



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ανάπτυξη Αλγορίθμου για την Εύρεση του
Σημείου Μέγιστης Ισχύος σε Συστοιχία
Φωτοβολταϊκών Μονάδων»**



Του φοιτητή

Ιωάννη Μπάρλα - Παπαγεωργίου
Αρ. Μητρώου: 514095

Επιβλέπων

Δρ. Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης
Καθηγητής

Ημερομηνία 29-5-2023

Τίτλος Π.Ε. : Ανάπτυξη αλγορίθμου για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος σε συστοιχία
φωτοβολταϊκών μονάδων

Κωδικός Π.Ε. : 20103

Ονοματεπώνυμο φοιτητή : Ιωάννης Μπάρλας - Παπαγεωργίου

Ονοματεπώνυμο εισηγητή : Δρ. Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. : 16-10-2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 29-5-2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ιωάννη Μπάρλα Παπαγεωργίου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην οικογένειά μου που με στηρίζει»

Πρόλογος

Η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) σε μια σειρά φωτοβολταϊκών μονάδων, αποτελεί ένα ενδιαφέρον πεδίο έρευνας εφόσον φέρνει το όραμα της βιώσιμης και καθαρής ενέργειας πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην αξιοποίηση προηγμένων υπολογιστικών τεχνικών και μοντελοποίησης για τον ακριβή προσδιορισμό του MPP (Maximum Power Point) των φωτοβολταϊκών μονάδων σε μια συστοιχία. Στόχος είναι η εκμετάλλευση της μέγιστης ισχύος που μπορεί να παράγει η μονάδα, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Η συγγραφή της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, επελέγη επειδή αντιπροσωπεύει ένα ακόμα βήμα προόδου στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, συμβάλλοντας στις συνεχείς προσπάθειες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας της συλλογής ηλιακής ενέργειας.

Περίληψη

Η έρευνα στα ενεργειακά συστήματα και τα ηλεκτρονικά ισχύος έχει επικεντρωθεί στην αποδοτική χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), με ιδιαίτερη έμφαση στη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ). Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου MPPT για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών μονάδων, αντιμετωπίζοντας την πρόκληση της μερικής σκίασης, η οποία επηρεάζει τον αποτελεσματικό έλεγχο των φωτοβολταϊκών συστημάτων και την ικανότητά τους να λειτουργούν στο Μέγιστο Σημείο Ισχύος (MPP), όπου επιτυγχάνεται η υψηλότερη ισχύς εξόδου.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται, υλοποιείται και αξιολογείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (ΦΒ) με τη χρήση μεθόδων ελέγχου MATLAB/Simulink. Το υπό μελέτη φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί υπό ομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία και υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Το σύστημα αποτελείται από έναν μετατροπέα DC-DC ανύψωσης, έναν ελεγκτή παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και ένα φορτίο.

Ο ρόλος του MPPT είναι να εξασφαλίζει τη λειτουργία της φωτοβολταϊκής μονάδας στο MPP, αποδίδοντας την υψηλότερη διαθέσιμη ισχύ. Η φωτοβολταϊκή μονάδα παράγει τη μέγιστη ισχύ σε ένα σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V όπου μεγιστοποιείται το προϊόν τάσης και ρεύματος. Χρησιμοποιώντας έναν αποδοτικό αλγόριθμο MPPT, το Φ/Β σύστημα μπορεί να επιτυγχάνει αποτελεσματικά τη μέγιστη παραγωγή ισχύος.

Σε αυτή τη μελέτη, η ανάπτυξη του αλγορίθμου βασίζεται στη μέθοδο Particle Swarm Optimization (PSO) και συγκρίνεται με δύο παραδοσιακές τεχνικές αναζήτησης (P&O-INC) στο περιβάλλον MATLAB/Simulink. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στοχεύει να ξεπεράσει τις εγγενείς πολυπλοκότητες της παρακολούθησης MPP, διασφαλίζοντας την προσαρμοστικότητα, την ακρίβεια και την ευρωστία σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Η τεχνική αναζήτησης με βάση τον αλγόριθμο PSO που αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε ικανοποίησε τον προσδοκώμενο στόχο ανίχνευσης του ολικού μεγίστου υπό συνθήκες μερικής σκίασης καθώς και υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία.

Λέξεις Κλειδιά

Φωτοβολταϊκό Σύστημα, DC-DC Μετατροπέας Ισχύος, Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος, Αλγόριθμοι, Μερική Σκίαση, MATLAB/Simulink, Προσομοίωση

Abstract

Research on energy systems and power electronics has focused on the efficient use of Renewable Energy Sources (RES), with particular emphasis on maximising electrical energy production from photovoltaic (PV) systems. This study aims to develop a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm for finding the Maximum Power Point (MPP) of a photovoltaic array, addressing the challenge of partial shading, which affects the effective control of photovoltaic systems and their ability to operate at the MPP, where the highest output power is achieved.

In this dissertation, a photovoltaic system (PV) is developed, implemented, and evaluated using MATLAB/Simulink control methods. The studied photovoltaic system operates under uniform solar radiation and partial shading conditions. The system consists of a DC-DC Boost converter, an MPPT controller, and a load.

The role of the MPPT is to ensure the operation of the photovoltaic unit at the MPP, outputting the highest available power. The PV module generates maximum power at a point on the I-V characteristic curve where the voltage and current product is maximal. Using an efficient MPPT algorithm, the PV system can effectively produce the maximum power.

In this study, the development of the algorithm is based on the Particle Swarm Optimization (PSO) method and is compared with two traditional search techniques (P&O-INC) in the MATLAB/Simulink environment. The proposed algorithm aims to overcome the inherent complexities of MPPT, ensuring adaptability, accuracy and robustness under various operating conditions.

The search technique based on the PSO algorithm that was developed and implemented satisfied the expected goal of tracking the global maximum under partial shading conditions as well as under uniform irradiation.

Keywords

Photovoltaic System, DC-DC Power Converter, Maximum Point Power Tracking, Algorithms, Partial Shading, MATLAB/Simulink, Simulation

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν επιστημονικά, υλικά και συναισθηματικά.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Ιορδάνη Ν. Κιοσκερίδη για την πολύτιμη καθοδήγησή του και υποστήριξή του. Οι σημαντικές συμβουλές και υποδείξεις, η εποικοδομητική κριτική καθώς και οι εξειδικευμένες γνώσεις του Δρ. Κιοσκερίδη συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση και βελτίωση αυτής της πτυχιακής.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητές μου στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος για τη συμβολή τους στην ακαδημαϊκή μου εξέλιξη. Είμαι ευγνώμων για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και όλες τις γνώσεις που μου μετέδωσαν.

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, είμαι βαθιά υπόχρεος στην οικογένειά μου για την άνευ όρων αγάπη καθώς και την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξή τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Ευρετήριο Σχημάτων	x
Ευρετήριο Πινάκων	xiii
Συντομογραφίες – Ορολογία	xiv
Κεφάλαιο 1	1
1. Εισαγωγή στην τεχνολογία των Φωτοβολταϊκών	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	1
1.2.1 Ηλιακή ενέργεια	2
1.3 Ηλιακή Γεωμετρία	4
1.3.1 Γεωγραφικές Συντεταγμένες	4
1.3.2 Αζιμούθιο.....	5
1.4 Ορόσημα στην Φωτοβολταϊκή τεχνολογία	6
1.5 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	8
1.5.1 Ημιαγωγοί- Επαφή p-n	9
1.6 Φωτοβολταϊκή κυψέλη – Φωτοβολταϊκή συστοιχία	11
1.6.1 Τύποι φωτοβολταϊκών	13
1.7 Ισοδύναμο κύκλωμα	14
1.8 Καμπύλη Ρεύματος- Τάσης ωμικού φορτίου	16
1.9 Αρχή λειτουργίας του Ανιχνευτή Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)	18
1.10 Επίλογος	20
Κεφάλαιο 2	22
2. Μετατροπείς Ισχύος	22
2.1 Εισαγωγή	22
2.2 Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου	22
2.3 Μετατροπείς ισχύος DC/DC	24

2.3.1	Μετατροπέας Buck	25
2.3.2	Μετατροπέας Boost.....	27
2.3.3	Μετατροπέας Buck-Boost	28
2.4	Επίλογος	30
Κεφάλαιο 3		32
3.	Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).....	32
3.1	Εισαγωγή	32
3.2	Συνθήκες Μερικής Σκίασης	32
3.3	Τεχνικές MPPT	35
3.3.1	Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O).....	37
3.3.2	Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance – INC)	40
3.3.1	Έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control-FLC).....	43
3.3.2	Τεχνητό Νευρωνικό δίκτυο (Artificial Neural Network - ANN)	47
3.3.3	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO) 48	
3.4	Επίλογος	51
Κεφάλαιο 4		53
4.	Προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο MPPT	53
4.1	Εισαγωγή	53
4.2	Επισκόπηση της πλατφόρμας λογισμικού MATLAB.....	53
4.2.1	Περιβάλλον Simulink	54
4.3	Ανάλυση μοντέλου Simulink.....	55
4.3.1	Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	55
4.3.2	Μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης	57
4.3.3	Ωμικό φορτίο	57
4.3.4	Αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν στην προσομοίωση	58
4.3.4.1	Αλγόριθμος Perturb & Observe (P&O)	58
4.3.4.2	Αλγόριθμος Incremental Conductance (INC)	60
4.3.4.3	Αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO)	62
4.3.5	Σενάρια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	64
4.4	Επίλογος	65
Κεφάλαιο 5		67
5.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	67
5.1	Εισαγωγή	67
5.2	Θεωρητικές τιμές	67
5.2.1	Θεωρητικές τιμές συνθηκών ομοιόμορφης ακτινοβολίας	67
5.2.2	Θεωρητικές τιμές συνθηκών μερικής σκίασης	68
5.3	Προσομοίωση τεχνικής P&O.....	69

5.3.1	Αποτελέσματα υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία.....	69
5.3.2	Αποτελέσματα υπό συνθήκες μερικής σκίασης.....	74
5.4	Προσομοίωση τεχνικής INC	76
5.4.1	Αποτελέσματα υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία.....	76
5.4.2	Αποτελέσματα υπό συνθήκες μερικής σκίασης.....	81
5.5	Προσομοίωση τεχνικής PSO	82
5.5.1	Αποτελέσματα υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία.....	83
5.5.2	Αποτελέσματα υπό συνθήκες μερικής σκίασης.....	88
5.5.3	Κίνηση σωματιδίων	89
5.6	Αξιολόγηση τεχνικών αναζήτησης MPP	91
Κεφάλαιο 6		92
6.	Συμπεράσματα	92
6.1	Συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων στοιχείων και επιλογή του βέλτιστου αλγορίθμου για ένα υπό μελέτη Φ/Β σύστημα.....	92
6.2	Επιπλέον ερευνητικές προτάσεις.....	93
Βιβλιογραφία		94
Παραρτήματα		99
Παράρτημα 1 ^ο : Κώδικας αλγορίθμου MPPT βασισμένος σε PSO		99
Παράρτημα 2 ^ο : Κώδικας αλγορίθμου MPPT βασισμένος σε INC		103
Παράρτημα 3 ^ο : Κώδικας αλγορίθμου MPPT βασισμένος σε P&O		105

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Το φωτοβολταϊκό δυναμικό της Γης [4].....	3
Σχήμα 1.2: Η χρήση γεωγραφικού πλάτους & μήκους επιτρέπει τον ακριβή, καθολικό εντοπισμό [9] ...	4
Σχήμα 1.3: Ηλιακή γωνία αζιμούθιου [10]	5
Σχήμα 1.4: Πηγή μονοχρωματικών φωτεινών κυμάτων δημιουργούν ενίσχυση και απόσβεση σε ορισμένες διευθύνσεις [13].....	6
Σχήμα 1.5: Δομή ενός ηλιακού κελιού [24]	9
Σχήμα 1.6: Επαφή p-n [26]	10
Σχήμα 1.7: Παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων σε μια ημιαγώγιμη ένωση [28].....	11
Σχήμα 1.8: Από το φ/β κύτταρο στο φ/β σύστημα [29]	12
Σχήμα 1.9: Τύποι φωτοβολταϊκών μονάδων [33].....	13
Σχήμα 1.10: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού πάνελ [35]	15
Σχήμα 1.11: Καμπύλη Ρεύματος- Τάσης ωμικού φορτίου [36].....	17
Σχήμα 1.12: Ηλιακή μονάδα I-V και καμπύλες ισχύος [37].....	18
Σχήμα 1.13: Διάγραμμα κυκλώματος MPPT [37].....	19
Σχήμα 1.14: Καμπύλη I-V σε διαφορετικές ακτινοβολίες [37]	19
Σχήμα 1.15: Καμπύλη I-V σε διαφορετικές θερμοκρασίες [37].....	20
Σχήμα 2.1: Δομή ενός MOSFET [43]	23
Σχήμα 2.2: Βασική αρχιτεκτονική ενός μετατροπέα DC-DC [44]	24
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα DC-DC Buck [44].....	25
Σχήμα 2.4: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα Buck [47].....	26
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα DC-DC Boost [44]	27
Σχήμα 2.6: Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC Boost [48].....	28
Σχήμα 2.7: Διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα DC-DC Buck-Boost [44].....	29
Σχήμα 2.8: Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC Buck-Boost [48].....	30
Σχήμα 3.1: Φ/Β συστοιχία (α) ομοιόμορφη ακτινοβολία (β) συνθήκες μερικής σκίασης [51].....	33
Σχήμα 3.2: Καμπύλη χαρακτηριστικών εξόδου Φ/Β υπό ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας [51]	34
Σχήμα 3.3: Καμπύλη χαρακτηριστικών εξόδου Φ/Β συστήματος υπό συνθήκες μερικής σκίασης [51]	35
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής Perturb and Observe [52]	38
Σχήμα 3.5: Γράφημα ισχύος έναντι τάσης για αλγόριθμο Perturb and Observe [52].....	39
Σχήμα 3.6: Γράφημα ισχύος έναντι τάσης για αλγόριθμο Incremental Conductance [57]	41

Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου <i>Incremental Conductance</i> [52]	42
Σχήμα 3.8: Αρχιτεκτονική <i>Fuzzy MPPT</i> [59]	43
Σχήμα 3.9: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου «αλλαγής ισχύος» [60]	45
Σχήμα 3.10: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου «αλλαγής ρεύματος» [60]	45
Σχήμα 3.11: Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου «αλλαγής ρεύματος αναφοράς» [60]	46
Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου <i>FLC</i> [52]	46
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα ελεγκτή <i>ANN MPPT</i> [62]	47
Σχήμα 3.14: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων [66]	49
Σχήμα 4.1: Φωτοβολταϊκή συστοιχία που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση	55
Σχήμα 4.2: Μετατροπέας <i>DC/DC</i> ανύψωσης τάσης που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση	57
Σχήμα 4.3: <i>Function block</i> των τριών μεθόδων <i>MPPT</i> που συγκρίθηκαν στην προσομοίωση	58
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου <i>Perturb & Observe (P&O)</i>	59
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου <i>Incremental Conductance (INC)</i>	61
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	63
Σχήμα 4.7: Σενάριο 4, μερική σκίαση, σταθερή ακτινοβολία $PV1=PV4= 1000W/m^2$, $PV2=PV5=300W/m^2$ $PV3=PV6=600W/m^2$ και σταθερή θερμοκρασία $25^{\circ}C$	64
Σχήμα 4.8: Σήματα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας ως είσοδος της <i>Φ/B</i> συστοιχίας, με χρήση <i>signal builder</i>	65
Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική <i>P-V</i> για ακτινοβολία ίση με $1000 W/m^2$ (σενάριο 1)	67
Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστική <i>P-V</i> για ακτινοβολία ίση με $500 W/m^2$ (σενάριο 2-3)	68
Σχήμα 5.3: Χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης σε συνθήκες μερικής σκίασης $PV1=PV4= 1000W/m^2$, $PV2=PV5=300W/m^2$ $PV3=PV6=600W/m^2$ και σταθερή θερμοκρασία $25^{\circ}C$ (σενάριο 4)	69
Σχήμα 5.4.: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο <i>P&O</i> για το σενάριο ακτινοβολίας 1	70
Σχήμα 5.5: Αρχική περιοχή αναζήτησης <i>MPP</i> διαγράμματος ισχύος-χρόνου <i>P&O</i> (σενάριο ακτινοβολίας 1)	70
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο <i>P&O</i> για το σενάριο ακτινοβολίας 2	71
Σχήμα 5.7: Αρχική περιοχή αναζήτησης <i>MPP</i> (<i>Time=0s-2s</i>) διαγράμματος ισχύος-χρόνου <i>P&O</i> (σενάριο ακτινοβολίας 2)	71
Σχήμα 5.8: Αρχική περιοχή αναζήτησης <i>MPP</i> (<i>Time=2s-4s</i>) διαγράμματος ισχύος-χρόνου <i>P&O</i> (σενάριο ακτινοβολίας 2)	72
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο <i>P&O</i> για το σενάριο ακτινοβολίας 3	73
Σχήμα 5.10: Αρχική περιοχή αναζήτησης <i>MPP</i> (<i>Time=0s-2s</i>) διαγράμματος ισχύος-χρόνου <i>P&O</i> (σενάριο ακτινοβολίας 3)	73
Σχήμα 5.11: Αρχική περιοχή αναζήτησης <i>MPP</i> (<i>Time=2s-4s</i>) διαγράμματος ισχύος-χρόνου <i>P&O</i> (σενάριο ακτινοβολίας 3)	74
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο <i>P&O</i> για το σενάριο ακτινοβολίας 4	75

Σχήμα 5.13: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 4).....	75
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 1	76
Σχήμα 5.15: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 1).....	77
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 2	78
Σχήμα 5.17: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 2).....	78
Σχήμα 5.18: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 2).....	79
Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 3	79
Σχήμα 5.20: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 3).....	80
Σχήμα 5.21: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 3).....	80
Σχήμα 5.22: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 4	81
Σχήμα 5.23: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 4).....	82
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 1	83
Σχήμα 5.25: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 1).....	84
Σχήμα 5.26: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 2	84
Σχήμα 5.27: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 2).....	85
Σχήμα 5.28: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 2).....	85
Σχήμα 5.29: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 3	86
Σχήμα 5.30: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 3).....	87
Σχήμα 5.31: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 3).....	87
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 4	88
Σχήμα 5.33: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 4).....	89
Σχήμα 5.34: Αναπαράσταση κίνησης σμήνους σε αρχικό στάδιο	90
Σχήμα 5.35: Αναπαράσταση κίνησης σμήνους σε προχωρημένο στάδιο	90

Ευρετήριο Πινάκων

<i>Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά Τεχνικών MPPT [54]</i>	<i>37</i>
<i>Πίνακας 3.2: Σύνοψη του αλγορίθμου P&O [55].....</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 3.3: Κανόνες ασαφούς ελεγκτή [60]</i>	<i>44</i>
<i>Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου SHARP ND 208U1 [70]</i>	<i>56</i>
<i>Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης τεχνικών αναζήτησης MPP.....</i>	<i>91</i>

Συντομογραφίες – Ορολογία

A	Ideality Factor	Ιδεατός Συντελεστής
ANN	Artificial Neural Network	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
c	Speed of Light	Ταχύτητα Φωτός: $C = 3,108 [M/S]$
D	Duty Cycle	Κύκλος Λειτουργίας του Μετατροπέα
DC	Direct Current	Συνεχές Ρεύμα
e	Error	Σφάλμα
E	Photon Energy	Ενέργεια Φωτονίων
FET	Field Effect Transistor	Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου
FLC	Fuzzy Logic Control	Έλεγχος Ασαφούς Λογικής
FMPPT	Fuzzy MPPT	Ασαφές MPPT
G_{best}	Global Best	Καθολικό Βέλτιστο
GMPP	Global Maximum Power Point	Παγκόσμιο Σημείο Μέγιστης Ισχύος
h	Planck Constant	Σταθερά Planck: $6.6260755 \times 10^{-34} J \cdot s$
HC	Hill Climbing	Αναρρίχηση Λόφων
I	Current	Ρεύμα
I_o	Reverse Diode Current	Ανάστροφο Ρεύμα Κόρου Διόδου
IC_{ij} INC	Incremental Conductance	Αυξητικής Αγωγιμότητας
I_d	Diode Current	Ρεύμα Διόδου
I_{in}	Input Current	Ρεύμα Εισόδου
I_L	Load Current	Φωτόρευμα
I_m ή I_{mp} ή I_{mpP}	Current at Maximum Power	Ρεύμα στο Σημείο MPP
I_o	Output Current	Ρεύμα Εξόδου
I_R	Rated Current	Ονομαστικό Ρεύμα
I_{sc}	Short-Circuit Current	Ρεύμα Βραχυκύκλωσης
k	Boltzman Constant	Σταθερά Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23} J / K$
kHz	Kilohertz	Κιλοχέρτζ
L	Inductor	Επαγωγέας
LMPP	Local Maximum Power Point	Τοπικό Σημείο Μέγιστης Ισχύος
m²	Square Metre	Τετραγωνικό Μέτρο
mH	Millihenry	Μιλιχένρι
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Ημιαγωγών Μετάλλου- Οξειδίου
MPP	Maximum Power Point	Σημείο Μέγιστης Ισχύος
MPPT	Maximum Power Point Tracking	Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος
MSE	Mean Squared Error	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
n	Negative	Αρνητικό
NB	Negative Big	Αρνητικό Μεγάλο
NM	Negative Medium	Αρνητικό-Μεσαίο
NS	Negative Small	Αρνητικό Μικρό

OCV	Open-Circuit Voltage	Τάση Ανοικτού Κυκλώματος
p	Positive	Θετικό
P	Power	Ισχύς
P&O	Perturb and Observe	Διαταραχής και Παρατήρησης
PB	Positive Big	Θετικό Μεγάλο
P_{best}	Personal Best	Ατομικό Βέλτιστο
PM	Positive Medium	Θετικό Μέσο
P_{max}	Maximum Power	Μέγιστη Ισχύς
PS	Positive Small	Θετικό Μικρό
PSC	Partial Shading Conditions	Συνθήκες Μερικής Σκίασης
PSO	Particle Swarm Optimization Algorithm	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων
PV ή Φ/B	Photovoltaic System	Φωτοβολταϊκό Σύστημα
PWM	Pulse-Width Modulation	Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού
q	Elementary Electron Charge	Στοιχειώδες Φορτίο Ηλεκτρονίου $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
R	Resistor	Αντίσταση
RES ή ΑΠΕ	Renewable Energy Sources	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
R_m ή R_{mpp}	Resistor at Maximum Power	Αντίσταση στο Σημείο MPP
R_o	Output Resistor	Αντίσταση Εξόδου
R_s	Series Resistor	Αντίσταση Σειράς
R_{sh}	Shunt Resistor	Αντίσταση Διαρροής
SCC	Short-Circuit Current	Ρεύμα Βραχυκυκλώματος
STC	Standard Testing Conditions	Τυπικές Συνθήκες Δοκιμής
T	Temperature	Θερμοκρασία
t	Time	Χρόνος
V	Voltage	Τάση
V_{in}	Input Voltage	Τάση Εισόδου
V_m ή V_{mp}	Voltage at Maximum Power	Τάση στο Σημείο MPP
V_o	Output Voltage	Τάση Εξόδου
V_{oc}	Open-Circuit Voltage	Τάση Ανοικτού Κυκλώματος
V_R	Rated Voltage	Ονομαστική Τάση
W/m²	Watts per Square Metre	Watt ανά Τετραγωνικό Μέτρο
Z ή ZZ	Zero	Μηδέν
η_m	Module Efficiency Maximum Power	Μέγιστη Ισχύς Απόδοσης Μονάδας
λ	Photon Wavelength	Μήκος Κύματος Φωτονίων
μF	Microfarad	Μικροφαράντ
f	Photon Wave Frequency	Συχνότητα Κύματος Φωτονίων

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή στην τεχνολογία των Φωτοβολταϊκών

1.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται γρήγορα λόγω της πληθυσμιακής έκρηξης και της τεχνολογικής προόδου. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας βλάπτουν σημαντικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να αξιοποιήσουμε τις φιλικές προς το περιβάλλον, οικονομικά αποδοτικές και διαρκείς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για τη κάλυψη της ζήτησης ενέργειας που θα προκύψει στο μέλλον. Η ηλιακή ενέργεια με όλα τα πιο πάνω χαρακτηριστικά είναι πολλά υποσχόμενη. Για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται η φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και ειδικότερα η ηλιακή ενέργεια. Μετά από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, εξετάζεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς και το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τέλος, γίνεται αναφορά στο ισοδύναμο κύκλωμα, στη καμπύλη ρεύματος-τάσης ωμικού φορτίου και στον ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ταυτόχρονα με τη πολιτισμική, τεχνολογική και βιομηχανική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες, δημιουργείται και εκθετική αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας που βασίζονται στο πετρέλαιο, τον άνθρακα και το φυσικό αέριο έχουν αποδειχθεί ότι είναι εξαιρετικά επιβλαβείς για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, ενώ παράλληλα, εκτιμάται ότι τα επόμενα χρόνια θα υπάρξει και τεράστια ενεργειακή κρίση. Είναι πλέον σαφές ότι το δυναμικό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι τεράστιο καθώς μπορούν στο μέλλον να καλύψουν πολλαπλάσια την παγκόσμια ζήτηση ενώ ήδη είναι ένας σημαντικός πρόσθετος ενεργειακός πόρος για την κάλυψη των αναγκών, ιδίως ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αξιοποίηση των φυσικών, απεριόριστων ενεργειακών πόρων από το περιβάλλον με στόχο τη μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια, διασφαλίζοντας παράλληλα υγιή περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, προσδίδει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πολυάριθμα πλεονεκτήματα στη χρήση τους, με πρωτίστως την προστασία του περιβάλλοντος. Αυτά περιγράφονται ως εξής:

- είναι ανεξάντλητες,
- προσθέτουν υποστήριξη σε ήδη υπάρχουσες συμβατικές μονάδες ενέργειας,
- συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων,
- μειώνουν την εξάρτηση από εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας και ορυκτών ενεργειακών πόρων,
- ενθαρρύνουν την οικονομική ανάπτυξη του ενεργειακού τομέα και όλων των συναφών δραστηριοτήτων,
- έχουν χαμηλά λειτουργικά κόστη,
- έχουν αντίκτυπο στην αύξηση της απασχόλησης και
- παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε περιοχές με ανεπαρκές-ανύπαρκτο ηλεκτρικό δίκτυο (π.χ. απομακρυσμένα χωριά ή νησιά)

Εκτός από πολλαπλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμοί στην καθημερινή χρήση τους:

- εξαρτώνται εξ ολοκλήρου από τη γεωγραφική θέση και τις καιρικές συνθήκες,
- η διαθεσιμότητά τους δεν είναι αδιάλειπτη,
- παρουσιάζουν χαμηλή αποδοτικότητα, και
- το κόστος κατασκευής μονάδας τους είναι υψηλότερο σε σύγκριση με αυτό των σταθμών παραγωγής ενέργειας ορυκτών.

Μπορεί λοιπόν να γίνει αντιληπτό ότι τα πλεονεκτήματα υπερτερούν των μειονεκτημάτων της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη συνολική κοινωνία.

Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας ορίζεται κάθε ενεργειακός πόρος που μπορεί να είναι φυσικά ανανεώσιμος, με ρυθμό συγκρίσιμο ή ταχύτερο από τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας αυτού του πόρου ή ως διαρκής πόρος που είναι άφθονα διαθέσιμος στη φύση. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως:

- η βιομάζα,
- η αιολική ενέργεια,
- η ηλιακή ενέργεια,
- η υδροηλεκτρική ενέργεια, και
- η γεωθερμία

μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες βιώσιμης ενέργειας, βασισμένες στη χρήση των τακτικά διαθέσιμων, εγχώριων πόρων [1, 2, 3].

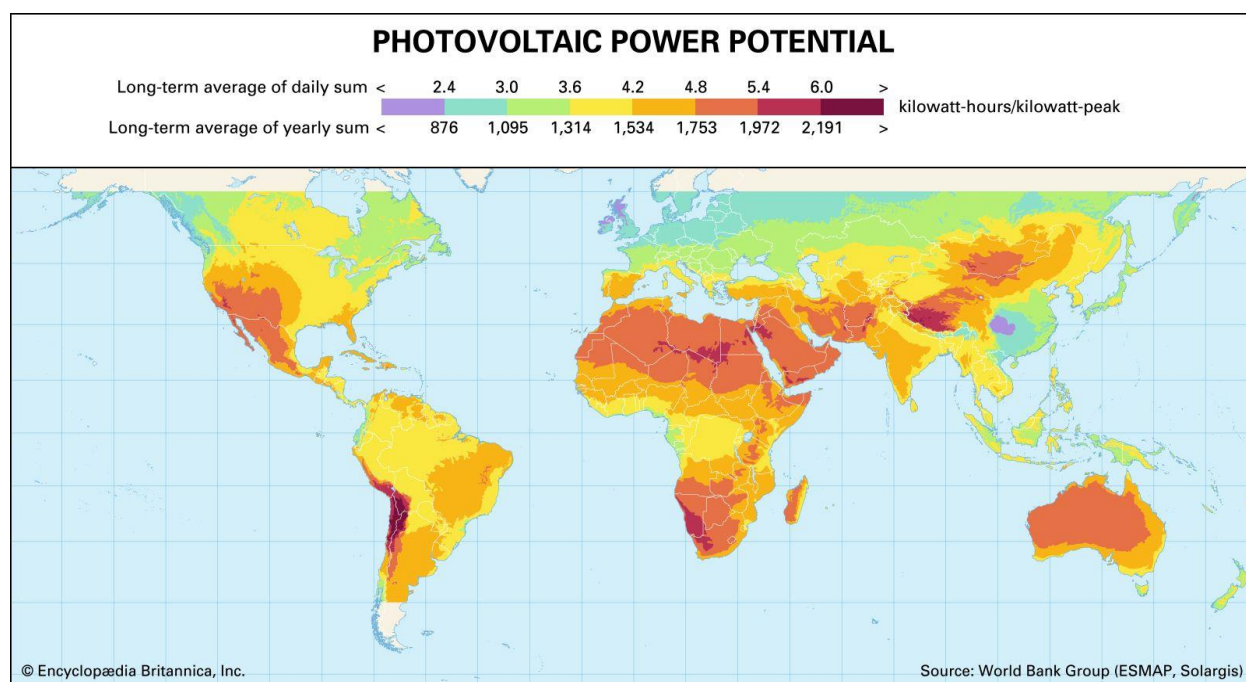
1.2.1 Ηλιακή ενέργεια

Ο Ήλιος είναι μια εξαιρετικά ισχυρή πηγή ενέργειας και το φως του ήλιου είναι μακράν η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας που λαμβάνει η Γη. Όμως, η έντασή της στην επιφάνεια του πλανήτη είναι στην

πραγματικότητα αρκετά χαμηλή. Αυτό οφείλεται ουσιαστικά στη τεράστια ακτινική διάχυση της ακτινοβολίας. Μια πρόσθετη απώλεια οφείλεται στην ατμόσφαιρα και τα σύννεφα της Γης, τα οποία απορροφούν ή διασκορπίζουν έως και το 54% του εισερχόμενου ηλιακού φωτός.

Η συνολική ποσότητα ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη Γη υπερβαίνει κατά πολύ τις τρέχουσες και αναμενόμενες ενεργειακές απαιτήσεις του κόσμου. Εάν αξιοποιηθεί κατάλληλα, αυτή η πηγή υψηλής διάχυσης έχει τη δυνατότητα να ικανοποιήσει όλες τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες (Σχήμα 1.1). Ταυτόχρονα, με τη χρήση βελτιωμένης τεχνολογίας, το κόστος των συστημάτων ηλιακής ενέργειας μειώνεται συνεχώς. Η ηλιακή βιομηχανία θα ήταν σίγουρα η καλύτερη επιλογή για τη μελλοντική ζήτηση ενέργειας, καθώς είναι ανώτερη όσον αφορά τη διαθεσιμότητα, την αποδοτικότητα και την προσβασιμότητα σε σύγκριση με άλλες ΑΠΕ.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί είτε σε θερμική ενέργεια (θερμότητα) ή σε ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από τα συστήματα που βασίζονται στη βιομάζα που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε χρήσιμες μορφές ενέργειας, με μια ευρύτερη έννοια, χρησιμοποιώντας τη φωτοσύνθεση από τα φυτά ως ενδιάμεσο βήμα, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες τεχνολογιών που το κάνουν αυτό. Πρώτον, τα ηλιακά θερμικά συστήματα που χρησιμοποιούν εστιασμένη ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ατμού, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός στροβίλου που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Δεύτερον, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV), συσκευές ημιαγωγών στερεάς κατάστασης χωρίς κινούμενα μέρη που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό συνεχούς ρεύματος [4, 5].



Σχήμα 1.1: Το φωτοβολταϊκό δυναμικό της Γης [4]

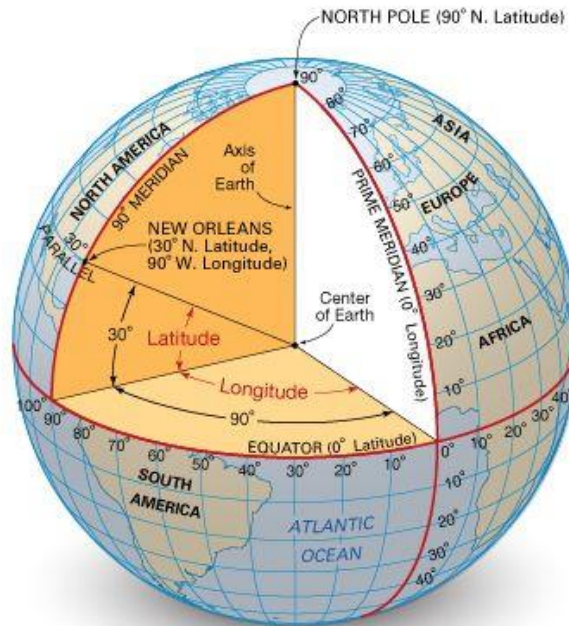
1.3 Ηλιακή Γεωμετρία

Ο προσδιορισμός της ακριβούς γεωμετρίας των ηλιακών κινήσεων στον ουρανό είναι σημαντικός για πολλές πτυχές του πρακτικού φωτοβολταϊκού σχεδιασμού. Το μέγεθος της διάταξης που απαιτείται για την κάλυψη ενός δεδομένου φορτίου μπορεί να βελτιστοποιηθεί μέσω κατάλληλων γεωμετρικών αποφάσεων. Η γνώση της ηλιακής γεωμετρίας είναι επίσης σημαντική για την εκτίμηση των περιόδων μερικής και ολικής σκίασης [6].

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται πολύ, ανάλογα με τη θέση του ήλιου και την κλίση της επιφάνειας που δέχεται την ακτινοβολία. Η διακύμανση της προσπίπτουσας σε μια επιφάνεια ακτινοβολία ποικίλει καθημερινά. Η τοποθέτηση μιας επιφάνειας, όπως μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, κάθετα στις ακτίνες του ήλιου επιτρέπει τη μέγιστη ακτινοβολία. Η φαινομενική κίνηση του ήλιου επηρεάζεται από τρεις κύριους παράγοντες: τη στιγμή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος, και την ώρα της ημέρας. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζονται με τη σειρά τους από τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια της Γης [7, 8].

1.3.1 Γεωγραφικές Συντεταγμένες

Οι προσδιορισμοί του γεωγραφικού πλάτους (Latitude) και γεωγραφικού μήκους (Longitude) είναι απαραίτητοι για τον εντοπισμό θέσεων στη Γη (Σχήμα 1.2). Το γεωγραφικό πλάτος είναι η γωνιακή απόσταση μιας τοποθεσίας από τον Ισημερινό, μετρούμενη προς τα βόρεια ή προς τα νότια κατά μήκος ενός μεσημβρινού από 0° στον Ισημερινό έως 90° στους πόλους.

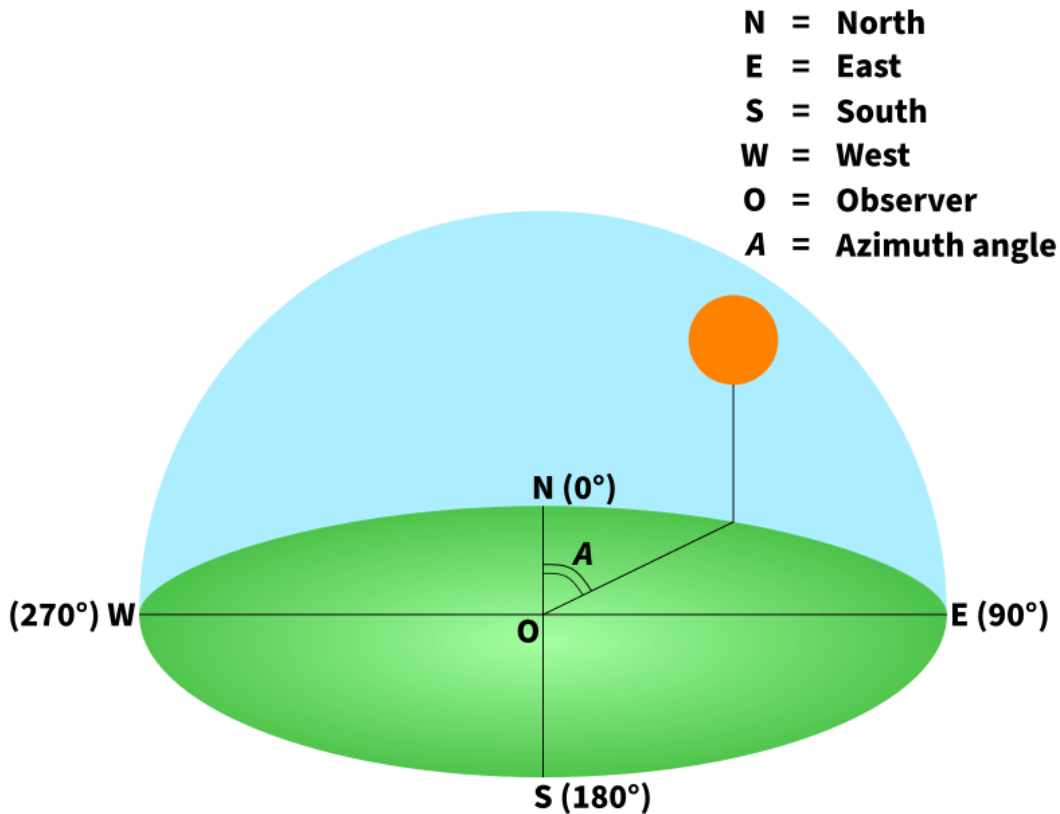


Σχήμα 1.2: Η χρήση γεωγραφικού πλάτους & μήκους επιτρέπει τον ακριβή, καθολικό εντοπισμό [9]

Οι γραμμές γεωγραφικού πλάτους είναι γνωστές ως παράλληλες ή παράλληλες γεωγραφικού πλάτους και συνδέουν όλα τα σημεία ίσου γεωγραφικού πλάτους. Γεωγραφικό μήκος είναι το τόξο μιας παραλλήλου ή της γωνίας στον πόλο μεταξύ του πρώτου μεσημβρινού, που διέρχεται από το Γκρίνουιτς, στο Ηνωμένο Βασίλειο, και του μεσημβρινού ενός σημείου στη γη, μετρούμενο προς τα ανατολικά ή δυτικά κατά 180° . Ο συνδυασμός μεσημβρινών γεωγραφικού μήκους και παραλλήλων γεωγραφικού πλάτους δημιουργεί ένα πλέγμα για την εύρεση τοποθεσιών. Είναι αδιαμφισβήτητα πολύ σημαντικό να ξέρουμε τη θέση εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, επειδή, αυτό προσδιορίζει με ακρίβεια την κλίση ως προς το ηλιακό ύψος και το αζιμούθιο [7, 8].

1.3.2 Αζιμούθιο

Ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου σε σχέση με οποιοδήποτε σημείο πάνω στη γη γίνεται με τον υπολογισμό της γωνίας αζιμούθιου (azimuth angle) και ζενίθ, ή της συμπληρωματικής σε αυτή, γωνίας ανύψωσης. Η ηλιακή γωνία αζιμούθιου είναι η γωνία μεταξύ του βορρά και του ήλιου στον τοπικό ορίζοντα (Σχήμα 1.3). Ανάλογα με τη θέση του ήλιου στον ουρανό, η γωνία του αζιμούθιου μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και μήκος καθώς και την ημέρα του έτους [7].



Σχήμα 1.3: Ηλιακή γωνία αζιμούθιου [10]

Στην τεχνολογία φωτοβολταϊκών, η γωνία αζιμούθιου ορίζει τη κατεύθυνση που βλέπει μια φωτοβολταϊκή μονάδα. Ο βαθμός του αζιμούθιου δείχνει ότι στις:

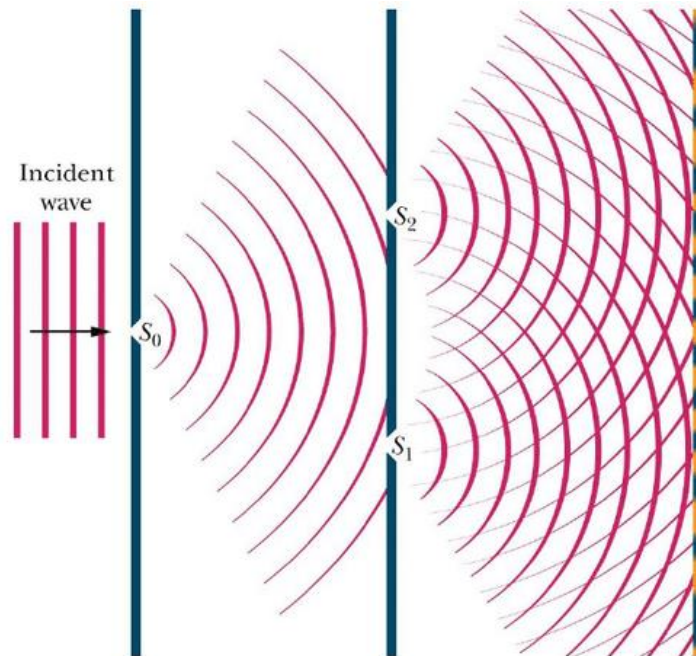
- 0° , η συστοιχία είναι στραμμένη προς τον ισημερινό τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο ημισφαίριο,
- 90° , η συστοιχία είναι στραμμένη προς τα δυτικά,
- -90° , η συστοιχία είναι στραμμένη προς τα ανατολικά.

Μια γωνία πυξίδα δείχνει 180° για το νότο, 90° για την ανατολή και 270° για τη δύση [8].

1.4 Ορόσημα στην Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Αν και η ενέργεια από τον ήλιο χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα, η φύση του φωτός δεν αποσαφηνίζεται έως την αρχή του αιώνα μας. Έκτοτε, γίνονται πολλά βήματα για την απόκτηση ολοένα και πιο αποδοτικών συσκευών, τόσο με ηλιακές κυψέλες εργαστηριακής κλίμακας όσο και με εμπορικές φωτοβολταϊκές μονάδες [11].

Τον 17ο αιώνα, ο Ισαάκ Νεύτων αναπτύσσει τη σωματιδιακή θεωρία σύμφωνα με την οποία ο τρόπος εκπομπής του φωτός είναι ασυνεχής. Στα τέλη του ίδιου αιώνα, υπερισχύει η κυματική θεωρία του Christiaan Huygens που δηλώνει ότι κάθε σημείο σε μια πηγή φωτός στέλνει ένα μέτωπο κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις σε ένα συνεχές και ομοιογενές μέσο, τον αιθέρα (Σχήμα 1.4), [12].



Σχήμα 1.4: Πηγή μονοχρωματικών φωτεινών κυμάτων δημιουργούν ενίσχυση και απόσβεση σε ορισμένες διευθύνσεις [13]

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρείται αρχικά το 1839, από τον φυσικό Alexandre Edmond Becquerel όταν παρατηρεί ότι ορισμένα υλικά, κυρίως τα ηλεκτρόδια αργύρου και πλατίνας, παράγουν μικρές ποσότητες ηλεκτρικού ρεύματος όταν εκτίθενται στις ακτίνες του ήλιου.

Το 1873, ο Willoughby Smith ανακαλύπτει ότι το σελήνιο (Se) είναι φωτοβολταϊκό. Το 1877, ο Adams και ο μαθητής του Richard Day αναπτύσσουν την πρώτη ηλιακή κυψέλη σεληνίου με απόδοση περίπου 0,5%. Το 1883 ο Charles Fritts δημιουργεί λειτουργικά ηλιακά πάνελ με ένα φωτοβολταϊκό δίσκιο σεληνίου ανάμεσα σε δύο μεταλλικά λεπτά στρώματα τα οποία όμως απέδιδαν μόνο 1% [7, 14].

Όταν το 1900, ο φυσικός Max Planck παρατηρεί ότι η ποσότητα ενέργειας που ακτινοβολεί το μέλαν σώμα¹ είναι ανάλογη της συχνότητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που απορροφά, διατυπώνει τη «θεωρία των κβάντα». Αυτή η εκπομπή ενέργειας έχει τη μορφή μικρών, διακριτών πακέτων ενέργειας που ονομάζει "quanta" τα οποία μπορούν να αποκτήσουν συγκεκριμένες διακριτές τιμές μόνο σε πολλαπλάσια μιας σταθεράς, την ονομαζόμενη σήμερα σταθερά Planck [15, 16].

Το 1905, ο Albert Einstein, βασιζόμενος στο μοντέλο του Planck, ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, γεγονός που συνεισφέρει στη δημιουργία των αρχικών φ/β στοιχείων. Το άρθρο του Einstein προβάλλει μια δραστική υπόθεση: το φως σχηματίζεται από ελαφρά κβάντα, με καλά καθορισμένη ενέργεια και ορμή που σήμερα ονομάζονται φωτόνια [12, 17]. Οι Mott και Schottky το 1949, διατυπώνουν τη θεωρία τους για τη δίοδο σταθερής κατάστασης [18].

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία ουσιαστικά γεννιέται το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson στα Bell Labs (ΗΠΑ) όταν αναπτύσσουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου (PV) - το πρώτο ηλιακό στοιχείο ικανό να μετατρέψει αρκετή ενέργεια του ήλιου σε ηλεκτρική, με απόδοση 5.7% και αργότερα 11% [7, 11, 19].

Το 1958, η Hoffman Electronics επιτυγχάνει 9% αποδοτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Την ίδια χρονιά εκτοξεύονται οι δορυφόροι Vanguard I, Explorer III, Vanguard II και Sputnik-3. Όλοι με συστήματα που τροφοδοτούνται από Φ/Β. Έκτοτε, τα ηλιακά κελιά γίνονται η αποδεκτή πηγή ενέργειας για τους δορυφόρους παγκοσμίως [20].

Το 1963 η Sharp παράγει μια βιώσιμη φωτοβολταϊκή μονάδα ηλιακών κυψελών πυριτίου, παράγοντας με επιτυχία ηλιακά πάνελ μαζικής παραγωγής. Η Ιαπωνία εγκαθιστά μια Φ/Β συστοιχία 242 Watt, τη μεγαλύτερη συστοιχία παγκοσμίως [21].

Το 1964, η NASA εκτοξεύει τον πρώτο δορυφόρο Nimbus με φωτοβολταϊκή συστοιχία 470 Watt. Η επιθυμία για την ανακάλυψη του διαστήματος ήταν ένας από τους μεγάλους μοχλούς για την πρόοδο της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, με κυριότερο αγοραστή για τις επόμενες δεκαετίες τη NASA [14].

¹ Ως μέλαν σώμα ορίζεται ένα αντικείμενο που απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία, σε όλες τις συχνότητες.

Το 1980 η ARCO Solar γίνεται η πρώτη εταιρεία που παράγει περισσότερα από 1 MW φωτοβολταϊκών μονάδων σε ένα χρόνο. Δύο χρόνια μετά, ο πρώτος φωτοβολταϊκός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής σε κλίμακα MW τίθεται σε σύνδεση στην Καλιφόρνια. Διαθέτει σύστημα χωρητικότητας 1 MW, με μονάδες σε 108 ιχνηλάτες διπλού άξονα (dual-axis trackers) [22].

