



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων
Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος
Φωτοβολταϊκών Στοιχείων**

Γεώργιος Δημητρίου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά Μάιος 2019

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σύγκριση αλγορίθμων εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT) λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο κύριος στόχος όλων αυτών των τεχνικών είναι να υποχρεώνουν το φωτοβολταϊκό σύστημα να παράγει μονίμως τη μέγιστη ισχύ σε συνθήκες είτε ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, είτε μερικής σκίασης. Αρχικά, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη φωτοβολταϊκή μονάδα, βασισμένη στο μοντέλο μιας διόδου με τη χρήση του εργαλείου Matlab/ Simulink. Αναλύονται και ελέγχονται τέσσερις αλγόριθμοι σε συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια εισάγεται η έννοια του φαινομένου μερικής σκίασης και αποδεικνύεται η ανικανότητα των συμβατικών αλγορίθμων για σωστό εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος κάτω από αυτές τις συνθήκες. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζονται πέντε μέθοδοι MPPT, οι οποίες είναι αποδοτικές στον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος σε συνθήκες μερικής σκίασης. Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταγράφονται λεπτομερώς, συγκρίνονται αρχικά με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές και μετέπειτα μεταξύ τους.

Abstract

The subject of this diploma thesis is to make a comparative analysis between specific maximum power point tracking (MPPT) techniques. The main purpose of all these techniques is to locate the maximum power point of operation of a photovoltaic module either at uniform incident solar irradiation, or partial shading conditions. Firstly, a photovoltaic module is presented, based on the single-diode model, which has been designed in the Matlab/ Simulink platform. Four conventional algorithms are analyzed during operation of the PV array under uniform incident solar irradiation conditions. Thereafter, the term of partial shading is introduced and the inefficiency of the conventional MPPT algorithms to locate the maximum power point under these conditions is demonstrated. For that reason, five MPPT techniques are presented, which are efficient enough to track the maximum power point under partial shading conditions. Finally, the results of the simulations are collected and analyzed and a final comparison among them is performed.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα και οι ΑΠΕ.....	10
1.2 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	11
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ.....	12
1.4 Ηλιακή ενέργεια.....	13
1.4.1 Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.....	14
1.5 Σκοπός της εργασίας.....	15
1.6 Δομή της εργασίας.....	16
2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα	17
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	17
2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	18
2.3 Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	20
2.4 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	20
2.4.1 Μονοκρυσταλλική τεχνολογία.....	20
2.4.2 Πολυκρυσταλλική τεχνολογία.....	21
2.4.3 Τεχνολογία λεπτών υμενίων.....	21
2.5 Φωτοβολταϊκές διατάξεις.....	22
2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V.....	23
2.7 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου	25

2.7.1	Σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος.....	26
2.8	Μερική σκίαση.....	27
2.8.1	Λειτουργία Φ/B διάταξης σε συνθήκες μερικής σκίασης.....	28
2.8.2	Μερική σκίαση και MPP.....	29
2.9	Σύνδεση σε ηλεκτρικό φορτίο.....	29
2.9.1	Μετατροπέας ισχύος	30
2.9.2	Μονάδα ελέγχου MPPT.....	33
3.	Μέθοδοι MPPT.....	34
3.1	Εισαγωγή στις μεθόδους MPPT.....	34
3.2	Ο αλγόριθμος Perturb and Observe	35
3.3	Ο αλγόριθμος Variable Step Size Perturb and Observe	37
3.4	Ο αλγόριθμος Incremental Conductance	39
3.5	Ο αλγόριθμος Variable Step Size Incremental Conductance	42
3.6	Ο αλγόριθμος Golden Section Search	43
3.7	Ο αλγόριθμος Random Search	45
3.8	Ο αλγόριθμος Voltage Window	47
3.9	Ο αλγόριθμος Voltage Window & Perturb and Observe.....	49
3.10	Ο αλγόριθμος Cuckoo Search.....	51
3.11	Ο αλγόριθμος DIRECT Search.....	53
4.	Υλοποίηση προσομοιώσεων λειτουργίας μεθόδων MPPT.....	56
4.1	Παρουσίαση βασικών διατάξεων προσομοίωσης.....	56

4.1.1	Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	57
4.1.2	Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης.....	58
4.1.3	Μονάδα ελέγχου MPPT.....	60
4.1.4	Ωμικό φορτίο.....	60
4.2	Σετ μετρήσεων προσομοίωσης.....	60
4.3	Μετασχηματισμός μοντέλου για προσομοίωση συνθηκών μερικής σκίασης.....	62
5.	Αποτελέσματα.....	67
5.1	Θεωρητικές τιμές.....	67
5.1.1	Θεωρητικές τιμές συνθηκών ομοιόμορφης ακτινοβολίας.....	68
5.1.2	Θεωρητικές τιμές συνθηκών μερικής σκίασης.....	71
5.2	Προσομοίωση τεχνικής P&O.....	73
5.3	Προσομοίωση τεχνικής INCOND	78
5.4	Προσομοίωση τεχνικής Variable Step Size P&O	83
5.5	Προσομοίωση τεχνικής Variable Step Size INCOND.....	86
5.6	Προσομοίωση συμβατικών τεχνικών σε συνθήκες μερικής σκίασης.....	89
5.7	Προσομοίωση τεχνικής GSS	90
5.8	Προσομοίωση τεχνικής RS	93
5.9	Προσομοίωση τεχνικής VW	95
5.10	Προσομοίωση τεχνικής VW and P&O.....	97
5.11	Προσομοίωση τεχνικής Cuckoo Search.....	99
5.12	Προσομοίωση τεχνικής DIRECT.....	102

5.13	Συγκεντρωτική αξιολόγηση μεθόδων MPPT	104
6.	Συμπεράσματα.....	107
6.1	Ανασκόπηση της εργασίας και επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για ένα υπό μελέτη Φ/Β σύστημα.....	107
6.2	Προτάσεις για περεταίρω έρευνα	108
7.	Βιβλιογραφία.....	110

Κατάλογος Συμβόλων

V	Τάση (V)
I	Ρεύμα (A)
P	Ισχύς (W)
G	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)
π	Μαθηματική σταθερά ($\cong 3.14$)
Φ/B	Φωτοβολταϊκό
STC	Standard Testing Conditions (Πρότυπες συνθήκες λειτουργίας Φ/B)
SC	Short Circuit (Βραχυκύκλωση)
OC	Open Circuit (Ανοικτοκύκλωση)
I_{sc}	Ρεύμα βραχυκύκλωσης
V_{oc}	Τάση ανοικτοκύκλωσης
MPP	Maximum Power Point (Σημείο μέγιστης ισχύος)
LMPP	Local Maximum Power Point
GMPP	Global Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Εντοπισμός σημείου μέγιστης ισχύος)
I_{mpp}	Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος
V_{mpp}	Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος
P_{mpp}	Ισχύς στο σημείο μέγιστης ισχύος
D	Duty cycle μετατροπέα ισχύος

P&O	Perturb & Observe
INCOND	Incremental Conductance
VSS	Variable step size
VW	Voltage Window
CS	Cuckoo Search
RS	Random Search
GSS	Golden Section Search
PWM	Pulse Width Modulation

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα και οι ΑΠΕ

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος και της ποιότητας της ανθρώπινης ζωής από τις κλασσικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με την εμφάνιση των πετρελαϊκών κρίσεων στα μέσα του 20^{ού} αιώνα, έστρεψε το ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Με την έννοια **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργεια** ή **ήπιες μορφές ενέργειας** ή **εναλλακτικές μορφές ενέργειας** ή **καθαρές μορφές ενέργειας** ορίζονται οι εκμεταλλεύσιμες πηγές ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διεργασίες όπως ο άνεμος, η γεωθερμία και άλλες [1].

Ο όρος «**Ανανεώσιμες**» αναφέρεται στο ότι οι πηγές αυτές υπάρχουν σε αφθονία στη φύση και ανανεώνονται συνεχώς. Ο όρος «**ήπιες**» αναφέρεται στο γεγονός ότι για την αξιοποίηση τους δεν πραγματοποιείται κάποια ενεργητική παρέμβαση πάρα μόνο η διαχείριση της υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, πρόκειται για «**καθαρές**» μορφές ενέργειας, που σημαίνει ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον [1].

Οι ΑΠΕ θεωρούνται πλέον εφελκτήριο για την επίλυση των ενεργειακών προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης. Η ανάγκη της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οδηγούν όλο και περισσότερο στη χρήση καθαρών πηγών ενέργειας, οι οποίες αποτελούν τη μοναδική οδό για την επίλυση των οικολογικών ζητημάτων της Γης. Ωστόσο, σε παγκόσμιο επίπεδο, κατέχουν μικρό ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο έως το 2020, ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας να προέρχεται αποκλειστικά από αυτές. Συμπερασματικά, η αξιοποίηση των ΑΠΕ και η αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας με αυτές θα μπορούσε να αποτελέσει πολύ σημαντικό βήμα για την καλυτέρευση της ποιότητας ζωής, δείχνοντας παράλληλα τον αντίστοιχο σεβασμό στον πλανήτη μας [1].

1.2 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας δεν βασίζονται στην εκμετάλλευση του ορυκτού πλούτου όπως οι συμβατικές μορφές ενέργειας. Πιο αναλυτικά, οι ΑΠΕ διακρίνονται στα παρακάτω είδη [2]:

- **Αιολική Ενέργεια.** Ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Για την αξιοποίηση της χρησιμοποιούνται οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική [2].
- **Ηλιακή Ενέργεια.** Χαρακτηρίζεται το σύνολο των μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Στοιχεία και ενώσεις στη Γη απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμότητα και τα μετατρέπουν σε άλλες μορφές ενέργειας [2].
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια.** Είναι η ενέργεια που στηρίζεται στην μετατροπή της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού των λιμνών ή των ποταμών, σε ηλεκτρική [2].

- **Βιομάζα.** Ονομάζεται το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των προϊόντων και αποβλήτων προερχόμενο από τη γεωργία ή το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων [2].
- **Γεωθερμία.** Είναι η φυσική θερμική ενέργεια της Γης. Καλύπτει κατά κύρια βάση ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μετατρέπεται σε ηλεκτρική [2].
- **Βιοαέριο.** Προέρχεται από την αναερόβια χώνευση βιομάζας. Ως χώνευση ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία, σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου, το βιολογικό κλάσμα ενός υλικού διασπάται από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς του [3].
- **Πυρηνική Ενέργεια.** Είναι η ενέργεια που υπάρχει μέσα στον πυρήνα του ατόμου. Μπορεί να απελευθερωθεί μέσω πυρηνικής σχάσης ή πυρηνικής σύντηξης πυρήνων [4].

1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΑΠΕ

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι τα εξής:

- Δεν παράγουν απόβλητα γεγονός που τις καθιστά πολύ φιλικές προς το περιβάλλον.
- Είναι ανεξάντλητες.
- Είναι ευέλικτες και έτσι δεν απαιτείται δημιουργία τεράστιων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας.
- Ο εξοπλισμός τους είναι απλός στην κατασκευή και την συντήρηση.

- Βοηθούν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών η αναπτυσσόμενων χωρών.

Από την άλλη πλευρά, παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ, εμφανίζονται και κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι:

- Έχουν αρκετά μεγάλο κόστος εφαρμογής.
- Η παραγωγή ενέργειας δεν διατηρείται σε σταθερά επίπεδα εφόσον εξαρτάται από παράγοντες όπως το γεωγραφικό πλάτος, η εποχή του έτους, το κλίμα της περιοχής κλπ.
- Για τις ανεμογεννήτριες υπάρχει η άποψη ότι ευθύνονται για τους θανάτους πουλιών.

1.4 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τον ήλιο, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται πυρηνική σύντηξη μέσω της οποίας ισότοπα υδρογόνου ενώνονται για να δημιουργήσουν ένα άτομο ηλίου. Σε ένα δευτερόλεπτο, ο ήλιος παράγει τόση ενέργεια όση θα έδινε μια έκρηξη τεσσάρων δισεκατομμυρίων βομβών υδρογόνου, των εκατό μεγατόνων η κάθε μια. Ο ήλιος εκπέμπει εδώ και πέντε δισεκατομμύρια χρόνια και θα συνεχίσει τουλάχιστον για άλλα τόσα [2].

Η ένταση G (W/m^2) της ηλιακής ακτινοβολίας, ορίζεται ως το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μία επιφάνεια και δίνεται από τον τύπο:

$$G = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (1.1)$$

όπου:

P Η συνολική ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος (W).

d Η απόσταση της περιοχής, που υπολογίζεται η ένταση, από τον Ήλιο (m).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από το υψόμετρο της περιοχής που την δέχεται. Σύμφωνα με μετρήσεις, η μέγιστη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας τυπικά φτάνει στα 1000 W/m^2 στη στάθμη της θάλασσας και η τιμή της αυξάνεται κατά 7 W/m^2 για κάθε εκατό μέτρα ύψους της τοποθεσίας. Αυτό συμβαίνει επειδή μειώνεται αναλόγως το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας.

1.4.1 Αξιοποίηση της Ηλιακής Ενέργειας

Στις μέρες μας, η αξιοποίηση της ηλιακής επιτυγχάνεται με δυο τρόπους:

- Με τη χρήση **ηλιακών συλλεκτών**. Οι συλλέκτες απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν σε θερμική. Χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρου ή νερού [1].



Σχήμα 1-1. Ηλιακός συλλέκτης.

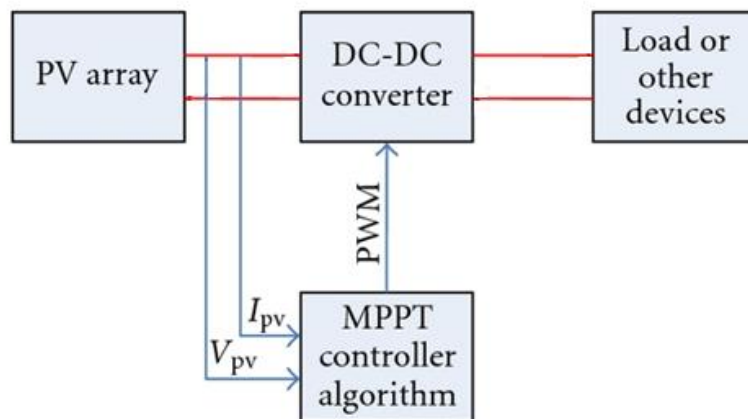
- Με τη χρήση **Φ/Β στοιχείων**. Τα στοιχεία απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στηριζόμενα σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται **φωτοβολταϊκό**, την μετατρέπουν σε ηλεκτρική [1].



Σχήμα 1-2. Φ/Β στοιχείο.

1.5 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση διαφόρων αλγορίθμων εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος Φ/Β συστήματος σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.



Σχήμα 1-3. Σχηματική αναπαράσταση Φ/Β συστήματος.

Στο Σχήμα 1-3 παριστάνεται το γενικό διάγραμμα ενός Φ/Β συστήματος που χρησιμοποιείται στην περίπτωση μας. Η Φ/Β συστοιχία είναι συνδεδεμένη σε έναν DC-DC μετατροπέα που τροφοδοτεί ένα φορτίο. Για λόγους απλοποίησης της μελέτης το φορτίο είναι ωμικό γιατί μας ενδιαφέρει η μέγιστη πραγματική ισχύς που παράγει η Φ/Β συστοιχία. Το Duty Cycle του PWM σήματος ελέγχου του μετατροπέα DC/DC καθορίζεται από τη μονάδα ελέγχου

η οποία μετρά συνεχώς την τάση και το ρεύμα εξόδου της Φ/Β συστοιχίας και υλοποιεί τον εκάστοτε αλγόριθμο MPPT για την εύρεση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Γίνονται προσομοιώσεις σε διαφορετικές συνθήκες (μεταβαλλόμενη θερμοκρασία, μεταβαλλόμενη ακτινοβολία, μερική σκίαση) ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη λειτουργία του κάθε αλγορίθμου αλλά και σύγκριση μεταξύ αυτών.

1.6 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή και εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής περιγραφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και της λειτουργίας τους και εισάγεται η έννοια του «σημείου μέγιστης ισχύος».

Στο τρίτο κεφάλαιο, μελετώνται αλγόριθμοι οι οποίοι εντοπίζουν το σημείο μέγιστης ισχύος σε διάφορες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, οι αλγόριθμοι αυτοί προσομοιώνονται στο περιβάλλον Matlab/Simulink και γίνεται μια εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων για κάθε αλγόριθμο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση τους με βάση κάποιες παραμέτρους αξιολόγησης.

2.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Το Φ/Β φαινόμενο παρατηρήθηκε, για πρώτη φορά, από τον Edmond Becquerel το 1839. Κατά τη διάρκεια πειραμάτων, παρατήρησε ότι όταν δυο πλάκες Χρυσού (Au) ή Λευκόχρυσου (Pt) εμβυθισμένες σε όξινο, βασικό ή ουδέτερο διάλυμα, εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία, τότε παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Το επόμενο βήμα έγινε από τον Fritts το 1883, ο οποίος έκανε μια απόπειρα κατασκευής ενός Φ/Β στοιχείου, επικαλύπτοντας το ημιαγώγιμο στοιχείο Σελήνιο (Se) με λεπτή στρώση χρυσού. Σε πρακτικές εφαρμογές, το πρώτο Φ/Β στοιχείο σχεδιάστηκε στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Fuller, Chapin και Pearson [5], [6], [7].

2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός ημιαγώγιμου υλικού όταν προσπίπτει σε αυτό ηλιακή ακτινοβολία. Το βασικό συστατικό ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ένας ημιαγωγός (στοιχείο που ανήκει στην τέταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα). Ο συνηθέστερος που χρησιμοποιείται είναι το πυρίτιο (Si) λόγω της αφθονίας του στη φύση [8].

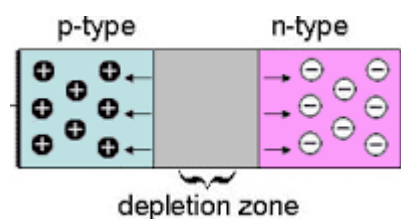
Κάθε άτομο του πυριτίου περιέχει τέσσερα ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους (εξωτερική στοιβάδα). Η στοιβάδα σθένους θα πρέπει να συμπληρωθεί με οκτώ ηλεκτρόνια επομένως κάθε άτομο πυριτίου ενώνεται με ομοιοπολικό δεσμό με άλλα τέσσερα άτομα πυριτίου. Έτσι, σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου [8].

