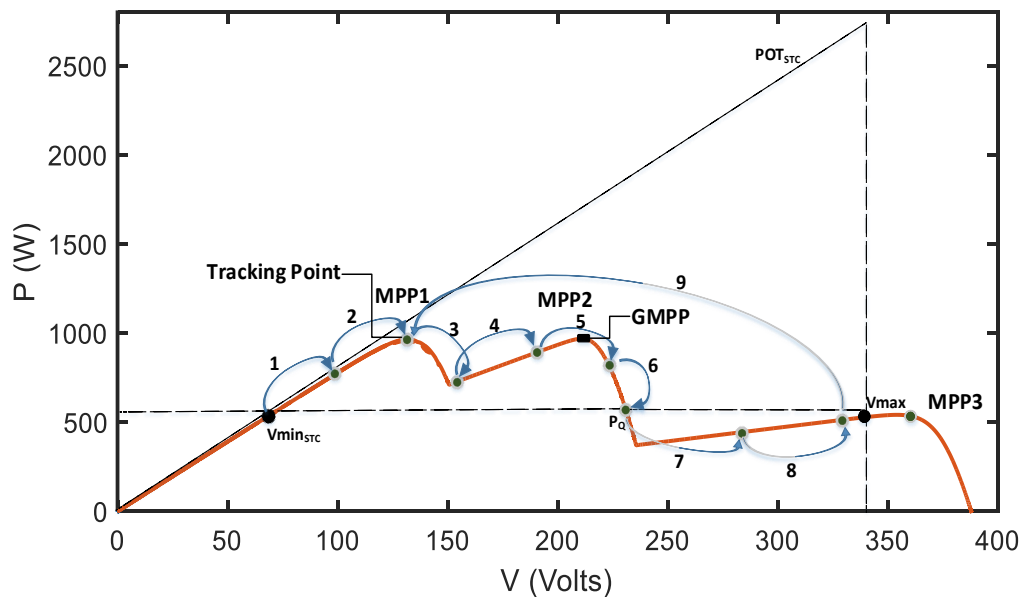


Σχ. 4. 11. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [42] λειτουργεί σωστά.



Σχ. 4. 12. Σχηματικό διάγραμμα του αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο [42].

Παρ' όλο που η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά ακριβής για σενάρια σκίασης που δεν παρουσιάζουν πολύ αυξημένη πολυπλοκότητα, υπάρχουν περιπτώσεις που αποτυγχάνει. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται, παρακάτω, στο **Error! Reference source not found.**



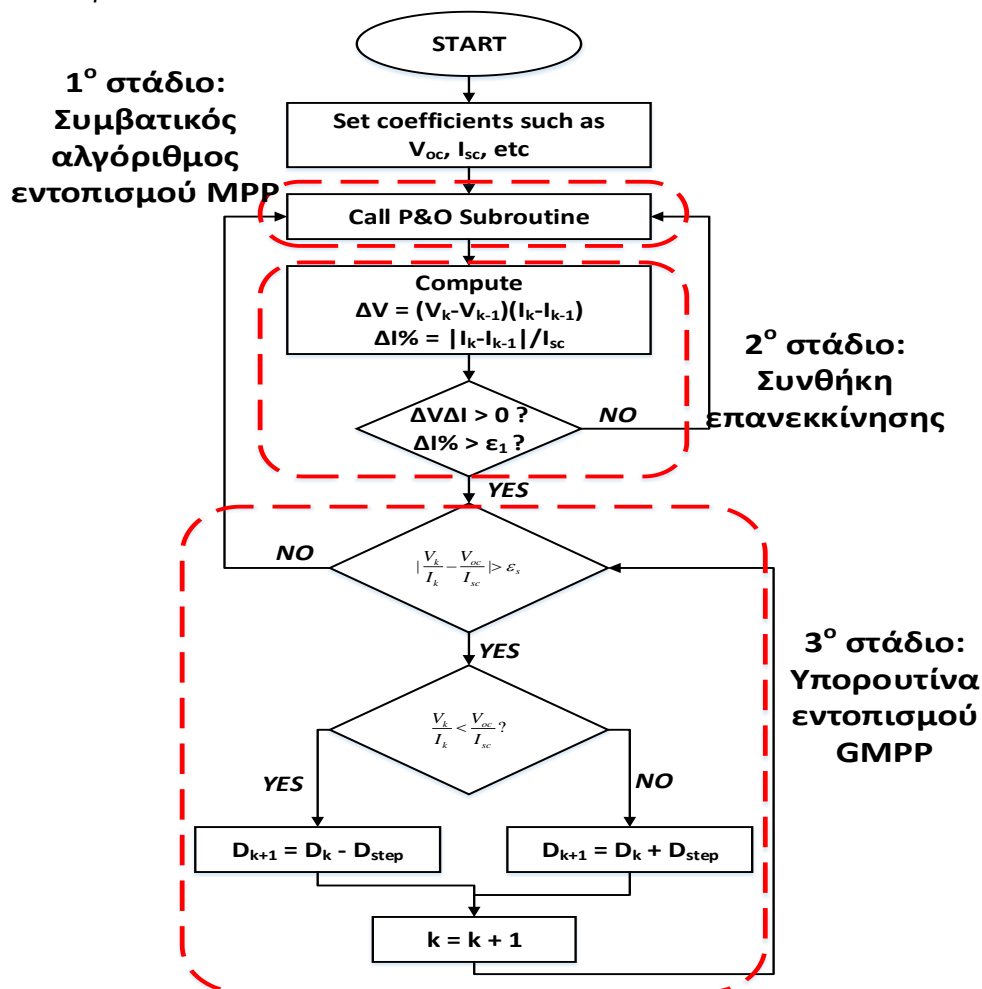
Σχ. 4. 13 Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [42] αποτυγχάνει.

Στο παράδειγμα αυτό, το ολικό μέγιστο της καμπύλης είναι το σημείο ΜΡΡ2. Παρ' όλα αυτά, το επιλεγμένο βήμα σάρωσης είναι τέτοιο ώστε προσπερνά το την κορυφή του σημείου ΜΡΡ2 και δειγματοληπτεί ενεργειακές τιμές εκατέρωθεν αυτού (4) – (5). Συνεχίζοντας, δειγματοληπτεί, επίσης, και την τιμή του σημείου ΜΡΡ1 (2), το οποίο έχει πολύ κοντινή ισχύ με το σημείο ΜΡΡ2. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο αλγόριθμος να αναγνωρίσει σαν βέλτιστο σημείο λειτουργίας το σημείο ΜΡΡ1 και όχι το ΜΡΡ2 (9). Έτσι, χάνεται το πραγματικό GMPP.

4.2.5 Ο αλγόριθμος των Qi, Zhang, Chen

Ο αλγόριθμος αυτός, ο οποίος παρουσιάζεται στο [31] ανήκει στην υποκατηγορία των ντετερμινιστικών αλγορίθμων, όπου χρησιμοποιούν σχέσεις οι οποίες στηρίζονται σε εμπειρικές παρατηρήσεις των καμπυλών του συστήματος, για τον εντοπισμό του GMPP. Οι υπόλοιπες μέθοδοι της υποκατηγορίας αυτής, οι οποίες παρουσιάζονται στα [30], [32]–[34] είναι παρόμοιας φιλοσοφίας με τη συγκεκριμένη που επιλέχθηκε. Ο αλγόριθμος, όμως, των Qi, Zhang και Chen, είναι αρκετά σύγχρονος, απλά υλοποιήσιμος και αρκετά αποτελεσματικός για την πλειοψηφία των-απλής έως μέτριας πολυπλοκότητας-σεναρίων σκίασης. Συνοπτικά, αποτελεί έναν άκρως αντιπροσωπευτικό και ενδιαφέροντα αλγόριθμο της συγκεκριμένης υποκατηγορίας, προς σύγκριση με τους υπόλοιπους.

Το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο Σχ. 4. 14, ενώ τα τρία στάδια λειτουργίας της αναλύονται παρακάτω.



Σχ. 4. 14. Σχηματικό διάγραμμα του αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο [31].

- **1^ο Στάδιο: Συμβατικός αλγόριθμος σύγκλισης.** Εδώ, χρησιμοποιείται ο συμβατικός αλγόριθμος P&O, που αποτελεί μια απλή και αξιόπιστη λύση όπως έχουμε δει.
- **2^ο Στάδιο: Συνθήκη επανεκκίνησης υπορουτίνας εντοπισμού GMPP.** Στο στάδιο αυτό, προκειμένου ο αλγόριθμος να αντιληφθεί μια πιθανή αλλαγή κατάστασης λειτουργίας, που μπορεί να σημαίνει την εμφάνιση μερικής ή ολικής σκίασης στο ΦΒ σύστημα, επιλέγονται οι εξής σχέσεις, οι οποίες πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα:

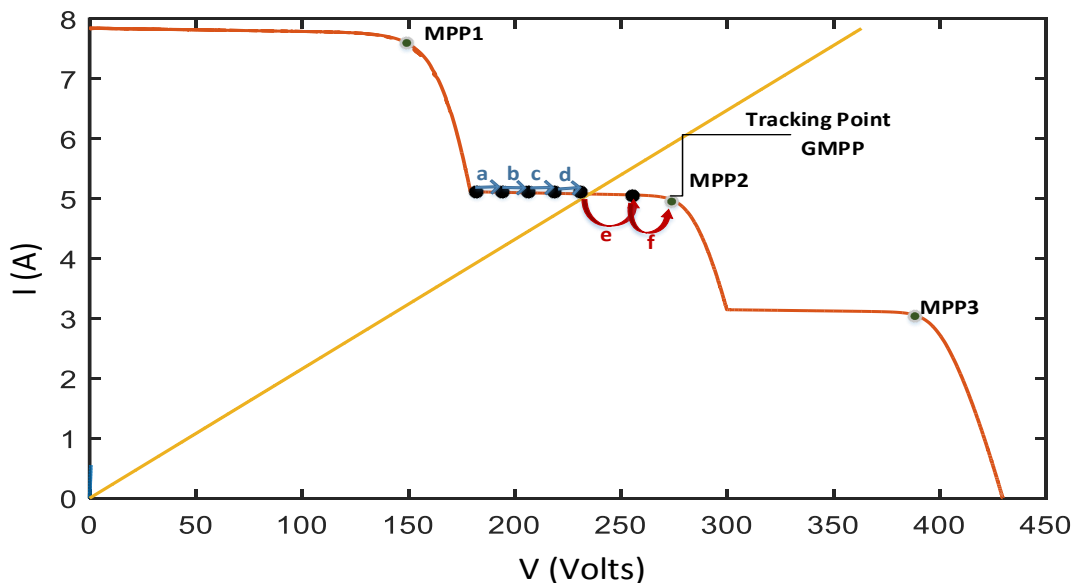
$$\begin{aligned} \Delta V \cdot \Delta I &\geq 0 \\ \Delta I \% &> \varepsilon_1 \end{aligned} \quad [3.6]$$

Με άλλα λόγια, γίνεται ταυτόχρονη εκτίμηση τόσο της κατεύθυνσης μεταβολής της τάσης και του ρεύματος, όσο και του μεγέθους μεταβολής του ρεύματος μεμονωμένα, η οποία πρέπει να ξεπερνά ένα όριο για να αναγνωριστεί η μεταβολή.

- **3^ο Στάδιο: Υπορουτίνα εντοπισμού GMPP.** Η φιλοσοφία λειτουργίας του συγκεκριμένου σταδίου είναι αρκετά απλή και πρακτική. Οι δημιουργοί του αλγορίθμου, μετά από δοκιμές και παρατηρήσεις, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η περιοχή της καμπύλης I-V, όπου κείται το GMPP σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος σεναρίων σκίασης, τέμνεται από την γραμμή φορτίου του συστήματος για ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στα 1000 W/m². Η γραμμική σχέση που περιγράφει τη γραμμή αυτή είναι η εξής:

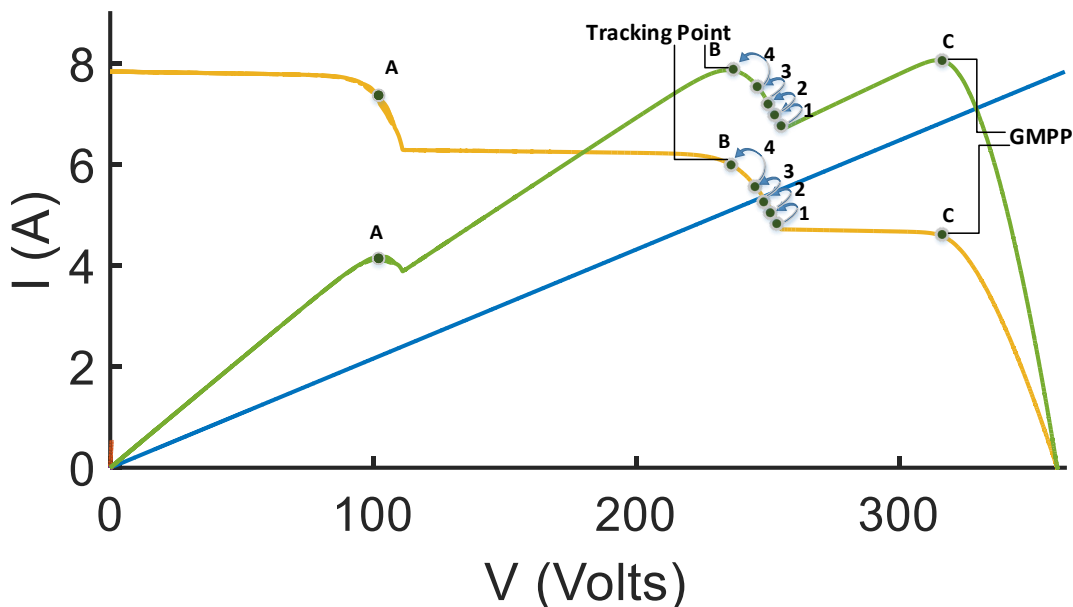
$$R = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad [3.7]$$

Έτσι, όταν ο αλγόριθμος εντοπίσει ενδεχόμενη σκίαση, με τη βοήθεια του μηχανισμού που περιγράφηκε παραπάνω, ξεκινά να προσεγγίζει τη γραμμή φορτίου αυτή με ένα προκαθορισμένο βήμα. Όταν φτάσει αρκετά κοντά στη γραμμή αυτή, μπαίνει σε λειτουργία το 1^ο στάδιο λειτουργίας για να υπάρξει σύγκλιση στο υποτιθέμενο GMPP [Σχ. 4. 15, (a) – (f)].



Σχ. 4. 15. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [31] λειτουργεί σωστά.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά πρακτική εξαιρετικά αποτελεσματική για απλά σενάρια σκίασης, ενώ βρίσκει εφαρμογή, κατά κύριο λόγο, σε περιπτώσεις όπου έχουμε μέχρι το πολύ τρία τοπικά μέγιστα στις καμπύλες λειτουργίας. Ακόμα και με τρία, όμως, LMPPs οι πιθανότητες αποτυχίας είναι αρκετές. Μια τέτοια περίπτωση δίνεται ως παράδειγμα, παρακάτω, στο Σχ. 4. 16. Εδώ, βέλτιστο σημείο λειτουργίας αποτελεί το σημείο MPP3 της καμπύλης. Η γραμμή φορτίου, παρ' όλα αυτά, τέμνει την καμπύλη I-V στην περιοχή του σημείου MPP2. Έτσι, χάνεται το GMPP και ο αλγόριθμος συγκλίνει σε λάθος σημείο (1) – (4).



Σχ. 4. 16. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [31] αποτυγχάνει.

4.2.6 Ο αλγόριθμος των Μπατζέλη, Παπαθανασίου

Ο αλγόριθμος αυτός, ο οποίος παρουσιάζεται στο [49], αποτελεί, όπως και οι προηγούμενοι μια μέθοδο ντετερμινιστικής φύσης. Ανήκει στην ευρύτερη υποκατηγορία των ντετερμινιστικών αλγορίθμων οι οποίοι χρησιμοποιούν ευθείς μαθηματικές μεθόδους ή/και σχέσεις με σκοπό τον διαχωρισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V σε τμήματα, όπου σε κάθε τμήμα υπάρχει και ένα LMPP. Βέβαια, στον συγκεκριμένο αλγόριθμο γίνεται απευθείας εκτίμηση των LMPPs μέσω αποδεδειγμένων μαθηματικών σχέσεων, δηλαδή, ουσιαστικά, ένας νοητός διαχωρισμός της χαρακτηριστικής σε τμήματα-σημεία. Η καινοτομία του είναι ότι η υπορουτίνα εντοπισμού GMPP δεν επιβάλλει μετακίνηση του σημείου λειτουργίας σε αντίθεση με όλους τους ανωτέρω αλγορίθμους. Αντίθετα, γίνεται εκτίμηση των πιθανών μεγίστων με μαθηματικό τρόπο και το σημείο λειτουργίας αλλάζει μόνο αν πρέπει να οδηγηθεί στο GMPP. Περιορισμός του εν λόγω αλγορίθμου είναι ότι έχει σχεδιαστεί για δύο μόνο MPPs. Οι υπόλοιποι αλγόριθμοι της υποκατηγορίας αυτής που παρουσιάζονται στα [47], [48], [50] χρησιμοποιούν πολύ απλοϊκές μεθόδους διαχωρισμού και δεν παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον, ενώ αυτός στο [] χρησιμοποιεί μια αρκετά περίπλοκη μεθοδολογία εντοπισμού των κατάλληλων σχέσεων που περιγράφουν τα LMPPs του συστήματος και γι' αυτό δεν προτιμήθηκε.

Το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου στο [49] δίνεται στο Σχ. 4. 18, ενώ τα στάδια λειτουργίας της περιγράφονται αναλυτικά, στη συνέχεια.

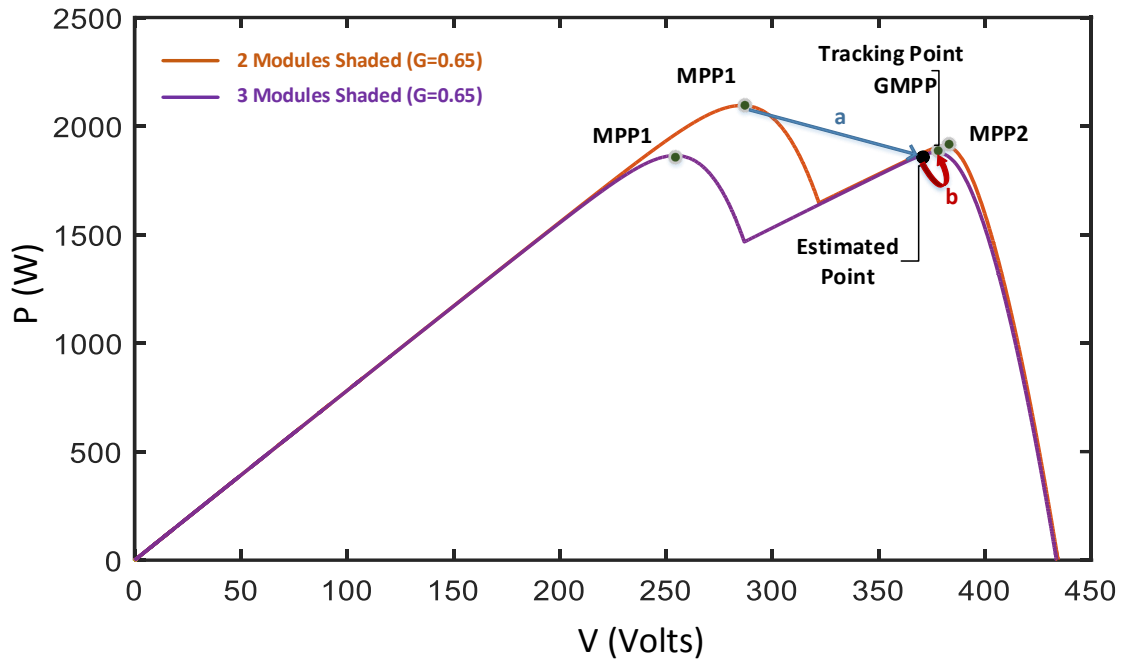
- **1^ο Στάδιο: Συμβατικός αλγόριθμος σύγκλισης.** Στο στάδιο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συμβατική μέθοδος επιθυμούμε, όπως π.χ. Ρ&Ο κλπ.
- **2^ο Στάδιο: Συνθήκη επανεκκίνησης υπορουτίνας εντοπισμού GMPP.** Δεδομένου ότι η υπορουτίνα εντοπισμού GMPP δεν επιβάλλει μετακίνηση του σημείου λειτουργίας (και άρα δεν έχει κόστος/συνέπειες), μπορεί να εκτελείται συνεχώς. Δεν χρησιμοποιείται, δηλαδή, κάποια συνθήκη εντοπισμού σκίασης, αλλά η υπορουτίνα επανεκτελείται περιοδικά με πολύ μεγάλη συχνότητα (π.χ. 10 φορές το δευτερόλεπτο) ώστε να καλύπτει ταχέως μεταβαλλόμενα σενάρια σκίασης.
- **3^ο Στάδιο: Υπορουτίνα εντοπισμού GMPP.** Το βασικό αυτό στάδιο λειτουργίας του αλγορίθμου στηρίζεται στις περιγραφικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες έχουν αποδειχθεί στο [11] και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν ένα ΦΒ σύστημα σε συνθήκες μερικής σκίασης, το οποίο εμφανίζει μέχρι το πολύ δύο τοπικά μέγιστα. Την πρώτη φορά εκκίνησης της συγκεκριμένης υπορουτίνας, και με προϋπόθεση ότι η ένταση της σκίασης είναι άγνωστη, δίνεται εντολή στον επόμενο κύκλο εκτέλεσης της υπορουτίνας για αξιολόγηση της έντασης αυτής μέσω της κατάλληλης σχέσης. Όταν η ένταση σκίασης εκτιμηθεί, και ανάλογα με το που βρίσκεται το σημείο λειτουργίας κάθε φορά, σε κάθε επανεκκίνηση της υπορουτίνας γίνεται επανεκτίμηση της ισχύος του άλλου τοπικού μεγίστου από αυτό που βρισκόμαστε. Έτσι, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει κάθε φορά στο GMPP απευθείας, χωρίς να γίνεται αναγνωριστική μετακίνησή του στην χαρακτηριστική καμπύλη. Οι αναλυτικές σχέσεις, που περιγράφουν τα τοπικά μέγιστα του συστήματος, δίνονται παρακάτω:

$$MPP1: \begin{cases} V_{mp1} = N_{un} \cdot V_{mp0} - N_{sh} \cdot \Delta V_D \\ I_{mp1} = G_{un} \cdot I_{mp0} \end{cases} \quad [3.8]$$

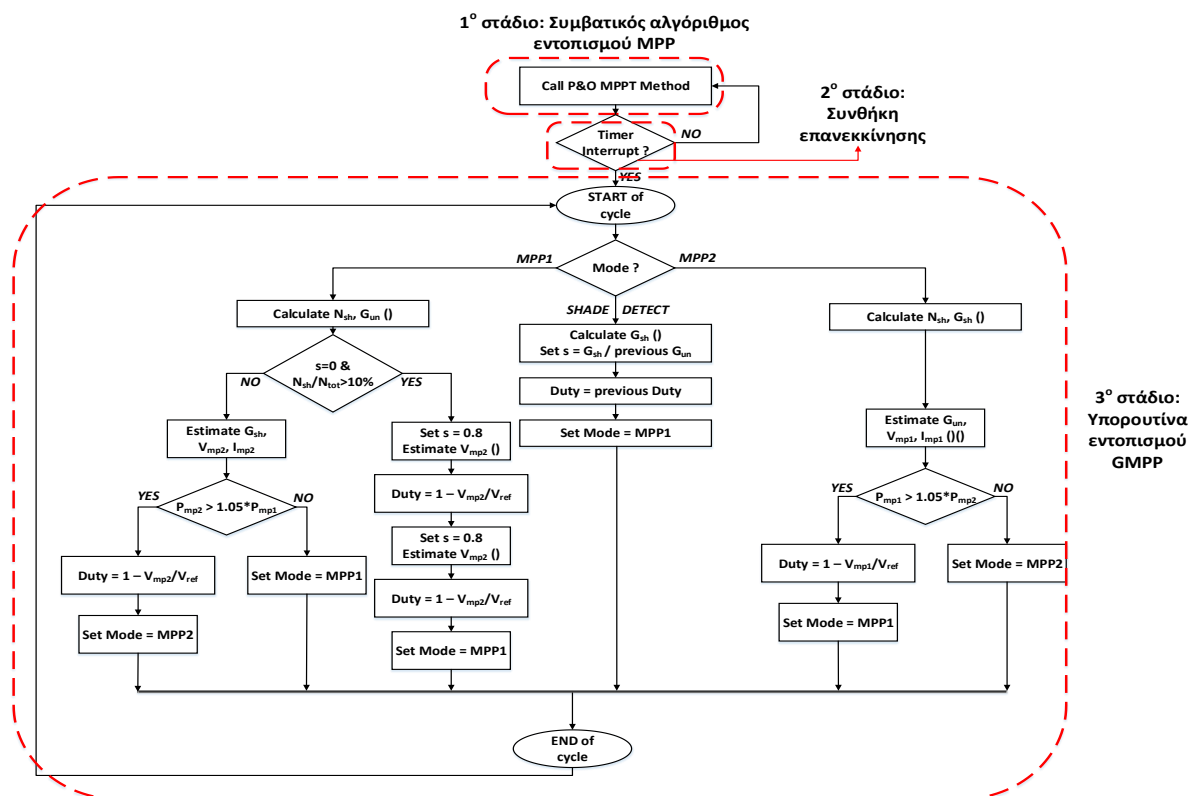
$$MPP2: \begin{cases} V_{mp2} = N_{un} \cdot (s \cdot V_{mp0} + (1-s) \cdot V_{oc0}) + N_{sh} \cdot V_{mp0} \\ I_{mp2} = G_{sh} \cdot I_{mp0} \cdot (1 + \lambda \cdot \frac{N_{un}}{N_{tot}}) \end{cases} \quad [3.9]$$

Όπου N_{un} είναι το πλήθος των ασκίαστων πλαισίων και N_{sh} το πλήθος των σκιασμένων. G_{un} και G_{sh} είναι η ένταση της ασκίαστης και σκιασμένης ακτινοβολίας, αντίστοιχα. V_{mp0} , I_{mp0} και V_{oc0} αποτελούν την τάση και ρεύμα του ονομαστικού ΜΡΡ και την ονομαστική τάση ανοιχτοκύκλωσης του συστήματος, αντίστοιχα. Το ΔV_D αντιπροσωπεύει την πτώση τάσης της διόδου (περίπου 1V), ενώ τέλος το λ είναι μια εμπειρική παράμετρος, κοντά στο 0.06. Το s είναι η αναλογία της σκιασμένης προς την ασκίαστη ένταση ακτινοβολίας.

Μια χαρακτηριστική περίπτωση επιτυχίας του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχ. 4. 17, όπου αρχικά το MPP1 της πρώτης καμπύλης αποτελεί το GMPP, ενώ κατά της σκίαση ενός επιπλέον πλαισίου της ΦΒ συστοιχίας, το MPP2 της επόμενης καμπύλης είναι το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Μπαίνοντας σε εφαρμογή οι σχέσεις εκτίμησης των συντεταγμένων του MPP2, διαπιστώνεται ότι το τελευταίο είναι ικανό να παρέχει παραπάνω ισχύ στο σύστημα απ' ότι το MPP1 της αντίστοιχης καμπύλης P-V. Έτσι, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει ακαριαία με τη βοήθεια του αλγορίθμου στην περιοχή του MPP2 [Σχ. 4. 17, (a) – (b)].



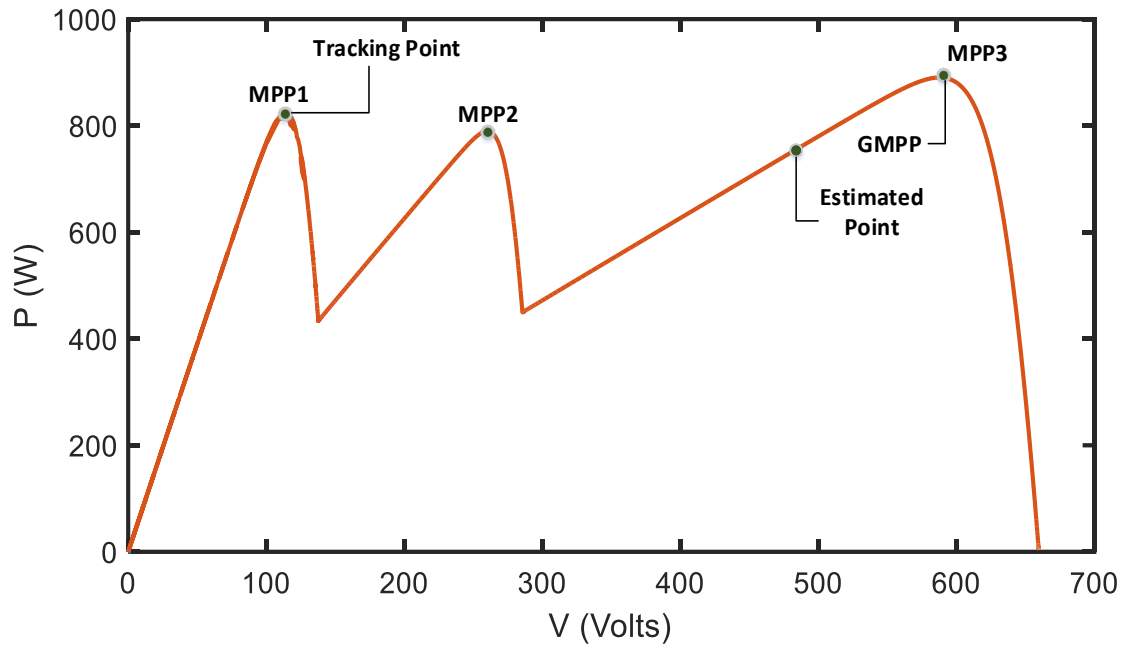
Σχ. 4. 17. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [49] λειτουργεί σωστά.



Σχ. 4. 18. Σχηματικό διάγραμμα του αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο [49].

Με δεδομένο, τώρα, ότι στο σύστημα υπάρχει σκίαση η οποία προκαλεί την ύπαρξη μέχρι δύο τοπικών μεγίστων, ο αλγόριθμος αυτός έχει περιορισμένες πιθανότητες αποτυχίας. Όταν, όμως, τα μέγιστα είναι πάνω από δύο, θα υπάρχει πρόβλημα. Η εκτίμηση του δεύτερου σημείου θα είναι προβληματική και δεν

θα ανταποκρίνεται στη σωστή περιοχή ύπαρξής του. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται, παρακάτω, στο Σχ. 4. 19.



Σχ. 4. 19. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεναρίου σκίασης σε μια ΦΒ συστοιχία, όπου η μέθοδος στο [49] αποτυγχάνει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή των επιλεγμένων αλγορίθμων σε τρία ρεαλιστικά και αντιπροσωπευτικά σενάρια σκίασης. Η υλοποίηση των αλγορίθμων, σε μορφή κώδικα, και οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο Matlab/Simulink και αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.

5.1 Πρώτο Σενάριο σκίασης: Σενάριο ανοικτού χώρου

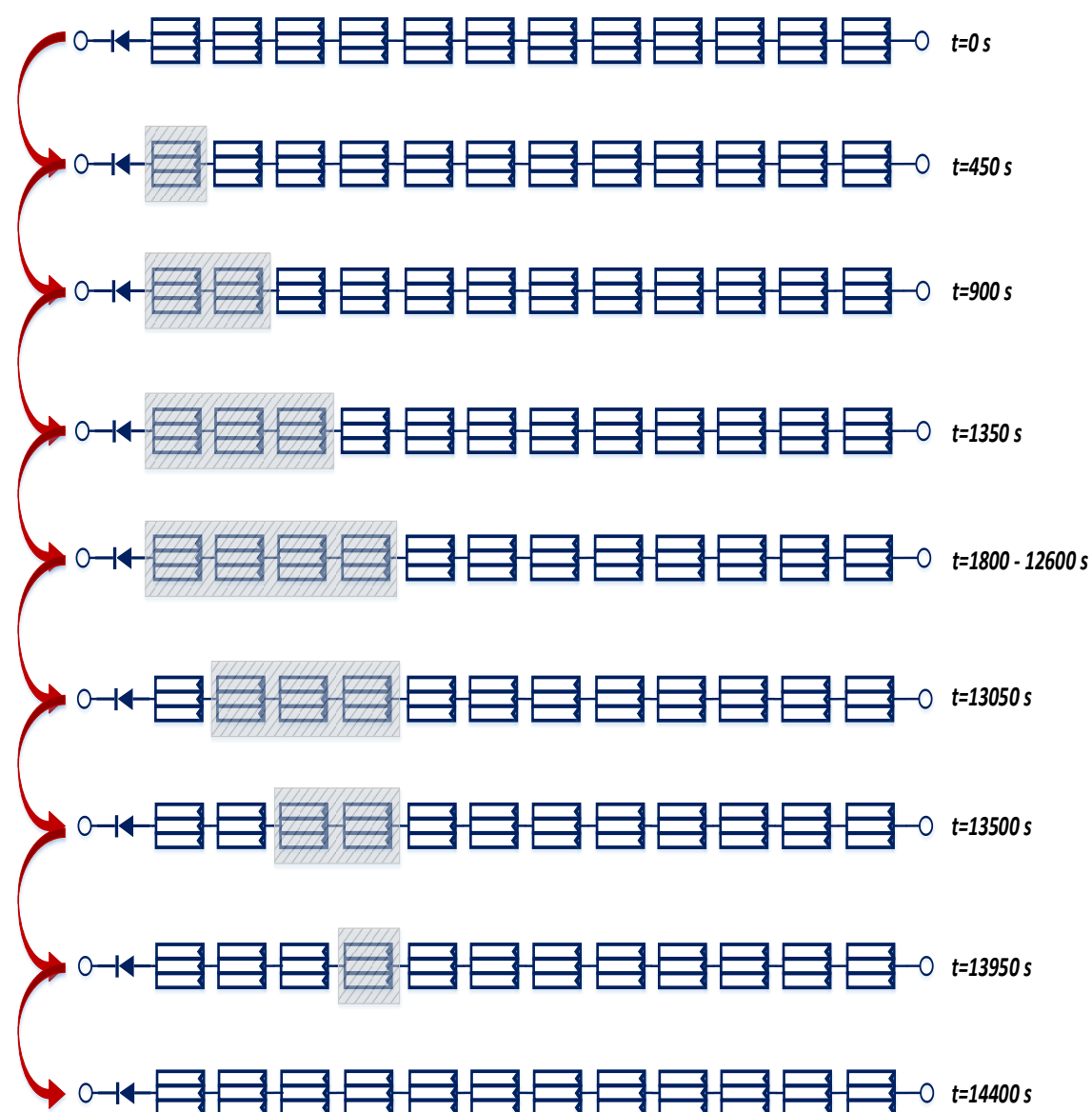
5.1.1 Ανάλυση του σεναρίου σκίασης ανοικτού χώρου

Το πρώτο σενάριο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, αντιπροσωπεύει τη μερική σκίαση που δημιουργείται στη ΦΒ συστοιχία με τη φυσική κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω ενός εμποδίου του περιβάλλοντα χώρου (όπως για παράδειγμα κάποιο άλλο τμήμα της διάταξης), σε μια ΦΒ διάταξη η οποία βρίσκεται σε ανοιχτό πεδίο (open field). Η ΦΒ πλαισιοσειρά μας παραμένει ασκίαστη, δεχόμενη ακτινοβολία της τάξεως των 1000 W/m^2 , από την ανατολή του ήλιου μέχρι ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, όπου εκκινεί η σκίαση. Το σημείο εκκίνησης του φαινομένου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας της συστοιχίας, κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του τρόπου διάταξής της, κ.α. Οι παράγοντες αυτοί και το ακριβές χρονικό σημείο εκκίνησης και λήξης του φαινομένου δεν σχετίζονται με την ποιοτική εξέλιξη της σκίασης, οπότε δεν αφορούν την παρούσα διπλωματική εργασία. Κατά συνέπεια, δεν θα αναλυθούν. Η μέση τιμή της άμεσης ακτινοβολίας που δέχονται τα σκιασμένα πλαίσια έχει επιλεγεί στα 650 W/m^2 , μετά από μελέτη της ανάλυσης που γίνεται στα [2], [3]. Η μέγιστη έκταση της σκιασμένης επιφάνειας της ΦΒ συστοιχίας έχει επιλεγεί να είναι τα 4 πλαίσια, δηλαδή το 33,33% της συνολικής επιφάνειας.