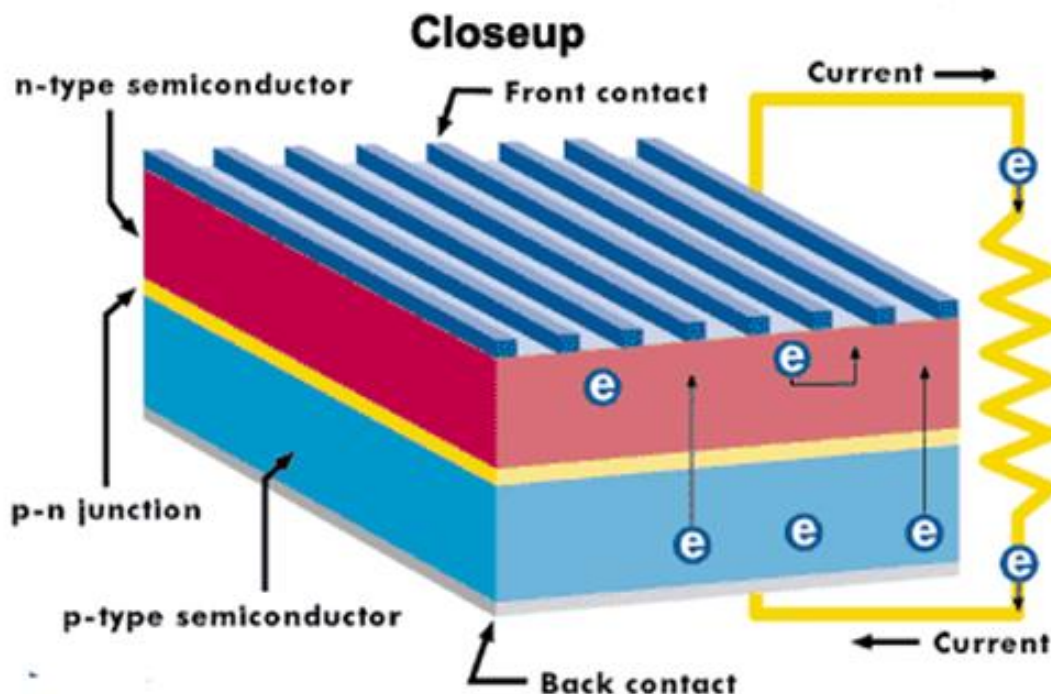
Σήμερα, σημαντικότερη εφαρμογή τα φ/β έχουν στη επιπρόσθετη παραγωγή ενέργειας. Οι εξελιγμένες ηλιακές κυψέλες πετυχαίνουν απόδοση μέχρι 24.5% (σε συνθήκες εργαστηρίου). Οι νέες τεχνολογίες θα επιτρέψουν την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σε πολύ χαμηλές τιμές και με υψηλή απόδοση [7, 11].

1.5 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η βασική διαδικασία κατά την οποία ένα ηλιακό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Με απλά λόγια, αποτελούμενο από μικροσκοπικά σωματίδια ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, τα φωτόνια, το ηλιακό φως απορροφάται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, το οποίο περιέχει ένα ημιαγωγικό υλικό όπως το πυρίτιο ή η πλατίνα. Η ενέργεια των φωτονίων πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από αυτή που χαρακτηρίζει κάθε υλικό, ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν φορείς αγωγιμότητας, δηλαδή, ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών στους ημιαγωγούς. Η ενέργεια E των φωτονίων ορίζεται από τη μαθηματική σχέση (1.1):

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = [J] = \frac{1240}{\lambda[nm]} [eV] \quad (1.1)$$

Όπου h η σταθερά του Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34}$ [J·s], c η ταχύτητα του φωτός: $c = 3,10^8$ [m/s], f και λ η συχνότητα και το μήκος κύματος των φωτονίων αντίστοιχα. Η ενέργεια από το φωτόνιο μεταφέρεται σε ένα ηλεκτρόνιο, σε ένα άτομο του ηλιακού κυττάρου. Το ενεργοποιημένο ηλεκτρόνιο μπορεί στη συνέχεια να ξεφύγει από τον δεσμό του με το άτομο και να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό αφήνει πίσω του μια «οπή». Σε συνδυασμό με μια διεπαφή p-n (p-n junction), η οποία είναι ένα στρώμα μέσα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο που σχηματίζεται από την στενή επαφή ημιαγωγών τύπου p και τύπου n που δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο, οι οπές κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση από τα ηλεκτρόνια, παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα (Σχήμα 1.5, σελ.9) [7, 23].

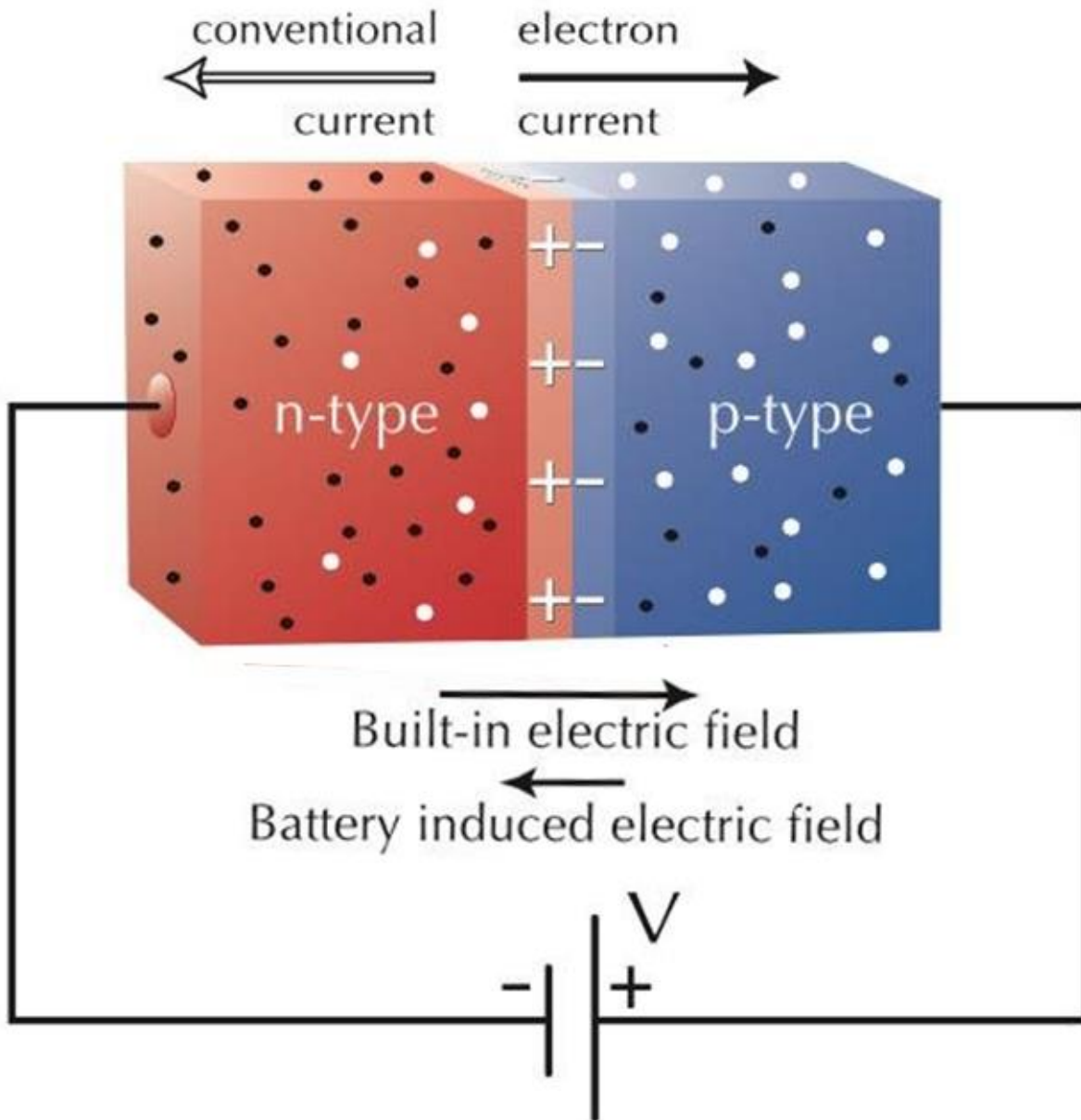


Σχήμα 1.5: Δομή ενός ηλιακού κελιού [24]

1.5.1 Ημιαγωγοί- Επαφή p-n

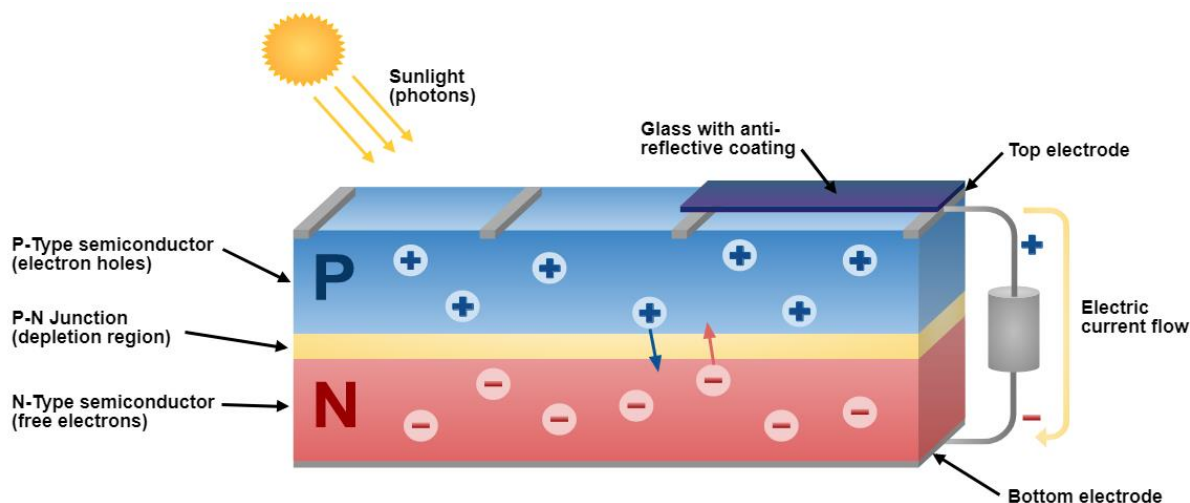
Οι ημιαγωγοί είναι υλικά που έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ αγωγών (γενικά μετάλλων) και μη αγωγών ή μονωτών (όπως τα περισσότερα κεραμικά). Οι ημιαγωγοί μπορεί να είναι καθαρά στοιχεία, όπως το πυρίτιο (Si) ή το γερμάνιο (Ge), ή ενώσεις όπως το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs) ή το σεληνιούχο κάδμιο (CdSe). Αντίθετα με τους αγωγούς, η ηλεκτρική αγωγιμότητα των ημιαγωγών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, καθορισμένη μεταβολή της αγωγιμότητας είναι δυνατή με την εισαγωγή προσμίξεων σε κρύσταλλο ημιαγωγών [25].

Για τη δημιουργία φωτοβολταϊκού φαινομένου, εισάγονται χημικά στοιχεία στον ημιαγωγό, διαδικασία που ονομάζεται πρόσμιξη (Doping), που τον βοηθούν να δημιουργήσει περίσσεια ηλεκτρονίων και οπών. Δύο από τα πιο σημαντικά στοιχεία με τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί πρόσμιξη στο πυρίτιο, το οποίο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, είναι το βόριο (B) και ο φώσφορος (P). Εφόσον το βόριο (B) έχει στην εξωτερική του στοιβάδα τρία ηλεκτρόνια, κάθε άτομο βορίου που ενώνεται με ένα άτομο πυριτίου, αφήνει μια οπή στο σημείο που θα έπρεπε να υπάρχει άλλο ηλεκτρόνιο. Αυτή η δομή ονομάζεται ημιαγωγός τύπου p (positive). Από την άλλη, ο φώσφορος, έχει ένα ηλεκτρόνιο δεσμού περισσότερο από το πυρίτιο. Όταν ένα άτομο πυριτίου αντικαθίσταται από άλλο του φωσφόρου στο κρυσταλλικό πλέγμα, το πλεονάζον ηλεκτρόνιο μένει ελεύθερο και ο ημιαγωγός καλείται τύπου n (negative). Με τη τροποποίηση δύο περιοχών στο ίδιο κρύσταλλο πραγματοποιείται μια ημιαγωγίμη επαφή που στη μία πλευρά έχει περισσότερες οπές ενώ στην άλλη πιο πολλά ηλεκτρόνια.



Σχήμα 1.6: Επαφή p-n [26]

Η επαφή p-n αποτελείται από την περιοχή επαφής μεταξύ ενός ημιαγωγού τύπου p και ενός ημιαγωγού τύπου n (Σχήμα 1.6). Η συμπεριφορά καθορίζεται από δύο τύπους ρευμάτων: Το «ρεύμα διάχυσης», που ακολουθεί τη κλίση συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα, και το ρεύμα πεδίου, που οδηγείται από το ηλεκτρικό πεδίο που προέρχεται από τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στην επαφή p-n. Εάν μια εξωτερική τάση εφαρμοστεί στη διεπαφή p-n, προσθέτει σε αυτή τη διαφορά δυναμικού, μειώνοντας ή αυξάνοντας το «φράγμα δυναμικού» μεταξύ της περιοχής p και n [27].



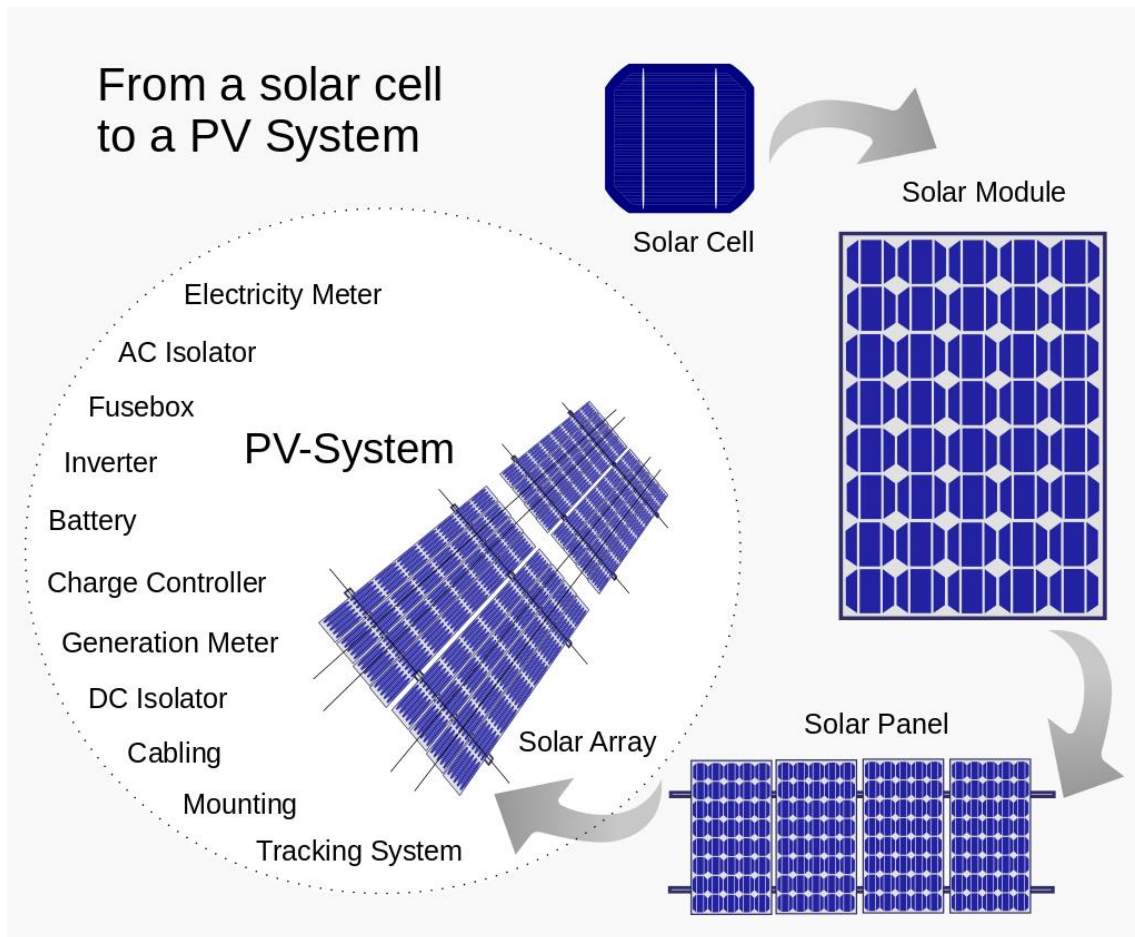
Σχήμα 1.7: Παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων σε μια ημιαγωγική ένωση [28]

Όταν προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πάνω στην ημιαγωγική ένωση και εφόσον τα φωτόνια μεταφέρουν την απαραίτητη ενέργεια στα ηλεκτρόνια ώστε αυτά να απελευθερωθούν, κάποια ηλεκτρόνια θα διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού και θα μεταφερθούν έξω από τον ημιαγωγό (Σχήμα 1.7). Εάν υπάρχει ένα εξωτερικό κύκλωμα, μέσω του οποίου να μπορούν να κυκλοφορήσουν, θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Τα παραπάνω ηλεκτρόνια, αφού διαπεράσουν το εξωτερικό κύκλωμα, θα μπουν εκ νέου στην ημιαγωγική ένωση από την άλλη πλευρά.

1.6 Φωτοβολταϊκή κυψέλη – Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, για να λάβει χώρα ένα φωτοβολταϊκό φαινόμενο απαραίτητη είναι η συμμετοχή μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης (ηλιακού κυττάρου ή κελιού - photovoltaic cell ή solar cell). Αυτό είναι το βασικό και μικρότερο στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού (PV) συστήματος το οποίο, αιχμαλωτίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία, καθιστά δυνατή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια ενός κβαντικού μηχανισμού. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δεν χρειάζεται έντονο ηλιακό φως για να λειτουργήσει. Μπορεί επίσης να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και σε μερική σκίαση, από την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία. Το ποσοστό έκθεσης στο ηλιακό φως αλλάζει ανάλογα και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως το ρεύμα, τη τάση ή την αντίσταση.

Το συνηθέστερο υλικό από το οποίο κατασκευάζεται ένα φ/β κύτταρο είναι το πυρίτιο. Οι περισσότερες εμπορικές φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι μόνο single-junction, αλλά έχουν επίσης αναπτυχθεί φωτοβολταϊκές κυψέλες multi-junction που παρέχουν υψηλότερη απόδοση με μεγαλύτερο κόστος.



Σχήμα 1.8: Από το φ/β κύτταρο στο φ/β σύστημα [29]

Η κοινή ηλιακή κυψέλη πυριτίου μονής σύνδεσης μπορεί να παραγάγει μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος περίπου 0,5V έως 0,6V. Ένας αριθμός ηλιακών κυψελών που συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους και τοποθετούνται σε μια δομή στήριξης ή πλαίσιο ονομάζεται φωτοβολταϊκή μονάδα. Οι μονάδες έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε μια συγκεκριμένη τάση, όπως ένα κοινό σύστημα 12V. Το ρεύμα που παράγεται εξαρτάται άμεσα από το πόσο φως προσπίπτει στη μονάδα.

Πολλαπλές μονάδες μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια φωτοβολταϊκή πλαίσιοσειρά ή συστοιχία (string ή array), (Σχήμα 1.8). Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια μιας μονάδας ή συστοιχίας, τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια θα παραχθεί. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες και συστοιχίες παράγουν ηλεκτρισμό συνεχούς ρεύματος (DC). Μπορούν να συνδεθούν τόσο σε σειρά, όσο και σε παράλληλες ηλεκτρικές διατάξεις για την παραγωγή οποιουδήποτε απαιτούμενου συνδυασμού τάσης και ρεύματος [7, 30].

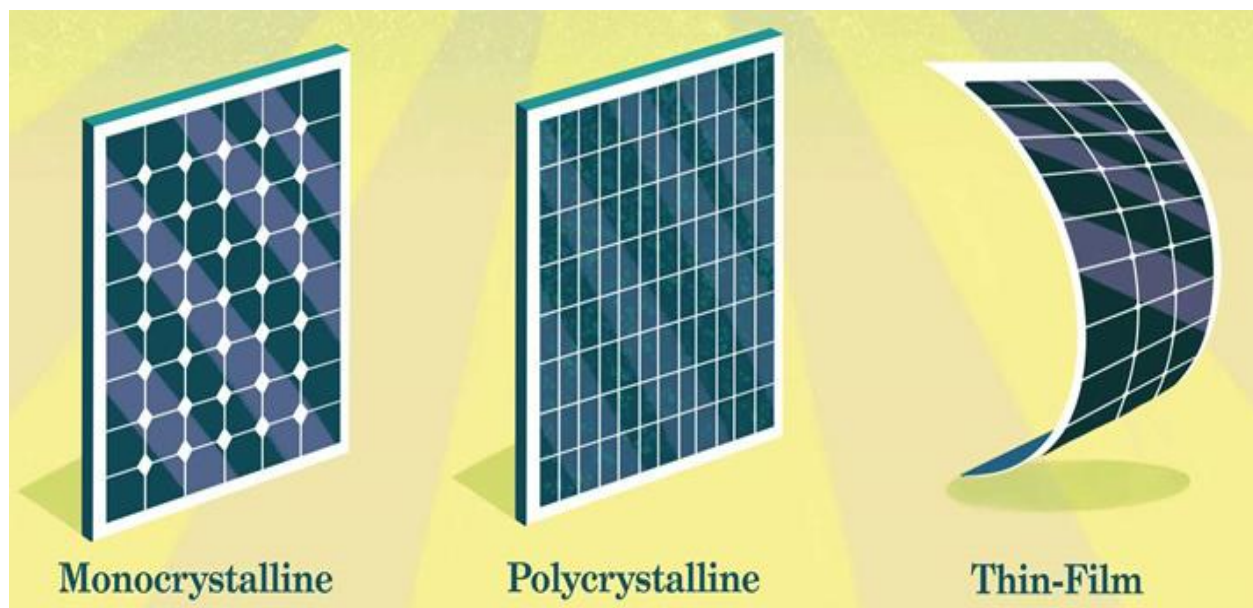
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός από το φωτοβολταϊκό πάνελ περιλαμβάνουν την ηλιακή γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά συστήματα που είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελείται από συσκευές και εξαρτήματα

διαφορετικών τύπων, μεγεθών και τεχνικών χαρακτηριστικών τα οποία απαιτούν σωστό υπολογισμό και επιλογή για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, ένα φ/β σύστημα μπορεί να αποτελείται επίσης από το μετρητή ηλεκτρισμού, τον μονωτή εναλλασσόμενου ρεύματος, το κιβώτιο ασφαλειών, τον αναστροφέα, τον ελεγκτή φόρτισης, τον μετρητή παραγωγής, τον μονωτή συνεχούς ρεύματος, τη καλωδίωση, τη βάση στερέωσης, και το σύστημα εντοπισμού. Η αυτονομία ενός συστήματος επιτυγχάνεται με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες [31, 32].

1.6.1 Τύποι φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να κατασκευαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους και από ποικιλία διαφορετικών υλικών. Όπως προαναφέρθηκε, το πιο κοινό υλικό για την κατασκευή ηλιακών πάνελ είναι το πυριτίο που έχει ημιαγωγικές ιδιότητες.

Υπάρχουν τρεις τύποι τεχνολογιών φωτοβολταϊκών κυψελών που κυριαρχούν στην παγκόσμια αγορά: μονοκρυσταλλικού πυριτίου (monocrystalline silicon), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (polycrystalline silicon) και λεπτού υμενίου (thin film) (Σχήμα 1.9). Η απόδοση μετατροπής για αυτούς τους τύπους φωτοβολταϊκών κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 10% και 20%. Οι τεχνολογίες φωτοβολταϊκών υψηλότερης απόδοσης, συμπεριλαμβανομένου του αρσενιδίου του γαλλίου και των κυψελών πολλαπλών συνδέσεων, είναι λιγότερο κοινές λόγω του υψηλού κόστους τους, αλλά είναι ιδανικές για χρήση σε συγκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα και διαστημικές εφαρμογές.



Σχήμα 1.9: Τύποι φωτοβολταϊκών μονάδων [33]

Οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι εξαιρετικά αποδοτικές, αλλά η διαδικασία κατασκευής τους είναι αργή και εντατική, γεγονός που τις καθιστά πιο ακριβές από τις αντίστοιχες πολυκρυσταλλικές ή λεπτής μεμβράνης. Το μονοκρυσταλλικό στοιχείο προέρχεται από μια μονοκρυσταλλική ράβδο υψηλής καθαρότητας. Αυτά τα κύτταρα είναι τα πιο αποδοτικά ηλεκτρικά, άρα απαιτούν μικρότερη επιφάνεια από άλλους τύπους κυψελών για να παραγάγουν ισοδύναμη ποσότητα ισχύος. Έχουν επίσης ένα ευρύ φάσμα επιλογών διαφάνειας. Τα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος τους, η απαίτηση για εξαιρεισμό προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση και το χαρακτηριστικό γεωμετρικό μοτίβο. Η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των εμπορικών μονάδων κυμαίνεται γύρω στο 14-19%.

Αντί για μια ενιαία ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή, τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα περιέχουν πολλούς μικρούς κόκκους κρυστάλλων. Μπορούν να κατασκευαστούν με απλή χύτευση μιας κυβικής ράβδου από λιωμένο πυρίτιο, που στη συνέχεια τεμαχίζεται παρόμοια με τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα. Αυτά τα κύτταρα είναι λιγότερο αποτελεσματικά από τα μονοκρυσταλλικά. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο διαφέρει από το μονοκρυσταλλικό ως προς το κόστος (λόγω της μείωσης των απωλειών) και την απόδοση (λόγω των ορίων των κόκκων). Οι αποδόσεις των εμπορικών μονάδων κυμαίνονται γύρω στο 12-15%.

Τα φωτοβολταϊκά λεπτής μεμβράνης παράγονται με εκτύπωση ή ψεκασμό ενός λεπτού στρώματος ημιαγωγού φωτοβολταϊκού υλικού σε ένα λεπτό υπόστρωμα (λίγα νανόμετρα έως 1 micrometre) από γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό. Η διαδικασία κατασκευής είναι γρηγορότερη και φθηνότερη, καθιστώντας την τεχνολογία φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου πιο βιώσιμη για χρήση σε οικιακό ηλιακό σύστημα καθώς ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρότερος. Με ποσοστό απόδοσης μόνο 6 έως 7%, αυτά τα κύτταρα είναι λιγότερο αποτελεσματικά από τα κρυσταλλικά πυρίτια αλλά, ενώ μια μεγαλύτερη επιφάνεια απαιτείται για παραγωγή, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο ελκυστικό.

Υπάρχουν και άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών, τρίτης γενιάς, που βασίζονται σε διάφορες τεχνολογίες thin film, όμως οι πιο πολλοί είναι ακόμα στο στάδιο της έρευνας ή της ανάπτυξης [34].

1.7 Ισοδύναμο κύκλωμα

Για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο οποιουδήποτε ηλιακού κυττάρου, πάνελ ή συστοιχίας, απαιτείται η εξαγωγή των ηλεκτρικών παραμέτρων του φ/β στοιχείου στο ισοδύναμο κύκλωμα. Η ισχύς είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού του ρεύματος και της τάσης που παράγονται. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.10 (σελ. 15), το παραγόμενο ρεύμα προκύπτει ως εξής:

$$I = I_L - I_d - I_{sh} \quad (1.2)$$

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} \quad (1.3)$$

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_{sh}}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

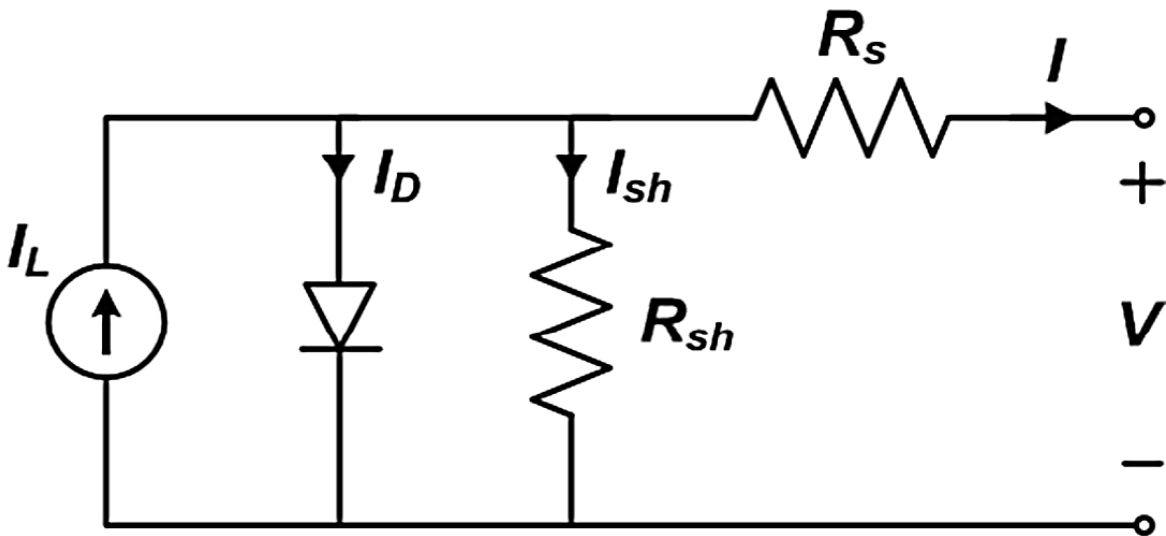
Το I_L υποδηλώνει το ρεύμα που παράγεται από την πρόσπτωση του φωτός, το I_0 υποδηλώνει το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου από τη διεπαφή p-n, το I_d υποδηλώνει το ρεύμα της διόδου, το R_s αντιπροσωπεύει την αντίσταση σειράς, το R_{sh} την αντίσταση διαρροής, A είναι ο ιδεατός συντελεστής, q το στοιχειώδες φορτίο ηλεκτρονίου, το k η σταθερά Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$, και το T η απόλυτη θερμοκρασία της επαφής p-n σε Kelvin. Η τιμή του R_{sh} δεν επηρεάζει κατά πολύ τα χαρακτηριστικά του φ/β κυττάρου, αντίθετα με την R_s που τα επηρεάζει σημαντικά. Εφόσον, η R_{sh} μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη, η εξίσωση (1.4) μπορεί να γραφεί απλά:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} \quad (1.5)$$

Σε ανοικτοκύκλωμα ($I = 0$) είναι δυνατόν να ισχύσουν οι πιο κάτω εξισώσεις:

$$V_{oc} = \left(\frac{AkT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right] \sim \left(\frac{AkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) \quad (1.6)$$

$$I_0 = I_L \exp \left(- \frac{qV}{AkT} \right) \quad (1.7)$$



Σχήμα 1.10: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού πάνελ [35]

Η τιμή του ανάστροφου ρεύματος κόρου της διόδου (στην δύναμη $^{-5}$ με $^{-6}$) είναι μικρή. Συνεπώς, το ρεύμα που παράγεται από την πρόσπτωση του φωτός ισούται με το ρεύμα βραχυκύκλωσης (short circuit) $I_L \sim I_{sc}$. Η R_s προκύπτει ως ακολούθως:

$$R_s = \left(\frac{AkT}{q} \right) \ln \left\{ \left[\frac{I_L + I}{I_0} \right] + 1 \right\} - \frac{V}{I} \quad (1.8)$$

Επομένως, για να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή της παραχθείσας ισχύος από ένα φ/β κύτταρο, έχουμε:

$$P_{max} = I_{mp} V_{mp} \left\{ I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_{mp}}{AkT} \right) - 1 \right] \right\} V_{mp} \quad (1.9)$$

- Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} : το μεγαλύτερο σε ένταση ρεύμα που μπορούμε να έχουμε σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην ουσία, είναι το ρεύμα που προκύπτει στους πόλους ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν αυτό είναι βραχυκυκλωμένο.
- Τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} : η μεγαλύτερη τάση που μπορούμε να έχουμε χωρίς να περνάει ρεύμα στο κύκλωμα, σε ανοιχτό κύκλωμα δηλαδή. Σε αυτή την περίπτωση, δεν έχουμε φορτίο πάνω στο πλαίσιο.
- Ρεύμα I_{mp} : το ρεύμα που προκύπτει έχοντας μια συγκεκριμένη τάση V_{mp} . Είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που κυκλοφορεί διαμέσου ενός φορτίου.
- Μέγιστη ισχύς P_{max} : το γινόμενο της τάσης επί της έντασης. Η τιμή P_{max} είναι το γινόμενο που προκύπτει από έναν συνδυασμό τιμών έντασης και τάσης, τέτοιον ώστε η τιμή να είναι μέγιστη.

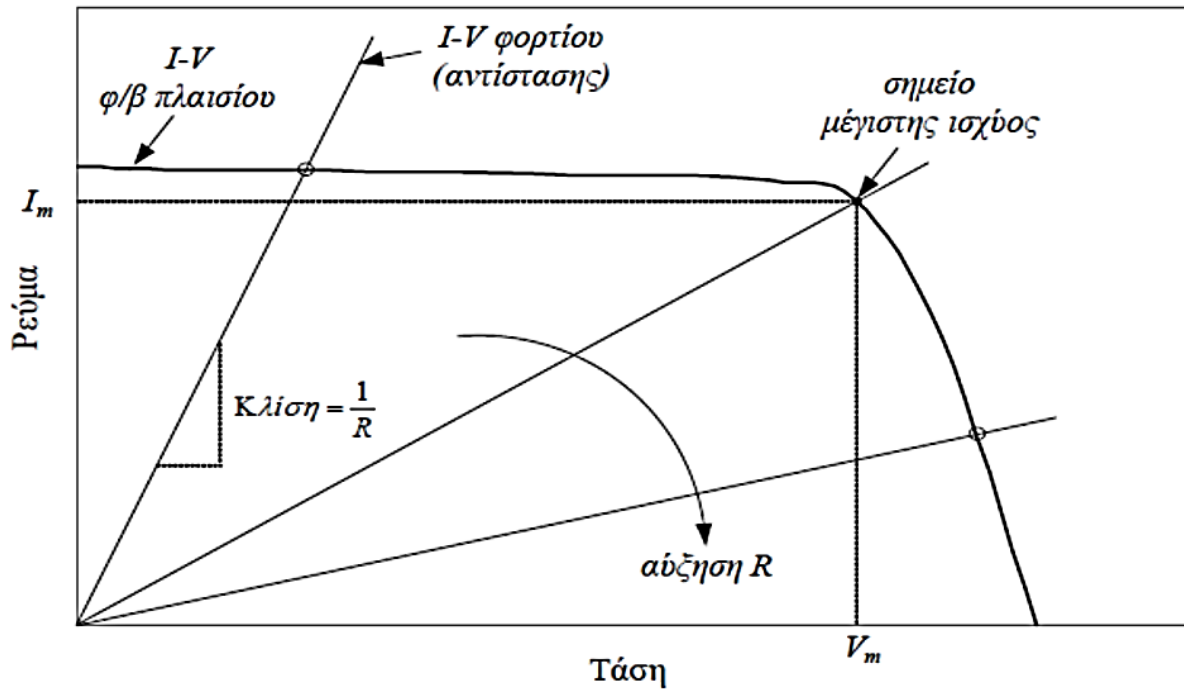
Ουσιαστικά, η αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος ορίζει τις τιμές I_{mp} και V_{mp} για το μέγιστο αποτέλεσμα [31, 35].

1.8 Καμπύλη Ρεύματος- Τάσης ωμικού φορτίου

Προκειμένου να γίνει κατανοητό πόσο σημαντικές και απαραίτητες είναι οι καμπύλες φορτίου, σύμφωνα με το Σχήμα 1.11 (σελ.17), κατά το νόμο του Ohm, ισχύει:

$$V = I \cdot R \quad \text{ή} \quad I = \left(\frac{1}{R} \right) \cdot V \quad (1.10)$$

που, σε γράφημα ρεύματος ως συνάρτηση της τάσης μεταφράζεται σαν ευθεία γραμμή με κλίση $\frac{1}{R}$.



Σχήμα 1.11: Καμπύλη Ρεύματος- Τάσης ωμικού φορτίου [36]

Κατά το Σχήμα 1.11 , με την αύξηση της αντίστασης R , το σημείο λειτουργίας όπου συναντάται η χαρακτηριστική $I - V$ του φωτοβολταϊκού με τη χαρακτηριστική $I - V$ του φορτίου κινείται επί της καμπύλης $I - V$ με φορά από αριστερά προς δεξιά.

Εφόσον η παραδιδόμενη στο φορτίο ισχύς ισούται με $I \cdot V$, τότε θα υφίσταται μια ορισμένη τιμή R η οποία θα υποδεικνύει το MPP. Άρα:

$$R_m = \frac{V_m}{I_m} \quad (1.11)$$

- V_m : τάση στο σημείο MPP
- I_m : ρεύμα στο σημείο MPP

Υπό τις ιδιαίτερες συνθήκες από τις οποίες καταπονούνται οι φωτοβολταϊκές μονάδες, το MPP είναι αντίστοιχο της ονομαστικής τάσης V_R και του ονομαστικού ρεύματος I_R της μονάδας PV. Δηλαδή, η βέλτιστη τιμή R , για μέγιστη μεταφορά ισχύος, υπό ένταση ήλιου ίση με 1 kW/m^2 , θερμοκρασία 25°C και λόγω μάζας αέρα (AM 1.5), [36] θα ισούται με :

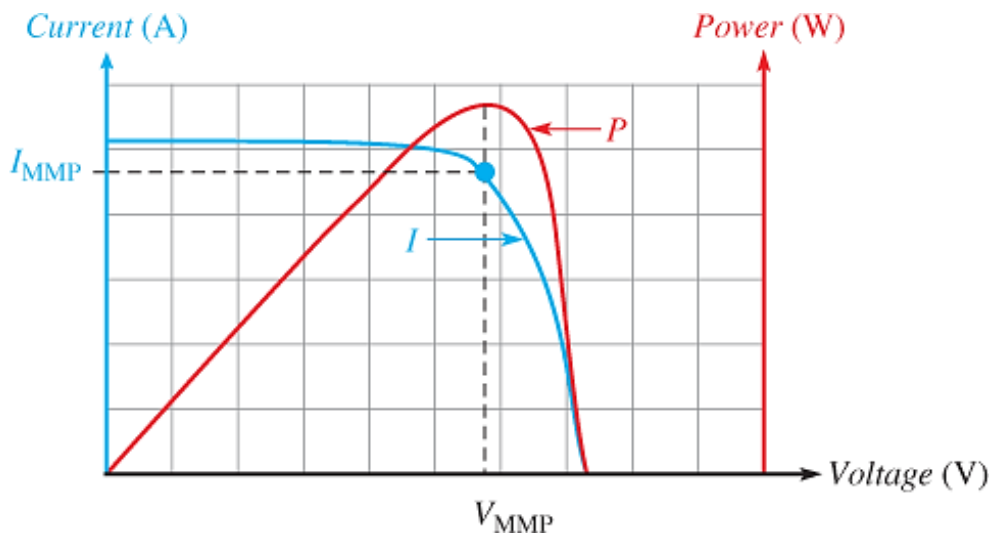
$$\frac{V_R}{I_R} \quad (1.12)$$

1.9 Αρχή λειτουργίας του Ανιχνευτή Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

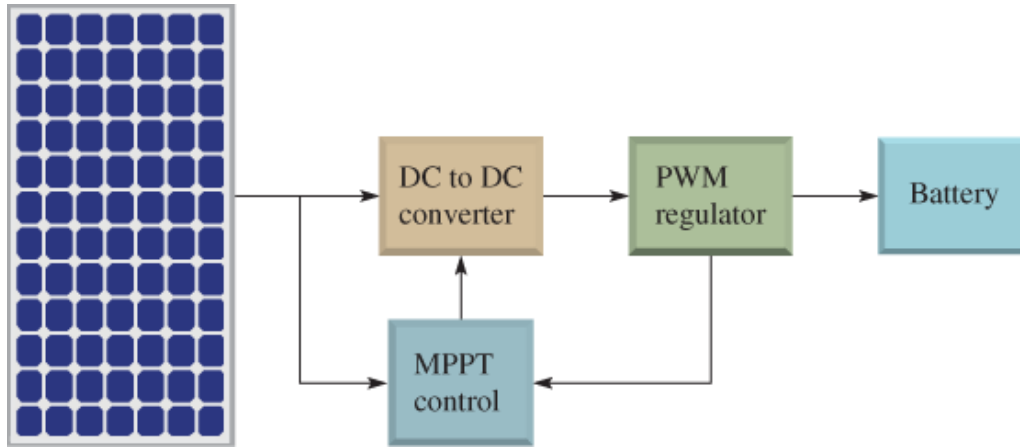
Από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι σημαντικό να εξαχθεί η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται σε συνθήκες μερικής σκίασης (PSC). Ως εκ τούτου, απαιτείται ένας ανιχνευτής του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) για τη συλλογή της μέγιστης διαθέσιμης. Η παρακολούθηση αυτού του σημείου για τα φωτοβολταϊκά συστήματα που λειτουργούν υπό μερική σκίαση είναι μια πρόκληση, καθώς οι χαρακτηριστικές P-V περιλαμβάνουν πολλαπλές κορυφές με μόνο μία να αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ισχύ. Οι συμβατικές τεχνικές MPPT είναι κατάλληλες μόνο για φωτοβολταϊκά συστήματα που λειτουργούν υπό ομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία όπου η καμπύλη P-V έχει μόνο μία κορυφή και γενικά αποτυγχάνουν να συγκεντρώσουν τη μέγιστη ισχύ όταν το φωτοβολταϊκό λειτουργεί υπό PSC. Οι ανιχνευτές μέγιστης ισχύος (MPPT) εξαλείφουν μεγάλο μέρος της απώλειας ενέργειας που συναντάται στους άλλους τύπους ελεγκτών και παράγουν απόδοση έως και 30% υψηλότερη σε σχέση με ελεγκτές που δεν είναι MPPT. Είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος ελεγκτή φόρτισης, ειδικά σε μεγαλύτερα συστήματα.

Το MPPT παρακολουθεί την τάση και το ρεύμα της φωτοβολταϊκής μονάδας για να καθορίσει πότε προκύπτει η μέγιστη ισχύς προκειμένου αυτή να εξαχθεί. Στη συνέχεια, το MPPT προσαρμόζει την τάση στην μπαταρία για να βελτιστοποιήσει τη φόρτιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά μέγιστης ισχύος από την ηλιακή μονάδα στην μπαταρία. Οι ελεγκτές φόρτισης MPPT χρησιμοποιούν συνήθως Pulse-width modulation (PWM) στη λειτουργία τους.

Στο Σχήμα 1.12, η μπλε καμπύλη είναι η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για ένα συγκεκριμένο ηλιακό πάνελ κάτω από μια καθορισμένη συνθήκη προσπίπτοντος φωτός. Η καμπύλη P είναι η ισχύς που δείχνει το σημείο που εμφανίζεται η κορυφή, η οποία βρίσκεται στο «γόνατο» της καμπύλης $I - V$ στα I_{MPP} και V_{MPP} . Εάν το προσπίπτον φως μειωθεί, οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα κάτω. Ο ανιχνευτής μέγιστης ισχύος (MPPT) ενσωματώνει ρυθμιστή PWM και μετατροπέα DC σε DC.



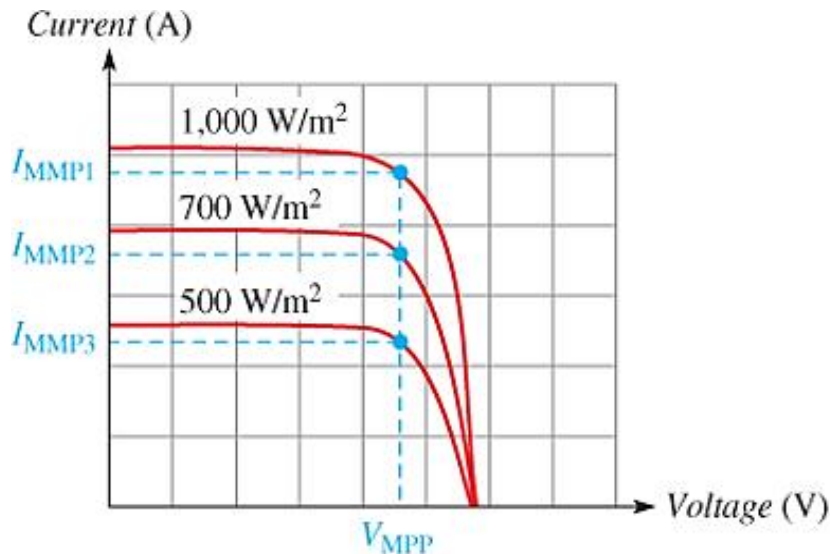
Σχήμα 1.12: Ηλιακή μονάδα I-V και καμπύλες ισχύος [37]

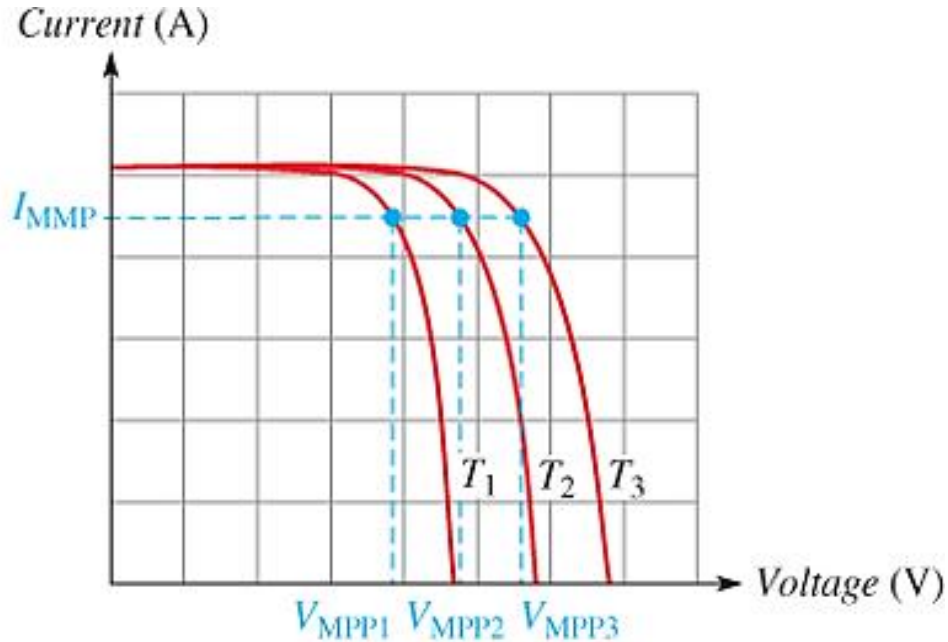


Σχήμα 1.13: Διάγραμμα κυκλώματος MPPT [37]

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της λειτουργικής ιδέας φαίνεται στο Σχήμα 1.13. Η παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους, επομένως το σχήμα απεικονίζει μόνο τις βασικές λειτουργίες. Ο σκοπός του μετατροπέα DC σε DC είναι να απομονώσει την είσοδο DC από την έξοδο DC, ώστε η έξοδος να μπορεί να ρυθμιστεί για μέγιστη ισχύ. Ο έλεγχος MPPT τυπικά χρησιμοποιεί έναν μικροεπεξεργαστή.

Το ρεύμα εξόδου μιας ηλιακής μονάδας ποικίλλει άμεσα ανάλογα με την ποσότητα φωτός (ακτινοβολία) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραδοθεί θα είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερη ακτινοβολία, μειώνοντας το φορτίο και διατηρώντας την τάση σε σταθερό επίπεδο. Για την αλλαγή της θερμοκρασίας, η τάση εξόδου αλλάζει αντίστροφα, ενώ το ρεύμα παραμένει σχετικά σταθερό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15 (σελ.20). Ο στόχος του MPPT είναι να διατηρεί το σημείο λειτουργίας της ηλιακής μονάδας στο μέγιστο σημείο ισχύος καθώς οι καμπύλες $I - V$ αλλάζουν σύμφωνα με τις διακυμάνσεις του φωτός ή της θερμοκρασίας.