Στους ημιαγωγούς, τα ηλεκτρόνια σθένους (ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας) δεν έχουν ούτε πολύ ισχυρούς δεσμούς με τον πυρήνα (όπως συμβαίνει με τους μονωτές), αλλά ούτε είναι και πολύ ευκίνητα (όπως συμβαίνει με τους αγωγούς). Αν λοιπόν, ένα ηλεκτρόνιο δεχθεί πρόσθετη ενέργεια (όπως φως ή θερμότητα) τότε μπορεί να φύγει από τον πυρήνα σπάζοντας τους δεσμούς του με αυτόν. Η κενή θέση που μένει ονομάζεται «οπή» όντας μια περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμμα και θετικό φορτίο [8].

Το φως αποτελείται από φωτόνια, τα οποία είναι σωματίδια που μεταφέρουν ενέργεια. Φωτίζοντας λοιπόν τον ημιαγωγό, φωτόνια συγκρούονται με ηλεκτρόνια σθένους με συνέπεια τα τελευταία να φεύγουν από άτομα του ημιαγωγού και να προσκολλώνται σε άλλα. Επομένως, θα υπάρχουν άτομα με εννέα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (αρνητικά φορτισμένα) και άτομα με επτά ηλεκτρόνια ή αλλιώς με μία οπή στην εξωτερική στοιβάδα (θετικά φορτισμένα). Το αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας είναι η άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών, η οποία όμως **δεν** ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα [8].

Για να επιτευχθεί κατευθυνόμενη και προς μια συγκεκριμένη φορά μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί πρόσμιξης. Για να δημιουργηθεί ένας τέτοιος ημιαγωγός αρκεί ο καθαρός ημιαγωγός να νοθευτεί με ένα πεντασθενές στοιχείο από τη μια πλευρά (π.χ. Φωσφόρος - P) ο οποίος ονομάζεται ημιαγωγός προσμίξεως τύπου n και ένα τρισθενές στοιχείο από την άλλη (π.χ. Βόριο - B) ο οποίος ονομάζεται ημιαγωγός προσμίξεως τύπου p. Έτσι από την πλευρά του Φωσφόρου θα έχουμε άτομα πυριτίου με εννέα ηλεκτρόνια και από την πλευρά του Βορίου άτομα με επτά ηλεκτρόνια, αφήνοντας τον κρύσταλλο ηλεκτρικά ουδέτερο [8].

Φωτίζοντας τον νοθευμένο ημιαγωγό, από την πλευρά του Φωσφόρου θα ελευθερωθούν τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια, κάνοντας άλματα με στόχο να καλύψουν τις οπές από την πλευρά του Βορίου, αφήνοντας στη μέση μια περιοχή με λίγους φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη αραίωσης ή ζώνη απογύμνωσης (depletion zone) [8].



Σχήμα 2-1. Σχηματική αναπαράσταση ένωσης p-n.

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται μια ένωση p-n. Στην περιοχή του Βορίου (περιοχή n) πραγματοποιείται συσσώρευση ηλεκτρονίων, δηλαδή αρνητικών φορτίων, ενώ στην περιοχή του φωσφόρου (περιοχή p) πραγματοποιείται συσσώρευση οπών, δηλαδή θετικών φορτίων, δημιουργώντας ηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο επιφανειών.

2.3 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Ως φωτοβολταϊκό στοιχείο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη καλείται μια συσκευή η οποία χρησιμοποιεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό. Βασικό συστατικό του είναι κάποιος ημιαγωγός, συνήθως το πυρίτιο. Για παραγωγή ικανοποιητικής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται σύνδεση πολλών Φ/Β στοιχείων σε σειρά ή/και παράλληλα [8].

2.4 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή Φ/Β στοιχείων σήμερα είναι τρεις [8]:

- Μονοκρυσταλλική τεχνολογία (monocrystalline).
- Πολυκρυσταλλική τεχνολογία (polycrystalline).
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film).

2.4.1 Μονοκρυσταλλική τεχνολογία

Είναι η πιο παλιά από τις τρεις μεθόδους. Τα Φ/Β στοιχεία κατασκευάζονται από μια συνεχόμενη κρυσταλλική δομή και έχουν ενιαίο χρώμα. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται η μέθοδος Czochralski κατά την οποία ένα μικρό κομμάτι κρυστάλλου πυριτίου τοποθετείται σε μια δεξαμενή με λιωμένο πυρίτιο και σιγά σιγά σχηματίζεται ένας συμπαγής κρύσταλλος γνωστός ως ράβδος πυριτίου. Η ράβδος αυτή κόβεται σε λεπτές φέτες που είναι ευρέως γνωστές ως δισκία πυριτίου (silicon wafers) [8].

Πλεονεκτήματα μονοκρυσταλλικής τεχνολογίας [8]:

- Έχει τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Μετατρέπει πάνω από το 22% της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Τα Φ/Β στοιχεία που προκύπτουν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

Μειονέκτημα μονοκρυσταλλικής τεχνολογίας [8]:

- Είναι η πιο ακριβή από τις τρεις τεχνολογίες.

2.4.2 Πολυκρυσταλλική τεχνολογία

Κατά την πολυκρυσταλλική μέθοδο, ένα μικρό κομμάτι πυριτίου χυτεύεται και στη συνέχεια ψύχεται βραδέως με αποτέλεσμα να αποκτά στερεή μορφή, οπότε και εμφανίζονται οι κρυσταλλικές δομές του σε διάφορες διατάξεις [8].

Πλεονέκτημα πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας:

- Είναι απλή και λιγότερο δαπανηρή από την μονοκρυσταλλική μέθοδο.

Μειονεκτήματα πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας:

- Η απόδοση της κυμαίνεται από 14% έως 16%.
- Καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια για να παραγάγει το ίδιο ποσό ενέργειας σε σχέση με την μονοκρυσταλλική τεχνολογία.

2.4.3 Τεχνολογία λεπτών υμενίων (Thin Film)

Στην τεχνολογία λεπτών υμενίων, εναποτίθενται λεπτά στρώματα υλικών όπως CdTe, CdS κλπ. επάνω σε κάποιο υπόστρωμα [8].

Πλεονέκτημα τεχνολογίας λεπτών υμενίων [8]:

- Μπορεί να δημιουργήσει εύκαμπτα πάνελ για να εφαρμοστούν σχεδόν σε οποιαδήποτε επιφάνεια.

Μειονέκτημα τεχνολογίας λεπτών υμενίων [8]:

- Είναι προς το παρόν ακριβότερη σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες.

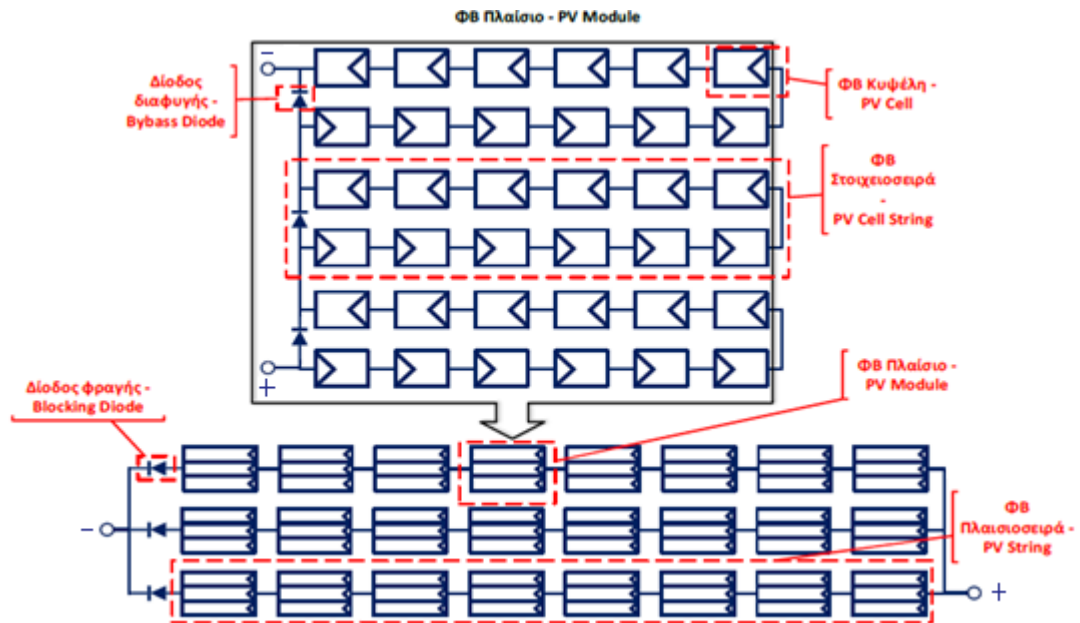
2.5 Φωτοβολταϊκές διατάξεις

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο λόγω της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης του, παράγει μικρή διαφορά δυναμικού. Επομένως, για να παραχθεί το επιθυμητό ποσό ενέργειας συνδέονται πολλά Φ/Β στοιχεία σε σειρά ή/και παράλληλα [8].

Για λόγους προστασίας, ανά κάποιο αριθμό κυψελών συνδέονται σε σειρά δίοδοι διαφυγής (bypass diodes). Η σύνδεση πολλών Φ/Β στοιχείων και της διόδου διαφυγής σε σειρά ονομάζεται Φ/Β στοιχειοσειρά (PV Cell String) [8].

Η παράλληλη σύνδεση πολλών στοιχειοσειρών δημιουργεί ένα Φ/Β πλαίσιο (PV Module). Σε εμπορικές εφαρμογές συναντώνται 36-72 κυψέλες ανά Φ/Β πλαίσιο, το οποίο αναπτύσσει τάση μερικών δεκάδων Volts [8].

Σε περίπτωση που συνδεθούν σε σειρά πολλά Φ/Β πλαίσια σχηματίζουν μια Φ/Β πλαίσιοσειρά (PV string), ενώ η παράλληλη σύνδεση πολλών πλαίσιοσειρών διαμορφώνουν μια Φ/Β συστοιχία (PV array) [8].

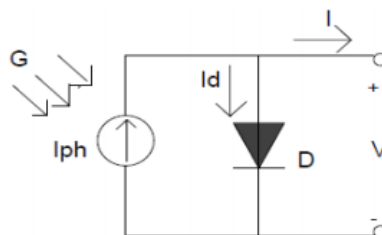


Σχήμα 2-2. Σχηματική απεικόνιση Φ/B διατάξεων [8].

Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι συνδυασμοί των Φ/B διατάξεων, ξεκινώντας από τη μικρότερη δομική μονάδα, δηλαδή το Φ/B στοιχείο και καταλήγοντας στην μεγαλύτερη δομική μονάδα, δηλαδή τη Φ/B συστοιχία η οποία χρησιμοποιείται και για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V

Το ιδανικό Φ/B στοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μια πηγή ρεύματος η οποία συνδέεται σε μια δίοδο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών καθώς και της λειτουργίας του.



Σχήμα 2-3. Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού Φ/Β στοιχείου [9].

Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού Φ/Β στοιχείου. Το φωτόρευμα (I_{ph}) εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα διόδου (I_d) έχει μια εξάρτηση από την τάση (λόγω της διόδου), καθώς και από τη θερμοκρασία. Η μαθηματική σχέση ρεύματος-τάσης που προκύπτει από το κύκλωμα του Σχήματος 2.3 είναι η εξής:

$$I = I_{ph} - I_d \left(e^{\frac{V}{a}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$a = \frac{nkT_c}{q} \quad (2.2)$$

όπου:

I_{ph} το φωτόρευμα ή αλλιώς η ένταση της πηγής ρεύματος (A).

I_d το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου (A).

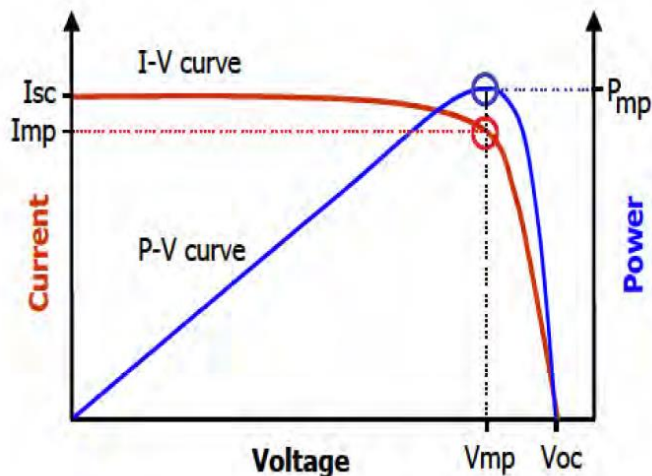
n συντελεστής της διόδου που κυμαίνεται στο διάστημα [1,2].

k η σταθερά Boltzmann με τιμή 1.38065×10^{-23} J/K.

q το φορτίο του ηλεκτρονίου με τιμή 1.60218×10^{-19} Cb.

T_c η θερμοκρασία κυψέλης (K).

Η γραφική παράσταση μεταξύ τάσεως και ρεύματος, ή μεταξύ της τάσεως και της ισχύος, στην έξοδο του Φ/Β στοιχείου ονομάζεται χαρακτηριστική [9].



Σχήμα 2-4. Χαρακτηριστική I-V (κόκκινο) και P-V (μπλε) Φ/Β στοιχείου [9].

Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα χαρακτηριστικής ρεύματος - τάσεως με πορτοκαλί χρώμα καθώς και η αντίστοιχη χαρακτηριστική ισχύος - τάσεως με μπλε χρώμα. Παρατηρούνται επίσης τα σημεία I_{mp} , V_{mp} και P_{mp} που αντιστοιχούν στις τιμές του ρεύματος, της τάσης και της ισχύος στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP).

2.7 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου

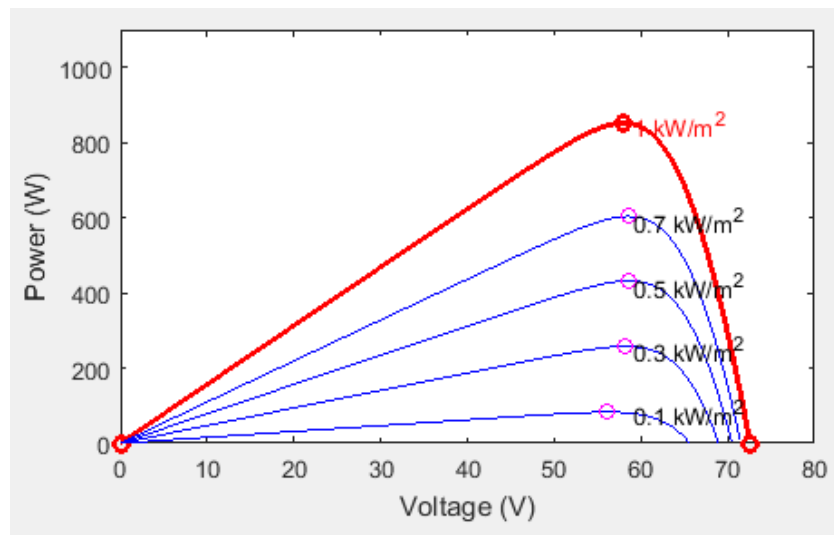
Τα εμπορικά Φ/Β πλαίσια συνοδεύονται από το τεχνικό τους φυλλάδιο (data sheet), στο οποίο αναγράφονται τα χαρακτηριστικά τους. Τα πιο σημαντικά είναι:

- Οι αριθμοί N_s και N_{cs} των κυψελών και των διόδων διαφυγής αντίστοιχα.
- Το σημείο λειτουργίας βραχυκύκλωσης (Short Circuit - SC) στο οποίο παράγεται το μέγιστο δυνατό ρεύμα, αλλά η τάση στα άκρα του Φ/Β πλαισίου είναι μηδενική.
- Το σημείο λειτουργίας ανοικτοκύκλωσης (Open Circuit – OC) στο οποίο το Φ/Β πλαίσιο δεν διαρρέεται από ρεύμα και τη τάση στα άκρα του είναι η μέγιστη δυνατή.

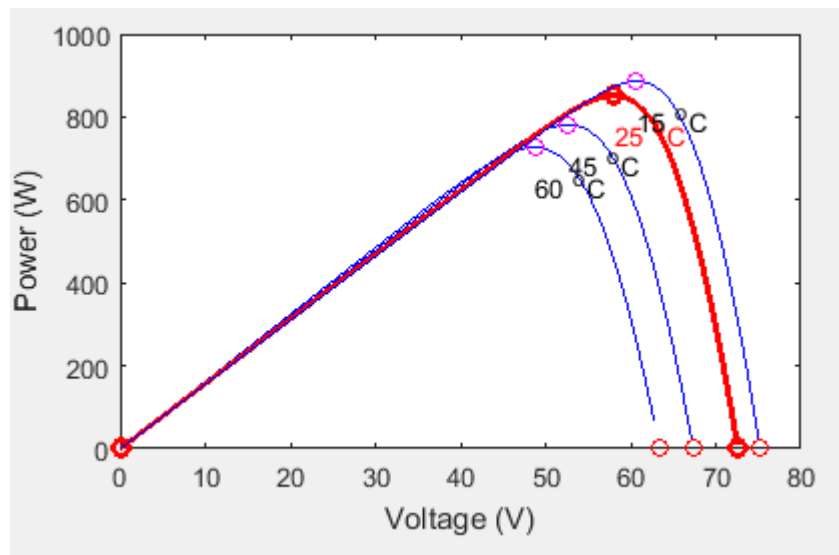
- Το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point – MPP) στο οποίο παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς.
- Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος–τάσης και ισχύος–τάσης του Φ/Β πλαισίου.

2.7.1 Σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος

Το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) είναι το σημείο στο οποίο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Η τιμή της τάσης στο MPP συμβολίζεται ως V_{mp} και η τιμή της κυμαίνεται στο 80-85% της V_{oc} , ενώ η τιμή του ρεύματος στο MPP συμβολίζεται ως I_{mp} και είναι ελαφρώς μικρότερη από την τιμή του I_{sc} . Υπάρχουν διάφορες τεχνικές οι οποίες εντοπίζουν έξυπνα, με τη χρήση αλγορίθμων, το MPP και υποχρεώνουν το Φ/Β πλαίσιο να δουλεύει συνεχώς σε αυτό το σημείο αυτό. Κάποιες από αυτές αναλύονται διεξοδικά στην παρούσα εργασία [8].



Σχήμα 2-5. Χαρακτηριστικές P-V για θερμοκρασία 25 °C και διάφορες τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2-6. Χαρακτηριστικές P-V για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 και διάφορες τιμές της θερμοκρασίας.