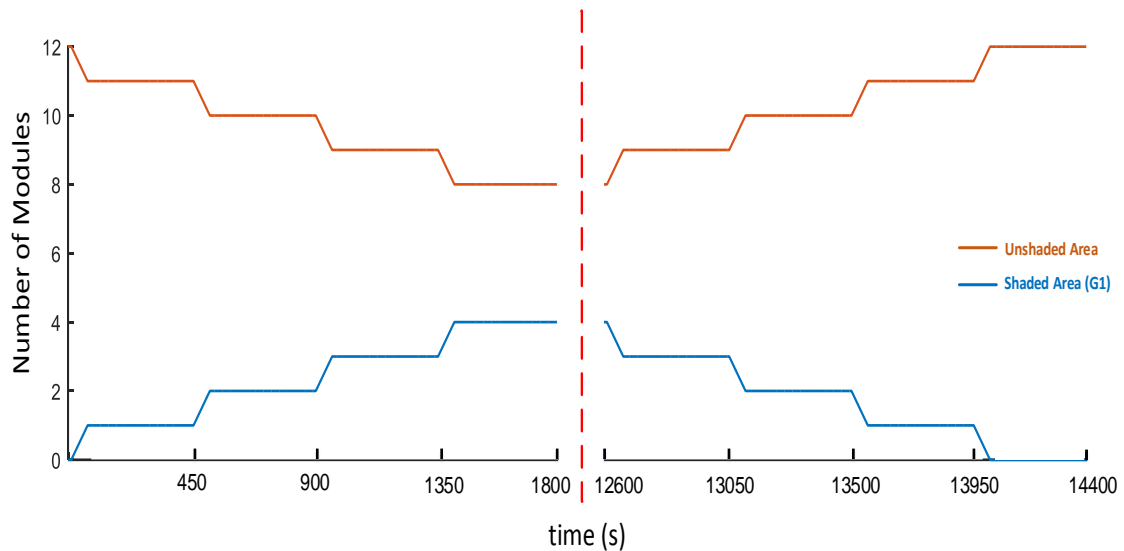
Πιο αναλυτικά, κάποια χρονική στιγμή της ημέρας και όταν ο ήλιος παίρνει μια συγκεκριμένη θέση, ξεκινά να σκιάζεται ένα συγκεκριμένο πλαίσιο της ΦΒ πλαισιοσειράς και η σκίαση εκτείνεται σταδιακά, στη συνέχεια, σε τέσσερα πλαίσια, από τα δώδεκα συνολικά. Η σκίαση, από την εκκίνησή της μέχρι την κάλυψη όλων των τεσσάρων πλαισίων διαρκεί 30 λεπτά, δηλαδή 1800 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, η συστοιχία παραμένει σε μια σταθερή κατάσταση μερικής σκίασης για 3 ώρες περίπου, κατά τη διάρκεια της οποίας η κίνηση του ήλιου δεν αλλάζει τα δεδομένα του φαινομένου. Μετά το πέρας των συνολικών 3,5 ωρών, και όταν ο ήλιος μετακινηθεί σε μια κατάλληλη θέση, η σκίαση των πλαισίων αρχίζει να υποχωρεί σταδιακά, με τρόπο αντίστοιχο της εξάπλωσης της. Σαν βήμα σκίασης της ΦΒ πλαισιοσειράς έχει επιλεγεί το ένα πλαίσιο, ενώ ο χρονισμός μεταβολής της ακτινοβολίας από το επίπεδο των 1000 W/m^2 σε αυτό των 650 W/m^2 , για το κάθε πλαίσιο, είναι το ένα δευτερόλεπτο. Τα 4 πλαίσια σκιάζονται και αποσκιάζονται, ανά σταθερό χρονικό διάστημα περίπου 7,5 λεπτών. Το βήμα σκίασης έχει οριστεί στο ένα πλαίσιο, και όχι σε κάποια μικρότερη δομική μονάδα, για πρακτικούς λόγους. Αφενός, από την επιλογή αυτή, δεν επηρεάζονται ποιοτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις δοκιμές μας, και αφετέρου οι χρόνοι προσομοιώσεων μειώνονται αισθητά και γίνονται διαχειρίσιμοι. Παρακάτω, στα Σχ. 5. 1 και Σχ. 5. 2, παρουσιάζεται, αντίστοιχα, σχηματικά και γραφικά, η εξέλιξη του φαινομένου.

Όπως φαίνεται και στην ανάλυση της μοντελοποίησης του κυκλώματος ισχύος, που έχει χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις, εφ' όσον η σκίαση εξαπλώνεται και υποχωρεί με βήμα το ένα πλαίσιο, έχει τοποθετηθεί μια δίοδος διαφυγής ανά ένα πλαίσιο για την αποφυγή του φαινομένου των θερμών κηλίδων. Σε αυτό το σημείο, και με τη βοήθεια μιας παρατήρησης γνωστής στη βιβλιογραφία [91], [92] που αναλύεται αμέσως μετά, δικαιολογείται η επιλογή του ενός δευτερολέπτου σαν χρονισμός εξάπλωσης της

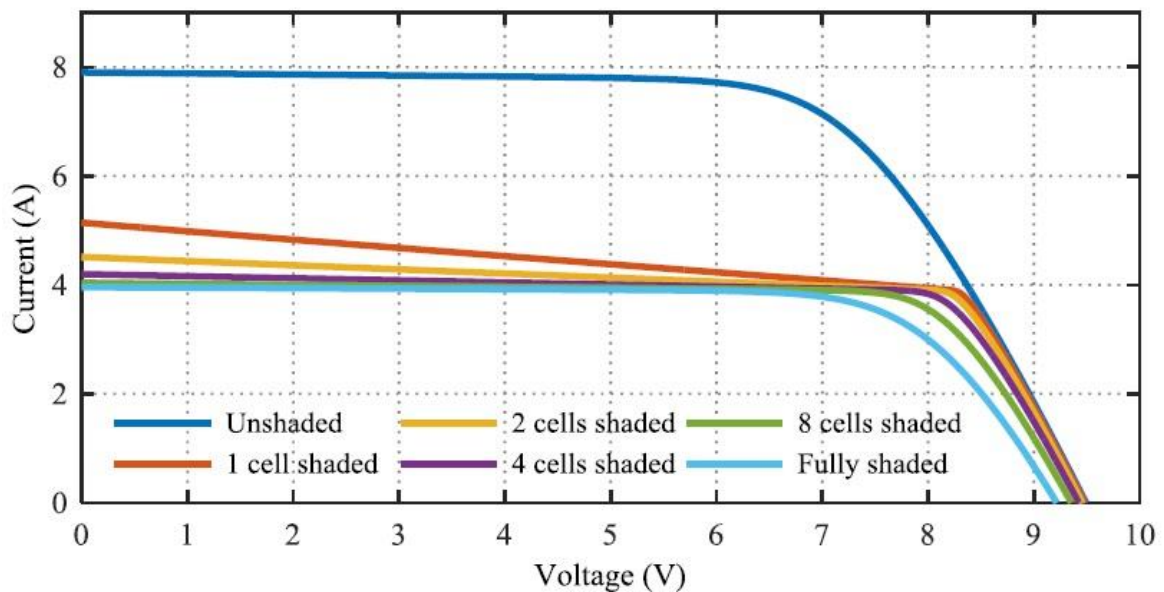
σκίασης στο κάθε πλαίσιο. Στο Σχ. 5. 3, απεικονίζεται η καμπύλη I-V μιας τυπικής στοιχειοσειράς(πλαίσιου) που αποτελείται από 16 κυψέλες, για διάφορες εκτάσεις σκίασης. Είναι εμφανές ότι ήδη από το σενάριο σκίασης μόνο του 1/16 κυψελών(κόκκινη γραμμή), η χαρακτηριστική έχει συγκλίνει σημαντικά προς την καμπύλη που αντιστοιχεί σε ολική σκίαση(γαλανή γραμμή). Δηλαδή, το συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή την ανάλυση είναι ότι αν η ΦΒ στοιχειοσειρά(πλαίσιο) σκιάζεται τουλάχιστον στο 5-10% της έκτασής της, λειτουργεί σχεδόν σαν να ήταν ολικά σκιασμένη. Βατζελής διατριβή]. Σε ρεαλιστικές συνθήκες, με την πάροδο του ενός δευτερολέπτου σε ένα τόσο αργό σενάριο σκίασης, όπως αυτό, θα έχει προλάβει να σκιαστεί ένα μικρό, μεν, μέρος του κάθε πλαίσιου, ικανό, όμως, δε, για να το κάνει να συμπεριφερθεί σαν ολικά σκιασμένο. Οπότε, η επιλογή του συγκεκριμένου χρονισμού έχει ικανοποιητική βάση και απλοποιεί τις προσομοιώσεις μειώνοντας το χρόνο των δοκιμών, χωρίς να αλλοιώνει τα αποτελέσματά τους.



Σχ. 5. 1. Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης στα 4/12 πλαίσια της συστοιχίας, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

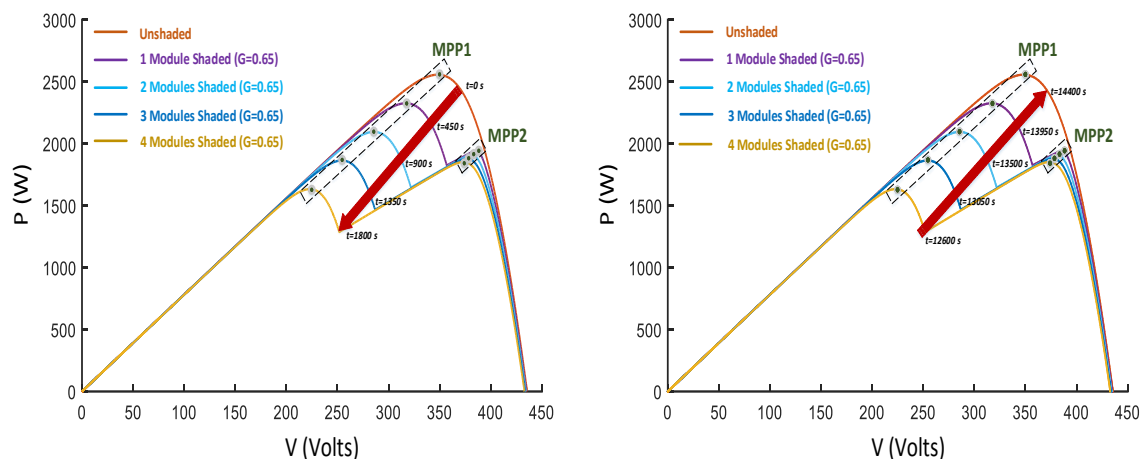


Σχ. 5. 2. Γραφική αναπαράσταση της σκιασμένης και ασκιάστης περιοχής της συστοιχίας, σε κοινό γράφημα, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.



Σχ. 5. 3. Χαρακτηριστική I-V μερικώς σκιασμένης ΦΒ στοιχειοσειράς 16 κυψελών για σκίαση διαφόρων εκτάσεων, από μηδενική έως πλήρη (50% ένταση σκίασης) [11].

Με τη σταδιακή άφιξη και υποχώρηση της σκίασης στα πλαίσια του ΦΒ, οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας μεταβάλλονται ανάλογα με το πόσα πλαίσια είναι σκιασμένα κάθε φορά. Παρακάτω, στο Σχ. 5. 4, φαίνονται οι χαρακτηριστικές P-V του συστήματος στα διάφορα στάδια λειτουργίας, τόσο κατά την άφιξη όσο και κατά την υποχώρηση της σκίασης.



Σχ. 5. 4. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας P-V, στα διάφορα στάδια εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης, κατά τη διάρκεια του σεναρίου σκίασης ανοικτού χώρου.

Στον Πίνακα 5. 1 συνομίζονται όλα τα χαρακτηριστικά του πρώτου σεναρίου σκίασης, τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 5. 1. Χαρακτηριστικά του σεναρίου σκίασης ανοικτού χώρου.

Επίπεδα Ακτινοβολίας	Ένταση επιπέδων ακτινοβολίας	Μέγιστη έκταση σκίασης	Βήμα δομικής ΦΒ μονάδας σκίασης	Ρυθμός μεταβολής ακτινοβολίας	Συνολική διάρκεια φαινομένου
2	1 ^ο : 1000 W/m ² 2 ^ο : 650 W/m ²	4/12 πλαίσια (33,33%)	1 πλαίσιο	350 W/m ² *s	4 ώρες

5.1.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου

5.1.2.A Ο αλγόριθμος των Patel, Agarwal

Ο αλγόριθμος στο [35] είναι ένας από εκείνους που επιλέχθηκαν για να δοκιμαστούν. Η παραμετροποίησή του για τις προσομοιώσεις, τόσο σε αυτό το σενάριο όσο και στα υπόλοιπα, έγινε ακολουθώντας τους κανόνες που θέτονται από τους δημιουργούς του και προσαρμόζοντάς τον στις συνθήκες των παρόντων προσομοιώσεων.

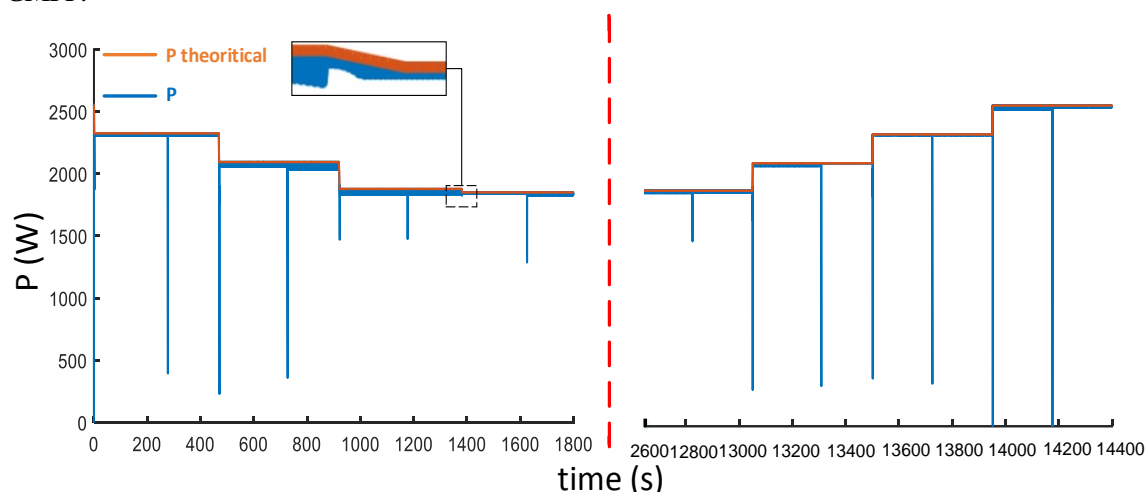
Κατά το πρώτο στάδιο λειτουργίας του, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη συμβατική μέθοδο P&O, όπως έχει προαναφερθεί, με βήμα μεταβολής του duty cycle ρυθμισμένο στο 1%. Στο συγκεκριμένο σενάριο, το οποίο είναι ένα σενάριο αρκετά αργών μεταβολών τόσο στις ακτινοβολίες όσο και στις αλλαγές καταστάσεων, η κρίσιμη τιμή της ισχύος που επιλέχθηκε στο δεύτερο στάδιο, για τον εντοπισμό της σκίασης, τέθηκε στο 2% της εγκατεστημένης ισχύος του ΦΒ μας. Η τιμή είναι αρκετά μικρή, που σημαίνει ότι το σύστημα γίνεται αρκετά ευαίσθητο στις μεταβολές ακτινοβολίας. Θα δούμε, όμως, και στη συνέχεια, ότι κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς οι μεταβολές της ακτινοβολίας είναι αρκετά αργές και μικρές. Επιπλέον, ο αλγόριθμος αυτός στο συγκεκριμένο στάδιο έχει διττή λειτουργία. Πέρα από τη συνθήκη αναγνώρισης της ισχύος, περιέχει και ένα περιοδικό χρονικό όριο, το οποίο όταν αναγνωρίζεται ο αλγόριθμος μεταβαίνει στην αναζήτηση του GMPP. Το περιοδικό αυτό χρονικό όριο έχει οριστεί στα 5 λεπτά. Στο τρίτο στάδιο λειτουργίας, όπου γίνεται ο εντοπισμός του

εκάστοτε GMPP, επιλέχθηκε βήμα σάρωσης της καμπύλης P-V, ίσο με το 70% της τάσης ανοιχτούκλωσης που αντιστοιχεί στο κάθε χρησιμοποιούμενο πλαίσιο ($V_{oc,p}$). Οι ερευνητές προτείνουν το βήμα αυτό να κυμαίνεται ανάμεσα στο 60-80% της τάσης αυτής, οπότε επιλέχθηκε μια μέση τιμή του διαστήματος αυτού. Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 5. 2.

Πίνακας 5. 2. Αρχικές ρυθμίσεις παραμέτρων του αλγορίθμου στο [35] με αναφορά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου και ισχύ και για τα υπόλοιπα σενάρια.

Στάδια	Αρχικές Ρυθμίσεις
1 ^ο Στάδιο	Βήμα duty cycle P&O: 1%
2 ^ο Στάδιο	Κρίσιμη τιμή ισχύος: 2% of installed Power Περιοδικό χρονικό όριο: 7,5 min
3 ^ο Στάδιο	Βήμα σάρωσης (ΔV_{step}): 70% of $V_{oc,p}$

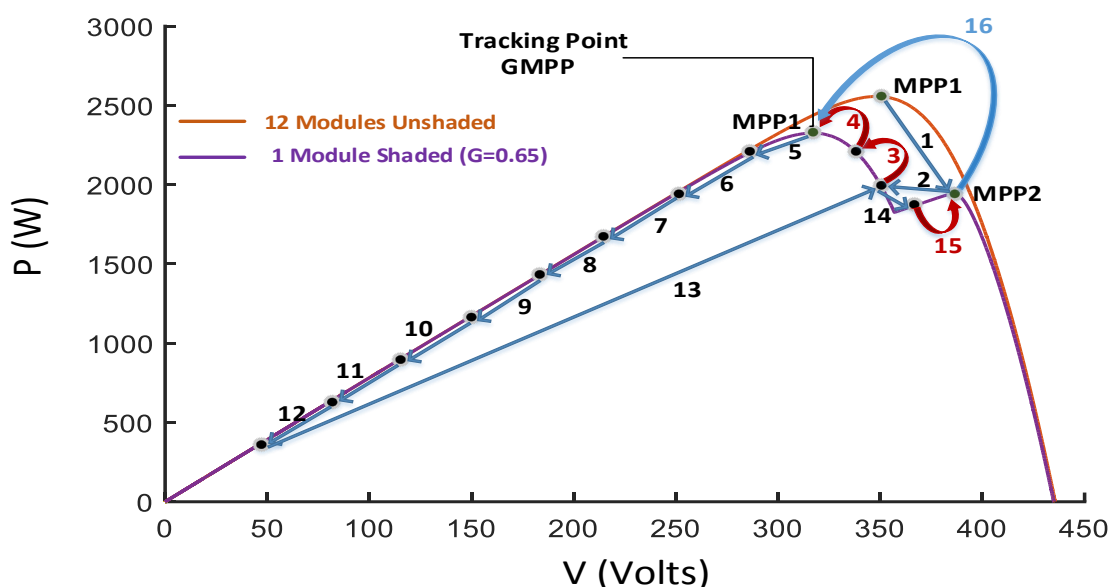
Παρακάτω, στο Σχ. 5. 5, παρουσιάζεται το διάγραμμα της εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ συστήματος, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [35], κατά το πρώτο σενάριο σκίασης. Καθώς, το σενάριο αυτό είναι αρκετά μεγάλο σε χρονική διάρκεια, στο παρακάτω γράφημα φαίνονται μόνο οι περιοχές της κυμαινόμενης ισχύος που μας ενδιαφέρουν. Η μια περιοχή αφορά την άφιξη της σκίασης, ενώ η άλλη την υποχώρηση της. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική εξαγόμενη τιμή της ισχύος με την επρροή του αλγορίθμου, ενώ με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται η θεωρητική μέγιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος που θα είχε το σύστημα σε ιδανικές συνθήκες, για κάθε κατάσταση. Παρατηρούμε ότι, σε γενικές γραμμές, ο αλγόριθμος κάνει σωστά τη δουλειά του και εντοπίζει κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από μια, και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Η μεταβολή που δεν εντοπίζεται είναι αυτή κατά την άφιξη της σκίασης από το τρίτο προς το τέταρτο πλαίσιο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5. 5. Η μεταβολή αυτή δεν εντοπίζεται καθώς είναι αρκετά μικρή ενεργειακά και η συνθήκη εντοπισμού δεν ενεργοποιείται. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός αυτό, εδώ, τυχαίνει να μη διαδραματίζει κάποιο ρόλο στη μετάβαση προς το σωστό GMPP.



Σχ. 5. 5. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Σε κάθε αλλαγή κατάστασης, δηλαδή με την σκίαση κάθε επιπλέον πλαισίου, μπαίνει σε εφαρμογή το στάδιο εντοπισμού του GMPP. Βλέπουμε αρκετά μεγάλες και απότομες μεταβολές της ισχύος στα σημεία όπου μπαίνει σε εφαρμογή το στάδιο αυτό. Οι μεταβολές αυτές εξηγούνται αν εξετάσει κανείς προσεκτικά

τη φύση του συγκεκριμένου αλγορίθμου, ο οποίος περιέχει αρκετά ευρεία σάρωση της χαρακτηριστικής P-V. Η σάρωση αυτή φτάνει, συχνά, σε ακραία τμήματα της καμπύλης, με αποτέλεσμα οι απώλειες ισχύος που προκαλούνται να είναι αρκετά μεγάλες. Η εν λόγω διακύμανση της ισχύος, κατά το στάδιο αναζήτησης του GMPP, ουσιαστικά εκφράζει την ισχύ η οποία εγχέεται στο δίκτυο και δημιουργεί προβλήματα στην ποιότητα ισχύος. Για το λόγο αυτό θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Έτσι η ποσοστιαία αυτή διακύμανση της ισχύος (Power fluctuation) έχει υπολογιστεί για τον κάθε αλγόριθμο σε κάθε σενάριο προσομοίωσης. Ενδεικτικά, στο Σχ. 5. 6, παρουσιάζεται η λειτουργία του σταδίου αυτού μετά τη σκίαση του πρώτου πλαισίου της ΦΒ πλαισιοσειράς.



Σχ. 5. 6. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP στο [35], με τη σκίαση του πρώτου πλαισίου, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 6, αρχικά βλέπουμε ότι με την σκίαση του πρώτου πλαισίου, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει διαγώνια, και όχι κατακόρυφα (1), από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP2 της δεύτερης καμπύλης. Αυτό οφείλεται στην αργή μεταβολή της ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, αρχίζει η σάρωση προς τα αριστερά του MPP2 (2), όπου εντοπίζεται το MPP1 και ο αλγόριθμος συγκλίνει σε αυτό (3)-(4). Επειδή το ενεργειακό επίπεδο του MPP1 είναι μεγαλύτερο από αυτό του MPP2, το MPP1 αποθηκεύεται σαν βασικό υποψήφιο για να είναι το GMPP. Αφού ολοκληρωθεί η σύγκλιση, συνεχίζεται η σάρωση προς τα αριστερά του MPP1 μέχρι ακραία χαμηλές τιμές της ισχύος πάνω στην καμπύλη P-V (5)-(12). Όταν ο αλγόριθμος εντοπίσει τις ακραίες αυτές τιμές, αλλάζει κατεύθυνση σάρωσης προς τα δεξιά του MPP1 (13)-(14), και αφού ξαναεντοπίσει το MPP2 (15), επιστρέφει στο MPP1 (16), το οποίο αποτελεί το GMPP. Η όλη διαδικασία, μέχρι ο αλγόριθμος να συγκλίνει τελικά στο GMPP, είναι αρκετά αργή. Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 3, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο πρώτο σενάριο σκίασης. Το “Average MPPT efficiency” αντιστοιχεί στη μέση απόδοση MPPT του κάθε αλγορίθμου στο εκάστοτε σενάριο, ενώ το “Hit Count” αποτελεί τον αριθμό των GMPPs τα οποία ο αλγόριθμος επιτυγχάνει να εντοπίσει από τα συνολικά που υπάρχουν σε κάθε σενάριο. Με τη βοήθεια του όρου “Convergence Time” αποδίδεται ο ελάχιστος, ο μέγιστος και ο μέσος χρόνος σύγκλισης του αλγορίθμου στο GMPP κατά τις μεταβολές ακτινοβολίας που συμβαίνουν. Τέλος, το “Power Fluctuation during Stage 3” αναφέρεται στη μέγιστη διακύμανση ισχύος κατά το 3^ο στάδιο λειτουργίας για τον κάθε αλγόριθμο, όπως προειπώθηκε.

Πίνακας 5. 3. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
99,50	77	1800	350	889,28	99,88

5.1.2.B Ο αλγόριθμος των Tey, Mekhilef

Η ρύθμιση των αρχικών παραμέτρων του αλγορίθμου στο [36] έγινε, όπως προηγουμένως, στα πλαίσια που ορίζουν οι δημιουργοί του, με ενιαία ισχύ για όλα τα σενάρια δοκιμών.

Όπως σε όλες τις προσομοιώσεις το βήμα της εξαγόμενης τιμής του duty cycle, κατά το πρώτο στάδιο λειτουργίας του συμβατικού αλγορίθμου INC, έχει οριστεί στο 1%. Στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας του, για τον εντοπισμό των μεταβολών στις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος, ο συγκεκριμένος

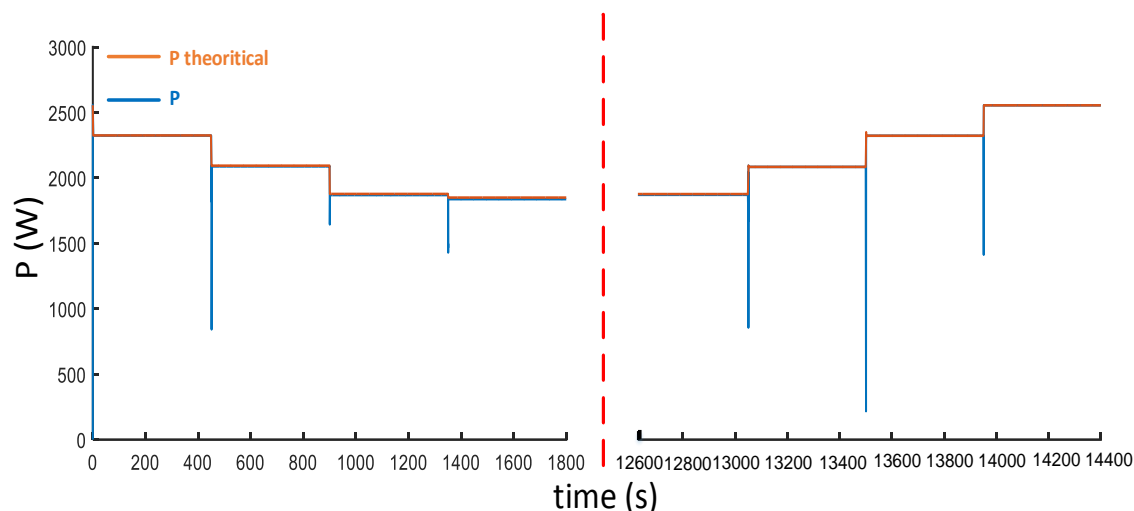
αλγόριθμος κάνει χρήση της σχέσης: $\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| < \text{deltaCrit}$, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο

κεφάλαιο. Οι ερευνητές προτείνουν μια κρίσιμη τιμή κοντά στο $\text{deltaCrit} = 0,06$, προσαρμοσμένη στις συνθήκες όπου αυτοί πραγματοποιούν τις δοκιμές τους (π.χ. βήμα duty cycle 0,5%). Προσαρμοζόμενη στις συνθήκες του παρόντος σεναρίου, η τιμή αυτή επιλέχθηκε να είναι κοντά στο 0,12. Στο τρίτο του στάδιο, κατά τη σάρωση της χαρακτηριστικής P-V για τον εντοπισμό του GMPP, ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ένα σταθερό βήμα σάρωσης που αντιστοιχεί σε κάποιο πολλαπλάσιο του 80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του συστήματος (V_{∞}). Η τιμή αυτή ρυθμίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά της συστοιχίας. Πρέπει να τονιστεί, εδώ, ότι όπως αναφέρεται και στο [36], ο συγκεκριμένος αλγόριθμος υποστηρίζει μέχρι τρία επίπεδα ακτινοβολίας. Το βήμα σάρωσης έχει οριστεί εδώ στο 1/3 του 80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, τιμή που καλύπτει με άνεση τα 2 επίπεδα ακτινοβολίας του σεναρίου. Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 5. 4.

Πίνακας 5. 4. Αρχικές ρυθμίσεις παραμέτρων του αλγορίθμου στο [36], με αναφορά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου και ισχύ και για τα υπόλοιπα σενάρια.

Στάδια	Αρχικές Ρυθμίσεις
1° Στάδιο	Βήμα duty cycle P&O: 1%
2° Στάδιο	Κρίσιμη τιμή deltaCrit: 0,12
3° Στάδιο	Βήμα σάρωσης: 1/3 of 80% of V_{∞} =108,9 Volts

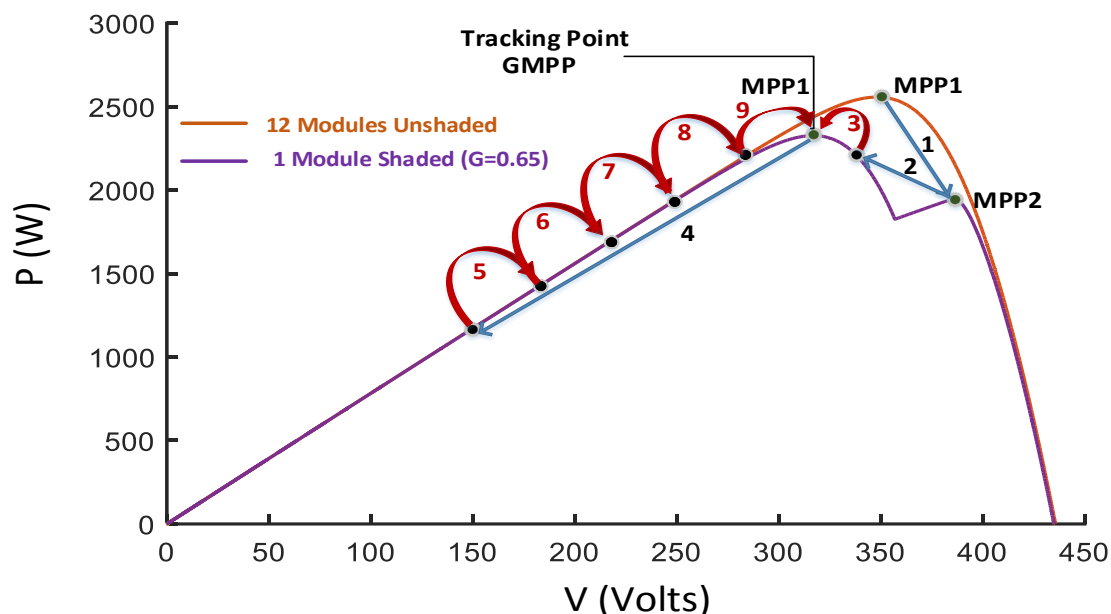
Στο Σχ. 5. 7 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του ΦΒ συστήματος κατά το πρώτο σενάριο σκίασης, με την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Όπως και πριν, με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.



Σχ. 5. 7. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Παρατηρείται εύκολα ότι ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Υπάρχουν και εδώ αρκετά απότομες-και μεγάλες σε κάποιες περιπτώσεις-διακυμάνσεις της ισχύος που οφείλονται στη λειτουργία του τρίτου σταδίου. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ότι οι μεταβολές αυτές είναι μικρότερες από ότι στον προηγούμενο αλγόριθμο. Επίσης, εδώ, όταν ο αλγόριθμος συγκλίνει στο εκάστοτε GMPP, σταθεροποιεί την τιμή του duty cycle σε μια συγκεκριμένη τιμή και δεν θέτει σε λειτουργία τον αλγόριθμο INC του πρώτου σταδίου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν διακυμάνσεις της ισχύος. Έτσι, συνδυαστικά και με το μεγαλύτερο βήμα σάρωσης, οι συνολικές απώλειες ισχύος είναι αρκετά μικρές συγκριτικά και με άλλους αλγόριθμους, κάτι που φαίνεται και στη μέση απόδοση MPPT του αλγορίθμου. Ενδεικτικά, στο Σχ. 5. 8, παρουσιάζεται η λειτουργία του σταδίου αυτού μετά τη σκίαση του πρώτου πλαισίου της ΦΒ πλαισιοσειράς.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 8, αρχικά βλέπουμε ότι με την σκίαση του πρώτου πλαισίου, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει από το αρχικό MPP1 προς την περιοχή του MPP2 της δεύτερης καμπύλης (1). Αυτό οφείλεται στην αργή μεταβολή της ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, κανονικά αρχίζει η σάρωση προς τα δεξιά του MPP2. Επειδή, όμως, το βήμα σάρωσης είναι αρκετά μεγάλο, ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται την οριοθέτηση που υπάρχει από τη μέγιστη τιμή τάσης και αλλάζει κατεύθυνση σάρωσης, προς τα αριστερά (2). Έτσι, εντοπίζεται το MPP1, και ο αλγόριθμος συγκλίνει σε αυτό (3). Επειδή το ενεργειακό επίπεδο του MPP1 είναι μεγαλύτερο από αυτό του MPP2, το MPP1 αποθηκεύεται σαν βασικό υπονήφιο για να είναι το GMPP. Αφού ολοκληρωθεί η σύγκλιση, συνεχίζεται η σάρωση προς τα αριστερά του MPP1 (4), με το ίδιο σταθερό βήμα.



Σχ. 5. 8. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Καθώς μεταβαίνει σε κάποιο σημείο αριστερότερα του MPP1, ο αλγόριθμος βάζει σε λειτουργία την υπορουτίνα σύγκλισης που περιέχει και επανασυγκλίνει στο MPP1, αφού δεν υπάρχει άλλο τοπικό μέγιστο, αριστερά αυτού. Τότε, ο αλγόριθμος σταθεροποιεί τη τιμή του duty cycle, στο MPP1, το οποίο αποτελεί και το GMPP. Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 5, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο πρώτο σενάριο σκίασης.

Πίνακας 5. 5. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
99,65	77	1600	900	1137,50	90,64

5.1.2.C Ο αλγόριθμος των Kouchaki, Iman-Eini, Asaei

Η ομαλή λειτουργία του αλγορίθμου αυτού [40], όπως και των προηγούμενων, απαιτεί μια σωστή αρχικοποίηση των παραμέτρων του. Η παραμετροποίηση αυτή ισχύει, προφανώς, και για τα υπόλοιπα σενάρια δοκιμών.

Στο πρώτο στάδιο λειτουργίας του ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον συμβατικό αλγόριθμο Hill Climbing (HC), όπου το βήμα μεταβολής του duty cycle είναι ορισμένο στο 1%. Στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας γίνεται χρήση μιας οριακής συνθήκης μεταβολής της ισχύος για την αναγνώριση των μεταβολών στο σύστημα, όπως στον αλγόριθμο στο [40]. Οπότε, έχει χρησιμοποιηθεί η ίδια κρίσιμη τιμή για την ενεργοποίηση της συνθήκης. Η τιμή αυτή έχει οριστεί στο 2% της εγκατεστημένης ισχύος της ΦΒ συστοιχίας. Κατά το στάδιο αυτό, όμως, ο αλγόριθμος παρουσιάζει και μια ιδιαιτερότητα, όπως έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έχει τη δυνατότητα, κατά τους δημιουργούς του, να εξετάζει αν σε μια αλλαγή κατάστασης, το σύστημα μεταβαίνει σε ομοιόμορφες ή ανομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας.

Στην επιλογή της κρίσιμης τιμής για τον έλεγχο αυτό, καίριο ρόλο παίζει η συνθήκη:

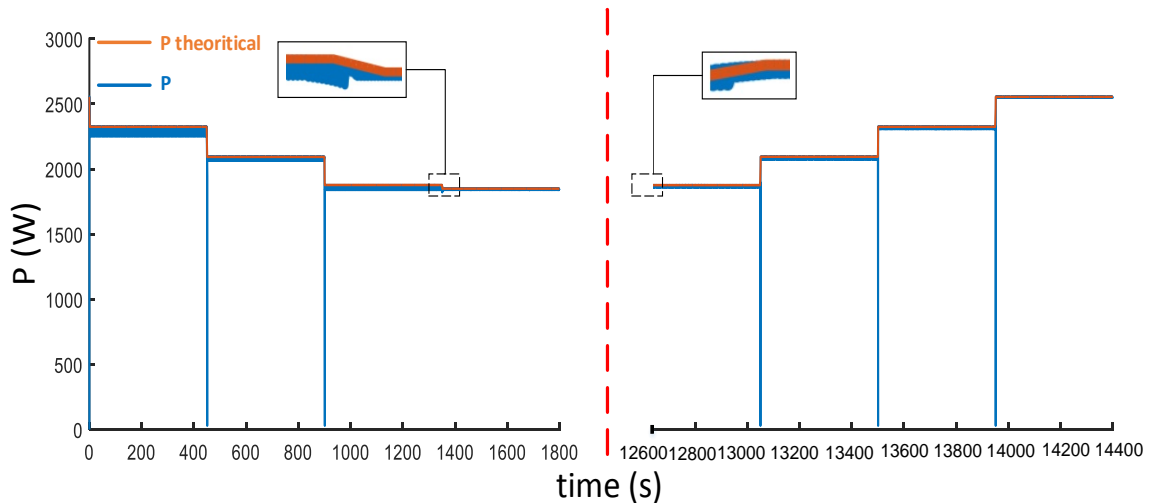
$$\Delta I_u = I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{MPP}}{a \cdot N_s \cdot V_t}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{\Delta V}{a \cdot N_s \cdot V}\right) - 1\right], \text{ όπου με τα δεδομένα του επιλεγμένου μοντέλου}$$

προσομοιώσεων μας δίνει τιμή $\Delta I_u=0,234$. Αυτό σημαίνει ότι αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος είναι ανομοιόμορφες. Στο τρίτο στάδιο λειτουργίας, κατά της σάρωση της χαρακτηριστικής P-V, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί σταθερό βήμα σάρωσης duty cycle και κάθε βήμα αντιστοιχεί σε ένα πολλαπλάσιο του 80% της ολικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης, ενώ ο συνολικός αριθμός βημάτων είναι ίσος με τον αριθμό των εν σειρά πλαισίων της πλαισιοσειράς. Εν ολίγοις, η ακριβής τάση αναφοράς των βημάτων σάρωσης του αλγορίθμου έχουν τη μορφή: $V_{ref} = 0.8 \cdot (N_s - n) \cdot V_{oc}$, όπου N_s ο συνολικός αριθμός των εν σειρά πλαισίων (12) και n το εκάστοτε πλαίσιο που αντιστοιχεί στο κάθε βήμα σάρωσης. Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 5. 6.

Πίνακας 5. 6. Αρχικές ρυθμίσεις παραμέτρων του αλγορίθμου στο [40], με αναφορά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου και ισχύ και για τα υπόλοιπα σενάρια.

Στάδια	Αρχικές Ρυθμίσεις
1 ^ο Στάδιο	Βήμα duty cycle P&O: 1%
2 ^ο Στάδιο	Κρίσιμη τιμή ισχύος: 2% of installed Power $\Delta I_u=0,234$
3 ^ο Στάδιο	Βήμα σάρωσης: $V_{ref} = 0.8 \cdot (N_s - n) \cdot V_{oc}$

Στο Σχ. 5. 9 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο πρώτο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.