Σχήμα 1.14: Καμπύλη $I - V$ σε διαφορετικές ακτινοβολίες [37]



Σχήμα 1.15: Καμπύλη I-V σε διαφορετικές θερμοκρασίες [37]

Ο Ανιχνευτής Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT) λειτουργεί χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο, ο οποίος είναι βασικά μια σειρά βημάτων ή διαδικασιών που χρησιμοποιείται για την επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος. Στο MPPT μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αλγόριθμοι, για μερικούς από τους οποίους γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην ενότητα 3.3, Κεφάλαιο 3. [37, 38].

1.10 Επίλογος

Εν κατακλείδι, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν κερδίσει πολύ μεγάλη προσοχή λόγω των κυρίαρχων πλεονεκτημάτων τους σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Οι περιορισμένοι πόροι των συμβατικών καυσίμων μαζί με τη σχετική περιβαλλοντική ρύπανση που απειλεί τη δημόσια υγεία είναι τα πιο σημαντικά ζητήματα σχετικά με αυτά τα είδη ενέργειας. Στη σύγχρονη εποχή, η ανάπτυξη στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία καθιστά την ηλιακή ενέργεια να θεωρείται ως μία από τις σημαντικότερες ΑΠΕ. Με την εξέλιξη των ηλιακών κυψελών, αναπτύχθηκαν διαφορετικοί τύποι κυψελών πυριτίου με βάση κρυσταλλικές δομές, όπως μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς και λεπτού υμενίου ή ακόμα και άλλες πιο εξελιγμένες, τρίτης γενιάς. Μια φ/β μονάδα αποτελείται από πολλές ηλιακές κυψέλες με ιδιότητες ημιαγωγών, εγκλωβισμένων σε ένα κατάλληλο για προστασία από το περιβάλλον υλικό. Αυτές οι ιδιότητες παρέχουν τη δυνατότητα στη φ/β κυψέλη να δέχεται το φως, ή για την ακρίβεια, τα φωτόνια από τον ήλιο, και να μεταβάλλει την ενέργειά τους σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου (Becquerel, 1839). Και στις δύο πλευρές του ημιαγωγού υπάρχει ένα στρώμα αγωγίμου υλικού το οποίο «συλλέγει» την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Τα φ/β κελιά δεν δύνανται να λειτουργήσουν σωστά χωρίς την επαφή p-n που διαχωρίζει τους φορείς ηλεκτρονίων και οπών σε ένα ηλιακό στοιχείο για να δημιουργήσει μια τάση. Οι ηλιακές κυψέλες τελευταίας τεχνολογίας, επιτυγχάνουν απόδοση μέχρι 24.5% (σε συνθήκες

εργαστηρίου) [7]. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται σημαντικά από τη προσπίπτουσα ακτινοβολία και από τη θέση του ήλιου σε σχέση με τη τοποθεσία εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση, τα φωτοβολταϊκά συμπεριλαμβάνουν στα εξαρτήματά τους έναν ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Η βελτίωση της απόδοσης και της μείωσης του κόστους των φωτοβολταϊκών είναι μια συνεχής προσπάθεια που επιδιώκουν πολλές ερευνητικές κοινότητες [39, 40].

Κεφάλαιο 2

2. Μετατροπείς Ισχύος

2.1 Εισαγωγή

Οι φωτοβολταϊκοί μετατροπείς DC-DC αποτελούν κρίσιμο μέρος της μετατροπής ισχύος σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Ο μετατροπέας DC-DC παρέχεται για τη ρύθμιση της σταθερής εξόδου υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μετρά την ισχύ και την παραγόμενη ανά μονάδα ενέργεια, καθώς και τη θερμοκρασία και την τάση του πάνελ. Μπορεί να απενεργοποιήσει την τάση DC του πίνακα όταν η θερμοκρασία ή η τάση είναι πολύ υψηλή. Ένας μετατροπέας DC-DC μπορεί να ενισχύσει τη συνολική ηλιακή ενέργεια που παράγεται.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αρχικά μελετώνται τα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (FET) και MOSFET και στη συνέχεια, οι μετατροπείς ισχύος DC/DC γενικά, ενώ ειδικότερα αναλύονται οι Μετατροπείς Buck, Boost και Buck-Boost.

2.2 Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου

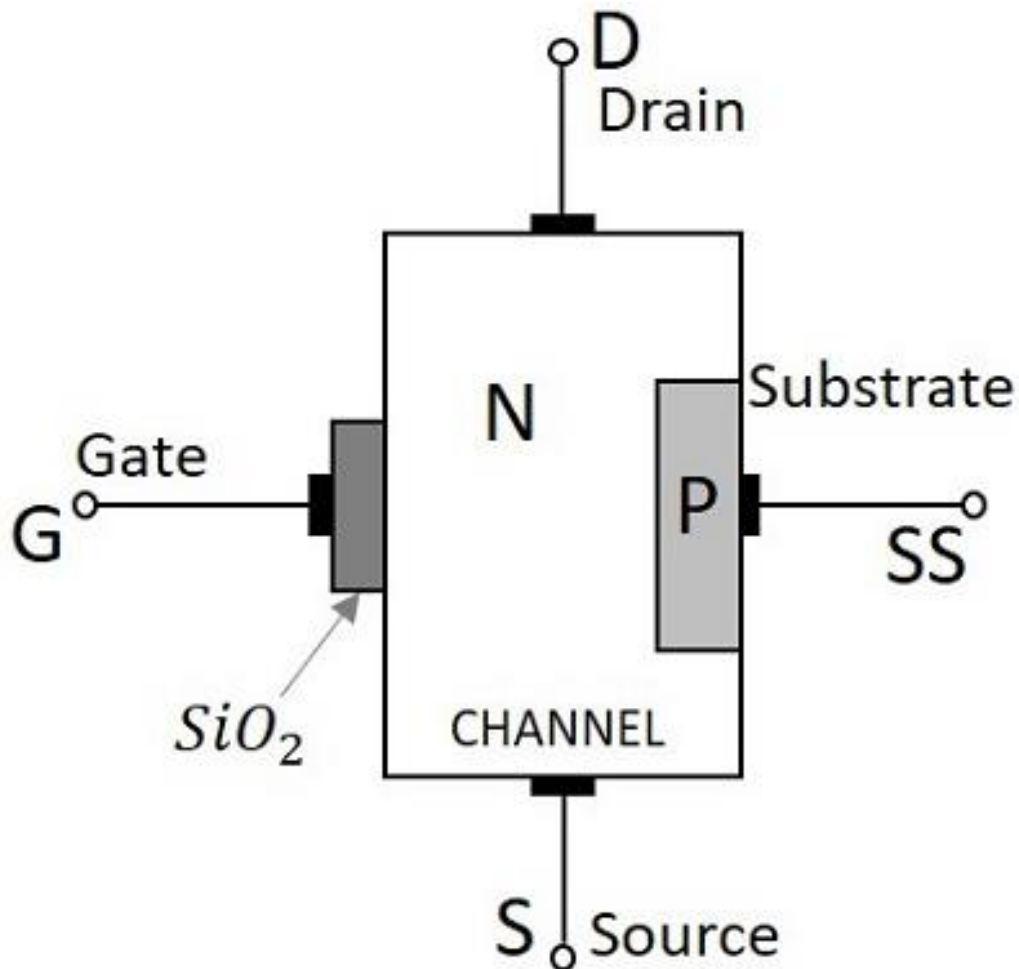
Πριν από την εισαγωγή των πρώτων FET (Field Effect Transistor) στην αγορά ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, η ιδέα αυτών των συσκευών ημιαγωγών ήταν γνωστή εδώ και πολλά χρόνια. Μερικές από τις πρώτες έννοιες για το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου περιγράφηκαν σε μια εργασία από τον Lilienfeld, το 1926. Τα επόμενα θεμέλια τέθηκαν στη δεκαετία του 1940, στα εργαστήρια Bell, όπου ιδρύθηκε ερευνητική ομάδα ημιαγωγών υπό τον William Shockley. Αυτή η ομάδα διερεύνησε μια σειρά από τομείς που σχετίζονται με την τεχνολογία ημιαγωγών, ένας από τους οποίους ήταν μια συσκευή που ρυθμίζει το ρεύμα που ρέει σε ένα κανάλι ημιαγωγών, τοποθετώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο κοντά σε αυτό.

Ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι μια ενεργή συσκευή ημιαγωγών τριών ακροδεκτών, όπου το ρεύμα εξόδου ελέγχεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από την τάση εισόδου. Το FET ελέγχει τη ροή ηλεκτρονίων (ή οπών ηλεκτρονίων) από την πηγή προς την εκροή (Drain) επηρεάζοντας το μέγεθος και το σχήμα ενός "αγωγίμου καναλιού" που δημιουργείται και επηρεάζεται από την τάση (ή την έλλειψη τάσης) που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της πύλης (Gate) και της πηγής (Source).

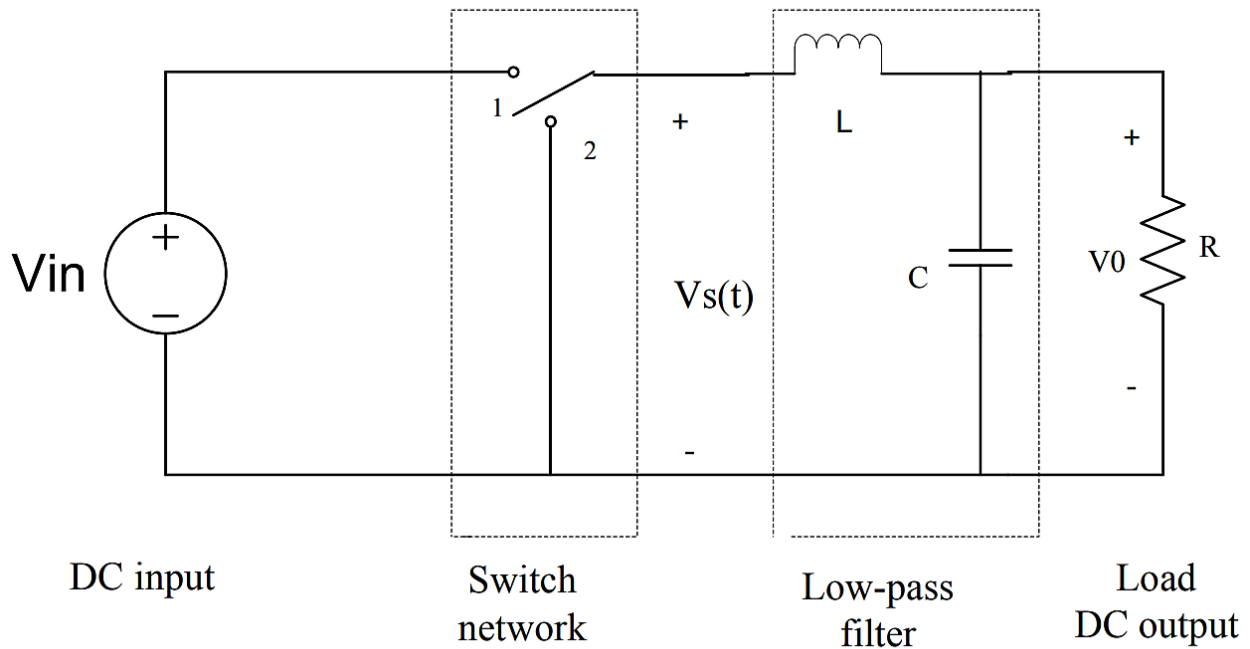
Ο πιο διαδεδομένος τύπος FET είναι τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου ημιαγωγών Μετάλλου- Οξειδίου ή αλλιώς MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Λειτουργούν ως ηλεκτρικοί διακόπτες και ενισχυτές που ελέγχουν την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να ρέει μεταξύ

των ακροδεκτών πηγής και εκροής με βάση την τάση που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη πύλης. Το κανάλι ημιαγωγών όπου συμβαίνει η ροή ρεύματος μπορεί να είναι είτε τύπου p είτε τύπου n. Αυτό οδηγεί σε δύο τύπους ή κατηγορίες FET γνωστών ως p-Channel και n-Channel FET. Οι δεύτεροι είναι πιο κοινοί λόγω της υψηλότερης κινητικότητας των ηλεκτρονίων. Ένα MOSFET αποτελείται από τέσσερις ακροδέκτες: την πηγή (Source), την εκροή (Drain), την πύλη (Gate) και το υπόστρωμα (Substrate), (Σχήμα 2.1). Συνήθως, το υπόστρωμα συνδέεται με τον ακροδέκτη πηγής. Το υπόστρωμα, η πηγή και η εκροή αποτελούνται από θετικούς ή αρνητικούς ημιαγωγούς. Ο ακροδέκτης της πύλης μετάλλου (ή αγώγιμου πυριτίου) διαχωρίζεται από αυτούς με ένα μη αγώγιμο στρώμα οξειδίου. Εφαρμόζοντας τάση στην πύλη, αλλάζουν οι ηλεκτρικές ιδιότητες του υποκείμενου ημιαγωγού, είτε επιτρέποντας, είτε εμποδίζοντας τη ροή του ηλεκτρισμού μεταξύ της πηγής και της εκροής [41, 42].

Στην παρούσα πτυχιακή, το MOSFET εισάγεται ως ένας ηλεκτρικός διακόπτης στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος των φ/β συστημάτων.



Σχήμα 2.1: Δομή ενός MOSFET [43]

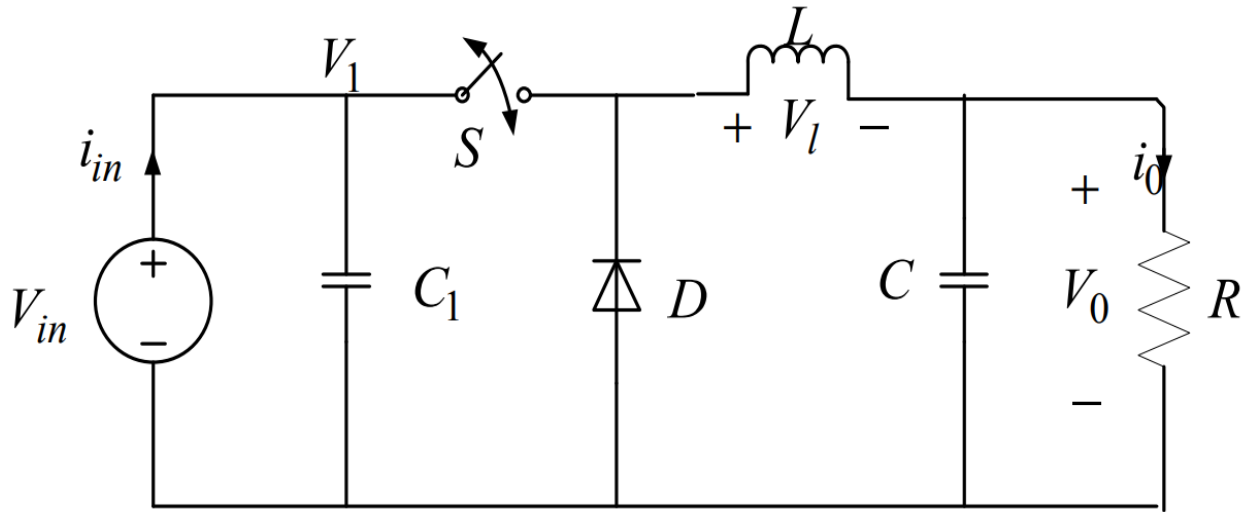


Σχήμα 2.2: Βασική αρχιτεκτονική ενός μετατροπέα DC-DC [44]

2.3 Μετατροπείς ισχύος DC/DC

Ένας Μετατροπέας Συνεχούς σε Συνεχές Ρεύμα (DC-DC converter) είναι ένα σημαντικό συστατικό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι μετατροπείς DC-DC μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την εσωτερική σύνθετη αντίσταση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας ρυθμίζοντας τις τάσεις ακροδεκτών της, ώστε να ταιριάζουν με την αντίσταση φορτίου. Οι μετατροπείς DC-DC είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος με εξαρτήματα παρόμοια με αυτά των MOSFET συνδυαστικά με πηνία, πυκνωτές και διόδους που μετατρέπουν μια τάση συνεχούς ρεύματος σε διαφορετικό επίπεδο τάσης. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός μετατροπέα DC-DC. Σε αυτήν τη διάταξη, ρυθμίζοντας τη θέση του διακόπτη, τη δίοδο αποκλεισμού ροής αντίστροφου ρεύματος και προσθέτοντας κάποιο παθητικό στοιχείο, μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικοί τύποι μετατροπέων DC-DC.

Πλήθος τοπολογιών προσφέρεται προς υλοποίηση ενός converter. Αναλόγως του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες μετατροπέων: υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Step-Down Converters ή Buck Converters), ανύψωσης συνεχούς τάσης, (Step-Up Converters ή Boost Converters) και υποβιβασμού-ανύψωσης (Buck-Boost Converters). Σε αυτή τη μελέτη, για εφαρμογή MPPT, εξετάζονται οι μετατροπείς Buck, Boost και Buck-Boost [44, 45, 46].



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα DC-DC Buck [44]

2.3.1 Μετατροπέας Buck

Σε αυτόν τον μετατροπέα, η τάση εξόδου είναι πάντα μικρότερη από την τάση εισόδου. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται το διάγραμμα κυκλώματος του μετατροπέα Buck. Η κύρια εφαρμογή των μετατροπέων Buck (Step-Down) είναι στα ρυθμιζόμενα τροφοδοτικά DC και στον έλεγχο ταχύτητας κινητήρα. Σύμφωνα με τη λειτουργία του κυκλώματος, ονομάζεται επίσης μετατροπέας ρεύματος-τάσης. Αυτός ο μετατροπέας είναι κατάλληλος όταν η επιθυμητή τάση φορτίου είναι μικρότερη από την τάση που αντιστοιχεί στο MPP.

Κατά τη διάρκεια του χρόνου ενεργοποίησης του διακόπτη (κατάσταση Off-State), η διόδος βρίσκεται σε κατάσταση αντίστροφης πόλωσης. Κατά τη διάρκεια του χρόνου απενεργοποίησης του διακόπτη (κατάσταση On-State), η διόδος βρίσκεται σε κατάσταση πόλωσης προς τα εμπρός. Οι εξισώσεις τάσης εξόδου, ρεύματος εξόδου, αντίστασης εξόδου εμφανίζονται ως εξής:

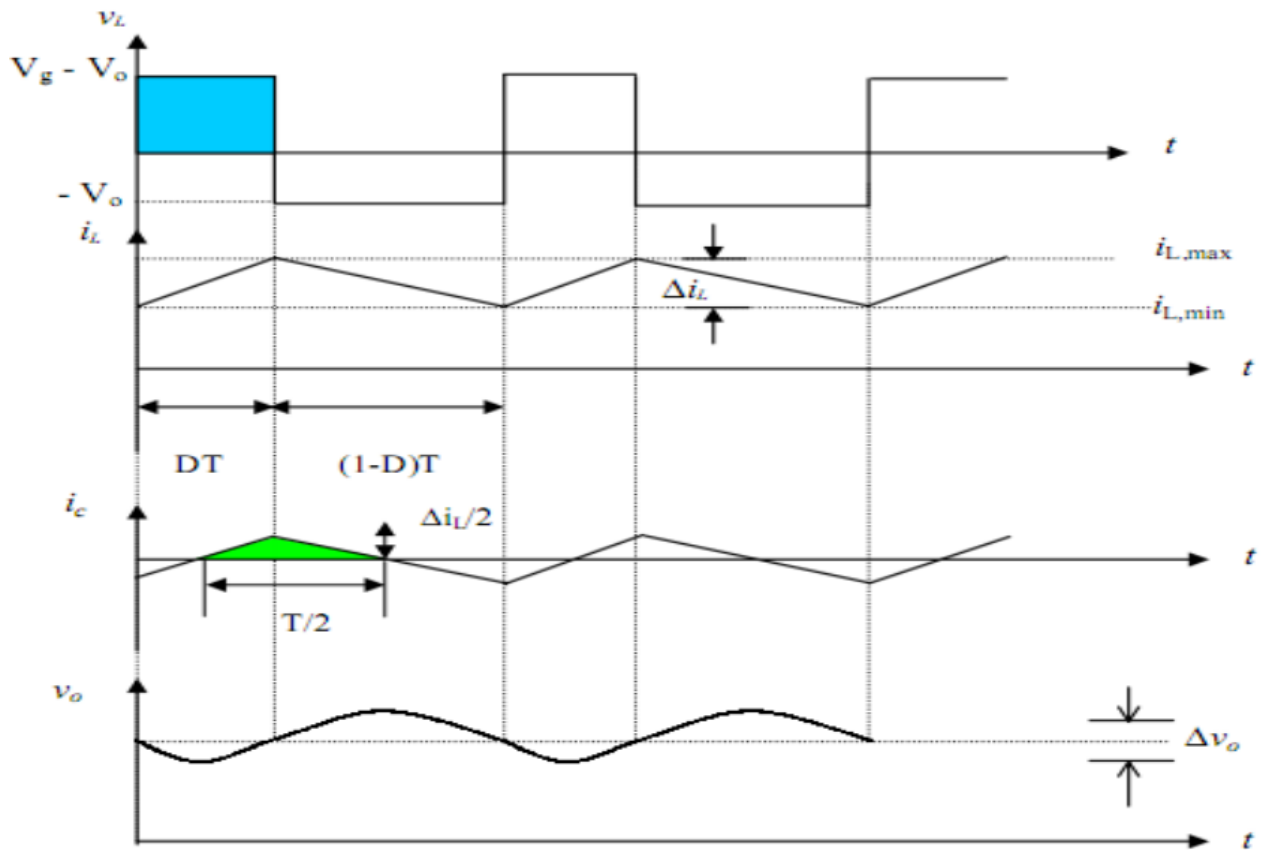
$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.1)$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{1}{D} \quad (2.2)$$

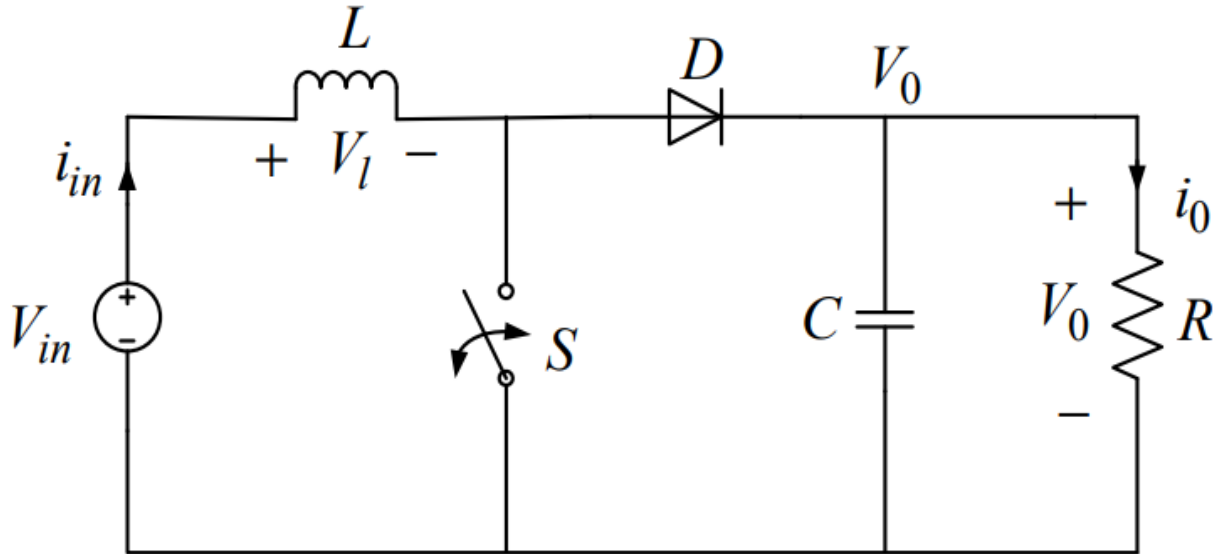
$$R_{in} = \frac{R_o}{D^2} \quad (2.3)$$

Όπου D είναι ο κύκλος λειτουργίας του μετατροπέα και V_{in}, I_{in}, V_o, I_o είναι η τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου, η τάση εξόδου και το ρεύμα εξόδου, αντίστοιχα. Με την αλλαγή του κύκλου λειτουργίας D , η τιμή R_{in} μπορεί να αντιστοιχιστεί με το R_{mpp} (αντίσταση στο σημείο μέγιστης ισχύος). Ο κύκλος λειτουργίας είναι πάντα μεταξύ 0-1. Έτσι ο μετατροπέας Buck δεν μπορεί να πάρει την αντίσταση που είναι μικρότερη από την αντίσταση φορτίου. Ως εκ τούτου, ο μετατροπέας Buck είναι ο καταλληλότερος όταν $R_o \leq R_{mpp}$ [44].

Οι κυματομορφές (Σχήμα 2.4) για την τάση και το ρεύμα εμφανίζονται στο συνεχές ρεύμα φορτίου, υποθέτοντας ότι το ρεύμα αυξάνεται ή μειώνεται γραμμικά. Για μια σταθερή ροή ρεύματος στον επαγωγέα L , θεωρείται ότι το ρεύμα ανεβαίνει και πέφτει γραμμικά. Στα πρακτικά κυκλώματα, ο διακόπτης έχει πεπερασμένη, μη γραμμική αντίσταση. Η επίδρασή του μπορεί γενικά να είναι αμελητέα στις περισσότερες εφαρμογές ανάλογα με τη συχνότητα μεταγωγής, την επαγωγή του φίλτρου και την χωρητικότητα, το ρεύμα του επαγωγέα μπορεί να είναι ασυνεχές.



Σχήμα 2.4: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα Buck [47]



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα DC-DC Boost [44]

2.3.2 Μετατροπέας Boost

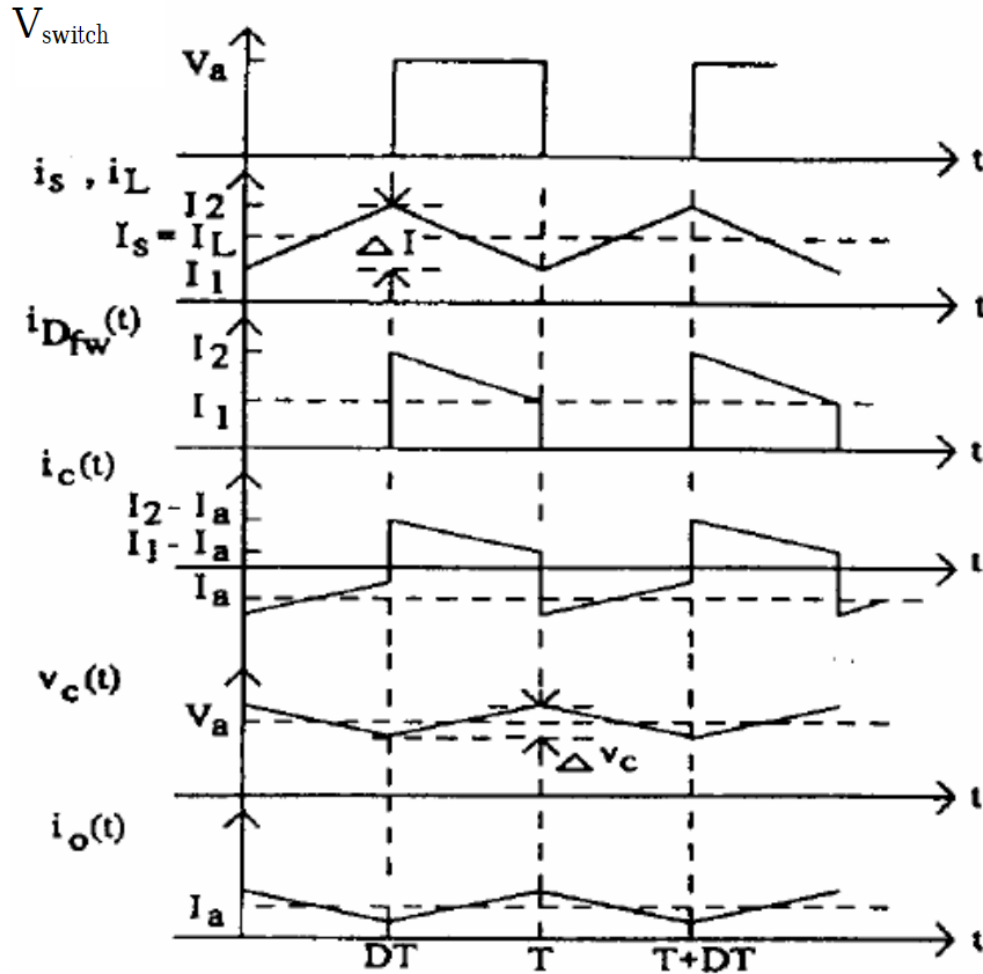
Σε αυτόν τον μετατροπέα, η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Ο ενδιάμεσος μετατροπέας Boost (Step-Up) απαιτείται για την ενσωμάτωση στο δίκτυο πηγών DC χαμηλής τάσης, όπως: φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμου. Ο μετατροπέας Boost μπορεί να λειτουργήσει είτε σε μοντέλο συνεχούς είτε σε ασυνεχές επαγωγικό ρεύμα. Στο Σχήμα 2.5 εμφανίζεται το διάγραμμα κυκλώματος ενός μετατροπέα Boost DC-DC.

Κατά τη διάρκεια του χρόνου ενεργοποίησης του διακόπτη, η διόδος βρίσκεται σε κατάσταση αντίστροφης πόλωσης και κατά τη διάρκεια του χρόνου απενεργοποίησης του διακόπτη, η διόδος είναι σε κατάσταση ώθησης προς τα εμπρός. Σύμφωνα με τη λειτουργία του κυκλώματος, ονομάζεται και μετατροπέας τάσης – ρεύματος.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.4)$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = 1 - D \quad (2.5)$$

$$R_{in} = R_o(1 - D)^2 \quad (2.6)$$



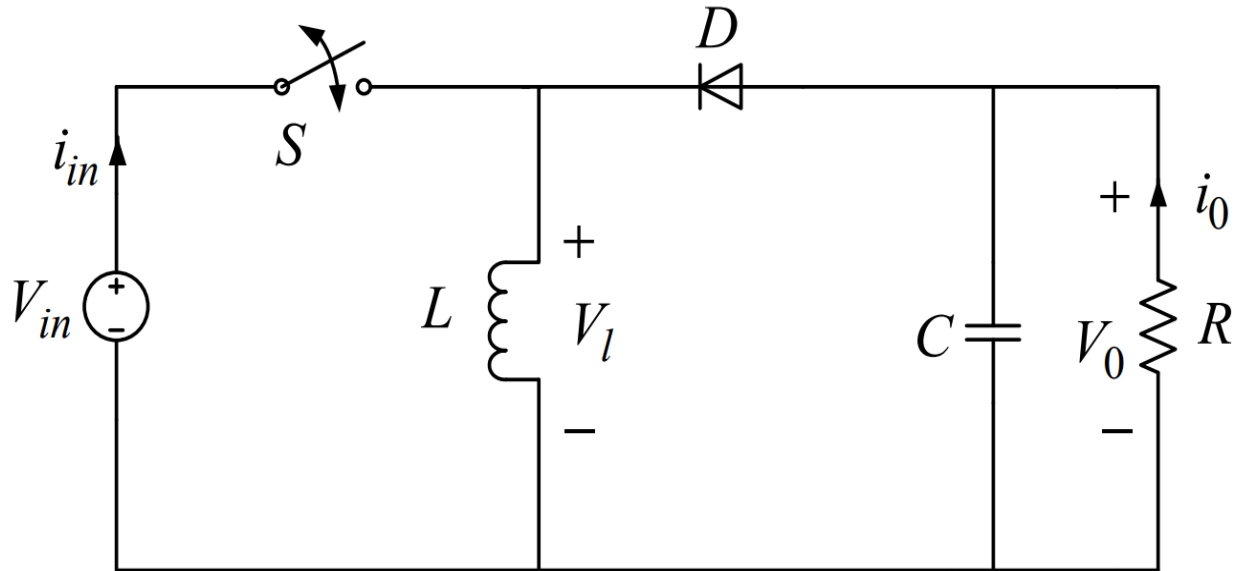
Σχήμα 2.6: Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC Boost [48]

Οι εξισώσεις τάσης εξόδου, ρεύματος εξόδου, αντίστασης εξόδου φαίνονται στις παραπάνω μαθηματικές σχέσεις. Ο μετατροπέας ενίσχυσης είναι καταλληλότερος όταν, $R_o \geq R_{mpp}$ [44].

Ένας μετατροπέας Boost χρησιμοποιεί ένα διακόπτη τρανζίστορ. Οι κυματομορφές μεταγωγής του φαίνονται στο Σχήμα 2.6.

2.3.3 Μετατροπέας Buck-Boost

Σε αυτόν τον μετατροπέα, η τάση εξόδου είναι είτε χαμηλότερη είτε υψηλότερη από εκείνη της τάσης εισόδου, ανάλογα με τον κύκλο λειτουργίας (Duty cycle) D του μετατροπέα. Ονομάζεται επίσης μετατροπέας Voltage to Current to Voltage. Ανάλογα με τη συνέχεια του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, ο τρόπος λειτουργίας του μετατροπέα Buck-Boost μπορεί να ταξινομηθεί είτε ως συνεχές είτε ως ασυνεχές ρεύμα επαγωγής. Το Σχήμα 2.7 (σελ. 29) δείχνει το διάγραμμα κυκλώματος του μετατροπέα Buck-Boost [48]. Οι κυματομορφές μεταγωγής του φαίνονται στο Σχήμα 2.8 (σελ. 30).



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα DC-DC Buck-Boost [44]

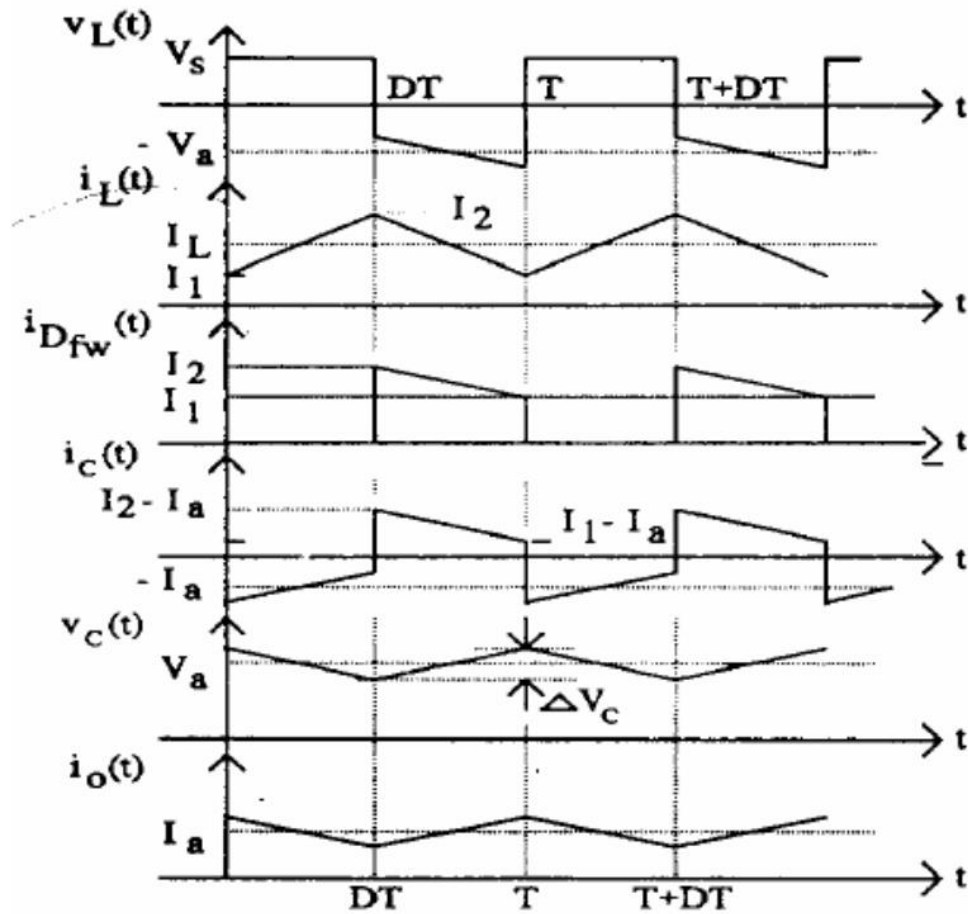
Οι σχέσεις μεταξύ της τάσης εξόδου, της τάσης εισόδου, του ρεύματος εξόδου, του ρεύματος εισόδου, της αντίστασης εξόδου και των αντιστάσεων εισόδου φαίνονται στις παρακάτω εξισώσεις.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.7)$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{1-D}{D} \quad (2.8)$$

$$R_{in} = R_o \left[\frac{(1-D)^2}{D^2} \right] \quad (2.9)$$

Αυτό είναι κατάλληλο τόσο για υψηλότερες όσο και για χαμηλότερες τιμές αντιστάσεων φορτίου σε σύγκριση με το R_{mpp} . Από την παραπάνω σχέση σύνθετης αντίστασης εισόδου και εξόδου, η σύνθετη αντίσταση εισόδου μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιαδήποτε σύνθετη αντίσταση φορτίου. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτού του μετατροπέα είναι ότι η τάση εξόδου είναι ανεστραμμένη της τάσης εισόδου.



Σχήμα 2.8: Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC Buck-Boost [48]

2.4 Επίλογος

Συνοψίζοντας, ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) είναι σημαντικό δομικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού, επειδή, με τη χρήση ενός ηλεκτρικού πεδίου, μπορεί να μεταβάλλει την αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού. Τα FET χωρίζονται σε υποκατηγορίες, με πιο διαδεδομένη αυτή των MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) που λειτουργεί ως ηλεκτρονικά ελεγχόμενο φορτίο το οποίο αλλάζει το σημείο λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε όλο το εύρος της χαρακτηριστικής I-V.

Ο Μετατροπέας Συνεχούς σε Συνεχές Ρεύμα (DC-DC converter) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος, επίσης με μεγάλη σημασία για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, επειδή, μπορεί να αυξομειώσει την εσωτερική σύνθετη αντίσταση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ρυθμίζοντας τις τάσεις ακροδεκτών της, ώστε να ταιριάζουν με την αντίσταση φορτίου. Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων ισχύος, σε αυτό το κεφάλαιο, για εφαρμογή MPPT, αναλύθηκαν οι μετατροπείς Buck, Boost και Buck-Boost.

Μεταξύ αυτών, ο μετατροπέας Buck χρησιμοποιείται όταν πρόκειται για μείωση της τάσης εξόδου της φωτοβολταϊκής μονάδας. Δηλαδή, ο σκοπός του μετατροπέα Buck είναι να παράγει μια ρυθμιζόμενη και χαμηλότερη τάση εξόδου από την τάση εισόδου.

Ο μετατροπέας ενίσχυσης (Boost) λειτουργεί τόσο σε λειτουργία MPPT όσο και σε λειτουργία ελέγχου τάσης. Η λειτουργία ελέγχου τάσης χρησιμοποιείται μόνο όταν η ισχύς φορτίου είναι μικρότερη από τη μέγιστη ισχύ που παράγεται από την ηλιακή φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, δεδομένης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του πάνελ [49].

Τέλος, η χρήση ενός μετατροπέα Buck-Boost σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να ρυθμίσει τη τάση εξόδου σε υψηλότερη ή χαμηλότερη από την τάση εισόδου, επιτρέποντας τη διατήρηση της επιθυμητής τάσης εξόδου.

Κεφάλαιο 3

3. Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

3.1 Εισαγωγή

Μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η μερική σκίαση, όταν ένα μέρος του ηλιακού πάνελ σκιάζεται λόγω κοντινών αντικειμένων όπως δέντρα, κτίρια ή σύννεφα. Η μερική σκίαση μπορεί να προκαλέσει μείωση της συνολικής ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος, οδηγώντας σε μειωμένη παραγωγή ενέργειας.

Αυτό το πρόβλημα, έρχεται να το ξεπεράσει η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών Ανίχνευσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT). Το MPPT βασίζεται σε αλγορίθμους ελέγχου που παρακολουθούν το σημείο μέγιστης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, προσαρμόζοντας το σημείο λειτουργίας του συστήματος για να διατηρεί τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Αυτή η τεχνική μπορεί να βοηθήσει το σύστημα να ξεπεράσει τη μερική σκίαση, με αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση παραγωγής ενέργειας.

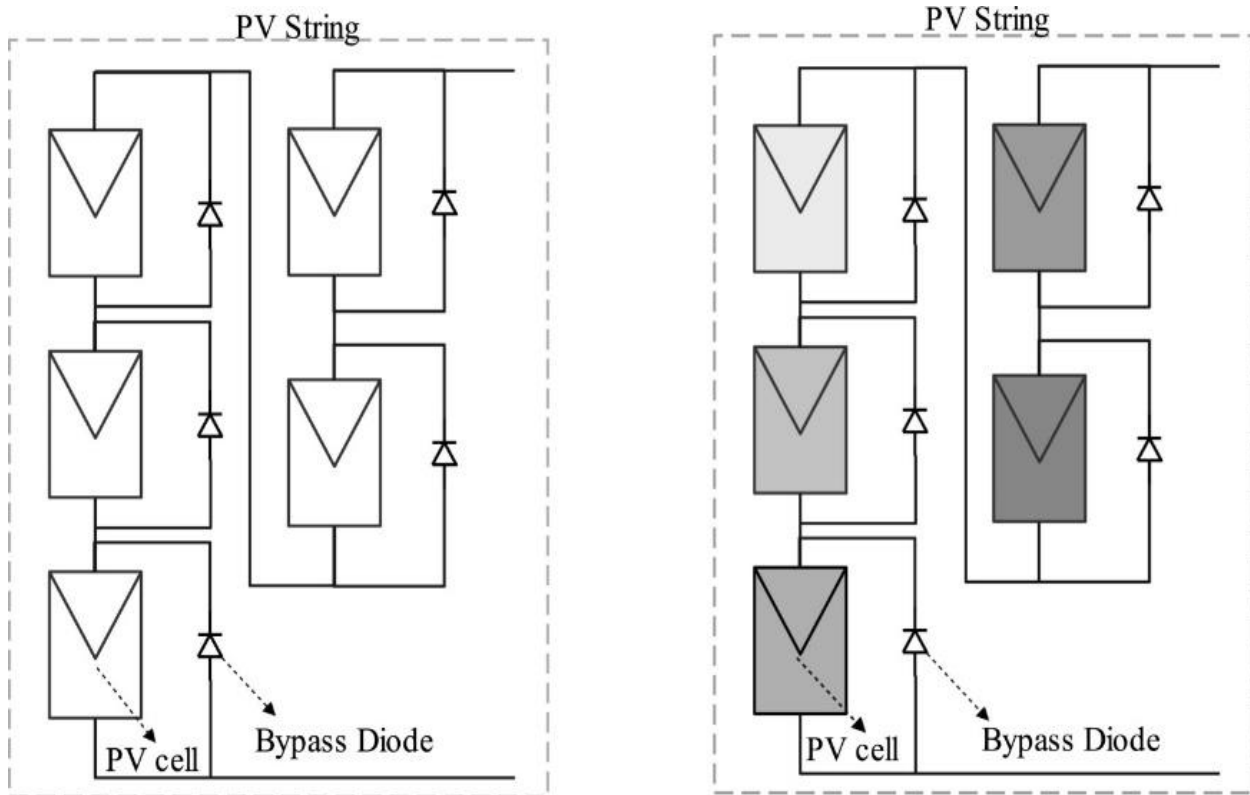
Οι τεχνικές MPPT έχουν αναπτυχθεί για να λειτουργούν με διαφορετικούς τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων και υπό διαφορετικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της μερικής σκίασης. Κάθε αλγόριθμος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του και η επιλογή του εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε αυτό το κεφάλαιο, διερευνώνται διάφοροι τύποι αλγορίθμων MPPT, συμπεριλαμβανομένων αυτού της Διαταραχής και Παρατήρησης, της Αυξητικής Αγωγιμότητας και των αλγορίθμων που βασίζονται σε Ασαφή Λογική και Τεχνητή Νοημοσύνη.

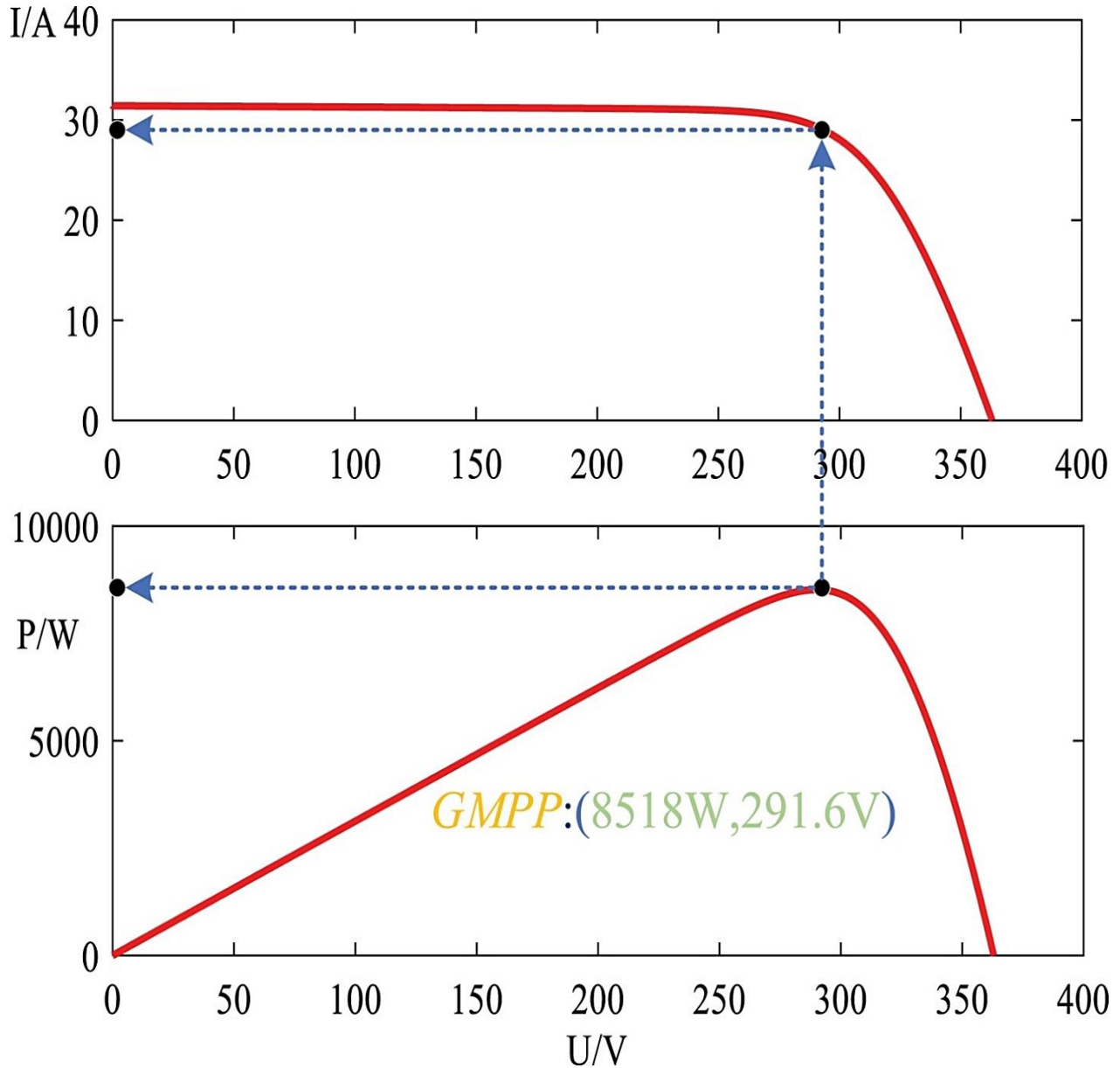
3.2 Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Η ισχύς που παράγεται από το σύνολο του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός και την τιμή θερμοκρασίας. Η ακτινοβολία (Irradiance) ορίζεται ως η ισχύς/μονάδα επιφάνειας με μονάδα μέτρησης W/m^2 . Σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, η ακτινοβολία παραμένει σταθερή και η τιμή της ισούται με $1000 W/m^2$ με βάση τις STC (Standard Testing Conditions). Εφόσον οι ϕ/β κυψέλες συνδέονται κυρίως σε σειρά, το ρεύμα που θα παραχθεί μειώνεται σημαντικά, έστω και αν ένα μικρό μέρος της ϕ/β μονάδας είναι υπό σκιά. Κατά συνέπεια, η ισχύς εξόδου κυμαίνεται σημαντικά

υπό συνθήκες μερικής σκίασης ενώ και η χαρακτηριστική καμπύλη εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος περιέχει πολλαπλές κορυφές. Το σημείο εξόδου μέγιστης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος περιέχει δύο τύπους, οι οποίοι μπορούν να συνοψιστούν ως Παγκόσμιο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Global Maximum Power Point-GMPP) και Τοπικό Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Local Maximum Power Point-LMPP). Ανάλογα με την ακτινοβολία που δέχονται οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, μπορούν να βρίσκονται υπό κατάσταση πλήρους ακτινοβολίας (uniform radiance) ή υπό συνθήκες μερικής σκίασης (Partial Shading Conditions-PSC). Τα σχηματικά διαγράμματα των δύο περιπτώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Η χαρακτηριστική καμπύλη εξόδου της παραγωγής ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού, υπό συνθήκες πλήρους ακτινοβολίας, φαίνεται στο Σχήμα 3.2 (σελ. 34), το οποίο παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό μονής κορυφής (P-U&I-U) και διαθέτει ένα σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point-MPP). Οι συμβατικές τεχνικές ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking-MPPT) δείχνουν υψηλότερη απόδοση σε αυτό το σημείο υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία. Υπό συνθήκες σκίασης, η προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι χαμηλότερη. Επομένως, το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί με χαμηλότερη απόδοση. Η εύρεση του σημείου GMP μπορεί να είναι δύσκολη, επειδή υπάρχουν περισσότερα από ένα MPP στο φ/β σύστημα υπό PSC. Λόγω της αναντιστοιχίας μεταξύ ρεύματος και τάσης, η ισχύς του υπό σκιά τμήματος του φωτοβολταϊκού πάνελ ρέει προς τα πίσω και θα δημιουργούσε το φαινόμενο «hot spot». Σε κάποιο βαθμό, αυτό το φαινόμενο μπορεί να μετριάσει με δίοδο παράκαμψης [7, 50].