Στα Σχήματα 2-5 και 2-6 διακρίνονται παραδείγματα των χαρακτηριστικών P-V για διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για δυο Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Για κάθε μια χαρακτηριστική παρουσιάζεται το Σημείο Μέγιστης Ισχύος. Αξίζει να αναφερθεί ότι η χαρακτηριστική P-V με κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας Φ/Β (Standard Testing Conditions - STC), οι οποίες αναλογούν σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C .

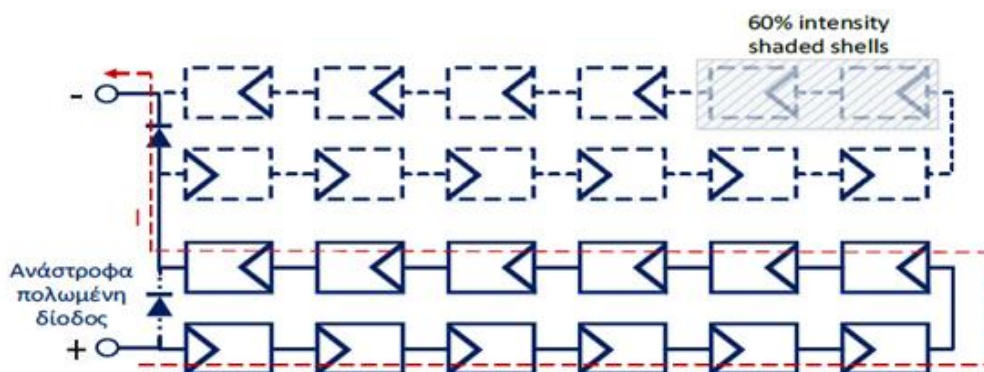
2.8 Μερική σκίαση

Ως μερική σκίαση, ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια μιας Φ/Β συστοιχίας δέχονται διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα υπόλοιπα της ίδιας Φ/Β συστοιχίας. Η σκίαση μπορεί να προκληθεί από σκόνη, σύννεφα, κτίρια, δέντρα κλπ. [10].

2.8.1 Λειτουργία Φ/Β διάταξης σε συνθήκες μερικής σκίασης

Η σύνδεση Φ/Β κυψελών σε σειρά συνεπάγεται λειτουργία τους με κοινό ρεύμα. Κατά τη μερική σκίαση, μια ή περισσότερες Φ/Β κυψέλες δέχονται διαφορετική ακτινοβολία από τις υπόλοιπες, οπότε παράγουν μειωμένο ρεύμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ολόκληρή η συστοιχία να προσαρμόζεται στις μειωμένες ανάγκες ρεύματος. Οι σκιασμένες κυψέλες απορροφούν ισχύ εφόσον αναπτύσσουν αρνητική τάση. Το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση θερμικών κηλίδων (hot spot effect) και κατά συνέπεια στην καταστροφή των αντίστοιχων κυψελών.

Η αντιμετώπιση του φαινομένου των θερμικών κηλίδων πραγματοποιείται με την τοποθέτηση διόδων διαφυγής ανά συγκεκριμένο αριθμό Φ/Β στοιχείων μέσα σε κάθε Φ/Β πλαίσιο. Έτσι, απομονώνονται οι σκιασμένες στοιχειοσειρές και διασώζεται μεγάλο μέρος της ισχύος καθώς και οι αντίστοιχες Φ/Β κυψέλες από τη φθορά.

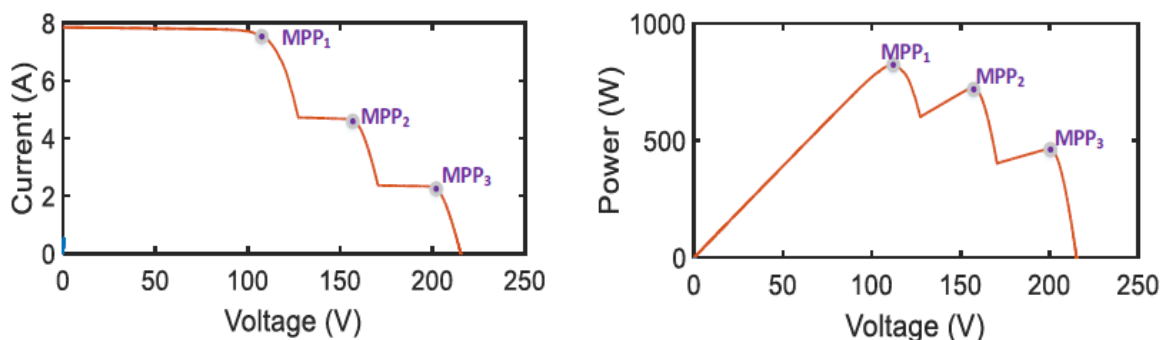


Σχήμα 2-7. Μερικώς σκιασμένο πλαίσιο. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η ροή του ρεύματος [8].

Στο Σχήμα 2-7 απεικονίζεται σχηματικά ένα μερικώς σκιασμένο πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα σκιάζονται δυο από τις δώδεκα κυψέλες της στοιχειοσειράς, οπότε η αντίστοιχη δίοδος διαφυγής πολώνεται ορθά.

2.8.2 Μερική σκίαση και MPP

Η τοποθέτηση διόδων διαφυγής, ως μέσον προστασίας του Φ/Β συστήματος, ευθύνεται για την τροποποίηση των χαρακτηριστικών καμπύλων ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης, εμφανίζοντας περισσότερα του ενός τοπικά μέγιστα (Local Maximum Power Points - LMPPs).

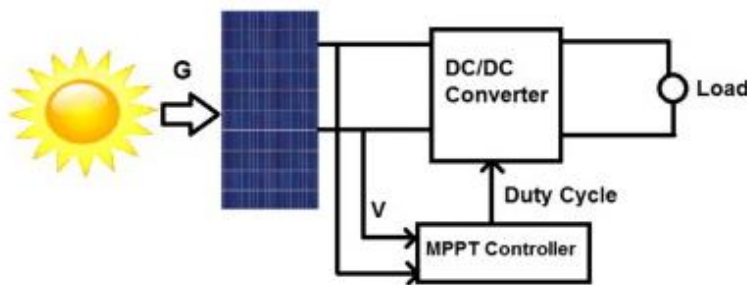


Σχήμα 2-8. Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V σκιασμένης Φ/Β συστοιχίας [8].

Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί τροχοπέδη τόσο στη μελέτη, όσο και στη λειτουργία των Φ/Β συστημάτων. Οι συμβατικές τεχνικές ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος οδηγούνται σε ανακριβή αποτελέσματα και αδυνατούν να εντοπίσουν το ολικό μέγιστο. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η δημιουργία καινοτόμων τεχνικών με τη χρήση έξυπνων αλγορίθμων, έχει καταφέρει να δώσει λύσεις στο παραπάνω ζήτημα.

2.9 Σύνδεση σε ηλεκτρικό φορτίο

Τα Φ/Β συστήματα δεν συνδέονται απευθείας στο ηλεκτρικό φορτίο. Για να μπορέσει να συνδεθεί ένα Φ/Β σύστημα σε ηλεκτρικό φορτίο έτσι ώστε η ισχύς που παράγει να είναι ωφέλιμη προς χρήση, απαιτούνται κάποιες πρόσθετες διατάξεις.



Σχήμα 2-9. Γενικό διάγραμμα σύνδεσης Φ/Β συστοιχία σε ηλεκτρικό φορτίο.

Στο Σχήμα 2-9 παρουσιάζεται μια τυπική συνδεσμολογία που υιοθετήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Όπως φαίνεται η Φ/Β συστοιχία συνδέεται σε έναν μετατροπέα ισχύος και την μονάδα ελέγχου MPPT. Με τη βοήθεια του αλγορίθμου MPPT, το υποσύστημα (DC/DC converter) λειτουργεί ως ρυθμιστής ισχύος έτσι ώστε να εξάγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς και ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση της ΦΒ διάταξης για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού φορτίου. Στην περίπτωση διασύνδεσης του Φ/Β συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο, τότε στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC συνδέεται και ένας μετατροπέας DC/AC (αντιστροφέας, inverter).

2.9.1 Μετατροπέας Ισχύος

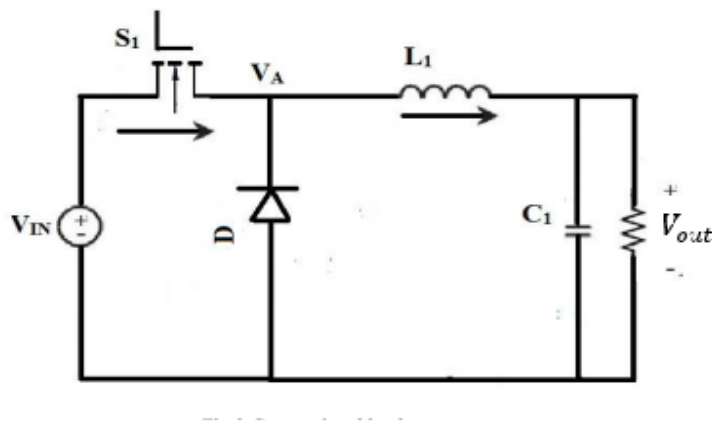
Ο μετατροπέας ισχύος σε ένα σύστημα αναλαμβάνει να ανυψώσει ή να υποβιβάσει την DC τάση. Υπάρχουν τρεις τύποι μετατροπέων ισχύος [11],[12]:

- Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (Boost DC-DC converter).

Πραγματοποιεί ανύψωση τάσης, δηλαδή η τάση εξόδου μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από την τάση εισόδου.

- Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buck ή Step-Down converter).
Πραγματοποιεί υποβιβασμό τάσης, δηλαδή η τάση εξόδου μπορεί να πάρει τιμές από μηδέν έως την τάση εισόδου.
- Μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης συνεχούς τάσης (Buck-Boost converter).
Πραγματοποιεί είτε ανύψωση, είτε υποβιβασμό τάσης, δηλαδή δίνει τη δυνατότητα στην τάση εξόδου να πάρει τιμές μεγαλύτερες, μικρότερες ή ίσες της τάσης εισόδου.

Στην παρούσα διατριβή έχει χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck converter).



Σχήμα 2-10. Διάγραμμα μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης [13].

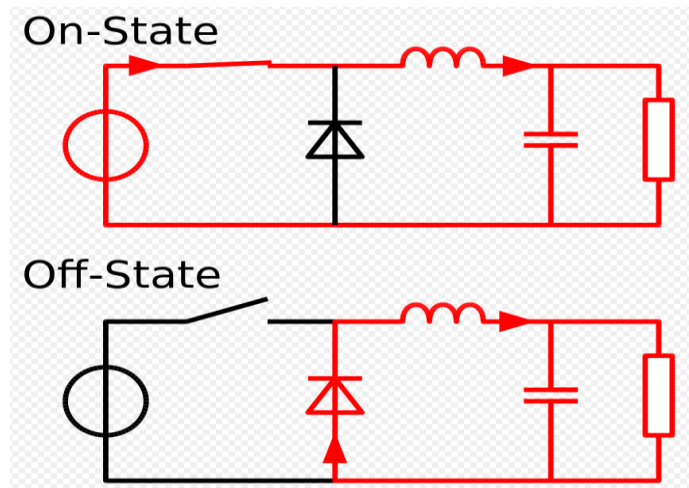
Ο μετατροπέας παράγει στην έξοδο του τάση V_{out} με πλάτος μικρότερο από το πλάτος της τάσης εισόδου V_{IN} . Το πηλίκο του χρόνου T_{on} κατά τη διάρκεια του οποίου ο διακόπτης άγει, προς τον συνολικό χρόνο T της περιόδου λειτουργίας ονομάζεται **κύκλος λειτουργίας** (Duty Cycle) του διακόπτη, συμβολίζεται με D και δίνεται από τον τύπο:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.4)$$

όπου:

T_{on} ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης άγει (s).

T_{off} ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης είναι κλειστός (s).



Σχήμα 2-11. Οι δύο καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter).

Στο Σχήμα 2-11 παρουσιάζονται οι δύο καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Ο ρόλος της διόδου, που ονομάζεται διάδος ελεύθερης διέλευσης, είναι όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός (Off-State), να δημιουργείται κλειστός βρόχος ρεύματος προκειμένου να εκφορτιστεί η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου στο φορτίο. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (On-State), τότε η διάδος είναι πολωμένη ανάστροφα και το ρεύμα διαρρέει μόνο το πηνίο φορτίζοντας το.

Η τάση εξόδου του μετατροπέα, V_{out} , δίνεται από την σχέση:

$$V_{out} = D \times V_{IN} \quad (2.5)$$

όπου:

D ο κύκλος λειτουργίας του μετατροπέα ($0 \leq D \leq 1$).

V_{IN} η τάση εισόδου του μετατροπέα DC/DC (V).

2.9.2 Μονάδα ελέγχου MPPT

Η μονάδα ελέγχου MPPT έχει ως βασικό στόχο να υπολογίσει την τάση εξόδου που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 2-12. Γενικό διάγραμμα μονάδας ελέγχου MPPT.

Στο Σχήμα 2-12 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα της μονάδας ελέγχου MPPT. Η μονάδα παρακολουθεί μόνιμα την τάση και το ρεύμα που παράγει η Φ/Β συστοιχία και προσπαθεί να υπολογίσει την σωστή τάση εξόδου της συστοιχίας για την οποία έχουμε λειτουργία στο MPP. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιεί τον υπό εξέταση κάθε φορά αλγόριθμο MPPT και αφού υπολογίσει την απαιτούμενη τάση της συστοιχίας για λειτουργία στο MPP παράγει το σήμα PWM που ελέγχει τον μετατροπέα DC-DC με το κατάλληλο Duty Cycle.

3.

Μέθοδοι MPPT

3.1 Εισαγωγή στις μεθόδους MPPT

Οι τεχνικές εντοπισμού λειτουργίας της μέγιστης ισχύος μιας Φ/Β συστοιχίας έχουν προβληματίσει αρκετά τον επιστημονικό κλάδο τα τελευταία χρόνια, αποτελώντας αντικείμενο μελέτης και συνεχούς έρευνας [8].

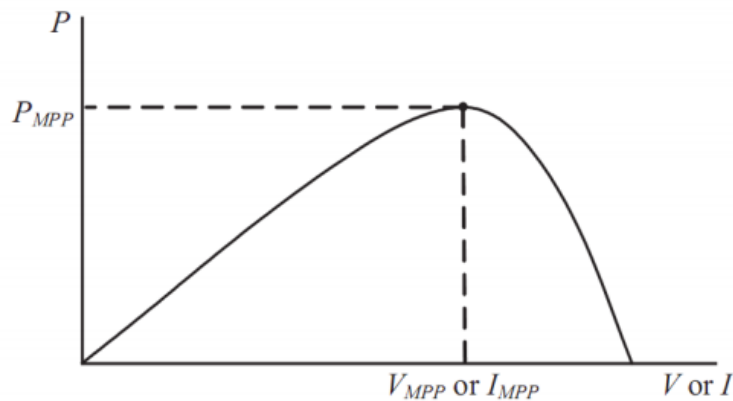
Οι αλγόριθμοι MPPT που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική μετρούν την τάση και το ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας και καθορίζουν κάθε φορά, με τις παρούσες μετεωρολογικές συνθήκες (ακτινοβολία, θερμοκρασία), το σημείο λειτουργίας για παραγωγή μέγιστης ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας επιλέγοντας κάθε φορά το κατάλληλο duty cycle του μετατροπέα ισχύος. Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της Φ/Β συστοιχίας, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει ένα ολικό μέγιστο το οποίο αντιστοιχεί σε μια μοναδική τάση (V_{mpp}) και ένα μοναδικό ρεύμα (I_{mpp}) λειτουργίας. Συνεπώς, μεταβάλλοντας την τάση και κατ' επέκταση και το ρεύμα, υπολογίζεται το σημείο λειτουργίας κατά το οποίο έχουμε τη μέγιστη παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία [8].

Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές αφορούν τις Φ/Β συστοιχίες που λειτουργούν κάτω από ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, συνθήκες κατά τις οποίες η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης έχει ένα ολικό μέγιστο. Στην περίπτωση της μερικής σκίασης η χαρακτηριστική P-V αλλοιώνεται εμφανίζοντας πολλά τοπικά μέγιστα (Local MPPs - LMPPs), αλλά ένα μόνο ολικό μέγιστο ισχύος (Global MPP - GMPP). Σε αυτήν την περίπτωση οι συμβατικές μέθοδοι αδυνατούν να εντοπίσουν το σημείο μέγιστης ισχύος και εγκλωβίζονται σε ένα από τα τοπικά μέγιστα [8].

Το γεγονός αυτό έχει στρέψει το ενδιαφέρον στη μελέτη και ανάπτυξη νέων τεχνικών ικανών να εντοπίζουν το GMPP ανάμεσα στα πολλά LMPPs. Οι δύο βασικές κατηγορίες των τεχνικών αυτών είναι οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι και οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αλγόριθμους που χρησιμοποιούν ευθείς υπολογισμούς βελτιστοποίησης, ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αλγόριθμους που χρησιμοποιούν νευρωνικά δίκτυα (neural networks) ή ασαφή λογική (fuzzy logic) ή τεχνικές σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO) ή γενετικούς αλγόριθμους (Genetic Algorithms) [8].

3.2 Ο αλγόριθμος Perturb and Observe

Ο αλγόριθμος διαταραχής και παρατήρησης (Perturb and Observe – P&O ή P&O) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές εύρεσης του σημείου παραγωγής μέγιστης ισχύος, εξαιτίας της μικρής υπολογιστικής πολυπλοκότητάς του. Η εν λόγω τεχνική έχει θεμελιώδη αρχή τη διατάραξη του duty cycle του μετατροπέα ισχύος κατά μια σταθερά C. Αυτή η διαταραχή συνεπάγεται τη διαταραχή της τάσης στην οποία αναγκάζεται να λειτουργήσει η Φ/Β συστοιχία και ορίζεται ως V_{ref} . Στο σημείο μέγιστης ισχύος η V_{ref} είναι ίση με την V_{mpp} [14].