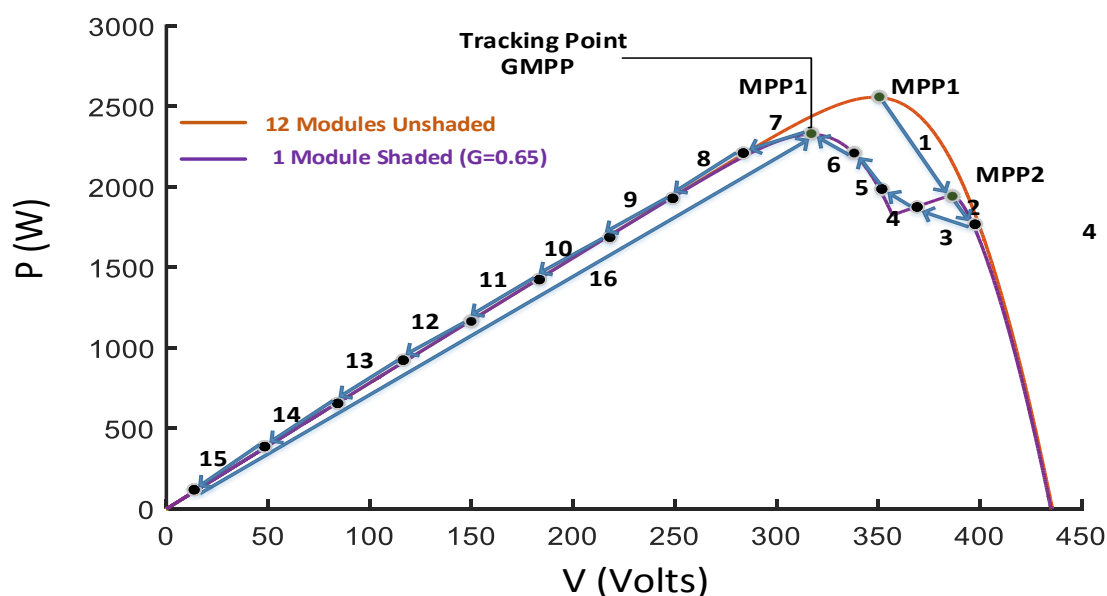


Σχ. 5. 9. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίζει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από δύο, και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Η μεταβολές που δεν εντοπίζονται φαίνονται στο Σχ. 5. 9, και είναι αυτές κατά την άφιξη της σκίασης από το τρίτο προς το τέταρτο πλαίσιο και κατά την υποχώρηση της από αυτό. Η μεταβολές αυτές δεν εντοπίζονται καθώς είναι αρκετά μικρές ενεργειακά και η συνθήκη εντοπισμού

δεν ενεργοποιείται. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός αυτό, εδώ, τυχάνει να μη διαδραματίζει κάποιο ρόλο στη μετάβαση προς το σωστό GMPP. Υπάρχουν και εδώ αρκετά απότομες-αλλά χρονικά σύντομες-μεταβολές της ισχύος που οφείλονται στη λειτουργία του τρίτου σταδίου. Έτσι, συνδυαστικά και με το βήμα σάρωσης, οι συνολικές απώλειες ισχύος είναι αρκετά μικρές συγκριτικά και με άλλους αλγόριθμους, κάτι που φαίνεται και στη μέση απόδοση MPPT του αλγορίθμου. Ενδεικτικά, στο Σχ. 5. 10, παρουσιάζεται η λειτουργία του σταδίου αυτού μετά τη σκίαση του πρώτου πλαισίου της ΦΒ πλαισιοσειράς.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 10, αρχικά βλέπουμε ότι όπως και πριν με τη σκίαση του πρώτου πλαισίου, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει από το αρχικό MPP1 προς το MPP2 της επόμενης καμπύλης (1). Αυτό οφείλεται στην αργή μεταβολή της ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει λίγο δεξιά του MPP2 (2) για να μετρηθεί το ρεύμα και να διαπιστωθεί αν οι συνθήκες είναι ομοιόμορφες ή όχι. Αφού διαπιστωθεί ότι οι συνθήκες είναι ανομοιόμορφες, ξεκινά η σάρωση της καμπύλης P-V (3) – (15). Πραγματοποιούνται 12 βήματα σάρωσης, όσα και τα πλαίσια της ΦΒ συστοιχίας. Σε κάθε βήμα σάρωσης, μετριέται και αποθηκεύεται η ενεργειακή στάθμη και στο τέλος



Σχ. 5. 10. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

της διαδικασίας ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο σημείο με την υψηλότερη ισχύ και συγκλίνει σε αυτό. Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 7, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Πίνακας 5. 7. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
99,70	77	300	150	208,35	98,84

5.1.2.D Ο αλγόριθμος των Boztepe, Guinjoan, Quesada, Silvestre, Chouder, Karatepe

Όπως και στα προηγούμενα, θα ξεκινήσουμε με την παραμετροποίηση του αλγορίθμου στο [], η οποία παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στην απόδοση του. Η ισχύς των παραμέτρων που τέθηκαν με αναφορά αυτό το σενάριο έχουν ενιαία ισχύ και για τα δύο άλλα.

Στο πρώτο στάδιο λειτουργίας του, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον συμβατικό αλγόριθμο P&O με βήμα μεταβολής duty cycle 1%. Στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας, χρησιμοποιείται η οριακή συνθήκη:

$$\left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right| > threshold, \text{ για την αναγνώριση της σκίασης. Σαν κρίσιμη τιμή ενεργοποίησης της συνθήκης}$$

προτείνεται, από τους συγγραφείς, η χρησιμοποίηση ενός πολλαπλάσιου της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας. Το μέγεθος του πολλαπλάσιου αυτού καθορίζεται από τις απαιτήσεις του συστήματος εφαρμογής του αλγορίθμου. Στο στάδιο αυτό, ο αλγόριθμος κάνει χρήση και του περιοδικού χρονικού ορίου. Το περιοδικό αυτό χρονικό όριο έχει οριστεί στα 5 λεπτά, όμοια με τον αλγόριθμο στο [PATEL]. Το τρίτο στάδιο λειτουργίας του αλγορίθμου περιλαμβάνει τρία μέρη. Το πρώτο μέρος είναι, φυσικά, το βήμα μετακίνησης του σημείου λειτουργίας (ΔV_{GSTEP}), το οποίο επιλέγεται μετά από δοκιμές των συγγραφέων ανάμεσα σε $0,5 \cdot V_{oc,module}$. Το δεύτερο μέρος είναι το λεγόμενο τρίγωνο ισχύος (Power Operating Triangle-POT) και το τρίτο μέρος είναι το παράθυρο της τάσης (Voltage Window-VW), τα οποία αλληλοσυνδέονται στην παραμετροποίησή τους. Το POT, γενικά, ορίζεται στην καμπύλη P-V από τον άξονα x και δύο ευθείες γραμμές, οι οποίες ονομάζονται: ευθεία τάσης και ευθεία ρεύματος. Η επιλεγμένη τιμή του βήματος σάρωσης, στο σενάριο αυτό, έχει οριστεί στο 50% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του κάθε ΦΒ πλαισίου ($\Delta V_{GSTEP} = 0,5 \cdot V_{oc,module}$). Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 5. 8.

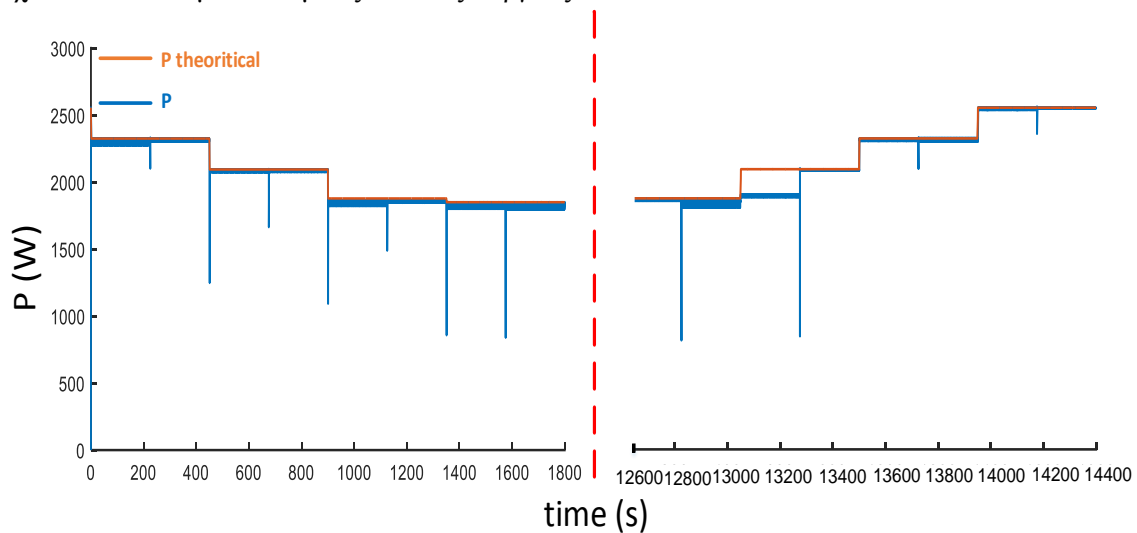
Πίνακας 5. 8. Αρχικές ρυθμίσεις παραμέτρων του αλγορίθμου στο [42], με αναφορά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου και ισχύ και για τα υπόλοιπα σενάρια.

Στάδια	Αρχικές Ρυθμίσεις
1 ^ο Στάδιο	Βήμα duty cycle P&O: 1%
2 ^ο Στάδιο	Κρίσιμη τιμή: $3 \cdot I_{pv}$ Περιοδικό χρονικό όριο: 7,5 min
3 ^ο Στάδιο	Βήμα σάρωσης (ΔV_{GSTEP}): $0,5 \cdot V_{oc,module}$

Στο Σχ. 5. 11 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.

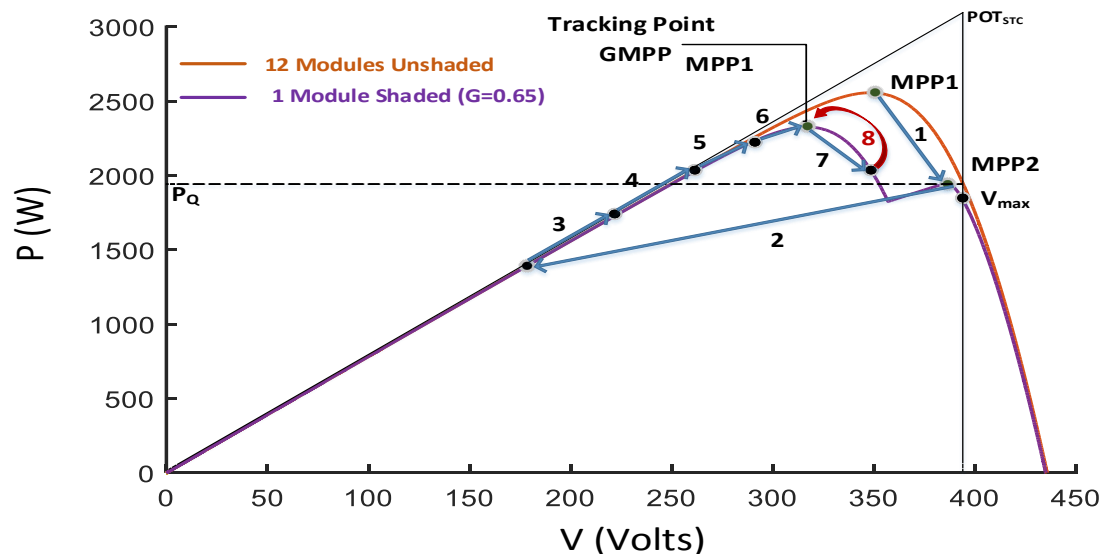
Στο πρώτο μισό της εξέλιξης του φαινομένου, κατά την άφιξη της σκίασης στο ΦΒ, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Στο δεύτερο μισό, όμως, κατά την υποχώρηση της σκίασης, ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει πρόβλημα στον εντοπισμό των αλλαγών κατάστασης, καθώς οι αλλαγές στην κλίση της καμπύλης P-V δεν είναι αρκετά μεγάλες για να ενεργοποιήσουν τη συνθήκη του δεύτερου σταδίου λειτουργίας. Το κυριότερο πρόβλημα εντοπίζεται κατά την υποχώρηση της σκίασης από το δεύτερο πλαίσιο. Εκεί, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει από το MPP2, που έχει συγκλίνει σωστά στην προηγούμενη κατάσταση, στο MPP2 της επόμενης κατάστασης, το οποίο δεν αποτελεί το GMPP. Η αλλαγή κατάστασης δεν αναγνωρίζεται, και

έτσι μέχρι την ενεργοποίηση του περιοδικού χρονικού ορίου, το GMPP (MPP1) δεν εντοπίζεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα εκτεταμένες απώλειες ενέργειας.



Σχ. 5.11. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Σε αυτό το σημείο, φαίνεται και ο καθοριστικός ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει η ύπαρξη του περιοδικού χρονικού ορίου για την ενεργοποίηση του τρίτου σταδίου και την αναζήτηση του GMPP. Χωρίς την ύπαρξή του, στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι απώλειες ενέργειας θα ήταν ακόμα μεγαλύτερες. Στο Σχ. 5.12, παρακάτω, παρουσιάζεται ενδεικτικά η λειτουργία του τρίτου σταδίου μετά τη σκίαση του πρώτου πλαισίου της ΦΒ πλαίσιοσειράς.



Σχ. 5.12. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [42] κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Παρατηρώντας το Σχ. 5.12, αρχικά βλέπουμε ότι με την σκίαση του πρώτου πλαισίου, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει διαγώνια, και όχι κατακόρυφα (1), από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP2 της δεύτερης καμπύλης. Αυτό οφείλεται στην αργή μεταβολή της ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, αφού μετρηθεί και αποθηκευτεί η τιμή P_Q στο σημείο μετάβασης, υπολογίζεται η τιμή $V_{\min STC} = P_Q / I_{sc}$ και το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει εκεί (2). Με αφετηρία και κατώτατο όριο τη συγκεκριμένη τιμή τάσης, ο αλγόριθμος ξεκινά να πραγματοποιεί βήματα σάρωσης της καμπύλης P-V με ανώτερο όριο

τάσης το 90% της συνολικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης (3) – (7). Σε κάθε βήμα αποθηκεύεται η τιμή της ισχύος και στο τέλος το σημείο λειτουργίας επιστρέφει στην περιοχή με τη μεγαλύτερη ενεργειακή στάθμη, συγκλίνοντας στο GMPP (8). Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 9, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο πρώτο σενάριο σκίασης.

Πίνακας 5. 9. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
99	6,57	300	20	98,75	59,58

5.1.2.E Ο αλγόριθμος των Qi, Zhang, Chen

Στο πρώτο στάδιο, ο αλγόριθμος στο [31] χρησιμοποιεί την κλασική μέθοδο P&O, για την οποία έχει επιλεγεί η ενιαία τιμή βήματος του duty cycle 1%. Στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας, η εξεταζόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί συνδυαστικά δύο μαθηματικές συνθήκες για την αναγνώριση της μεταβολής κατάστασης. Οι σχέσεις αυτές είναι οι εξής: $\Delta V \cdot \Delta I \geq 0$ και $\Delta I\% > \varepsilon_1$. Με λίγα λόγια, δηλαδή, υπάρχει η απαίτηση η μεταβολή του ρεύματος και της τάσης να ακολουθούν μια ομόσημη κατεύθυνση, ενώ, παράλληλα, η μεταβολή του ρεύματος να υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή ε_1 , ώστε να αναγνωριστεί από τον αλγόριθμο κάποια σκίαση. Η κρίσιμη σταθερά για τη μεταβολή του ρεύματος, όπως προτείνεται από τους δημιουργούς του αλγορίθμου, είναι 0,1 για τις συγκεκριμένες συνθήκες δοκιμής του αλγορίθμου από τους συγγραφείς. Μετά από δοκιμές, όμως, στη μοντελοποίηση της παρούσας διπλωματικής, η τιμή αυτή έχει προσαρμοστεί στο 0,0023. Όταν ενεργοποιείται το τρίτο στάδιο λειτουργίας, τώρα, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη γραμμή φορτίου, που ορίζεται από τη σχέση: $R = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$, σαν μπουσούλα για τον

εντοπισμό του GMPP. Ουσιαστικά, το σημείο λειτουργίας οδηγείται προς την περιοχή της τομής της γραμμής αυτής με την χαρακτηριστική P-V του συστήματος και, στη συνέχεια, συγκλίνει στο GMPP. Το βήμα duty cycle, με το οποίο οδηγείται το σημείο λειτουργίας προς τη γραμμή αυτή, έχει οριστεί στο 0,2%, ενώ η οριακή τιμή προσέγγισης της γραμμής στο 0,8.

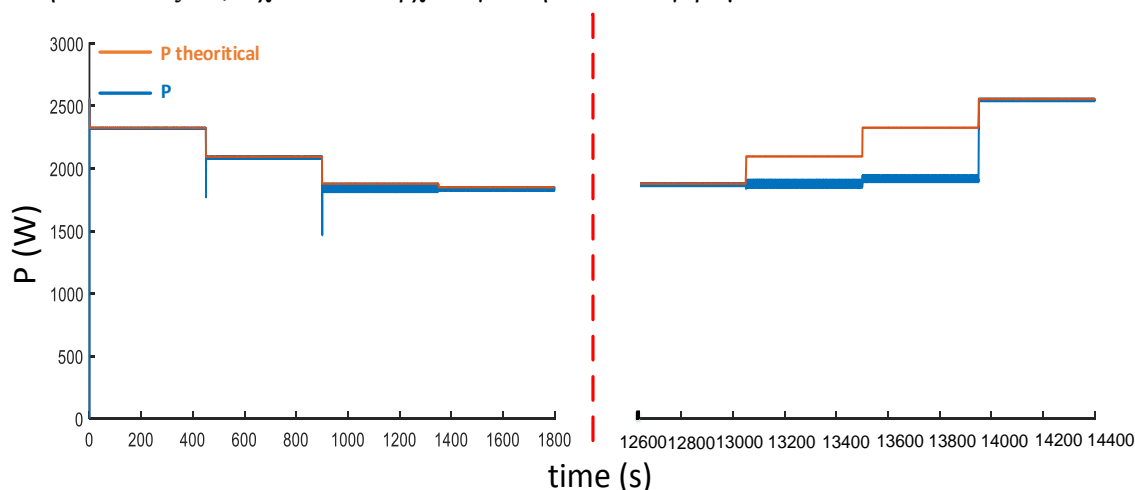
Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 5. 10.

Πίνακας 5. 10. Αρχικές ρυθμίσεις παραμέτρων του αλγορίθμου στο [31], με αναφορά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου και ισχύ και για τα υπόλοιπα σενάρια.

Στάδια	Αρχικές Ρυθμίσεις
1 ^ο Στάδιο	Βήμα duty cycle P&O: 1%
2 ^ο Στάδιο	ε_1 : 0,0023
3 ^ο Στάδιο	Οριακή τιμή προσέγγισης: 0,8 Βήμα προσέγγισης: 0,2% duty cycle

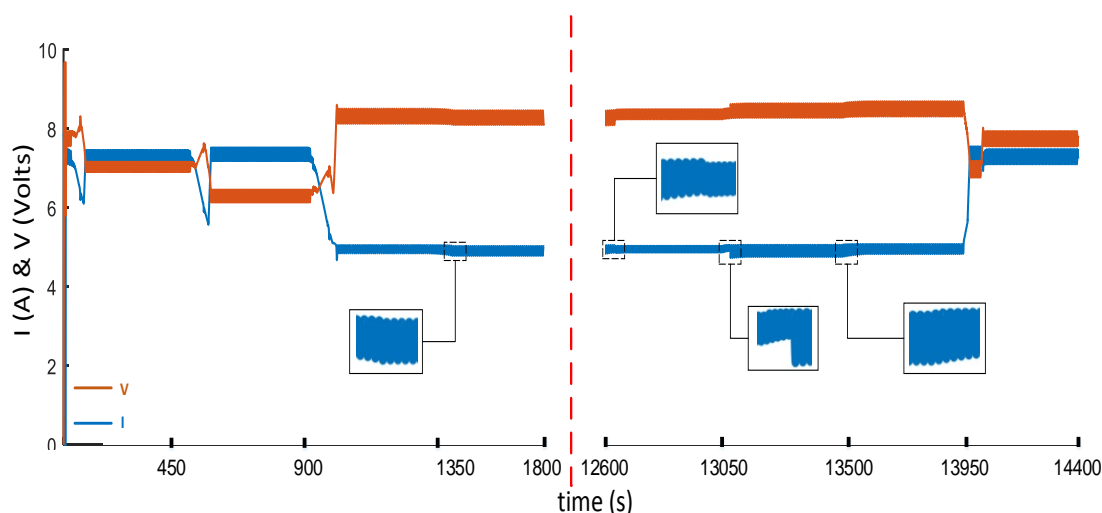
Στο Σχ. 5. 13 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο πρώτο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.

Στο πρώτο μισό της εξέλιξης του φαινομένου, κατά την άφιξη της σκίασης στο ΦΒ, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από την τελευταία, και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Στο δεύτερο μισό, όμως, κατά την υποχώρηση της σκίασης, ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει πρόβλημα στον εντοπισμό των αλλαγών κατάστασης, καθώς οι μεταβολές ρεύματος και τάσης δεν ικανοποιούν τα κριτήρια των συνθηκών για την ενεργοποίηση της αναζήτησης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας (Σχ. 5. 14). Κατά την υποχώρηση της σκίασης από πρώτο πλαίσιο, παρ' ότι η αλλαγή αυτή δεν εντοπίζεται, τυχαίνει να υπάρχει σύγκλιση από τον αλγόριθμο στο σωστό GMPP.



Σχ. 5. 13. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

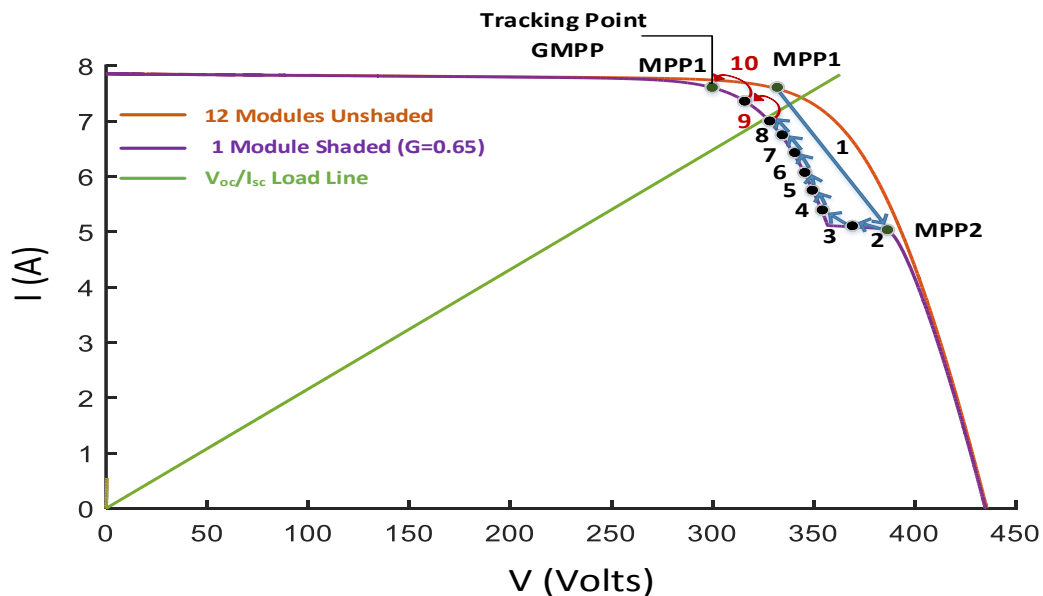
Κατά την υποχώρηση, όμως, της σκίασης από το δεύτερο και τρίτο πλαίσιο, εφ' όσον οι αλλαγές δεν εντοπίζονται, η σύγκλιση του αλγορίθμου πραγματοποιείται σε λάθος σημεία και, αναπόφευκτα, οι απώλειες σε ενέργεια είναι πάρα πολύ μεγάλες. Αυτό έχει αντίκτυπο, φυσικά, και στην απόδοση του αλγορίθμου που θα δούμε παρακάτω. Στο Σχ. 5. 15, παρακάτω, παρουσιάζεται ενδεικτικά η λειτουργία του τρίτου σταδίου μετά τη σκίαση του πρώτου πλαισίου της ΦΒ πλαισιοσειράς.



Σχ. 5. 14. Διάγραμμα εξαγόμενου ρεύματος και τάσης του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 15, παρατηρούμε τη μετάβαση του σημείου λειτουργίας από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP2 της δεύτερης καμπύλης (1). Αυτό οφείλεται στην αργή μεταβολή της ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, αφού εντοπιστεί η μεταβολή αυτή μπαίνει σε λειτουργία το τρίτο στάδιο του αλγορίθμου. Έτσι, ξεκινούν αμέσως τα βήματα προσέγγισης της γραμμής φορτίου $R = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$ (2) - (8).

Όταν το σημείο λειτουργίας φτάσει αρκετά κοντά στη γραμμή αυτή, θεωρητικά βρισκόμαστε στην περιοχή που κείται το GMPP, οπότε εκκινεί η διαδικασία σύγκλισης προς αυτό με τη βοήθεια του αλγορίθμου P&O (9) - (10).



Σχ. 5. 15. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 11, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο πρώτο σενάριο σκίασης.

Πίνακας 5. 11. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
96,31	5/7	500	250	458	21,80

5.1.2.F Ο αλγόριθμος των Μπατζέλη, Παπαθανασίου

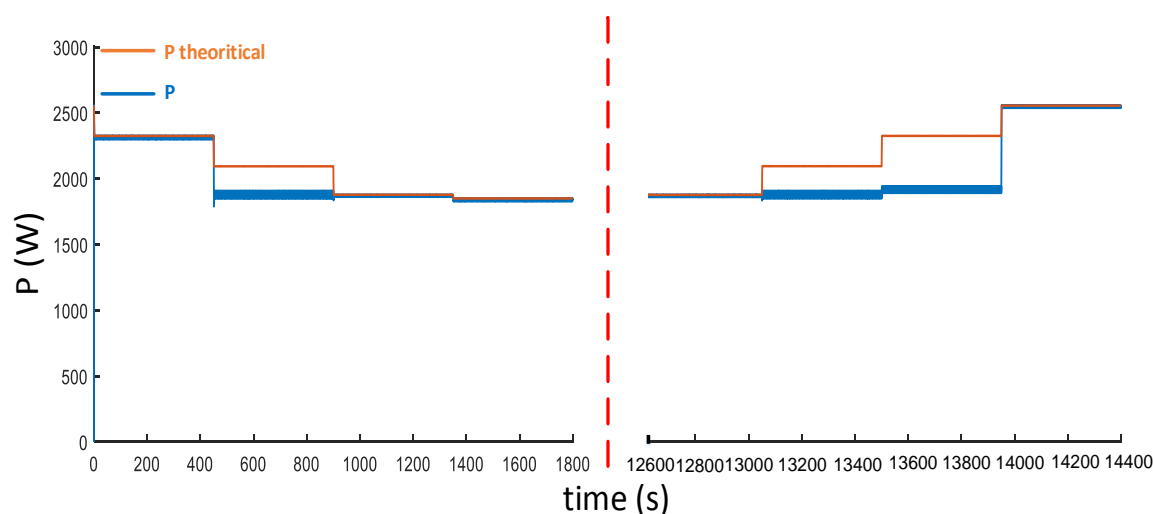
Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά στο [49], κατά το πρώτο στάδιο λειτουργίας του χρησιμοποιεί έναν οποιοδήποτε συμβατικό αλγόριθμο σύγκλισης. Στις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει υλοποιηθεί με τον αλγόριθμο P&O. Όπως και στις υπόλοιπες υλοποιήσεις το βήμα μεταβολής του duty cycle σε αυτό το στάδιο έχει οριστεί στο 1%. Στο δεύτερο στάδιο, τώρα, ο αλγόριθμος διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους και δεν κάνει χρήση κάποιας συνθήκης αναγνώρισης της σκίασης. Παρά ταύτα, κάνει χρήση ενός χρονικού ορίου σταθερής περιοδικότητας, το οποίο προσαρμόζεται στις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος εφαρμογής. Εδώ, έχουν επιλεγεί οι 15 κύκλοι λειτουργίας. Στο στάδιο αναζήτησης του GMPP, όπως έχει αναλυθεί και στο προηγούμενο

κεφάλαιο, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί κάποιες μαθηματικές σχέσεις εκτίμησης τόσο των παραμέτρων του ΦΒ όσο και των τιμών των LMPPs. Η παράμετρος που υπάρχει εδώ και ρυθμίζεται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις έχει να κάνει με την ευαισθησία του αλγορίθμου στο ποσοστό της έκτασης της σκίασης, ώστε να εκτιμήσει με μια ειδική διαδικασία την ένταση αυτής. Όλα αυτά στην περίπτωση που η ένταση της σκίασης είναι αρχικά άγνωστη. Στο παρόν σενάριο ο αλγόριθμος έχει ρυθμιστεί ώστε η συγκεκριμένη λειτουργία να ενεργοποιείται αμέσως μόλις σκιαστεί το πρώτο πλαίσιο της συστοιχίας, δηλαδή το 8% της συνολικής έκτασης. Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 5. 12.

Πίνακας 5. 12. Αρχικές ρυθμίσεις παραμέτρων του αλγορίθμου στο [49], με αναφορά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου και ισχύ και για τα υπόλοιπα σενάρια.

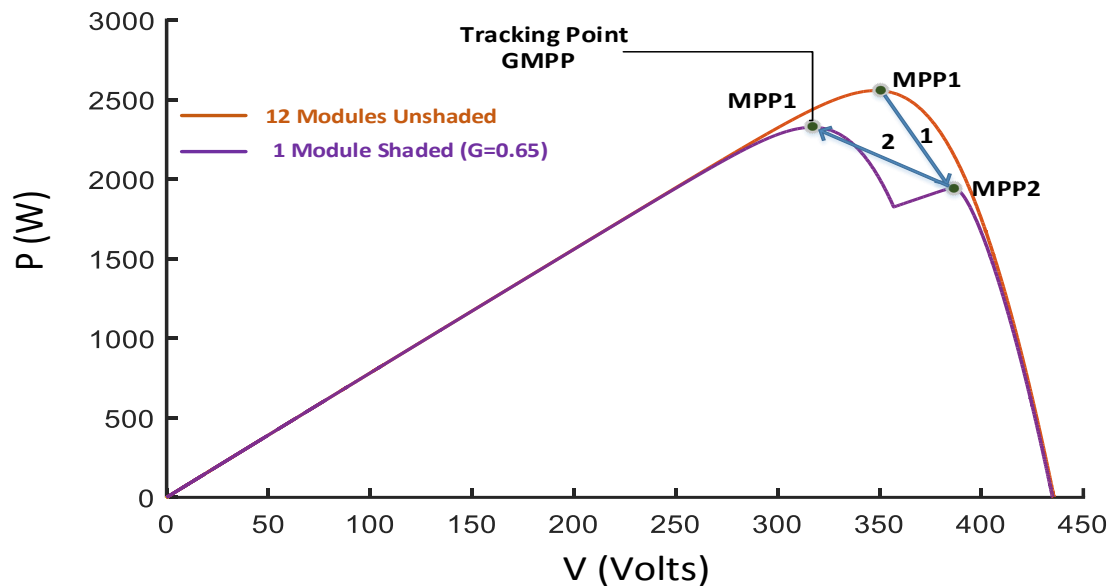
Στάδια	Αρχικές Ρυθμίσεις
1 ^ο Στάδιο	Βήμα duty cycle P&O: 1%
2 ^ο Στάδιο	Χρονικό όριο: 15 κύκλοι λειτουργίας
3 ^ο Στάδιο	Οριακή τιμή σκίασης: 8% της συνολικής έκτασης

Στο Σχ. 5. 16 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο πρώτο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική. Με την άφιξη της σκίασης στο πρώτο πλαίσιο, ο αλγόριθμος εντοπίζει την αλλαγή αυτή στην κατάσταση του συστήματος και μεταβαίνει στο MPP2 για να υπολογίσει την παράμετρο s , δηλαδή ουσιαστικά την ένταση της ακτινοβολίας σκίασης, ώστε να μπορεί αν χρησιμοποιήσει σωστά της σχέσεις ενεργειακής εκτίμησης των εκάστοτε LMPPs. Στη συνέχεια, όμως, ο αλγόριθμος αποτυγχάνει πλήρως στον εντοπισμό των GMPPs, καθώς όπως αναφέρεται ξεκάθαρα και στο [], βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία του αποτελεί η μετάβαση από το MPP1 της μιας κατάστασης στο MPP1 της επόμενης. Αντίστοιχα και για το MPP2. Επειδή, όμως, το συγκεκριμένο σενάριο είναι αρκετά αργό στις μεταβολές του, αυτό δε συμβαίνει. Ενδεικτικά, στα Σχ. 5. 17 και Σχ. 5. 18, παρουσιάζεται η αποτυχία αυτή του αλγορίθμου και, στη συνέχεια, εξηγείται λεπτομερώς η αιτία της.

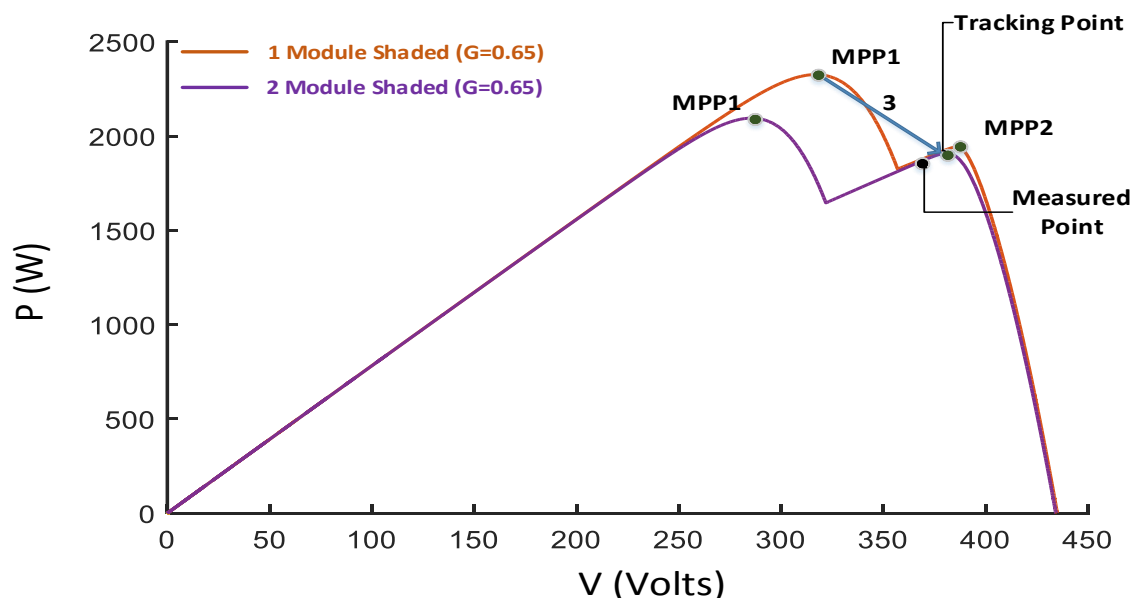


Σχ. 5. 16. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Πιο αναλυτικά, λοιπόν, βλέπουμε ότι με την σκίαση του πρώτου πλαισίου, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει διαγώνια προς την περιοχή του MPP2 της δεύτερης καμπύλης (1). Η μεταβολή αυτή εντοπίζεται από τον αλγόριθμο περίπου στα μέσα της. Τότε, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει αμέσως στο MPP2 και υπολογίζεται η ένταση του επιπέδου ακτινοβολίας της σκίασης. Έτσι γίνεται εκτίμηση της ισχύος των δύο LMPPs και το Σ.Λ. μεταβαίνει (2) αυτόματα στο MPP1, το οποίο αποτελεί το GMPP σε αυτή την κατάσταση. Στη συνέχεια, όμως, κατά της σκίαση και του δεύτερου πλαισίου, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει κατά το γνωστό μοτίβο αυτού του σεναρίου σκίασης από το MPP1 προς το MPP2 της επόμενης κατάστασης (3).



Σχ. 5. 17. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.



Σχ. 5. 18. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να αναγνωρίζει στη συνέχεια το σημείο αυτό σαν το MPP1, ενώ στην πραγματικότητα βρίσκεται στο MPP2. Έτσι κάνει εκτίμηση μέσω των σχέσεων για το MPP2 (περίπου στο υποδειγμένο σημείο του Σχ. 5. 18), και αποτυγχάνει.

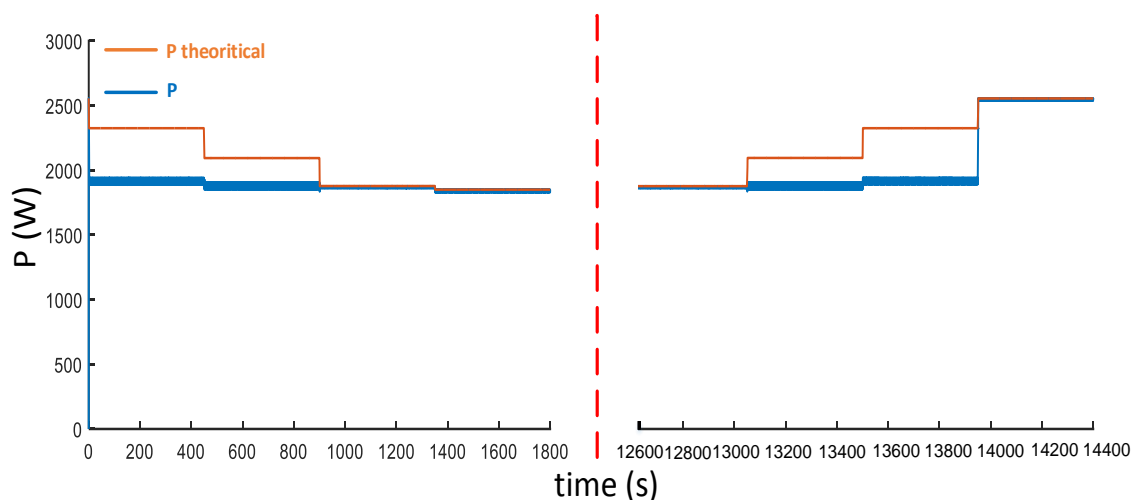
Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 13, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο πρώτο σενάριο σκίασης.