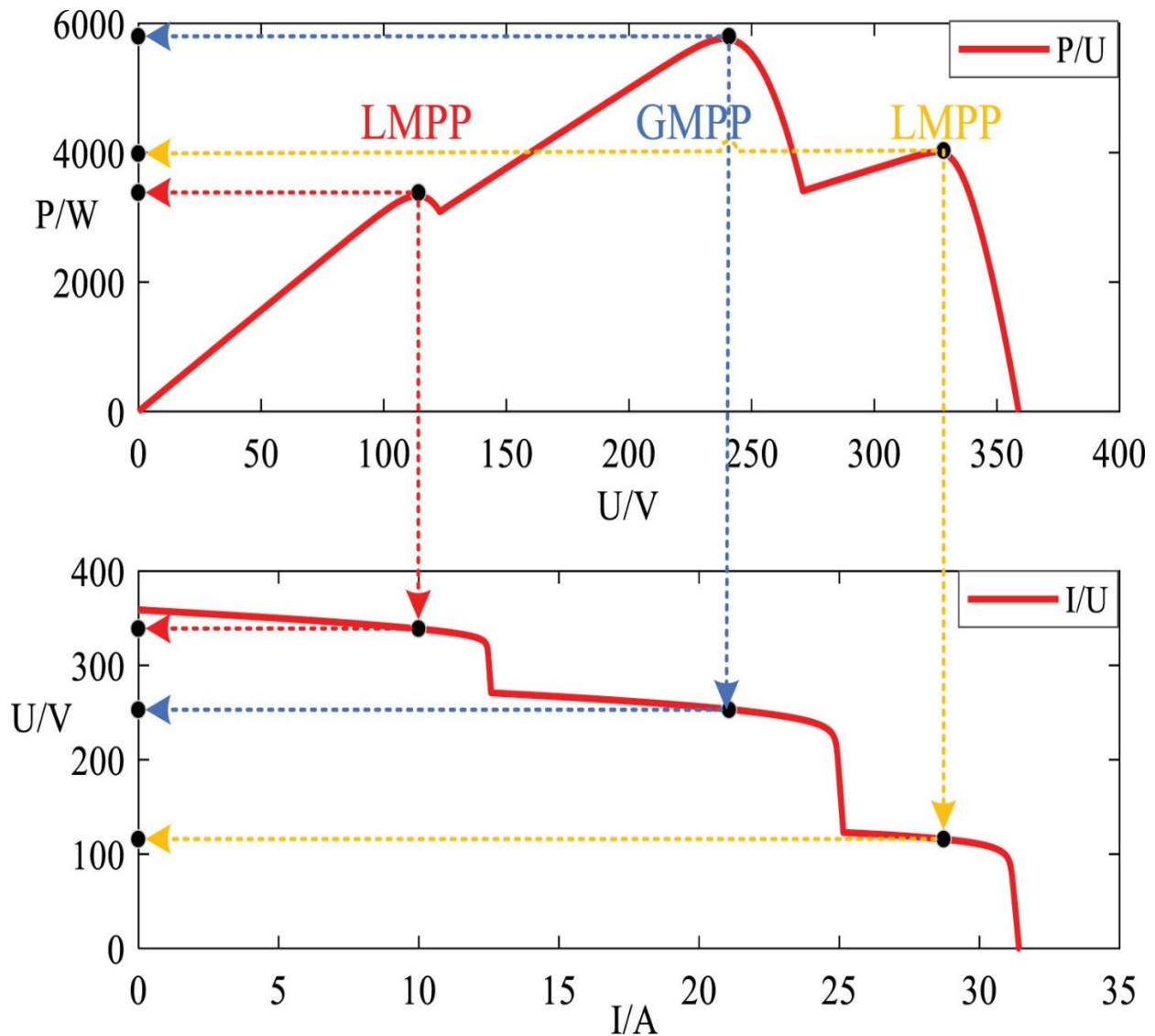


Σχήμα 3.1: Φ/Β συστοιχία (α) ομοιόμορφη ακτινοβολία (β) συνθήκες μερικής σκίασης [51]



Σχήμα 3.2: Καμπύλη χαρακτηριστικών εξόδου Φ/V υπό ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας [51]

Ωστόσο, η χαμηλή απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν θα μπορούσε να επιλυθεί αποτελεσματικά. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για διαφορετικές συνθήκες σκίασης φαίνονται στο Σχήμα 3.3 (σελ. 35). Καθώς το εμβαδόν της φωτοβολταϊκής σκίασης αυξάνεται, οι χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου γίνονται πολύπλοκες [50].



Σχήμα 3.3: Καμπύλη χαρακτηριστικών εξόδου Φ/Β συστήματος υπό συνθήκες μερικής σκίασης [51]

Η επιστημονική κοινότητα προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση μιας φ/β εγκατάστασης, ανεξάρτητα από τις συνθήκες σκίασης, και να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, έχει αναπτύξει συνδεσμολογίες και μεθόδους για τον εντοπισμό του MPP [51].

3.3 Τεχνικές MPPT

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 1.9, η ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) είναι μια μέθοδος που βασίζεται στο σύστημα ελέγχου που επιτρέπει στη φωτοβολταϊκή μονάδα να παράγει τη μέγιστη ισχύ που δύναται. Το υψηλότερο σημείο ισχύος μιας φωτοβολταϊκής μονάδας είναι η τάση στην οποία μπορεί να παράγει τη μέγιστη ισχύ (ή η αιχμή ισχύος τάσης). Δεδομένου ότι με την αλλαγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ακτινοβολίας, η μέγιστη ισχύς μεταβάλλεται, ένας ανιχνευτής σημείου μέγιστης

ισχύος σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητο μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος. Έτσι αν το MPPT μπορεί να ελέγξει με ακρίβεια το συνεχώς μεταβαλλόμενο σημείο λειτουργίας όπου είναι διαθέσιμη η μέγιστη ισχύς, η απόδοση της ηλιακής κυψέλης αυξάνεται [52].

Τα προτεινόμενα σχήματα παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) στην τεχνική βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

1. άμεσες μέθοδοι,
2. μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης, και
3. έμμεσες μέθοδοι.

Στις άμεσες μεθόδους, το MPP αναζητείται διαταράσσοντας συνεχώς το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Κάτω από αυτήν την κατηγορία, τα σχήματα Perturb and Observe (P&O), Hill Climbing (HC) και Incremental Conductance (INC) εφαρμόζονται ευρέως στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το σχήμα P&O περιλαμβάνει τη διατάραξη της τάσης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για να φτάσει στο MPP. Ανάλογα με το σχήμα P&O, η μέθοδος Hill Climbing (HC) διαταράσσει τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα διασύνδεσης DC-DC. Η απλότητα είναι το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των μεθόδων. Ωστόσο, η εγγενής ταλάντωση σταθερής κατάστασης περιορίζει αυτές τις μεθόδους σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Η μειωμένη ταλάντωση σταθερής κατάστασης είναι δυνατή με τη μέθοδο της Incremental Conductance (INC), η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της ισχύος έναντι της τάσης είναι μηδέν στο MPP.

Η τεχνητή νοημοσύνη και οι έμμεσες μέθοδοι έχουν προταθεί για τη βελτίωση της δυναμικής απόδοσης της παρακολούθησης MPP. Με επίκεντρο τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης παρέχουν μια γρήγορη, και ωστόσο, υπολογιστικά απαιτητική λύση για το πρόβλημα MPPT, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control - FLC) και το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Artificial Neural Network - ANN). Οι έμμεσες μέθοδοι βασίζονται στην εξαγωγή του MPP της συστοιχίας από τα χαρακτηριστικά εξόδου της. Τα σχήματα κλασματικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (open-circuit voltage - OCV) και ρεύματος βραχυκυκλώματος (short-circuit current - SCC) παρέχουν έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο λήψης του MPP [53].

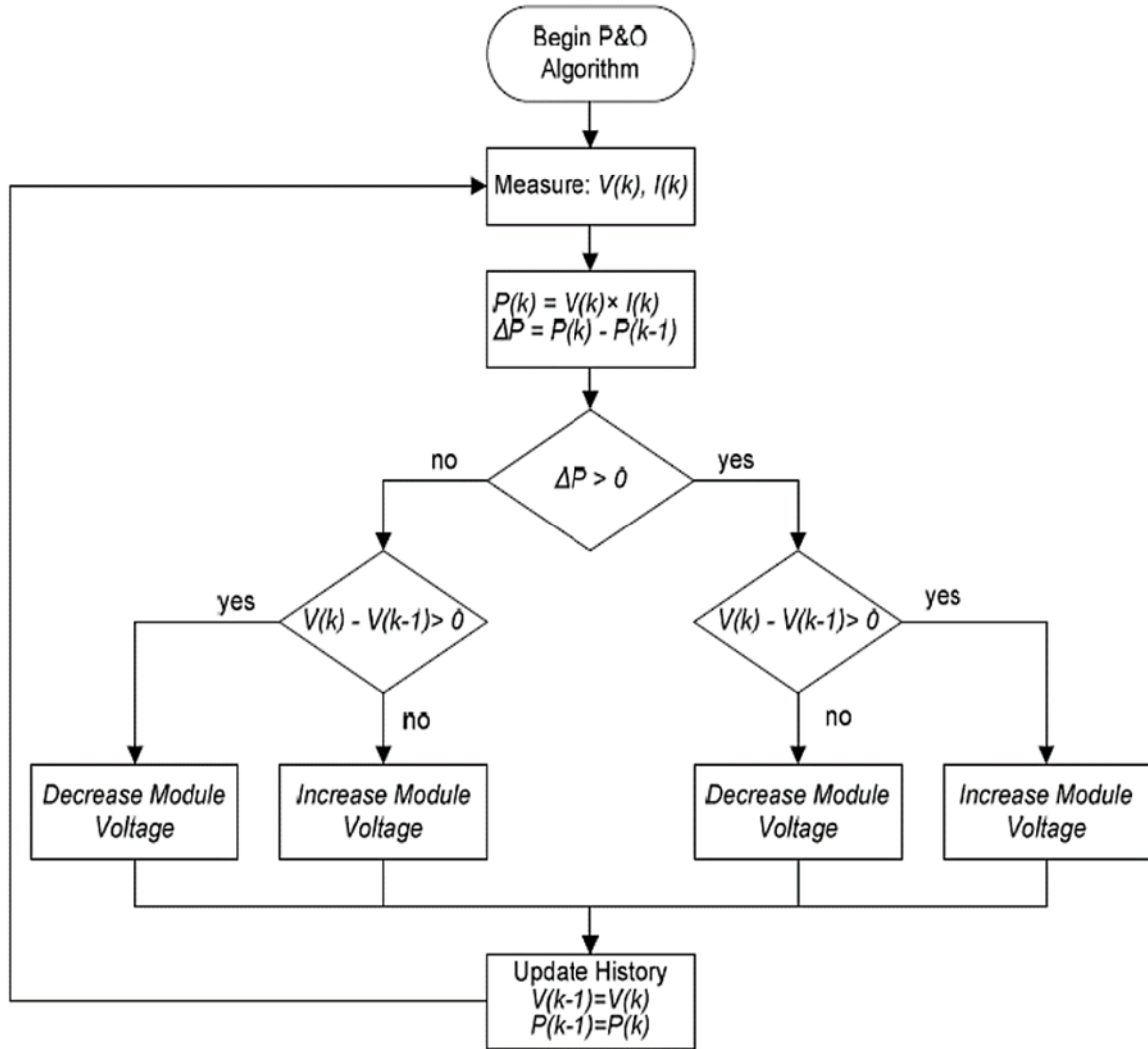
Οι τεχνικές MPPT ποικίλλουν και διαφέρουν ως προς την αποτελεσματικότητα, την πολυπλοκότητα, την ταχύτητα σύγκλισης, τους απαραίτητους αισθητήρες (Πίνακας 3.1, σελ.37) και το κόστος τους [52]. Οι παρακάτω ενότητες επικεντρώνονται στους αλγόριθμους Διαταραχής και Παρατήρησης Perturb and Observe (P&O) και Incremental Conductance (IC), στον έλεγχο Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control), στο Τεχνητό Νευρωνικό δίκτυο (Artificial Neural Network - ANN) και τέλος στον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO).

Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά Τεχνικών MPPT [54]

Τεχνική MPPT	Εξάρτηση από Φ/Β Συστοαγία;	Πραγματικό MPP;	Αναλογική ή Ψηφιακή;	Περιοδική Ρύθμιση	Ταχύτητα Σύγκλισης	Πολυπλοκότητα Υλοποίησης	Αισθητήρες
Hill Climbing/P&O	Όχι	Ναι	Και τα δύο	Όχι	Ποικίλλει	Χαμηλή	Ρεύματος, Τάσης
Incremental Conductance	Όχι	Ναι	Ψηφιακή	Όχι	Ποικίλλει	Μέτρια	Ρεύματος, Τάσης
Κλασματικής V_{oc}	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	Μέτρια	Χαμηλή	Τάσης
Κλασματικού I_{sc}	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	Μέτρια	Μέτρια	Ρεύματος
Έλεγχος Ασαφούς Λογικής	Ναι	Ναι	Ψηφιακή	Ναι	Γρήγορη	Υψηλή	Ποικίλλει
Νευρωνικά Δίκτυα	Ναι	Ναι	Ψηφιακή	Ναι	Γρήγορη	Υψηλή	Ποικίλλει
Συσχετισμού Κυμάτωσης (RCC)	Όχι	Ναι	Αναλογική	Όχι	Γρήγορη	Χαμηλή	Ρεύματος, Τάσης
Σάρωσης Ρεύματος	Ναι	Ναι	Ψηφιακή	Ναι	Αργή	Υψηλή	Ρεύματος, Τάσης
DC Link Capacitor Droop Control	Όχι	Όχι	Και τα δύο	Όχι	Μέτρια	Χαμηλή	Τάσης
Μεγιστοποίηση I_{LOAD} ή V_{LOAD}	Όχι	Όχι	Αναλογική	Όχι	Γρήγορη	Χαμηλή	Ρεύματος, Τάσης
dP/dV ή dP/dI Feedback Control	Όχι	Ναι	Ψηφιακή	Όχι	Γρήγορη	Μέτρια	Ρεύματος, Τάσης
Linear Current Control	Ναι	Όχι	Ψηφιακή	Ναι	Γρήγορη	Μέτρια	Ακτινοβολίας
BFV Algorithm	Ναι	Όχι	Και τα δύο	Ναι	Μη διαθέσιμο	Χαμηλή	Κανένας
Look-up Table	Ναι	Ναι	Ψηφιακή	Ναι	Γρήγορη	Μέτρια	Ρεύματος, Τάσης, Ακτινοβολίας, Θερμοκρασίας

3.3.1 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O)

Ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς λόγω της ευκολίας εφαρμογής, όπως εξηγείται στο διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.4, σελ.38). Μετρά το ρεύμα, την τάση και υπολογίζει την ισχύ μέσω μιας συνεχούς διαδικασίας παρατήρησης και διαταραχής, ώστε το σημείο λειτουργίας να συγκλίνει στο MPP. Ο αλγόριθμος συγκρίνει την ισχύ και τις τάσεις του χρόνου (K) με το δείγμα σε ένα χρόνο ($K-1$) και προβλέπει το χρόνο προσέγγισης στο MPP. Μια μικρή διαταραχή τάσης αλλάζει την ισχύ του ηλιακού πάνελ εάν η μεταβολή ισχύος είναι θετική, η διαταραχή τάσης συνεχίζεται στην ίδια διαδρομή. Αλλά εάν η ισχύς Δ είναι αρνητική, υποδηλώνει ότι το MPP είναι μακριά και η διαταραχή μειώνεται για να φτάσει στο MPP [55].

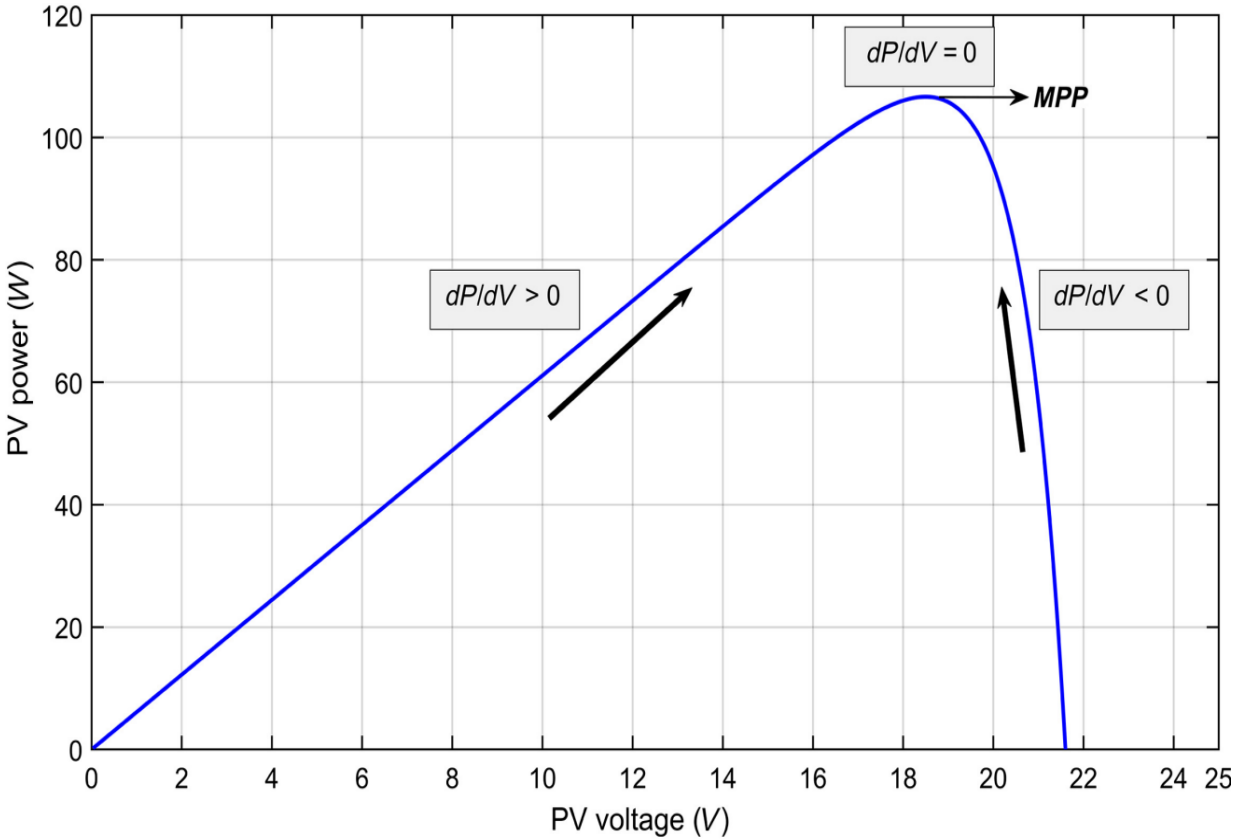


Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής Perturb and Observe [52]

Στον Πίνακα 3.2 φαίνεται η σύνοψη του αλγορίθμου P&O. Με αυτόν τον τρόπο ολόκληρη η καμπύλη PV ελέγχεται από μικρές διαταραχές για να βρεθεί το MPP που αυξάνει τον χρόνο απόκρισης του αλγορίθμου. Αντίθετα, εάν το μέγεθος της διαταραχής μεγεθύνεται, δημιουργεί ταλαντώσεις σταθερής κατάστασης γύρω από το MPP [55].

Πίνακας 3.2: Σύνοψη του αλγορίθμου P&O [55]

Διαταραχή	ΔP	Προκύπτουσα Διαταραχή
+ve	+ve	+ve
+ve	-ve	-ve
-ve	+ve	-ve
-ve	-ve	+ve



Σχήμα 3.5: Γράφημα ισχύος έναντι τάσης για αλγόριθμο Perturb and Observe [52]

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5, η αύξηση (μείωση) της τάσης αυξάνει (μειώνει) την ισχύ στην αριστερή πλευρά του MPP ενώ μειώνει (αυξάνει) την ισχύ στη δεξιά πλευρά του MPP. Ως αποτέλεσμα, εάν αυξηθεί η ισχύς, η διαταραχή πρέπει να παραμείνει σταθερή για να ληφθεί το MPP. Εάν η ισχύς μειωθεί, η διαταραχή αντιστρέφεται [52].

Στην ουσία, η συγκεκριμένη μέθοδος αναζητά μια διαφορά στην ισχύ (dP) των φωτοβολταϊκών κυψελών και στη συνέχεια μια αλλαγή στην τάση (dV) τους. Ως συνάρτηση των ληφθέντων τιμών, ο D έχει διαταραχθεί. Το πραγματικό σημείο φαίνεται να βρίσκεται στο αριστερό μισό του MPP εάν το $\frac{dP}{dV}$ είναι θετικό. Αν είναι αρνητικό, το πραγματικό σημείο φαίνεται να βρίσκεται στο δεξί μισό. Επιπλέον, αυτό το βήμα συνεχίζεται μέχρι το $\frac{dP}{dV}$ να ισούται με μηδέν. Στο ακραίο σημείο οποιασδήποτε καμπύλης P-V, το MPP ορίζεται από τις πιο κάτω σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του MPP (αριστερά ή δεξιά):

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad \text{στο MPP} \quad (3.1)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad \text{αριστερή πλευρά του MPP} \quad (3.2)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \quad \text{δεξιά πλευρά του MPP} \quad (3.3)$$

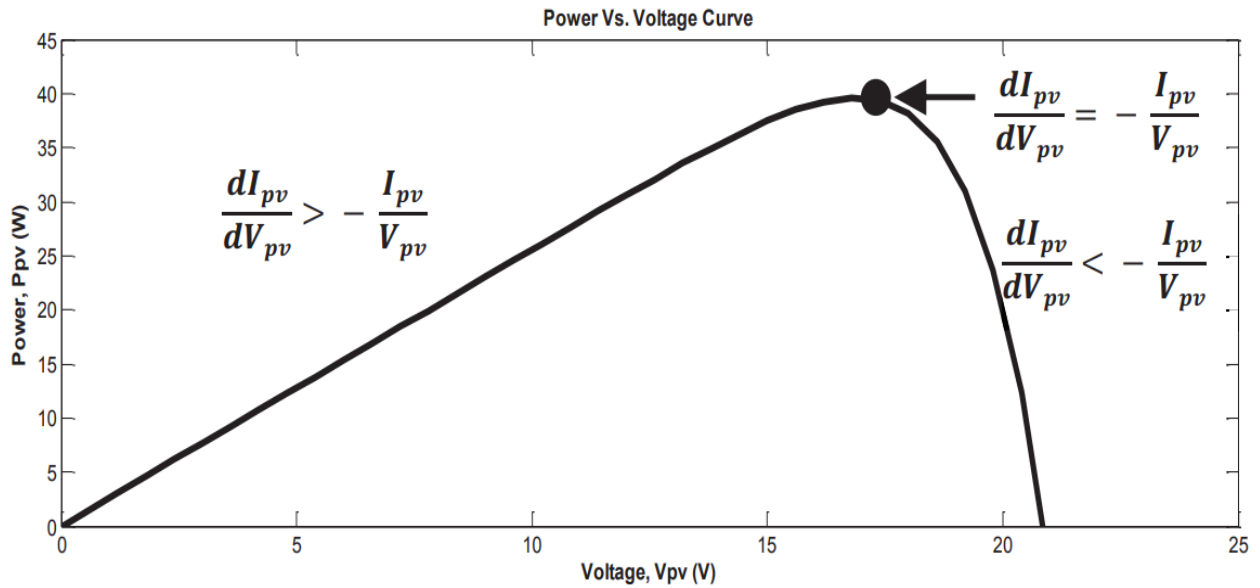
$$\begin{cases} \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 & \text{στο MPP} \\ \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 & \text{αριστερά του MPP} \\ \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 & \text{δεξιά του MPP} \end{cases} \quad (3.4)$$

Τα πλεονεκτήματα της P&O είναι η υψηλή ικανότητα παρακολούθησης, η απλή και γρήγορη δυναμική. Τα μειονεκτήματα είναι οι ταλαντώσεις γύρω από το MPP, η αδυναμία παρακολούθησης του ακριβούς MPP υπό PSC και η υψηλή απώλεια ισχύος σε σταθερές συνθήκες [52].

3.3.2 Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance – INC)

Το μειονέκτημα της μεθόδου Perturb & Observe για την παρακολούθηση της μέγιστης ισχύος κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες ξεπερνιέται με τη μέθοδο Incremental Conductance. Ο αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance – IC ή INC) ανιχνεύει την κλίση της καμπύλης P-V και το MPP παρακολουθείται αναζητώντας την κορυφή της καμπύλης P-V.

Μπορεί να προσδιορίσει ότι το MPPT έχει φτάσει στο MPP και να σταματήσει να διαταράσσει το σημείο λειτουργίας. Εάν δεν πληρούται αυτή η προϋπόθεση, η κατεύθυνση στην οποία πρέπει να διαταραχθεί το σημείο λειτουργίας MPPT μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ $\frac{dI}{dV}$ και $-\frac{I}{V}$. Αυτή η σχέση προκύπτει από το γεγονός ότι το $\frac{dI}{dV}$ είναι αρνητικό όταν το MPPT είναι στα δεξιά του MPP και θετικό όταν βρίσκεται στα αριστερά του MPP. Αυτός ο αλγόριθμος πλεονεκτεί έναντι του P&O επειδή μπορεί να καθορίσει πότε το MPPT έχει φτάσει στο MPP, όπου το P&O ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Επίσης, η αυξητική αγωγιμότητα μπορεί να παρακολουθεί τις ταχέως αυξανόμενες και μειούμενες συνθήκες ακτινοβολίας με μεγαλύτερη ακρίβεια από το P&O [56].



Σχήμα 3.6: Γράφημα ισχύος έναντι τάσης για αλγόριθμο Incremental Conductance [57]

Το Σχήμα 3.6 δείχνει ότι η κλίση της καμπύλης ισχύος της συστοιχίας P-V είναι μηδέν στο MPP, αυξάνεται στα αριστερά του MPP και μειώνεται στη δεξιά πλευρά του MPP. Οι βασικές εξισώσεις αυτής της μεθόδου είναι οι εξής:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 & \text{στο MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{αριστερά του MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{δεξιά του MPP} \end{cases} \quad (3.5)$$

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

Μπορεί να ξαναγραφεί ως:

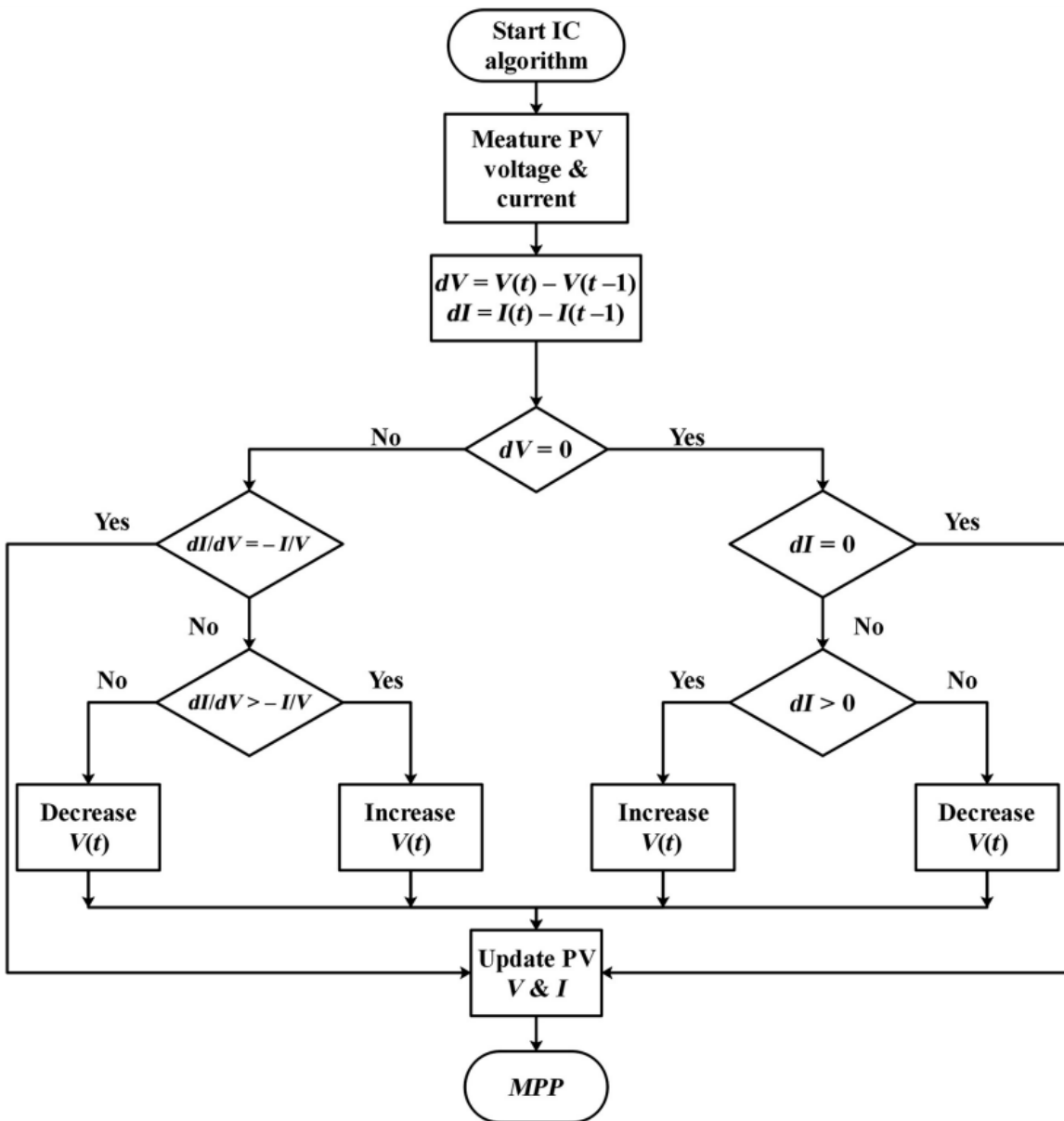
$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{στο MPP} \quad (3.7)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{αριστερά του MPP} \quad (3.8)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{δεξιά του MPP} \quad (3.9)$$

Το διάγραμμα ροής εμφανίζεται στο Σχήμα 3.7.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής INC είναι οι χαμηλές ταλαντώσεις γύρω από το MPP. Τα μειονεκτήματα είναι τα διαφορετικά βήματα που απαιτούν πολύπλοκους και δαπανηρούς ελέγχους [52].

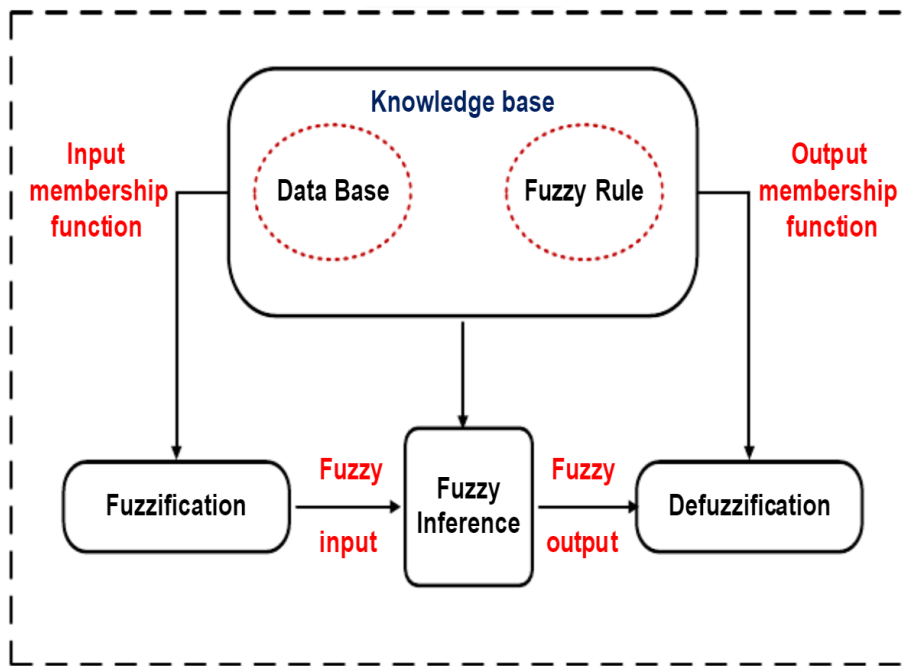


Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Incremental Conductance [52]

3.3.1 Έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control-FLC)

Ο έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control - FLC) έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η χρήση ελέγχου ασαφούς λογικής έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της απλότητάς του, της λειτουργίας του με ανακριβείς εισόδους, της μη απαίτησης ακριβούς μαθηματικού μοντέλου και της ικανότητάς του να χειρίζεται τη μη γραμμικότητα του συστήματος. Το FLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ελεγκτής για την απόκτηση της μέγιστης ισχύος που μπορούν να παράγουν οι φωτοβολταϊκές μονάδες υπό μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Τα ευφυή MPPT που βασίζονται σε ασαφή λογική έχουν κερδίσει περισσότερη προσοχή λόγω της ικανότητάς τους να χειρίζονται τη μη γραμμικότητα που σχετίζεται με το σύστημα. Εξαιτίας της έλλειψης ακριβούς μοντελοποίησης των φωτοβολταϊκών μονάδων και της αβεβαιότητας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων λόγω της ποικίλης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, το ασαφές MPPT (FMPPT) έχει βρεθεί πιο κατάλληλο για την παρακολούθηση του MPP από τους συμβατικούς αλγόριθμους σε Φ/Β συστήματα. Αυτή η τεχνική MPPT βελτιώνει την επιλογή του μεταβλητού μεγέθους βήματος του κύκλου λειτουργίας και επομένως, βελτιώνει τις επιδόσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ιδέα αυτού του αλγορίθμου είναι να υπολογίσει το μεταβλητό βήμα σύμφωνα με την τιμή κλίσης της χαρακτηριστικής Power-Voltage για μια φωτοβολταϊκή μονάδα. Στη συνέχεια, παρέχει την κατάλληλη τιμή του κύκλου λειτουργίας [58].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, το FLC αποτελείται, γενικά, από τρία μέρη: 1) την ασαφοποίηση, 2) την αναζήτηση στη βάση γνώσεων (βάση ασαφών κανόνων, βάση δεδομένων) και 3) την αποασαφοποίηση. Στη διαδικασία ασαφοποίησης, οι ασαφείς τιμές εισόδου μετατρέπονται σε ασαφείς τιμές οι οποίες πραγματοποιούνται από λεκτικές μεταβλητές, π.χ. υψηλή, μεγάλη, μεσαία, αργή κ.λ.π. [59].



Σχήμα 3.8: Αρχιτεκτονική Fuzzy MPPT [59]

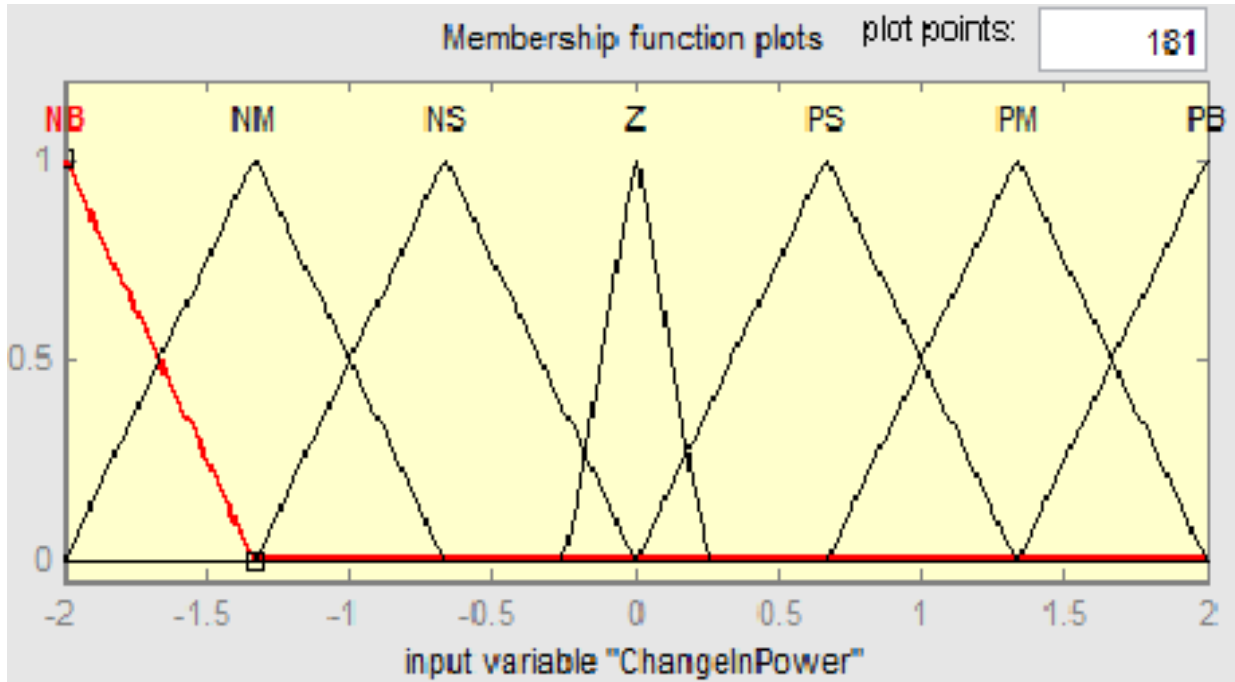
Υπάρχουν δύο είσοδοι στον ελεγκτή – σφάλμα $e(k)$ και η αντίστοιχη μεταβολή του σφάλματος $\Delta e(k)$. Το μπλοκ ασαφοποίησης μετατρέπει τις ευκρινείς εισόδους σε ασαφείς. Οι κανόνες σχηματίζονται στη βάση κανόνων και εφαρμόζονται σε μπλοκ συμπερασμάτων. Η αποασαφοποίηση μετατρέπει τη ασαφή έξοδο σε ευκρινή. Το ασαφές συμπέρασμα πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Mamdani² και η αποασαφοποίηση χρησιμοποιεί το κέντρο βάρους για να υπολογίσει την έξοδο αυτού του FLC που είναι η αλλαγή στον κύκλο λειτουργίας.

Οι είσοδοι στον ελεγκτή Fuzzy είναι η αλλαγή στην Ισχύ της Φ/Β γεννήτριας (ΔP_{pv}) και η αλλαγή στο ρεύμα της Φ/Β γεννήτριας (ΔI_{pv}) που αντιστοιχεί στις δύο χρονικές στιγμές δειγματοληψίας. Οι δύο είσοδοι επεξεργάζονται από τον ελεγκτή Fuzzy και η έξοδος του ελεγκτή Fuzzy είναι το αυξητικό ρεύμα αναφοράς (ΔI_{ref}). Αυτή η έξοδος δίνεται στον μετατροπέα ισχύος DC-DC. Η πρώτη μεταβλητή εισόδου (ΔP_{pv}) για τον ελεγκτή ασαφούς λογικής χωρίζεται σε επτά σύνολα Fuzzy: PB (Positive Big-Θετικό Μεγάλο), PM (Positive Medium-Θετικό Μέσο), PS (Positive Small-Θετικό Μικρό), ZZ (Zero-Μηδέν), NS (Negative Small-Αρνητικό Μικρό), NM (Negative Medium-Αρνητικό-Μεσαίο) και NB (Negative Big-Αρνητικό Μεγάλο). Η δεύτερη μεταβλητή εισόδου (ΔI_{pv}) για τον ελεγκτή ασαφούς λογικής χωρίζεται σε 3 σύνολα ασαφούς: N (αρνητικό), Z (μηδέν) και P (θετικό). Η μόνη μεταβλητή εξόδου (ΔI_{ref}) χωρίζεται σε 7 ασαφείς ομάδες: PB (Θετικό μεγάλο), PM (Θετικό Μεσαίο), PS (Θετικό Μικρό), ZZ (Μηδέν), NB (Αρνητικό Μεγάλο), NM (Αρνητικό Μεσαίο) και NS (Αρνητικό Μικρό). Οι κανόνες διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3. Οι συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου, εξόδου φαίνονται στα σχήματα 3.9, 3.10 (σελ.45) και 3.11 (σελ. 46) αντίστοιχα [60].

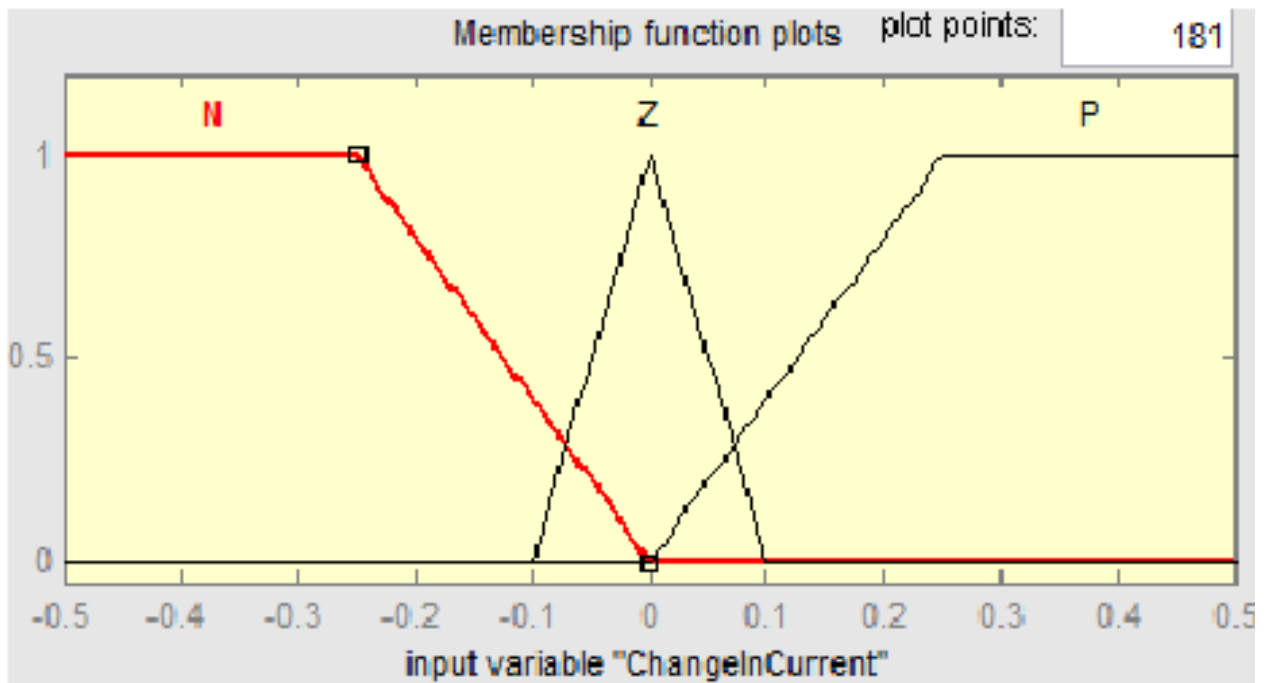
Πίνακας 3.3: Κανόνες ασαφούς ελεγκτή [60]

ΔP_{pv} ΔI_{pv}	PB	PM	PS	ZZ	NS	NM	NB
P	PB	PM	PS	PS	NS	NM	NB
Z	PB	PM	PS	ZZ	NS	NM	NB
N	NB	NM	NS	NS	PS	PM	PB

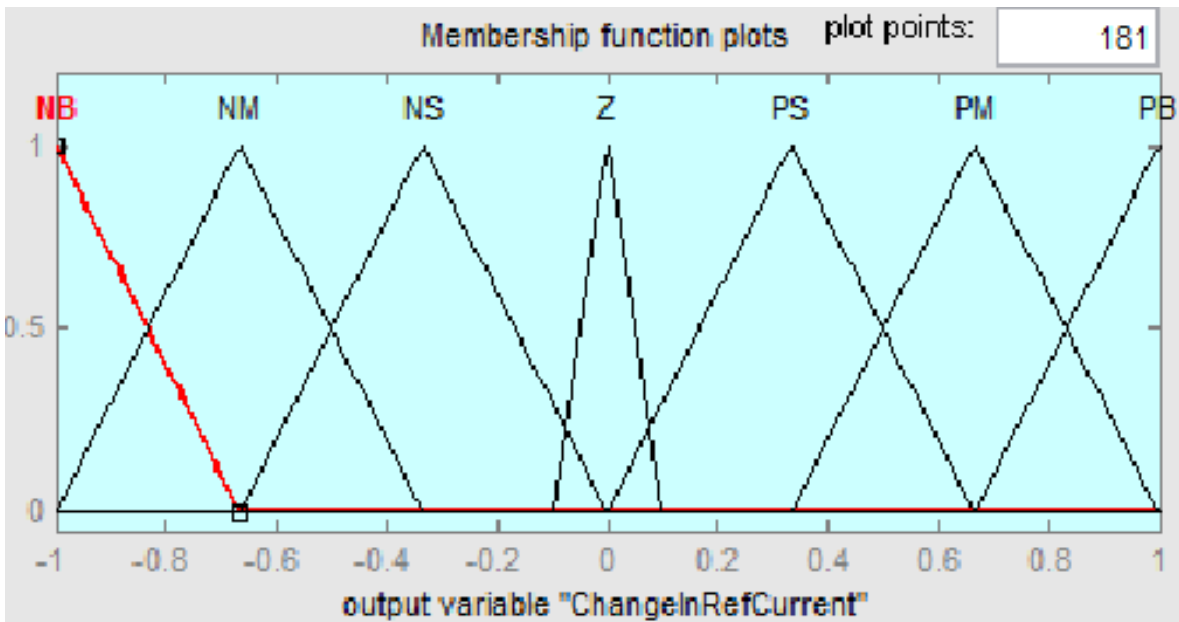
² Το ασαφές συμπέρασμα Mamdani εισήχθη για πρώτη φορά ως μέθοδος για τη δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου συνθέτοντας ένα σύνολο κανόνων γλωσσικού ελέγχου που λαμβάνονται από έμπειρους χειριστές. Σε ένα σύστημα Mamdani, η έξοδος κάθε κανόνα είναι ένα ασαφές σύνολο.