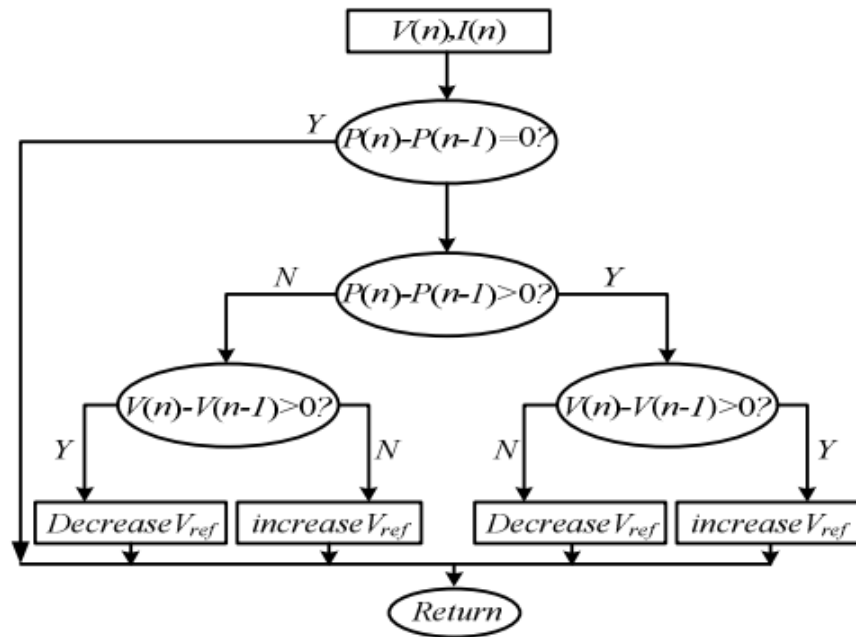


Σχήμα 3-1. Χαρακτηριστική καμπύλη P-V [14].

Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται το γενικευμένο σχήμα της χαρακτηριστικής ισχύος – τάσης. Είναι προφανές ότι καθώς αυξάνεται η τάση αυξάνεται και η ισχύς όταν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στα αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος. Από την άλλη πλευρά, όταν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στα δεξιά του MPP, όσο αυξάνεται η τάση τότε η ισχύς μειώνεται.

Πίνακας 3-1. Πίνακας αποφάσεων αλγορίθμου P&O		
Διαταραχή	Μεταβολή Ισχύος	Επόμενη Διαταραχή
Θετική	Θετική	Θετική
Θετική	Αρνητική	Αρνητική
Αρνητική	Θετική	Αρνητική
Αρνητική	Αρνητική	Θετική

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζεται ο πίνακας καθορισμού αποφάσεων (Decision Table) της τεχνικής P&O. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου να βρεθεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Μόλις βρεθεί, τότε ο αλγόριθμος δεν σταματά, αλλά συνεχίζει να ταλαντεύεται γύρω από αυτό [14].



Σχήμα 3-2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Perturb and Observe [15].

Στο Σχήμα 3-2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Perturb and Observe. Ο αλγόριθμος P&O, έχοντας σαν κανόνα το παραπάνω συμπέρασμα, μεταβάλλει κατά ένα μικρό σταθερό βήμα την τάση της Φ/Β συστοιχίας και συγκρίνει την τιμή της παραγόμενης ισχύς με την προηγούμενη τιμή της. Αν η νέα τιμή είναι μεγαλύτερη, τότε οι επόμενες διαταραχές πραγματοποιούνται στην ίδια κατεύθυνση με τις προηγούμενες έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αν υπάρχει μείωση της ισχύος, τότε η διαταραχή πραγματοποιείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η αλλαγή της τάσης αναφοράς V_{ref} πραγματοποιείται μέσα από την μεταβολή του duty cycle του σήματος ελέγχου του μετατροπέα ισχύος.

3.3 Ο αλγόριθμος Variable Step Size Perturb and Observe

Ο αλγόριθμος P&O είναι από τους πιο παλιούς και πιο συνηθισμένους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ωστόσο, το αδύνατο σημείο του αλγορίθμου είναι ο υπολογισμός της σταθερής τιμής C κατά την οποία γίνεται η εκάστοτε διαταραχή. Αν η τιμή του βήματος διαταραχής είναι μεγάλη, τότε ναι μεν υπάρχει γρήγορη σύγκλιση στο MPP, αλλά αυτό οδηγεί

σε μεγάλου πλάτους ταλάντωση γύρω από το MPP μετά τη σύγκλιση. Από την άλλη πλευρά, μικρό βήμα διαταραχής συνεπάγεται αργή σύγκλιση [16], [17].

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα, δίνεται από διάφορες παραλλαγές του P&O αλγορίθμου, οι οποίες αντικαθιστούν το βήμα διαταραχής από σταθερό σε μεταβλητό. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, η τάση αναφοράς V_{ref} αυξομειώνεται σύμφωνα με την εξίσωση [17]:

$$V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) \pm M \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right| \quad (3.1)$$

όπου:

$V_{ref}(k)$ η τρέχουσα τιμή της τάσης αναφοράς (V).

$V_{ref}(k-1)$ η προηγούμενη τιμή της τάσης αναφοράς (V).

M ο συντελεστής μεταβολής της τάσης αναφοράς.

$\Delta P/\Delta V$ η μεταβολή της ισχύος ως προς την μεταβολή της τάσεως.

Ωστόσο, το μεταβλητό βήμα μπορεί να εφαρμοσθεί και απευθείας στο duty cycle του μετατροπέα ισχύος ως εξής [16], [17]:

$$D(k) = D(k-1) \pm M \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta D} \right| \quad (3.2)$$

όπου:

$D(k)$ η τρέχουσα τιμή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

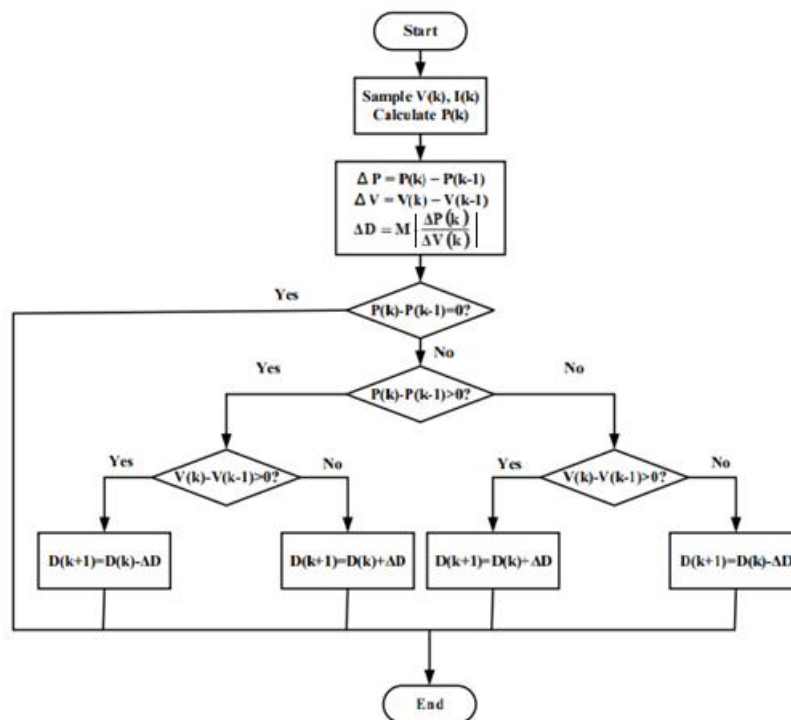
$D(k-1)$ η προηγούμενη τιμή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

M ο συντελεστής μεταβολής του duty cycle.

$\Delta P/\Delta D$ η μεταβολή της ισχύος ως προς την μεταβολή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

Η λογική του αλγορίθμου βασίζεται στη γρήγορη σύγκλιση στο MPP (μεγάλο βήμα διαταραχής) και μικρή ταλάντευση γύρω από το MPP (μικρό βήμα διαταραχής) εφόσον αυτό

εντοπιστεί. Η επιλογή της τιμής του παράγοντα M εξαρτάται από το εκάστοτε σύστημα και καθορίζεται με πειραματικές μεθόδους [16], [17].



Σχήμα 3-3. Διάγραμμα ροής Variable Step Size P&O [17].

Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Variable Step Size P&O. Δεν διαφέρει από αυτό του κλασσικού αλγορίθμου P&O, αλλάζει μόνο δυναμικά το μέγεθος του βήματος διαταραχής. Το βήμα είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης της καμπύλης P-V στο σημείο που εξετάζεται κάθε φορά πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή M , όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) [17], [18].

3.4 Ο αλγόριθμος Incremental-Conductance

Ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental-Conductance, INCOND) βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης είναι μηδέν στο MPP, θετική αριστερά του και αρνητική δεξιά από αυτό [16]. Πιο συγκεκριμένα:

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ στο MPP.}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ αριστερά του MPP.} \quad (3.3)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ δεξιά του MPP.}$$

όπου:

dP/dV είναι η παράγωγος της παραγόμενης ισχύος ως προς την τάση.

Όμως:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \quad (3.4)$$

όπου:

dP/dV είναι η παράγωγος της παραγόμενης ισχύος ως προς την τάση.

dI/dV η παράγωγος του παραγόμενου ρεύματος ως προς την τάση.

V η τιμή της παραγόμενης τάσης (V).

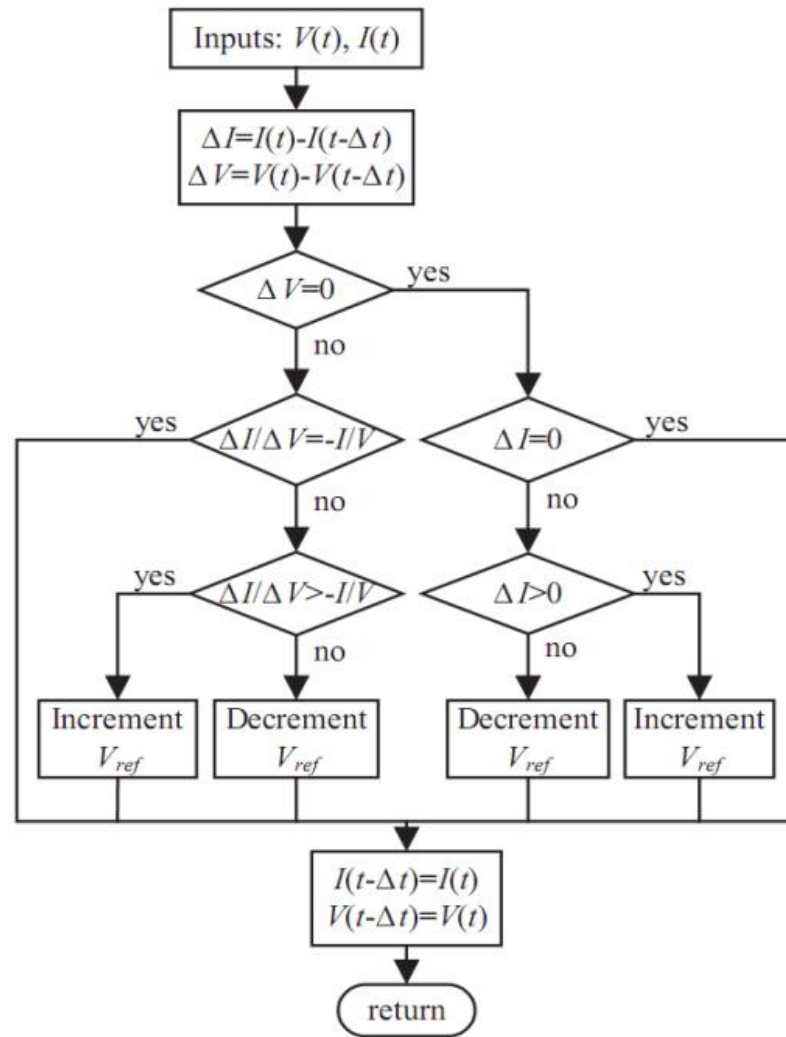
I η τιμή του παραγόμενου ρεύματος (A).

Χρησιμοποιώντας την (3.4) η σχέση (3.3) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ στο MPP.}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ αριστερά του MPP.} \quad (3.5)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ δεξιά του MPP.}$$



Σχήμα 3-4. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου INCOND [16].

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου INCOND. Βασικός γνώμονας του αλγορίθμου για τον εντοπισμό του MPP είναι η σύγκριση της κλήσης του εκάστοτε σημείου της P-V καμπύλης με την τιμή της στο σημείο λειτουργίας του προηγούμενου κύκλου. Ως V_{ref} καθορίζεται η τάση αναφοράς στην οποία αναγκάζεται να λειτουργεί η Φ/Β συστοιχία. Στο σημείο μέγιστης ισχύος, η V_{ref} ισούται με την V_{mpp} . Όπως και στον αλγόριθμο P&O, έτσι και στον INCOND δημιουργείται ταλάντωση γύρω από το MPP όταν αυτό ανιχνευτεί [16].

3.5 Ο αλγόριθμος Variable Step Size Incremental Conductance

Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου INCOND μπορεί να βελτιωθεί εάν χρησιμοποιηθεί μεταβλητό βήμα για τον υπολογισμό της τάσης V_{ref} . Όπως και στην περίπτωση του μεταβλητού βήματος P&O που αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται ο τύπος [18]:

$$V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) \pm M \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right| \quad (3.6)$$

όπου:

$V_{ref}(k)$ η τρέχουσα τιμή της τάσης αναφοράς (V).

$V_{ref}(k-1)$ η προηγούμενη τιμή της τάση αναφοράς (V).

M ο συντελεστής μεταβολής της τάσης αναφοράς.

$\Delta P/\Delta V$ η μεταβολή της ισχύος ως προς την μεταβολή της τάσεως.

Ωστόσο το μεταβλητό βήμα μπορεί να εφαρμοσθεί και απευθείας στο Duty Cycle του μετατροπέα ισχύος ως εξής:

$$D(k) = D(k-1) \pm M \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta D} \right| \quad (3.7)$$

όπου:

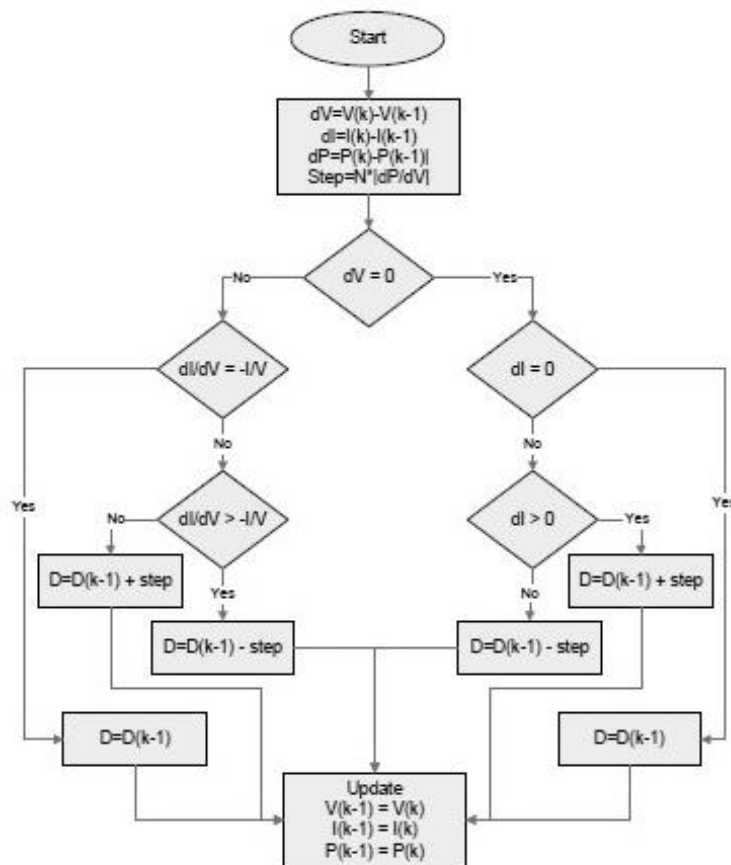
$D(k)$ η τρέχουσα τιμή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

$D(k-1)$ η προηγούμενη τιμή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

M ο συντελεστής μεταβολής του duty cycle.

$\Delta P/\Delta D$ η μεταβολή της ισχύος ως προς τη μεταβολή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

Και εδώ η επιλογή της τιμής του συντελεστή M εξαρτάται από το εκάστοτε σύστημα και υπολογίζεται πειραματικά [18].

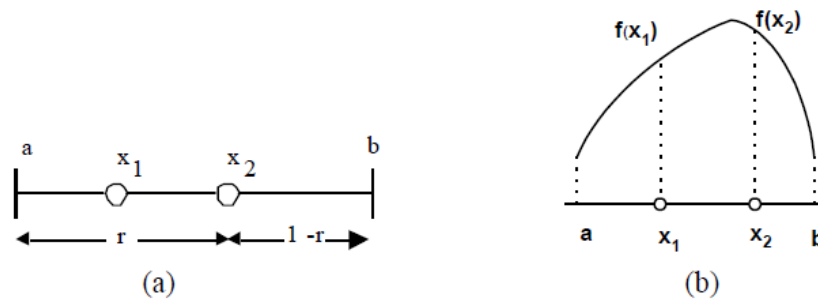


Σχήμα 3-5. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Variable Step Size INCOND [18].

Στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου INCOND. Η λειτουργία του είναι ίδια με αυτή του συμβατικού αλγορίθμου, αλλάζει μόνο το βήμα. Το βήμα είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης της καμπύλης P-V στο σημείο που εξετάζεται κάθε φορά πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή N.

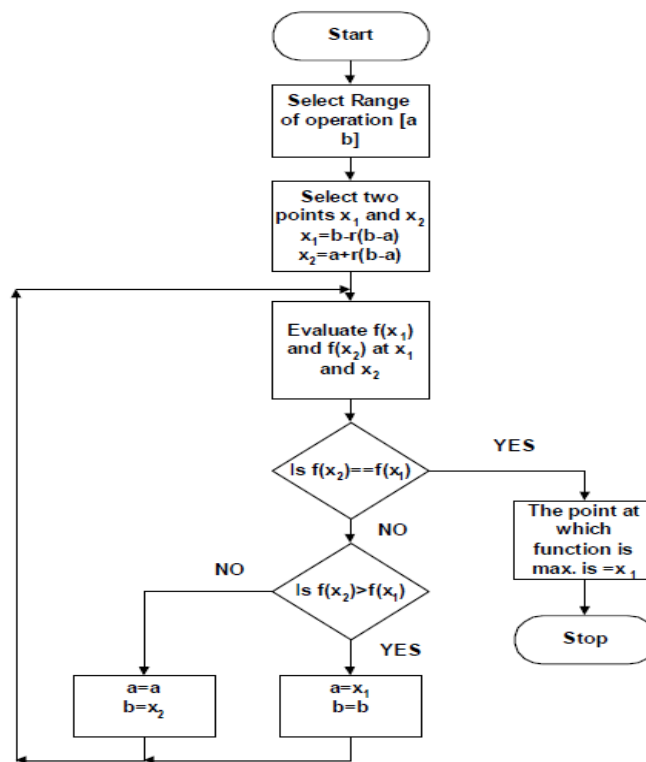
3.6 Ο αλγόριθμος Golden Section Search

Η μέθοδος αναζήτησης της χρυσής τομής (Golden Section Search - GSS) χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα βελτιστοποίησης και εύρεσης του ολικού μεγίστου ή ελαχίστου. Ο GSS χρησιμοποιεί την τεχνική συνεχούς στένυνσης των σημείων, ανάμεσα στα οποία αναζητείται το ολικό μέγιστο.