Πίνακας 5. 13. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
95,1	4/7	1000	10	174	14,75

5.1.2.G Οι συμβατικοί αλγόριθμοι *Perturb & Observe(P&O)* και *Incremental Conductance(INC)*

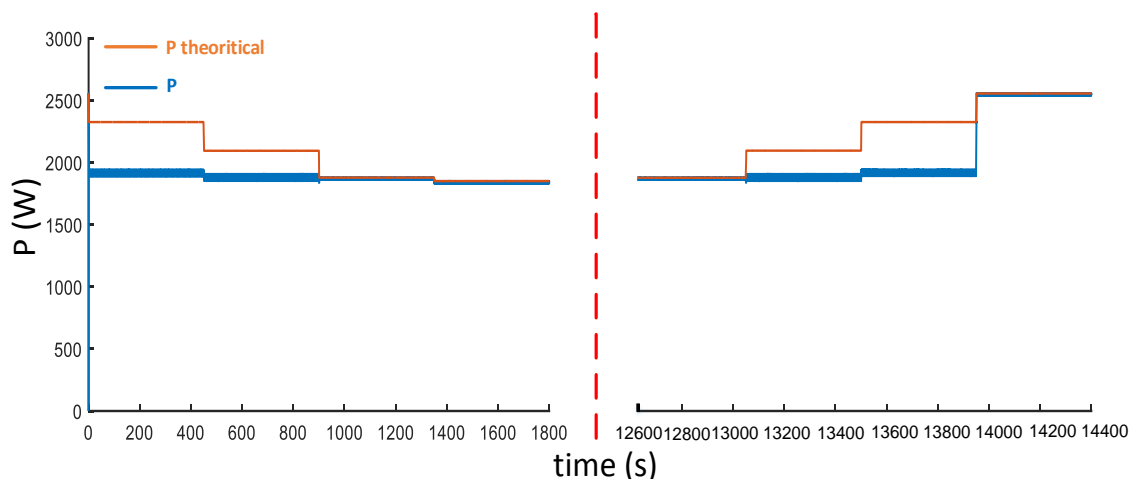
Για την πληρότητα της μελέτης της αποδοτικότητας των αλγορίθμων MPPT που εξετάζονται, είναι αναγκαία η σύγκριση τους με τις επιδόσεις των γνωστότερων και παλαιότερων συμβατικών αλγορίθμων στις ίδιες συνθήκες δοκιμών. Για το λόγο αυτό, οι ευρέως διαδεδομένοι κλασσικοί αλγόριθμοι P&O και INC προσομοιώθηκαν στα ίδια σενάρια σκίασης με τους υπόλοιπους. Τα γραφήματα των ισχύων τους, καθώς και τα στατιστικά της αποδοτικότητας τους παρουσιάζονται, παρακάτω, στα Σχ. 5. 19, Σχ. 5. 20 και στους Πίνακες Πίνακας 5. 14 και Πίνακας 5. 15.



Σχ. 5. 19. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου P&O, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Πίνακας 5. 14. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου P&O, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
92,65	3/7	10	10	10	5



Σχ. 5. 20. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου INC, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Πίνακας 5. 15. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου INC, κατά το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
92,67	3/7	10	10	10	4

5.1.3 Συνοπτική σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου

Συνοψίζοντας, στον Πίνακα 5. 16 παρουσιάζονται τα συγκεντρικά στατιστικά των οκτώ αλγορίθμων οι οποίοι δοκιμάστηκαν στο σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Πίνακας 5. 16. Συγκεντρικά στατιστικά των αλγορίθμων MPPT στο πρώτο σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου.

Algorithms	Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
			Max.	Min.	Average	Max.
[35]	99,50	7/7	1800	350	889,28	99,88
[36]	99,65	7/7	1600	900	1137,50	90,64
[40]	99,70	7/7	300	150	208,35	98,84
[42]	99,00	6,5/7	300	20	98,75	59,58
[31]	96,31	5/7	500	250	458,00	21,80
[49]	95,10	4/7	600	10	90,00	14,75
P&O	92,65	3/7	10	10	10,00	5,00
INC	92,67	3/7	10	10	10,00	4,00

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές και συγκεντρώνονται στον παραπάνω πίνακα, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο πιο αποδοτικός αλγόριθμος στο συγκεκριμένο σενάριο δοκιμών είναι αυτός στο [40], ο οποίος συγκλίνει με επιτυχία και στα επτά εμφανιζόμενα GMPP κατά τη διάρκεια του σεναρίου και έχοντας μέση απόδοση MPPT που αγγίζει το 99,7%. Πρέπει, βέβαια, σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι παρατηρούνται υψηλά ποσοστά αποδόσεων MPPT σε όλους τους αλγόριθμους, καθώς το παρόν σενάριο σκίασης είναι πολύ αργό. Πρακτικά, δηλαδή, το σύστημα, με τη βοήθεια των αλγορίθμων, σταθεροποιείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε συγκεκριμένες τιμές ισχύων και οι διακυμάνσεις είναι χρονικά πολύ σύντομες σε σύγκριση με τη συνολική διάρκεια του σεναρίου.
2. Ο αλγόριθμος MPPT, ο οποίος επιτυγχάνει τη μέση γρηγορότερη σύγκλιση στο εκάστοτε σταθερό σημείο λειτουργίας, είναι αυτός στο [49]. Βέβαια, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, η απόδοση του αλγορίθμου σε αυτό το σενάριο είναι χαμηλή συγκριτικά με τους υπόλοιπους και πλησιάζει το 95,1%, ενώ καταφέρνει να συγκλίνει επιτυχώς μόνο σε 4 από τα συνολικά επτά GMPP.
3. Ο αλγόριθμος MPPT, όπου εμφανίζεται η μικρότερη μέγιστη διακύμανση ισχύος κατά τη διάρκεια της αναζήτησης των GMPP (εξαιρώντας τους δύο συμβατικούς αλγόριθμους), είναι και πάλι αυτός στο [49]. Βέβαια, και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει το μεγάλο μειονέκτημα της μειωμένης απόδοσης MPPT. Αξίζει, εδώ, να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος στο [40], ο οποίος είναι ο αποδοτικότερος, παρουσιάζει, παράλληλα, τη δεύτερη υψηλότερη μέγιστη διακύμανση ισχύος κατά τα διαστήματα αναζήτησης των GMPP. Η διακύμανση αυτή αγγίζει το 98,84%, ποσοστό που είναι υπερβολικά μεγάλο.
4. Οι δύο συμβατικοί αλγόριθμοι που δοκιμάστηκαν στο σενάριο αυτό δεν περιέχουν κάποιον συγκεκριμένο μηχανισμό αναζήτησης του GMPP. Έτσι δεν παρουσιάζουν διακυμάνσεις ισχύος και επίσης ο χρόνος σύγκλισης τους είναι κοντά στον ένα κύκλο λειτουργίας του μοντέλου (10 ms). Παράλληλα, όμως, καθώς το σημείο σύγκλισής τους είναι καθαρά θέμα χαρακτηριστικών του συστήματος και του σεναρίου δοκιμών, η απόδοση του είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους καθώς καταφέρνουν να συγκλίνουν επιτυχώς μόνο στα τρία από τα συνολικά επτά εμφανιζόμενα GMPP.

5.2 Δεύτερο σενάριο σκίασης: Σενάριο σκίασης οροφής

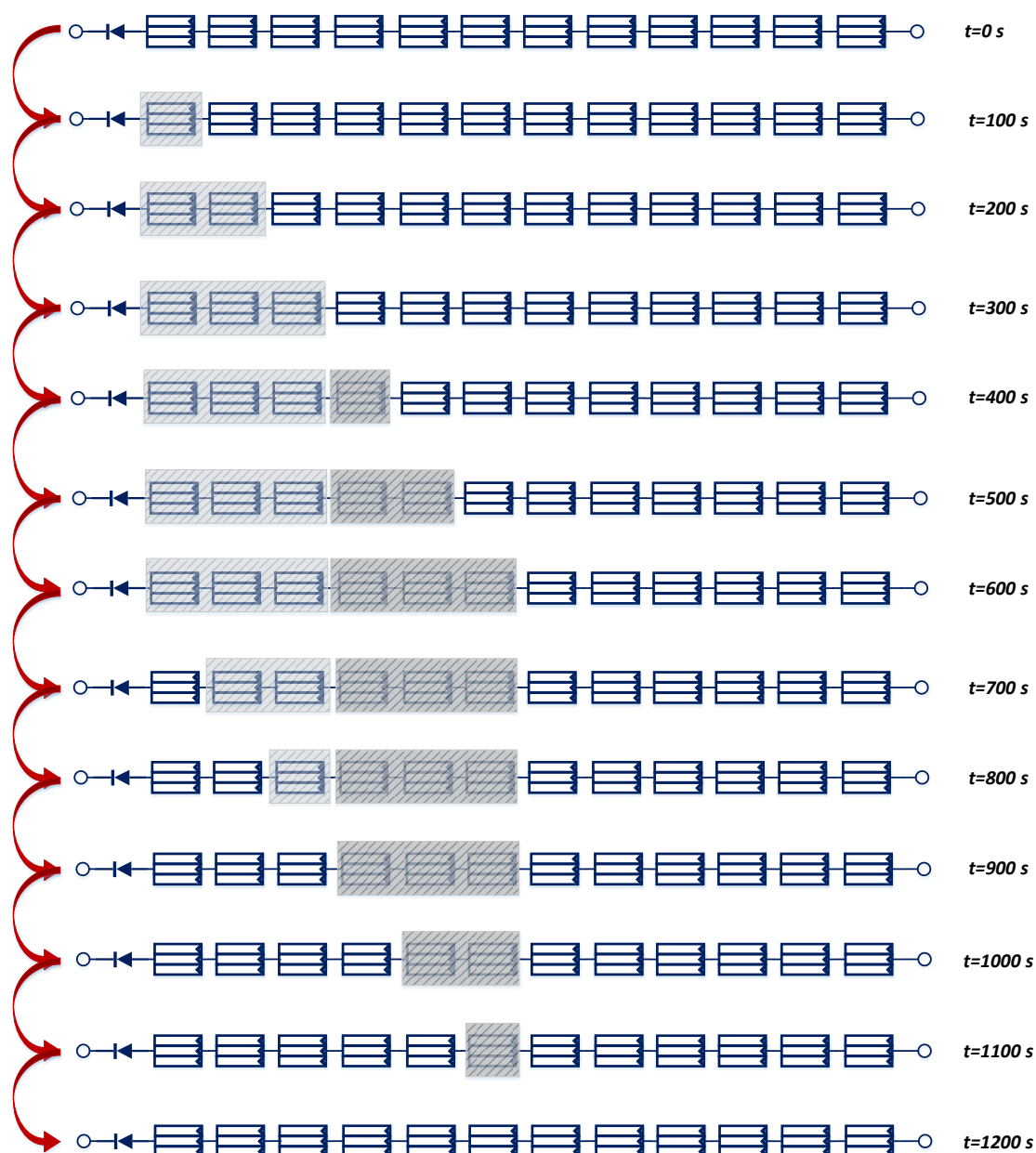
5.2.1 Ανάλυση του σεναρίου σκίασης οροφής

Το δεύτερο σενάριο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, αντιπροσωπεύει τη μερική σκίαση που δημιουργείται στη ΦΒ συστοιχία, η οποία σε αυτή την περίπτωση βρίσκεται σε μια οροφή κτιρίου (rooftop), λόγω δύο διαφορετικών εμποδίων του περιβάλλοντα χώρου. Τα φυσικά εμπόδια εδώ μπορεί να είναι, για παράδειγμα: κάποια καμινάδα ή κάποιο ψηλό δέντρο κ.α. Η ΦΒ πλαισιοσειρά δέχεται ακτινοβολία της τάξεως των 1000 W/m², σε μια ηλιόλουστη ημέρα του χρόνου χωρίς νέφωση, μέχρι ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, όπου η θέση του ήλιου είναι τέτοια και εκκινείται η σκίαση. Το σημείο εκκίνησης του φαινομένου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται την ακριβή θέση της εγκατάστασης, τη γωνία πρόσπτωσης των ακτινών του ήλιου, κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του τρόπου διάταξης της, κ.α. Οι παράγοντες αυτοί και το ακριβές χρονικό σημείο εκκίνησης και λήξης της σκίασης δεν σχετίζονται με την ποιοτική εξέλιξη της, οπότε δεν αφορούν την παρούσα διπλωματική εργασία. Κατά

συνέπεια, δεν θα αναλυθούν. Τα επίπεδα ακτινοβολίας που σχετίζονται με τη σκίαση είναι δύο και συνολικά τα επίπεδα ακτινοβολίας που επηρεάζουν τη ΦΒ συστοιχία όταν αυτή είναι σκιασμένη στο μέγιστο δυνατό επίπεδο του σεναρίου, είναι τρία. Τα επίπεδα ακτινοβολίας της σκίασης που έχουν επιλεγεί, έχουν ένταση $G_1=650 \text{ W/m}^2$ και $G_2=400 \text{ W/m}^2$. Η μέγιστη έκταση της σκιασμένης επιφάνειας της ΦΒ συστοιχίας έχει επιλεγεί να είναι τα 6 πλαίσια, δηλαδή το 50% της συνολικής επιφάνειας. Όταν η μέγιστη έκταση της πλαισιοσειράς είναι σκιασμένη, 3 πλαίσια επηρεάζονται από τη μια ακτινοβολία και 3 από την άλλη, ενώ 6 πλαίσια είναι εντελώς ασκίαστα.

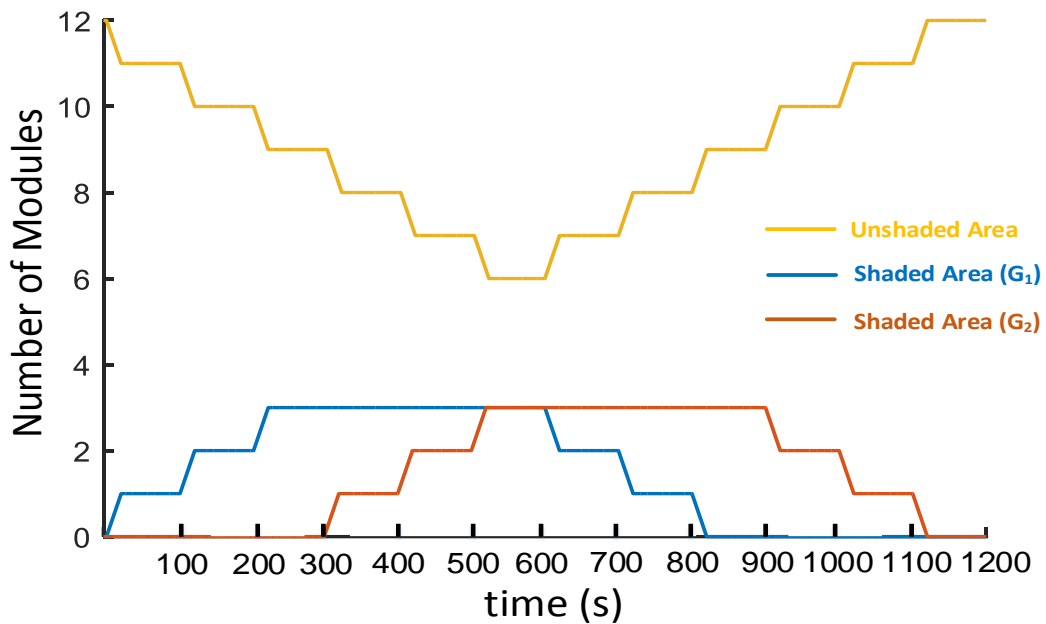
Πιο αναλυτικά, κάποια χρονική στιγμή της ημέρας και όταν ο ήλιος παίρνει μια συγκεκριμένη θέση, ξεκινά να σκιάζεται ένα συγκεκριμένο πλαίσιο της ΦΒ πλαισιοσειράς, καθώς το πρώτο εμπόδιο καταλαμβάνει στο χώρο θέση τέτοια ώστε να παρεμβάλλεται ανάμεσα στον ήλιο και στο πλαίσιο αυτό. Η σκίαση εκτείνεται σταδιακά. Στη συνέχεια, άλλα δύο πλαίσια (συνολικά τρία) από τα δώδεκα σκιάζονται, το ένα μετά το άλλο, από το συγκεκριμένο αντικείμενο. Αμέσως μετά, η θέση του ήλιου γίνεται τέτοια ώστε ένα δεύτερο αντικείμενο ξεκινά να επηρεάζει με τρόπο παρόμοιο με το πρώτο, άλλα τρία πλαίσια της ΦΒ συστοιχίας, ενώ τα τρία προηγούμενα παραμένουν σκιασμένα. Η σκίαση, από την εκκίνησή της μέχρι την κάλυψη όλων των έξι συνολικά πλαισίων διαρκεί 10 λεπτά, δηλαδή 600 δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού, και όταν ο ήλιος πάρει κατάλληλη θέση, η σκίαση των πλαισίων αρχίζει να υποχωρεί σταδιακά, με τρόπο αντίστοιχο της εξάπλωσης της. Σαν βήμα σκίασης της ΦΒ πλαισιοσειράς έχει επιλεγεί το ένα πλαίσιο, ενώ ο χρονισμός μεταβολής της ακτινοβολίας από το επίπεδο των 1000 W/m^2 σε αυτό των 650 W/m^2 και των 400 W/m^2 , για το κάθε πλαίσιο, είναι το ένα δευτερόλεπτο. Τα έξι πλαίσια σκιάζονται και αποσκιάζονται, ανά σταθερό χρονικό διάστημα περίπου 1 λεπτού και 40 δευτερολέπτων (100 δευτερόλεπτα). Πρέπει, σε αυτό το σημείο, να τονιστεί όπως και στο πρώτο σενάριο σκίασης ότι το βήμα σκίασης έχει οριστεί στο ένα πλαίσιο, και όχι σε κάποια μικρότερη δομική μονάδα, για πρακτικούς λόγους. Αφενός, από την επιλογή αυτή, δεν επηρεάζονται ποιοτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις δοκιμές μας, και αφετέρου οι χρόνοι προσομοιώσεων μειώνονται αισθητά και γίνονται διαχειρίσιμοι. Το σενάριο αυτό, όπως και το πρώτο, είναι ένα σενάριο αργής εξάπλωσης της σκίασης όπου η βασική του διαφορά είναι ότι περιέχει τα τρία επίπεδα ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου, για την επιλογή του ενός δευτερολέπτου σαν χρονισμό εξάπλωσης και υποχώρησης της σκίασης από το κάθε πλαίσιο, ισχύει η παρατήρηση της βιβλιογραφίας που αναφέρθηκε, παραπάνω, στην ανάλυση του πρώτου σεναρίου.

Παρακάτω, στα Σχ. 5. 21 και Σχ. 5. 22, παρουσιάζεται, αντίστοιχα, σχηματικά και γραφικά, η εξέλιξη του φαινομένου.

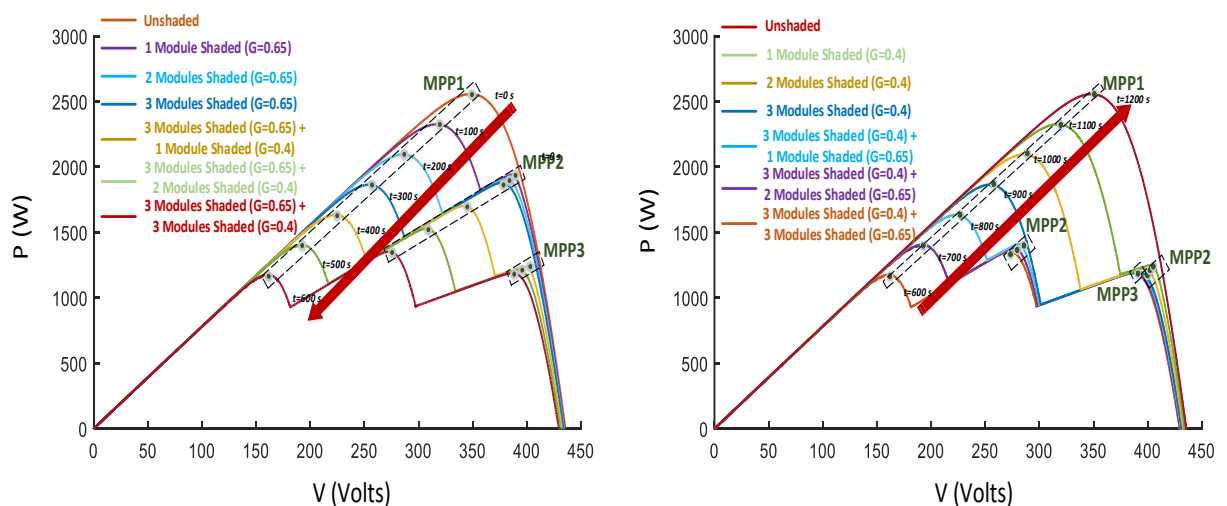


Σχ. 5. 21. Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης στα 6/12 πλαίσια της συστοιχίας, κατά το σενάριο σκίασης οροφής. Με αχνό γκρι χρώμα έχει τονιστεί το επίπεδο ακτινοβολίας των 650 W/m^2 και με έντονο γκρι χρώμα αυτό των 400 W/m^2 .

Με τη σταδιακή άφιξη και υποχώρηση της σκίασης στα πλαίσια του ΦΒ, οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας μεταβάλλονται ανάλογα με το πόσα πλαίσια είναι σκιασμένα κάθε φορά και από ποιο επίπεδο ακτινοβολίας επηρεάζονται. Παρακάτω, στο Σχ. 5. 23, φαίνονται οι χαρακτηριστικές P-V του συστήματος στα διάφορα στάδια λειτουργίας, τόσο κατά την άφιξη όσο και κατά την υποχώρηση της σκίασης.



Σχ. 5. 22. Γραφική αναπαράσταση της σκιασμένης και ασκίαστης περιοχής της συστοιχίας, σε κοινό γράφημα, κατά το σενάριο σκίασης οροφής.



Σχ. 5. 23. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας P-V, στα διάφορα στάδια εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης, κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Στον Πίνακα 5. 17 συνοψίζονται όλα τα χαρακτηριστικά του πρώτου σεναρίου σκίασης, τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 5. 17. Χαρακτηριστικά του σεναρίου σκίασης οροφής.

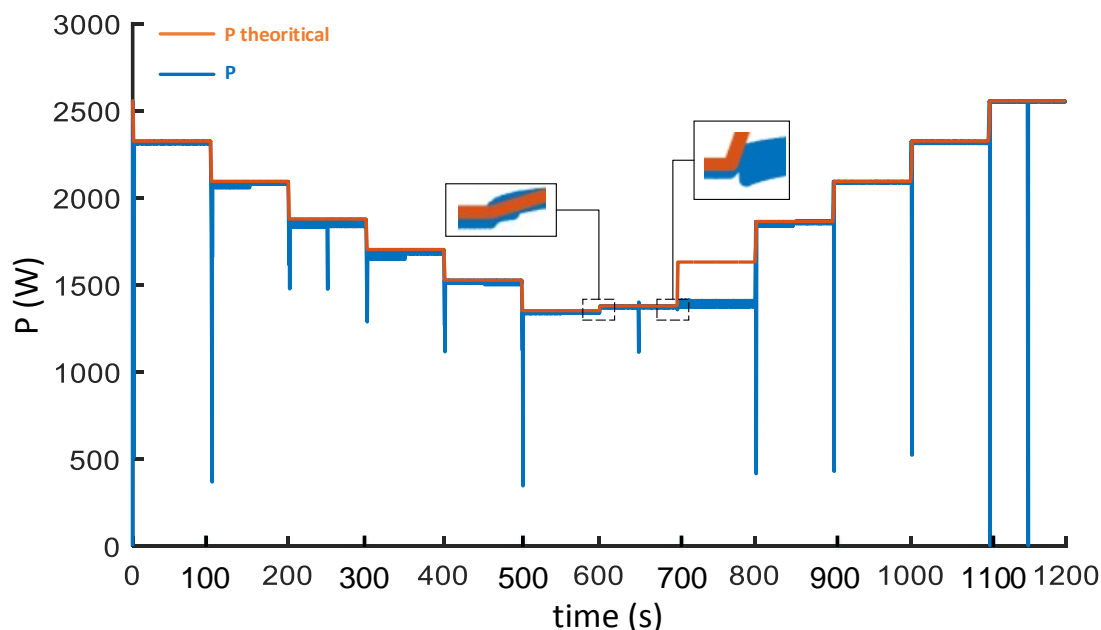
Επίπεδα Ακτινοβολίας	Ένταση επιπέδων ακτινοβολίας	Μέγιστη έκταση σκίασης	Βήμα δομικής ΦΒ μονάδας σκίασης	Ρυθμός μεταβολής ακτινοβολίας	Συνολική διάρκεια φαινομένου
3	1 ^ο : 1000 W/m ² 2 ^ο : 650 W/m ² 3 ^ο : 400 W/m ²	6/12 πλαίσια (50%)	1 πλαίσια	350 W/m ² *s και 600 W/m ² *s	20 λεπτά

5.2.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης οροφής

5.2.2.A Ο αλγόριθμος των Patel, Agarwal

Η επιλογή των παραμέτρων του αλγορίθμου στο [35] για αυτό το σενάριο είναι ακριβώς ίδια με την επιλογή που έγινε στο πρώτο σενάριο.

Παρακάτω, στο Σχ. 5. 24, παρουσιάζεται το διάγραμμα της εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ συστήματος, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [35], στο δεύτερο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική εξαγόμενη τιμή της ισχύος του αλγορίθμου, ενώ με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται η θεωρητική μέγιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος που θα είχε το σύστημα σε ιδανικές συνθήκες, για κάθε κατάσταση. Παρατηρούμε ότι, σε γενικές γραμμές, ο αλγόριθμος κάνει σωστά τη δουλειά του και εντοπίζει κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από δύο: κατά την υποχώρηση της σκίασης από το πρώτο και το δεύτερο πλαίσιο. Στη δεύτερη από αυτές τις δύο περιπτώσεις, η σύγκλιση αποτυγχάνει και γίνεται σε λάθος τοπικό μέγιστο της καμπύλης P-V. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, φυσικά, αρκετά μεγάλες απώλειες ισχύος και απόδοσης. Σε όλες τις υπόλοιπες μεταβολές ο αλγόριθμος λειτουργεί όπως πρέπει.



Σχ. 5. 24. . Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Σε κάθε αλλαγή κατάστασης, δηλαδή με την σκίαση κάθε επιπλέον πλαισίου, μπαίνει σε εφαρμογή το στάδιο εντοπισμού του GMPP. Βλέπουμε αρκετά μεγάλες και απότομες μεταβολές της ισχύος στα σημεία όπου μπαίνει σε εφαρμογή το στάδιο αυτό. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι παρόμοιας κλίμακας με τις αντίστοιχες στο πρώτο σενάριο ανοικτού χώρου. Η σύρωση, πρακτικά, προσεγγίζει ακραία τμήματα της καμπύλης, με αποτέλεσμα οι απώλειες ισχύος που προκαλούνται να είναι αρκετά μεγάλες. Η λειτουργία του τρίτου σταδίου του αλγορίθμου, δηλαδή αυτό του εντοπισμού του GMPP, είναι εντελώς παρόμοια με την αναλυτική περιγραφή που έγινε στο πρώτο σενάριο λειτουργίας.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 18, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης οροφής.

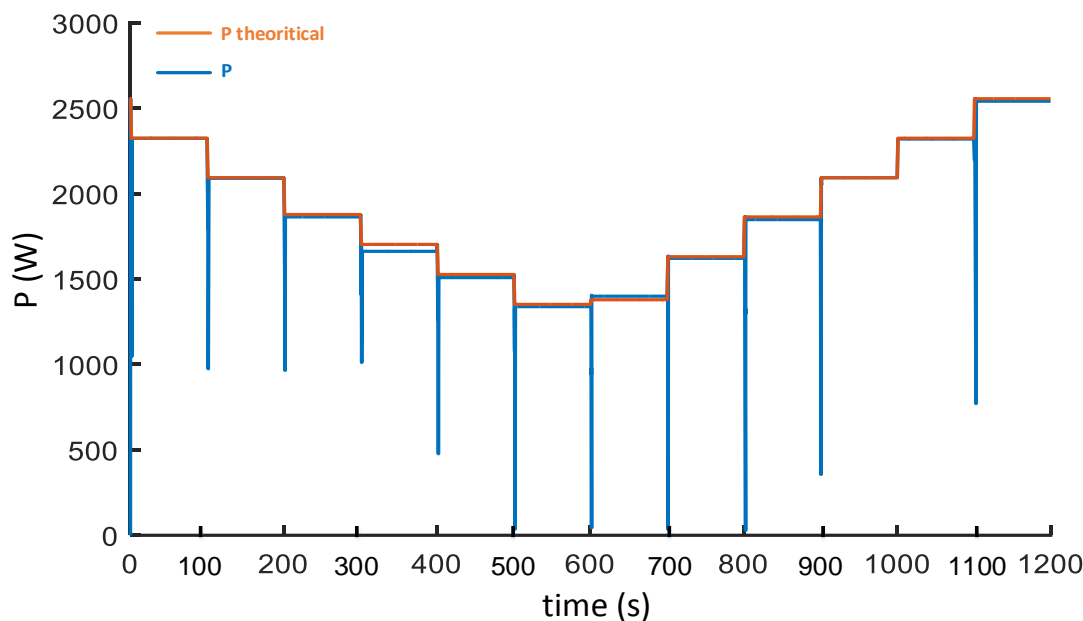
Πίνακας 5. 18. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
98,46	10/11	1900	300	1031,81	99,87

5.2.2.B Ο αλγόριθμος των Tey, Mekhilef

Η ρύθμιση των αρχικών παραμέτρων του αλγορίθμου στο [36] έγινε, όπως προηγουμένως, με τον ίδιο τρόπο όπως στο πρώτο σενάριο σκίασης.

Στο Σχ. 5. 25 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του ΦΒ συστήματος κατά το δεύτερο σενάριο σκίασης, με την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Όπως και πριν, με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.



Σχ. 5. 25. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Παρατηρείται εύκολα ότι ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από μια, και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Υπάρχουν και εδώ αρκετά απότομες-και μεγάλες σε κάποιες περιπτώσεις-διακυμάνσεις της ισχύος που οφείλονται στη λειτουργία του τρίτου σταδίου. Οι μεταβολές αυτές είναι μικρότερες από ότι στον προηγούμενο αλγόριθμο. Επίσης, εδώ, όταν ο αλγόριθμος συγκλίνει στο εκάστοτε GMPP, σταθεροποιεί την τιμή του duty cycle σε μια συγκεκριμένη τιμή και δεν θέτει σε λειτουργία τον αλγόριθμο INC του πρώτου σταδίου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν διακυμάνσεις της ισχύος. Έτσι, συνδυαστικά και με το μεγαλύτερο βήμα σάρωσης, οι συνολικές απώλειες ισχύος είναι αρκετά μικρές συγκριτικά και με άλλους αλγόριθμους, κάτι που φαίνεται και στη μέση

απόδοση MPPT του αλγορίθμου. Η λειτουργία του τρίτου σταδίου αναζήτησης του GMPP είναι ίδια με αυτή που αναλύθηκε πριν, οπότε δεν επαναλαμβάνεται.

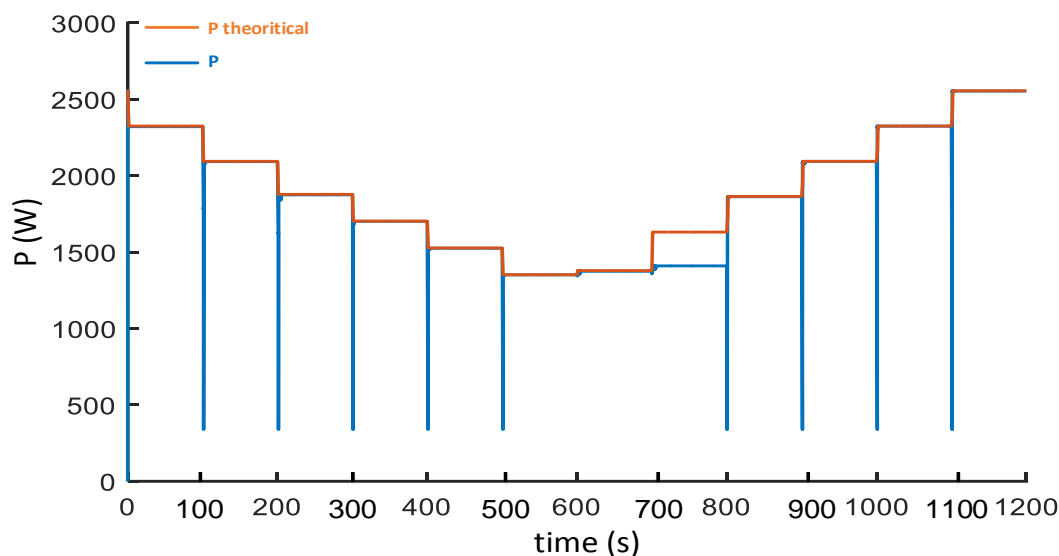
Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 19, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης οροφής.

Πίνακας 5. 19. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
99,3	11/11	1500	800	1209,10	98,50

5.2.2.C Ο αλγόριθμος των Kouchaki, Iman-Eini, Asaei

Στο Σχ. 5. 26 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο δεύτερο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική. Όπως και στον αλγόριθμο στο [35], λόγω της χρήσης κοινής συνθήκης εντοπισμού της σκίασης στο δεύτερο στάδιο, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος δεν εντοπίζει δύο αλλαγές κατάστασης: κατά την υποχώρηση της σκίασης από το πρώτο και το δεύτερο πλαίσιο.



Σχ. 5. 26. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Στη δεύτερη από αυτές τις δύο περιπτώσεις, η σύγκλιση γίνεται σε λάθος μέγιστο της καμπύλης P-V και δεν επέρχεται ποτέ σωστή σύγκλιση (ομοίως με τον αλγόριθμο στο [35]). Σε όλες τις υπόλοιπες μεταβολές ο αλγόριθμος εντοπίζει σωστά το GMPP. Η λειτουργία του σταδίου αναζήτησης του GMPP, έχει περιγραφεί αναλυτικά στο πρώτο σενάριο προσομοιώσεων και είναι εντελώς όμοια.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 20, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης οροφής.

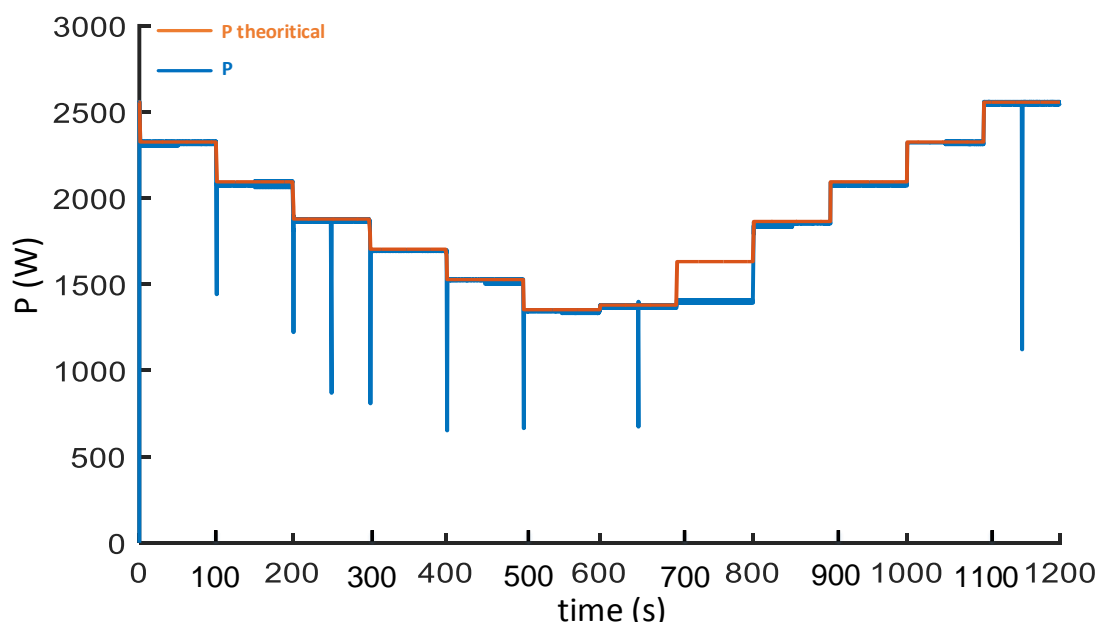
Πίνακας 5. 20. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
98,88	10/11	600	200	200	86,77

5.2.2.D Ο αλγόριθμος των *Boztepe, Guinjoan, Quesada, Silvestre, Chouder, Karatepe*

Όπως και στα προηγούμενα, η παραμετροποίηση του αλγορίθμου είναι ενιαία και είναι αυτή που φαίνεται παραπάνω στο πρώτο σενάριο σκίασης.

Στο Σχ. 5. 27 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο δεύτερο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.



Σχ. 5. 27. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Ομοίως με το πρώτο σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου, στο πρώτο μισό της εξέλιξης του φαινομένου κατά την άφιξη της σκίασης στο ΦΒ, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Στο δεύτερο μισό, όμως, κατά την υποχώρηση της σκίασης, ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει πρόβλημα στον εντοπισμό των αλλαγών κατάστασης, καθώς οι αλλαγές στην κλίση της καμπύλης P-V δεν είναι αρκετά μεγάλες για να ενεργοποιήσουν τη συνθήκη του δεύτερου σταδίου λειτουργίας. Το κυριότερο πρόβλημα εντοπίζεται κατά την υποχώρηση της σκίασης από το δεύτερο πλαίσιο. Η αλλαγή κατάστασης δεν αναγνωρίζεται, και έτσι το σωστό GMPP (MPP1) δεν εντοπίζεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα εκτεταμένες απώλειες ενέργειας. Σε αυτό το σημείο, φαίνεται και ο καθοριστικός ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει η ύπαρξη του περιοδικού χρονικού ορίου για την ενεργοποίηση του τρίτου σταδίου και την αναζήτηση του GMPP. Με την ύπαρξή του στο πρώτο σενάριο

σκίασης, και σε παρόμοια προβληματική κατάσταση, το GMPP εντοπίζεται έστω και καθυστερημένα, ενώ εδώ ο αλγόριθμος αποτυγχάνει πλήρως.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 21, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης οροφής.