Σχήμα 3.9: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου «αλλαγής ισχύος» [60]

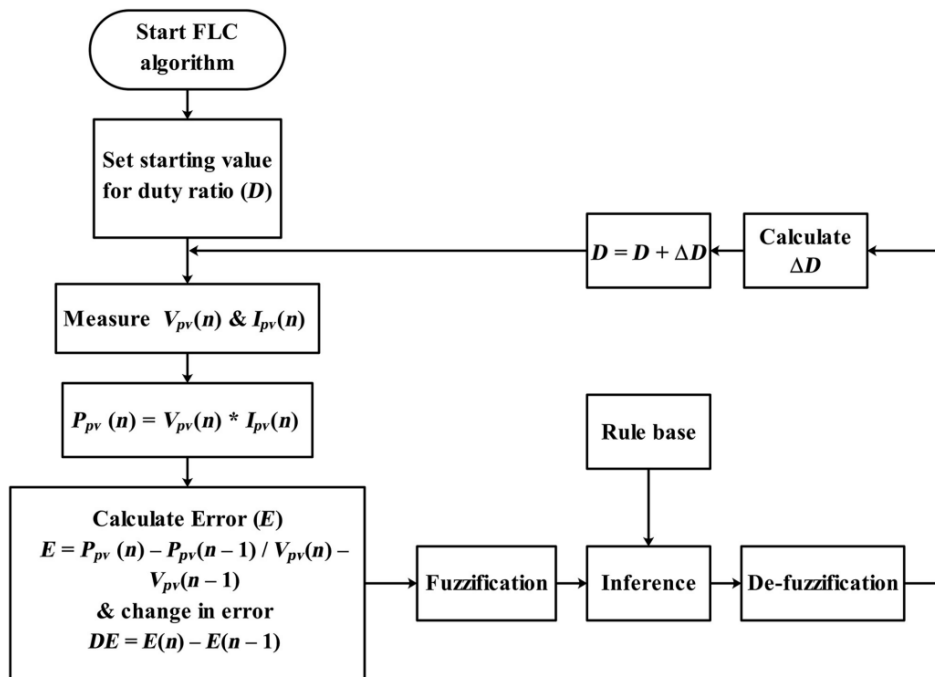


Σχήμα 3.10: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου «αλλαγής ρεύματος» [60]



Σχήμα 3.11: Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου «αλλαγής ρεύματος αναφοράς» [60]

Το διάγραμμα ροής αλγορίθμου FLC φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Η βάση κανόνων κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας γλωσσικές συναρτήσεις όπως στον Πίνακα 3.3 (σελ.44). Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό ασαφούς αλληλεπίδρασης που είναι ο εγκέφαλος του ελεγκτή. Μετά από αυτό, υπάρχει μια διαδικασία αποασαφοποίησης κατά την οποία οι ασαφείς τιμές μετατρέπονται σε στενές τιμές [59].

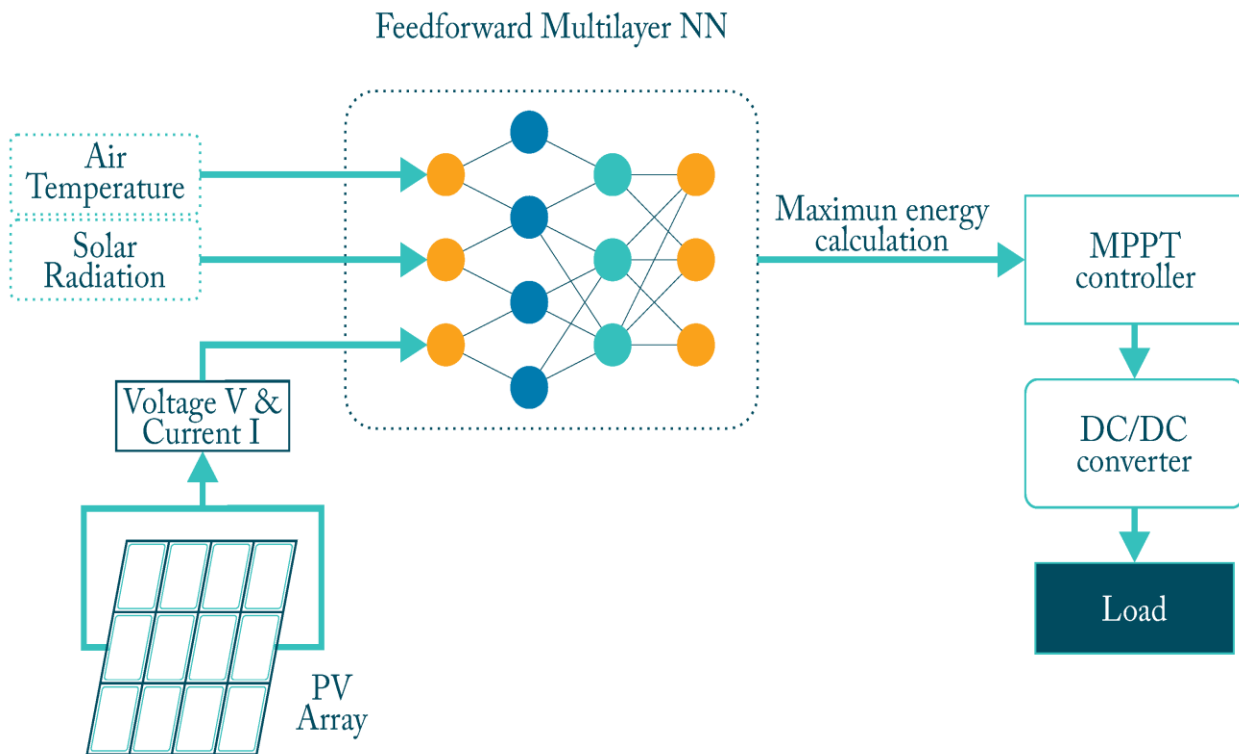


Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου FLC [52]

Επομένως, το πλεονέκτημα του FLC είναι ότι δεν χρειάζεται μαθηματικό μοντέλο και γνώση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Μειονέκτημα όμως είναι η πολυπλοκότητα συντονισμού της συνάρτησης μέλους, του παράγοντα κλιμάκωσης και των κανόνων ελέγχου που παρουσιάζονται από το FLC [52].

3.3.2 Τεχνητό Νευρωνικό δίκτυο (Artificial Neural Network - ANN)

Το Νευρωνικό Δίκτυο αποτελείται από ένα σύστημα νευρώνων που έχουν διαταχθεί συνήθως σε στρώματα (layers) με σκοπό οι νευρώνες κάθε layer να διεξάγουν παρόμοια και ομόχρονη διεργασία. Κύριο χαρακτηριστικό των Νευρωνικών Δικτύων είναι η ικανότητα εκπαίδευσής τους, επιλέγοντας κατάλληλα την διάταξή τους και τα βάρη w [61]. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Artificial Neural Network - ANN) είναι μια μέθοδος τεχνητής νοημοσύνης. Η μέθοδος τεχνητής νοημοσύνης έχει περισσότερα πλεονεκτήματα από τις συμβατικές μεθόδους. Τα μειονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων είναι ότι παρουσιάζουν αργές αποκρίσεις σε ξαφνικές αλλαγές στην ηλιακή θερμοκρασία και τις συνθήκες ακτινοβολίας, και μερικές φορές, μπορεί να αποτύχουν επίσης, να παρακολουθήσουν το μέγιστο σημείο ισχύος. Ένα γενικό διάγραμμα της λειτουργίας του νευρωνικού δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Η είσοδος είναι η ηλιακή θερμοκρασία και η ακτινοβολία. Στόχος του νευρωνικού δικτύου είναι ο duty cycle προς τον μετατροπέα DC-DC. Για κάθε αλλαγή της ηλιακής θερμοκρασίας και της τιμής ακτινοβολίας, το νευρωνικό δίκτυο θα δώσει μια συγκεκριμένη τιμή duty cycle για να ληφθεί το σημείο μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα ελεγκτή ANN MPPT [62]

Το δίκτυο αποκτάται μέσω εκπαίδευσης, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt³. Για διαφορετικό συνδυασμό ηλιακής ακτινοβολίας και τιμής θερμοκρασίας υπολογίζεται ο duty cycle και το ANN εκπαιδεύεται. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου σημαίνει προσαρμογή των βαρών των στρωμάτων για να ληφθούν οι τιμές-στόχοι. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας προπόνησης τα βάρη προσαρμόζονται για να παρακολουθούνται οι τιμές στόχου με ελάχιστο σφάλμα. Η συνάρτηση απόδοσης του ANN είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean squared error - MSE). Εάν το a είναι η παρούσα έξοδος, το t είναι ο στόχος, τότε το MSE θα είναι,

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_1 - a_i)^2 \quad (3.10)$$

Βήματα για το σχεδιασμό ANN:

- συλλογή δεδομένων,
- επιλογή δομής δικτύου,
- εκπαίδευση του δικτύου, και
- δοκιμή του δικτύου [63].

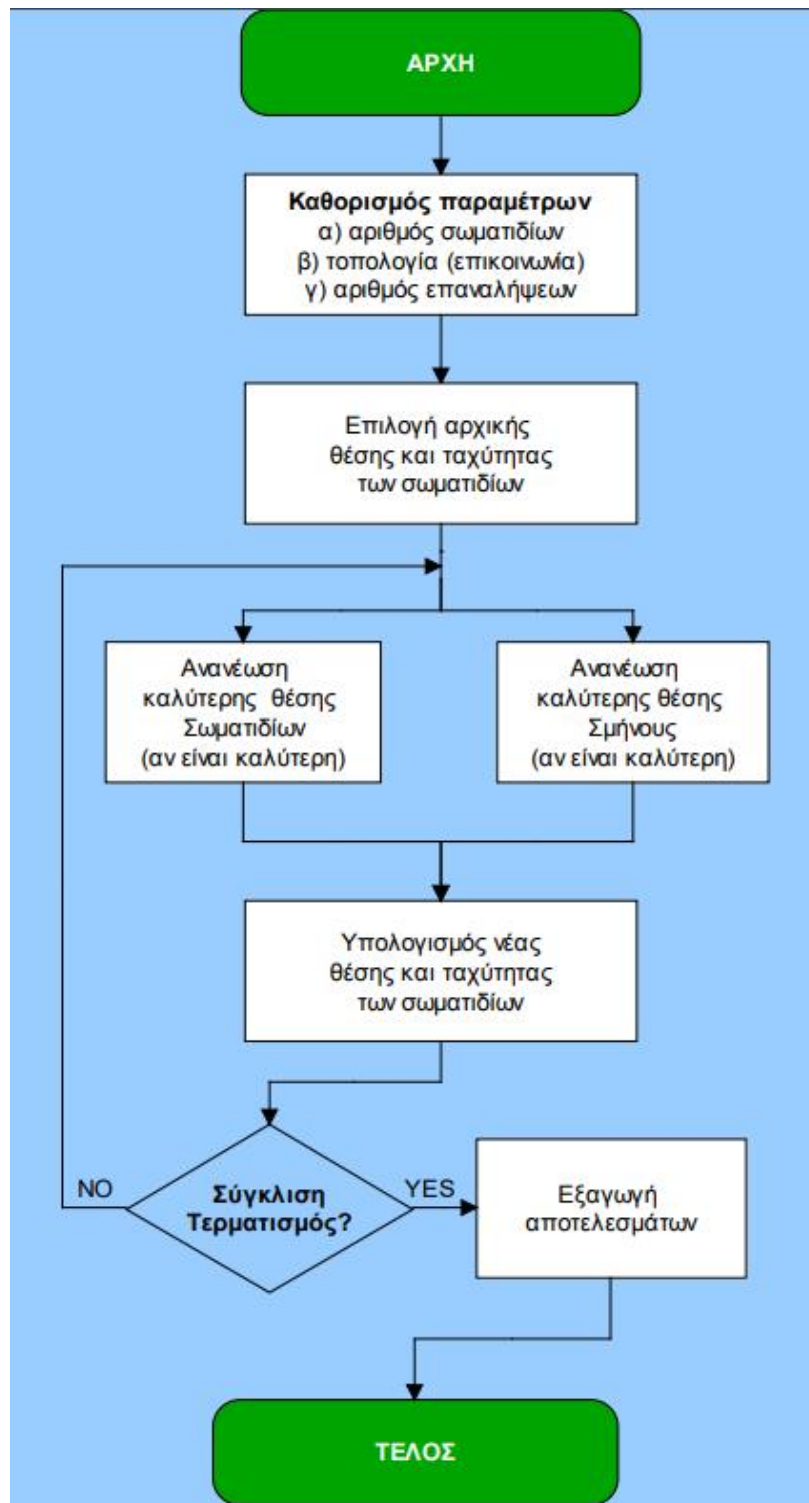
Γενικά, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι σε μεγάλο βαθμό ακριβές, με σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα. Όμως χρειάζεται να εκπαιδευθεί στο καθορισμένο σύστημα για το οποίο προορίζεται. Αυτό μειώνει πολύ την ευελιξία του και το εύρος εφαρμογών του [64].

3.3.3 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO)

Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO) είναι ένας δημοφιλής αλγόριθμος μεταερευτικής βελτιστοποίησης που έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορα προβλήματα. Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος, λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς του. Η τεχνική PSO βασίζεται στην κίνηση και τη νοημοσύνη των σμηνών. Προσομοιώνει τα πουλιά που αναζητούν τροφή ή την κίνηση των κοπαδιών των ψαριών. Εφαρμόζει την έννοια της κοινωνικής αλληλεπίδρασης στην επίλυση προβλημάτων. Χρησιμοποιεί έναν αριθμό παραγόντων (σωματιδίων) που αποτελούν ένα σμήνος τα οποία κινούνται γρήγορα στον χώρο αναζήτησης, επιδιώκοντας την βέλτιστη λύση, και προσαρμόζουν τη θέση τους ανάλογα με την αδράνεια, την ατομική εμπειρία και την κοινωνική εμπειρία (Σχήμα 3.14, σελ. 49). Κάθε σωματίδιο παρακολουθεί τις συντεταγμένες του στο χώρο της λύσης που σχετίζονται με τη βέλτιστη λύση (καταλληλότητα-fitness) που έχει επιτευχθεί μέχρι τότε από αυτό το σωματίδιο. Αυτή η τιμή ονομάζεται ατομικό βέλτιστο (Personal best – Pbest). Μια άλλη βέλτιστη

³ Ο αλγόριθμος Levenberg – Marquardt είναι μία επαναληπτική τεχνική που εντοπίζει το ελάχιστο μιας συνάρτησης πολλαπλών μεταβλητών. Χρησιμοποιείται για αθροίσματα τετραγώνων μη γραμμικών πραγματικών συναρτήσεων.

τιμή που παρακολουθείται από το PSO είναι η βέλτιστη τιμή που έχει ληφθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή από οποιοδήποτε σωματίδιο στη γειτονιά αυτού του σωματιδίου. Αυτή η τιμή ονομάζεται καθολικό βέλτιστο (Global best – Gbest) [65].



Σχήμα 3.14: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων [66]

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, τα σωματίδια καταλαμβάνουν τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ τα G_{best} και τα P_{besti} τους αποθηκεύονται. Ο βασικός αλγόριθμος PSO που καθορίζει την επόμενη ταχύτητα και θέση της υποψήφιας λύσης μπορεί να δοθεί μαθηματικά ως:

$$v_i^{k+1} = w \times v_i^k + r_1 \times c_1 \times (P_{besti} - x_i^k) + r_2 \times c_2 \times (G_{best} - x_i^k) \quad (3.11)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.12)$$

Στην προαναφερθείσα έκφραση, το i αντιπροσωπεύει τη μεταβλητή του διανύσματος βελτιστοποίησης, το k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, και αντίστοιχα η ταχύτητα και η θέση της μεταβλητής i στις k επαναλήψεις, η παράμετρος w είναι γνωστή ως αδράνεια που διατηρεί μια ισορροπία μεταξύ της τοπικής και καθολικής αναζήτησης. Οι c_1 και c_2 είναι σταθερές επιτάχυνσης. Οι r_1 και r_2 είναι δύο μεταβλητές που παίρνουν τυχαίες τιμές στο διάστημα $[0, 1]$.

Η μεταβλητή P_{besti} καταγράφει την καλύτερη θέση που επηρεάζεται από το i σωματίδιο μέχρι τον ακριβή χρόνο μέτρησης. Η ακόλουθη εξίσωση υποδεικνύει ότι αυτή η θέση καταγράφεται ως P_{besti} μόνο εάν ικανοποιείται η συνθήκη που αναφέρεται παρακάτω:

$$P_{besti} = x_i^k \text{ αν } fit(x_i^k) \geq fit(P_i) \quad (3.13)$$

Η αξιολόγηση των σωματιδίων βασίζεται στην Ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού πίνακα σε σχέση με την τελική τιμή τάσης που υποδεικνύεται από το fit ως ο αξιολογητής καταλληλότητας για τα σωματίδια. Η ακόλουθη εξίσωση δείχνει τον πίνακα θέσης των n σωματιδίων, ο οποίος αντιπροσωπεύει n λύσεις για το πρόβλημα MRPT:

$$x_i^k = [x_1^k, x_2^k, x_3^k, \dots, x_i^k, \dots, x_{(n-1)}^k, x_n^k] \quad (3.14)$$

Όπου x_i^k είναι η θέση του i σωματιδίου στην k επανάληψη.

Επομένως, ο αλγόριθμος πρέπει να αρχικοποιηθεί όταν ικανοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση [65]:

$$\left| \frac{fit(x_{i+1}) - fit(x_i)}{fit(x_i)} \right| > \Delta P \quad (3.15)$$

Ένα από τα θετικά χαρακτηριστικά του PSO έγκειται στη δυνατότητά του να κρατάει στη μνήμη του τις βέλτιστες θέσεις των σωματιδίων στα Pbest καθώς και στα Gbest, γεγονός που επιταχύνει τη σύγκλιση επειδή οδηγεί τα σωματίδια στις πιθανώς καταλληλότερες περιοχές για τη βελτιστοποίηση. Επίσης, ο κώδικάς του είναι απλός και σύντομος. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που τον χαρακτηρίζει είναι η άμεση προσαρμοστικότητα του στις αλλαγές του περιβάλλοντός του κρατώντας σταθερή την αποδοτικότητά του.

Στα αρνητικά χαρακτηριστικά του συγκαταλέγεται το γεγονός ότι για να λειτουργήσει στο προς βελτιστοποίηση πρόβλημα, απαιτεί τον ορισμό των αρχικών θέσεων των σωματιδίων ή τον τρόπο προκειμένου να βρεθεί η επόμενη θέση τους στο χώρο. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι κάθε σωματίδιο θεωρείται ίδιο, με ταυτόσημα χαρακτηριστικά και παρόμοιες δυνατότητες κίνησης, που όμως στη πραγματικότητα δεν ισχύει. Επίσης ο PSO είναι φτιαγμένος να αναζητά τη καλύτερη λύση του προβλήματος και δεν μπορεί να λάβει υπόψη ότι ίσως υπάρχει πάνω από μια βέλτιστη λύση [67].

3.4 Επίλογος

Ανακεφαλαιώνοντας, στις πιο πάνω ενότητες συζητήθηκαν διάφορες τεχνικές για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων. Η μερική σκίαση είναι ένα σημαντικό ζήτημα στα φωτοβολταϊκά συστήματα, που μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της συνολικής απόδοσής τους. Ωστόσο, η χρήση αλγορίθμων μπορεί να βοηθήσει στον μετριασμό των επιπτώσεων της μερικής σκίασης διασφαλίζοντας ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP).

Ο αλγόριθμος Perturb & Observe (P&O) είναι μια απλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος που διαταράσσει το σημείο λειτουργίας και συγκρίνει την ισχύ εξόδου για να βρει το μέγιστο σημείο. Ωστόσο, ο αλγόριθμος P&O έχει αργό χρόνο απόκρισης και μπορεί να ταλαντώνεται γύρω από το MPP.

Ο αλγόριθμος Incremental Conductance (IC) χρησιμοποιεί το παράγωγο της καμπύλης ισχύος-τάσης για να καθορίσει την κατεύθυνση που θα κινηθεί προς το MPP. Ο αλγόριθμος INC μπορεί να παρακολουθεί το MPP γρήγορα και με ακρίβεια, αλλά απαιτεί περισσότερη υπολογιστική προσπάθεια από τον αλγόριθμο P&O.

Ο έλεγχος Fuzzy Logic (FLC) είναι μια μη γραμμική μέθοδος ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του φωτοβολταϊκού συστήματος ώστε να λειτουργεί στο MPP του. Το FLC μπορεί να χειριστεί τις αβεβαιότητες και τη μη γραμμικότητα του συστήματος, αλλά απαιτεί ειδικές γνώσεις για τον σχεδιασμό των ασαφών κανόνων.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) είναι ισχυρά εργαλεία μηχανικής μάθησης που μπορούν να μάθουν το MPP χωρίς την ανάγκη ακριβούς μοντέλου. Τα ANN μπορούν να επιτύχουν υψηλή ακρίβεια στην παρακολούθηση του MPP, αλλά απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης και υπολογιστικών πόρων.

Τέλος, ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO) επίσης χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος με τον προσδιορισμό των βέλτιστων σημείων λειτουργίας. Το PSO μπορεί να βρει το καθολικό MPP γρήγορα και με ακρίβεια, αλλά απαιτεί προσεκτικό συντονισμό παραμέτρων.

Γενικά, η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το μέγεθος, η πολυπλοκότητα και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του συστήματος. Ο αλγόριθμος P&O μπορεί να είναι κατάλληλος για απλά συστήματα, ενώ πιο πολύπλοκα συστήματα μπορεί να απαιτούν πιο εξελιγμένους αλγόριθμους όπως INC, FLC, ANN ή PSO. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων συνδυασμού αυτών των τεχνικών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Κεφάλαιο 4

4. Προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο MPPT

4.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, η παρούσα πτυχιακή εργασία σκοπό έχει την εφαρμογή MPPT σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, ώστε να εκτιμηθούν οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι, σε κατάσταση πλήρους ηλιοφάνειας αλλά και σε κατάσταση μερικής σκίασης. Η προσομοίωση του συστήματος απαιτεί τη χρήση κατάλληλου μετατροπέα DC/DC τάσης, καθώς και τη χρήση αλγόριθμου MPPT που ρυθμίζει τον λόγο κατάτμησης του μετατροπέα. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι το Simulink, το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος του MATLAB (MathWorks).

Πριν από την ανάλυση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, σε αυτό το κεφάλαιο παρέχεται επισκόπηση της πλατφόρμας του λογισμικού MATLAB και επισημαίνονται ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματά της.

4.2 Επισκόπηση της πλατφόρμας λογισμικού MATLAB

Το MATLAB είναι μια ισχυρή πλατφόρμα λογισμικού, μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και ένα διαδραστικό περιβάλλον που χρησιμοποιείται ευρέως σε επιστημονικές και μηχανολογικές εφαρμογές. Το MATLAB συνδυάζει ένα περιβάλλον επιφάνειας εργασίας ρυθμισμένο για επαναληπτικές διαδικασίες ανάλυσης και σχεδίασης με μια γλώσσα προγραμματισμού που εκφράζει άμεσα μαθηματικά διανυσμάτων και πινάκων. Σε άλλη περίπτωση, θα ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μια μη διαδραστική γλώσσα. Το MATLAB παρέχει μια απρόσκοπτη ενοποίηση εργαλείων και λειτουργιών για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και την ανάλυση διαφόρων συστημάτων που αφορούν μηχανικούς ηλεκτρολογίας, συμπεριλαμβανομένων των αλγορίθμων Maximum Power Point Tracking (MPPT) για φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτό επιτρέπει σε πλήθος χρηστών να σχεδιάζουν, να προσομοιώνουν και να δοκιμάζουν αλγόριθμους MPPT σε μια ενιαία πλατφόρμα [68].

4.2.1 Περιβάλλον Simulink

Στα εργαλεία του MATLAB συμπεριλαμβάνεται και το Simulink. Το MATLAB Simulink είναι ένα ισχυρό περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού που επιτρέπει στο χρήστη να μοντελοποιεί, να προσομοιώνει και να αναλύει δυναμικά συστήματα. Χρησιμοποιείται ευρέως στον ακαδημαϊκό χώρο και τη βιομηχανία, για έρευνα, ανάπτυξη και δοκιμή σύνθετων συστημάτων σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, τα συστήματα ελέγχου, οι επικοινωνίες και τα ηλεκτρονικά ισχύος.

Στον πυρήνα του, το Simulink παρέχει ένα περιβάλλον μπλοκ διαγράμματος για τη δημιουργία μοντέλων δυναμικών συστημάτων. Κάθε μπλοκ αντιπροσωπεύει μια μαθηματική συνάρτηση, ένα φυσικό στοιχείο ή έναν αλγόριθμο ελέγχου. Με το Simulink είναι δυνατόν να παραχθούν εκτός από ιδανικά γραμμικά μοντέλα, και άλλα, στα οποία συνυπολογίζονται αρκετά πραγματικά μεγέθη, όπως η τριβή, η ολίσθηση, η αντίσταση του αέρα, οι ξαφνικές αλλαγές κ.λ.π. Τα blocks μπορούν να διασυνδεθούν για να σχηματίσουν ένα μοντέλο συστήματος, το οποίο μπορεί να προσομοιωθεί σε τομέα χρόνου ή τομέα συχνότητας.

Επειδή το λογισμικό του Simulink είναι μέρος του MATLAB, κάθε μπλοκ του συστήματος που έχει σχεδιαστεί, αξιολογείται και ελέγχεται από το MATLAB. Σημειώνεται επίσης, ότι το Simulink κάνει χρήση διαφόρων ιδιοτήτων του MATLAB, όπως τον ορισμό εισόδων του μοντέλου, την αποθήκευση εξόδων του μοντέλου για επεξεργασία, και την εκτέλεση των λειτουργιών μέσα σε ένα μοντέλο, μέσω κλήσεων συναρτήσεων και τελεστών του MATLAB.

Το Simulink υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών μοντελοποίησης, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων συνεχούς χρόνου, διακριτού χρόνου και υβριδικών συστημάτων. Περιλαμβάνει επίσης, βιβλιοθήκες προκατασκευασμένων μπλοκ για κοινές εφαρμογές, όπως επεξεργασία σήματος, συστήματα ελέγχου και συστήματα επικοινωνίας. Επιπλέον, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν τα δικά τους προσαρμοσμένα μπλοκ χρησιμοποιώντας κώδικα Matlab ή κώδικα C/C++.

Το συγκεκριμένο λογισμικό περιλαμβάνει επίσης εργαλεία για ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης τομέα χρόνου και τομέα συχνότητας, επεξεργασίας σήματος και βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να εμφανίζονται σε γραφική ή αριθμητική μορφή και οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν αναφορές, πλοκές και κινούμενα σχέδια για να κοινοποιήσουν τα ευρήματά τους.

Το Simulink έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές γλώσσες προγραμματισμού, ιδιαίτερα για πολύπλοκα συστήματα. Παρέχει μια οπτική αναπαράσταση του συστήματος, διευκολύνοντας την κατανόηση και την τροποποίηση. Επιτρέπει επίσης τη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων και δοκιμές σχεδίων, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος ανάπτυξης. Τέλος, το Simulink παρέχει ένα ενοποιημένο περιβάλλον για μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση, το οποίο μπορεί

να εξορθολογήσει τη διαδικασία ανάπτυξης και να βελτιώσει τη συνεργασία μεταξύ των μελών μιας ομάδας [69].

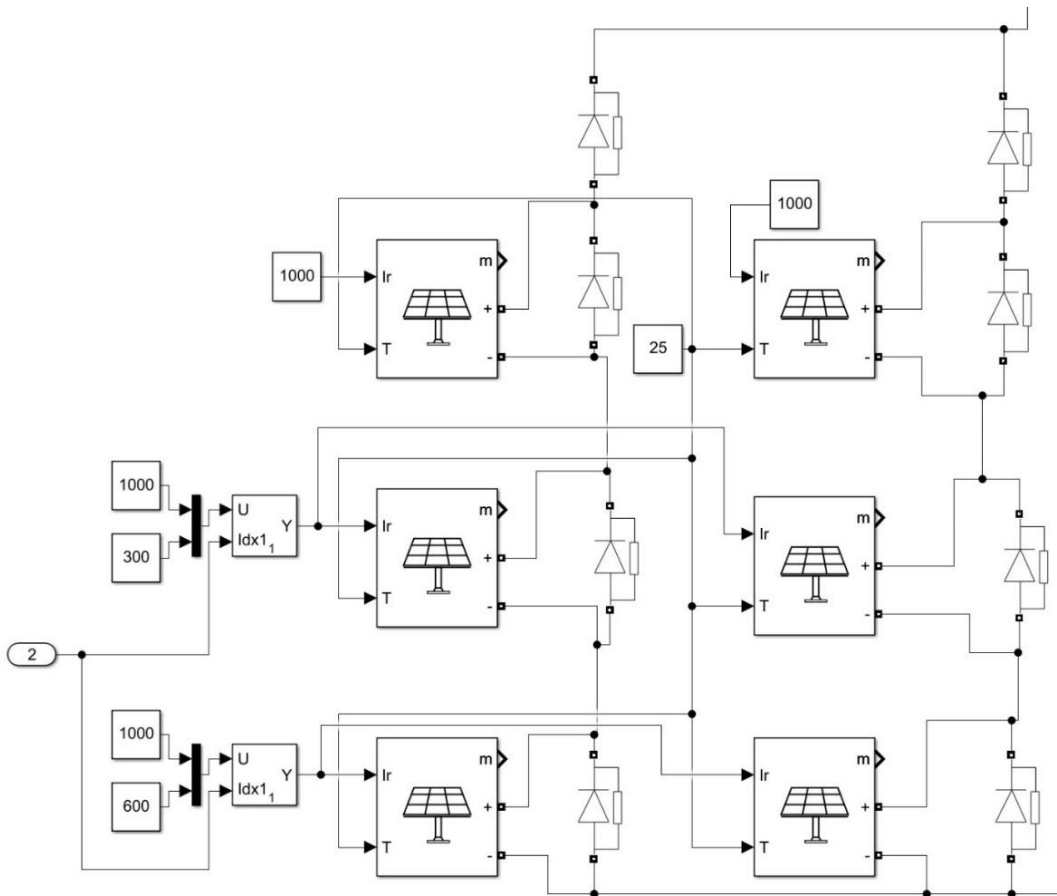
4.3 Ανάλυση μοντέλου Simulink

Το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να διακριθεί στα εξής μέρη, τα οποία απεικονίζονται παρακάτω στις αντίστοιχες ενότητες:

- τη φωτοβολταϊκή συστοιχία,
- τον μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης,
- το Ωμικό φορτίο, και
- τις μονάδες ελέγχου του παλμού του μετατροπέα DC/DC, εκτελώντας τον επιλεγμένο αλγόριθμο MPPT.

4.3.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Για να προσομοιωθεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία (Σχήμα 4.1) γίνεται χρήση του ήδη υπάρχοντος block του Simulink “pv array” από τη συλλογή “Electrical/Specialized Power Systems/Sources”.



Σχήμα 4.1: Φωτοβολταϊκή συστοιχία που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου SHARP ND 208U1 [70]

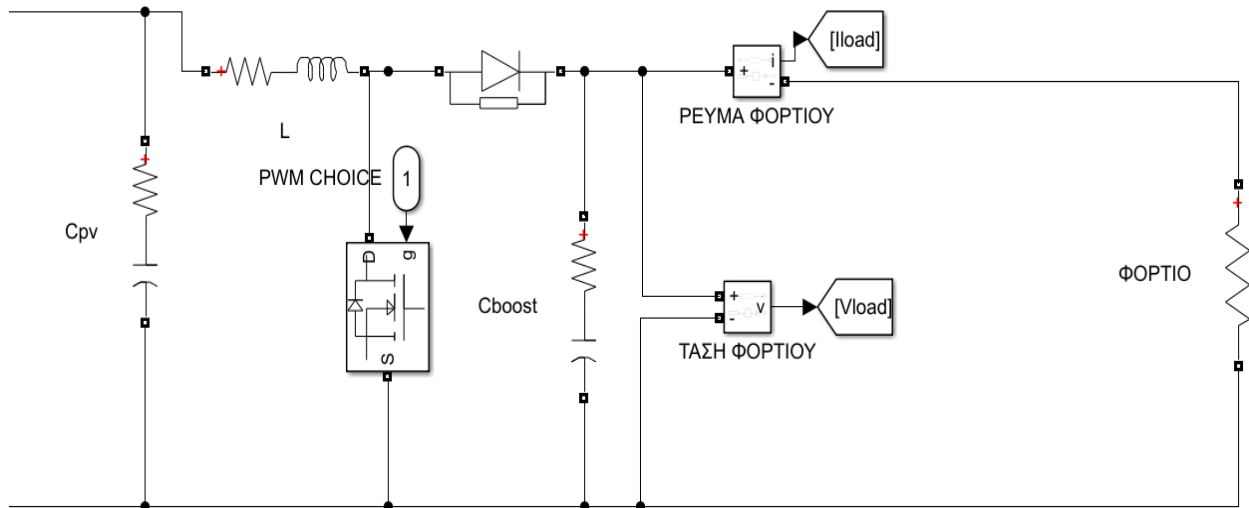
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SHARP ND 208U1	
Cell	Poly-crystalline silicon
No. of Cells and Connections	60 in series
Open Circuit Voltage (V_{oc})*	36.1V
Maximum Power Voltage (V_{pm})*	28.5V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.13A
Maximum Power Current (I_{pm})	7.3A
Maximum Power (P_{max})*	208W (+10% / -5%)
Module Efficiency Maximum Power (η_m)	12.8%
Maximum System Voltage	600VDC
Series Fuse Rating	15A
Type of Output Terminal	Lead Wire with MC Connector

*(STC) Standard Test Conditions: 25°C, 1 kW/m², AM 1.5

Πραγματοποιείται υλοποίηση δύο φωτοβολταϊκών πλαίσιοσειρών σε παράλληλη σύνδεση. Καθεμία από αυτές αποτελείται από τρία φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου Sharp ND-208U1, συνδεδεμένα σε σειρά. Το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από εξήντα Φ/Β στοιχεία. Επιπρόσθετα, μια δίοδος συνδέεται παράλληλα με καθένα Φ/Β πλαίσιο. Τα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου Φ/Β πλαισίου αναφέρονται στον Πίνακα 4.1.

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία λαμβάνει ως εισόδους, την ένταση της προσπίπτουσας στα Φ/Β πλαίσια ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²) και τη θερμοκρασία (°C), που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του κάθε Φ/Β στοιχείου (Tcell). Στις προσομοιώσεις, αρχικά, γίνεται χρήση σταθερών τιμών ακτινοβολίας/θερμοκρασίας με τη συνδρομή του έτοιμου block “constant” που δίνει το Simulink. Περαιτέρω στις δοκιμές, χρησιμοποιούνται χρονοσειρές τιμών ακτινοβολίας με τη συμμετοχή του υπάρχοντος block “signal builder” το οποίο παρομοίως δίνεται από το Simulink.

Στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, χρησιμοποιώντας έναν αποπολυπλέκτη, γίνεται εξαγωγή της συνολικής παραγόμενης τάσης και του συνολικού παραγόμενου ρεύματος. Αυτό το ζεύγος σημάτων μεταβιβάζεται στην μονάδα ελέγχου MPPT που ελέγχει τον κύκλο καθήκοντος του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Τελικά, γίνεται χρήση ενός ωμικού φορτίου το οποίο συνδέεται στην έξοδο του Boost converter.



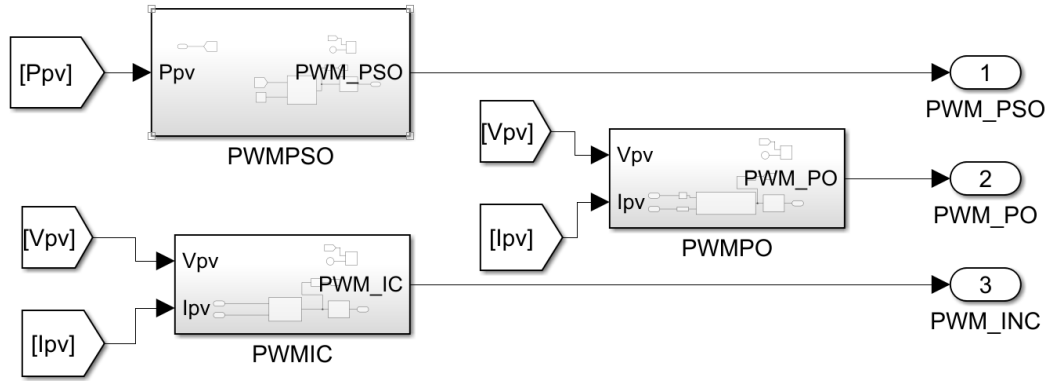
Σχήμα 4.2: Μετατροπέας DC/DC αύξησης τάσης που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση

4.3.2 Μετατροπέας DC/DC αύξησης τάσης

Στα άκρα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας συνδέεται ο μετατροπέας DC/DC αύξησης τάσης, το κύκλωμα του οποίου εμφανίζεται στο Σχήμα 4.2. Αυτό απαρτίζεται από τον πυκνωτή εξόδου C_{boost} της τάξης των 2200 μF , το πηνίο εξόδου L της τάξης των 10 mH. Ο ημιαγωγός του μετατροπέα είναι ένα MOSFET τρανζίστορ και με την παλμοδότησή του πραγματοποιείται έλεγχος της ισχύος της συστοιχίας που παράγεται. Η επιλογή των τιμών των C_{boost} και L έγιναν ανάλογα με τις βασικές εξισώσεις υπολογισμού ενός μετατροπέα DC/DC αύξησης τάσης [71], με σκοπό την ελάχιστη κυμάτωση. Η επιλεχθείσα συχνότητα switching του σήματος PWM που ελέγχει τον μετατροπέα DC/DC είναι ίση με 20 kHz. Ακόμη, ένας επιπλέον πυκνωτής συνδέεται στην είσοδο του μετατροπέα C_{pv} που ισούται με 100 μF , ο οποίος τοποθετείται για τη σταθεροποίηση της τάσης εισόδου του (εξομάλυνση κυμάτωσης).

4.3.3 Ωμικό φορτίο

Στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC αύξησης τάσης συνδέεται μια αντίσταση 12 Ω που λειτουργεί ως ωμικό φορτίο.



Σχήμα 4.3: Function block των τριών μεθόδων MPPT που συγκρίθηκαν στην προσομοίωση

4.3.4 Αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται οι μονάδες ελέγχου (Function Blocks) MPPT που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση. Επίσης, παρακάτω ακολουθεί επεξήγηση της λειτουργίας του κώδικα των μεθόδων που ελέγχθηκαν στην προσομοίωση σε συνδυασμό με την απεικόνιση του κάθε κώδικα ως διάγραμμα ροής.

4.3.4.1 Αλγόριθμος Perturb & Observe (P&O)

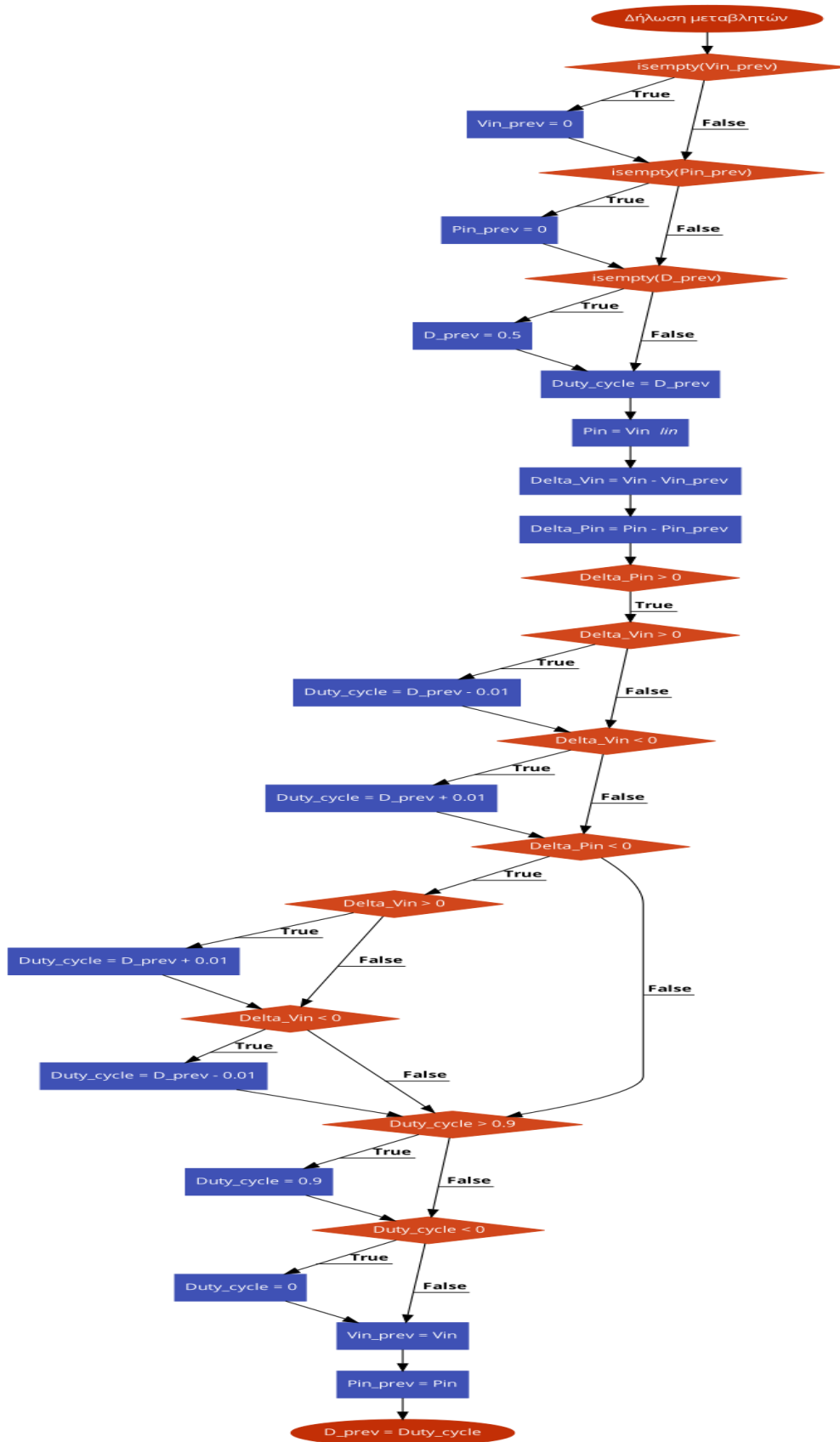
Στο Σχήμα 4.4 (σελ. 59), παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που σχεδιάστηκε.

Η συνάρτηση που αναπτύχθηκε υλοποιεί τον αλγόριθμο Perturb & Observe [52] για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.

Υπολογίζει το duty cycle του διακόπτη βάσει της αλλαγής τάσης (V_{in}) και ισχύος (I_{in}) στην είσοδό του. Οι persistent μεταβλητές V_{in_prev} , P_{in_prev} και D_prev χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύσουν τις προηγούμενες τιμές της τάσης, της ισχύος και του duty cycle αντίστοιχα, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επόμενη επανάληψη της συνάρτησης.

Αρχικά, ελέγχονται οι persistent μεταβλητές και αρχικοποιούνται, αν δεν έχουν τιμές από την προηγούμενη επανάληψη. Έπειτα, ορίζεται η τιμή του duty cycle ως την προηγούμενη τιμή του. Υπολογίζεται η ισχύς (P_{in}) στην είσοδο του διακόπτη με βάση την τάση (V_{in}) και την ισχύ (I_{in}) που δίνονται ως είσοδοι στη συνάρτηση.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι διαφορές της τάσης (ΔV_{in}) και ισχύος (ΔP_{in}) στην είσοδο του διακόπτη σε σχέση με την προηγούμενη επανάληψη. Ανάλογα με τη διαφορά της ισχύος και της τάσης, αλλάζεται το duty cycle του διακόπτη.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Perturb & Observe (P&O)

Στο εξής, γίνεται έλεγχος για επιβεβαίωση ότι το duty cycle είναι εντός των επιτρεπτών ορίων (0 έως 0.9) και αν δεν είναι, προσαρμόζεται στο μέγιστο ή ελάχιστο επιτρεπτό. Τέλος, αποθηκεύονται οι τρέχουσες τιμές τάσης, ισχύος και duty cycle για χρήση στην επόμενη επανάληψη της συνάρτησης.

Συνοψίζοντας, η συνάρτηση αυτή ελέγχει τις αλλαγές στην τάση και στην ισχύ εισόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και προσαρμόζει το duty cycle του διακόπτη ώστε να διατηρηθεί σταθερή η ισχύς εισόδου.

4.3.4.2 Αλγόριθμος Incremental Conductance (INC)

Στο Σχήμα 4.5 (σελ. 61) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που σχεδιάστηκε.

Η συνάρτηση που αναπτύχθηκε υλοποιεί τον αλγόριθμο Incremental Conductance (INC) [52] για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.

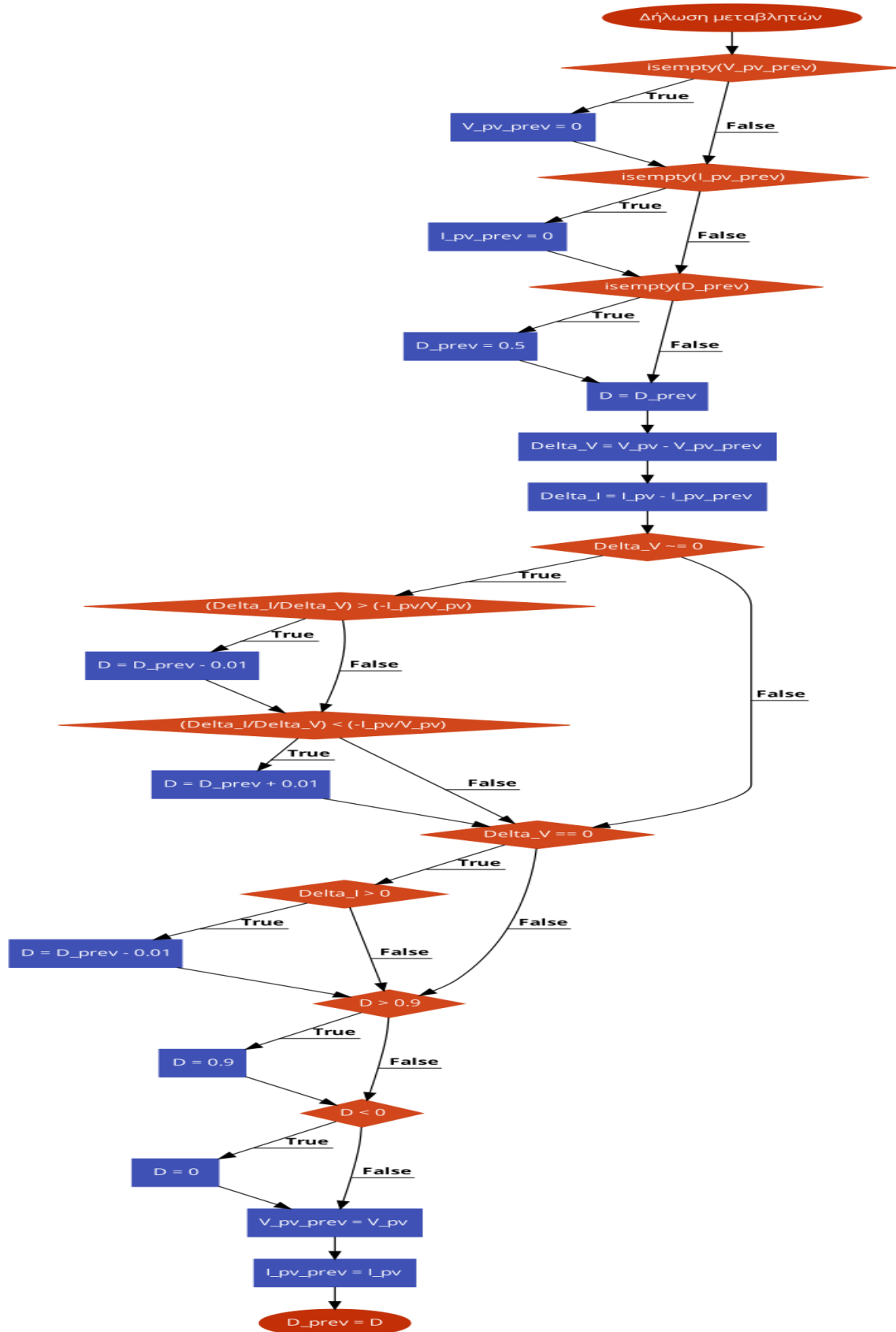
Η συνάρτηση έχει δύο εισόδους: την τάση V_{pn} και το ρεύμα I_{pn} του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η έξοδος της συνάρτησης είναι ο κύκλος εργασίας D που απαιτείται για τον μετατροπέα Boost.