Σχήμα 3-6. (α) Επιλογή διαστήματος $[a, b]$, (β) Υπολογισμός τιμών ισχύος στο διάστημα $[a, b]$ [19].

Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζεται πως ο αλγόριθμος Golden Section Search τμηματοποιεί τον άξονα της τάσης. Η μεταβλητή r ονομάζεται λόγος της Χρυσής Τομής και είναι ίση με 0.618 [19].



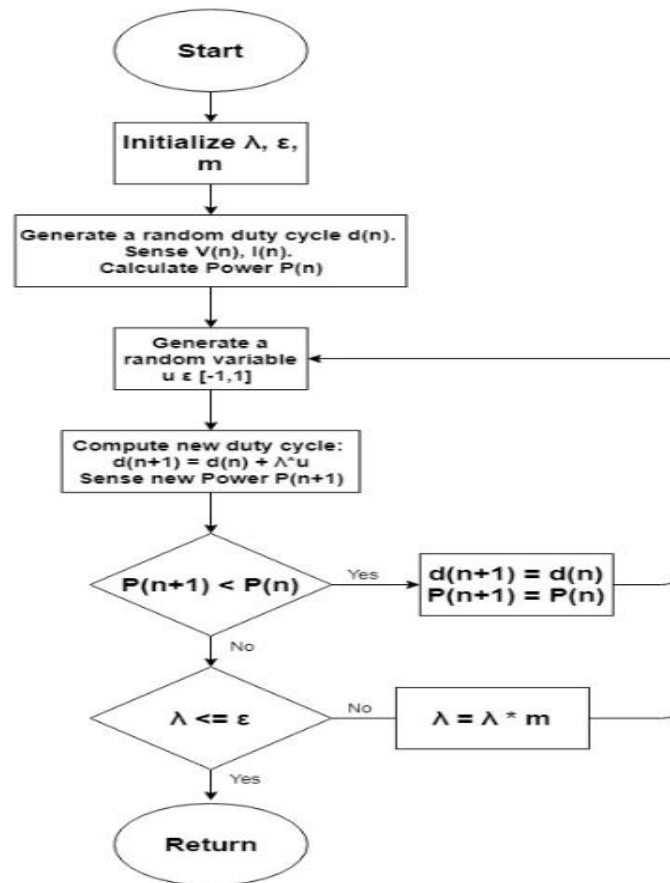
Σχήμα 3-7. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου GSS [19].

Στο Σχήμα 3-7 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Golden Section Search. Ο αλγόριθμος διαλέγει δυο σημεία x_1, x_2 ($x_1 < x_2$) από τον άξονα της τάσης, τα οποία απέχουν

ίση απόσταση από τα άκρα $[a, b]$ του διαστήματος μελέτης. Στην πρώτη επανάληψη ισχύει ότι: $a=0$ και $b=V_{oc}$ (τάση ανοικτοκύκλωσης). Ο αλγόριθμος ελέγχει τις τιμές της ισχύος $f(x_1)$ και $f(x_2)$ που αντιστοιχούν στα x_1, x_2 . Τα δυο επόμενα πιθανά διαστήματα αναζήτησης είναι τα $[a, x_2]$ εάν $f(x_2) > f(x_1)$ και $[x_1, b]$ εάν $f(x_2) < f(x_1)$. Εάν το νέο διάστημα είναι το $[a, x_2]$, ο αλγόριθμος αποφασίζει το σημείο x_1 να χρησιμοποιηθεί ως ένα εκ των δυο ενδιαμέσων σημείων, γιατί έτσι αποφεύγεται η εκ νέου αποτίμηση της συνάρτησης. Σε αυτή την περίπτωση, τα ενδιαμέσα σημεία θα είναι τα x_3 και x_1 με $a < x_3 < x_1 < x_2$. Η τμηματοποίηση του διαστήματος μελέτης σε μικρότερα διαστήματα γίνεται επαναληπτικά έως ότου $f(x_1) = f(x_2)$, όπου εκεί βρίσκεται και το MPP [19].

3.7 Ο αλγόριθμος Random Search

Ο αλγόριθμος Random Search (RS) είναι μια τεχνική συνεχούς αναζήτησης, ανεξάρτητη της κλίσης της καμπύλης. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών, που διαθέτουν όλες οι βιβλιοθήκες λογισμικού, με σκοπό την πιο γρήγορη εύρεση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος [20].



Σχήμα 3-8. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου RS [20].

Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου RS. Ο αλγόριθμος αφού ξεκινήσει με τις απαραίτητες αρχικοποιήσεις, δημιουργεί ένα τυχαίο ένα duty cycle εντός συγκεκριμένων ορίων τα οποία καθορίζονται από μια παράμετρο λ σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$d(n+1) = d(n) + \lambda \times u \quad (3.8)$$

$$\lambda = \lambda \times m \quad (3.9)$$

όπου:

$d(n+1)$ η τρέχουσα τιμή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

$d(n)$ η προηγούμενη τιμή του duty cycle του μετατροπέα ισχύος.

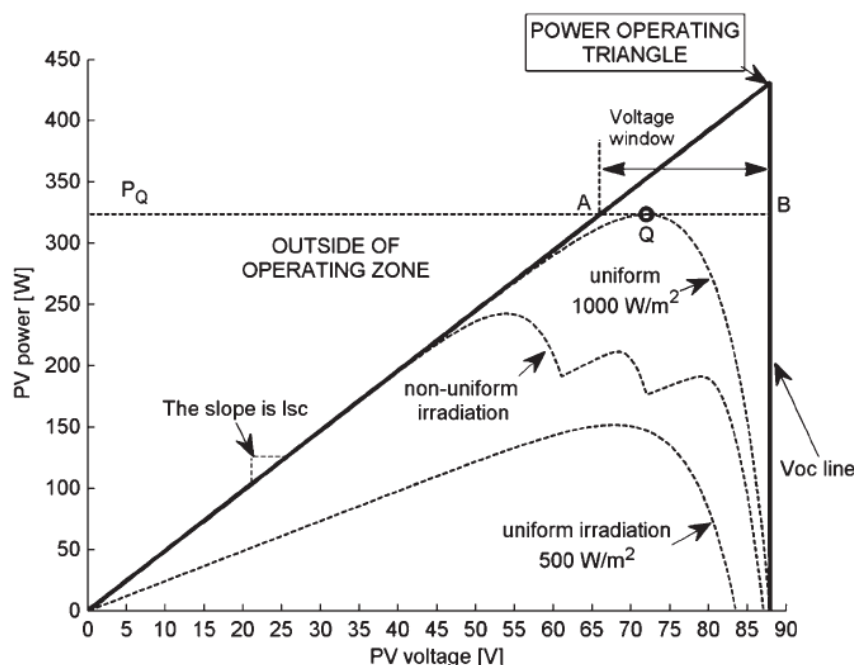
m σταθερά ίση με 0.92.

u τυχαία μεταβλητή με τιμές στο διάστημα $[-1,1]$.

Στη συνέχεια, μετρίεται η καινούργια ισχύς εξόδου της Φ/Β συστοιχίας και συγκρίνεται με αυτήν του προηγούμενου κύκλου. Εάν αυτή είναι μεγαλύτερη, τότε δημιουργείται ένα καινούργιο τυχαίο duty cycle, αυτή τη φορά εντός μικρότερων ορίων. Η αλλαγή των ορίων αυτών εξαρτάται από μια σταθερά m σύμφωνα με την εξίσωση (3.9). Πάντα το βήμα του duty cycle θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο μιας σταθεράς ε . Στην περίπτωση που η καινούργια ισχύς είναι μικρότερη από εκείνη του προηγούμενου κύκλου διατηρείται και η τιμή του duty cycle σταθερή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να εντοπιστεί το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος [20].

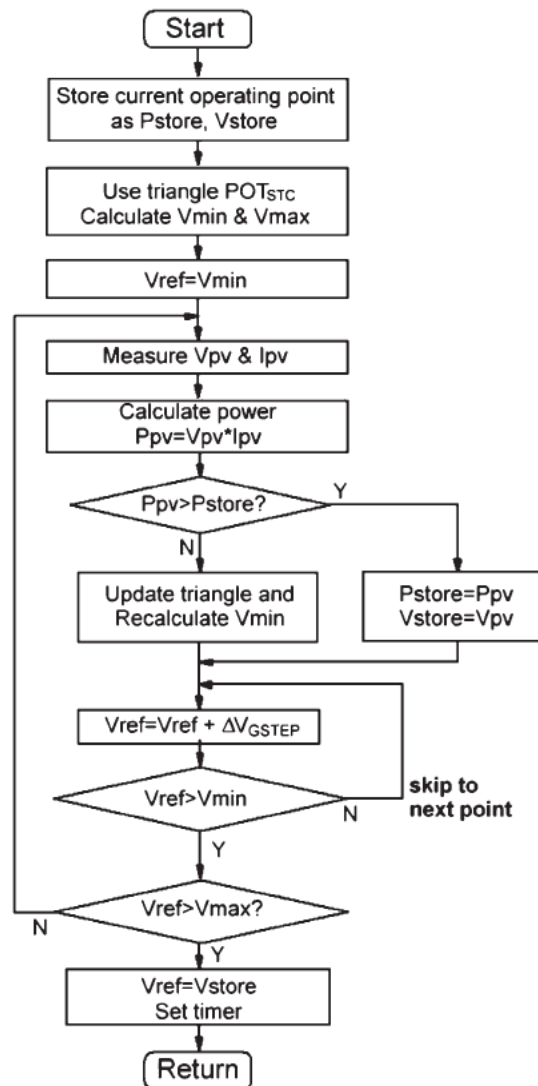
3.8 Ο αλγόριθμος Voltage Window

Η τεχνική Voltage Window (VW) βασίζεται στον υπολογισμό ενός τριγώνου ισχύος (POT) για κάθε περίπτωση συνθηκών λειτουργίας.



Σχήμα 3-9. Τρίγωνο ισχύος του αλγορίθμου VW [21].

Στο Σχήμα 3-9 παρουσιάζεται το τρίγωνο ισχύος που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος VW. Το τρίγωνο ισχύος υπολογίζεται από την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσεως (P-V) και αποτελείται από τρεις ευθείες. Η πρώτη είναι ο άξονας x, η δεύτερη είναι η ευθεία που ξεκινά από το (0,0) και έχει κλίση ίση με το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και η τρίτη είναι η κάθετη γραμμή με εξίσωση $x=V_{oc}$ (τάση ανοικτοκύκλωσης) [21].



Σχήμα 3-10. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου VW [21].

Στο Σχήμα 3-10 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου VW. Αρχικά, ο αλγόριθμος κάνει τις απαραίτητες αρχικοποιήσεις, υπολογίζει το τρίγωνο ισχύος, τις τιμές V_{min} και V_{max} , (όπως αυτές υπολογίζονται στις εξισώσεις 3.10 και 3.11) και θέτει την τιμή V_{min} ως

V_{ref} . Στη συνέχεια, μετράει την τάση και το ρεύμα και ελέγχει συνεχώς την παραγόμενη ισχύ της Φ/Β συστοιχίας. Αν αυτή είναι μικρότερη της προηγούμενης τιμής, τότε μικραίνει το τρίγωνο ισχύος γύρω από το MPP. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της βάσης του τριγώνου ισχύος που ανήκει στο διάστημα $[V_{min}, V_{max}]$. Οι τιμές των V_{min} και V_{max} καθορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{min} = \frac{P_{store}}{I_{sc}} \quad (3.10)$$

$$V_{max} = 0.9 \times V_{oc} \quad (3.11)$$

όπου:

P_{store} προηγούμενη τιμή ισχύος που καταμετρήθηκε.

I_{sc} ρεύμα βραχυκύκλωσης.

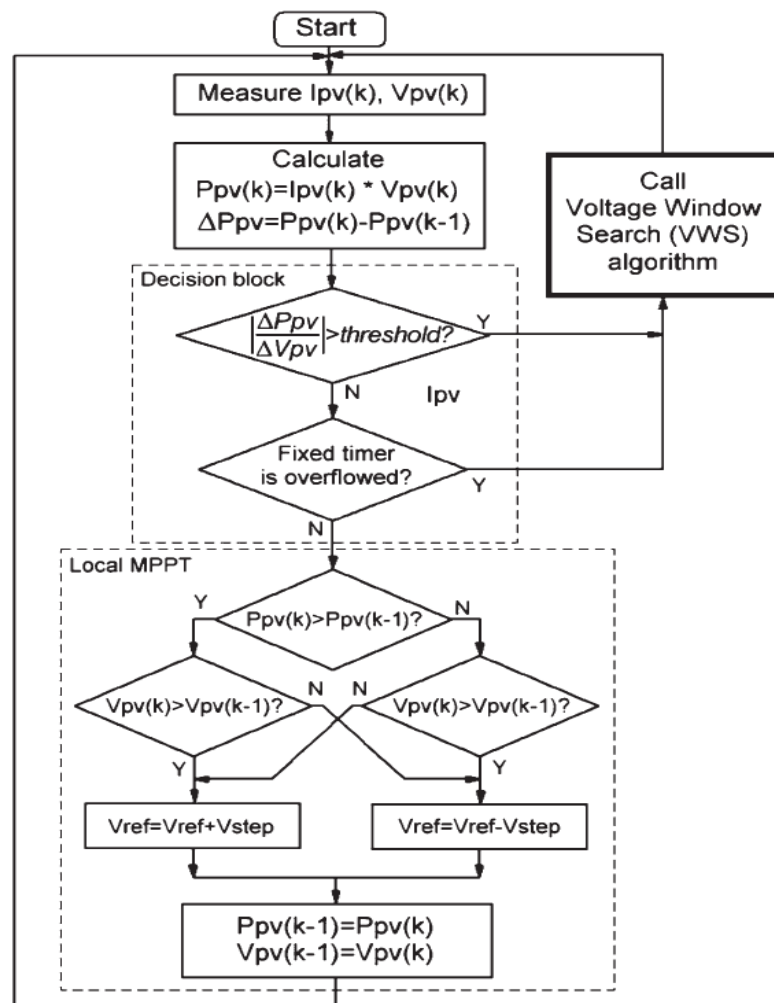
V_{oc} τάση ανοικτοκύκλωσης.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το τρίγωνο να καταλήξει σε ένα και μοναδικό σημείο το οποίο είναι το MPP [21].

3.9 Ο αλγόριθμος Voltage Window & Perturb and Observe

Η τεχνική Voltage Window & Perturb and Observe (VW-P&O) αποτελεί συνδυασμό των δυο επιμέρους αλγορίθμων. Βασική χρήση αυτής της τεχνικής είναι η ανίχνευση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος σε περιπτώσεις μερικής σκίασης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε συνθήκες μερικής σκίασης η καμπύλη P-V παρουσιάζει διάφορα τοπικά μέγιστα και ένα ολικό μέγιστο. Επειδή ο αλγόριθμος P&O από μόνος του σε τέτοιες συνθήκες εγκλωβίζεται σε τοπικό μέγιστο, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος VW για να καθοριστεί το εύρος της τάσης εντός του οποίου βρίσκεται το ολικό μέγιστο. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο P&O

εντός του προαναφερθέντος εύρους για να επιτευχθεί σύγκλιση στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος [21].



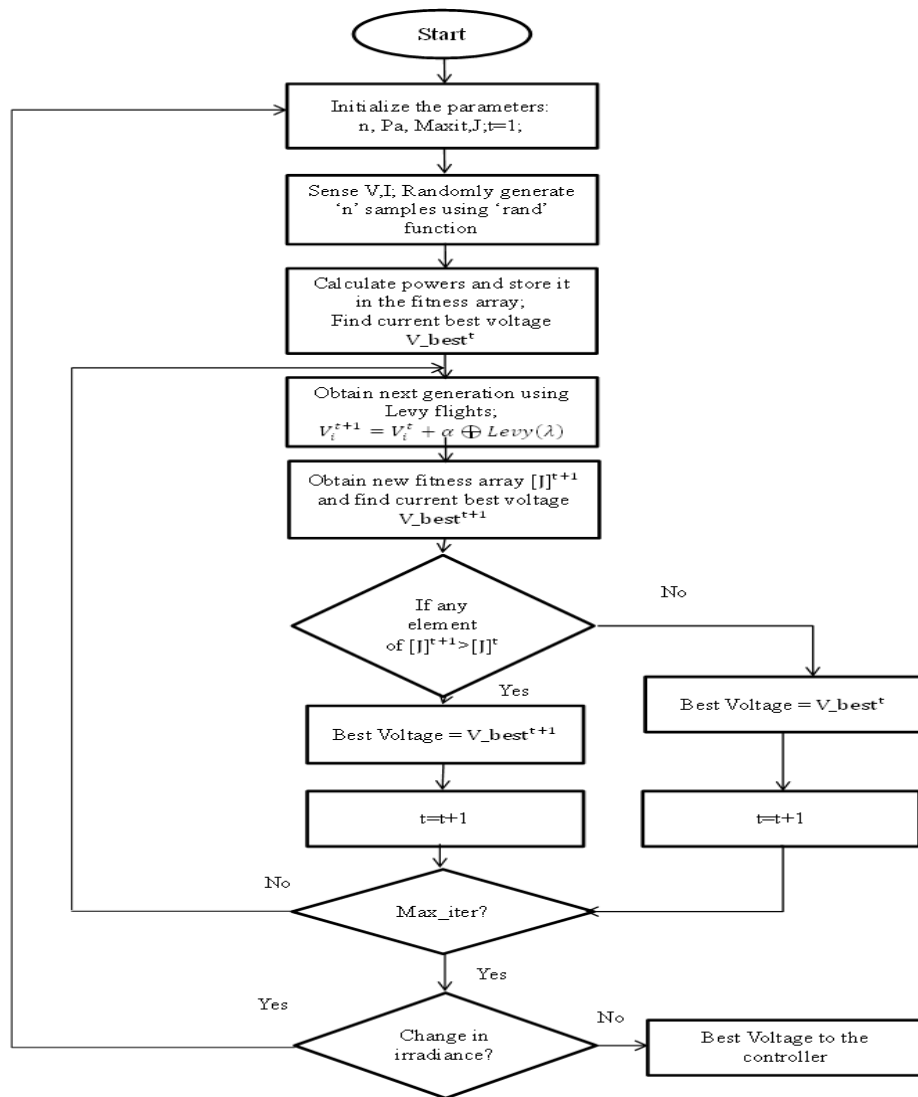
Σχήμα 3-11. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου VW-P&O [21].