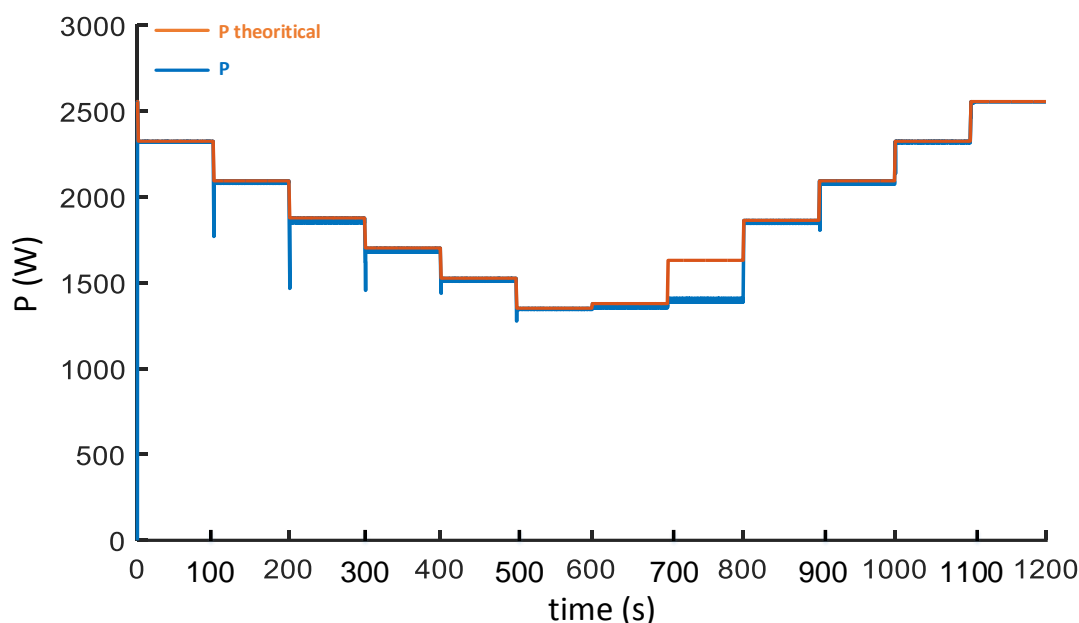
Πίνακας 5. 21. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
98,68	10/11	500	150	286,11	57,43

5.2.2.E Ο αλγόριθμος των Qi, Zhang, Chen

Κι εδώ έχουν εφαρμοστεί οι ίδιες παράμετροι στον αλγόριθμο, όπως στο πρώτο σενάριο δοκιμών.

Στο Σχ. 5. 28 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο δεύτερο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.



Σχ. 5. 28. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Η λειτουργία του αλγορίθμου στο σενάριο αυτό είναι παρόμοια με την αντίστοιχη στο πρώτο σενάριο σκίασης. Στο πρώτο μισό της εξέλιξης του φαινομένου, κατά την άφιξη της σκίασης στο ΦΒ, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάσταση, εκτός από την τελευταία, και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Στο δεύτερο μισό, όμως, κατά την υποχώρηση της σκίασης, ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει πρόβλημα στον εντοπισμό των αλλαγών κατάσταση, καθώς οι μεταβολές ρεύματος και τάσης δεν ικανοποιούν τα κριτήρια των συνθηκών για την ενεργοποίηση της αναζήτησης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να αποτυγχάνει στην αναγνώριση των

αλλαγών κατάστασης κατά την υποχώρηση της σκίασης από τα τρία πρώτα πλαίσια. Κατά την υποχώρηση της σκίασης από το πρώτο και το τρίτο πλαίσιο, τυχαίνει να υπάρχει σύγκλιση από τον αλγόριθμο στο σωστό GMPP. Στην υποχώρηση, όμως, της σκίασης από το δεύτερο πλαίσιο, εφ' όσον η αλλαγή δεν εντοπίζεται, η σύγκλιση του αλγορίθμου πραγματοποιείται σε λάθος σημείο και, αναπόφευκτα, οι απώλειες σε ενέργεια είναι αρκετές. Αυτό έχει αντίκτυπο, φυσικά, και στην απόδοση του αλγορίθμου που θα δούμε παρακάτω. Η λειτουργία της αναζήτησης του GMPP περιγράφεται αναλυτικά στην προηγούμενη υποενότητα.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 22, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης οροφής.

Πίνακας 5. 22. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

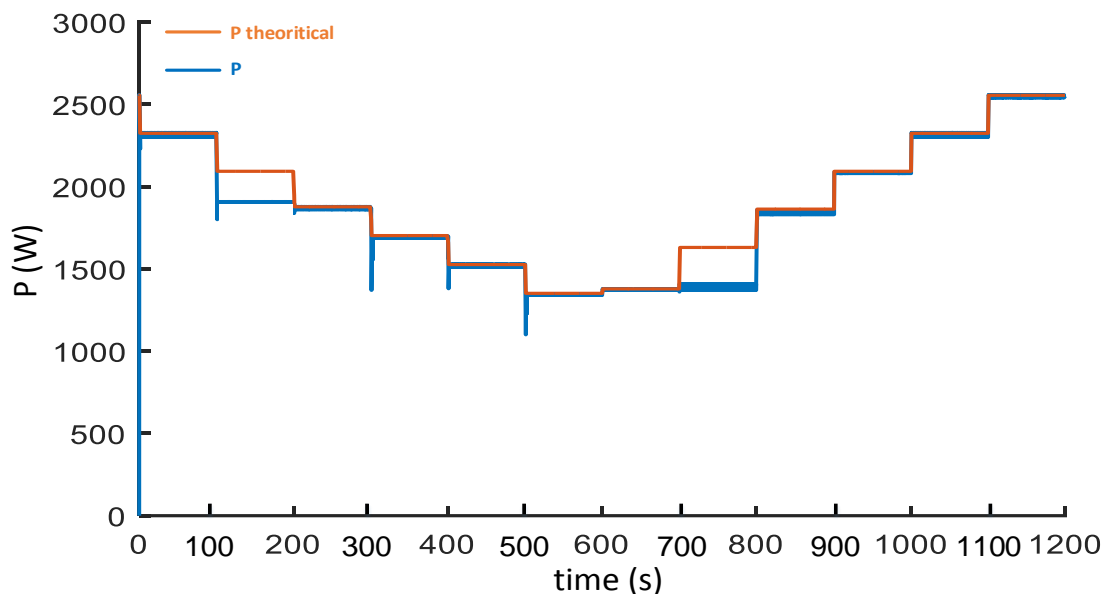
Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
98,66	10/11	900	300	594,44	21,80

5.2.2.F Ο αλγόριθμος των Μπατζέλη, Παπαθανασίου

Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου στο παρόν σενάριο σκίασης έχει πραγματοποιηθεί με τις ίδιες ακριβώς τιμές, όπως στο πρώτο σενάριο.

Στο Σχ. 5. 29 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο δεύτερο σενάριο σκίασης. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξηγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική. Με την άφιξη της σκίασης στο πρώτο πλαίσιο, ο αλγόριθμος εντοπίζει την αλλαγή αυτή στην κατάσταση του συστήματος και μεταβαίνει στο MPP2 για να υπολογίσει την παράμετρο s , δηλαδή ουσιαστικά την ένταση της ακτινοβολίας σκίασης, ώστε να μπορεί αν χρησιμοποιήσει σωστά της σχέσεις ενεργειακής εκτίμησης των εκάστοτε LMPPs. Στη συνέχεια, όμως, ο αλγόριθμος αποτυγχάνει πλήρως στον εντοπισμό των GMPPs, καθώς όπως αναφέρεται ξεκάθαρα και στο [49], βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία του αποτελεί η μετάβαση από το MPP1 της μιας κατάστασης στο MPP1 της επόμενης. Αντίστοιχα και για το MPP2. Επειδή, όμως, το συγκεκριμένο σενάριο είναι αρκετά αργό στις μεταβολές του, αυτό δε συμβαίνει. Ένα ακόμα πρόβλημα στο συγκεκριμένο σενάριο είναι η ύπαρξη τριών επιπέδων ακτινοβολίας. Έτσι, και η δεύτερη βασική προϋπόθεση λειτουργίας του αλγορίθμου που αφορά την ύπαρξη μέχρι το πολύ δύο επιπέδων ακτινοβολίας, δεν τηρείται. Για του λόγους αυτούς ο αλγόριθμος αποτυγχάνει στο παρόν σενάριο σκίασης και η σωστή σύγκλιση σε ορισμένα GMPP, που φαίνεται παρακάτω, είναι τυχαία. Οι απώλειες ενέργειας λόγω της αποτυχίας αυτής έχει, φυσικά, αντίκτυπο στην απόδοση του αλγορίθμου που θα δούμε στη συνέχεια.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 23, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης οροφής.



Σχ. 5. 29. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

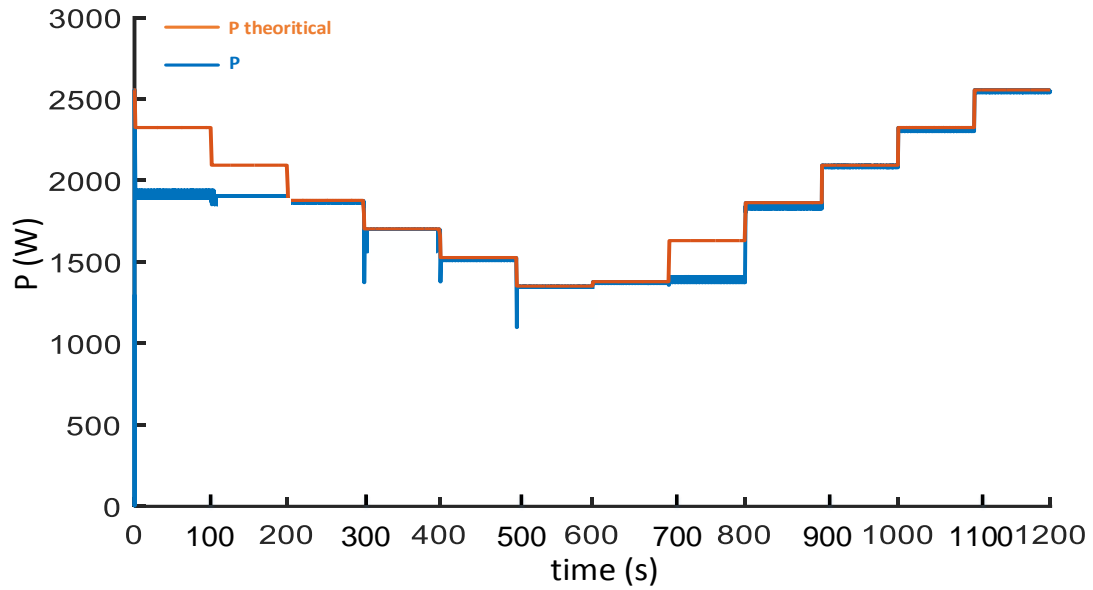
Πίνακας 5. 23. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
97,79	9/11	600	10	117,58	21,46

5.2.2.G Οι συμβατικοί αλγόριθμοι *Perturb & Observe(P&O)* και *Incremental Conductance(INC)*

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαία η σύγκριση των επιδόσεων των αλγορίθμων MPPT με την απόδοση των γνωστότερων και παλαιότερων συμβατικών αλγορίθμων στις ίδιες συνθήκες δοκιμών. Για το λόγο αυτό, οι κλασσικοί αλγόριθμοι P&O και INC προσομοιώθηκαν στα ίδια σενάρια σκίασης με τους υπόλοιπους.

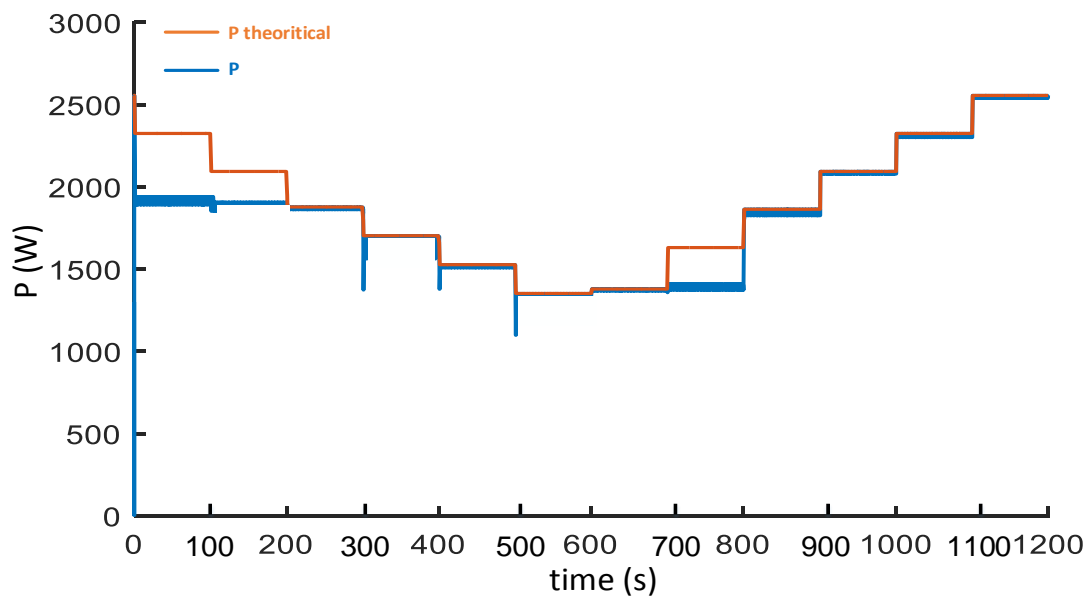
Τα γραφήματα των ισχύων τους, καθώς και τα στατιστικά της αποδοτικότητας τους παρουσιάζονται, παρακάτω, στα Σχ. 5. 30 και Σχ. 5. 31, και στους Πίνακας 5. 24 και Πίνακας 5. 25.



Σχ. 5. 30. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου P&O, κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Πίνακας 5. 24. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου P&O, κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
96,01	8/11	10	10	10	19,33



Σχ. 5. 31. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου INC, κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Πίνακας 5. 25. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου INC, κατά το σενάριο σκίασης οροφής.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
96,1	8/11	10	10	10	19,33

5.2.2.H Συνοπτική σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης οροφής

Συνοψίζοντας, στον Πίνακας 5. 26 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά στατιστικά των οκτώ αλγορίθμων οι οποίοι δοκιμάστηκαν στο σενάριο σκίασης οροφής.

Πίνακας 5. 26. Συγκεντρωτικά στατιστικά των αλγορίθμων MPPT στο δεύτερο σενάριο σκίασης οροφής.

Algorithms	Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
			Max.	Min.	Average	Max.
[35]	98,46	10/11	1900	300	1031,81	99,87
[36]	99,30	11/11	1500	800	1209,10	98,50
[40]	98,88	10/11	600	200	200,00	86,77
[42]	98,68	10/11	500	150	286,11	57,43
[31]	98,66	10/11	900	300	594,44	21,80
[49]	97,79	9/11	600	10	117,58	21,46
P&O	96,01	8/11	10	10	10,00	19,45
INC	96,10	8/11	10	10	10,00	19,33

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν, ερμηνεύοντας συνοπτικά τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων στο δεύτερο σενάριο σκίασης οροφής, είναι τα εξής:

1. Ο αποδοτικότερος εκ των αλγορίθμων είναι ο αλγόριθμος στο [36]. Η μέση απόδοση MPPT του αγγίζει το 99,3%, καθώς είναι ο μοναδικός ο οποίος πετυχαίνει το απόλυτο και συγκλίνει σε όλα τα σωστά βέλτιστα σημεία λειτουργίας. Σε αυτό συμβάλει αρκετά η συνθήκη εντοπισμού της σκίασης που χρησιμοποιείται στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας του αλγορίθμου, η οποία φαίνεται, εκ των πραγμάτων, να είναι αποδοτικότερη από τις αντίστοιχες των άλλων αλγορίθμων. Οι αποδόσεις των αλγορίθμων είναι κι εδώ, όπως και στο προηγούμενο σενάριο δοκιμών, ιδιαίτερας υψηλές λόγω της αρκετά μεγάλης χρονικής διάρκειας και αυτού του σεναρίου. Λίγο μικρότερες, βέβαια, από πριν, κάτι που είναι λογικό αναλογικά με τις διάρκειες των δύο σεναρίων.
2. Εξαιρώντας τους δύο συμβατικούς αλγόριθμους, ο αλγόριθμος στο [49] επιτυγχάνει τη μέση γρηγορότερη σύγκλιση από όλους. Η μέση ταχύτητα σύγκλισης του αγγίζει τα 117,58 ms. Βέβαια, η απόδοση του είναι αρκετά χαμηλή, καθώς αποτυγχάνει να εντοπίσει δύο GMPP. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος στο [36] ο οποίος είναι ο αποδοτικότερος, είναι, παράλληλα, και ο πιο αργός στη σύγκλιση του, με μέση ταχύτητα που αγγίζει τα 1209,1 ms.
3. Ο αλγόριθμος ο οποίος παρουσιάζει τη μικρότερη μέγιστη διακύμανση ισχύος είναι και πάλι αυτός που παρουσιάζεται στο [49]. Η μέγιστη διακύμανση του είναι στο 21,46% και αυτό

οφείλεται στην αμεσότητα με την οποία λειτουργεί το τρίτο στάδιο λειτουργίας του το οποίο δεν περιλαμβάνει σάρωση της χαρακτηριστικής ή κάτι παρόμοιο.

4. Όπως και στο πρώτο σενάριο δοκιμών, έτσι κι εδώ, οι δύο συμβατικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν αρκετά χαμηλή απόδοση σε σύγκριση με του υπόλοιπους, καθώς αποτυγχάνουν στον εντοπισμό των τριών από τα συνολικά έντεκα ολικά μέγιστα της καμπύλης P-V.

5.3 Τρίτο σενάριο σκίασης: Σενάριο κινούμενου σύννεφου

5.3.1 Ανάλυση του σεναρίου σκίασης κινούμενου σύννεφου

Περνώντας στο τρίτο σενάριο σκίασης της ΦΒ πλαισιοσειράς, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι εξετάστηκαν σε ορισμένα διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα σενάρια. Το τρίτο σενάριο αντιπροσωπεύει τη μερική σκίαση η οποία μπορεί να επηρεάσει τη ΦΒ συστοιχία λόγω ενός ταχέως κινούμενου σύννεφου. Οι εναλλαγές των συνθηκών λειτουργίας, δηλαδή εδώ, είναι αρκετά πιο γρήγορες από πριν. Το σενάριο τοποθετεί τη ΦΒ πλαισιοσειρά σε μια ημέρα με αρκετή νεφοκάλυψη και αρκετά δυνατό άνεμο. Έτσι, οι εναλλαγές στις συνθήκες λειτουργίες είναι ταχέως μεταβαλλόμενες και συνεχείς. Μια τέτοια εναλλαγή, από ασκίαση σε σκιασμένη και ξανά ασκίαση πλαισιοσειρά, μελετά το παρόν σενάριο. Οπότε όταν η ΦΒ συστοιχία μας είναι αρχικά ασκίαση δέχεται ακτινοβολία της τάξεως των 1000 W/m^2 , μέχρι ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, όπου εκκινεί η σκίαση. Το σημείο εκκίνησης του φαινομένου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται την ακριβή θέση της εγκατάστασης, την κίνηση του σύννεφου, κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του τρόπου διάταξης της πλαισιοσειράς, κ.α. Οι παράγοντες αυτοί και το ακριβές χρονικό σημείο εκκίνησης και λήξης του φαινομένου δεν σχετίζονται με την ποιοτική εξέλιξη της σκίασης, οπότε δεν αφορούν την παρούσα διπλωματική εργασία. Κατά συνέπεια, δεν θα αναλυθούν. Τα επίπεδα ακτινοβολίας που επηρεάζουν τη ΦΒ συστοιχία όταν αυτή είναι σκιασμένη είναι δύο. Το επίπεδο ακτινοβολίας της σκίασης που έχει επιλεγεί, έχει ένταση $G_1=600 \text{ W/m}^2$. Η τιμή αυτή αποτελεί τη μέση τιμή έντασης ακτινοβολίας σκίασης από ένα κινούμενο σύννεφο, σε όλη τη διάρκεια ενός χρόνου [93], [94] όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5. 27, παρακάτω. Η μέγιστη έκταση της σκιασμένης επιφάνειας της ΦΒ συστοιχίας έχει επιλεγεί να είναι τα 8 πλαίσια, δηλαδή το 66,67% της συνολικής επιφάνειας. Όταν η μέγιστη έκταση της πλαισιοσειράς είναι σκιασμένη, 3 πλαίσια επηρεάζονται από τη μια ακτινοβολία και 3 από την άλλη, ενώ 6 πλαίσια είναι εντελώς ασκίαστα.

Πιο αναλυτικά, κάποια χρονική στιγμή της ημέρας και όταν το σύννεφο πάρει κατάλληλη θέση ανάμεσα στον ήλιο και στην πλαισιοσειρά, ξεκινά να σκιάζεται ένα συγκεκριμένο πλαίσιο της. Η σκίαση εκτείνεται σταδιακά. Στη συνέχεια, άλλα επτά πλαίσια (συνολικά οκτώ) από τα δώδεκα σκιάζονται, το ένα μετά το άλλο, από το συγκεκριμένο σύννεφο. Η σκίαση, από την εκκίνησή της μέχρι την κάλυψη όλων των οκτώ συνολικά πλαισίων διαρκεί 10 δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού, και καθώς το σύννεφο συνεχίζει να κινείται, η σκίαση των πλαισίων αρχίζει να υποχωρεί σταδιακά, με τρόπο αντίστοιχο της εξάπλωσης της. Σαν βήμα σκίασης της ΦΒ πλαισιοσειράς έχουν επιλεγεί τα δύο πλαίσια, ενώ ο χρονισμός μεταβολής της ακτινοβολίας από το επίπεδο των 1000 W/m^2 σε αυτό των 600 W/m^2 , για το κάθε πλαίσιο, είναι τα 8 ms (ρυθμός $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ms}$). Τα οκτώ πλαίσια σκιάζονται και αποσκιάζονται, ανά σταθερό χρονικό διάστημα περίπου 2,5 δευτερόλεπτων. Το βήμα σκίασης έχει οριστεί στα δύο πλαίσια, και όχι σε κάποια μικρότερη δομική μονάδα, για πρακτικούς λόγους. Αφενός, το σενάριο θέλει να δοκιμάσει τους

αλγόριθμους σε αρκετά γρήγορες διακυμάνσεις της ακτινοβολίας, και αφετέρου δεν επηρεάζονται ποιοτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις δοκιμές μας. Παράλληλα, επιτυγχάνεται ταχύτερα μεγαλύτερη έκταση σκίασης του ΦΒ, ενώ οι χρόνοι προσομοιώσεων γίνονται διαχειρίσιμοι. Παρακάτω, στα Σχ. 5. 32 και Σχ. 5. 33, παρουσιάζεται, αντίστοιχα, σχηματικά και γραφικά, η εξέλιξη του φαινομένου.

Πίνακας 5. 27. Στατιστικά στοιχεία χαρακτηριστικών σκίασης που επηρεάζει ένα ΦΒ σύστημα, προερχόμενης από κινούμενο σύννεφο. Στη τέταρτη στήλη φαίνεται η μέση ένταση της ακτινοβολίας [93].

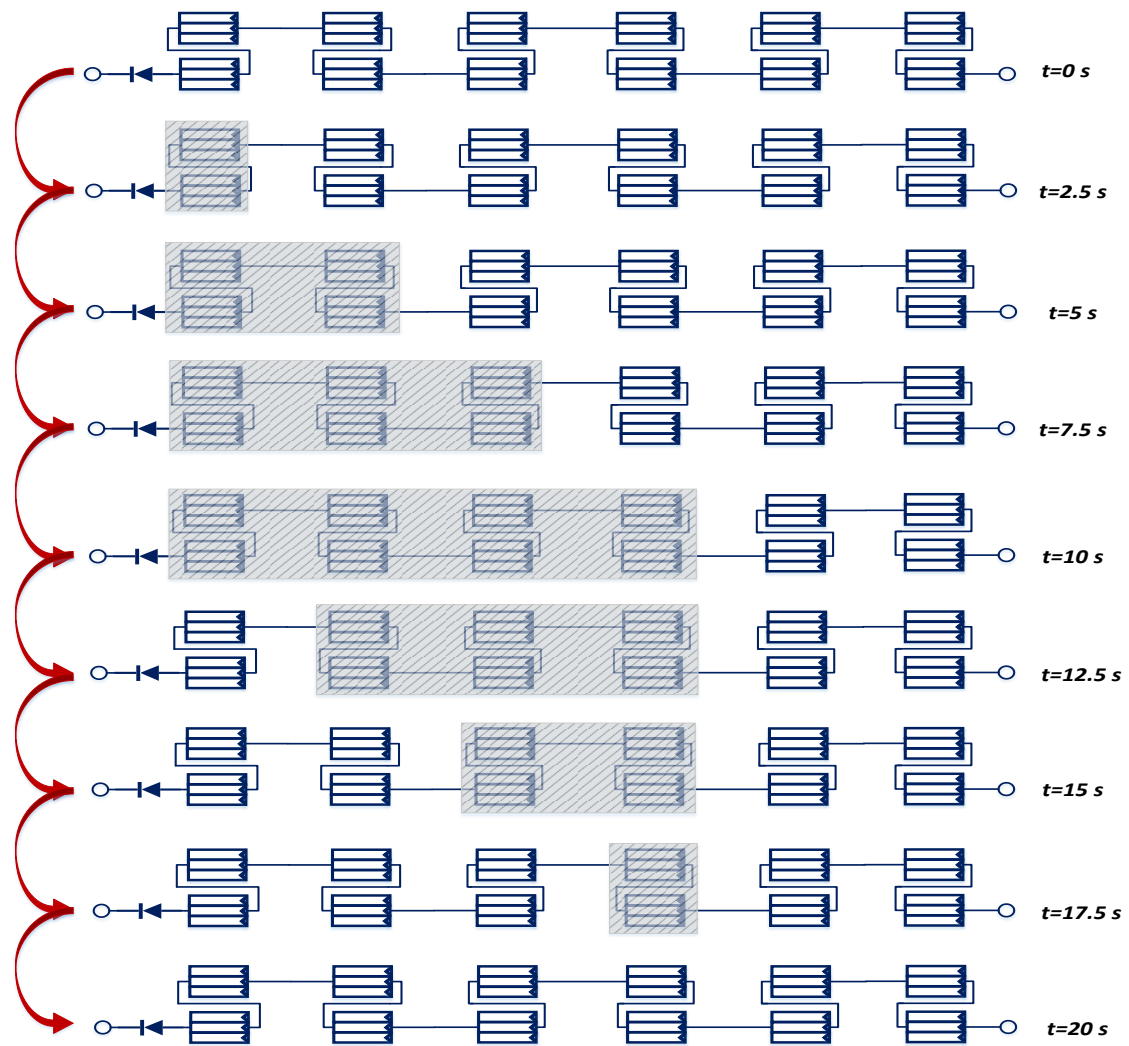
Year	Month	Number of shading periods	Average shading strength (%)	Average duration (s)
2011	8	860	58.39	71.50
2011	9	657	59.67	58.69
2012	4	491	57.91	68.69
2012	5	974	58.95	59.09
2012	6	942	60.56	65.86
2012	7	1241	59.54	61.73
2012	9	1256	60.96	43.98
2013	5	582	59.15	49.09
2013	6	975	59.91	63.37
2013	7	984	58.57	47.93
2013	8	1019	60.79	55.52
2013	9	459	58.92	68.77
2014	4	364	56.85	71.80
2014	5	601	60.45	70.98
2014	6	494	57.71	73.95
Total		11899	59.48	60.19

Με τη σταδιακή άφιξη και υποχώρηση της σκίασης στα πλαίσια του ΦΒ, οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας μεταβάλλονται ανάλογα με το πόσα πλαίσια είναι σκιασμένα κάθε φορά. Παρακάτω, στο Σχ. 5. 34, φαίνονται οι χαρακτηριστικές P-V του συστήματος στα διάφορα στάδια λειτουργίας, τόσο κατά την άφιξη όσο και κατά την υποχώρηση της σκίασης.

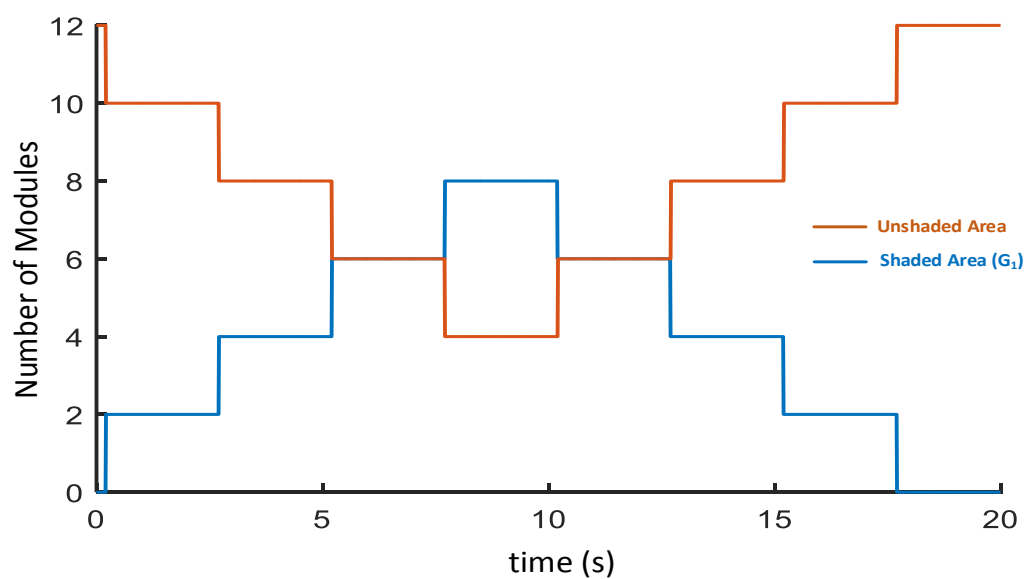
Στον **Error! Reference source not found.** συνοψίζονται όλα τα χαρακτηριστικά του τρίτου σεναρίου σκίασης κινούμενου σύννεφου, τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 5. 28. Χαρακτηριστικά του σεναρίου σκίασης κινούμενου σύννεφου.

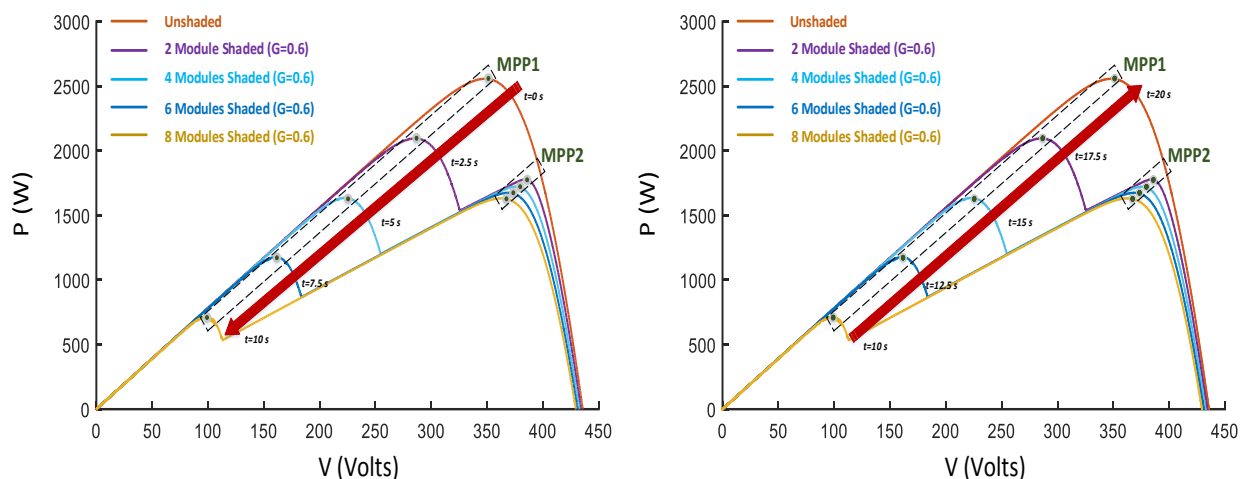
Επίπεδα Ακτινοβολίας	Ένταση επιπέδων ακτινοβολίας	Μέγιστη έκταση σκίασης	Βήμα δομικής ΦΒ μονάδας σκίασης	Ρυθμός μεταβολής ακτινοβολίας	Συνολική διάρκεια φαινομένου
2	1 ^ο : 1000 W/m ² 2 ^ο : 600 W/m ²	8/12 πλαίσια (66,67%)	1 πλαίσιο	50 W/m ² *ms	20 δευτερόλεπτα



Σχ. 5. 32. Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης στα 8/12 πλαίσια της συστοιχίας, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.



Σχ. 5. 33. Γραφική αναπαράσταση της σκιασμένης και ασκίαστης περιοχής της συστοιχίας, σε κοινό γράφημα, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.



Σχ. 5. 34. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας P-V, στα διάφορα στάδια εξέλιξης του φαινομένου της σκίασης, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

5.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου

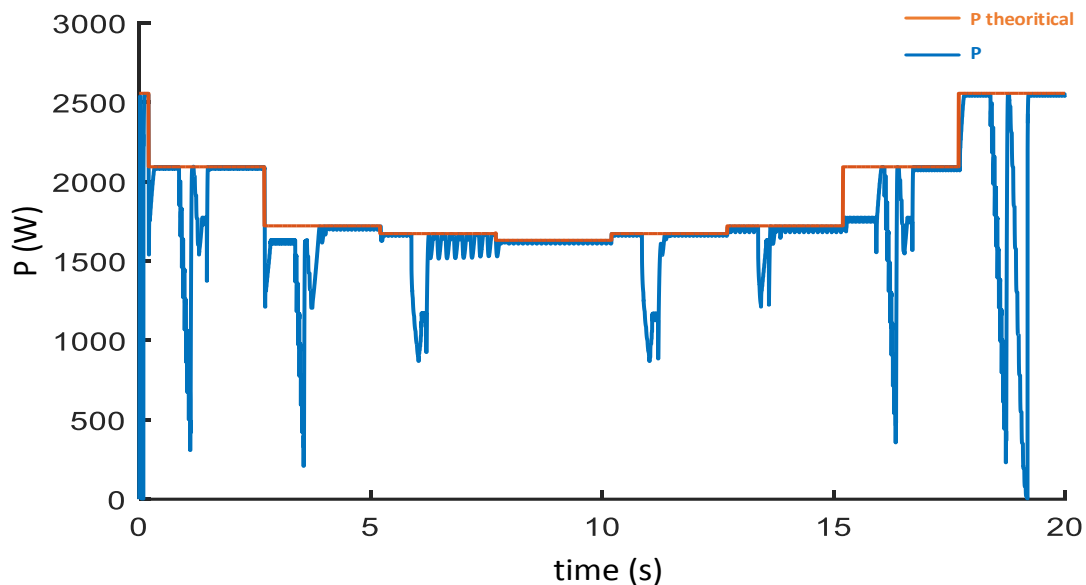
5.3.2.A Ο αλγόριθμος των Patel, Agarwal

Κατά το τρίτο σενάριο σκίασης της ΦΒ συστοιχίας στις προσομοιώσεις, ο παρών αλγόριθμος χρησιμοποιεί, φυσικά, τις ίδιες ενιαίες ρυθμιστικές παραμέτρους που ορίστηκαν με αναφορά το πρώτο σενάριο. Το μόνο που αξίζει να παρατηρηθεί, εδώ, είναι ότι παρ' ότι το περιοδικό χρονικό όριο του δεύτερου σταδίου λειτουργίας-ορισμένο στα 7,5 λεπτά-ισχύει, δεν εκφράζεται στα αποτελέσματα της δοκιμής, καθώς αυτή διαρκεί μόλις 20 δευτερόλεπτα.

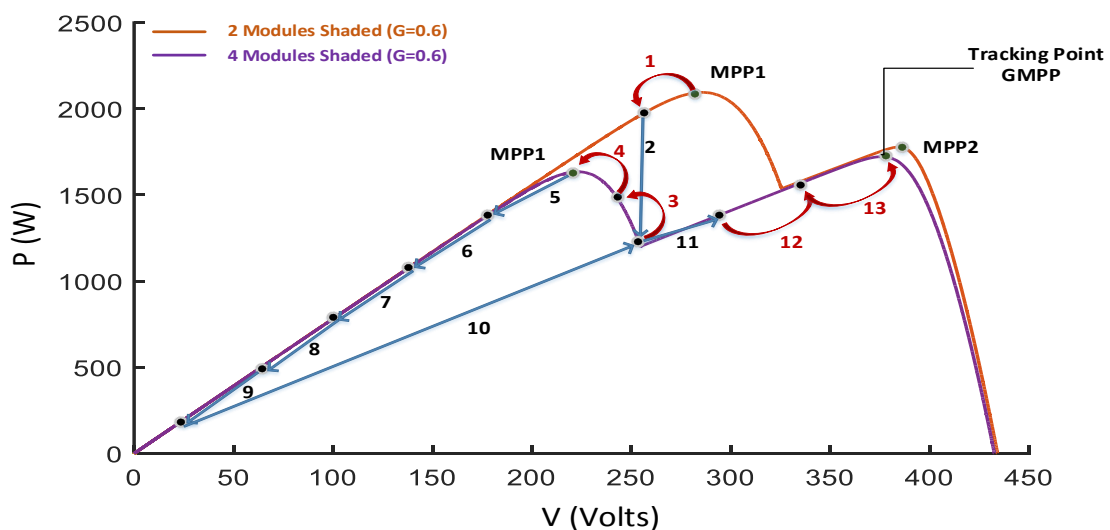
Παρακάτω, στο Σχ. 5. 35, παρουσιάζεται το διάγραμμα της εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ συστήματος, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του αλγορίθμου [35], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου. Η πραγματική εξαγόμενη τιμή της ισχύος φαίνεται με μπλε χρώμα, ενώ με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται η θεωρητική μέγιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος που θα είχε το σύστημα σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι, σε γενικές γραμμές, ο αλγόριθμος κάνει σωστά τη δουλειά του και εντοπίζει κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από την άφιξη της σκίασης στο τελευταίο ζεύγος πλαισίων, και καταφέρνει να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Η μεταβολή η οποία δεν εντοπίζεται είναι αρκετά μικρή ενεργειακά, αντίστοιχη με εκείνες που αναδείχθηκαν σε γραφήματα προηγούμενων υποενοτήτων, και η συνθήκη εντοπισμού δεν ενεργοποιείται. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός αυτό, εδώ, τυχάνει να μη διαδραματίζει κάποιο ρόλο στη μετάβαση προς το σωστό GMPP.