Ο αλγόριθμος αρχικοποιεί τις persistent μεταβλητές V_{pn_prev} , I_{pn_prev} και D_prev με τις αρχικές τους τιμές, εάν δεν έχουν οριστεί ακόμη. Η persistent μεταβλητή χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της προηγούμενης τιμής του κύκλου εργασίας για να χρησιμοποιηθεί στην επόμενη επανάληψη της συνάρτησης.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι διαφορές της τάσης (ΔV) και του ρεύματος (ΔI) σε σχέση με την προηγούμενη επανάληψη. Με βάση την αυξομείωση του ρεύματος και της τάσης, ενημερώνεται ο κύκλος εργασίας (D) με βάση την Incremental Conductance [52]. Εάν η σχέση $\Delta I / \Delta V$ είναι μεγαλύτερη από $-I_{pn} / V_{pn}$, τότε ο κύκλος εργασίας μειώνεται κατά 0.01. Αντίστοιχα, εάν η σχέση $\Delta I / \Delta V$ είναι μικρότερη από $-I_{pn} / V_{pn}$, τότε ο κύκλος εργασίας αυξάνεται κατά 0.01. Επιπλέον, εάν η ΔV είναι μηδέν και η ΔI είναι θετική, τότε ο κύκλος εργασίας μειώνεται κατά 0.01.

Έπειτα, ο κύκλος εργασίας περιορίζεται στο διάστημα 0 έως 0.9, εάν υπερβεί αυτά τα όρια. Τέλος, οι τρέχουσες τιμές της τάσης V_{pn} , του ρεύματος I_{pn} και του κύκλου εργασίας D αποθηκεύονται για χρήση στην επόμενη επανάληψη της συνάρτησης.

Συνολικά, η συνάρτηση υπολογίζει τον κύκλο εργασίας που απαιτείται για τον μετατροπέα Boost, ώστε να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ με τη χρήση του αλγορίθμου Incremental Conductance.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Incremental Conductance (INC)

4.3.4.3 Αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO)

Στο Σχήμα 4.6 (σελ. 63) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που σχεδιάστηκε.

Η συνάρτηση MPPT που αναπτύχθηκε, υλοποιεί τον αλγόριθμο Particle Swarm Optimization (PSO) [67] για τη βελτιστοποίηση του duty cycle ως προς την παραγόμενη ισχύ.

Ο κώδικας εξηγείται ως εξής:

Η κύρια συνάρτηση fcn παίρνει δύο εισόδους: Power και half_swarm_pop. Αρχικοποιεί τις μεταβλητές και δημιουργεί την αρχική κατάσταση του σμήνους εάν το σμήνος είναι άδειο ή εάν η σημαία σύγκλισης (convergence_flag) έχει τεθεί σε 1.

Ο κώδικας υπολογίζει τότε το νέο duty cycle με βάση την ταχύτητα. Εάν το άθροισμα των απόλυτων ταχυτήτων είναι μεγαλύτερο από 0,01 πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των σωματιδίων (swarm_pop) ή εάν το άθροισμα είναι μηδέν, αυξάνεται ένας μετρητής (counter). Όταν ο μετρητής φτάσει στο swarm_pop + 2, επανέρχεται στην τιμή 1.

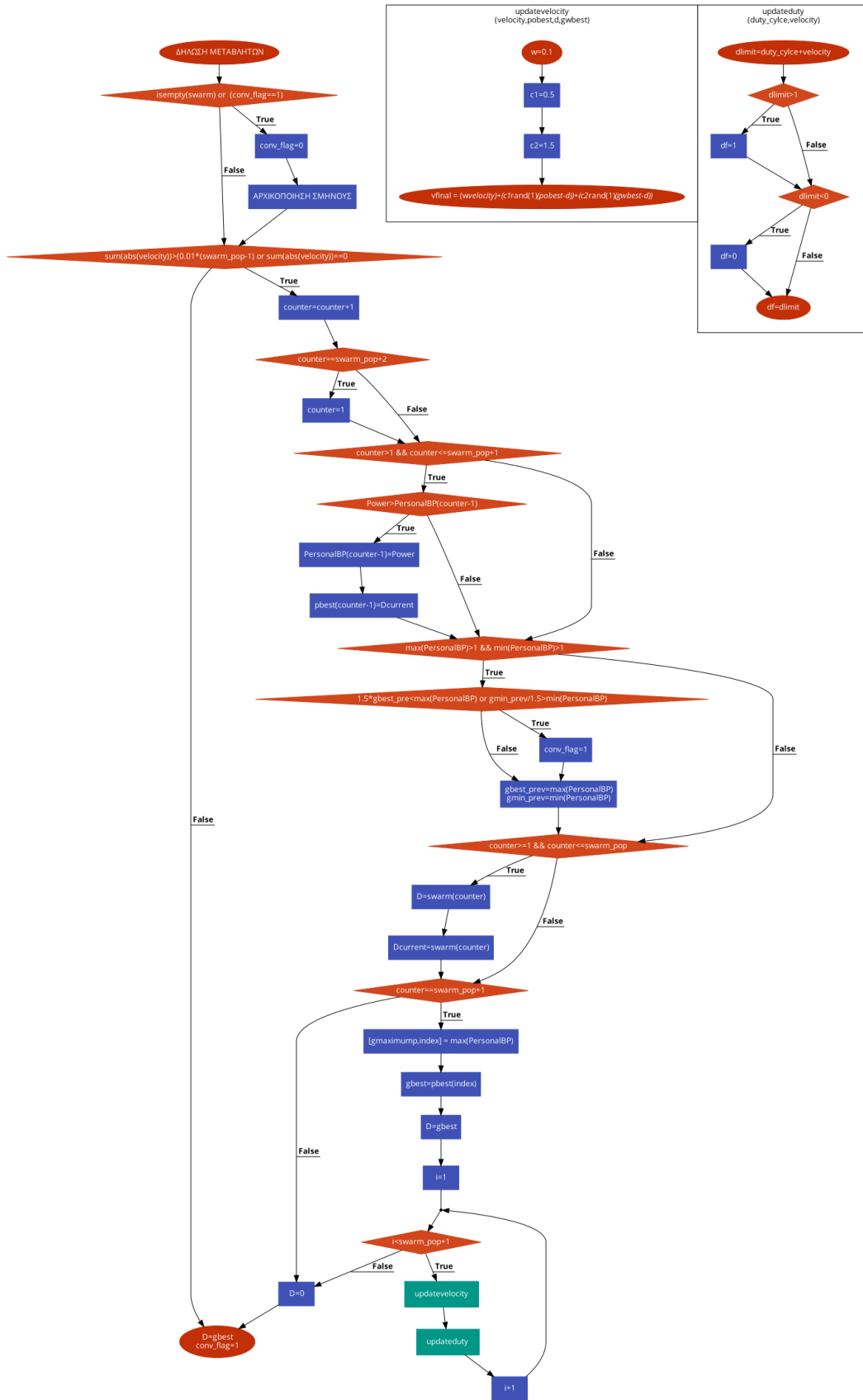
Στη συνέχεια, ο κώδικας ενημερώνει τις καλύτερες προσωπικές θέσεις και τιμές για κάθε σωματίδιο στο σμήνος. Εάν η τρέχουσα τιμή Power είναι μεγαλύτερη από την προσωπική βέλτιστη τιμή (PersonalBP) για ένα σωματίδιο, ενημερώνονται η προσωπική βέλτιστη τιμή και το αντίστοιχο duty cycle (pbest).

Οι προσωρινές μεταβλητές gbest_prev και gmin_prev χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των προηγούμενων μεγίστων και ελάχιστων τιμών του σμήνους. Σε περίπτωση που το νέο μέγιστο είναι 50% μεγαλύτερο ή το νέο ελάχιστο είναι 50% μικρότερο, η σημαία σύγκλισης (convergence_flag) θα τεθεί σε 1.

Έπειτα, ο κώδικας καθορίζει το duty cycle για κάθε σωματίδιο στο σμήνος. Εάν ο μετρητής είναι μεταξύ 1 και swarm_pop, το duty cycle ορίζεται στην αντίστοιχη τιμή του πίνακα swarm. Εάν ο μετρητής είναι swarm_pop + 1, προσδιορίζεται η παγκόσμια βέλτιστη θέση και δείκτης με βάση τις προσωπικές βέλτιστες τιμές. Στη συνέχεια, ενημερώνεται η ταχύτητα κάθε σωματιδίου χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση updatevelocity, και ενημερώνεται το duty cycle χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση updateduty.

Τέλος, εάν ο μετρητής δεν είναι εντός του αναμενόμενου εύρους, το duty cycle D ορίζεται σε 0. Εάν η σημαία σύγκλισης είναι τεθειμένη, το duty cycle D ορίζεται στο παγκόσμιο βέλτιστο duty cycle gbest.

Η συνάρτηση updatevelocity υπολογίζει την ταχύτητα ενός σωματιδίου με βάση την τρέχουσα ταχύτητα, την καλύτερη προσωπική θέση και την καλύτερη παγκόσμια θέση [67]. Η συνάρτηση updateduty εφαρμόζει όρια στο duty cycle, εξασφαλίζοντας ότι παραμένει εντός του διαστήματος από 0 έως 1.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO)

4.3.5 Σενάρια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Προκειμένου να υφίσταται μια καθολική παρατήρηση της συμπεριφοράς της Φ/Β συστοιχίας, γίνεται η επιλογή των ακόλουθων σετ μετρήσεων σε ποικίλες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας.

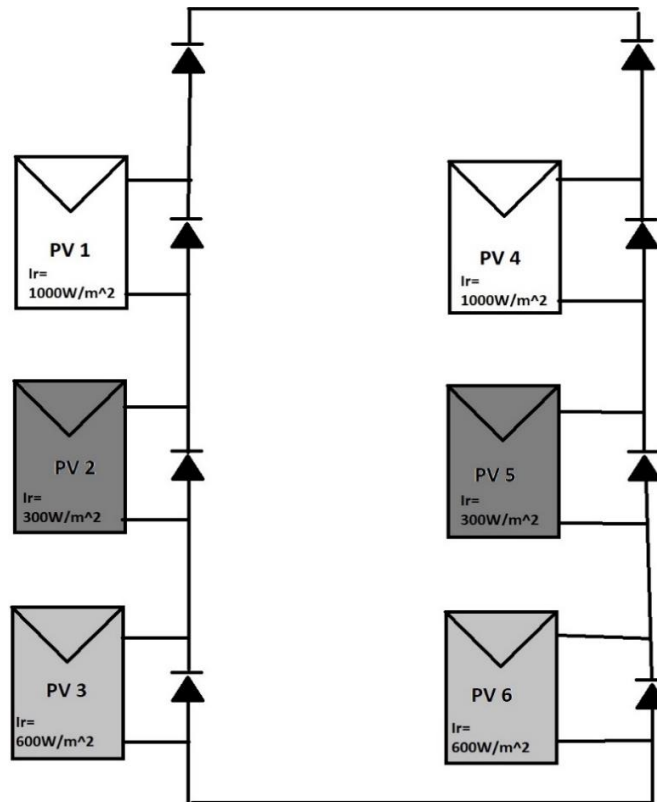
Σταθερή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία 25°C .

Στο σενάριο 1, υπάρχει πλήρης ηλιοφάνεια με σταθερή ακτινοβολία $PV1=PV2=PV3=PV4=PV5=PV6=1000 \text{ W/m}^2$ και σταθερή θερμοκρασία 25°C .

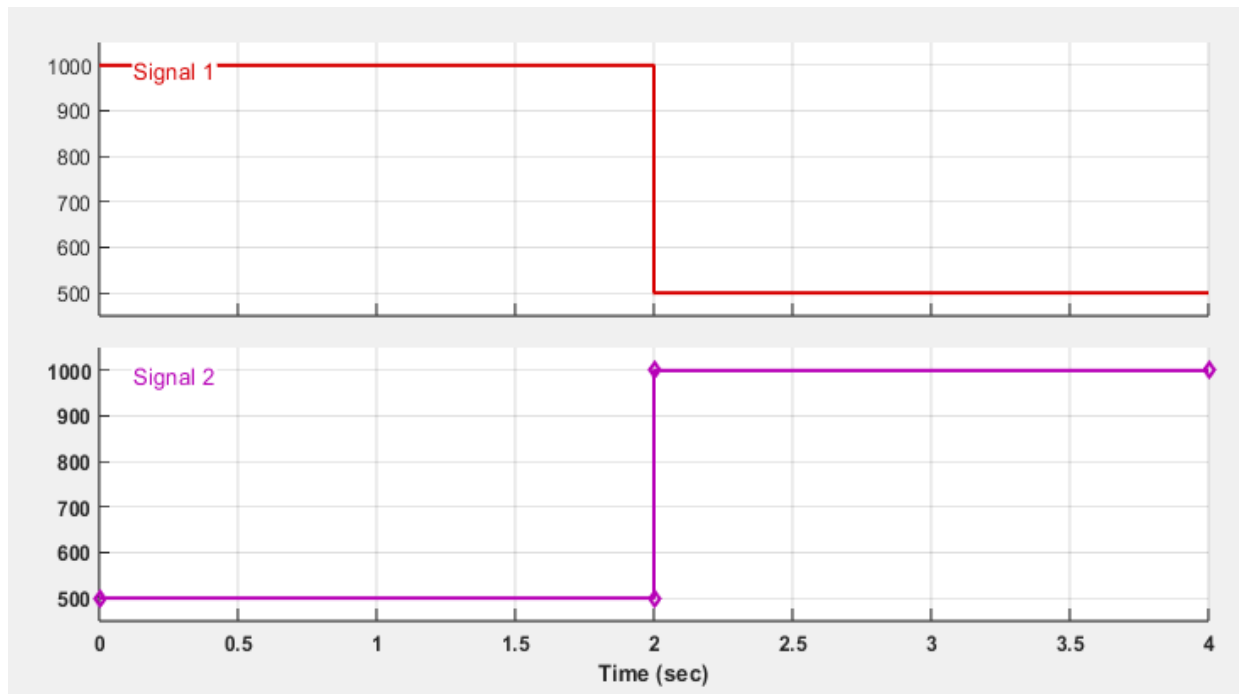
Στο σενάριο 2, υπάρχει μεταβαλλόμενη ακτινοβολία $PV1=PV2=PV3=PV4=PV5=PV6=500\text{W}-1000\text{W/m}^2$ με χρήση signal builder και σταθερή θερμοκρασία 25°C .

Στο σενάριο 3, μεταβαλλόμενη ακτινοβολία $PV1=PV2=PV3=PV4=PV5=PV6=1000\text{W}-500\text{W/m}^2$ με χρήση signal builder και σταθερή θερμοκρασία 25°C .

Ενώ, στο σενάριο 4 (Σχήμα 4.7) προσομοιώνεται ένα σενάριο μερικής σκίασης 3 κορυφών με σταθερή ακτινοβολία $PV1=PV4=1000 \text{ W/m}^2$, $PV2=PV5=300 \text{ W/m}^2$, $PV3=PV6=600 \text{ W/m}^2$ και σταθερή θερμοκρασία 25°C .



Σχήμα 4.7: Σενάριο 4, μερική σκίαση, σταθερή ακτινοβολία $PV1=PV4=1000 \text{ W/m}^2$, $PV2=PV5=300 \text{ W/m}^2$, $PV3=PV6=600 \text{ W/m}^2$ και σταθερή θερμοκρασία 25°C



Σχήμα 4.8: Σήματα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας ως είσοδος της Φ/Β συστοιχίας, με χρήση signal builder

Στο Σχήμα 4.8 εμφανίζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδος της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Για το σενάριο 2 (signal 2), τη χρονική στιγμή $t=2s$, η ακτινοβολία μεταβάλλεται απότομα από τα 500 W/m^2 στα 1000 W/m^2 . Για το σενάριο 3 (signal 1), τη χρονική στιγμή $t=2s$, η ακτινοβολία μεταβάλλεται απότομα από τα 1000 W/m^2 στα 500 W/m^2 .

Για τα ανωτέρω σετ συνθηκών λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, προσομοιώνεται ο καθένας αλγόριθμος μεμονωμένα, προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του.

4.4 Επίλογος

Το MATLAB Simulink παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν μοντέλα πολύπλοκων συστημάτων γρήγορα και εύκολα. Το Simulink χρησιμοποιείται ευρέως στον ακαδημαϊκό χώρο και τη βιομηχανία, για έρευνα, ανάπτυξη και δοκιμή συστημάτων σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, τα συστήματα ελέγχου, οι επικοινωνίες και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Το MATLAB Simulink αποδεικνύεται ένα χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό και τη δοκιμή αλγορίθμων MPPT και μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Συνοψίζοντας, η ανάλυση του μοντέλου Simulink προσφέρει μια λεπτομερή ματιά στα διάφορα μέρη του συστήματος. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αναπαράγεται με τη χρήση του block "pv array" (Simulink) και αποτελείται από δύο παράλληλα συνδεδεμένες φωτοβολταϊκές πλαισιοσειρές. Για να εξεταστεί η συμπεριφορά του κάθε αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT), εφαρμόζονται διάφορα σενάρια ηλιακής ακτινοβολίας. Η ανάλυση του συγκεκριμένου μοντέλου σκοπό έχει την ανάδειξη του βέλτιστου αλγορίθμου σε κάθε ένα από αυτά τα σενάρια.

Κεφάλαιο 5

5. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

5.1 Εισαγωγή

Για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα, αρχικά πραγματοποιείται μια καταγραφή των θεωρητικών τιμών ισχύος και τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Με αυτές τις τιμές ως αναφορά, είναι δυνατόν να συγκριθούν οι αλγόριθμοι MPPT όσον αφορά την ταχύτητα και την ακρίβεια σύγκλισής τους στο MPP.

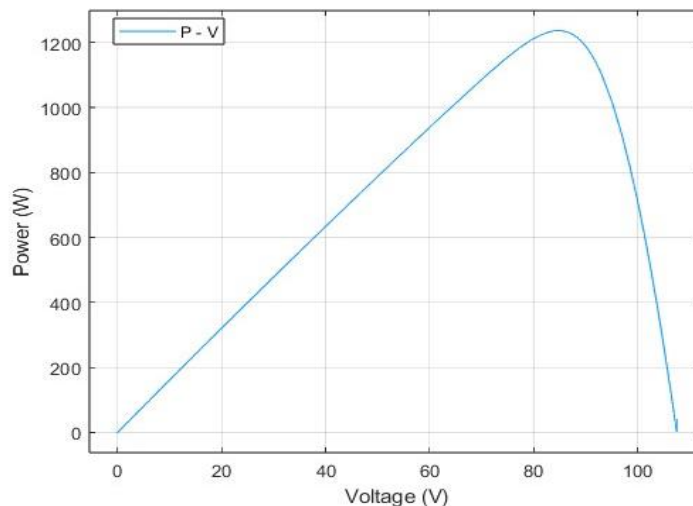
5.2 Θεωρητικές τιμές

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης που προκύπτουν από όλα τα σενάρια σκίασης.

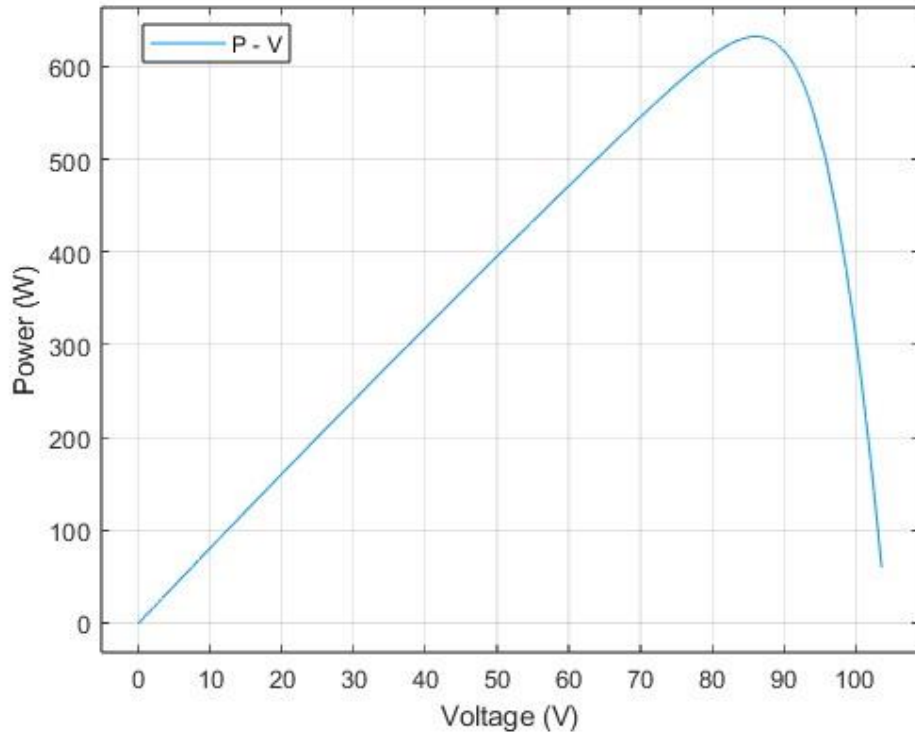
5.2.1 Θεωρητικές τιμές συνθηκών ομοιόμορφης ακτινοβολίας

Κατ' αρχάς, εμφανίζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης κάτω από συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και τα σημεία P_{mpp} και V_{mpp} για κάθε περίπτωση.

Στο Σχήμα 5.1 παρατίθεται η θεωρητική γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ ισχύος και τάσης για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C , με $P_{mpp}=1236.41 \text{ W}$ και $V_{mpp}=84.8403 \text{ V}$.



Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 1000 W/m^2 (σενάριο 1)



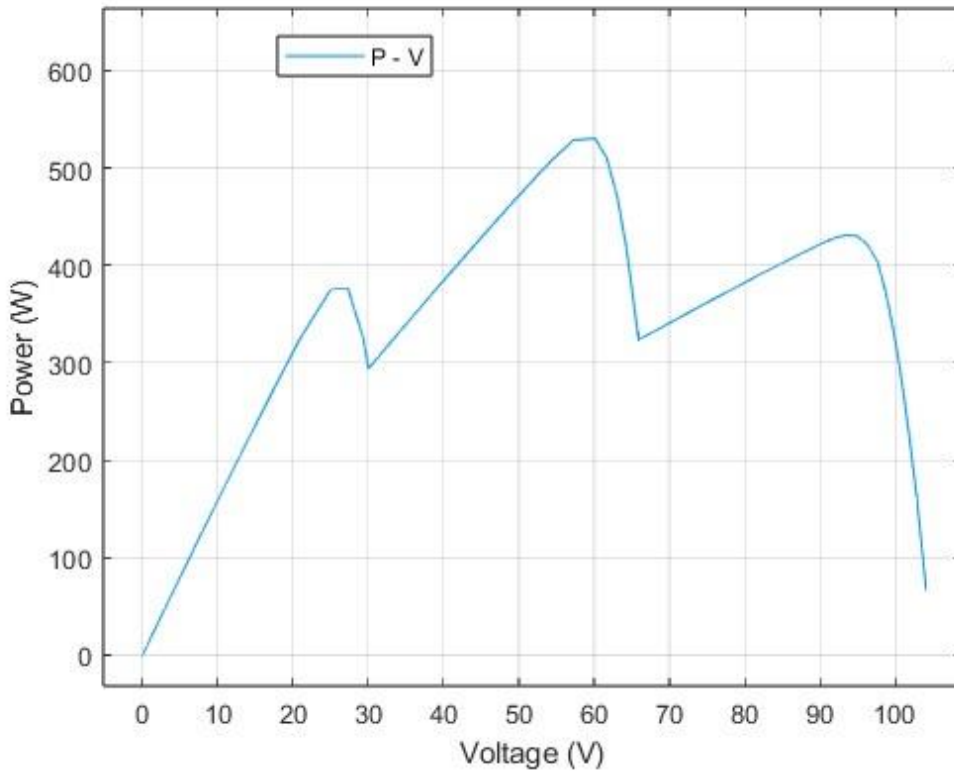
Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 500 W/m^2 (σενάριο 2-3)

Στο Σχήμα 5.2 εμφανίζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για ακτινοβολία 500 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C , με $P_{\text{mpp}}=632.138 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=86.3058 \text{ V}$.

5.2.2 Θεωρητικές τιμές συνθηκών μερικής σκίασης

Στο επόμενο βήμα, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης σε συνθήκες μερικής σκίασης και τα σημεία P_{mpp} και V_{mp} όπως και τα τοπικά μέγιστα.

Στο Σχήμα 5.3 (σελ.69), φαίνεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για συνθήκες μερικής σκίασης $PV1=PV4=1000\text{W/m}^2$, $PV2=PV5=300\text{W/m}^2$, $PV3=PV6=600\text{W/m}^2$ και σταθερή θερμοκρασία 25°C (σενάριο 4), με $P_{\text{mpp}}=530.362\text{W}$ και $V_{\text{mpp}}=60.1127\text{V}$. Το πρώτο τοπικό μέγιστο βρίσκεται στα αριστερά του G_{mpp} , με $P_{\text{Impp}1}=375.505\text{W}$ και $V_{\text{Impp}1}=27.3287\text{V}$, ενώ το δεύτερο στα δεξιά του ολικού μεγίστου, με $P_{\text{Impp}2}=431.164\text{W}$ και $V_{\text{Impp}2}=93.5471\text{V}$. Είναι άξιο αναφοράς ότι το ολικό μέγιστο βρίσκεται αριστερά του τοπικού μεγίστου.



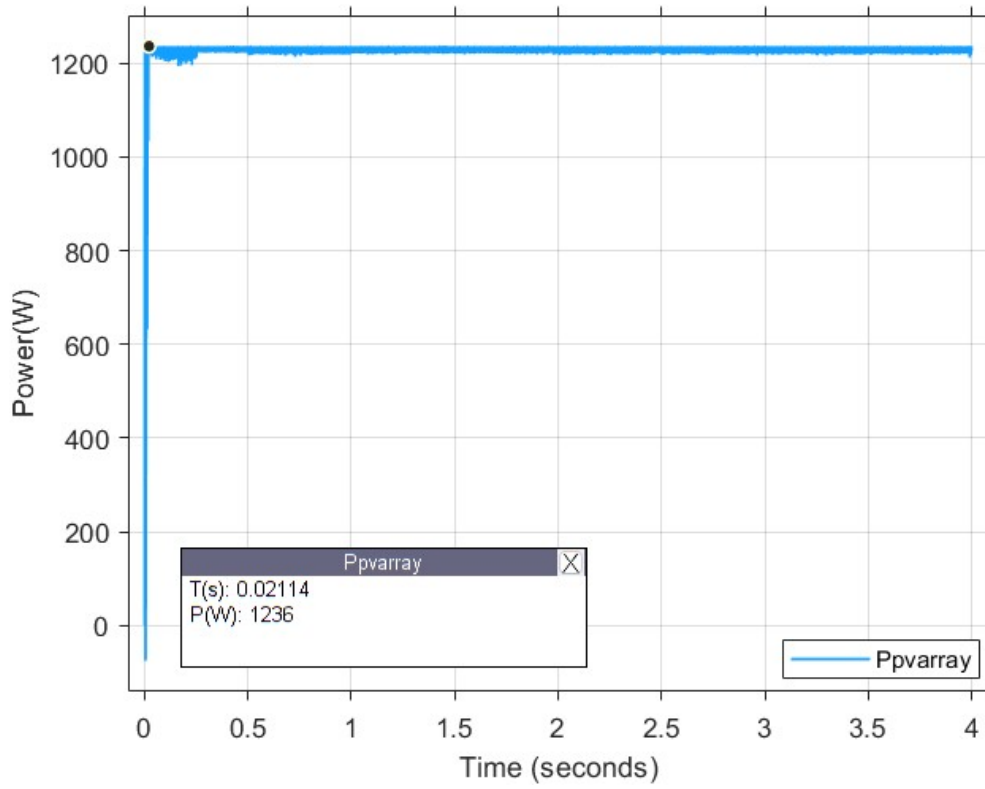
Σχήμα 5.3: Χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης σε συνθήκες μερικής σκίασης $PV1=PV4= 1000W/m^2$, $PV2=PV5=300W/m^2$ $PV3=PV6=600W/m^2$ και σταθερή θερμοκρασία $25^{\circ}C$ (σενάριο 4)

5.3 Προσομοίωση τεχνικής P&O

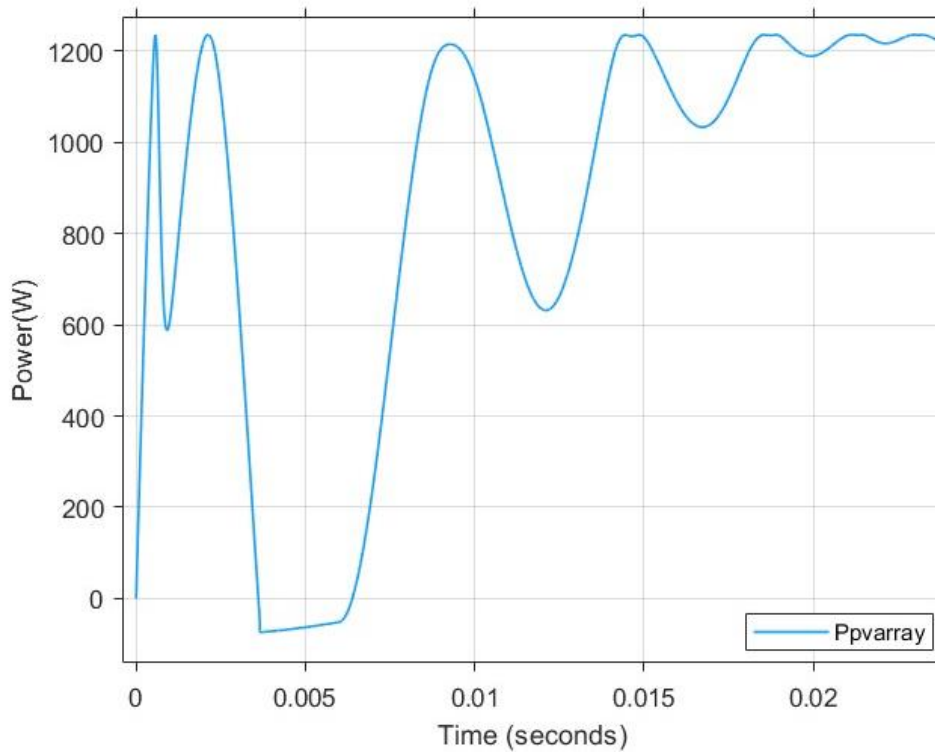
Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης που προκύπτουν από τη προσομοίωση, με χρήση της τεχνικής Perturb & Observe (P&O), για όλα τα σενάρια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

5.3.1 Αποτελέσματα υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία

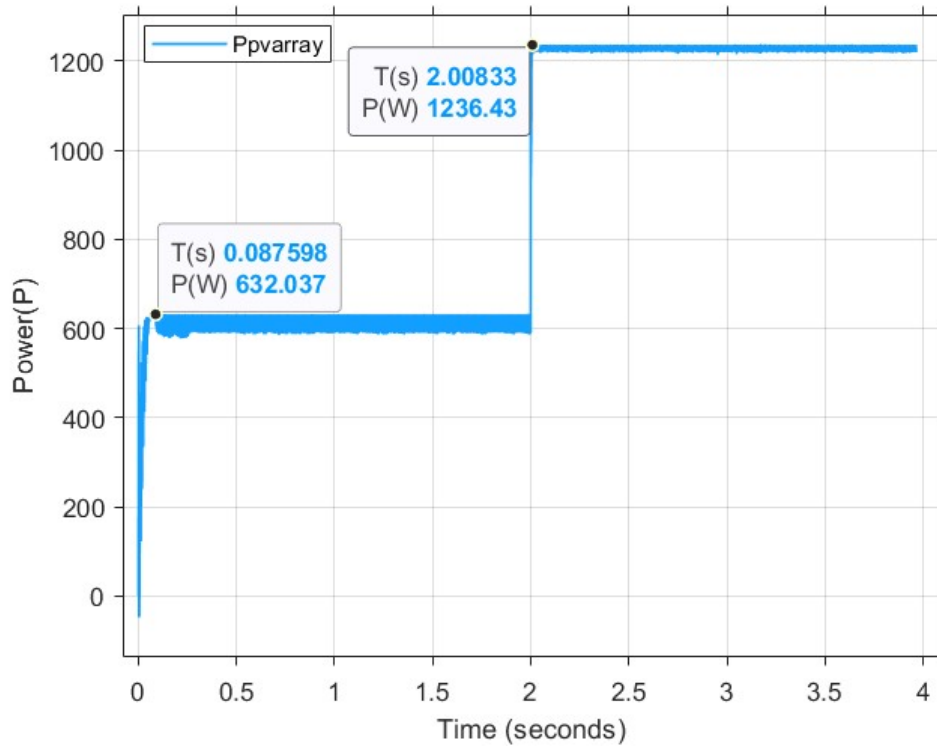
Κατ' αρχάς, για την τεχνική Perturb & Observe (P&O) εμφανίζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου βασισμένα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό ομοιόμορφη σταθερή, αλλά και μεταβαλλόμενη, ακτινοβολία βάσει των σετ μετρήσεων που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.5.



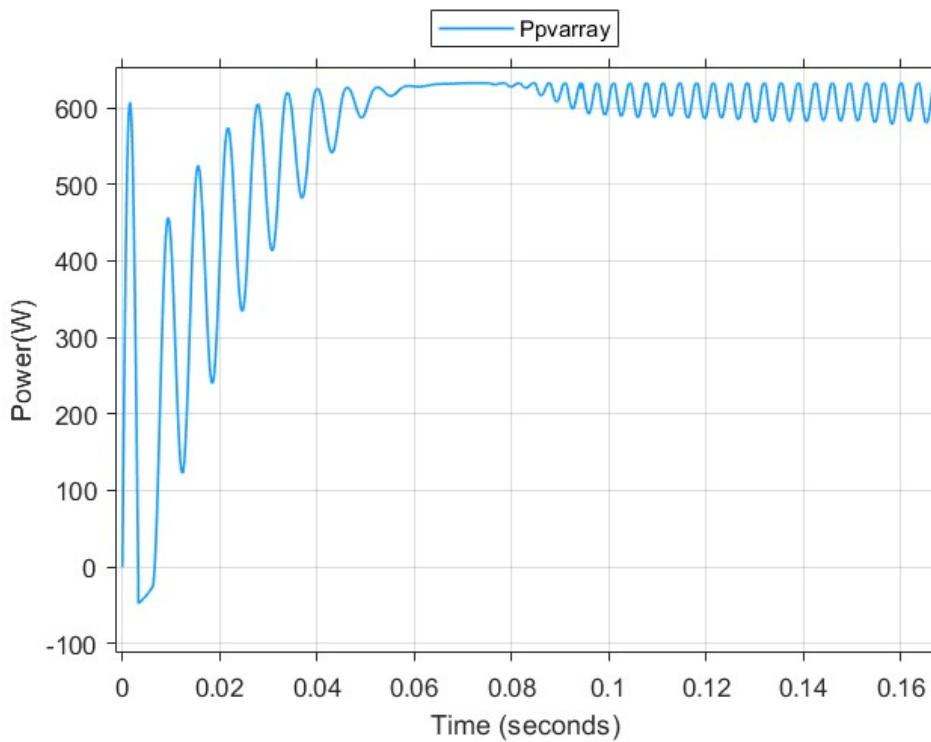
Σχήμα 5.4.: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο P&O για το σενάριο ακτινοβολίας 1



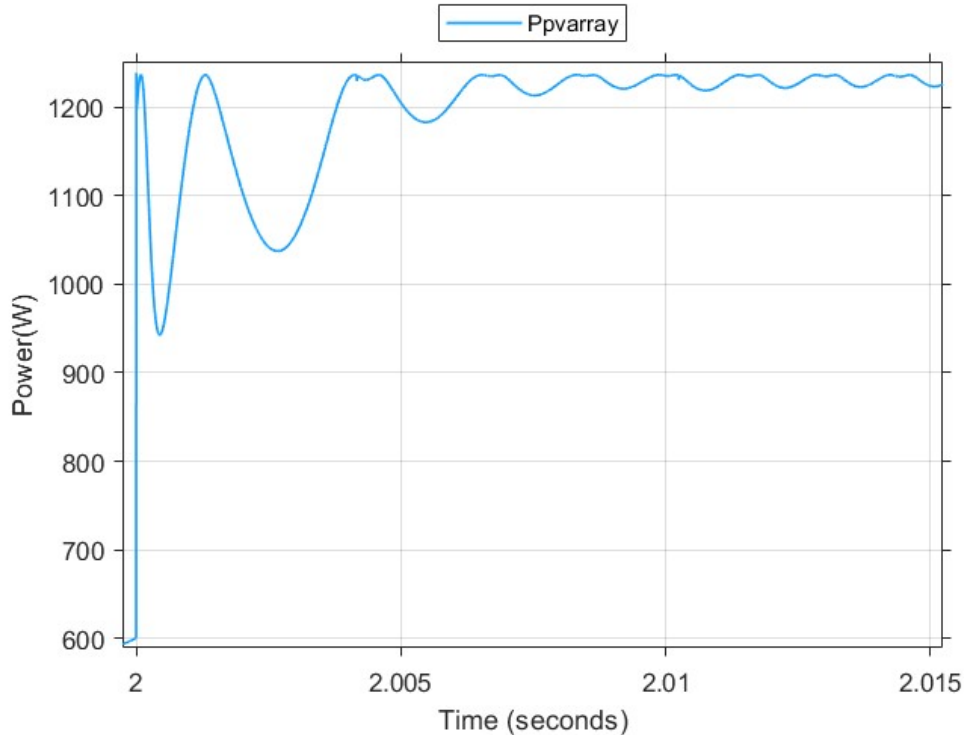
Σχήμα 5.5: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 1)



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο P&O για το σενάριο ακτινοβολίας 2



Σχήμα 5.7: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 2)

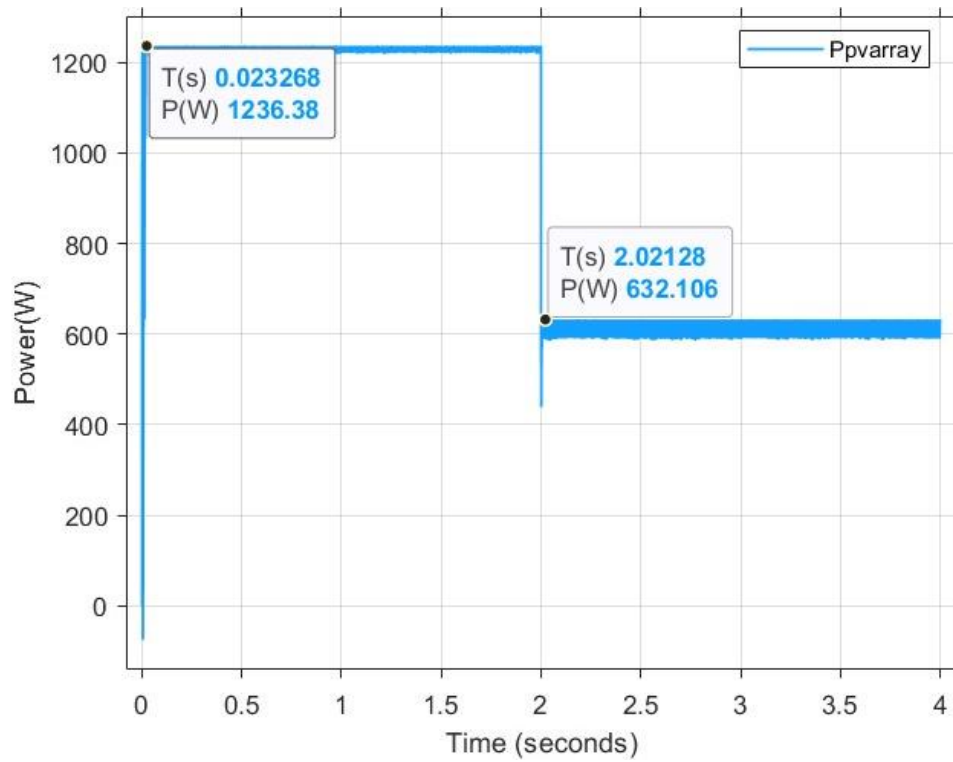


Σχήμα 5.8: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 2)

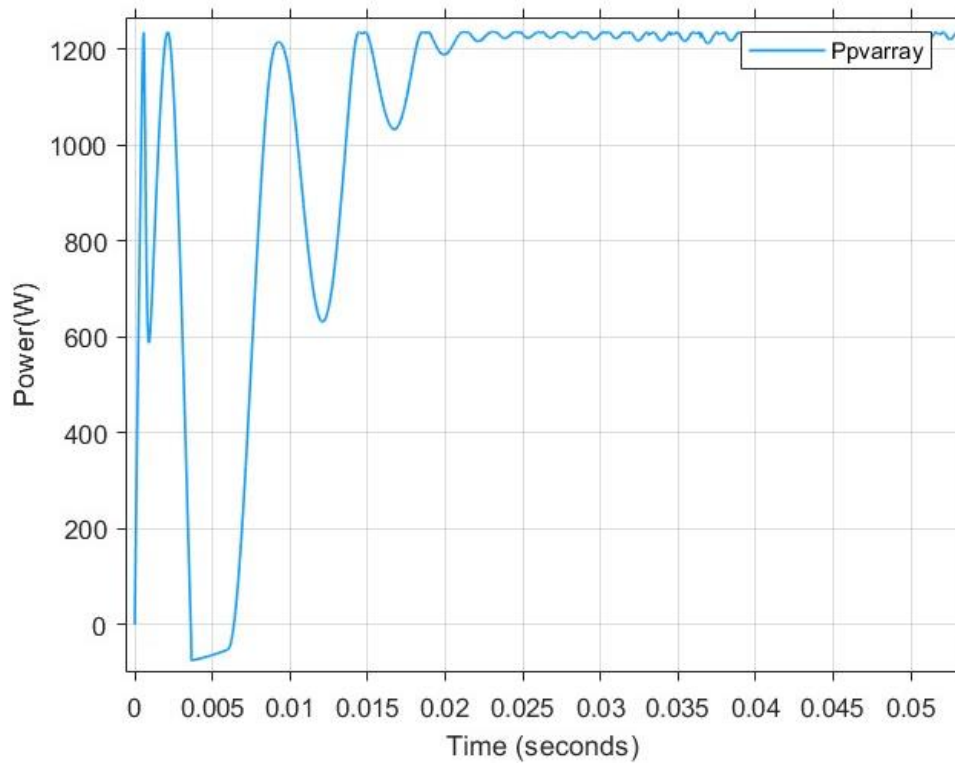
Από τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου προκύπτει η απόδοση του Φ/Β συστήματος με τη χρήση της τεχνικής αναζήτησης MPP, Perturb & Observe (P&O).

Στο Σχήμα 5.4 (σελ. 70) παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 1, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με $P_{mpp}=1236W$ σε $Time=0.02114s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στο Σχήμα 5.5 (σελ. 70) εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP.

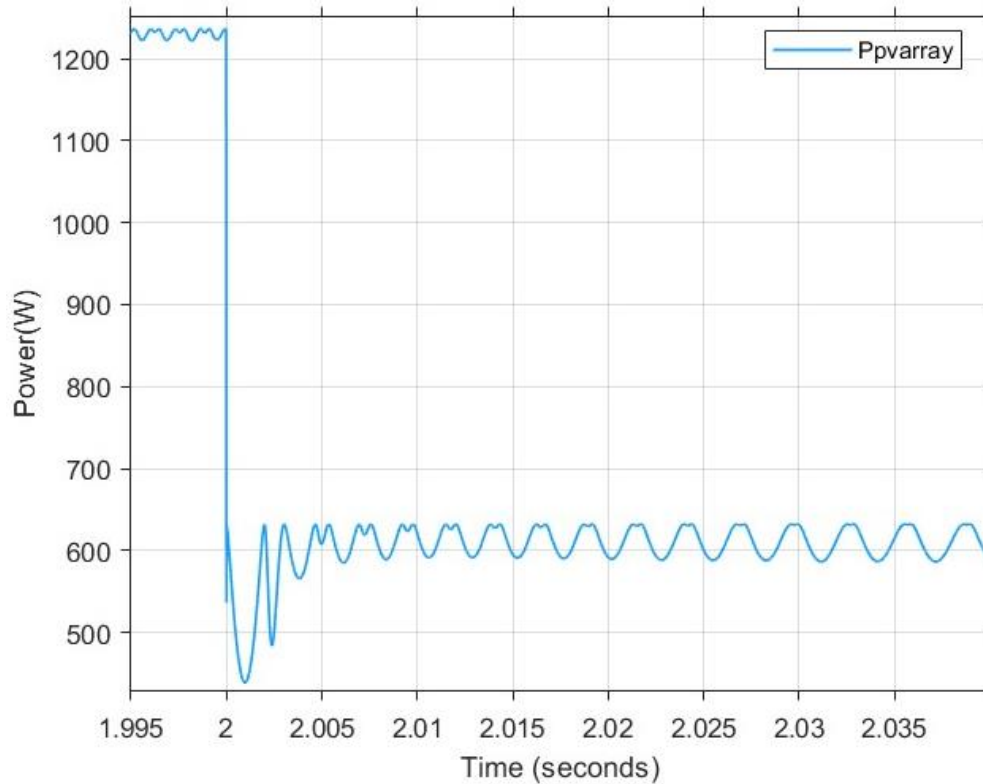
Στο Σχήμα 5.6 (σελ. 71) εμφανίζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 2, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για $Time=0s-2s$)= $632.037W$ σε $Time$ (Για $Time=0s-2s$)= $0.087598s$ και μετά την ξαφνική αλλαγή στην ακτινοβολία, συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για $Time=2s-4s$)= $1236.43W$ σε $Time$ (Για $Time=2s-4s$)= $0.00833s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στα Σχήματα 5.7 (σελ. 71) και 5.8, εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP, για $Time=0s-2s$ και για $Time=2s-4s$ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο P&O για το σενάριο ακτινοβολίας 3



Σχήμα 5.10: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 3)



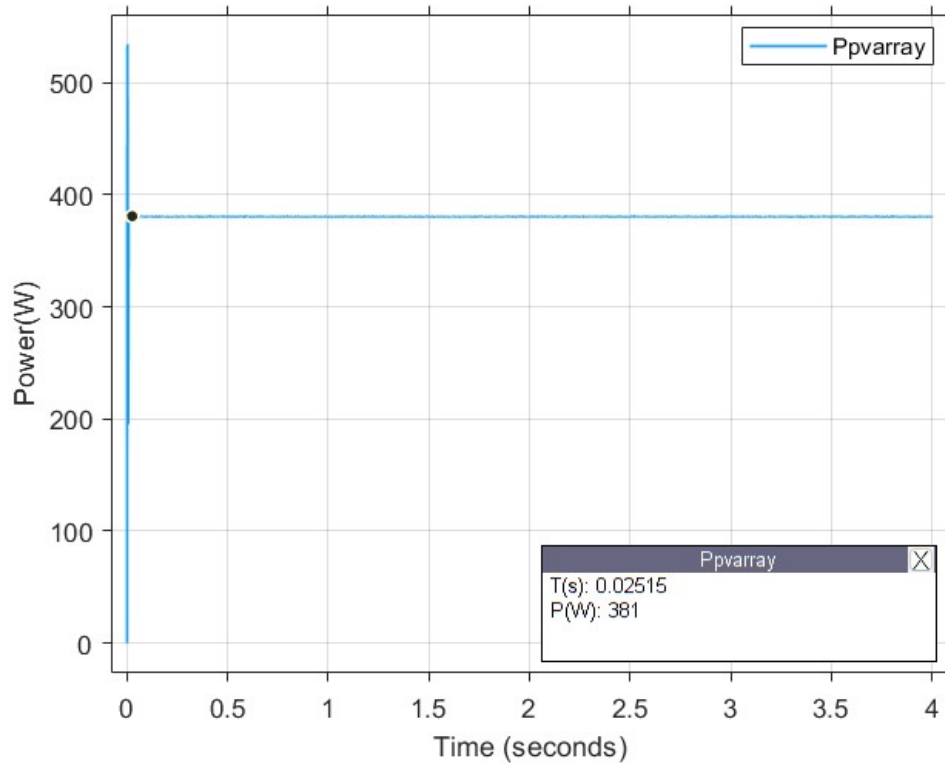
Σχήμα 5.11: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 3)

Στο Σχήμα 5.9 (σελ.73) φαίνεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 3, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=0s-2s)=1236.38W σε Time (Για Time=0s-2s)=0.023268s και μετά την ξαφνική αλλαγή στην ακτινοβολία, συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=2s-4s)=632.106W σε Time (Για Time=2s-4s)= 0.021280s. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στα Σχήματα 5.10 (σελ. 73) και 5.11, εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP, για Time=0s-2s και για Time=2s-4s αντίστοιχα.