Στο Σχήμα 3-11 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου VW-P&O. Στην αρχή του αλγορίθμου, αφού υπολογίσει την ισχύ για μια τιμή της τάσης, υπολογίζει την κλίση της καμπύλης. Εάν η κλίση είναι μεγαλύτερη από μια σταθερά threshold (ίση με 0.3) τότε καλείται ο VW. Διαφορετικά καλείται ο συμβατικός P&O αλγόριθμος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου να εντοπιστεί το MPP.

3.10 Ο αλγόριθμος Cuckoo Search

Η τεχνική Cuckoo Search (CS) είναι εμπνευσμένη από την ίδια τη φύση. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τους Xin-She Yang και Suash Deb το 2009. Η κεντρική ιδέα βασίζεται στον παρασιτισμό μερικών ειδών κούκου τα οποία τοποθετούν τα αυγά τους σε φωλιές άλλων πουλιών για να εκκολαφτούν από αυτά. Εάν τα πουλιά ξενιστές ανακαλύψουν τα αυγά του κούκου τα πετούν ή εγκαταλείπουν τη φωλιά. Εάν όμως τα αυγά εκκολαφτούν, η φωλιά χαρακτηρίζεται «καλή» και χρησιμοποιείται και στην επόμενη γενιά. Η αναζήτηση του κούκου για φωλιές γίνεται με τυχαίο τρόπο.

Στην περίπτωση της αναζήτησης του GMPP, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος τα τελευταία χρόνια βρίσκει μεγάλη απήχηση. Για τη εφαρμογή του θεωρούμε ότι: (α) κάθε κούκος αφήνει ένα αυγό κάθε φορά σε μια τυχαία επιλεγμένη φωλιά, (β) η καλύτερη φωλιά με τη μεγαλύτερη ποσότητα αυγών θα συνεχίσει και στην επόμενη γενιά και (γ) ο αριθμός των διαθέσιμων φωλιών είναι σταθερός και (δ) ο αριθμός των αυγών που ανακαλύπτονται από το πουλί ξενιστή έχει σταθερή πιθανότητα $0 < P_a < 1$. Η επιλογή των φωλιών γίνεται με μεταβλητό βήμα σύμφωνα με την κατανομή Levy, η οποία χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της τυχαίας κατεύθυνσης ή της πορείας που έχουν τα ζώα στην αναζήτηση τροφής [22], [23].



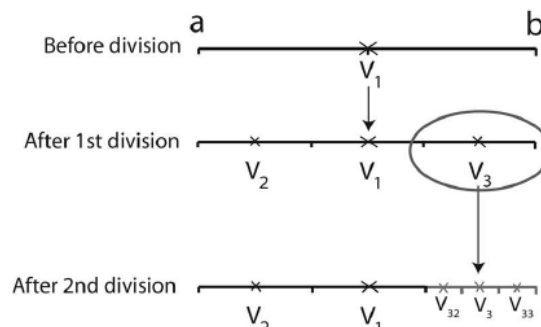
Σχήμα 3-12. Διάγραμμα ροής της τεχνικής CS [23].

Στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της τεχνικής CS. Αρχικά ο αλγόριθμος λαμβάνει τιμές της ισχύος του Φ/Β για διάφορες τιμές τάσης (δηλαδή του duty cycle) οι οποίες αποτελούν τα «αβγά». Ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων αυτών είναι n. Στην υλοποίηση που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική το n έχει την τιμή τέσσερα. Οι τιμές της ισχύος αποθηκεύονται σε έναν πίνακα J που αποτελεί τη συνάρτηση σύγκλισης $[J = f(V)]$. Η τάση για την οποία έχουμε τη μεγαλύτερη ισχύ θεωρείται το καλύτερο δείγμα. Στη συνέχεια, με αφετηρία τις προηγούμενες τάσεις και με χρήση της κατανομής Levy, επιλέγονται καινούριες. Για αυτές υπολογίζεται η ισχύς της Φ/Β συστοιχία. Οι νέες αυτές τιμές συγκρίνονται με τις παλιές και

απορρίπτονται οι χειρότερες κρατώντας τον αριθμό δειγμάτων της ισχύος σταθερό. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την εύρεση του MPPT [22], [23].

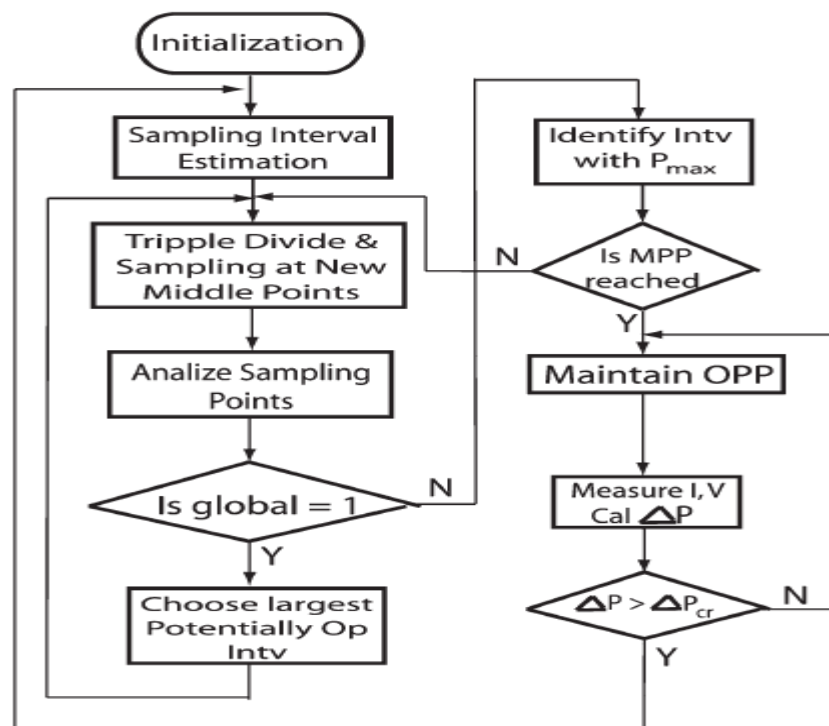
3.11 Ο αλγόριθμος DIRECT Search

Η τεχνική DIRECT (DIviding RECTangles) είναι ικανή στο να εντοπίσει το σημείο μέγιστης ισχύος ακόμα και σε συνθήκες μερικής σκίασης. Ο αλγόριθμος αυτός δεν απαιτεί υπολογισμούς αλλά βασίζεται σε αλληπαλλήλες δοκιμές για την εύρεση του ολικού μέγιστου. Αυτό επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης, αλλά επιτυγχάνει πολύ καλή ακρίβεια. Συνήθως υλοποιείται χωρίζοντας το duty cycle σε τρεις περιοχές κάθε φορά. Ο αριθμός αυτός παρέχει μια καλή ισορροπία ανάμεσα στην ταχύτητα σύγκλισης και στην ακρίβεια εύρεσης του MPP. Εάν η καμπύλη της ισχύος παρουσιάζει πολλά τοπικά μέγιστα, ο αριθμός των περιοχών είναι αναγκαίο να αυξηθεί για να είναι δυνατή η εύρεση του ολικού μεγίστου. Η αύξηση του αριθμού των περιοχών χειροτερεύει την ταχύτητα σύγκλισης κάνοντας τον αλγόριθμο πιο αργό [25].



Σχήμα 3-13. Στρατηγική διαίρεσης εύρους duty cycle [23].

Στο Σχήμα 3-13 παρουσιάζεται η στρατηγική σύμφωνα με την οποία διαιρούνται οι περιοχές εύρους του duty cycle έτσι ώστε να βρεθεί το ολικό μέγιστο ξεκινώντας από ένα διάστημα $[a, b]$ [25].



Σχήμα 3-14. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου DIRECT [25].

Στο Σχήμα 3-14 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της τεχνικής DIRECT. Αρχικά, ο αλγόριθμος διαιρεί το εύρος του duty cycle σε τρία όμοια τμήματα. Το μέσο κάθε τμήματος δοκιμάζεται ως υποψήφια τιμή του D και ελέγχεται η ισχύς που παράγεται από τη Φ/Β συστοιχία. Το τμήμα του εύρους του duty cycle μέσα στο οποίο βρέθηκε η μέγιστη ισχύς επιλέγεται και τεμαχίζεται εκ νέου σε όμοια τμήματα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με όλο και μικρότερες διαιρέσεις μέχρι να βρεθεί το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος της Φ/Β συστοιχίας.

Συνοψίζοντας, οι πρώτες τέσσερις τεχνικές, δηλαδή οι Perturb & Observe, Variable Step Size Perturb & Observe, Incremental-Conductance και Variable Step Size Incremental-Conductance, λόγω της αδυναμίας τους να εντοπίσουν το ολικό μέγιστο, διότι εγκλωβίζονται σε τοπικό μέγιστο, δεν θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογή σε συνθήκες μερικής σκίασης.

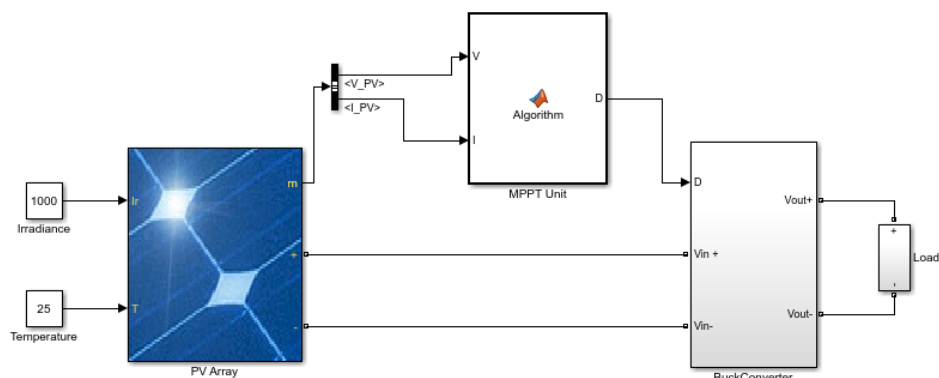
Εν αντιθέσει, οι τεχνικές Golden Section Search, Random Search, Voltage Window, Voltage Window and Perturb & Observe, Cuckoo Search και Direct Search δεν αντιμετωπίζουν κανένα πρόβλημα στον εντοπισμό του ολικού μεγίστου. Έτσι, θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογή σε συνθήκες μερικής σκίασης των Φ/Β συστοιχιών.

4.

Υλοποίηση προσομοιώσεων λειτουργίας μεθόδων MPPT

4.1 Παρουσίαση βασικών διατάξεων προσομοίωσης

Στην παρούσα διατριβή προσομοιώθηκε η λειτουργία των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη χρήση του εργαλείου Matlab/ Simulink, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγησή τους. Για την επίτευξη της σωστής σχεδίασης, υλοποιήθηκε μια Φ/Β μονάδα παραγωγής ενέργειας μαζί με τις απαραίτητες διατάξεις όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4-1. Μοντέλο προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αποτελείται από τη Φ/Β συστοιχία (PV Array), τη μονάδα ελέγχου MPPT (MPPT Unit), τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck Converter) και το ωμικό φορτίο (Load).

4.1.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Για την προσομοίωση της Φ/Β συστοιχίας χρησιμοποιήθηκε το έτοιμο block του Simulink “**pv array**” από τη βιβλιοθήκη “Renewables/Solar”. Υλοποιούνται δυο Φ/Β πλαίσιοι σε σειρά, συνδεδεμένες παράλληλα. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από δύο Φ/Β πλαίσια τύπου Trina Solar TSM-250-PC/PA05A, συνδεδεμένα σε σειρά. Το κάθε Φ/Β πλαίσιο δομείται από εξήντα Φ/Β στοιχεία. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου Φ/Β πλαισίου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1 – Χαρακτηριστικά λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου Trina Solar TSM-250-PC/PA05A	
Maximum Power (W)	249.86
Open-circuit voltage, V_{oc} (V)	37.6
Voltage at MPP, V_{mpp} (V)	31
Temperature coefficient of V_{oc} (V/°C)	-0.35
Cells per module	60
Short-circuit current, I_{sc} (A)	8.55
Current at MPP, I_{mpp} (A)	8.06
Temperature coefficient of I_{sc} (A/°C)	0.06

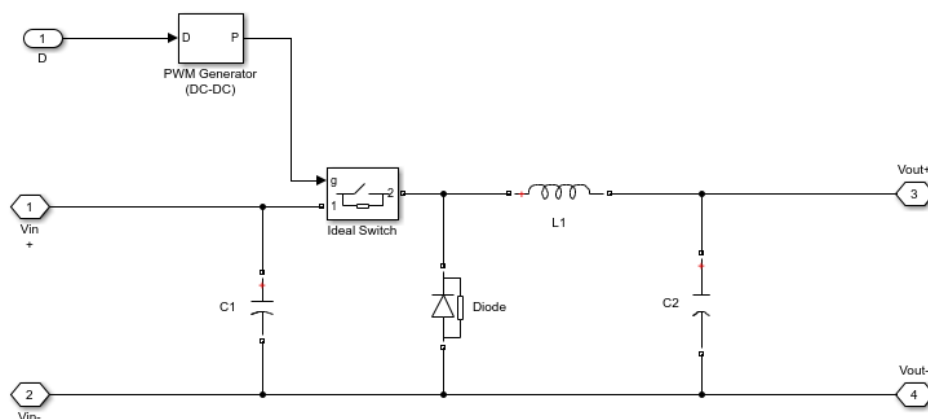
Η Φ/Β συστοιχία δέχεται ως εισόδους την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στα Φ/Β πλαίσια (W/m^2) και τη θερμοκρασία (°C), η οποία αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του κάθε Φ/Β στοιχείου (T_{cell}). Στην αρχή των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας με τη χρήση του έτοιμου block “**constant**” που

παρέχει το Simulink. Στη συνέχεια των δοκιμών, χρησιμοποιούνται χρονοσειρές τιμών ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας με τη βοήθεια του έτοιμου block “**signal builder**” που επίσης παρέχει το Simulink.

Έξοδος της Φ/Β συστοιχίας είναι ένα σήμα m , από το οποίο, με τη χρήση ενός από-πολυπλέκτη, εξάγονται η συνολική παραγόμενη τάση και το συνολικό παραγόμενο ρεύμα. Τα δύο αυτά σήματα στέλνονται στην μονάδα ελέγχου MPPT η οποία ελέγχει το duty cycle του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Τέλος, χρησιμοποιείται ένα ωμικό φορτίο που συνδέεται στην έξοδο του buck converter.

4.1.2 Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης

Στα άκρα της Φ/Β συστοιχίας συνδέεται ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης. Το κύκλωμα του μετατροπέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

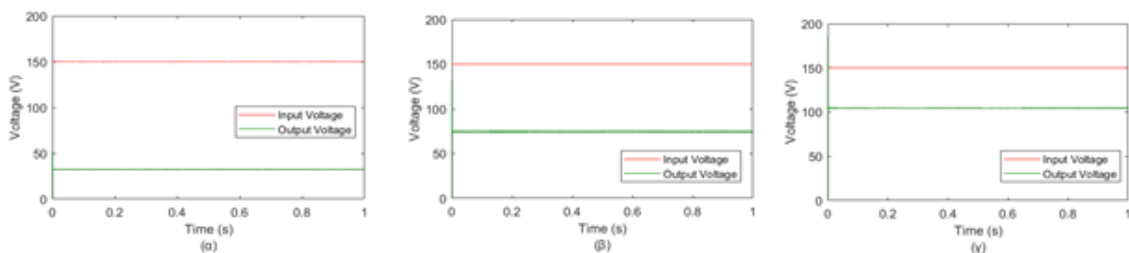


Σχήμα 4-2. Το κύκλωμα του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης.

Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζεται το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Αποτελείται από τον πυκνωτή εξόδου $C2$ της τάξεως των $250 \mu\text{F}$, ο οποίος μεταφέρει την ενέργεια στο ηλεκτρικό φορτίο, τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης, το πηνίο εξόδου $L1$ της τάξεως των $156 \mu\text{H}$. Το ημιαγώγιμο στοιχείο του μετατροπέα είναι ένα απλό IGBT τρανζίστορ και με

την παλμοδότηση του ελέγχεται η παραγόμενη ισχύς της συστοιχίας. Οι τιμές των C2 και L1 επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις του [24], ώστε η κυμάτωση της τάσης εξόδου να είναι 0.7 V, που αντιστοιχεί στο 1% της DC τάσης εξόδου. Η συχνότητα switching του σήματος PWM που ελέγχει τον μετατροπέα DC/DC επιλέχθηκε είναι ίση με 100 kHz. Επίσης, συνδέεται ένας ακόμα πυκνωτής στην είσοδο του μετατροπέα C1 ο οποίος έχει τοποθετηθεί για λόγους σταθεροποίησης της τάσης εισόδου του (εξομάλυνση κυμάτωσης).

Για να δοκιμαστεί η ορθή λειτουργία του Buck Converter, τοποθετήθηκε στην είσοδο του σταθερή πηγή τάσης ύψους 150 V, με τη χρήση του έτοιμου block του Simulink **DC Voltage Source**, για διάφορες τιμές του duty cycle (d).



Σχήμα 4-3. Κυματομορφή τάσης εισόδου – τάσης εξόδου για: (α) $d = 0.2$, (β) $d = 0.5$ και (γ) $d = 0.7$.

Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης εισόδου - τάσης εξόδου για τρία σενάρια περιπτώσεων. Και στις τρεις περιπτώσεις η τάση εισόδου είναι σταθερή και ίση με 150V. Στο (α) το duty cycle είναι ίσο με 0.2 και η τάση εξόδου είναι ίση με 30 V, στο (β) το duty cycle είναι ίσο με 0.5 και η τάση εξόδου είναι ίση με 75 V και στο (γ) το duty cycle είναι ίσο με 0.7 και η τάση εξόδου είναι ίση με 105 V. Και στις τρεις περιπτώσεις οι τιμές συνάδουν με τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση (2.5).