Σε κάθε αλλαγή κατάστασης, δηλαδή με την σκίαση κάθε δύο επιπλέον πλαισίων, μπαίνει σε εφαρμογή το στάδιο εντοπισμού του GMPP. Βλέπουμε αρκετά μεγάλες και απότομες μεταβολές της ισχύος στα σημεία όπου μπαίνει σε εφαρμογή το στάδιο αυτό. Οι μεταβολές αυτές εξηγούνται αν εξετάσει κανείς προσεκτικά τη φύση του συγκεκριμένου αλγορίθμου, ο οποίος περιέχει αρκετά ευρεία σάρωση της χαρακτηριστικής P-V. Η σάρωση αυτή φτάνει, συχνά, σε ακραία τμήματα της καμπύλης, με αποτέλεσμα οι απώλειες ισχύος που προκαλούνται να είναι αρκετά μεγάλες, ενώ το ίδιο προκαλεί και η αρχική σύγκλιση σε λάθος βέλτιστο σημείο σε ορισμένες μεταβολές. Ενδεικτικά, στο Σχ. 5. 36, παρουσιάζεται η

λειτουργία του σταδίου αυτού με την εξάπλωση της σκίασης από τα δύο πρώτα πλαίσια της ΦΒ πλαισιοσειράς, προς τα δύο επόμενα.



Σχ. 5. 35. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.



Σχ. 5. 36. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 36, αρχικά βλέπουμε ότι με την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας και τη σκίαση των δύο επιπλέον πλαισίων, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει κατακόρυφα από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP1 της δεύτερης καμπύλης (2). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη συμπεριφορά των δύο προηγούμενων σεναρίων στην αντίστοιχη μεταβολή. Στο σενάριο αυτό οι μεταβολές είναι γρήγορες και απότομες. Παρατηρούμε, βέβαια, ότι η κατακόρυφη μετάπτωση δεν εκκινεί από το ακριβές σημείο του MPP1. Αυτό οφείλεται στη διακύμανση που υπάρχει από τη συνεχή λειτουργία του συμβατικού αλγορίθμου γύρω από το GMPP (1). Συνεχίζοντας, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο MPP1 της

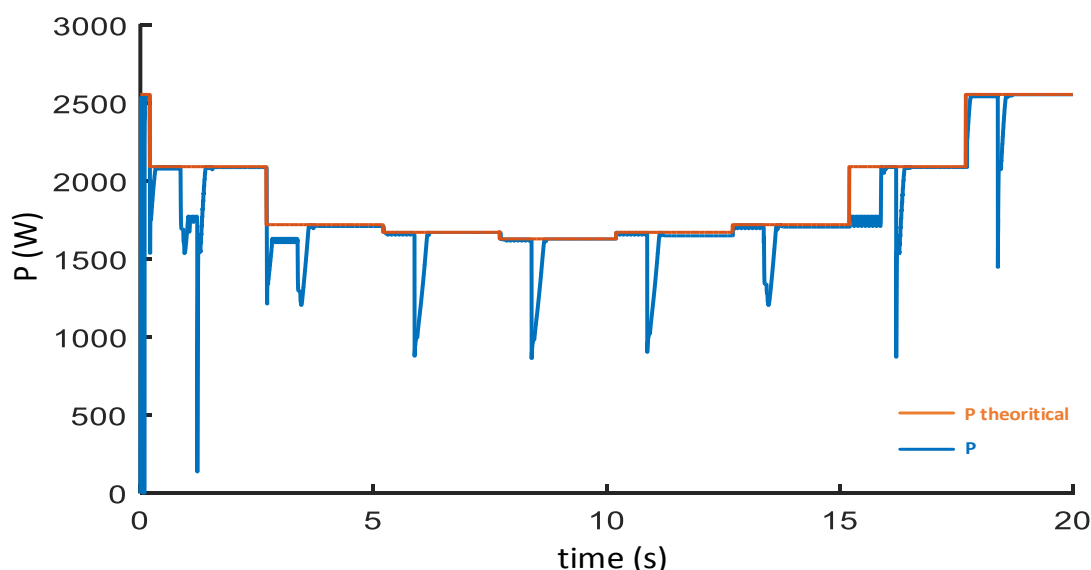
επόμενης καμπύλης (3) – (4) και αρχίζει η σάρωση προς τα αριστερά του MPP1 (5) – (9). Εφ’ όσον δεν εντοπίζεται κάποιο τοπικό μέγιστο στην περιοχή αυτή, η σάρωση μεταφέρεται δεξιά του MPP1 (10) – (11). Εκεί εντοπίζεται το MPP2 και ο αλγόριθμος συγκλίνει σε αυτό (12) – (13). Επειδή το ενεργειακό επίπεδο του MPP2 είναι μεγαλύτερο από αυτό του MPP1, η διαδικασία δεν συνεχίζεται άλλο και το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται με τη βοήθεια του P&O στη στενή περιοχή του MPP2, το οποίο αποτελεί το GMPP. Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 29, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο τρίτο σενάριο σκίασης.

Πίνακας 5. 29. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [35], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
91,8	77	1400	1000	1185,70	99,90

5.3.2.B Ο αλγόριθμος των Tey, Mekhilef

Η παραμετροποίηση και εδώ είναι αυτή που περιγράφηκε στο πρώτο σενάριο σκίασης. Στο Σχ. 5. 37 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του ΦΒ συστήματος κατά το τρίτο σενάριο σκίασης, με την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Όπως και πριν, με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.

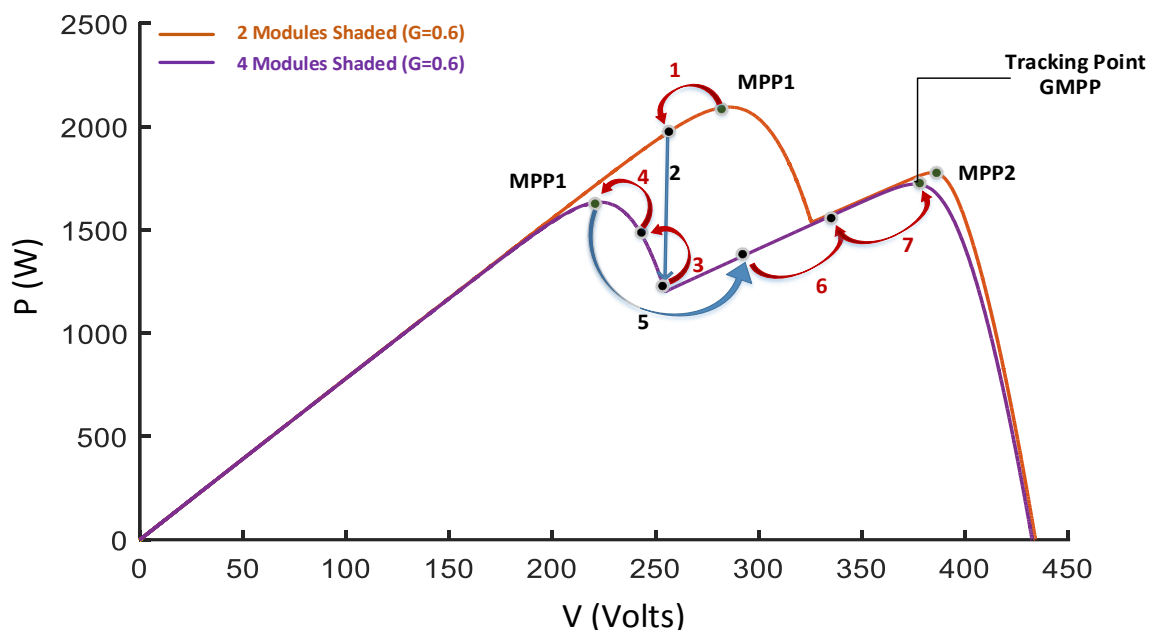


Σχ. 5. 37. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίζει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Υπάρχουν και εδώ αρκετά απότομες-και μεγάλες σε κάποιες περιπτώσεις-μεταβολές της ισχύος που οφείλονται στη λειτουργία του τρίτου σταδίου. Παρ’ όλα αυτά, φαίνεται ότι οι μεταβολές αυτές είναι μικρότερες από ότι στον προηγούμενο αλγόριθμο. Επίσης, εδώ, όταν ο αλγόριθμος συγκλίνει στο εκάστοτε GMPP, σταθεροποιεί την τιμή του duty cycle σε μια συγκεκριμένη τιμή και δεν θέτει σε λειτουργία τον αλγόριθμο INC του πρώτου σταδίου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν διακυμάνσεις της

ισχύος. Έτσι, συνδυαστικά και με το μεγαλύτερο βήμα σάρωσης, οι συνολικές απώλειες ισχύος είναι αρκετά μικρές συγκριτικά και με άλλους αλγόριθμους, κάτι που φαίνεται και στη μέση απόδοση MPPT του αλγορίθμου. Ενδεικτικά, στο Σχ. 5. 38, παρουσιάζεται η λειτουργία του σταδίου αυτού με την εξάπλωση της σκίασης από τα δύο πρώτα πλαίσια της ΦΒ πλαισιοσειράς, προς τα δύο επόμενα.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 38, αρχικά παρατηρούμε την ίδια ακριβώς μετάπτωση του σημείου λειτουργίας κατά τη μεταβολή, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη υποενότητα (1) και (2). Συνεχίζοντας, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο MPP1 της επόμενης καμπύλης (3) – (4) και αρχίζει η σάρωση προς τα δεξιά του MPP1 (5), όπου εντοπίζεται το MPP2 (6) – (7). Εφ' όσον το MPP2 έχει υψηλότερη ενέργεια από το MPP1, γίνεται αυτομάτως το βασικό υποψήφιο σημείο για GMPP. Κανονικά η σάρωση έπρεπε να συνεχιστεί στα δεξιά του MPP2, παρ' όλα αυτά επειδή η τάση αναφοράς του είναι κοντά στην οριακή μέγιστη, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί βήμα σάρωσης προς την κατεύθυνση αυτή. Έτσι, η διαδικασία τερματίζεται με τον αλγόριθμο να παραμένει στο MPP2, το οποίο αποτελεί το GMPP.



Σχ. 5. 38. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 30, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

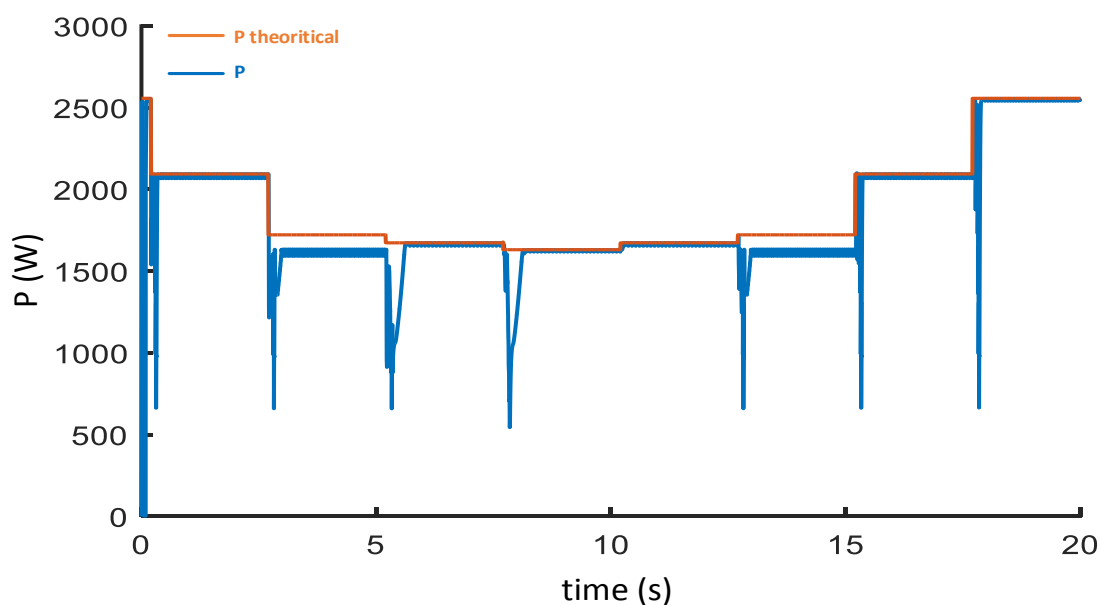
Πίνακας 5. 30. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [36], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
95,98	77	1200	800	937,50	94,43

5.3.2.C Ο αλγόριθμος των Kouchaki, Iman-Eini, Asaei

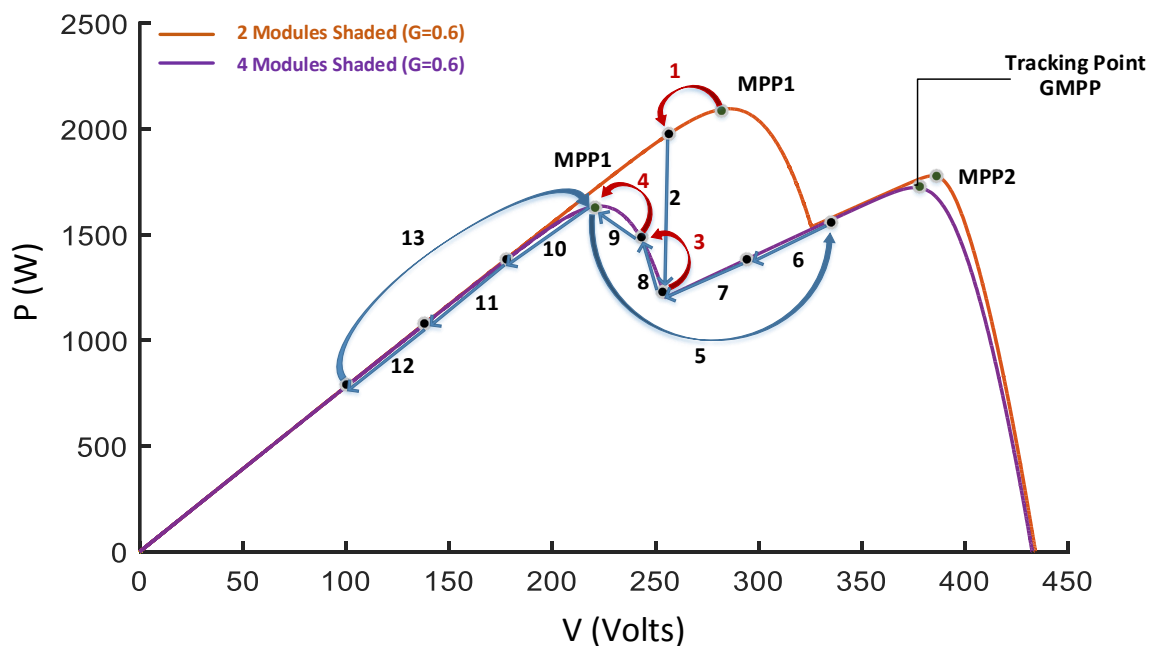
Η επιλογή των παραμέτρων παρουσιάζεται στην αντίστοιχη υποενότητα του σεναρίου σκίασης ανοικτού χώρου.

Στο Σχ. 5. 39 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου. Ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από μια.. Η μεταβολή που δεν εντοπίζεται είναι αυτή κατά την υποχώρηση της σκίασης από τα δύο πρώτα πλαίσια. Η μεταβολή αυτή δεν εντοπίζεται καθώς είναι αρκετά μικρή ενεργειακά και η συνθήκη εντοπισμού δεν ενεργοποιείται. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός αυτό, εδώ, τυχαίνει να μη διαδραματίζει κάποιο ρόλο στη μετάβαση προς το σωστό GMPP. Σε δύο περιπτώσεις, κατά την άφιξη και την υποχώρηση της σκίασης από το δεύτερο ζευγάρι πλαισίων, παρ' ότι το στάδιο αναζήτησης του GMPP ενεργοποιείται κανονικά, δεν πραγματοποιείται σωστή σύγκλιση. Αυτό συμβαίνει, καθώς παρατηρώντας την καμπύλη P-V στις δύο αυτές περιπτώσεις, βλέπουμε ότι τα δύο εμφανιζόμενα τοπικά μέγιστα είναι πάρα πολύ κοντά ενεργειακά με αποτέλεσμα κατά τη σάρωση να χάνεται το πραγματικό ολικό μέγιστο. Υπάρχουν και εδώ αρκετά απότομες-αλλά χρονικά σύντομες-μεταβολές της ισχύος που οφείλονται στη λειτουργία του τρίτου σταδίου. Έτσι, συνδυαστικά και την αποτυχία στις δύο περιπτώσεις, υπάρχουν κάποιες απώλειες ισχύος, όπως φαίνεται και στη μέση απόδοση MPPT του αλγορίθμου.



Σχ. 5. 39. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Ενδεικτικά, στο Σχ. 5. 40, παρουσιάζεται η λειτουργία του αλγορίθμου κατά την άφιξη της σκίασης στο δεύτερο ζευγάρι πλαισίων της συστοιχίας.



Σχ. 5. 40. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 40, αρχικά βλέπουμε το σημείο λειτουργίας να μεταβαίνει κατακόρυφα από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP1 της δεύτερης καμπύλης (1) και (2). Συνεχίζοντας, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο MPP1 της επόμενης καμπύλης (3) – (4) και αρχίζει η σάρωση από τα δεξιά προς τα αριστερά (5) – (12). Δυστυχώς, η περιοχή σάρωσης δεν περικλύει το πραγματικό GMPP, το οποίο είναι το MPP2, και έτσι υπάρχει σύγκλιση στο MPP1 (13), το οποίο είναι πολύ κοντά ενεργειακά αλλά όχι το ολικό μέγιστο. Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 31, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

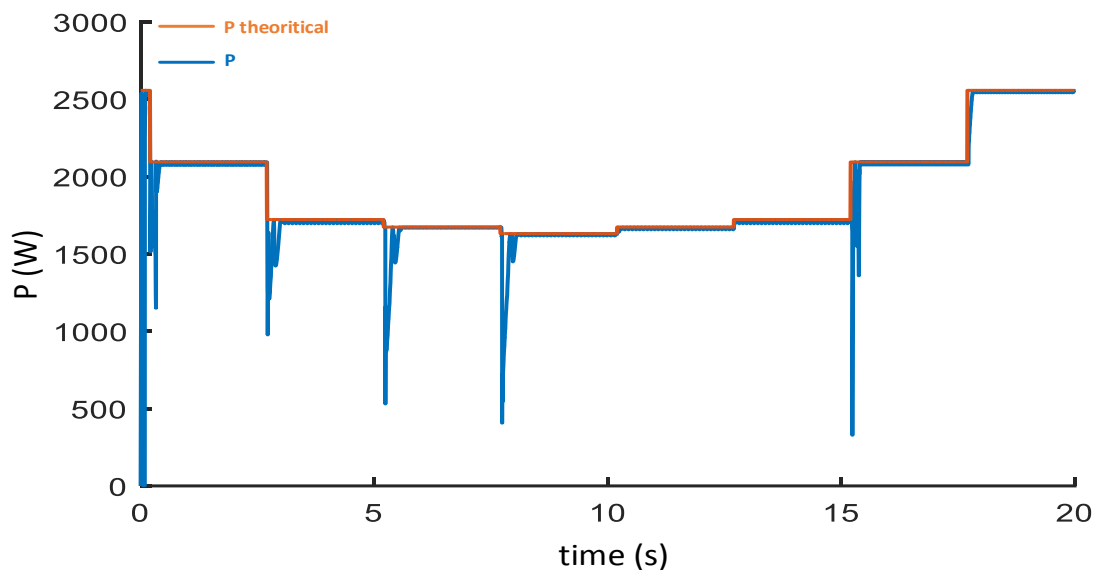
Πίνακας 5. 31. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [40], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
96,22	5/7	400	150	271,43	74,04

5.3.2.D Ο αλγόριθμος των Boztepe, Guinjoan, Quesada, Silvestre, Chouder, Karatepe

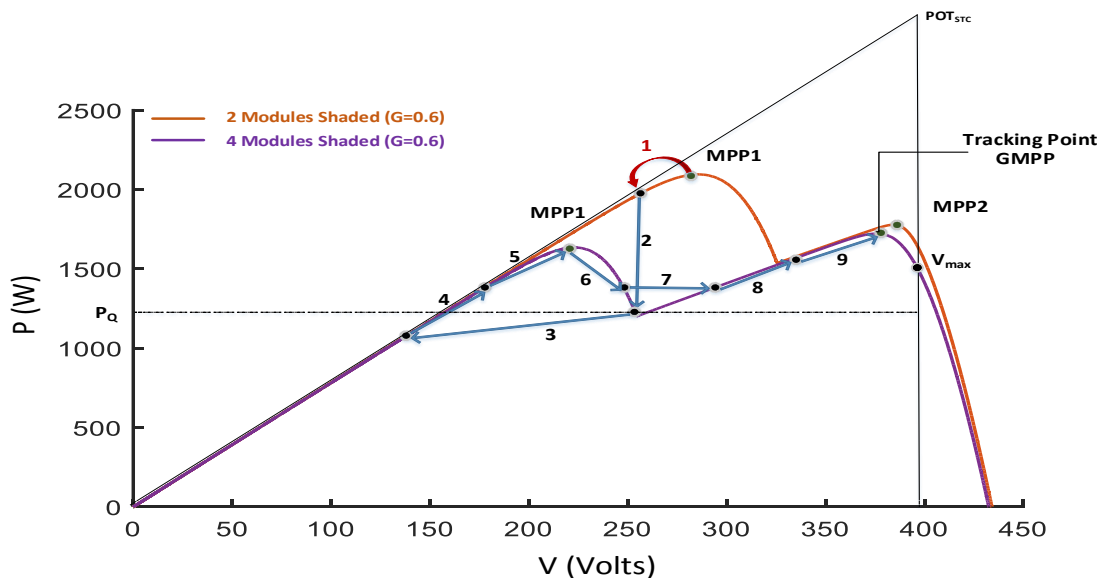
Κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου, ο παρών αλγόριθμος χρησιμοποιεί, φυσικά, τις ίδιες ενιαίες ρυθμιστικές παραμέτρους που ορίστηκαν με αναφορά το πρώτο σενάριο. Το μόνο που αξίζει να παρατηρηθεί, εδώ, είναι ότι παρ' ότι το περιοδικό χρονικό όριο του δεύτερου σταδίου λειτουργίας-ορισμένο στα 7,5 λεπτά-ισχύει, δεν εκφράζεται στα αποτελέσματα της δοκιμής, καθώς αυτή διαρκεί μόλις 20 δευτερόλεπτα.

Στο Σχ. 5. 41 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.



Σχ. 5. 41. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Στο πρώτο μισό της εξέλιξης του φαινομένου, κατά την άφιξη της σκίασης στο ΦΒ, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Στο δεύτερο μισό, όμως, κατά την υποχώρηση της σκίασης, ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει πρόβλημα στον εντοπισμό των αλλαγών κατάστασης, καθώς οι αλλαγές στην κλίση της καμπύλης P-V δεν είναι αρκετά μεγάλες για να ενεργοποιήσουν τη συνθήκη του δεύτερου σταδίου λειτουργίας. Σε αυτό το σημείο, εντοπίζεται μόνο μια μεταβολή κατάστασης. Παρ' όλα αυτά, όλες οι συγκλίσεις βαίνουν επιτυχώς στα σωστά GMPP κάθε φορά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι απώλειες ενέργειας να μην είναι τόσο εκτεταμένες. Στο Σχ. 5. 42, παρακάτω, παρουσιάζεται ενδεικτικά η λειτουργία του τρίτου σταδίου μετά τη σκίαση του δεύτερου ζευγαριού πλαισίων της ΦΒ συστοιχίας.



Σχ. 5. 42. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 42, πρωτίστως παρατηρούμε την κατακόρυφη κίνηση του σημείου λειτουργίας από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP1 της δεύτερης καμπύλης (1) και (2). Στη συνέχεια, αφού μετρηθεί και αποθηκευτεί η τιμή P_Q στο σημείο μετάβασης, υπολογίζεται η τιμή $V_{minSTC} = P_Q / I_{SC}$ και το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει εκεί (3). Με αφετηρία και κατώτατο όριο τη συγκεκριμένη τιμή τάσης, ο αλγόριθμος ξεκινά να πραγματοποιεί βήματα σάρωσης της καμπύλης P-V με ανώτερο όριο τάσης το 90% της συνολικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης (4) – (9). Σε κάθε βήμα αποθηκεύεται η τιμή της ισχύος και στο τέλος το σημείο λειτουργίας αποτελεί το GMPP. Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 32, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

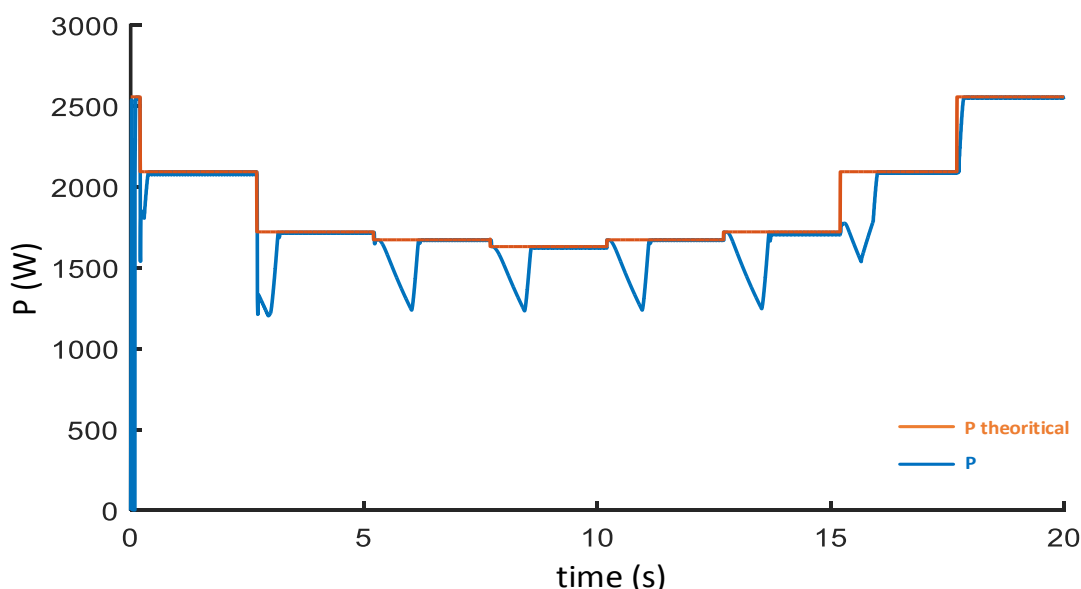
Πίνακας 5. 32. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [42], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
98,1	77	300	200	250	84,35

5.3.2.E Ο αλγόριθμος των Qi, Zhang, Chen

Η δοκιμή του αλγορίθμου [31] στο παρόν σενάριο, ακολουθεί τις ίδιες τιμές παραμέτρων όπως στα προηγούμενα.

Στο Σχ. 5. 43 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική.



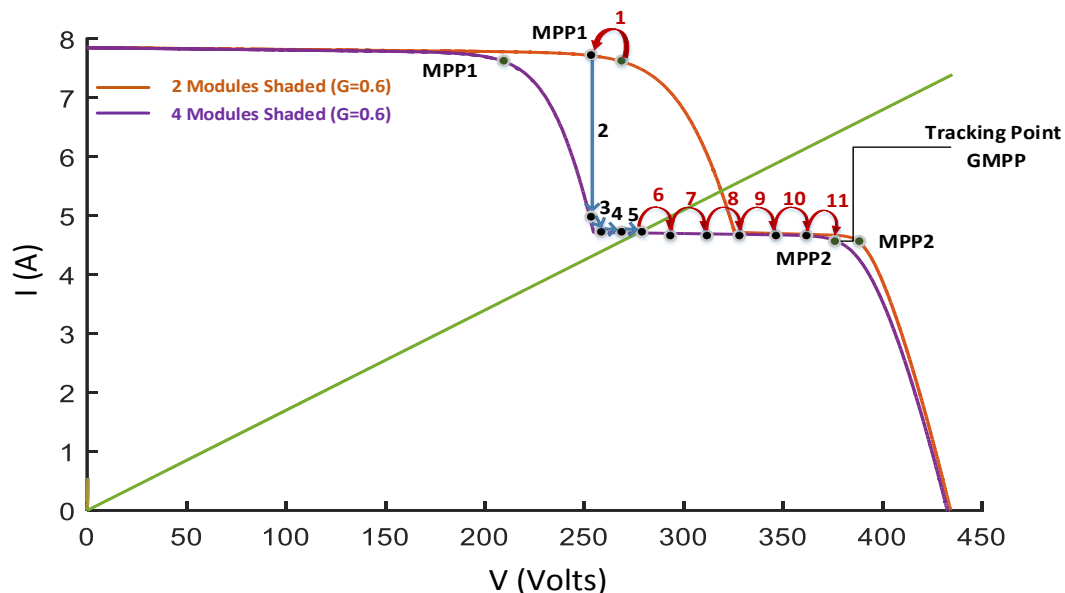
Σχ. 5. 43. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Ο αλγόριθμος καταφέρνει να εντοπίσει επιτυχώς κάθε αλλαγή κατάστασης, εκτός από την τελευταία, και να συγκλίνει στα σωστά GMPP. Οι πτώσεις στην ισχύ μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλες ποσοτικά, αλλά είναι αρκετά εκτεταμένες χρονικά, όπως φαίνεται, και αναπόφευκτα, οι απώλειες σε ενέργεια είναι αρκετά

μεγάλες. Αυτό έχει αντίκτυπο, φυσικά, και στην απόδοση του αλγορίθμου που θα δούμε παρακάτω. Στο Σχ. 5. 44, παρουσιάζεται ενδεικτικά η λειτουργία του τρίτου σταδίου μετά τη σκίαση του δεύτερου ζευγαριού πλαισίων της ΦΒ συστοιχίας.

Παρατηρώντας το Σχ. 5. 44, αρχικά βλέπουμε ότι με την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας και τη σκίαση των δύο επιπλέον πλαισίων, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει κατακόρυφα από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP1 της δεύτερης καμπύλης (2). Παρατηρούμε, βέβαια, ότι η κατακόρυφη μετάπτωση δεν εκκινεί από το ακριβές σημείο του MPP1. Αυτό οφείλεται στη διακύμανση που υπάρχει από τη συνεχή λειτουργία του συμβατικού αλγορίθμου γύρω από το GMPP (1). Στη συνέχεια, αφού εντοπιστεί η μεταβολή αυτή μπαίνει σε λειτουργία το τρίτο στάδιο του αλγορίθμου. Έτσι, ξεκινούν αμέσως τα βήματα προσέγγισης της γραμμής φορτίου $R = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$ (3) - (5). Όταν το σημείο λειτουργίας φτάσει

αρκετά κοντά στη γραμμή αυτή, θεωρητικά βρισκόμαστε στην περιοχή που κείται το GMPP, οπότε εκκινεί η διαδικασία σύγκλισης προς αυτό με τη βοήθεια του αλγορίθμου P&O (6) – (11).



Σχ. 5. 44. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 33, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

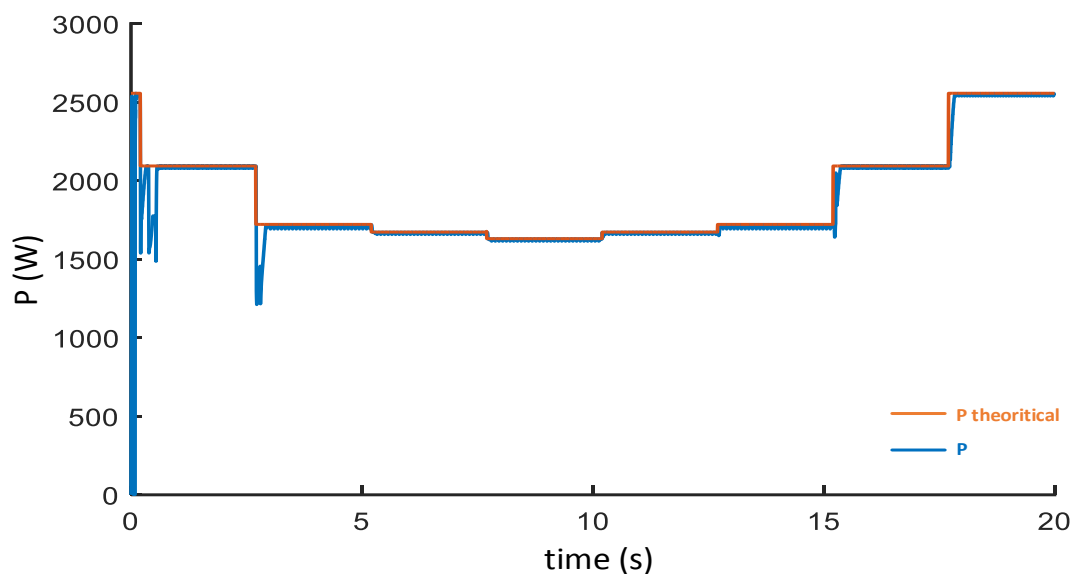
Πίνακας 5. 33. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [31], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
95,89	7/7	900	150	721,43	30,10

5.3.2.F Ο αλγόριθμος των Μπατζέλη, Παπαθανασίου

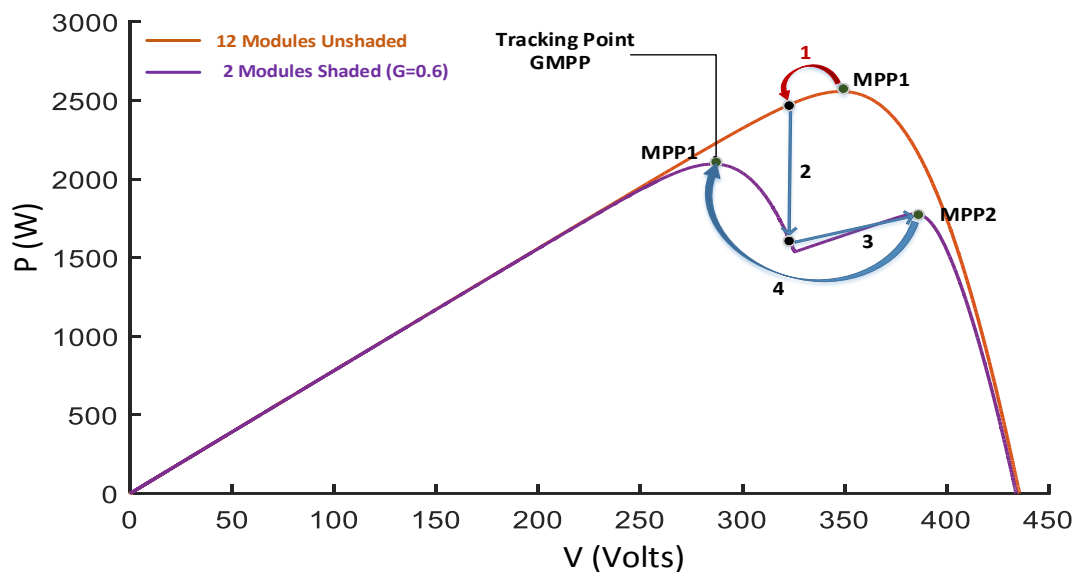
Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά στο [49], έχει παραμετροποιηθεί όπως και οι υπόλοιποι, με σενάριο αναφοράς το πρώτο.

Στο Σχ. 5. 45 φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος του συστήματος με την επίδραση του εξεταζόμενου αλγορίθμου στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου. Με μπλε χρώμα φαίνεται η πραγματική καμπύλη τιμών της εξαγόμενης ισχύος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η αντίστοιχη ιδανική. Με την άφιξη της σκίασης στο πρώτο πλαίσιο, ο αλγόριθμος εντοπίζει την αλλαγή κατάστασης λειτουργίας του συστήματος και μεταβαίνει στο MPP2 για να υπολογίσει την παράμετρο s , δηλαδή ουσιαστικά την ένταση της ακτινοβολίας σκίασης, ώστε να μπορεί αν χρησιμοποιήσει σωστά της σχέσεις ενεργειακής εκτίμησης των εκάστοτε LMPPs. Στη συνέχεια, αφού υπολογιστεί η ένταση της ακτινοβολίας της σκίασης και υπολογιστεί το ενεργειακό επίπεδο του MPP2, ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο MPP1, το οποίο αποτελεί το πραγματικό GMPP. Βλέπουμε ότι οι πτώσεις της ισχύος εδώ είναι από ελάχιστες έως μηδαμινές, γεγονός που συνδράμει στον περιορισμό των απωλειών ενέργειας. Ενδεικτικά, στα Σχ. 5. 46 και Σχ. 5. 47, παρουσιάζεται, αντίστοιχα, η λειτουργία του αλγορίθμου για τη μέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας σκίασης, κατά την άφιξη της σκίασης, και η λειτουργία του τρίτου σταδίου εντοπισμού του GMPP, κατά την εξάπλωση της σκίασης στο δεύτερο ζευγάρι πλαισίων της συστοιχίας.

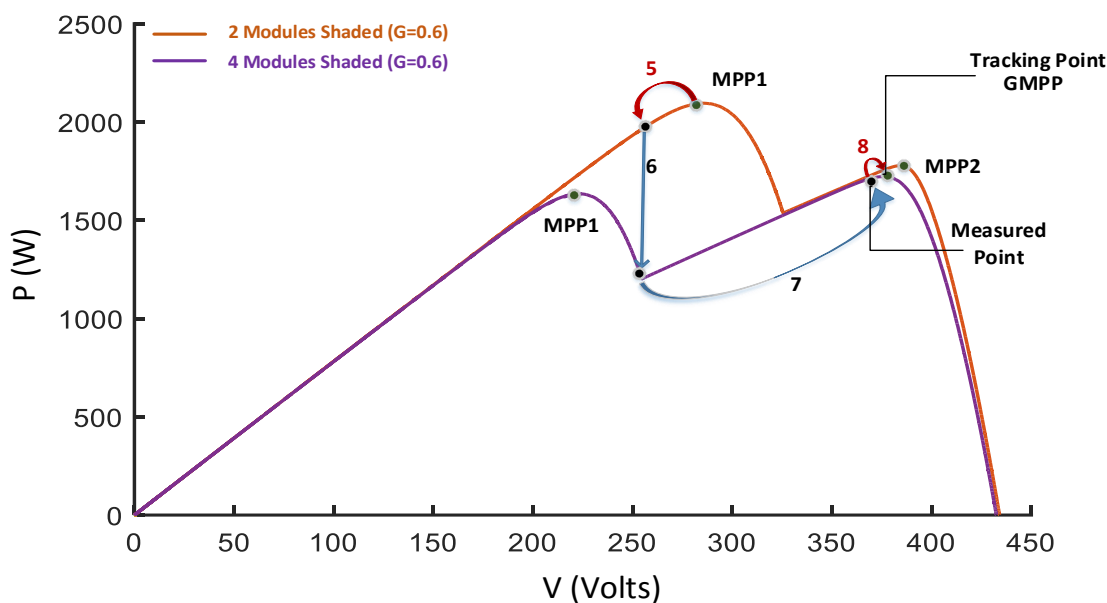


Σχ. 5. 45. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Πιο αναλυτικά, βλέπουμε ότι με τη σκίαση του πρώτου ζεύγους πλαισίων, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει κατακόρυφα για τους λόγους που εξηγήθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες (1) και (2), από το αρχικό MPP1, προς την περιοχή του MPP1 της δεύτερης καμπύλης. Τότε, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει αμέσως στο MPP2 (3) και υπολογίζεται η ένταση του επιπέδου ακτινοβολίας της σκίασης. Έτσι γίνεται εκτίμηση της ισχύος των δύο LMPPs και το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει (4) αυτόματα στο MPP1, το οποίο αποτελεί το GMPP σε αυτή την κατάσταση.