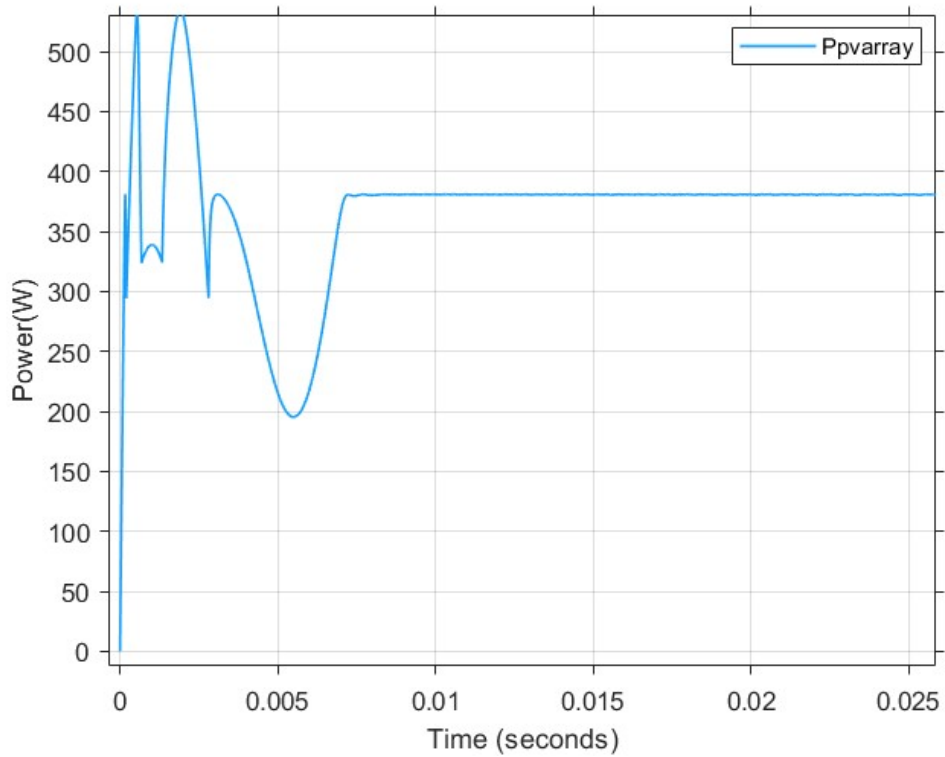
5.3.2 Αποτελέσματα υπό συνθήκες μερικής σκίασης

Στη συνέχεια, για την τεχνική Perturb & Observe (P&O), εμφανίζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου, βασισμένο στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό συνθήκες μερικής σκίασης, βάσει των σετ μετρήσεων που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.5.

Από το διάγραμμα ισχύος-χρόνου φαίνεται η απόδοση του Φ/Β συστήματος με τη χρήση της τεχνικής αναζήτησης MPP, Perturb & Observe (P&O).



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο P&O για το σενάριο ακτινοβολίας 4



Σχήμα 5.13: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου P&O (σενάριο ακτινοβολίας 4)

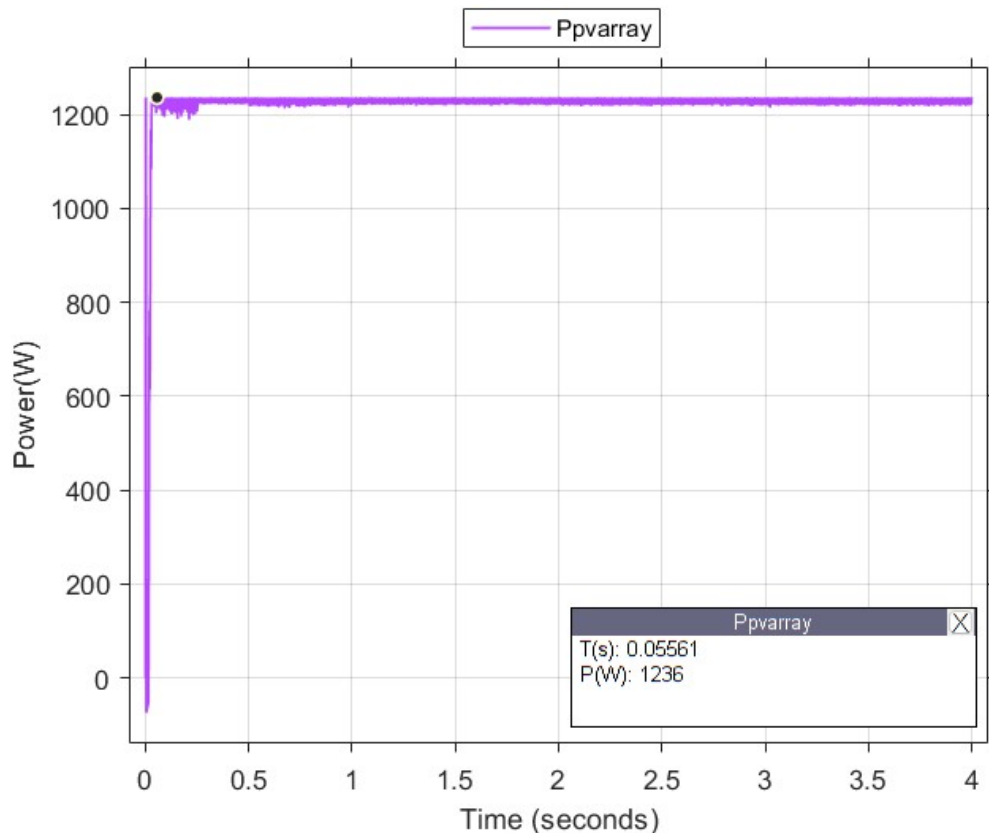
Στο Σχήμα 5.12 (σελ.75) παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 4, στο οποίο ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος άλλα στην περιοχή του πρώτου τοπικού μεγίστου, σύμφωνα με L_{mpp1} από το Σχήμα 5.3 (σελ. 69), με $P_{mpp}=381W$ σε $Time=0.02515s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στο Σχήμα 5.13 (σελ. 75), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP.

5.4 Προσομοίωση τεχνικής INC

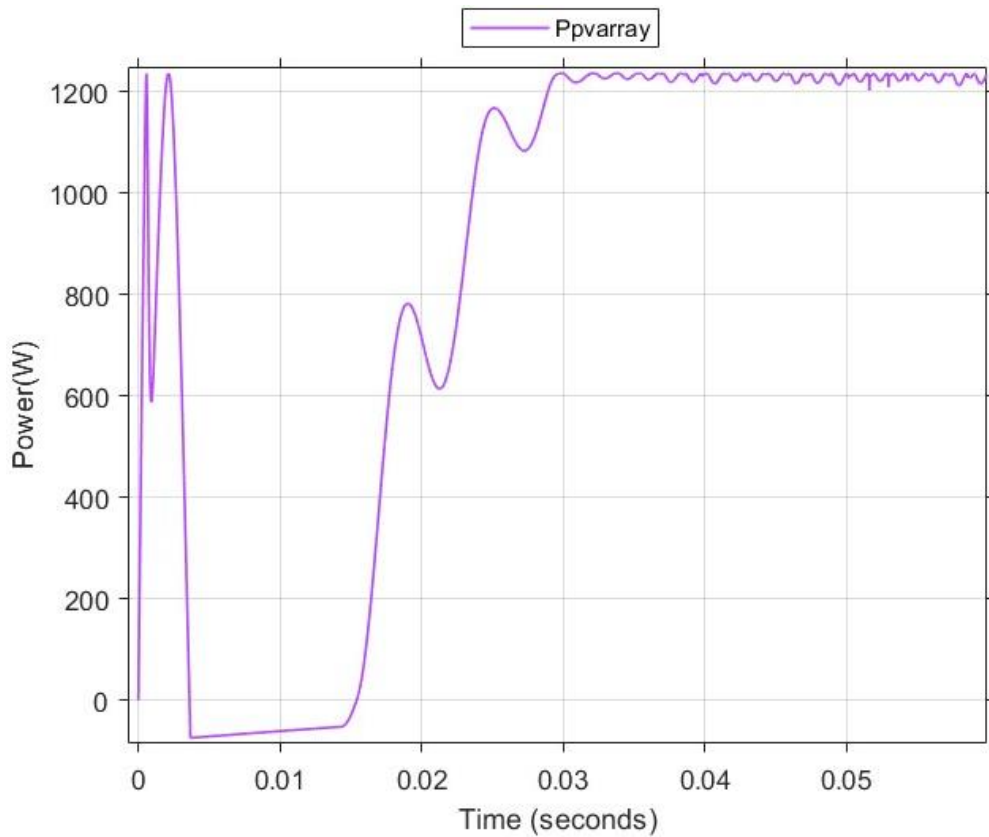
Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης που προκύπτουν από τη προσομοίωση με χρήση της τεχνικής Incremental Conductance (INC), για όλα τα σενάρια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

5.4.1 Αποτελέσματα υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία

Για την τεχνική Incremental Conductance (INC), εμφανίζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου, βασισμένα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό ομοιόμορφη σταθερή -αλλά και μεταβαλλόμενη- ακτινοβολία, βάσει των σετ μετρήσεων που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.5.



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 1

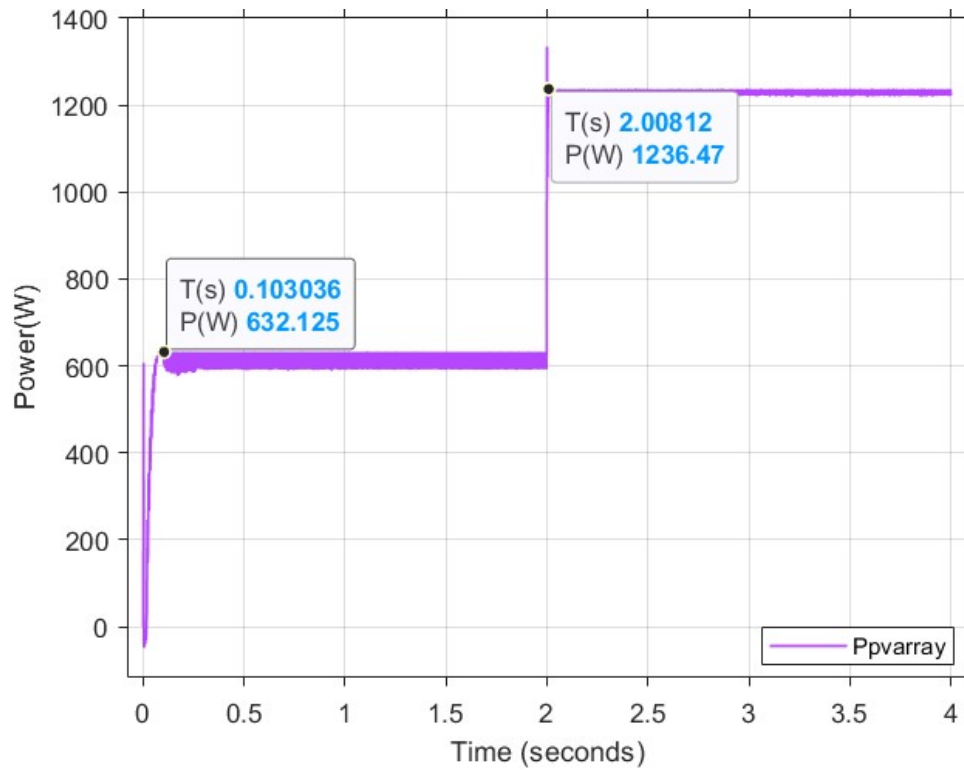


Σχήμα 5.15: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 1)

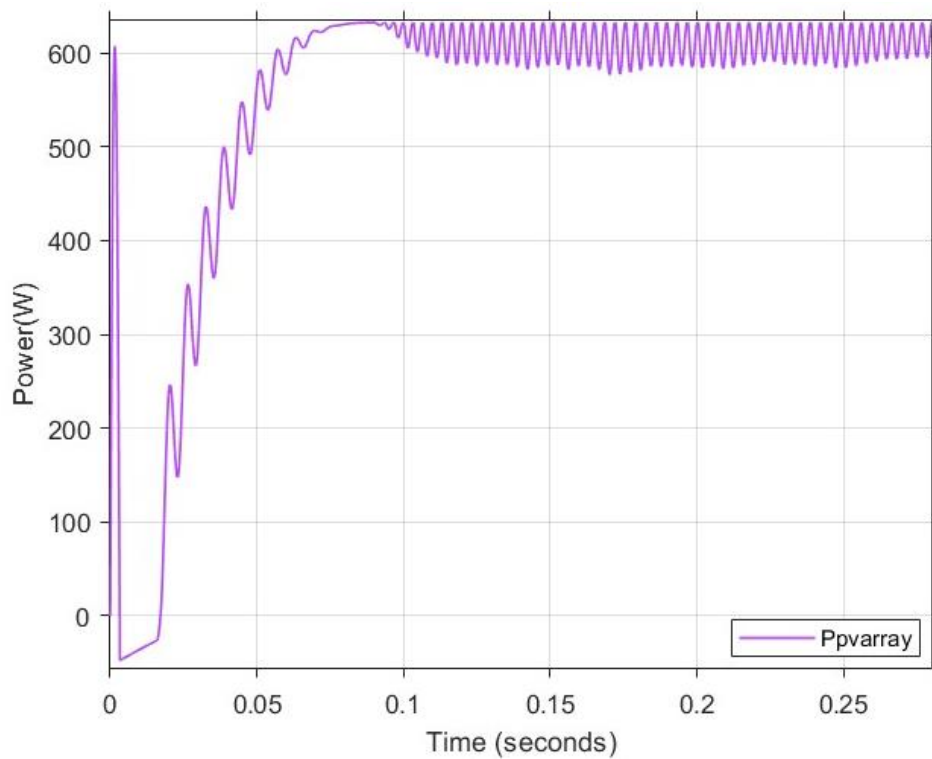
Από τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου φαίνεται η απόδοση του Φ/Β συστήματος με τη χρήση της τεχνικής αναζήτησης MPP, Incremental Conductance (INC).

Στο Σχήμα 5.14 (σελ.76) παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 1, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με $P_{mpp}=1236W$ σε $Time=0.05561s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στο Σχήμα 5.15, εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP.

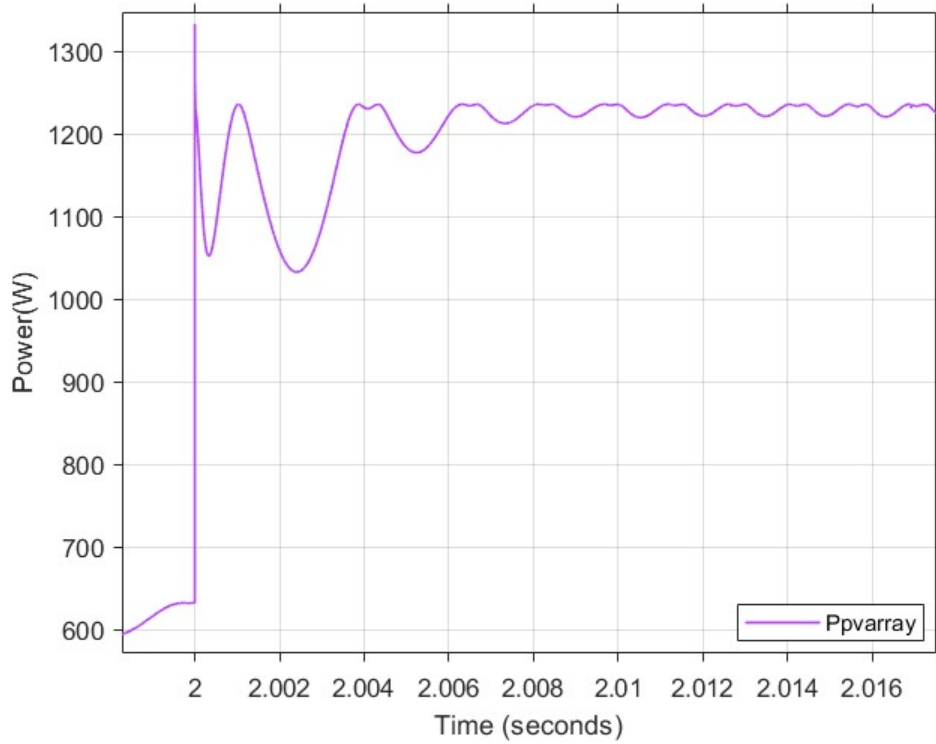
Στο Σχήμα 5.16 (σελ. 78) εμφανίζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 2, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για $Time=0s-2s$)= $632.125W$ σε $Time$ (Για $Time=0s-2s$)= $0.103036s$ και μετά την ξαφνική αλλαγή στην ακτινοβολία, συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για $Time=2s-4s$)= $1236.47W$ σε $Time$ (Για $Time=2s-4s$)= $0.00812s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στα Σχήματα 5.17 (σελ. 78) και 5.18 (σελ. 79), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP, για $Time=0s-2s$ και για $Time=2s-4s$ αντίστοιχα.



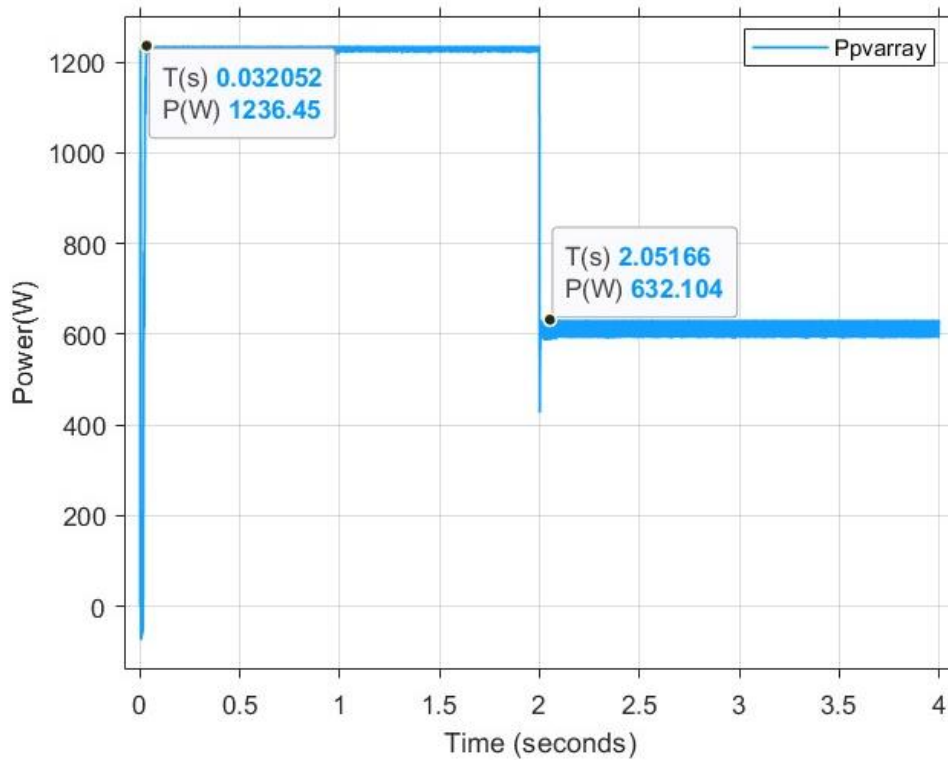
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 2



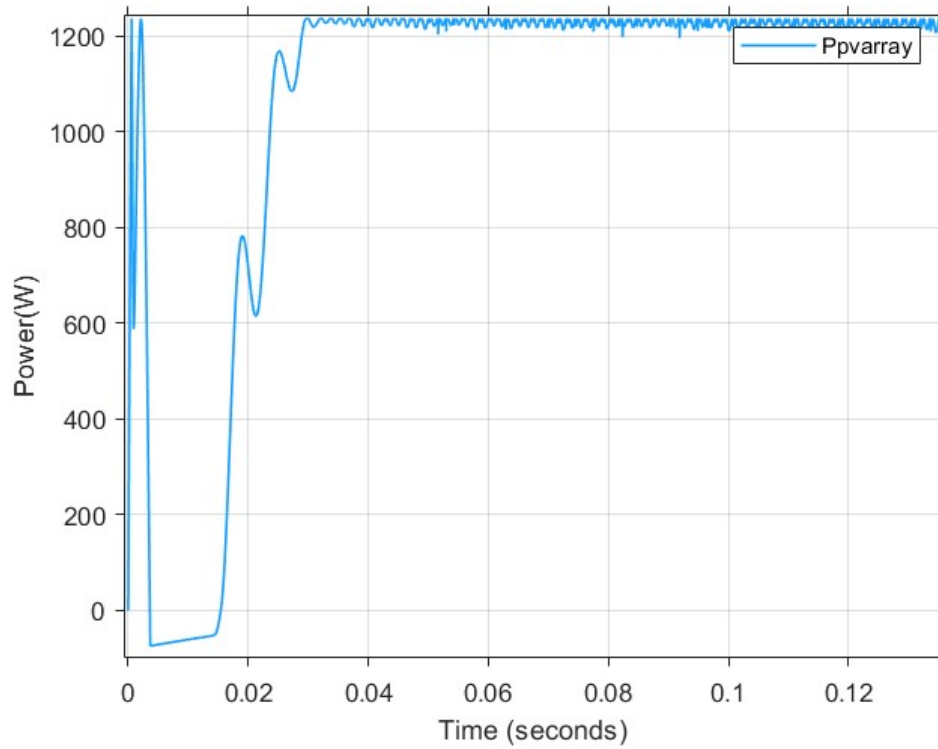
Σχήμα 5.17: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 2)



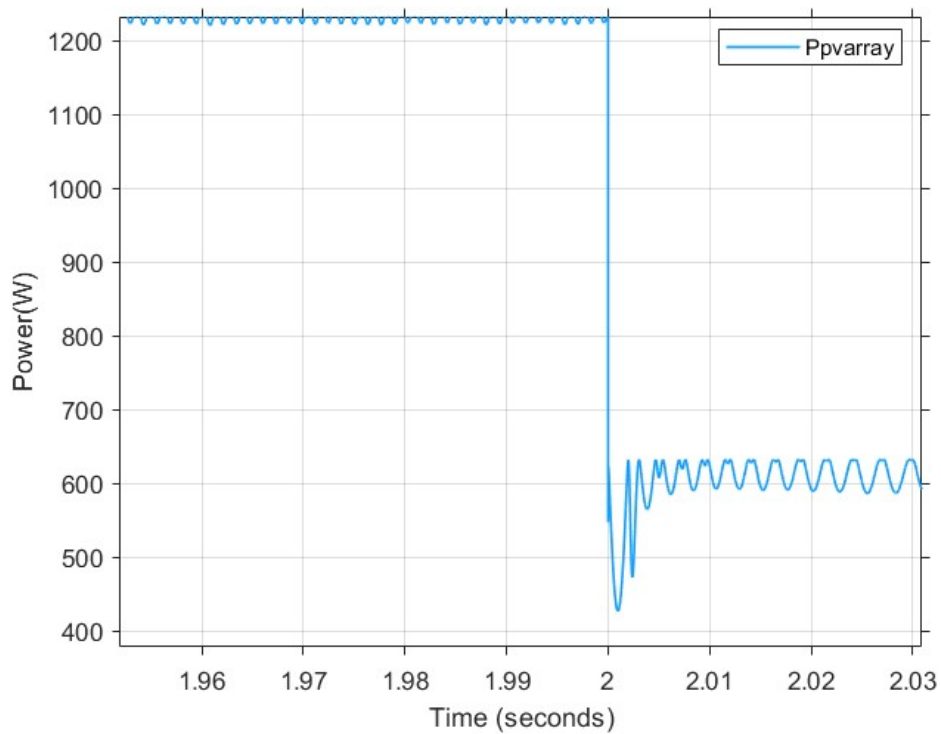
Σχήμα 5.18: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 2)



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 3



Σχήμα 5.20: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 3)



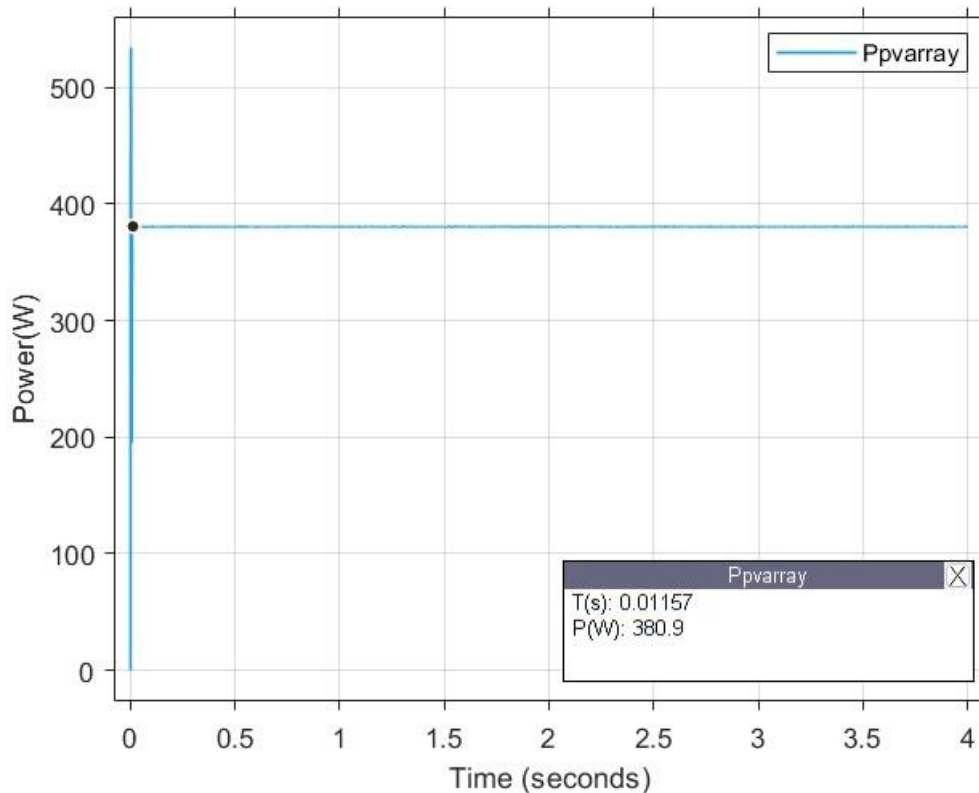
Σχήμα 5.21: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 3)

Στο Σχήμα 5.19 (σελ.79) φαίνεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 3, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=0s-2s)= 1236.45W σε Time (Για Time=0s-2s)=0.032052s και μετά την ξαφνική αλλαγή στην ακτινοβολία, συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=2s-4s)=632.104W σε Time (Για Time=2s-4s)= 0.05166s. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στα Σχήματα 5.20 και 5.21 (σελ. 80), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP, για Time=0s-2s και για Time=2s-4s αντίστοιχα.

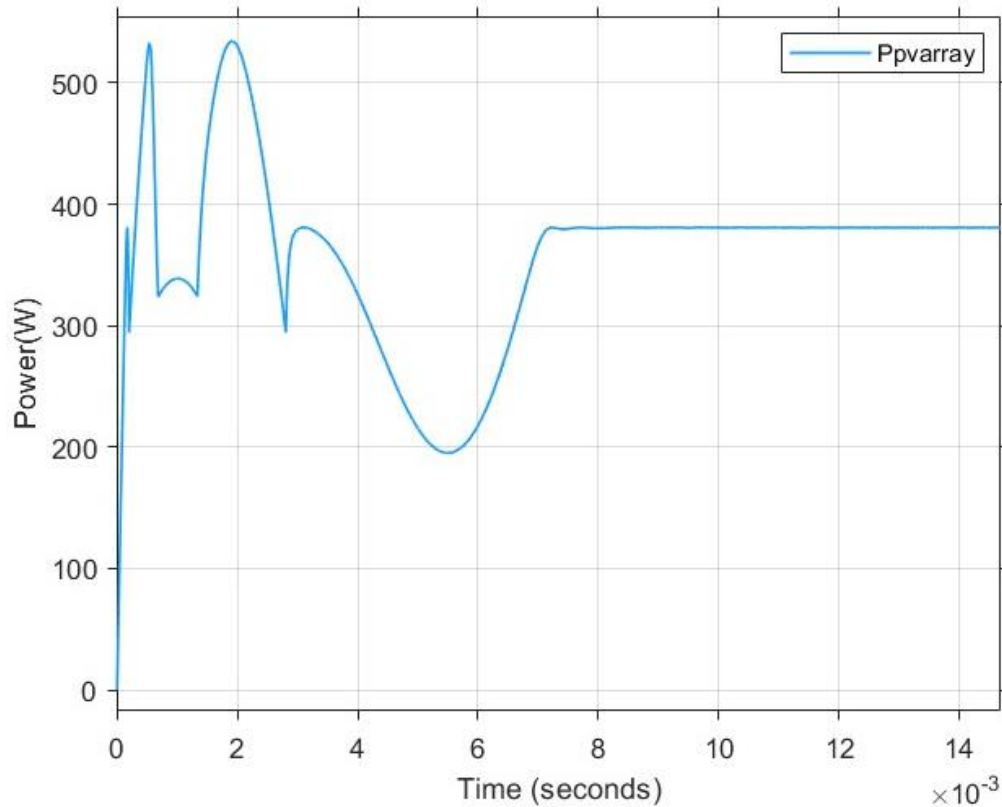
5.4.2 Αποτελέσματα υπό συνθήκες μερικής σκίασης

Στη συνέχεια, για την τεχνική Incremental Conductance (INC), εμφανίζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου, βασισμένο στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό συνθήκες μερικής σκίασης, βάσει των σετ μετρήσεων που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.5.

Από το διάγραμμα ισχύος-χρόνου προκύπτει η απόδοση του Φ/Β συστήματος με τη χρήση της τεχνικής αναζήτησης MPP, Incremental Conductance (INC).



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο INC για το σενάριο ακτινοβολίας 4



Σχήμα 5.23: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου INC (σενάριο ακτινοβολίας 4)

Στο Σχήμα 5.22 (σελ.81) παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο σκίασης 4, στο οποίο ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος αλλά στην περιοχή του πρώτου τοπικού μεγίστου σύμφωνα με L_{mpp1} από το Σχήμα 5.3 (σελ. 69), με $P_{mpp}=380.9W$ σε $Time=0.01157s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στο Σχήμα 5.23, εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP.

5.5 Προσομοίωση τεχνικής PSO

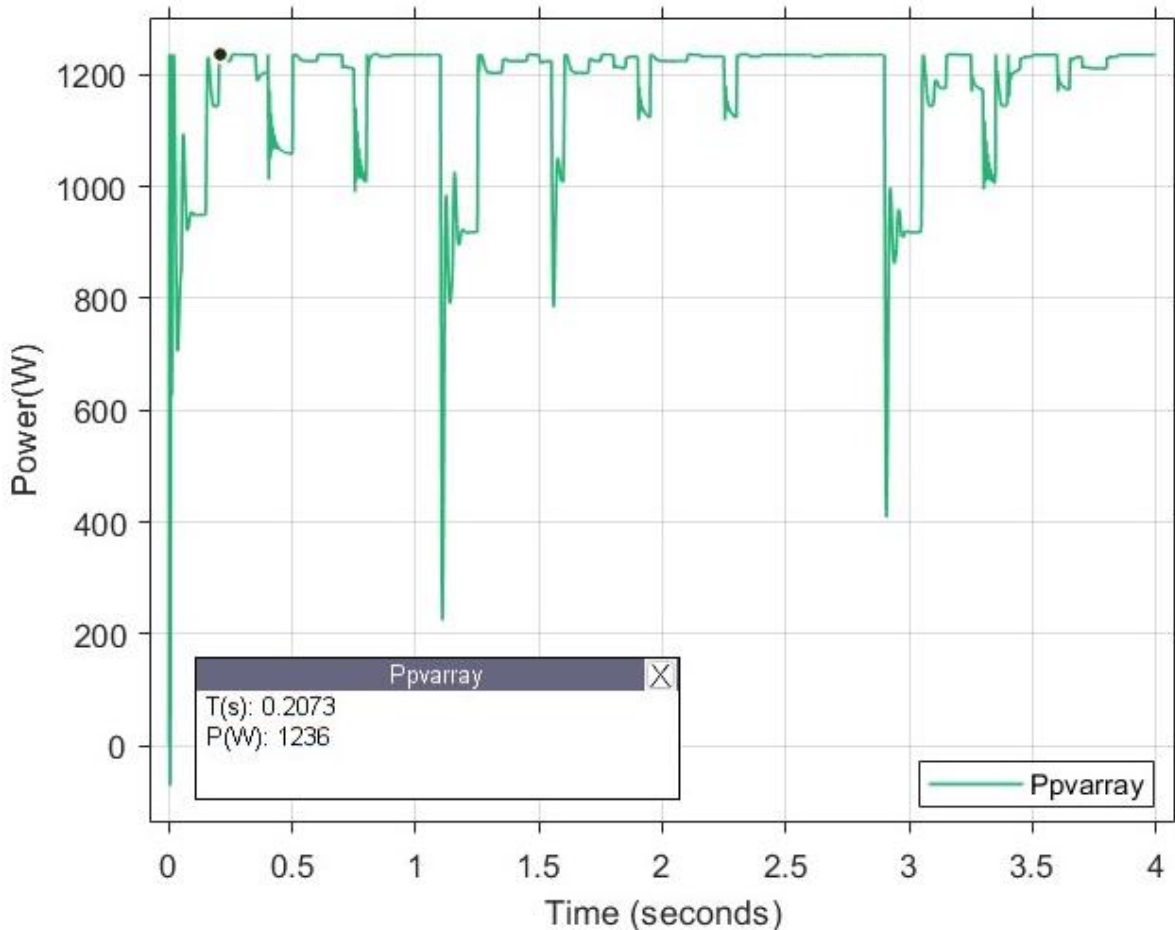
Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης που προκύπτουν από όλα τα σενάρια ακτινοβολίας από τη προσομοίωση, με χρήση της τεχνικής Particle Swarm Optimization (PSO) καθώς και η απεικόνιση της κίνησης των σωματιδίων του σμήνους, για καλύτερη ανάδειξη της λειτουργίας του προτεινόμενου αλγορίθμου.

5.5.1 Αποτελέσματα υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία

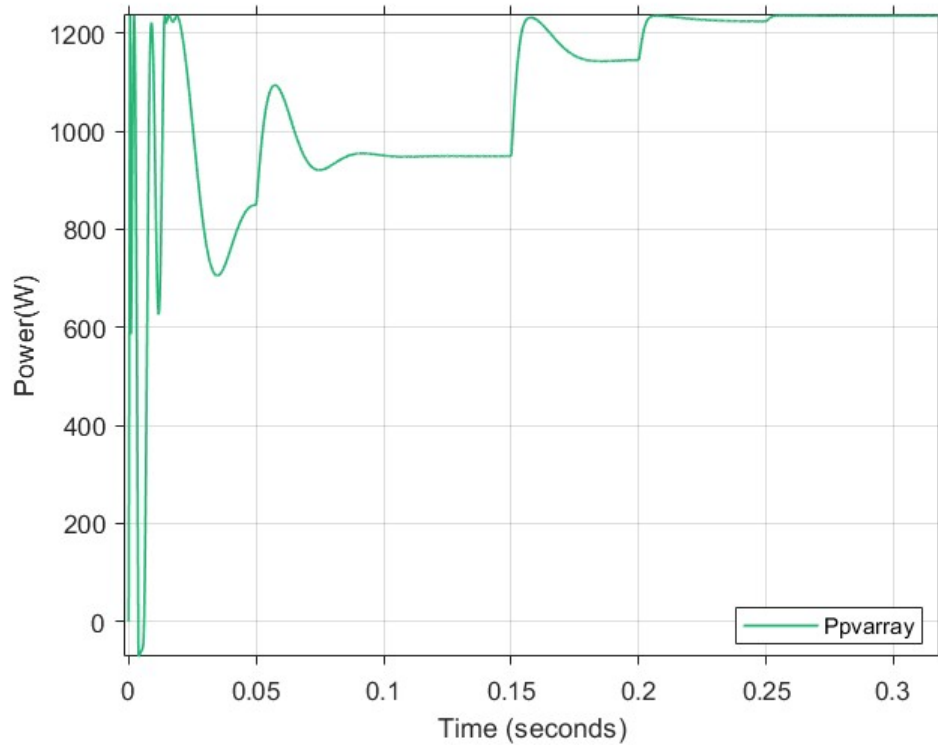
Στην αρχή, για την τεχνική Particle Swarm Optimization (PSO), εμφανίζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου, βασισμένα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό ομοιόμορφη σταθερή -αλλά και μεταβαλλόμενη- ακτινοβολία, βάσει των σετ μετρήσεων που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.5.

Από τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου προκύπτει η απόδοση του Φ/Β συστήματος με τη χρήση της τεχνικής αναζήτησης MPP, Particle Swarm Optimization (PSO).

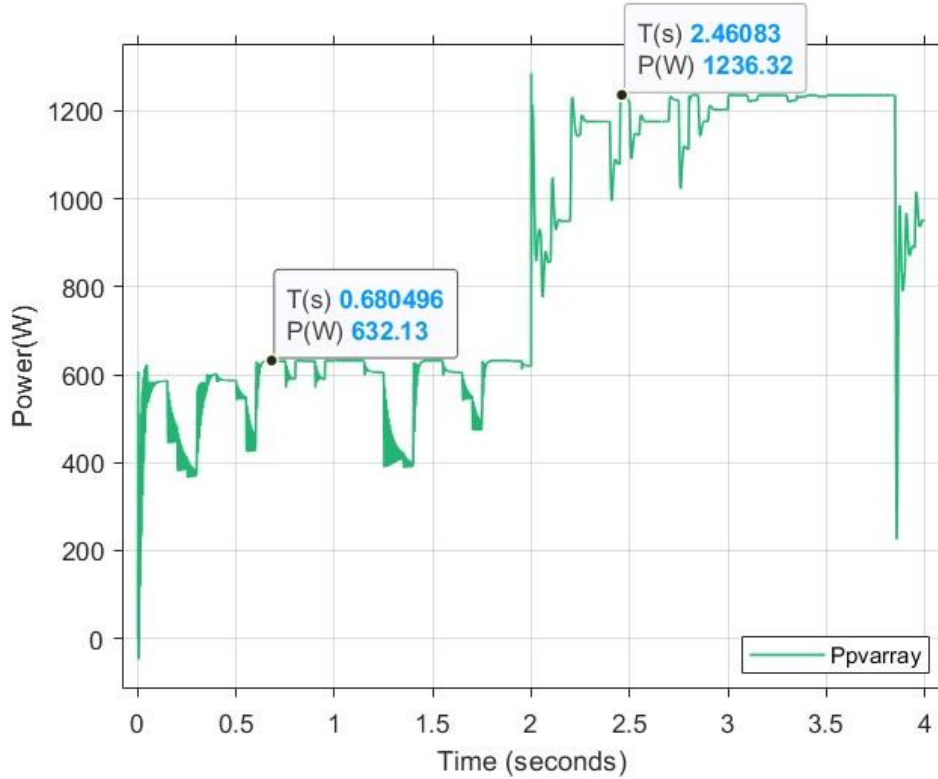
Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 1, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με $P_{mpp}=1236W$ σε $Time=0.2073s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στο Σχήμα 5.25 (σελ. 84), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP.



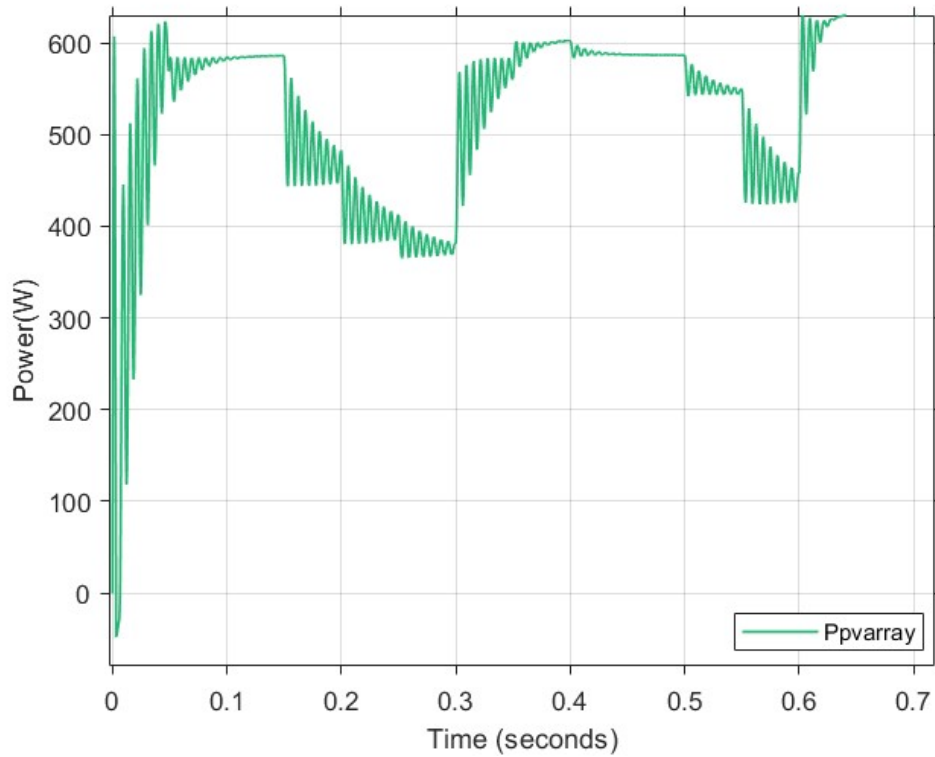
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 1



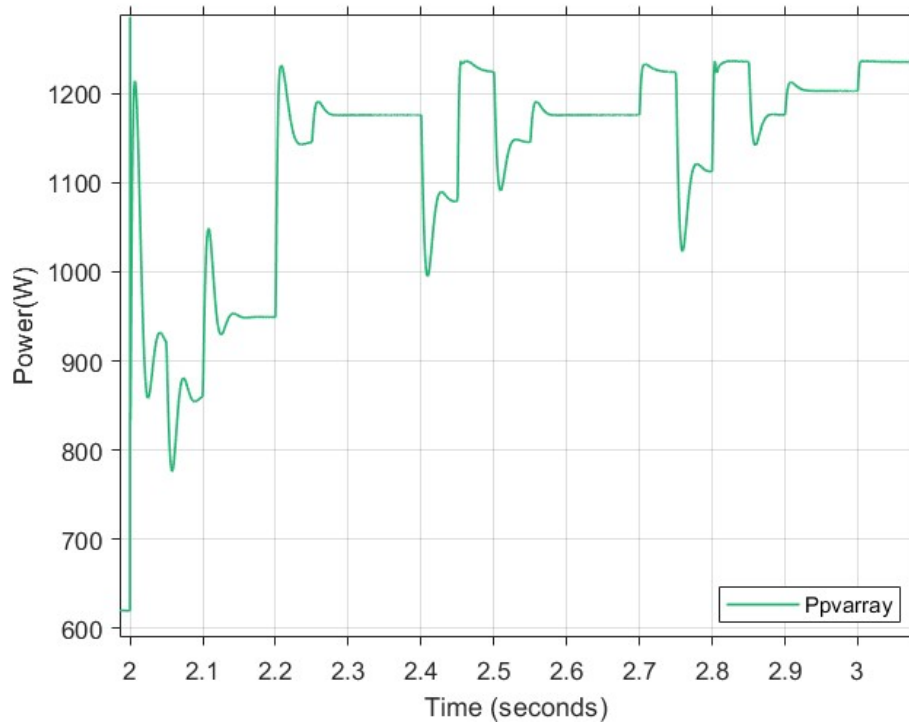
Σχήμα 5.25: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 1)



Σχήμα 5.26: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 2



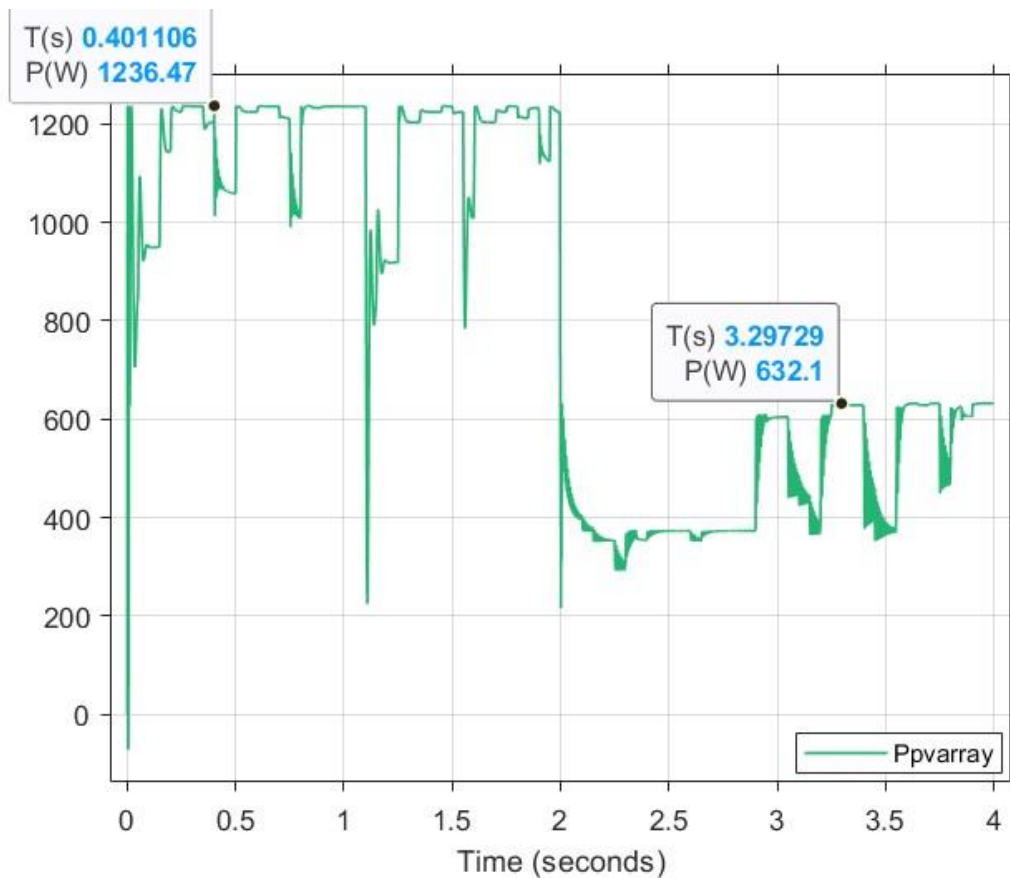
Σχήμα 5.27: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 2)



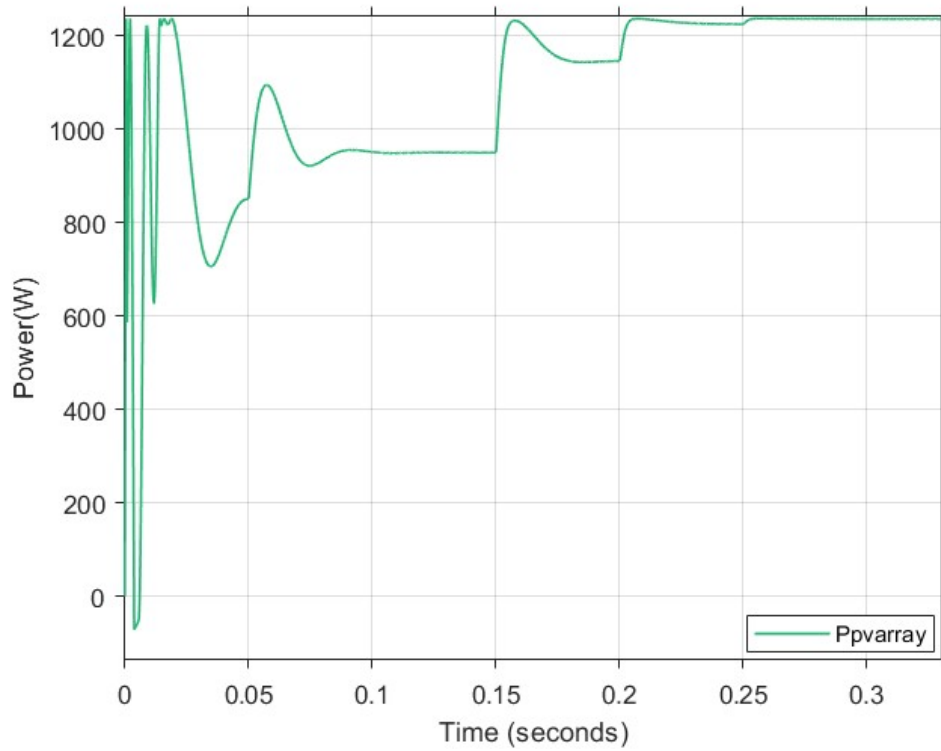
Σχήμα 5.28: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 2)

Στο Σχήμα 5.26 (σελ.84) φαίνεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 2, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=0s-2s)=632.13W σε Time (Για Time=0s-2s)=0.680496s και μετά την ξαφνική αλλαγή στην ακτινοβολία, συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=2s-4s)=1236.32W σε Time (Για Time=2s-4s)=0.46083s. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στα Σχήματα 5.27 και 5.28 (σελ. 85), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP, για Time=0s-2s και για Time=2s-4s αντίστοιχα.