4.1.3 Μονάδα ελέγχου MPPT

Η μονάδα ελέγχου MPPT (MPPT Unit) είναι μια MATLAB συνάρτηση η οποία δέχεται ως ορίσματα την τάση και το ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας και υλοποιεί τον υπό εξέταση κάθε φορά αλγόριθμο MPPT. Αφού υπολογίσει την τάση εξόδου της Φ/Β συστοιχίας κατά την οποία έχουμε λειτουργία στο MPP, επιστρέφει την απαιτούμενη τιμή duty cycle στον Buck converter

4.1.4 Ωμικό φορτίο

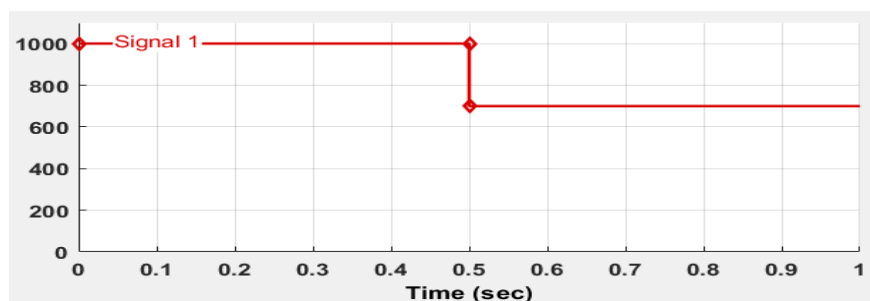
Στην έξοδο του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης συνδέεται μια αντίσταση 3 Ohm η οποία λειτουργεί ως ωμικό φορτίο.

4.2 Σετ μετρήσεων προσομοίωσης

Για να υπάρξει μια άρτια και ολοκληρωμένη παρατήρηση της συμπεριφοράς της Φ/Β συστοιχίας επιλέγονται τα εξής σετ μετρήσεων σε διάφορες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας:

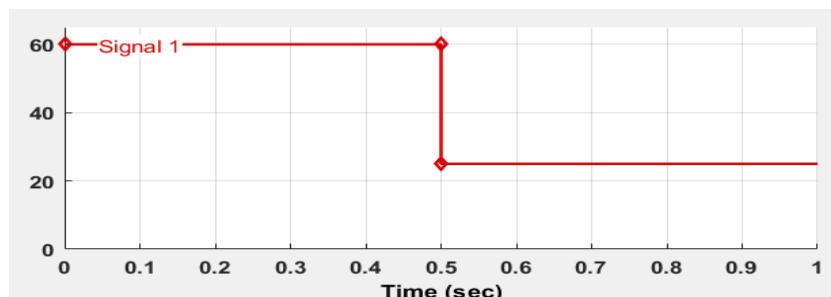
- Σταθερή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 700 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 700 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 700 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Σταθερή ακτινοβολία 700 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 500 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 500 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 500 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 500 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 300 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 300 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 300 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 300 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 100 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 100 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 100 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Σταθερή ακτινοβολία 100 W/m^2 και σταθερή θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Μεταβαλλόμενη ακτινοβολία $1000\text{-}700 \text{ W/m}^2$ και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία $60\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$ με χρήση signal builder και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4-4. Σήμα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας ως είσοδος της Φ/Β συστοιχίας με χρήση signal builder.

Στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδος της κάθε Φ/Β συστοιχίας. Τη χρονική στιγμή $t=0.5s$ η ακτινοβολία αλλάζει απότομα από τα 1000 W/m^2 στα 700 W/m^2 .



Σχήμα 4-5. Σήμα μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας ως είσοδος της Φ/Β συστοιχίας με χρήση signal builder.

Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδος της κάθε Φ/Β συστοιχίας. Τη χρονική στιγμή $t=0.5s$ η θερμοκρασία αλλάζει απότομα από τους 60°C στους 25°C .

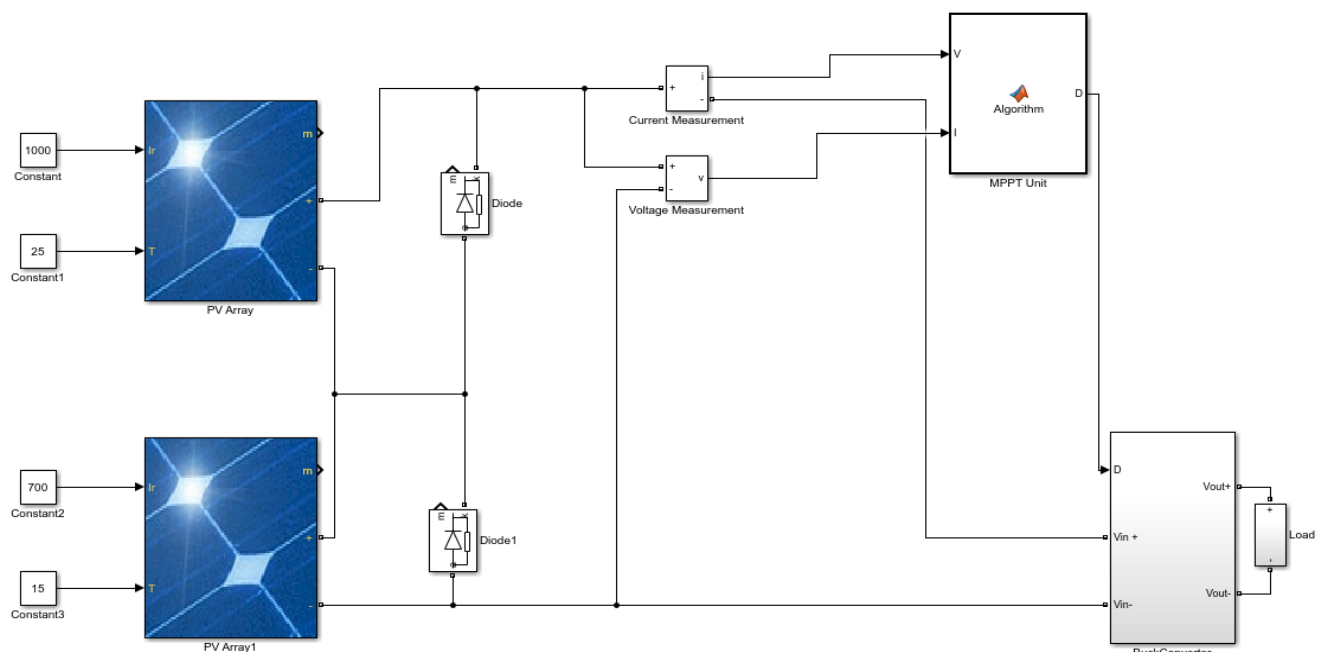
Για τα παραπάνω σετ συνθηκών λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας, προσομοιώθηκε ο κάθε αλγόριθμος ξεχωριστά, έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του.

4.3 Μετασχηματισμός μοντέλου για προσομοίωση συνθηκών σκίασης

Για να προσομοιωθούν οι συνθήκες μερικής σκίασης το παραπάνω μοντέλο υφίσταται μερικές μετατροπές. Αυτές είναι η προσθήκη μιας επιπλέον Φ/Β συστοιχίας συνδεδεμένη σε σειρά με την πρώτη. Επιπλέον, μια δίοδος bypass είναι συνδεδεμένη παράλληλα με κάθε μια Φ/Β συστοιχία. Το υπόλοιπο σύστημα παραμένει όπως έχει, δηλαδή το συνολικό ρεύμα και η συνολική τάση των δυο Φ/Β συστοιχιών οδηγείται στη μονάδα ελέγχου MPPT η οποία μεταβάλλει το duty cycle του μετατροπέα ισχύος. Τέλος, η έξοδος της Φ/Β συστοιχίας είναι

συνδεδεμένη στην είσοδο του Buck Converter, στην έξοδο του οποίου συνδέεται μια ωμική αντίσταση των 3 Ohm ως φορτίο.

Για να αναπαρασταθούν τα μερικώς σκιασμένα πλαίσια αρκεί να τοποθετηθούν διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στις εισόδους των αντίστοιχων Φ/Β συστοιχιών.



Σχήμα 4-6. Μοντέλο προσομοίωσης για συνθήκες μερικής σκίασης.

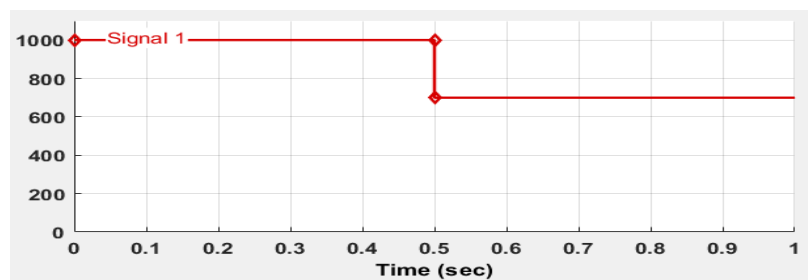
Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζεται το μετασχηματισμένο Φ/Β σύστημα που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική και το οποίο προσομοιώνει τις συνθήκες μερικής σκίασης της Φ/Β συστοιχίας.

Για την αξιολόγηση του κάθε αλγορίθμου μερικής σκίασης χρησιμοποιήθηκαν σταθερά σετ τιμών ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας:

- Για την πρώτη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 60°C .

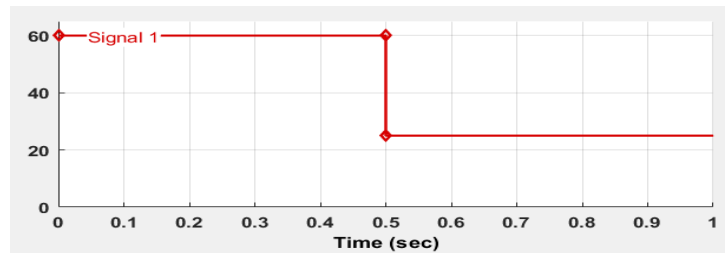
Για τη δεύτερη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 700 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C .

- Για την πρώτη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 700 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Για τη δεύτερη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 500 W/m^2 και θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Για την πρώτη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 500 W/m^2 και θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Για τη δεύτερη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 300 W/m^2 και θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Για την πρώτη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 300 W/m^2 και θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Για τη δεύτερη Φ/Β συστοιχία, ακτινοβολία 100 W/m^2 και θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Για την πρώτη Φ/Β συστοιχία, μεταβαλλόμενη ακτινοβολία $1000\text{-}700 \text{ W/m}^2$ και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία $60\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$. Για τη δεύτερη Φ/Β συστοιχία, μεταβαλλόμενη ακτινοβολία $700\text{-}500 \text{ W/m}^2$ και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία $25\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$ με χρήση signal builder σε όλες τις περιπτώσεις.



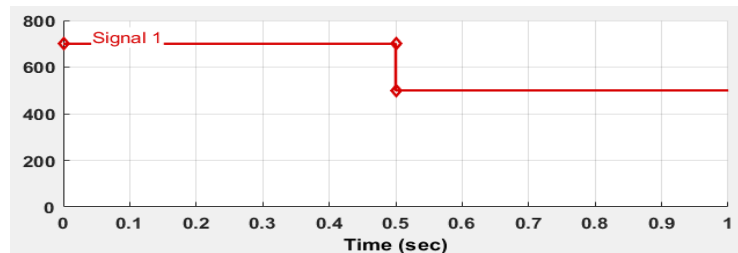
Σχήμα 4-7. Σήμα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας ως είσοδος της πρώτης Φ/Β συστοιχίας, με χρήση signal builder.

Στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδος της πρώτης Φ/Β συστοιχίας. Τη χρονική στιγμή $t=0.5\text{s}$ η ακτινοβολία αλλάζει απότομα από τα 1000 W/m^2 στα 700 W/m^2 .



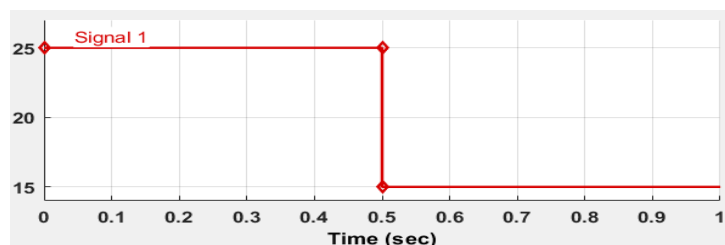
Σχήμα 4-8. Σήμα μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας ως είσοδος της πρώτης Φ/Β συστοιχίας, με χρήση signal builder.

Στο Σχήμα 4-8 παρουσιάζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδος της πρώτης Φ/Β συστοιχίας. Τη χρονική στιγμή $t=0.5s$ η θερμοκρασία αλλάζει απότομα από τους $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 4-9. Σήμα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας ως είσοδος της δεύτερης Φ/Β συστοιχίας, με χρήση signal builder.

Στο Σχήμα 4-9 παρουσιάζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδος της δεύτερης Φ/Β συστοιχίας. Τη χρονική στιγμή $t=0.5s$ η ακτινοβολία αλλάζει απότομα από τα 700 W/m^2 στα 500 W/m^2 .



Σχήμα 4-10. Σήμα μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας ως είσοδος της δεύτερης Φ/Β συστοιχίας, με χρήση signal builder.

Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζεται το σήμα της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση του signal builder ως είσοδο της δεύτερης Φ/B συστοιχίας. Τη χρονική στιγμή $t=0.5s$ η θερμοκρασία αλλάζει απότομα από τους $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Για τα παραπάνω σετ συνθηκών λειτουργίας της Φ/B συστοιχίας, προσομοιώθηκε ο κάθε αλγόριθμος ξεχωριστά, έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την προσομοίωση και μόνο του αλγορίθμου CS, η απότομη αλλαγή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στους αντίστοιχους signal builders έγινε τη χρονική στιγμή $t=1s$.

5.

Αποτελέσματα

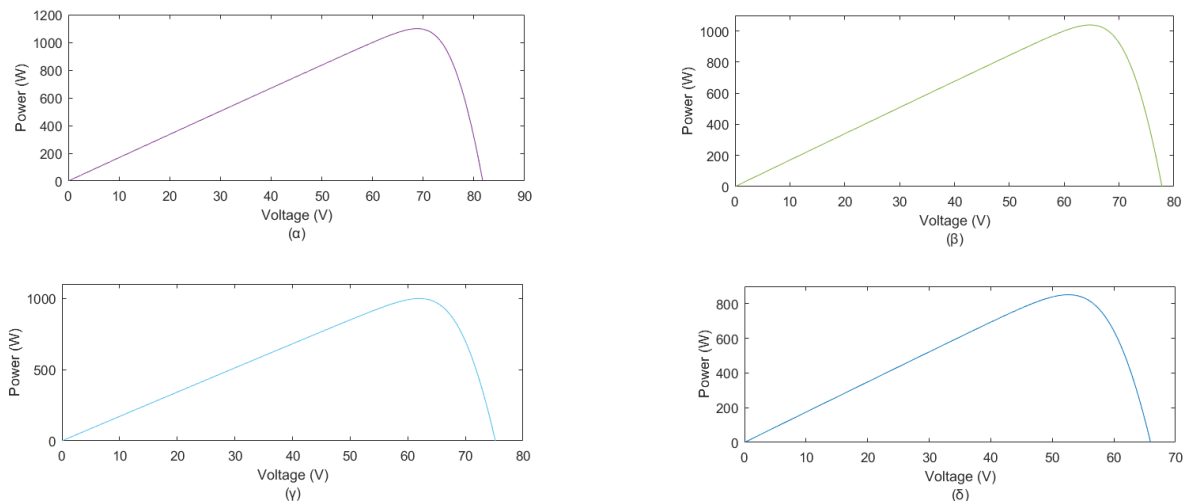
Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται αρχικά μια καταγραφή των θεωρητικών τιμών ισχύος και τάσεως στο MPP. έχοντας ως σημεία αναφοράς αυτές τις τιμές, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων MPPT ως προς την ταχύτητα και την ακρίβεια σύγκλισης στο MPP.

5.1 Θεωρητικές τιμές

Για να καταγραφούν οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης, το Φ/Β σύστημα (μια Φ/Β συστοιχία στην περίπτωση ομοιόμορφης ακτινοβολίας και δυο Φ/Β συστοιχίες στην περίπτωση μερικής σκίασης) συνδέεται σε μια μεταβλητή ωμική αντίσταση. Η αντίσταση αυτή ελέγχεται από ένα σήμα σε μορφή συνάρτησης αναρρίχησης, με αρχική τιμή μηδέν και σταθερή κλίση. Με τον τρόπο αυτόν το Φ/Β σύστημα ξεκινά από κατάσταση βραχυκύκλωσης μέχρι η τιμή της αντίστασης να φτάσει μια πολύ μεγάλη τιμή (ανοικτοκύκλωμα). Τέλος, με τη χρήση της συνάρτησης *max()* του Matlab υπολογίστηκε η θεωρητική τιμή P_{mpp} . Από τη γραφική παράσταση ισχύος-τάσης, γνωρίζοντας την P_{mpp} , υπολογίστηκε και η V_{mpp} .

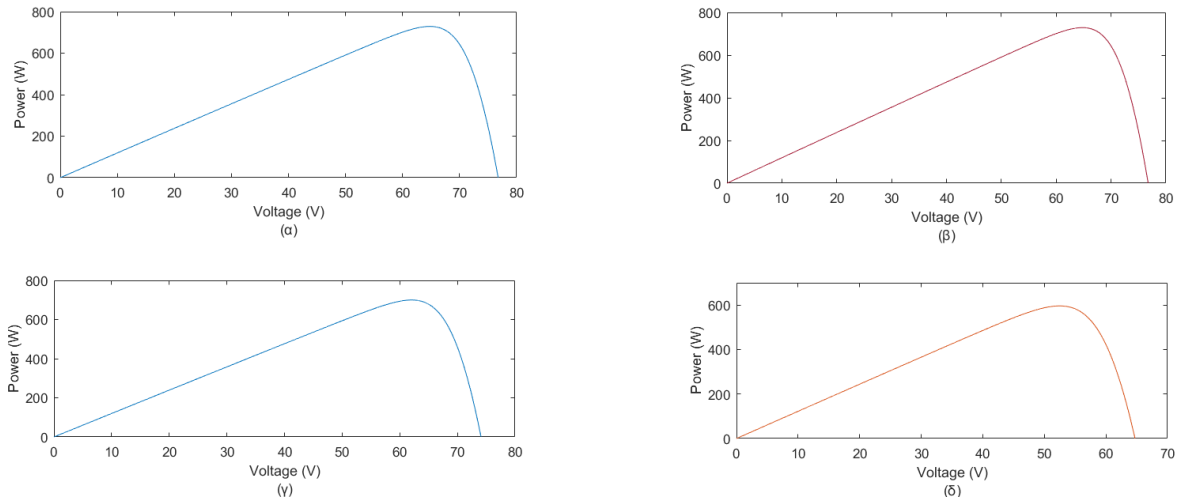
5.1.1 Θεωρητικές τιμές συνθηκών ομοιόμορφης ακτινοβολίας

Αρχικά, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας, για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας και τα σημεία P_{mpp} και V_{mpp} για κάθε περίπτωση.