Σχ. 5. 46. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.



Σχ. 5. 47. Αναλυτική γραφική παρουσίαση των βημάτων αναζήτησης του GMPP, με την εφαρμογή του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Στη συνέχεια, με την εξάπλωση της σκίασης προς το δεύτερο ζευγάρι πλαίσίων της ΦΒ πλαισιοσειράς (6), το MPP1 δεν αποτελεί πλέον το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία μαθηματικής εκτίμησης των τοπικών μεγίστων της καμπύλης P-V κάθε 15 κύκλους λειτουργίας, ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται την αλλαγή αυτή. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις στις οποίες στηρίζεται, μετρά την ενεργειακή στάθμη κάποιου σημείου πολύ κοντά στο MPP2 και συγκρίνοντας την ισχύ του με αυτή του MPP1, διαπιστώνει ότι το MPP2 αποτελεί το GMPP στην παρούσα φάση. Έτσι, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει ακαριαία στο μετρούμενο σημείο (7) και εφαρμόζοντας, στη συνέχεια, τον αλγόριθμο P&O, συγκλίνει στο MPP2 (8), όπου και παραμένει μέχρι την επόμενη αλλαγή.

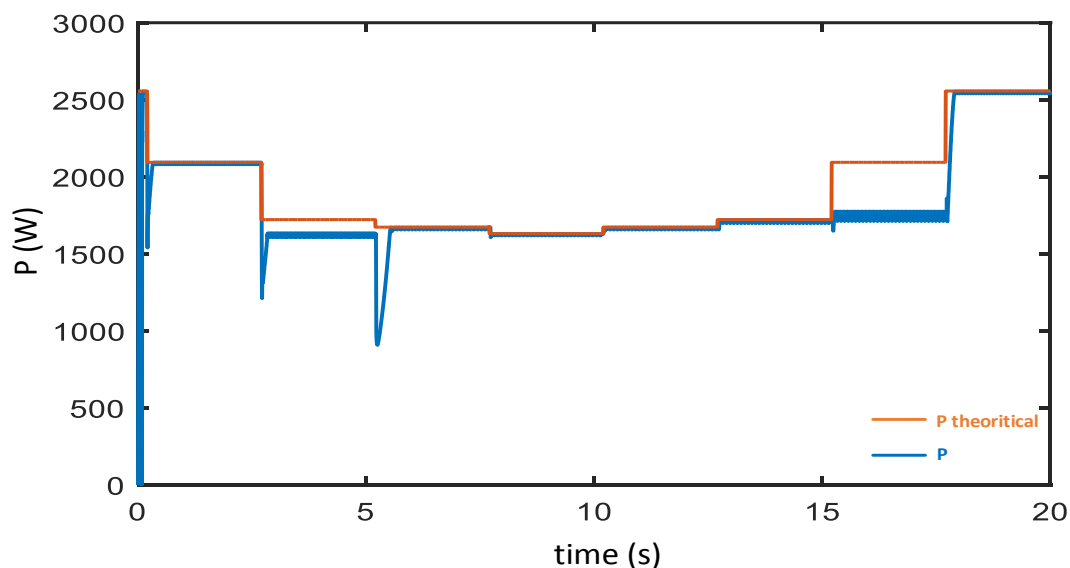
Παρακάτω, στον Πίνακα 5. 34, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά της αποδοτικότητας του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Πίνακας 5. 34. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου στο [49], κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
98,58	77	300	10	92,50	29,63

5.3.2.G Οι συμβατικοί αλγόριθμοι *Perturb & Observe(P&O)* και *Incremental Conductance(INC)*

Η πληρότητα της μελέτης της αποδοτικότητας των αλγορίθμων MPPT που εξετάζονται, απαιτεί κι εδώ τη σύγκριση τους με τις επιδόσεις των γνωστότερων και παλαιότερων συμβατικών αλγορίθμων στις ίδιες συνθήκες δοκιμών. Για το λόγο αυτό, οι ευρέως διαδεδομένοι κλασσικοί αλγόριθμοι P&O και INC προσομοιώθηκαν στα ίδια σενάρια σκίασης με τους υπόλοιπους. Τα γραφήματα των ισχύων τους, καθώς και τα στατιστικά της αποδοτικότητας τους για το τρίτο σενάριο σκίασης παρουσιάζονται, παρακάτω, στα Σχ. 5. 48, Σχ. 5. 49 και στους Πίνακες Πίνακας 5. 35 και **Error! Reference source not found.**



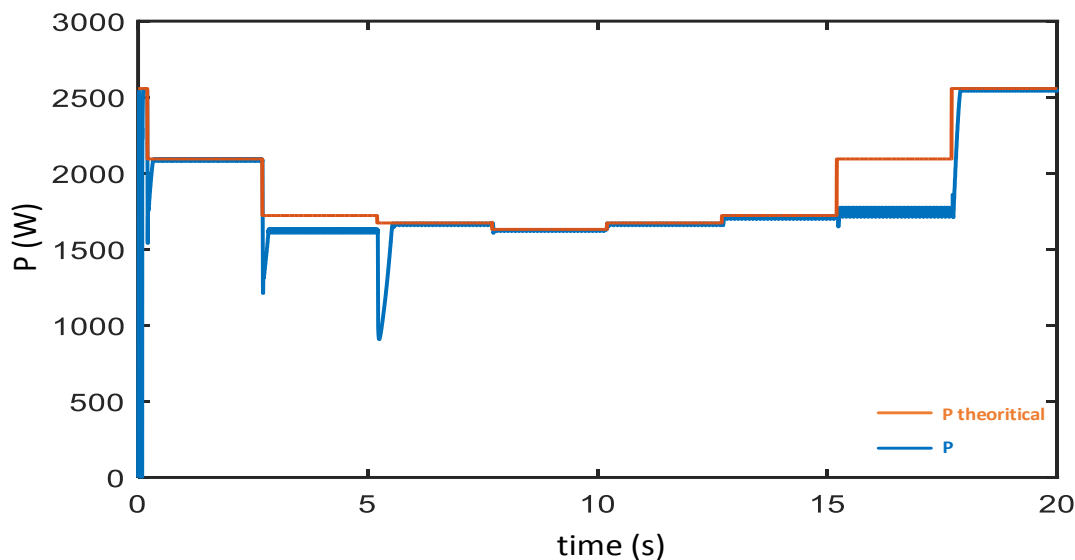
Σχ. 5. 48. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου P&O, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Πίνακας 5. 35. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου P&O, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
95,65	57	300	10	57,50	45,83

Πίνακας 5. 36. Στατιστικά αποδοτικότητας του αλγορίθμου INC, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
		Max.	Min.	Average	Max.
95,67	5/7	287	10	56,10	45,80



Σχ. 5. 49. Διάγραμμα εξαγόμενης ισχύος του ΦΒ, με τη χρήση του αλγορίθμου INC, κατά το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

5.3.2.H Συνοπτική σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων MPPT για το σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου

Συνοψίζοντας, στον Πίνακα 5. 37 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά στατιστικά των οκτώ αλγορίθμων οι οποίοι δοκιμάστηκαν στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Πίνακας 5. 37. Συγκεντρωτικά στατιστικά των αλγορίθμων MPPT στο τρίτο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου.

Algorithms	Average MPPT efficiency (%)	Hit Count	Convergence Time (ms)			Power Fluctuation during Stage 3(%)
			Max.	Min.	Average	Max.
[35]	91,80	7/7	1400	1000	1185,70	99,90
[36]	95,98	7/7	1200	800	937,50	94,43
[40]	96,22	5/7	400	150	271,43	74,04
[42]	98,10	7/7	300	200	250,00	84,35
[31]	95,89	7/7	900	150	721,43	30,10
[49]	98,58	7/7	300	10	92,50	25,52
P&O	95,65	5/7	300	10	57,50	45,83
INC	95,67	5/7	287	10	56,10	45,80

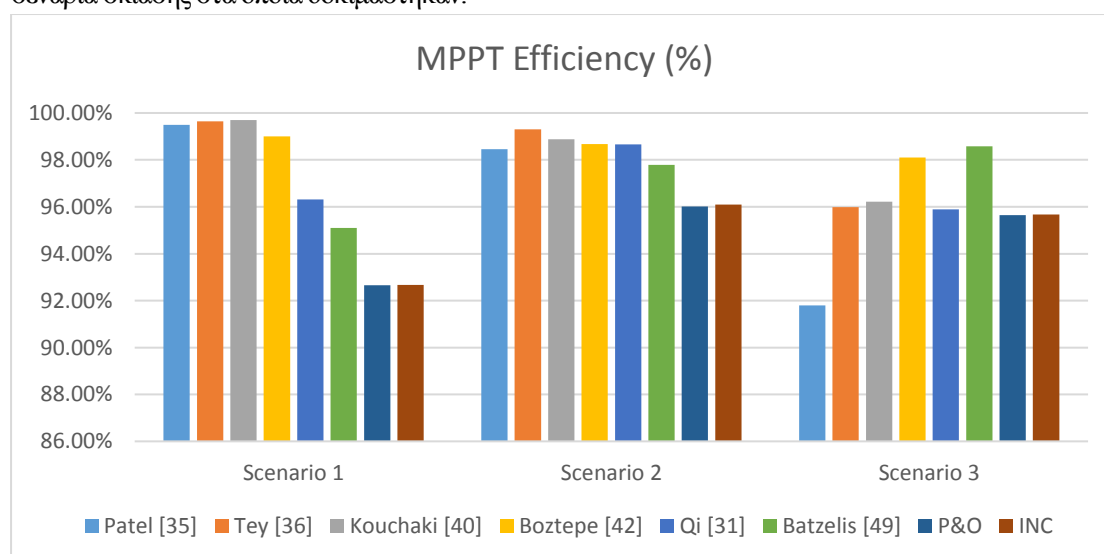
Από τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων στο τρίτο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου, μπορούν να εκφραστούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο αποδοτικότερος εκ των αλγορίθμων είναι ο αλγόριθμος στο [49]. Η μέση απόδοση MPPT του αγγίζει το 98,58%. Είναι το μόνο από τα σενάρια στο οποίο ο συγκεκριμένος αλγόριθμος λειτουργεί με τον τρόπο με τον οποίο είναι σχεδιασμένος, καθώς εδώ τηρούνται όλες οι προϋποθέσεις λειτουργίας του, σε αντίθεση με πριν. Επιπρόσθετα, οι αποδόσεις των αλγορίθμων σε αυτό το σενάριο είναι αισθητά χαμηλότερες σε γενικές γραμμές από τα δύο προηγούμενα σενάρια. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σύντομη χρονική διάρκεια του παρόντος σεναρίου.
2. Εξαιρώντας τους δύο συμβατικούς αλγόριθμους, ο αλγόριθμος στο [49] επιτυγχάνει τη μέση γρηγορότερη σύγκλιση από όλους. Η μέση ταχύτητα σύγκλισής του αγγίζει τα 92,50 ms. Αυτό οφείλεται στις άμεσες μεταβάσεις με τις οποίες λειτουργεί το τρίτο στάδιο του αλγορίθμου, με τη βοήθεια των μαθηματικών σχέσεων εκτίμησης των LMPPs.
3. Ο αλγόριθμος ο οποίος παρουσιάζει τη μικρότερη μέγιστη διακύμανση ισχύος είναι και πάλι αυτός που παρουσιάζεται στο [49]. Η μέγιστη διακύμανση του κατά το τρίτο στάδιο λειτουργίας του είναι στο 25,52%, γεγονός που έχει τις ρίζες του στους ίδιους παράγοντες με την ταχύτητα σύγκλισης του στα GMPP.
4. Όπως και στα δύο προηγούμενα σενάρια δοκιμών, έτσι κι εδώ, οι δύο συμβατικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν αρκετά χαμηλή απόδοση η οποία είναι όμως αρκετά κοντά με τις αποδόσεις των περισσότερο αποτυχημένων αλγορίθμων στο σενάριο αυτό. Αυτό, φυσικά, έχει να κάνει με τη φύση και τα χαρακτηριστικά του σεναρίου.

5.4 Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα τρία σενάρια σκίασης

5.4.1 Η απόδοση MPPT των αλγορίθμων

Παρακάτω, στο Σχ. 5. 50, παρουσιάζεται η απόδοση των αλγορίθμων συγκεντρωτικά και για τα τρία σενάρια σκίασης στα οποία δοκιμάστηκαν.

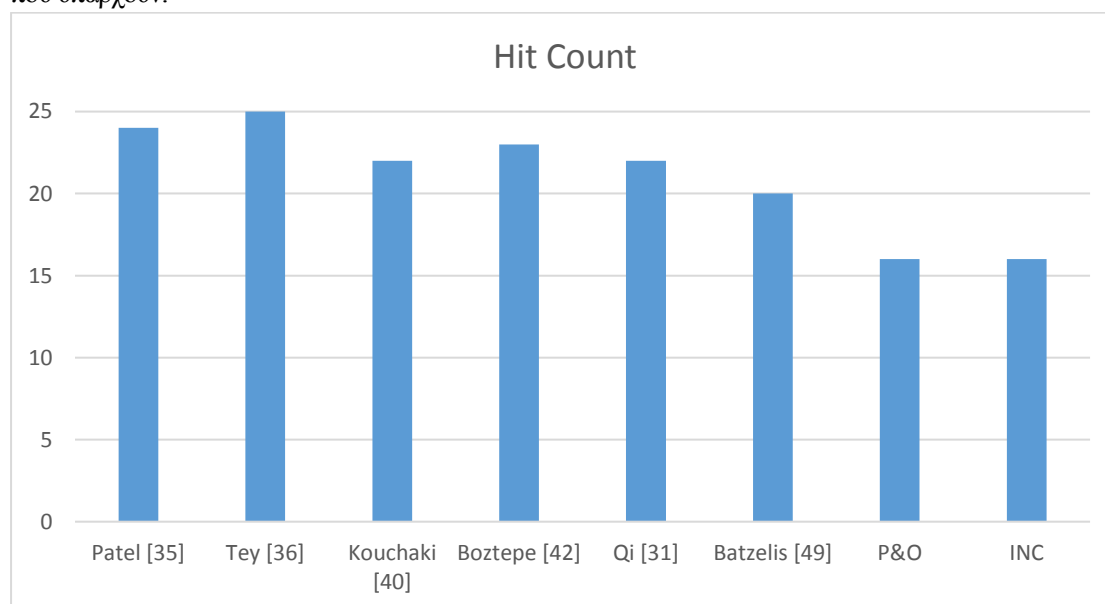


Σχ. 5. 50. Συγκεντρωτικό γράφημα της απόδοσης MPPT όλων των αλγορίθμων σε όλα τα σενάρια σκίασης δοκιμών.

Από το γράφημα προκύπτουν τα εξής:

- Σε όλες τις περιπτώσεις σεναρίων φαίνεται ξεκάθαρα ότι είναι περισσότερο συμφέρουσα η εφαρμογή ενός αλγορίθμου MPPT σε σύγκριση με τους τυπικούς αλγόριθμους P&O, INC κλπ. Αξιοσημείωτη εξαίρεση αποτελεί ο [35] στο σενάριο σκίασης του κινούμενου σύννεφου. Η πολύ μεγάλη διακύμανση και ο υψηλός χρόνος σύγκλισης στο GMPP κατά το τρίτο στάδιο του αλγορίθμου (όπως φαίνονται και στα επόμενα γραφήματα), δεν του επιτρέπουν να ανταποκρίνεται κατά το δοκούν σε σενάρια σκίασης μικρής χρονικής διάρκειας με γρήγορες μεταβολές. Αυτό κάνει περισσότερο ασύμφορο τον αλγόριθμο ακόμα και από κάποιον συμβατικό, για τέτοιου είδους σενάρια.
- Σε κάθε σενάριο προκύπτει διαφορετικός αλγόριθμος ως πιο αποδοτικός. Στο σενάριο σκίασης ανοικτού χώρου πιο αποδοτικός είναι ο αλγόριθμος στο [40], στο σενάριο σκίασης οροφής είναι ο [36], ενώ στο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου είναι ο [49]. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός σεναρίου σκίασης σε συνδυασμό με τον τύπο εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος, διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην απόδοση ενός αλγορίθμου MPPT. Ο κάθε αλγόριθμος δεν αποδίδει το ίδιο σε όλα τα σενάρια σκίασης. Συμπερασματικά, ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να μελετήσει τον χώρο εγκατάστασης και το μέσο όρο καιρικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτόν, για την κατάλληλη τελική επιλογή του εφαρμοζόμενου αλγορίθμου.
- Η πιο σταθερή απόδοση και στα τρία σενάρια προκύπτει από τον αλγόριθμο στο [42]. Έτσι, σε περίπτωση μειωμένης γνώσης του σχεδιαστή για το χώρο εγκατάστασης και τις καιρικές συνθήκες, ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί την πιο αξιόπιστη επιλογή σε σύγκριση με τους υπόλοιπους.
- Τα ποσοστά αποδόσεων των περισσότερων αλγορίθμων φαίνονται αρκετά αυξημένα στα δύο πρώτα σενάρια, σε αντίθεση με το τρίτο. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες χρονικές διάρκειες όπου η ισχύς κυμαίνεται γύρω από συγκεκριμένες σταθερές περιοχές, στα δύο πρώτα αργά σενάρια.

Στο Σχ. 5. 51 φαίνονται οι επιτυχημένες συγκλίσεις σε GMPP για κάθε αλγόριθμο ανάμεσα στα συνολικά που υπάρχουν.

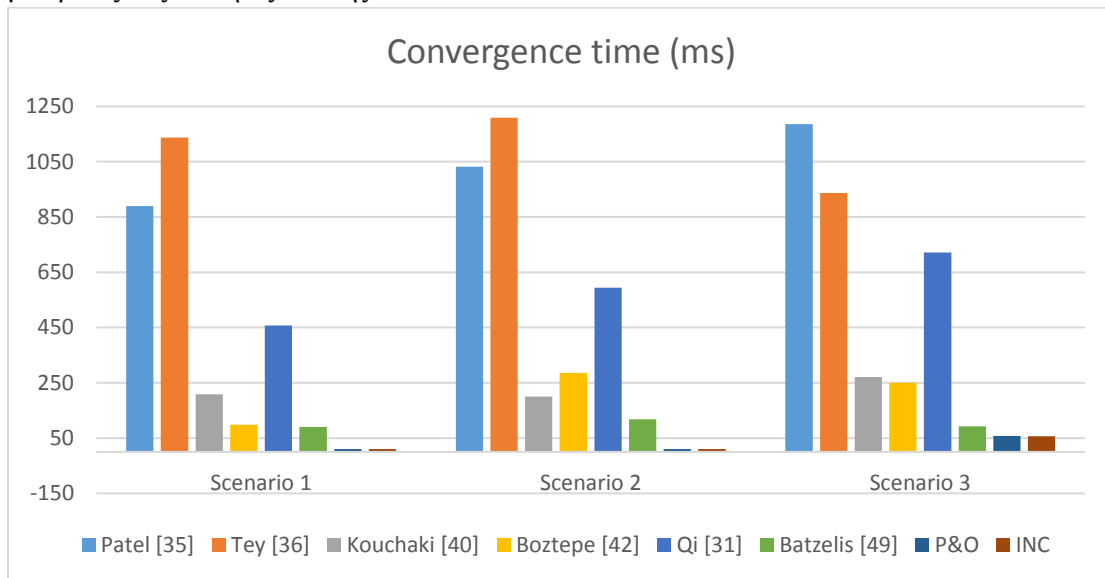


Σχ. 5. 51. Συγκεντρωτικό γράφημα του συνολικού αριθμού των επιτυχημένων συγκλίσεων σε GMPP, όλων των αλγορίθμων σε όλα τα σενάρια σκίασης δοκιμών.

- Ο συνολικός αριθμός GMPP που εμφανίζεται στο σύνολο των καταστάσεων και των τριών σεναρίων, είναι 25. Παρατηρούμε ότι σαφές προβάδισμα, εδώ, έχουν οι αλγόριθμοι στα [36] και [35], με 25/25 και 24/25 επιτυχίες αντίστοιχα, ενώ οι συμβατικοί αλγόριθμοι P&O και INC, όπως είναι λογικό, βρίσκονται πολύ πιο πίσω με 16/25 επιτυχημένες συγκλίσεις.
- Η επιτυχία σε συγκλίσεις GMPP δεν μεταφράζεται απαραίτητα και σε αυξημένη απόδοση MPPT για έναν αλγόριθμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι δύο προαναφερθέντες αλγόριθμοι στα [35] και [36], όπου η καθολική τους επιτυχία σε αριθμό συγκλίσεων δεν εκφράζεται στην απόδοσή τους στο τρίτο σενάριο σκίασης κινούμενου σύννεφου. Υπάρχουν κι άλλα χαρακτηριστικά, όπως η διακύμανση ισχύος και η ταχύτητα σύγκλισης που αναλύονται παρακάτω, τα οποία παίζουν ρόλο στην απόδοση ενός αλγορίθμου MPPT.
- Πρέπει, ακόμα, να τονιστεί ότι το πλήθος των επιτυχημένων GMPPs γενικότερα για κάποιον αλγόριθμο δεν είναι πάντα μέγεθος ενδεικτικό της απόδοσης του. Πολύ συχνά συμβαίνει να χάνεται η σύγκλιση σε κάποιο GMPP λόγω της ύπαρξης ενός LMPP πολύ κοντινής ενεργειακής στάθμης. Η σύγκλιση, οπότε, σε αυτό το LMPP αντί του GMPP δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση.

5.4.2 Ο χρόνος σύγκλισης των αλγορίθμων MPPT

Στο Σχ. 5. 52 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος σύγκλισης των αλγορίθμων στα GMPP, όταν υπάρχουν μεταβολές στις συνθήκες σκίασης.



Σχ. 5. 52. Συγκεντρωτικό γράφημα του μέσου χρόνου σύγκλισης όλων των αλγορίθμων σε όλα τα σενάρια σκίασης δοκιμών.

Από το γράφημα συμπεραίνονται εύκολα τα εξής:

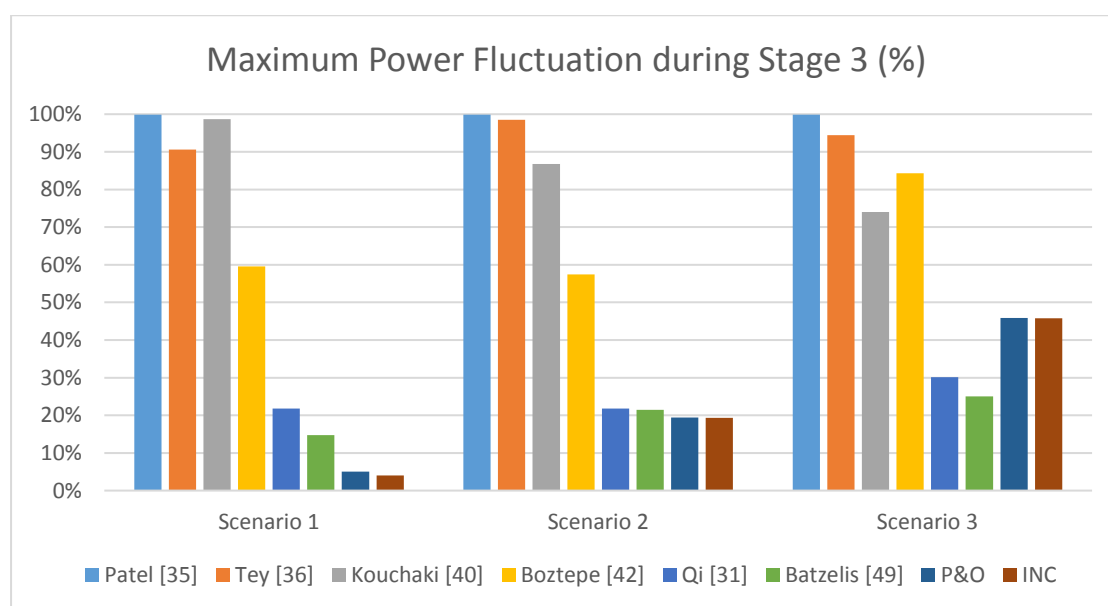
- Η ταχύτητα σύγκλισης επηρεάζεται ως επί το πλείστον από τη δομή και τα χαρακτηριστικά του τρίτου σταδίου λειτουργίας των αλγορίθμων, και λιγότερο από τη φύση του εκάστοτε σεναρίου σκίασης. Για το λόγο αυτό βλέπουμε ένα συγκεκριμένο μοτίβο στις τιμές των ταχυτήτων σύγκλισης των αλγορίθμων, το οποίο ακολουθείται και στα τρία σενάρια δοκιμών.
- Οι αλγόριθμοι οι οποίοι είναι πιο αργοί από τους υπόλοιπους σε όλα τα σενάρια είναι οι [35] και [36]. Αυτό οφείλεται στη φύση της μεθοδολογίας που ακολουθούν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι στο τρίτο στάδιο λειτουργίας τους. Χρησιμοποιούν μια αρκετά εκτεταμένη, παρόμοιας λογικής,

σάρωση της χαρακτηριστικής P-V, κάτι που οδηγεί σε πολλές περιπτώσεις σε αργή σύγκλιση στο σημείο αναζήτησης.

- Ο πιο γρήγορος αλγόριθμος, με εξαίρεση φυσικά τους συμβατικούς, σε όλα τα σενάρια είναι ο [49]. Η άμεση μετάβαση του σημείου λειτουργίας κάθε φορά στο GMPP, χωρίς να γίνεται αναγνωριστική μετακίνησή του στην χαρακτηριστική καμπύλη, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτό. Οι μεταβάσεις γίνονται απευθείας και είναι γρήγορες, οπότε οι καθυστερήσεις κατά τις συγκλίσεις μειώνονται αισθητά.

5.4.3 Η μέγιστη τιμή διακύμανσης ισχύος κατά το τρίτο στάδιο λειτουργίας των αλγορίθμων MPPT

Στο Σχ. 5. 53 παρουσιάζεται η μέγιστη ποσοστιαία διακύμανση της ισχύος, η οποία προκαλείται κατά το τρίτο στάδιο αναζήτησης του GMPP.



Σχ. 5. 53. Συγκεντρωτικό γράφημα της μέγιστης διακύμανσης ισχύος κατά το τρίτο στάδιο λειτουργίας των αλγορίθμων σε όλα τα σενάρια σκίασης δοκιμών.

Από το γράφημα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Αρχικά, παρατηρείται κι εδώ, όπως και στην ταχύτητα σύγκλισης, ένα δεδομένο μοτίβο στις τιμές της διακύμανσης και για τα τρία σενάρια σκίασης. Αυτό, φυσικά, οφείλεται στο ότι και η διακύμανση της ισχύος είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο επηρεάζεται κυρίως από τη φύση της μεθοδολογίας την οποία ακολουθεί ο κάθε αλγόριθμος, και όχι σε τόσο μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του κάθε σεναρίου σκίασης. Μόνη εξαίρεση αποτελούν οι δύο συμβατικοί αλγόριθμοι, όπου στο σενάριο σκίασης του κινούμενου σύννεφου παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη μέγιστη διακύμανση απ' ό,τι στα δύο άλλα σενάρια. Αυτό οφείλεται στις γρήγορες μεταβολές της ακτινοβολίας στο σενάριο αυτό όπου τυχάνει να οδηγούν σε μετάπτωση του σημείου λειτουργίας σε αρκετά χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη σε ορισμένες περιπτώσεις.
- Μεγαλύτερη μέγιστη διακύμανση σταθερά σε όλα τα σενάρια φαίνεται να έχουν οι αλγόριθμοι στα [35], [36] και [40] οι οποίοι λόγω της ευρείας σάρωσης της καμπύλης P-V που χρησιμοποιούν κατά την αναζήτηση του GMPP, μετακινούν συχνά το σημείο λειτουργίας σε ακραία χαμηλές τιμές ισχύος.

- Σε γενικές γραμμές, οι τέσσερις πρώτοι αλγόριθμοι που φαίνονται στο Σχ. 5. 53 [35], [36], [40] και [42] παρουσιάζουν πολύ μεγάλη μέγιστη τιμή διακύμανσης ισχύος η οποία κυμαίνεται άνω του 50% και μέχρι σχεδόν το 100% της εγκατεστημένης. Το γεγονός αυτό δημιουργεί σοβαρά θέματα ποιότητας ισχύος στο δίκτυο.
- Αντίθετα, όπως φαίνεται, οι καταλληλότεροι αλγόριθμοι με βάση τη μέγιστη διακύμανση είναι οι [31] και [49], οι οποίοι παρουσιάζουν μέγιστες τιμές διακύμανσης ισχύος σταθερά κάτω από 30% και 26%, αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

**Συμπεράσματα και περαιτέρω
έρευνα**

Στο παρόν κεφάλαιο, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα και σημεία συνεισφοράς της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, περιγράφονται κάποια πιθανά, ανοικτά και σχετικά πεδία περαιτέρω έρευνας.

6.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων και σημείων καινοτομίας

Σε αυτή την υποενότητα θα περιγραφούν συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα και αποτελέσματα της εργασίας ανά στάδιο διερεύνησης και, παράλληλα, θα επισημανθούν οι καινοτομίες σε κάθε περίπτωση.

6.1.1 Τα τρία στάδια λειτουργίας

Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του πεδίου που αφορά τους αλγόριθμους MPPT οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του DC/DC μετατροπέα σε ένα ΦΒ σύστημα, προέκυψε ένα συγκεκριμένο μοτίβο δομής τους. Το μοτίβο αυτό περιλαμβάνει **τρία στάδια λειτουργίας**: το *στάδιο σύγκλισης*, το *στάδιο εντοπισμού της αλλαγής κατάστασης(σκίαση)* και το *στάδιο αναζήτησης του GMPP*. Η μεθοδολογία των τριών σταδίων αναλύθηκε εκτενώς με παραδείγματα και σχηματικά διαγράμματα στο Κεφάλαιο 3. Η συγκεκριμένη παρατήρηση βοηθά πολύ στην κατανόηση της λειτουργίας ενός αλγορίθμου MPPT, στο διαχωρισμό των αλγορίθμων σε υποκατηγορίες για την διευκόλυνση της μελέτης τους, καθώς και στη συγκεκριμενοποίηση των κριτηρίων της περαιτέρω βελτιστοποίησης των. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει αντίστοιχη ανάλυση/κατηγοριοποίηση στη βιβλιογραφία.

6.1.2 Διαχωρισμός των αλγορίθμων MPPT σε υποκατηγορίες

Με δεδομένη την παρατήρηση της λειτουργίας των τριών σταδίων, στη συνέχεια, έγινε ένας διαχωρισμός των αλγορίθμων MPPT σε υποκατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Οι δύο μεγάλες υποκατηγορίες αλγορίθμων είναι: *οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι MPPT* και *οι ευριστικοί αλγόριθμοι MPPT*. Οι ντετερμινιστικοί, συνεχίζοντας, διαχωρίστηκαν στους: *αλγόριθμους που στηρίζονται σε εμπειρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών του συστήματος(System Characteristic Curve MPPT Methods-SCCMM)*, *τους αλγόριθμους περιορισμένης σάρωσης της χαρακτηριστικής P-V(Restricted Scan MPPT Methods-RSMM)* και *τους αλγόριθμους που βασίζονται σε μαθηματικές ή άλλες μεθόδους διαχωρισμού της καμπύλης P-V σε τμήματα(Segmental Search MPPT Methods-SSMM)*. Ενώ, οι ευριστικοί στους: *αλγόριθμους νευρωνικών δικτύων(MPPT ANN-based Algorithms)*, *τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης ασαφούς λογικής(MPPT FLC-Based Algorithms)*, *τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων(Particle Swarm Optimization-PSO)*, *τους γενετικούς αλγόριθμους(Genetic MPPT Algorithms)* και *μερικούς ακόμα αλγόριθμους MPPT*, όπου η λογική τους δεν ανήκει σε καμία από τις παραπάνω. Ο διαχωρισμός αυτός βοήθησε ιδιαίτερα στην ανάλυση τους και στη κατηγοριοποίηση πολλών χαρακτηριστικών τους, τα οποία είναι καθοριστικά για την ολοκληρωμένη διερεύνηση του συγκεκριμένου πεδίου.

6.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Αλγορίθμων MPPT

Μέσα από την παραπάνω ανάλυση, η οποία είναι από τις μοναδικές στη βιβλιογραφία που συμπεριέλαβε την πλειοψηφία των αλγορίθμων MPPT για συνθήκες μερικής σκίασης που έχουν δημιουργηθεί έως σήμερα, έγινε δυνατός ο τονισμός των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η κάθε υποκατηγορία αλγορίθμων κατά την εφαρμογή τους σε ένα σκιασμένο ΦΒ σύστημα. Στο τέλος του

Κεφαλαίου 3 παρουσιάζεται ο Πίνακας 2. 9, ο οποίος συνοψίζει με πρακτικό τρόπο όλα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε υποκατηγορίας αλγορίθμων MPPT.

6.1.4 Η επιλογή των αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση

Τα κριτήρια επιλογής των συγκρινόμενων αλγορίθμων MPPT αυτής της εργασίας, όπως τονίζεται και στο Κεφάλαιο 4, είχαν ως επίκεντρο την υπολογιστική και δομική πολυπλοκότητα. Στην ουσία αποκλείστηκαν από την έρευνα όλοι οι ευριστικοί MPPT αλγόριθμοι καθώς, στην πλειοψηφία τους, αυξάνουν υπερβολικά το εμπορικό και χρονικό κόστος σε αναλογία με το αποτέλεσμα που προσφέρουν σε σύγκριση με τους απλούστερους αλγόριθμους. Πρακτικά, έγινε η προσπάθεια για μια επιλογή αλγορίθμων, από το παρόν υλικό της βιβλιογραφίας, με όσο το δυνατόν ρεαλιστικά και εμπορικά κριτήρια.

6.1.5 Τα τρία σενάρια σκίασης

Στην παρούσα εργασία δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη ρεαλιστική επιλογή των σεναρίων, καθώς η έως τώρα βιβλιογραφία υστερεί αρκετά σε αυτό το κομμάτι. Είναι η πρώτη μελέτη που ξεχωρίζει τα σενάρια σκίασης βάσει ποιοτικών χαρακτηριστικών για σύγκριση των αλγορίθμων MPPT. Πρωταρχικός στόχος αποτελεί, τα σενάρια αυτά να αντιπροσωπεύουν μια αρκετά μεγάλη γκάμα πιθανών καταστάσεων στις οποίες μπορεί να επέλθει μια ΦΒ συστοιχία κατά τη διάρκεια της καθημερινής της λειτουργίας. Έτσι, τα σενάρια σκίασης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, περιλαμβάνουν ΦΒ σύστημα εγκατεστημένο τόσο σε ανοικτό χώρο (*open field*), όσο και σε οροφή (*rooftop*), ενώ καλύπτουν και την κοινή περίπτωση σκίασης λόγω κάποιου κινούμενου σύννεφου (*moving cloud*). Περιλαμβάνουν περιπτώσεις όπου εμφανίζονται μέχρι και τρία επίπεδα ακτινοβολίας, μέγεθος αρκετά αντικατοπτριστικό μιας κοινής ημέρας του χρόνου στη χώρα μας. Επιπρόσθετα, τα τρία επίπεδα ακτινοβολίας εσωκλείουν μια πολυπλοκότητα η οποία αποτελεί ένα καλό μέτρο δοκιμής για τους αλγόριθμους MPPT. Επίσης, στα σενάρια σκίασης εξετάζεται τόσο η άφιξη της σκίασης σε ένα ΦΒ όσο και η υποχώρηση αυτής, ώστε να δημιουργηθεί μια πιο εμπειριστατωμένη εικόνα του φαινομένου. Τέλος, οι αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν σε αργές και σε γρήγορες μεταβολές της ακτινοβολίας, γεγονός που όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους.