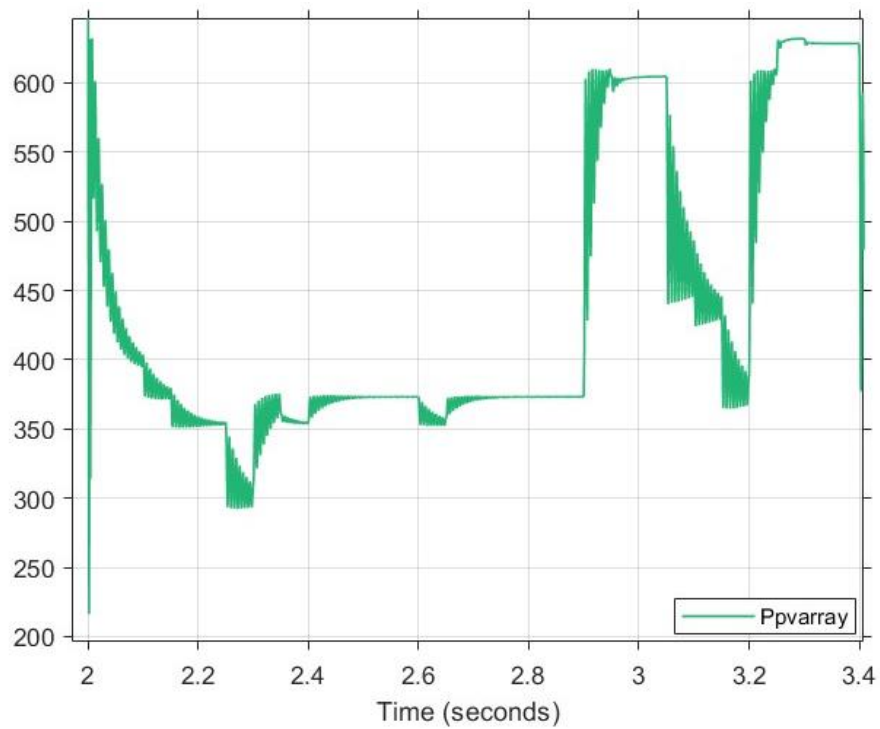
Στο Σχήμα 5.29 εμφανίζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 3, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=0s-2s)= 1236.47W σε Time (Για Time=0s-2s)=0.401106s και μετά την ξαφνική αλλαγή στην ακτινοβολία, συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος με P_{mpp} (Για Time=2s-4s)=632.1W σε Time (Για Time=2s-4s)= 1.29729s. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στα Σχήματα 5.30 και 5.31 (σελ. 87), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP, για Time=0s-2s και για Time=2s-4s αντίστοιχα.



Σχήμα 5.29: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 3



Σχήμα 5.30: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=0s-2s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 3)



Σχήμα 5.31: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP (Time=2s-4s) διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 3)

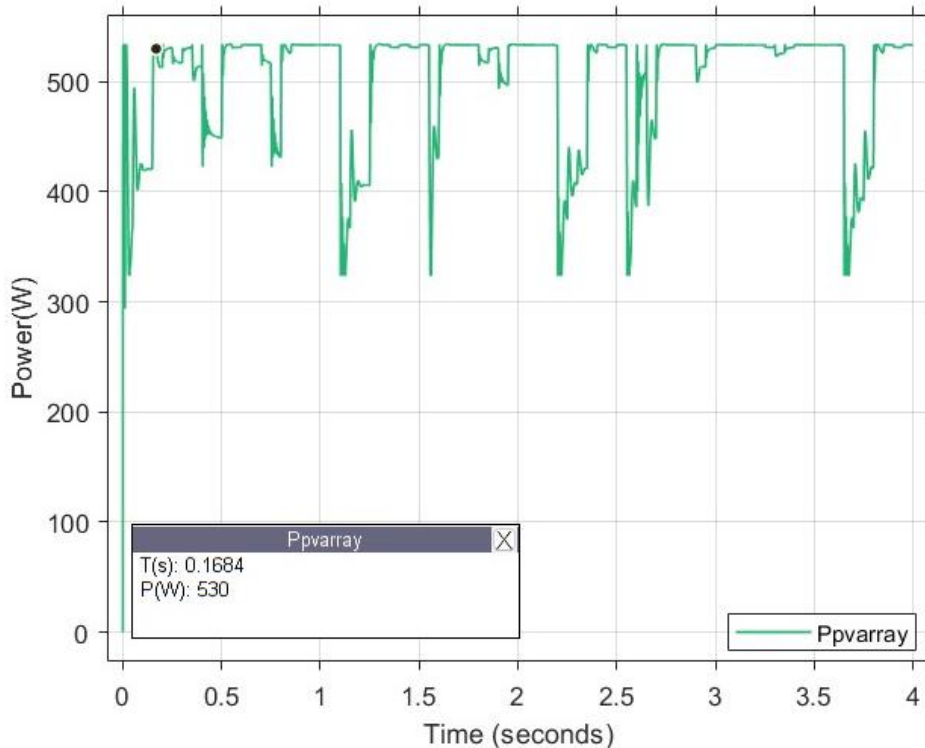
5.5.2 Αποτελέσματα υπό συνθήκες μερικής σκίασης

Στη συνέχεια, για την τεχνική Particle Swarm Optimization (PSO), εμφανίζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου, βασισμένο στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό συνθήκες μερικής σκίασης, βάσει των σετ μετρήσεων που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.5.

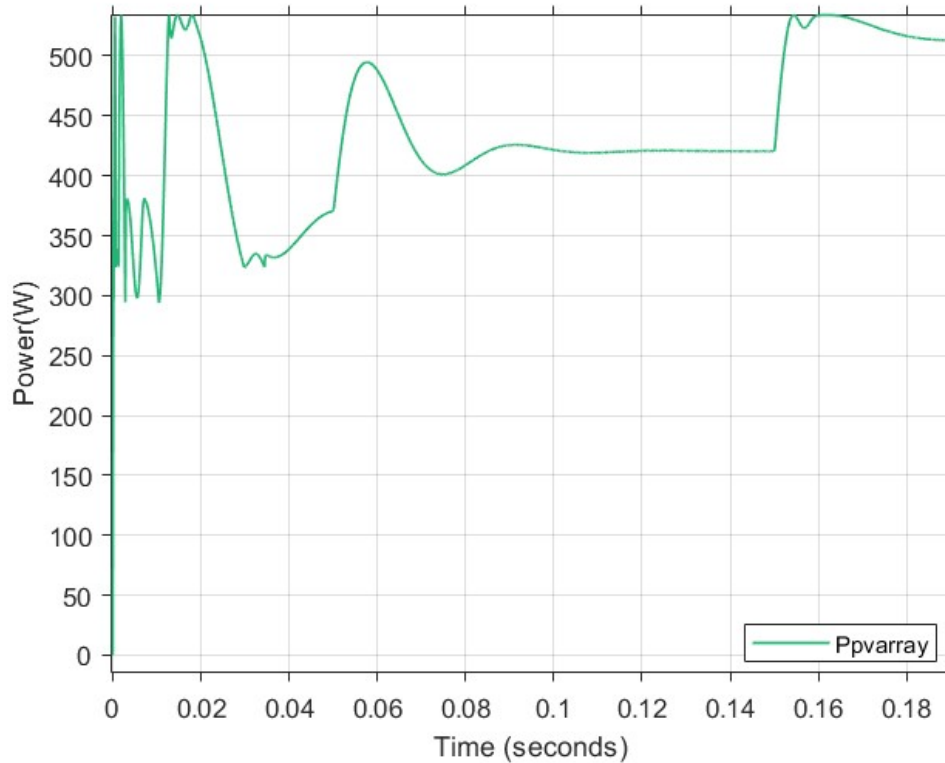
Από το διάγραμμα ισχύος-χρόνου βλέπουμε την απόδοση του Φ/Β συστήματος με τη χρήση της τεχνικής αναζήτησης MPP, Particle Swarm Optimization (PSO).

Στο Σχήμα 5.32 παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος-χρόνου για το σενάριο ακτινοβολίας 4, στο οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό σημείο ισχύος $P_{mpp}=530W$ σε $Time=0.1684s$. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου, στο Σχήμα 5.33 (σελ. 89), εμφανίζεται η αρχική περιοχή αναζήτησης προς το MPP.

Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου MPPT που αναπτύχθηκε με βάση τον αλγόριθμο PSO, ανιχνεύει το ολικό σημείο μέγιστης ισχύος σε όλα τα σενάρια που ερευνηθήκαν, αλλά το σμήνος συνεχίζει την αναζήτηση μέχρις ότου η πλειοψηφία του σμήνους συγκλίνει. Μετά, ξεκινά την έρευνα απ' την αρχή με σκοπό την καλύτερη απόδοση. Ως αποτέλεσμα παρατηρούνται κυματώσεις της ισχύος στα διαγράμματα ισχύος-χρόνου (αναφορά σε ανάλογες 1-2-3-4 από PSO).



Σχήμα 5.32: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου για τον αλγόριθμο PSO για το σενάριο ακτινοβολίας 4



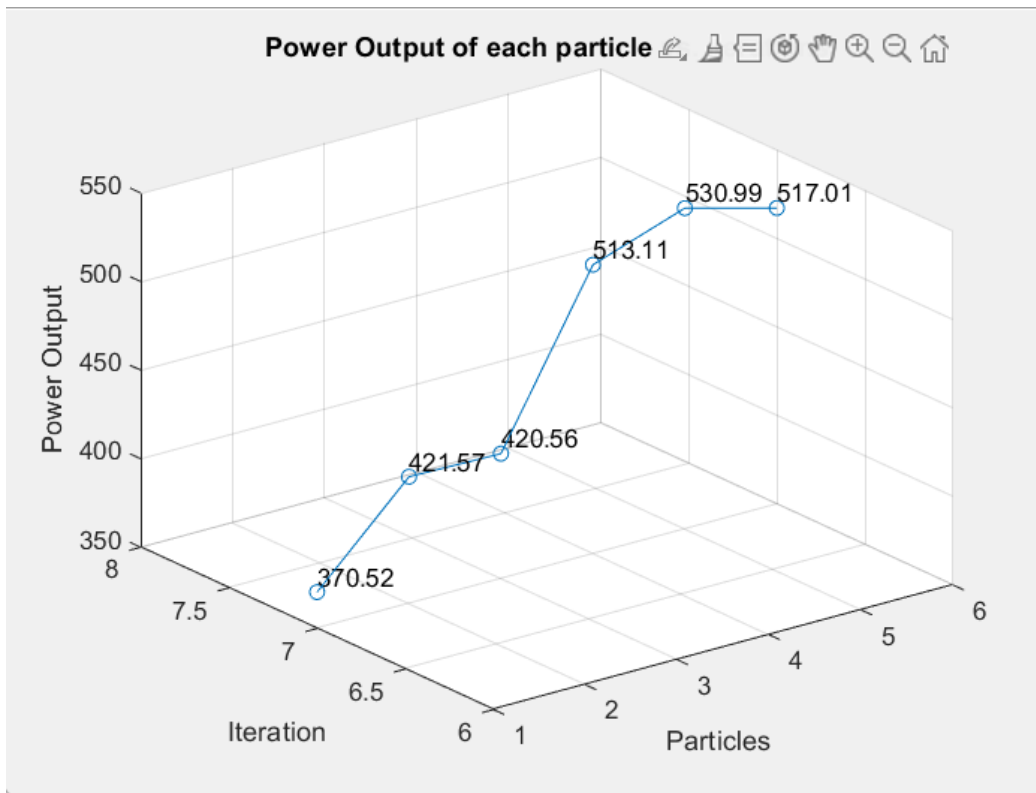
Σχήμα 5.33: Αρχική περιοχή αναζήτησης MPP διαγράμματος ισχύος-χρόνου PSO (σενάριο ακτινοβολίας 4)

5.5.3 Κίνηση σωματιδίων

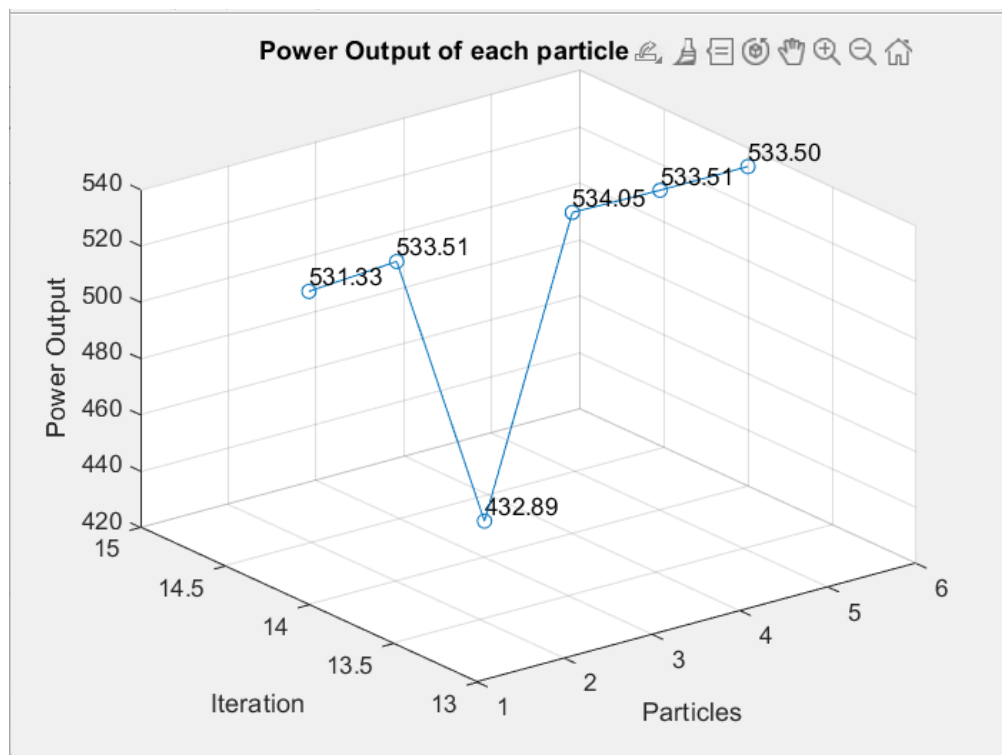
Προκειμένου να αντιληφθούμε καλύτερα πώς λειτουργεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, παρακάτω απεικονίζεται η παραγόμενη ισχύς της Φ/Β συστοιχίας για κάθε σωματίδιο ανά περιστροφή του κώδικα σε 3 άξονες (για το σενάριο ακτινοβολίας 4).

Στον άξονα X βλέπουμε την αρίθμηση των σωματιδίων, στον άξονα Y βλέπουμε την τελευταία παραγόμενη ισχύ κάθε σωματιδίου σε Watt, ενώ στον άξονα Z των αριθμό κύκλων του κώδικα.

Στο Σχήμα 5.34 (σελ. 90), παρουσιάζεται το σμήνος σε αρχικό στάδιο αναζήτησης, με μεγάλη απόκλιση παραγόμενης ισχύος των σωματιδίων, ενώ στο Σχήμα 5.35 (σελ. 90) το σμήνος παρατηρείται σε προχωρημένο στάδιο αναζήτησης, με την πλειοψηφία των σωματιδίων να έχουν περίπου ισάξια παραγόμενη ισχύ.



Σχήμα 5.34: Αναπαράσταση κίνησης σμήνους σε αρχικό στάδιο



Σχήμα 5.35: Αναπαράσταση κίνησης σμήνους σε προχωρημένο στάδιο

5.6 Αξιολόγηση τεχνικών αναζήτησης MPP

Για κάθε τεχνική πραγματοποιείται ο υπολογισμός της απόδοσής της με βάση τον τύπο:

$$\eta = \frac{P_{pv \text{ προσομοίωσης}}}{P_{pv \text{ θεωρίας}}} \times 100\% \quad (5.1)$$

με η να είναι το ποσοστό της απόδοσης για κάθε σετ μέτρησης, P_{pv} -προσομοίωσης, η παραγόμενη ισχύς προσομοίωσης στο τελικό σημείο σύγκλισης (W) και P_{pv} _θεωρίας , η θεωρητική τιμή ισχύος στο ολικό μέγιστο.

Πρώτα, γίνεται ο υπολογισμός της απόδοσης του κάθε αλγορίθμου για κάθε σετ μέτρησης χωριστά. Έπειτα, υπολογίζεται ο μέσος όρος όλων των αποδόσεων. Τελικά, υπολογίζεται και ο μέσος όρος του χρόνου στο σημείο σύγκλισης για κάθε αλγόριθμο, και τα αποτελέσματα καταγράφονται συγχρόνως με την πολυπλοκότητα υλοποίησής τους, σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα (Πίνακας 5.1).

Ανακεφαλαιώνοντας, οι συμβατικές τεχνικές συνθηκών ομοιόμορφης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας παρουσιάζουν υψηλή απόδοση. Οι αλγόριθμοι Perturb & Observe (P&O) και Incremental Conductance (INC) υλοποιούνται πιο απλά σε σύγκριση με τις παραλλαγές τους με μεταβλητό βήμα, αλλά συγχρόνως απαιτούν περισσότερο χρόνο για να συγκλίνουν στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Επιπλέον, αν και μπορούν να προσαρμοστούν σε απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καμία από αυτές δεν έχει την ικανότητα εντοπισμού του GMPP υπό μερική σκίαση.

Ενώ η τεχνική MPPT μερικής σκίασης (PSO) είναι ελάχιστα πιο περίπλοκη στην υλοποίησή της και εντοπίζει το ολικό μέγιστο σε όλα τα σενάρια σκίασης, είναι αρκετά πιο αργή, ειδικά σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης τεχνικών αναζήτησης MPP

Τεχνική αναζήτησης MPP	Μέσος βαθμός απόδοσης η (%)	Μέση τιμή χρόνου σύγκλισης στο MPP(s)	Πολυπλοκότητα υλοποίησης	Καταλληλότητα για συνθήκες Μερικής Σκίασης
P&O	99.9	0.032	Χαμηλή	Όχι
INC	99.9	0.05	Μέτρια	Όχι
PSO	99.9	0.38	Μέτρια	Ναι

Κεφάλαιο 6

6. Συμπεράσματα

6.1 Συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων στοιχείων και επιλογή του βέλτιστου αλγορίθμου για ένα υπό μελέτη Φ/Β σύστημα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη και αξιολόγηση διαφόρων τεχνικών αναζήτησης και εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP), οι οποίες αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία. Οι συγκεκριμένες τεχνικές υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Η αξιολόγηση των τεχνικών αυτών βασίστηκε στην απόδοσή τους, στην πολυπλοκότητα υλοποίησής τους και στον απαιτούμενο χρόνο για την επίτευξη του MPP.

Η επιλογή αλγορίθμου για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η τοποθεσία και το κόστος εγκατάστασης. Όσον αφορά την τοποθεσία, παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η σκίαση και οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι αλγόριθμοι που είναι κατάλληλοι για ανοικτές τοποθεσίες με λίγη σκιά μπορεί να μην είναι κατάλληλοι για συστήματα που είναι τοποθετημένα σε μέρη με περισσότερη σκιά. Επομένως, κατά την επιλογή ενός αλγορίθμου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ειδικές συνθήκες της τοποθεσίας. Επιπλέον, το κόστος εγκατάστασης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Διαφορετικοί αλγόριθμοι απαιτούν διαφορετικές τεχνικές, υλικά και εξοπλισμό, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει το συνολικό κόστος εγκατάστασης. Η επιλογή του αλγορίθμου θα πρέπει να βασίζεται στο χρηματικό ποσό που ορίζεται στον προϋπολογισμό για την εγκατάσταση.

Συνολικά, η επιλογή του αλγορίθμου για μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη θέση, τη σκιά, τις καιρικές συνθήκες και το κόστος εγκατάστασης, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του συστήματος και η βέλτιστη σχέση κόστους - αποτελεσματικότητας.

Έτσι, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από όλες τις δοκιμές αναλύθηκαν, και με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Αλγόριθμος MPPT

- Για φωτοβολταϊκά συστήματα που εγκαθίστανται σε ανοικτές περιοχές με πολλές ώρες ηλιοφάνειας, λίγη σκιά και συχνές (ή καθόλου) μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας:
 - Με προτεραιότητα το χαμηλό κόστος, θα επιλεγεί η τεχνική P&O.
 - Με κριτήριο την ταχύτητα σύγκλισης των MPP, η μεθοδολογία P&O είναι η μέθοδος επιλογής.
 - Για καλύτερες επιδόσεις, θα πρέπει να επιλέγεται η τεχνική P&O ή INC.
- Για φωτοβολταϊκά συστήματα που εγκαθίστανται σε ανοικτές τοποθεσίες με λίγες ηλιόλουστες ημέρες, πολλή σκιά και συχνές (ή καθόλου) μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας:
 - Με προτεραιότητα το χαμηλό κόστος, θα επιλεγεί η τεχνική PSO
 - Με κριτήριο την ταχύτητα σύγκλισης των MPP, η μεθοδολογία PSO είναι η μέθοδος επιλογής.
 - Για καλύτερες επιδόσεις, θα πρέπει να επιλέγεται η τεχνική PSO.

6.2 Επιπλέον ερευνητικές προτάσεις

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας έχει αξιόλογη ερευνητική σημασία. Εξετάζει ζητήματα που ανοίγουν τον δρόμο για περισσότερη έρευνα σχετικά με τη βελτιστοποίηση του ελέγχου των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες πλήρους ακτινοβολίας και μερικής σκίασης.

Προτεραιότητα στο επόμενο στάδιο της εργασίας είναι να επαληθευθούν πειραματικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, εφαρμόζοντάς τα σε πραγματικές συνθήκες. Για αυτό, απαιτείται ένα πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα, ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης, ένας μικροεπεξεργαστής/μικροελεγκτής όπου θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος MPPT και ορισμένα ηλεκτρικά φορτία (για παράδειγμα, μια μπαταρία για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας). Τα πειραματικά αποτελέσματα θα περιγράψουν πληρέστερα τη συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών MPPT που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Περαιτέρω σημαντικό ενδιαφέρον φαίνεται να έχει η έρευνα προς βελτίωση της τεχνικής MPPT που αναπτύχθηκε με βάση τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO), ο συνδυασμός του με άλλες τεχνικές MPPT, καθώς και η έρευνα προς μελέτη και ανάπτυξη άλλων τεχνικών αναζήτησης με χρήση αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη βιολογία.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Dario, "Advantages and disadvantages of renewable energy sources," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 11, no. 3, pp. 176-183, Feb. 2021.
- [2] V.Kumar, R.Kumar Bindal, "MPPT technique used with perturb and observe to enhance the efficiency of a photovoltaic system," *Materials Today: Proceedings*, vol. 73, no. 4, Jan. 2023.
- [3] A. V. Herzog, T. E. Lipman, D. M. Kammen, "Renewable Energy Sources," University of California, Berkeley, USA, 2001.
- [4] S. Ashok, "solar energy," *Encyclopædia Britannica*, 30 Nov. 2022. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/solar-energy>. [Accessed 11. 12. 2022].
- [5] N. Kannan, D. Vakeesan, "Solar energy for future world: - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1092-1105, Sep. 2016.
- [6] J. Page, "Chapter II-1-A - The Role of Solar-Radiation Climatology in the Design of Photovoltaic Systems," in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, 3rd ed., S. A. Kalogirou, Ed., Academic Press, 2017, pp. 601-670.
- [7] Ι. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος (2η έκδοση)*, ΤΖΙΟΛΑ, 2019.
- [8] L. Mari, "An Introduction to Solar Geometry for Solar Cell Optimization," *EE Power*, May 2020. [Online]. Available: <https://eepower.com/technical-articles/an-introduction-to-solar-geometry-for-solar-cell-optimization/#>. [Accessed 28. 12. 2022].
- [9] *Encyclopædia Britannica*, 2023. [Online]. Available: <https://kids.britannica.com/students/assembly/view/54586>. [Accessed 10. 1. 2023].
- [10] Solar Sena, "Solar Azimuth Angle Calculator & Solar Panels," April 2021. [Online]. Available: <https://solarsena.com/solar-azimuth-angle-calculator-solar-panels/>. [Accessed 28. 12. 2022].
- [11] A. Bosio, S. Pasini, and N. Romeo, "The History of Photovoltaics with Emphasis on CdTe Solar Cells and Modules," *Coatings*, vol. 10, no. 4, p. 344, Apr. 2020.
- [12] A. Aspect, "From Huygens' waves to Einstein's photons: Weird light," *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, no. 9–10, pp. 498-503, 2017.
- [13] S. Ha, "Destructive Interference and Conservation of Energy: Characteristics of Gifted Students' Understanding," *New Physics Sae Mulli*, vol. 67, no. 11, pp. 1348-1361, Nov. 2017.
- [14] R. A. Marques Lameirinhas, J. P. N. Torres, and J. P. de Melo Cunha, "A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications," *Energies*, vol. 15, no. 5, p. 1823, Mar. 2022.

- [15] D. S. Lemons, W. R. Shanahan and L. J. Buchholtz, *On the Trail of Blackbody Radiation: Max Planck and the Physics of his Era*, The MIT Press, 2022.
- [16] L. Mari, "A History of the Photoelectric Effect and Its Role in Solar PV," *EE Power*, May 2020. [Online]. Available: <https://eepower.com/technical-articles/a-history-of-the-photoelectric-effect-and-its-role-in-solar-pv/#>. [Accessed 30 12. 2022].
- [17] A. D. Stone, *Einstein and the Quantum: The Quest of the Valiant Swabian*, Princeton University Press, 2016.
- [18] F. La Mantia et al., "A Critical Assessment of the Mott–Schottky Analysis," *Russian Journal of Electrochemistry*, vol. 46, no. 11, p. 1306–1322, Jan. 2010.
- [19] D. W. Graham, "Overview of Silicon p-n Junctions," West Virginia University, Lane Department of Computer Science and Electrical Engineering, West Virginia, 2009.
- [20] P. Wolfe, "What Is Photovoltaics?," in *The Solar Generation: Childhood and Adolescence of Terrestrial Photovoltaics*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2018, pp. 9-24.
- [21] "One-of-a-Kind Story, 1963 Photovoltaic Module," Global.Sharp, n.d.
- [22] R E.L, Tolbert, and J C, Arnett,, "Design, installation and performance of ARCO solar photovoltaic power plants," in *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, Orlando, FL, USA, 1984.
- [23] O.K. Simya et al., "Engineered Nanomaterials for Energy Applications," in *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications, Micro and Nano Technologies*, C. M. Hussain, Ed., Elsevier, 2018, pp. 751-767.
- [24] A. Asrori et al., "The Design and Performance Investigation of Solar E-Bike using Flexible Solar Panel by Different Battery Charging Controller," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 10, no. 3, p. 14431–14442, Sep. 2020.
- [25] S. Zhuiykov, *Nanostructured Semiconductor Oxides for the Next Generation of Electronics and Functional Devices: Properties and Applications*, 1st ed., Woodhead Publishing, 2013.
- [26] G. Birant, "Surface Coverage Control of Self Organized Plasmonic Nano Structures at Interfaces of Photovoltaics Related Materials," Jan. 2017. [Online]. Available: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12620778/index.pdf>. [Accessed 4. 1. 2023].
- [27] A. Winnacker, "The pn-Junction," in *The Physics Behind Semiconductor Technology*, 1st ed., Springer, 2022, p. 129–141.
- [28] "How Solar Panels Work?," May 2017. [Online]. Available: https://m.hitechled.cn/IndustryNews_2001.html. [Accessed 4. 1. 2023].
- [29] "Solar cell," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Cells,_modules,_panels_and_systems. [Accessed 4. 1. 2023].

- [30] Κ. Θ. ΔΕΡΒΟΣ, Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Από τη Θεωρία στην Πράξη, Ε.Μ.Π. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, 2013.
- [31] Θ. Πουλής, "Μελέτη, σύγκριση και βελτιστοποίηση μεθόδων εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος διάταξης φωτοβολταϊκής φόρτισης συσσωρευτή," Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2017.
- [32] G. Knier, "How do Photovoltaics Work?," Nasa Science, 2023. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>. [Accessed 5. 1. 2023].
- [33] E. Rhode, "Types of Solar Panels: Pros and Cons," Oct. 2021. [Online]. Available: <https://www.treehugger.com/types-of-solar-panels-pros-and-cons-5181546>. [Accessed 4. 1. 2023].
- [34] A. Bhatia, Design and Sizing of Solar Photovoltaic Systems, Woodcliff Lake: Continuing Education and Development, Inc, n.d..
- [35] S. A. Afghan et al., "Simulating the electrical characteristics of a photovoltaic cell based on a single-diode equivalent circuit model," 2017.
- [36] Ι. Κατσιγιαννης, Σύστημα εσωτερικής διανομής Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης – Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Πανεπιστήμιο Κρήτης – Τμήμα Χημείας, 2013.
- [37] "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Charge Controller Working Principle," Electrical Academia, n.d. [Online]. Available: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/maximum-power-point-tracking-mppt-charge-controller-working-principle/>. [Accessed 5. 1. 2023].
- [38] M. Merchaoui et al., "Comparative study of swarm intelligence based maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems under partial shading conditions," in *Recent Advances in Renewable Energy Technologies*, vol. 2, Academic Press, 2022, pp. 43-73.
- [39] N.Khaled, B.Pattel, "MPC Design for Photovoltaic Cells," in *Practical Design and Application of Model Predictive Control: MPC for MATLAB® and Simulink® Users*, Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 141-180.
- [40] A.Bahrami et al., "Photovoltaic cells technology: principles and recent developments," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, p. 161–197, Aug. 2012.
- [41] T. H. Lee , The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits, Second Edition, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [42] G. Wright, "Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)," n.d. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/MOSFET-metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor>. [Accessed 8. 1. 2023].
- [43] Mizan, "Mosfet/Types of Mosfet/Applications," Mar. 2020. [Online]. Available: <https://www.iceeet.com/mosfet/>. [Accessed 9. 1. 2023].

- [44] T.Ramki, L. N. Tripathy, "Comparison of different DC-DC converter for MPPT application of photovoltaic system," in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015.
- [45] R. F. Coelho et al., "A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking," in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009.
- [46] A.P.K. Yadav et al., "Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 1, no. 1, Jul. 2012.
- [47] S. A. Lopa et al., "Design and Simulation of DC-DC Converters," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 03, no. 01, pp. 62-70, Jan 2016.
- [48] M. N. F. Nashed, "INPUT DC-DC CONVERTERS," Jan. 2023.
- [49] "Solar PV System with MPPT Using Boost Converter," The MathWorks, Inc., n.d. [Online]. Available: <https://ch.mathworks.com/help/sps/ug/solar-pv-system-maximum-power-point-tracking-using-boost-converter.html>. [Accessed 12. 1. 2023].
- [50] P. Mundra, "Partial Shading Condition on PV Array: Causes, Effects and Shading Mitigation using DSMPPT," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 1134-1139, Apr. 2020.
- [51] C. Fu, L. Zhang,, "A novel method based on tuna swarm algorithm under complex partial shading conditions in PV system," *Solar Energy*, vol. 248, pp. 28-40, Dec. 2022.
- [52] Z. M. S. Elbarbary, M. A. Alranini, "Review of maximum power point tracking algorithms of PV system," *Frontiers in Engineering and Built Environment*, vol. 1, May 2021.
- [53] F. Sedaghati et al., "PV Maximum Power-Point Tracking by Using Artificial Neural Network," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, p. 10, Mar 2012.
- [54] A. Παπασπύρου, "Ανάλυση Τεχνικών Ανίχνευσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος Φωτοβολταϊκού (Τεχνικές MPPT)," 2014. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/alexandropapaspurou/mppt-30080120>. [Accessed 5. 3. 2023].
- [55] K. Muhammad et al., "Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, no. 7, pp. 432-441, Nov. 2020.
- [56] S. R. Chafle, U. B. Vaidya, "Incremental Conductance MPPT Technique for PV System," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 2320-3765, June 2013.
- [57] M. W. Rahman et al., "Comparative analysis of developed incremental conductance (IC) and perturb & observe (P&O) MPPT algorithm for photovoltaic applications," in *10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, Coimbatore, India, 2016.

- [58] A. Panigrahi, K. C. Bhuyan, "Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Generation System," *Journal of Green Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 403-426, Oct. 2016.
- [59] W. S. E. Abdellatif et al., "A Fuzzy Logic Controller Based MPPT Technique for Photovoltaic Generation System," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 394 - 417, June 2021.
- [60] S. Selvan, "Simulation of Fuzzy Logic Control Based MPPT Technique for Photovoltaic System," in *2nd International Conference on Innovations in Engineering and Technology*, Penang, 2014.
- [61] Κ.Ηλιόπουλος, "Αναγνώριση θάδισης με χρήση αναδρομικών ασαφών δικτύων και μεθοδολογίας PREMOFS", Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ, 2008.
- [62] C. G. Villegas-Mier et al., "Artificial Neural Networks in MPPT Algorithms for Optimization of Photovoltaic Power Systems: A Review," *Micromachines*, vol. 12, no. 10, p. 1260, Oct. 2021.
- [63] L. P. N. Jyothy and M. R. Sindhu, "An Artificial Neural Network based MPPT Algorithm For Solar PV System," in *4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, Chennai, India, 2018.
- [64] Ε. Μπατζέλης, "Μοντελοποίηση και έλεγχος φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συνθήκες σκίασης", Αθήνα: ΕΜΠ, 2016.
- [65] O. Belghith et al., "MPPT Design Using PSO Technique for Photovoltaic System Control Comparing to Fuzzy Logic and P&O Controllers," *Energy and Power Engineering*, vol. 8, no. 11, pp. 349-366, Nov. 2016.
- [66] Π. Τσίκας, "Μέθοδοι Βελτιστοποίησης - Μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)," n.d. [Online]. Available: <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1756/3-Particle%20Swarm%20Optimization%20%28PSO%29.pdf>. [Accessed 7. 3. 2023].
- [67] Σ. Τσιάκουλη, *Χρήση του Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την Επιτήρηση Θερμοκρασίας μιας Περιοχής*, Πειραιάς, 2016.
- [68] "Matlab," The MathWorks, Inc., n.d. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=srchtitle_MATLAB_1. [Accessed 9. 3. 2023].
- [69] "Simulink," The MathWorks, Inc., n.d. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=srchtitle_Simulink%20_2. [Accessed 9. 3. 2023].
- [70] Sharp, "208W, Next Generation Breakthrough Performance, Poly-crystalline Silicon Photovoltaic Module," *ND-208U1 datasheet*, Sep. 2005.
- [71] Texas Instruments, Hauke B., "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage," Appl. Report SLVA372C, Texas, 2009.

Παραρτήματα

Παράρτημα 1^ο : Κώδικας αλγορίθμου MPPT βασισμένος σε PSO

```
function D = fcn(Power,half_swarm_pop)
% Αρχικοποίηση των μεταβλητών

% Επιμένουσα μεταβλητή για το σμήνος
persistent swarm
% Επιμένουσα μεταβλητή για την καλύτερη τιμή του κάθε μέλους του σμήνους
persistent pbest
% Επιμένουσα μεταβλητή για την καλύτερη τιμή του σμήνους
persistent gbest
% Επιμένουσα μεταβλητή για τις ταχύτητες του κάθε μέλους του σμήνους
persistent velocity
% Επιμένουσα μεταβλητή για τον τωρινό κύκλο εργασίας
persistent Dcurrent
% Επιμένουσα μεταβλητή για τον καλύτερο κύκλο εργασίας του κάθε μέλους του σμήνους
persistent PersonalBP
% Επιμένουσα μεταβλητή για τον μετρητή του πλήθους των κύκλων εργασίας
persistent counter
% Επιμένουσα μεταβλητή για το μέγιστο δυναμικό ισχύ του σμήνους
persistent gmaximump
% Επιμένουσα μεταβλητή για το δείκτη που δείχνει ποιο μέλος του σμήνους έχει τη μέγιστη δυναμική
ισχύ
persistent index
% Επιμένουσα μεταβλητή για το σημαία που δείχνει αν έχει επιτευχθεί σύγκλιση
persistent conv_flag
% Επιμένουσα μεταβλητή για τον πληθυσμό του σμήνους
persistent swarm_pop

persistent gbest_prev
persistent gmin_prev

persistent iter
if isempty(iter)
    iter=0;
end

if isempty(gbest_prev)
```

```

    gbest_prev=inf;
end
if isempty(gmin_prev)
    gmin_prev=1;
end
% Αρχικοποίηση του σήματος σύγκλισης αν δεν έχει γίνει ακόμα
if isempty(conv_flag)
    conv_flag=0;
end
% Έλεγχος για την αλλαγή στην κατάσταση του συστήματος

% Αυτό το μέρος του κώδικα δημιουργεί την αρχική κατάσταση του σμήνους και αρχικοποιεί τις
μεταβλητές που απαιτούνται για τον PSO αλγόριθμο.
if isempty(swarm) || (conv_flag==1)
    conv_flag=0;
    swarm_pop=half_swarm_pop*2;
    swarm= [sort(0.1*rand(half_swarm_pop,1)); sort(0.1*rand(half_swarm_pop,1)+0.2)];
    velocity = zeros(swarm_pop,1);
    pbest = zeros(swarm_pop,1);
    PersonalBP = zeros(swarm_pop,1);
    gbest=0.5;
    Dcurrent=0;
    gmaximump=0;
    counter=0;
    index=0;

end

% Υπολογισμός του νέου duty cycle
if sum(abs(velocity))>(0.01*swarm_pop) || sum(abs(velocity))==0
    counter=counter+1;
if(counter==swarm_pop+2)
    counter=1;
end

% Αυτό το μέρος του κώδικα χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των τοπικών καλύτερων θέσεων για
κάθε σωματίδιο του σμήνους.
if counter>1 && counter<=swarm_pop+1
    if Power>PersonalBP(counter-1)
        PersonalBP(counter-1)=Power;
        pbest(counter-1)=Dcurrent;
    end
end

```

```

    end
end
if max(PersonalBP)>1 && min(PersonalBP)>1
if (1.5*gbest_prev)<(max(PersonalBP)) || (gmin_prev/1.5)>(min(PersonalBP))
    conv_flag=1
end
gbest_prev=max(PersonalBP)
gmin_prev=min(PersonalBP)
end

iter=iter+1;

plot3(1:length(PersonalBP), iter*ones(size(PersonalBP)), PersonalBP, 'Marker', 'o')
xlabel('Particles')
ylabel('Iteration')
zlabel('Power Output')
title('Power Output of each particle vs. Iterations')
grid on
% Display data points
hold on;
for i = 1:length(PersonalBP)
    text(i, iter, PersonalBP(i), sprintf('%.2f', PersonalBP(i)), 'VerticalAlignment', 'bottom');
end
hold off;

drawnow

% Αυτό το μέρος του κώδικα χρησιμοποιείται για την επιλογή των τιμών του
% duty cycle καθορίζοντας τη θέση του κάθε σωματιδίου του σμήνους.
if (counter>=1 && counter<=swarm_pop)
    D=swarm(counter);
    Dcurrent=swarm(counter);
elseif (counter==swarm_pop+1)
    [gmaximump,index] = max(PersonalBP);
    gbest=pbest(index);
    D=gbest;
for i=1:swarm_pop
    velocity(i)=updatevelocity(velocity(i),pbest(i),swarm(i),gbest);

```

```

    swarm(i)=updateduty(swarm(i),velocity(i));
end
else
    D=0;
end
else
    D=gbest;
    iter=0;
    conv_flag=1;
end
end
end

```

% Συνάρτηση για τον υπολογισμό της ταχύτητας των σωματιδίων

```
function vfinal=updatevelocity(velocity,pobest,d,gwbest)
```

% Ορισμός των σταθερών της συνάρτησης

```
w=0.1;
```

```
c1=0.5;
```

```
c2=1.5;
```

```
vfinal = (w*velocity)+(c1*rand(1)(pobest-d))+(c2*rand(1)(gwbest-d));
```

```
end
```

% Εφαρμογή ορίων duty cylce.

```
function df=updateduty(duty_cylce,velocity)
```

```
dlimit=duty_cylce+velocity;
```

```
if(dlimit>1)
```

```
    df=1;
```

```
elseif(dlimit<0)
```

```
    df=0;
```

```
else
```

```
    df=dlimit;
```

```
end
```

```
end
```

Παράρτημα 2^ο : Κώδικας αλγορίθμου MPPT βασισμένος σε INC

```
function D = MPPT_IC(V_pv, I_pv)
% Συνάρτηση MPPT_IC: Αλγόριθμος incremental conductance για ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος
(maximum power point tracking - MPPT)
% Είσοδοι:
% V_pv: Τάση φωτοβολταϊκού πάνελ
% I_pv: Ρεύμα φωτοβολταϊκού πάνελ
% Έξοδος:
% D: κύκλος εργασίας για μετατροπέα boost

% Αρχικοποίηση
persistent V_pv_prev I_pv_prev D_prev;
if isempty(V_pv_prev)
V_pv_prev = 0;
end
if isempty(I_pv_prev)
I_pv_prev = 0;
end
if isempty(D_prev)
D_prev = 0.5;
end

D = D_prev;
Delta_V = V_pv - V_pv_prev;
Delta_I = I_pv - I_pv_prev;

% Ενημέρωση κύκλου εργασίας βάσει της incremental conductance
if Delta_V ~= 0
if (Delta_I/Delta_V) > (-I_pv/V_pv)
D = D_prev - 0.01;
elseif (Delta_I/Delta_V) < (-I_pv/V_pv)
D = D_prev + 0.01;
end
elseif Delta_V == 0
if Delta_I > 0
D = D_prev - 0.01;
end
end

% Περιορισμός του κύκλου εργασίας στο διάστημα 0 έως 0.9
```

```
if D > 0.9
D = 0.9;
elseif D < 0
D = 0;
end

% Ενημέρωση των προηγούμενων τιμών για την επόμενη επανάληψη
V_pv_prev = V_pv;
I_pv_prev = I_pv;
D_prev = D;
End
```

Παράρτημα 3^ο : Κώδικας αλγορίθμου MPPT βασισμένος σε P&O

% Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει το duty cycle ενός διακόπτη βάσει της αλλαγής τάσης και ισχύος στην είσοδό του.

```
function Duty_cycle = perturb_observe(Vin, Iin)
```

% Δηλώνουμε τις persistent μεταβλητές Vin_prev, Pin_prev και D_prev και τις αρχικοποιούμε αν δεν υπάρχουν τιμές από την προηγούμενη επανάληψη της συνάρτησης.

```
persistent Vin_prev
```

```
persistent Pin_prev
```

```
persistent D_prev
```

```
if isempty(Vin_prev)
```

```
    Vin_prev = 0;
```

```
end
```

```
if isempty(Pin_prev)
```

```
    Pin_prev = 0;
```

```
end
```

```
if isempty(D_prev)
```

```
    D_prev = 0.5;
```

```
end
```

```
Duty_cycle = D_prev; % Αρχικοποιούμε το duty cycle με την τιμή της προηγούμενης επανάληψης.
```

```
Pin = Vin * Iin; % Υπολογίζουμε την ισχύ στην είσοδο του διακόπτη.
```

% Υπολογίζουμε τη διαφορά στην τάση και στην ισχύ στην είσοδο του διακόπτη σε σχέση με την προηγούμενη επανάληψη.

```
Delta_Vin = Vin - Vin_prev;
```

```
Delta_Pin = Pin - Pin_prev;
```

% Αλλάζουμε το duty cycle ανάλογα με τη διαφορά της ισχύος και της τάσης.

```
if Delta_Pin > 0
```

```
    if Delta_Vin > 0
```

```
        Duty_cycle = D_prev - 0.01;
```

```
    elseif Delta_Vin < 0
```

```
        Duty_cycle = D_prev + 0.01;
```

```
    end
```

```
elseif Delta_Pin < 0
```

```
    if Delta_Vin > 0
```

```
Duty_cycle = D_prev + 0.01;
elseif Delta_Vin < 0
    Duty_cycle = D_prev - 0.01;
end
end
```

% Βεβαιωνόμαστε ότι το duty cycle είναι εντός των επιτρεπτών ορίων και αν όχι, προσαρμόζουμε στο μέγιστο ή ελάχιστο επιτρεπτό.

```
if Duty_cycle > 0.9
    Duty_cycle = 0.9;
elseif Duty_cycle < 0
    Duty_cycle = 0;
end
```

% Αποθηκεύουμε τις τρέχουσες τιμές της τάσης στην είσοδο, της ισχύος στην είσοδο και του duty cycle για την επόμενη επανάληψη της συνάρτησης.

```
Vin_prev = Vin;
Pin_prev = Pin;
D_prev = Duty_cycle;
end
```

% Στη συνάρτηση αυτή, πραγματοποιείται ένας έλεγχος της διαφοράς της τάσης και της ισχύος στην είσοδο ενός διακόπτη και ανάλογα αλλάζεται το duty cycle του διακόπτη, ώστε να διατηρηθεί σε σταθερά επίπεδα η ισχύς στην είσοδο.

% Επίσης, οι τρέχουσες τιμές της τάσης και ισχύος στην είσοδο, καθώς και η προηγούμενη τιμή του duty cycle, αποθηκεύονται ώστε να χρησιμοποιηθούν στην επόμενη επανάληψη της συνάρτησης.