6.1.6 Αξιολόγηση συγκρινόμενων αλγορίθμων MPPT

- Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο [35] είναι ο παλαιότερος όλων και η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί για τον εντοπισμό του GMPP είναι σχετικά απλή και δεν καλύπτει μεγάλη γκάμα περιπτώσεων σκίασης. Όπως φαίνεται και στα γραφήματα 5. 51 - 5. 54 του Κεφαλαίου 5, ο αλγόριθμος φαινομενικά καταφέρνει να εντοπίσει ένα πολύ μεγάλο αριθμό τοπικών μεγίστων συνολικά σε όλα τα σενάρια κάτι που οφείλεται στο μικρό βήμα σάρωσης που χρησιμοποιεί και επιτρέπει μια πυκνή και εκτεταμένη διερεύνηση πάνω στην καμπύλη P-V. Κατά το δεύτερο στάδιο λειτουργίας του, όμως, η συνθήκη εντοπισμού της σκίασης δεν φαίνεται να λειτουργεί όσο αποδοτικά θα έπρεπε σε αργές μεταβάσεις της ακτινοβολίας, παρά το γεγονός ότι ρυθμίστηκε ώστε να είναι αρκετά ευαίσθητη σε μεταβολές. Αυτό τυχαίνει, εδώ, να οδηγεί τον αλγόριθμο στην αποτυχία εντοπισμού μόνο ενός GMPP, αλλά δημιουργεί αρκετά ερωτηματικά για την απόκριση του αλγορίθμου σε πολύπλοκα σενάρια σκίασης αργών μεταβολών. Παράλληλα, η έκταση σάρωσης κατά την αναζήτηση του GMPP, η οποία φτάνει σε ακραία τμήματα της χαρακτηριστικής καμπύλης, οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύος που φτάνουν το 60-85% της εγκατεστημένης. Αναπόφευκτα, η διακύμανση ισχύος κατά τα διαστήματα σάρωσης εκφράζεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, γεγονός που μειώνει σημαντικά την

ομαλότητα της διοχετευόμενης ισχύος. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι, επίσης, ο αρκετά μεγάλος χρόνος σύγκλισης στο GMPP, κατά το τρίτο στάδιο λειτουργίας του. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη σύγκλιση μέσω του αλγορίθμου P&O σε όλα τα τοπικά μέγιστα που εντοπίζει, διεργασία που επιβραδύνει σημαντικά την όλη διαδικασία. Τελικά, ο αλγόριθμος στο [35] παρουσιάζει αυξημένη απόδοση μόνο στα δύο πρώτα σενάρια τα οποία διαρκούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η μεγάλη διάρκεια των σεναρίων καλύπτει τις αυξημένες απώλειες ενέργειας οι οποίες δημιουργούνται από τις μεγάλες διακυμάνσεις ισχύος, τις αργές ταχύτητες σύγκλισης στα GMPP και την αποτυχία εντοπισμού ενός GMPP στο δεύτερο σενάριο σκίασης. Στο τρίτο σενάριο σκίασης το οποίο περιλαμβάνει πολύ γρήγορες μεταβολές ακτινοβολιών και είναι εξαιρετικά σύντομο σε διάρκεια, τα παραπάνω αρνητικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου αντικατοπτρίζονται, φυσικά, και στην απόδοση του μειώνοντάς τη σημαντικά.

- Ο αλγόριθμος στο [36] χρησιμοποιεί μεθοδολογία εύρεσης του GMPP στο τρίτο στάδιο λειτουργίας του, παρόμοιας λογικής με εκείνη στο [35]. Η ουσιώδης διαφορά εδώ, είναι ότι το βήμα σάρωσης της χαρακτηριστικής P-V είναι αρκετά μεγαλύτερο και με τη βοήθεια των οριακών τιμών στο παράθυρο σάρωσης αποφεύγεται, σε σύγκριση με πριν, η τόσο εκτεταμένη σάρωση της καμπύλης για την εύρεση των GMPP. Έτσι, οι διακυμάνσεις της ισχύος κατά το στάδιο αυτό είναι σαφώς μικρότερες σε σύγκριση με τον αλγόριθμο στο [35]. Από την άλλη, η διαδικασία σύγκλισης μέσω του συμβατικού αλγορίθμου INC σε όλα τα εντοπιζόμενα LMPPs, όπου υπάρχει κι εδώ, αποβαίνει καθοριστική στην ταχύτητα της συνολικής διεργασίας σύγκλισης στο εκάστοτε GMPP. Η ταχύτητα αυτή, εδώ, είναι ιδιαίτερα αργή. Επίσης, πρέπει να τονιστεί η υψηλή αποδοτικότητα του αλγορίθμου στην αναγνώριση των μεταβολών κατάστασης. Η συνθήκη που χρησιμοποιεί στο στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα επιτυχημένη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καθολική επιτυχία εντοπισμού όλων των εμφανιζόμενων GMPP από τον αλγόριθμο. Συνολικά, λοιπόν, θα έλεγε κανείς πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αντιμετωπίζει το ίδιο πρόβλημα με τον προηγούμενο σε σύντομα σενάρια σκίασης, καθώς ο μεγάλος χρόνος σύγκλισης και οι μέτριες διακυμάνσεις της ισχύος του επηρεάζουν σημαντικά τον βαθμό απόδοσής του, ανεξάρτητα από την επιτυχία του στον εντοπισμό των GMPP. Από την άλλη, σε αντίθεση με τον προηγούμενο έχει εξαιρετικά αποτελέσματα σε σενάρια μεταβολής της ακτινοβολίας τα οποία έχουν μεγάλη διάρκεια, καθώς εντοπίζει όλες οι μεταβάσεις των ακτινοβολιών και η μεγάλη διάρκεια των σεναρίων υπερκαλύπτει τα αρνητικά στοιχεία του. Αυτό τον κάνει ιδανικό για εφαρμογή σε μεγάλα ΦΒ συστήματα, σε ανοικτό χώρο ενδεχομένως, τα οποία είναι εγκατεστημένα σε περιοχές με πολύ ήλιο και χαμηλής έντασης άνεμο κατά μέσο όρο.
- Ο αλγόριθμος στο [40] χρησιμοποιεί μια πολύ απλή μεθοδολογία αναζήτησης του GMPP, στο τρίτο του στάδιο, η οποία περιλαμβάνει μια απλή σάρωση της χαρακτηριστικής P-V με συγκεκριμένο βήμα που εξαρτάται από τον αριθμό των πλαισίων της ΦΒ συστοιχίας. Λόγω της πολύ μεγάλης έκτασης σάρωσης πάνω στην καμπύλη, οι διακυμάνσεις ισχύος εδώ είναι πάρα πολύ υψηλές. Επίσης, στα αρνητικά του συγκαταλέγεται η μεγάλη πιθανότητα που παρουσιάζει στο να απωλέσει κάποιο GMPP το οποίο βρίσκεται σε κοντινή ενεργειακή στάθμη με κάποιο άλλο τοπικό μέγιστο της καμπύλης, λόγω του μη προσαρμοζόμενου βήματος σάρωσης. Από την άλλη, η απουσία της διαδικασίας εντοπισμού και σύγκλισης σε κάθε LMPP ξεχωριστά, οδηγεί το χρόνο της συνολικής σύγκλισης του στο GMPP να είναι εξαιρετικά σύντομος. Στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας του κάνει χρήση του ίδιου κριτηρίου εντοπισμού της σκίασης με τον αλγόριθμο στο [35], έτσι αντιμετωπίζει τα ίδια ακριβώς προβλήματα που προαναφέρθηκαν. Στο

σύνολο του, μιλάμε για έναν μέτριο αλγόριθμο ο οποίος παρουσιάζει αξιόλογα αποτελέσματα μόνο σε σενάρια σκίασης με τοπικά μέγιστα τα οποία απέχουν ενεργειακά σε κάποιο βαθμό και είναι είτε μεγάλης χρονικής διάρκειας, είτε γρήγορων μεταβολών της ακτινοβολίας ώστε αυτές να εντοπίζονται.

- Στο [42] εξετάστηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος ανήκει στην ίδια υποκατηγορία με τους προηγούμενους αλλά χρησιμοποιεί μια αρκετά ενδιαφέρουσα και διαφορετική μεθοδολογία εντοπισμού του GMPP στο τρίτο του στάδιο. Στη μεθοδολογία αυτή οριοθετείται το παράθυρο αναζήτησης του GMPP πάνω στην καμπύλη P-V, γεγονός το οποίο συμβάλλει σε σύντομους χρόνους σύγκλισης στα διάφορα βέλπιστα σημεία λειτουργίας ενώ μειώνει αισθητά τις διακυμάνσεις της ισχύος κατά τη διάρκεια του φαινομένου της σκίασης. Το μεγάλο μειονέκτημα του αλγορίθμου, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι η συνθήκη εντοπισμού της σκίασης που χρησιμοποιεί. Το συγκεκριμένο στάδιο λειτουργίας του αλγορίθμου φαίνεται να είναι προβληματικό ακόμα και στο σενάριο με τις γρήγορες μεταβολές των ακτινοβολιών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να κυμαίνεται, συνολικά, σε μέτρια προς καλά ποσοστά απόδοσης MPPT, καθώς αποτυγχάνει στον εντοπισμό κάποιων GMPP λόγω της μη αναγνώρισης ορισμένων μεταβολών στις ακτινοβολίες. Η συνέπεια, παρ' όλα αυτά, που επιδεικνύει στη συνολική λειτουργία του και στα τρία σενάρια σκίασης, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι θα ήταν πολύ πιο αποδοτικός αν χρησιμοποιούσε μια πιο επιτυχημένη συνθήκη αναγνώρισης των μεταβολών στις ακτινοβολίες.
- Ο αλγόριθμος στο [31] είναι ένας από εκείνους που χρησιμοποιούν κάποια εμπειρική παρατήρηση που έχει να κάνει με τη γραμμή φορτίου σε STC συνθήκες για το σύστημα. Βάση αποτελεσμάτων, πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος παρουσιάζει ελάχιστες διακυμάνσεις ισχύος στα διαστήματα εντοπισμού των GMPP, αλλά αρκετά χαμηλή ταχύτητα σύγκλισης. Σε σενάρια με αργές μεταβολές της ακτινοβολίας, η συνθήκη εντοπισμού της σκίασης παρουσιάζει αρκετά μεγάλο πρόβλημα επιτυχίας, με αποτέλεσμα να χάνει ορισμένα GMPP. Ακόμα, σε πολύπλοκα σενάρια σκίασης με την ύπαρξη πολλών LMPPs η συνολική επιτυχία του αμφισβητείται. Γενικά, πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος θα ήταν ιδανικός για σενάρια σκίασης χαμηλής πολυπλοκότητας, με γρήγορες μεταβολές της ακτινοβολίας και με μέτρια έως μεγάλη συνολική χρονική διάρκεια. Σενάρια τα οποία συνδυάζουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι, βέβαια, είναι εξαιρετικά σπάνια σε ρεαλιστικές συνθήκες.
- Κλείνοντας, ο αλγόριθμος ο οποίος παρουσιάζεται στο [49] και ανήκει στην τρίτη υποκατηγορία των ντετερμινιστικών αλγορίθμων, είναι αρκετά διαφορετικής λογικής από όλους τους προηγούμενους. Στον αλγόριθμο αυτό οι διακυμάνσεις της ισχύος κατά τη μετάβαση στο εκάστοτε GMPP θα έλεγε κανείς ότι απουσιάζουν. Επίσης, ο χρόνος σύγκλισης στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι εξαιρετικά μικρός. Από την άλλη, όμως η απαίτηση κάποιων συγκεκριμένων προϋποθέσεων για την εφαρμογή του-οι οποίες έχουν αναλυθεί εκτενώς στα Κεφάλαια 4 και 5-περιορίζουν αρκετά τη χρήση του. Το σαφές πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου φαίνεται ξεκάθαρα στο τρίτο σενάριο κινούμενου σύννεφου. Εκεί, α) οι μεταβολές της ακτινοβολίας είναι γρήγορες και ευνοούν τις απαιτούμενες μεταβάσεις του αλγορίθμου από το MPP_x της προηγούμενης κατάστασης στο MPP_x της επόμενης, και β) τα εμφανιζόμενα LMPPs στις χαρακτηριστικές καμπύλες δεν υπερβαίνουν τα δύο. Αντίθετα, στα δύο πρώτα σενάρια ανοικτού χώρου και οροφής, όπου οι μεταβολές της ακτινοβολίας είναι αργές και τα εμφανιζόμενα τοπικά μέγιστα φτάνουν τα τρία σε κάποιες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος

αποτυγχάνει. Συμπερασματικά, ο [49] είναι, θα λέγαμε, ιδανικός για εφαρμογή σε σχετικά μικρά ΦΒ συστήματα τα οποία επηρεάζονται συχνά από ταχέως κινούμενα σύννεφα και τα εμφανιζόμενα τοπικά μέγιστα κατά τις περιόδους σκίασης δεν υπερβαίνουν συχνά τα δύο.

6.1.7 Επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου MPPT για ένα υπό-μελέτη ΦΒ σύστημα

Σκοπός της ερευνητικής διαδικασίας στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι, σε τελική ανάλυση, η δυνατότητα επιλογής ενός από τους συγκρινόμενους αλγορίθμους MPPT με χρήση των κριτηρίων και των αποτελεσμάτων που τέθηκαν στη διάθεση του αναγνώστη, για τη διαχείριση ενός υπό-μελέτη ΦΒ συστήματος. Η κατάλληλη επιλογή έχει ως θεμέλιο δύο βασικές παραμέτρους:

- την ακολουθία διάταξης του υπό-μελέτη ΦΒ συστήματος σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του χώρου εγκατάστασης. Συγκεκριμένα οι επιλογές που υπάρχουν εδώ με βάση τα επιλεγμένα σενάρια σκίασης είναι οι εξής: **ΦΒ σε ανοικτό χώρο με αρκετό ήλιο και λίγες αυτοσκιάσεις αργής μεταβολής, ΦΒ εγκατεστημένο σε οροφή με αρκετές ηλιόλουστες ημέρες αλλά συνεπτυγμένη διάταξη και πολλές σκιάσεις διάφορων διαβαθμίσεων** και **ΦΒ εγκατεστημένο σε αρκετά ανοικτό χώρο χωρίς πολύ ήλιο και χωρίς πολλές αυτοσκιάσεις, αλλά με αρκετά σύννεφα και δυνατούς ανέμους.**
- την κατανομή των αναγκών του περιβάλλοντος δικτύου του ΦΒ ή των επιθυμιών του χειριστή του συστήματος σε μια ιεραρχία. Για παράδειγμα, σε κάποιες ΦΒ εγκαταστάσεις πρωτεύον μέλημα αποτελεί η αυξημένη **απόδοση MPPT**, ενώ σε κάποιες άλλες η υψηλή **ταχύτητα σύγκλισης** στο επιθυμητό GMPP ή η ελαχιστοποίηση **της μέγιστης διακύμανσης ισχύος**. Τέλος, σημαντικό ρόλο μπορεί να παίζει κάποιος συνδυασμός της απόδοσης MPPT των αλγορίθμων με το ένα από τα άλλα δύο εξεταζόμενα μεγέθη, όπως **η απόδοση MPPT δεδομένου ότι η μέγιστη διακύμανση ισχύος δεν υπερβαίνει το 50%**, ώστε να συνδυάζεται υψηλή απόδοση με όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα εγχεόμενης ισχύος στο δίκτυο ή **η απόδοση MPPT δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος σύγκλισης δεν ξεπερνά το μισό δευτερόλεπτο (500 ms)**, ώστε να συνδυάζεται υψηλή απόδοση MPPT με πολύ γρήγορη απόκριση στις μεταβολές ακτινοβολίας ενός πιθανού γρήγορου σεναρίου σκίασης..

Αναλύοντας, λοιπόν, όλα τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τις δοκιμές και λαμβάνοντας υπ' όψη τα Σχ. 5. 50, 5. 52 και 5. 53 του προηγούμενου κεφαλαίου, καταλήγουμε στις εξής βέλτιστες επιλογές αλγορίθμων MPPT:

1. Για ένα σύστημα το οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί **σε ανοικτό χώρο με αρκετές ηλιόλουστες ημέρες και διεσπαρμένη διάταξη η οποία έχει σαν αποτέλεσμα λίγες αυτοσκιάσεις αργής μεταβολής κατά τη διάρκεια της ημέρας**, με βασικό κριτήριο:
 - **Την απόδοση MPPT**, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [40].
 - **Την ταχύτητα σύγκλισης στο GMPP**, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - **Τη μέγιστη διακύμανση ισχύος**, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - **Την απόδοση MPPT δεδομένου ότι η μέγιστη διακύμανση ισχύος δεν ξεπερνά το 50% της εγκατεστημένης**, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [31].
 - **Την απόδοση MPPT δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος σύγκλισης στο GMPP δεν ξεπερνά τα 500 ms**, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [40].

2. Σε ένα σύστημα το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί σε *συνεπτυγμένη διάταξη*, σε κάποια οροφή η οποία βρίσκεται σε τόπο με αρκετές ηλιόλουστες ημέρες αλλά με πολλές σκιάσεις διαφόρων διαβαθμίσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας, με βασικό κριτήριο:
 - Την απόδοση MPPT, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [36].
 - Την ταχύτητα σύγκλισης στο GMPP, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - Τη μέγιστη διακύμανση ισχύος, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - Την απόδοση MPPT δεδομένου ότι η μέγιστη διακύμανση ισχύος δεν ξεπερνά το 50% της εγκατεστημένης, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [31].
 - Την απόδοση MPPT δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος σύγκλισης στο GMPP δεν ξεπερνά τα 500 ms, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [40].

3. Σε ένα υπο-μελέτη σύστημα το οποίο θα εγκατασταθεί σε έναν αρκετά ανοικτό χώρο χωρίς πολύ ήλιο μέσα στο έτος και χωρίς πολλές αυτοσκιάσεις, αλλά με δυνατό άνεμο και αρκετά σύννεφα κατά τη διάρκεια της ημέρας, με βασικό κριτήριο:
 - Την απόδοση MPPT, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - Την ταχύτητα σύγκλισης στο GMPP, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - Τη μέγιστη διακύμανση ισχύος, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - Την απόδοση MPPT δεδομένου ότι η μέγιστη διακύμανση ισχύος δεν ξεπερνά το 50% της εγκατεστημένης, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].
 - Την απόδοση MPPT δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος σύγκλισης στο GMPP δεν ξεπερνά τα 500 ms, θα επιλέγαμε τον αλγόριθμο στο [49].

Για πρακτικούς λόγους οι παραπάνω οδηγίες επιλογής των αλγορίθμων με βάση τις παραμέτρους που αναλύθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 1.

Πίνακας 6. 1. Πίνακας επιλογής κατάλληλου αλγορίθμου με βάση διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων.

	Average MPPT Efficiency	Convergence Time	Power Fluctuation	Average MPPT Efficiency with Power Fluct. < 50% given	Average MPPT Efficiency with Convergence Time < 500 ms given
Open Field	[40]	[49]	[49]	[31]	[40]
RoofTop	[36]	[49]	[49]	[31]	[40]
Moving Cloud (Open Field)	[49]	[49]	[49]	[49]	[49]

6.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Το αντικείμενο με το οποίο καταπιάνεται η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον και περιέχει ζητήματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης ώστε να βελτιστοποιηθεί ο έλεγχος των ΦΒ συστημάτων σε συνθήκες μερικής σκίασης.

6.2.1 Πειραματική επιβεβαίωση των εξεταζόμενων αλγορίθμων MPPT και αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες

Η πειραματική εφαρμογή των συγκρινόμενων αλγορίθμων MPPT σε πραγματικό αντιστροφέα με σκοπό την πειραματική επιβεβαίωση των εξαγόμενων συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας σε πραγματικές συνθήκες αποτελεί, ίσως, το σημαντικότερο κρίκο της αλυσίδας στην περαιτέρω έρευνα αυτού του αντικειμένου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι επιθυμητή για τη θωράκιση και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που αναλύονται στις προηγούμενες υποενότητες, αλλά και για την εξαγωγή νέων χρήσιμων πληροφοριών οι οποίες αφορούν τον έλεγχο ενός ΦΒ συστήματος υπό μερική σκίαση.

6.2.2 Σαφής προσδιορισμός και εντοπισμός της σκίασης

Το κομμάτι αυτό αφορά το δεύτερο στάδιο λειτουργίας των αλγορίθμων MPPT. Όπως συμπεραίνεται και από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της εργασίας, το ζήτημα του έγκαιρου και έγκυρου εντοπισμού των μεταβολών της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου σκίασης επηρεάζει σημαντικά την απόδοση ενός αλγορίθμου MPPT στον έλεγχο του συστήματος. Ο προσδιορισμός μιας βέλτιστης συνθήκης εντοπισμού των μεταβολών αυτών, η οποία θα συνδυάζεται ιδανικά με μια αποδοτική αναζήτηση του GMPP στη συνέχεια, θα δώσει πολλές λύσεις στην αντιμετώπιση του φαινομένου της μερικής σκίασης.

6.2.3 Βελτίωση του σταδίου αναζήτησης του GMPP

Το σημείο αυτό, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα ενός αλγορίθμου MPPT, συγκεντρώνει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον και έχει την ανάγκη βελτίωσης. Κάποιες προτεινόμενες τεχνικές εγγυώνται πραγματικά βέλτιστη λειτουργία και έλεγχο του ΦΒ σε συνθήκες σκίασης, αλλά έχουν διαφόρων ειδών περιορισμούς εφαρμογής. Άλλες αφορούν ΦΒ πλαισιοσειρές με ένα συγκεκριμένο μέγιστο αριθμό επιπέδων ακτινοβολίας και άλλες αποδίδουν βέλτιστα σε σενάρια σκίασης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αξίζει να διερευνηθεί η δυνατότητα μετεξέλιξης αυτών των αλγορίθμων, ώστε σε συνδυασμό με μια συμπαγή λειτουργία εντοπισμού της σκίασης, να υποστηρίζουν την πληρέστερη περίπτωση της ΦΒ συστοιχίας, των πολλαπλών επιπέδων ακτινοβολίας και μια μεγάλη γκάμα χαρακτηριστικών των καταστάσεων σκίασης.

6.2.4 Υλοποίηση και αξιολόγηση ευριστικών αλγορίθμων MPPT

Στην παρούσα διπλωματική, για τους λόγους που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, επιλέχθηκαν και συγκρίθηκαν αποκλειστικά αλγόριθμοι MPPT οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία των ντετερμινιστικών. Η επιλογή, λοιπόν, ευριστικών αλγορίθμων MPPT προς σύγκριση και αξιολόγηση θα ήταν μια ενδιαφέρουσα ερευνητική διαδικασία η οποία λείπει από την έως τώρα βιβλιογραφία και, ενδεχομένως, θα απαντούσε σε καίρια ερωτήματα. Για παράδειγμα, μια πιθανή σύγκριση τους με τους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους θα αξιολογούσε την επιπρόσθετη πολυπλοκότητα των ευριστικών αλγορίθμων σε συνάρτηση με την απόδοσή, τη ταχύτητα σύγκλισης, τη διακύμανση ισχύος τους και άλλα χαρακτηριστικά τους.

6.2.5 Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά σύγκρισης των αλγορίθμων

Τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε αλγόριθμο MPPT, οποιασδήποτε φύσης, είναι πάρα πολλά, ειδικότερα κατά την εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η εισαγωγή επιπλέον μεγεθών

των αλγορίθμων προς αξιολόγηση θα έκανε τη συνολική σύγκριση τους πιο εμπειριστατωμένη. Για παράδειγμα, κατά τη μελέτη μεταξύ ευριστικών αλγορίθμων που προτάθηκε παραπάνω, θα ήταν ενδιαφέρουσα η σύγκριση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας τους (υπολογιστικός φόρτος από τον μικροεπεξεργαστή του inverter για την εφαρμογή τους). Η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι ένα κείμερο χαρακτηριστικό κατά την εφαρμογή όλων των αλγορίθμων MPPT σε ένα πραγματικό σύστημα, όπου όμως για τους ντετερμινιστικούς είναι παρόμοιο και σχετικά μικρό, ενώ για τους ευριστικούς είναι μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπ' όψη.

6.2.6 Επέκταση της μελέτης και ανάλυσης των σεναρίων σκίασης

Η επιλογή των σεναρίων σκίασης στα οποία δοκιμάστηκαν οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι MPPT στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε με ρεαλιστικά κριτήρια και αποτελεί μια αρκετά καλή βάση σύγκρισης. Παρ' όλα αυτά, η επιλογή αυτή έγινε χωρίς να έχει προηγηθεί κάποια εμπειριστατωμένη πειραματική μελέτη για τις πιθανές μεθόδους σκίασης κάποιας ΦΒ συστοιχίας σε συγκεκριμένο χώρο. Επίσης, όπως είδαμε, σε πολλές περιπτώσεις προσομοιώσεων η συνολική απόδοση των αλγορίθμων επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα σενάρια αυτά. Έτσι, λοιπόν, κρίνεται αναγκαία η εμπειριστατωμένη μελέτη και ανάλυση όλων των χαρακτηριστικών τα οποία συντελούν ένα σενάριο σκίασης, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, για μια αποτελεσματική σύγκριση των αλγορίθμων MPPT.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [Http://www.pveducation.org/](http://www.pveducation.org/).
- [2] Ε. Μπατζέλης, “Ενεργειακό μοντέλο φωτοβολταϊκής συστοιχίας με χρήση της συνάρτησης Lambert W και διερεύνηση των επιπτώσεων της σκίασης,” Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Παραγωγή και διαχείριση ενέργειας, ΕΜΠ, 2012.
- [3] Ι. Ρουτσόλιας, “Επιδράσεις σκίασης και ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού σταθμού,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2008.
- [4] A. Goetzberger and V. U. Hoffmann, *Photovoltaic solar energy generation*. Germany: Springer, Germany, 2005.
- [5] Α. Πέππα, “Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2008.
- [6] M. C. Alonso-Garcia and J. M. Ruiz, “Analysis and modeling the reverse characteristic of photovoltaic cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 90, pp. 1105–1120, 2006.
- [7] The German Society, *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers*, 2nd ed. London: Earthscan, London, 2008.
- [8] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, pp. 1198–1208, 2009.
- [9] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 1991.
- [10] S. A. Papathanassiou, P. S. Georgilakis, and E. I. Batzelis, “Energy models for photovoltaic systems under partial shading conditions: a comprehensive review,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 4, pp. 340–349, 2015.
- [11] Ε. Μπατζέλης, “Μοντελοποίηση και έλεγχος φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συνθήκες σκίασης,” Διδακτορική διατριβή, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2016.
- [12] Σ. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Αθήνα: Συμεών, Αθήνα, 2014.
- [13] S. Manias, *Power Electronics and Motor Drive Systems*. Athens: Elsevier, Athens, 2017.
- [14] T. Esram and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [15] A. Bidram, A. Davoudi, and R. S. Balog, “Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 4, pp. 532–546, 2012.
- [16] K. Ishaque and Z. Salam, “A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 475–488, 2013.
- [17] Y. Shaiek, M. Ben Smida, A. Sakly, and M. F. Mimouni, “Comparison between conventional methods and GA approach for maximum power point tracking of shaded

- solar PV generators,” *Sol. Energy*, vol. 90, pp. 107–122, 2013.
- [18] M. Muthuramalingam and P. S. Manoharan, “Comparative analysis of distributed MPPT controllers for partially shaded stand alone photovoltaic systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 286–299, 2014.
- [19] J. Ahmed and Z. Salam, “A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 933–953, 2015.
- [20] S. Kumar Dash, S. Nema, R. K. Nema, and D. Verma, “A comprehensive assessment of maximum power point tracking techniques under uniform and non-uniform irradiance and its impact on photovoltaic systems: A review,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 6, 2015.
- [21] Y.-H. Liu, J.-H. Chen, and J.-W. Huang, “A review of maximum power point tracking techniques for use in partially shaded conditions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 436–453, 2015.
- [22] L. Liu, X. Meng, and C. Liu, “A review of maximum power point tracking methods of PV power system at uniform and partial shading,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1500–1507, 2016.
- [23] S. Lyden and M. E. Haque, “Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1504–1518, 2015.
- [24] D. Verma, S. Nema, A. M. Shandilya, and S. K. Dash, “Comprehensive analysis of maximum power point tracking techniques in solar photovoltaic systems under uniform insolation and partial shaded condition,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, 2015.
- [25] J. P. Ram, T. S. Babu, and N. Rajasekar, “A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 826–847, 2017.
- [26] S. Saravanan and N. Ramesh Babu, “Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 192–204, 2016.
- [27] M. Seyedmahmoudian *et al.*, “State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems ??? A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 435–455, 2016.
- [28] M. Kermadi and E. M. Berkouk, “Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for Photovoltaic systems: Comparative study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. February 2016, pp. 369–386, 2017.
- [29] M. A. M. Ramli, S. Twaha, K. Ishaque, and Y. A. Al-Turki, “A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 144–159, 2017.
- [30] 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,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 18–19, pp. 2975–2988, 2006.
- [31] J. Qi, Y. Zhang, and Y. Chen, “Modeling and maximum power point tracking (MPPT) method for PV array under partial shade conditions,” *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 337–345, 2014.

-
- [32] Y. Cui, W. Yao, and J. Luo, "A research and improvement on a maximum power point tracking method for PV system under partially shaded conditions," *Procedia Eng.*, vol. 29, pp. 2583–2589, 2012.
- [33] G. Carannante, C. Fraddanno, M. Pagano, and L. Piegari, "Experimental performance of MPPT algorithm for photovoltaic sources subject to inhomogeneous insolation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4374–4380, 2009.
- [34] Y. H. Ji, D. Y. Jung, J. G. Kim, J. H. Kim, T. W. Lee, and C. Y. Won, "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, 2011.
- [35] 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, 2008.
- [36] K. S. Tey and S. Mekhilef, "Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5384–5392, 2014.
- [37] T. K. Soon and S. Mekhilef, "A fast-converging MPPT technique for photovoltaic system under fast-varying solar irradiation and load resistance," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 11, no. 1, pp. 176–186, 2015.
- [38] 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. Photovoltaics*, vol. 2, no. 2, pp. 184–190, 2012.
- [39] H. Renaudineau, A. Houari, J. P. Martin, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, and B. Gerardin, "A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2580–2588, 2011.
- [40] A. Kouchaki, H. Iman-Eini, and B. Asaei, "A new maximum power point tracking strategy for PV arrays under uniform and non-uniform insolation conditions," *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 221–232, 2013.
- [41] M. F. Kashif, S. Choi, Y. Park, and S. K. Sul, "Maximum power point tracking for single stage grid-connected PV system under partial shading conditions," *Conf. Proc. - 2012 IEEE 7th Int. Power Electron. Motion Control Conf. - ECCE Asia, IPEMC 2012*, vol. 2, pp. 1377–1383, 2012.
- [42] M. Boztepe, F. Guinjoan, G. Velasco-Quesada, S. Silvestre, A. Chouder, and E. Karatepe, "Global MPPT scheme for photovoltaic string inverters based on restricted voltage window search algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3302–3312, 2014.
- [43] K. Chen, S. Tian, Y. Cheng, and L. Bai, "An improved MPPT controller for photovoltaic system under partial shading condition," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 978–985, 2014.
- [44] Y. T. Chen, Y. C. Jhang, T. H. Kuo, R. H. Liang, and C. W. Hung, "Jumping maximum power point tracking method for PV array under partially shaded conditions," *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 617–627, 2016.
- [45] M. Unlu, S. Camur, and B. Arifoglu, "A new maximum power point tracking method for PV systems under partially shaded conditions," *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, pp. 1346–1351, 2013.
-

-
- [46] M. A. Ghasemi, H. Mohammadian Forushani, and M. Parniani, "Partial shading detection and smooth maximum power point tracking of PV arrays under PSC," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 9, pp. 6281–6292, 2016.
- [47] 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. 57, no. 10, pp. 3456–3467, 2010.
- [48] Y. H. Liu, J. H. Chen, and J. W. Huang, "Global maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions using the segmentation search method," *Sol. Energy*, vol. 103, pp. 350–363, 2014.
- [49] E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou, "An efficient MPPT algorithm for partially shaded PV strings," *31st Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, 2014.
- [50] Y. Wang, Y. Li, and X. Ruan, "High-Accuracy and Fast-Speed MPPT Methods for PV String under Partially Shaded Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 235–245, 2016.
- [51] K. Punitha, D. Devaraj, and S. Sakthivel, "Artificial neural network based modified incremental conductance algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic system under partial shading conditions," *Energy*, vol. 62, pp. 330–340, 2013.
- [52] Syafaruddin, E. Karatepe, and T. Hiyama, "Performance enhancement of photovoltaic array through string and central based MPPT system under non-uniform irradiance conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 62, pp. 131–140, 2012.
- [53] L. L. Jiang, D. R. Nayanisiri, D. L. Maskell, and D. M. Vilathgamuwa, "A simple and efficient hybrid maximum power point tracking method for PV systems under partially shaded condition," *IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 1513–1518, 2013.
- [54] L. L. Jiang, D. R. Nayanisiri, D. L. Maskell, and D. M. Vilathgamuwa, "A hybrid maximum power point tracking for partially shaded photovoltaic systems in the tropics," *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 53–65, 2015.
- [55] A. Mellit and Kalogirou S.A., "Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 34, pp. 574–632, 2008.
- [56] T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, 2009.
- [57] S. Sivanandam, S. Sumathi, and S. Deepa, *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer, 2007.
- [58] Young-Hyok Ji, D. Y. Jung, Jun-Gu Kim, Jae-Hyung Kim, T. W. Lee, and Chung-Yuen Won, "A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 1001–1009, 2011.
- [59] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney, B. W. Williams, and B. Wayne Williams, "A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1596–1606, 2011.
- [60] R. Ramaprabha, M. Balaji, and B. L. Mathur, "Maximum power point tracking of partially shaded solar PV system using modified Fibonacci search method with fuzzy controller," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 754–765, 2012.
- [61] Syafaruddin, E. Karatepe, and T. Hiyama, "Polar coordinated fuzzy controller based real-time maximum-power point control of photovoltaic system," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2597–2606, 2009.
-

-
- [62] R. Boukenoui, H. Salhi, R. Bradai, and A. Mellit, "A new intelligent MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under fast transient variations of shading patterns," *Sol. Energy*, vol. 124, pp. 124–142, 2016.
- [63] C. S. Chin, P. Neelakantan, H. P. Yoong, S. S. Yang, and K. T. K. Teo, "Maximum power point tracking for PV array under partially shaded conditions," *Proc. - 3rd Int. Conf. Comput. Intell. Commun. Syst. Networks, CICSyN 2011*, pp. 72–77, 2011.
- [64] K. Punitha, D. Devaraj, and S. Sakthivel, "Development and analysis of adaptive fuzzy controllers for photovoltaic system under varying atmospheric and partial shading condition," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 13, no. 11, pp. 4320–4332, 2013.
- [65] J. H. Seo, C. H. Im, C. G. Heo, J. K. Kim, H. K. Jung, and C. G. Lee, "Multimodal function optimization based on particle swarm optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, pp. 1095–1098, 2006.
- [66] Y. Liu, S. Huang, J. Huang, and W. Liang, "A Particle Swarm Optimization-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems," vol. 27, no. 4, pp. 1027–1035, 2012.
- [67] 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. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 367–380, 2011.
- [68] S. Roy Chowdhury and H. Saha, "Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 9, pp. 1441–1447, 2010.
- [69] Z. S. K. Ishaque, "A Deterministic Particle Swarm Optimization Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System under Partial Shading Condition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3195–3206, 2013.
- [70] K. L. Lian, J. H. Jhang, and I. S. Tian, "A Maximum Power Point Tracking Method Based on Perturb-and-Observe Combined With Particle Swarm Optimization," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 626–633, 2014.
- [71] M. Seyedmahmoudian *et al.*, "Simulation and Hardware Implementation of New Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV System Using Hybrid DEPSO Method," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 850–862, 2015.
- [72] K.-H. Chao, Y.-S. Lin, and U.-D. Lai, "Improved particle swarm optimization for maximum power point tracking in photovoltaic module arrays," *Appl. Energy*, vol. 158, pp. 609–618, 2015.
- [73] J. Ahmed and Z. Salam, "A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability," *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 118–130, 2014.
- [74] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, and S. Mekhilef, "An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, pp. 3627–3638, 2012.
- [75] F. M. Oliveira, S. A. O. Silva, F. R. Durand, and L. P. Sampaio, "Application of Pso Method for Maximum Power Point Extraction in Photovoltaic Systems Under Partial Shading Conditions," vol. 1000, no. 1, pp. 0–5, 2015.
- [76] H. Renaudineau *et al.*, "A PSO-based global MPPT technique for distributed PV power
-

- generation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 2, pp. 1047–1058, 2015.
- [77] K. Sundareswaran, V. Vignesh kumar, and S. Palani, “Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 308–317, 2015.
- [78] S. M. Mirhassani, S. Z. M. Golroodbari, S. M. M. Golroodbari, and S. Mekhilef, “An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking strategy with variable sampling time,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 761–770, 2015.
- [79] J. Shi, W. Zhang, Y. Zhang, F. Xue, and T. Yang, “MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 123, pp. 100–107, 2015.
- [80] T. Sudhakar Babu, N. Rajasekar, and K. Sangeetha, “Modified Particle Swarm Optimization technique based Maximum Power Point Tracking for uniform and under partial shading condition,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 34, pp. 613–624, 2015.
- [81] R. Ramaprabha, “Genetic algorithm based maximum power point tracking for partially shaded solar photovoltaic array,” *InT. J. Res. Rev. Inf. Sci.*
- [82] H. Taheri, Z. Salam, K. Ishaque, and S. Syafaruddin, “and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions,” no. Isiea, pp. 82–87, 2010.
- [83] H. R. Mohajeri, M. P. Moghaddam, M. Shahparasti, and M. Mohamadian, “Development a New Algorithm for Maximum Power Point Tracking on Partially Shaded Photovoltaic Arrays,” *Iran. Conf. pm Electr. Eng.*, pp. 489–494, 2012.
- [84] R. C. Eberhart and J. Kennedy, *A new optimizer using particle swarm theory. In: Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science.* New York, 1995.
- [85] S. Daraban, D. Petreus, and C. Morel, “A novel MPPT (maximum power point tracking) algorithm based on a modified genetic algorithm specialized on tracking the global maximum power point in photovoltaic systems affected by partial shading,” *Energy*, vol. 74, no. C, pp. 374–388, 2014.
- [86] A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, and S. A. Kalogirou, “Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 2, pp. 265–277, 2011.
- [87] A. A. Kulaksiz and R. Akkaya, “A genetic algorithm optimized ANN-based MPPT algorithm for a stand-alone PV system with induction motor drive,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2366–2375, 2012.
- [88] P. Lei, Y. Li, and J. E. Seem, “Sequential ESC-based global MPPT control for photovoltaic array with variable shading,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 348–358, 2011.
- [89] H. Heydari-doostabad, R. Keypour, M. R. Khalghani, and M. H. Khooban, “A new approach in MPPT for photovoltaic array based on Extremum Seeking Control under uniform and non-uniform irradiances,” *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 28–36, 2013.
- [90] A. Bouilouta, A. Mellit, and S. A. Kalogirou, “New MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under partially shaded conditions,” *Energy*, vol. 55, pp. 1172–1185, 2013.
- [91] H. Kawamura *et al.*, “Simulation of I–V characteristics of a PV module with shaded PV cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 75, no. 3–4, pp. 613–621, 2003.

- [92] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Colak, “Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 977–992, 2007.
- [93] K. Lappalainen and S. Valkealahti, “Recognition and modelling of irradiance transitions caused by moving clouds,” *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 55–67, 2015.
- [94] K. Lappalainen and S. Valkealahti, “Analysis of shading periods caused by moving clouds,” *Sol. Energy*, vol. 135, pp. 188–196, 2016.