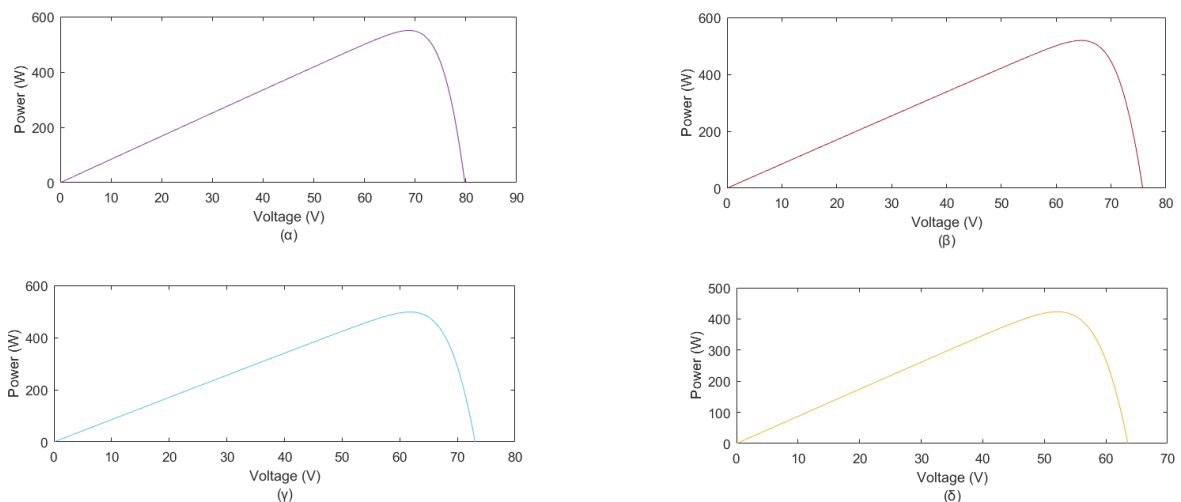
Σχήμα 5-1. Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 1000 W/m^2 και θερμοκρασία ίση με:
(α) 0°C , (β) 15°C , (γ) 25°C και (δ) 60°C .

Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και: (α) και θερμοκρασία 0°C με $P_{mpp}=1097.2 \text{ W}$ και $V_{mpp}=69 \text{ V}$, (β) θερμοκρασία 15°C με $P_{mpp}=1038.9 \text{ W}$ και $V_{mpp}=64.8 \text{ V}$, (γ) θερμοκρασία 25°C με $P_{mpp}=998.01 \text{ W}$ και $V_{mpp}=62.2 \text{ V}$ και (δ) θερμοκρασία 60°C με $P_{mpp}=851.65 \text{ W}$ και $V_{mpp}=52.5 \text{ V}$.



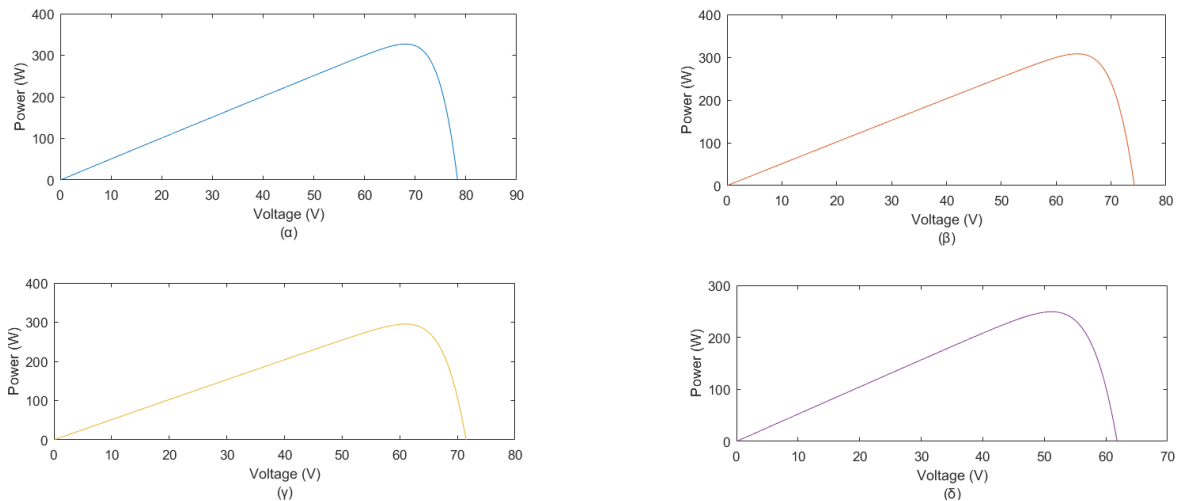
Σχήμα 5-2. Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 700 W/m^2 και θερμοκρασία ίση με: (α) 0°C , (β) 15°C , (γ) 25°C και (δ) 60°C .

Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για ακτινοβολία 700 W/m^2 και: (α) θερμοκρασία 0°C με $P_{\text{mpp}}=771.33 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=69 \text{ V}$, (β) θερμοκρασία 15°C με $P_{\text{mpp}}=728.81 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=64.9 \text{ V}$, (γ) θερμοκρασία 25°C με $P_{\text{mpp}}=699.84 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=62.2 \text{ V}$ και (δ) θερμοκρασία 60°C με $P_{\text{mpp}}=596.01 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=52.4 \text{ V}$.



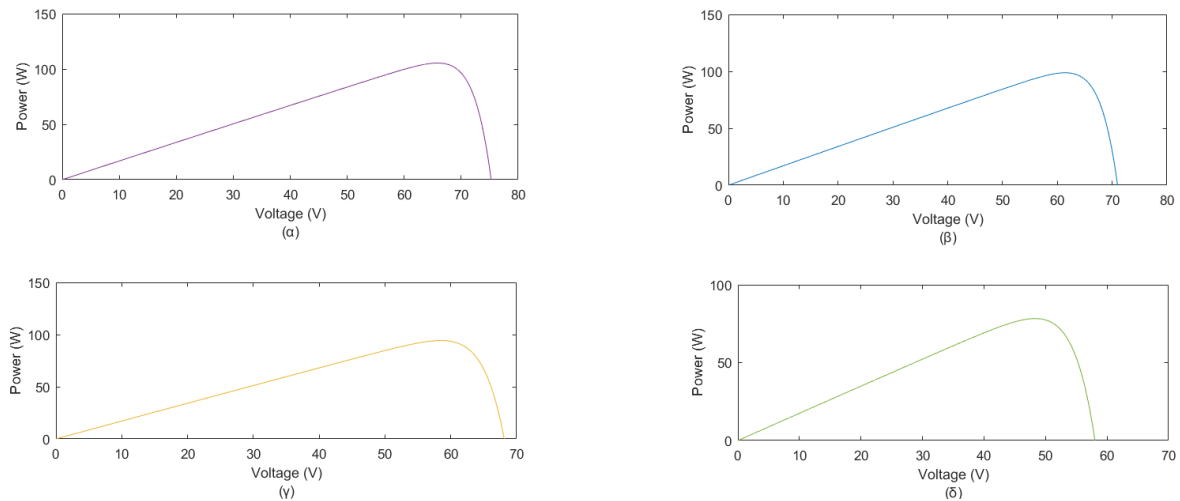
Σχήμα 5-3. Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 500 W/m^2 και θερμοκρασία ίση με: (α) 0°C , (β) 15°C , (γ) 25°C και (δ) 60°C .

Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για ακτινοβολία 500 W/m^2 και: (α) θερμοκρασία 0°C με $P_{\text{mpp}}=548.97 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=68.8 \text{ V}$, (β) θερμοκρασία 15°C με $P_{\text{mpp}}=519.02 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=64.8 \text{ V}$, (γ) θερμοκρασία 25°C με $P_{\text{mpp}}=498.06 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=62 \text{ V}$ και (δ) θερμοκρασία 60°C με $P_{\text{mpp}}=422.94 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=52.1 \text{ V}$.



Σχήμα 5-4. Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 300 W/m^2 και θερμοκρασία ίση με: (α) 0°C , (β) 15°C , (γ) 25°C και (δ) 60°C .

Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για ακτινοβολία 300 W/m^2 και: (α) θερμοκρασία 0°C με $P_{\text{mpp}}=326.35 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=68.4 \text{ V}$, (β) θερμοκρασία 15°C με $P_{\text{mpp}}=308.01 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=64.4 \text{ V}$, (γ) θερμοκρασία 25°C με $P_{\text{mpp}}=295.18 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=61.3 \text{ V}$ και (δ) θερμοκρασία 60°C με $P_{\text{mpp}}=249.2 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=51.5 \text{ V}$.

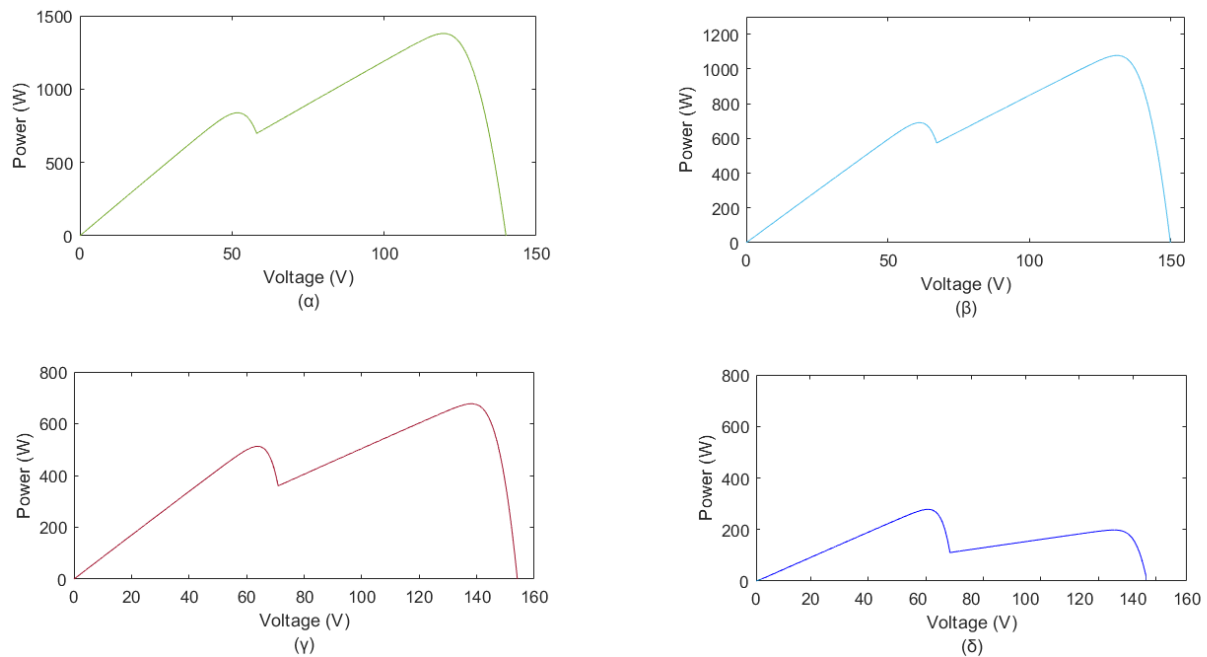


Σχήμα 5-5. Χαρακτηριστική P-V για ακτινοβολία ίση με 100 W/m^2 και θερμοκρασία ίση με: (α) 0°C , (β) 15°C , (γ) 25°C και (δ) 60°C .

Στο Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για ακτινοβολία 100 W/m^2 και: (α) θερμοκρασία 0°C με $P_{\text{mpp}}=105.15 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=65.4 \text{ V}$, (β) θερμοκρασία 15°C με $P_{\text{mpp}}=98.76 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=62.2 \text{ V}$, (γ) θερμοκρασία 25°C με $P_{\text{mpp}}=94.29 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=58.2 \text{ V}$ και (δ) θερμοκρασία 60°C με $P_{\text{mpp}}=78.3 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=48.5 \text{ V}$.

5.1.2 Θεωρητικές τιμές συνθηκών μερικής σκίασης

Σε δεύτερο στάδιο, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας και τα σημεία P_{mpp} και V_{mpp} για κάθε μια περίπτωση.



Σχήμα 5-6. Χαρακτηριστική P-V για: (α) την πρώτη Φ/Β συστοιχία $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=60 \text{ }^\circ\text{C}$ και για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία $G=700 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, (β) την πρώτη Φ/Β συστοιχία $G=700 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ και για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία $G=500 \text{ W/m}^2$, $T=15 \text{ }^\circ\text{C}$, (γ) για την πρώτη Φ/Β συστοιχία $G=500 \text{ W/m}^2$, $T=15 \text{ }^\circ\text{C}$ και για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία $G=300 \text{ W/m}^2$, $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$ και (δ) για την πρώτη Φ/Β συστοιχία $G=300 \text{ W/m}^2$, $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$ και για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία $G=100 \text{ W/m}^2$, $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$.

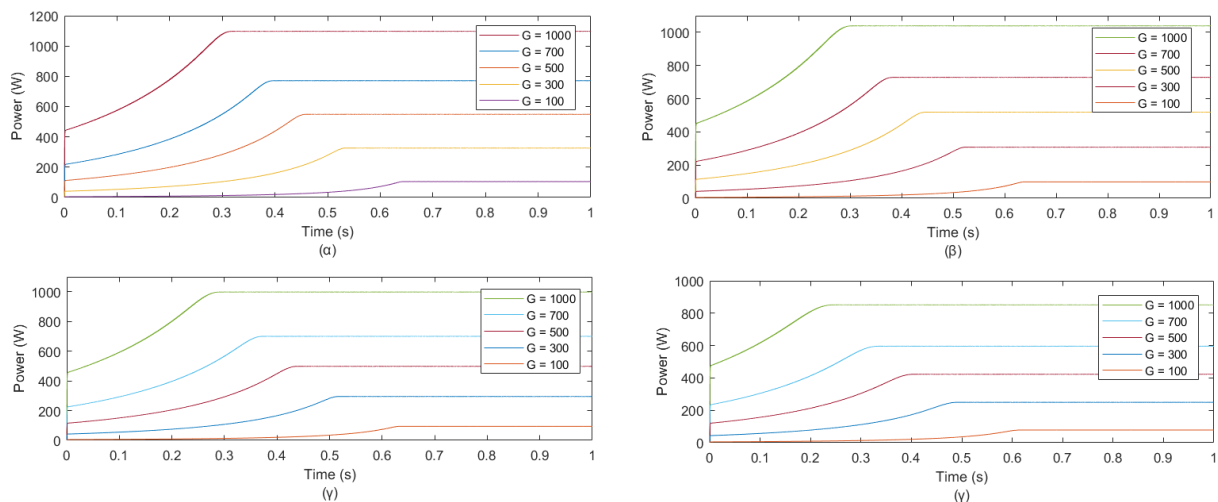
Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη ισχύος-τάσης για: (α) την πρώτη Φ/Β συστοιχία ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία ακτινοβολία 700 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$, με $P_{\text{mpp}}=1379.2 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=126.28 \text{ V}$ ενώ το τοπικό μέγιστο κυμαίνεται κοντά στα 800 W , (β) την πρώτη Φ/Β συστοιχία ακτινοβολία 700 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία ακτινοβολία 500 W/m^2 και θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$, με $P_{\text{mpp}}=1077.4 \text{ W}$ και $V_{\text{mpp}}=134.14 \text{ V}$. Εδώ το τοπικό μέγιστο κυμαίνεται κοντά στα 600 W , (γ) την πρώτη Φ/Β συστοιχία ακτινοβολία 500 W/m^2 και θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία ακτινοβολία 300 W/m^2 και θερμοκρασία

0 °C, με $P_{mpp}=677.04$ W και $V_{mpp}=144.19$ V, με το τοπικό μέγιστο να βρίσκεται κοντά στα 500 W και (δ) την πρώτη Φ/Β συστοιχία $G=300$ W/m², $T=0$ °C και για την δεύτερη Φ/Β συστοιχία $G=100$ W/m², $T=0$ °C, με $P_{mpp}=323.2$ W και $V_{mpp}=64.6$ V.

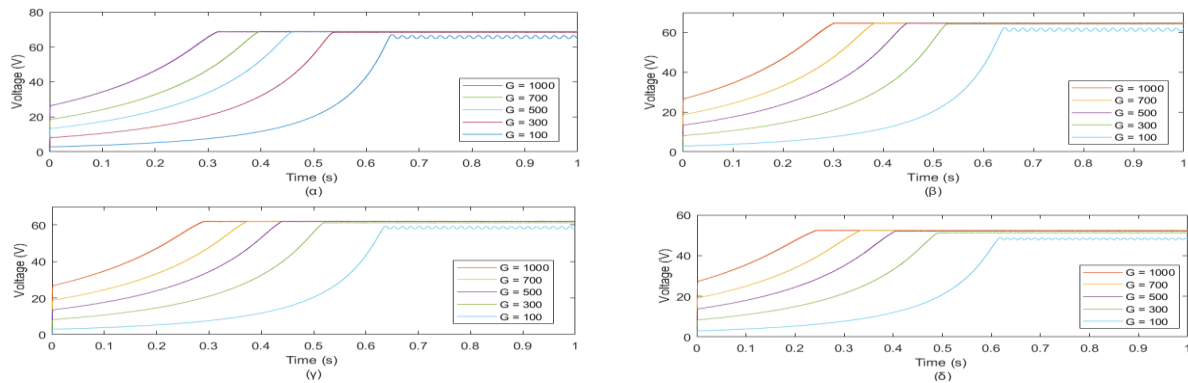
Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση (δ) το ολικό μέγιστο βρίσκεται αριστερά του τοπικού μεγίστου. Η περίπτωση αυτή μελετάται σαν ένα ξεχωριστό σενάριο.

5.2 Προσομοίωση τεχνικής P&O

Αρχικά, για την τεχνική P&O, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε ομοιόμορφη σταθερή- αλλά και μεταβαλλόμενη- ακτινοβολία και θερμοκρασία με βάση τα σενάρια μετρήσεων της παραγράφου 4.2. Στη συνέχεια, μελετάται η συμπεριφορά του αλγορίθμου για τέσσερις διαφορετικές τιμές του βήματος μεταβολής του μετατροπέα ισχύος. Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.

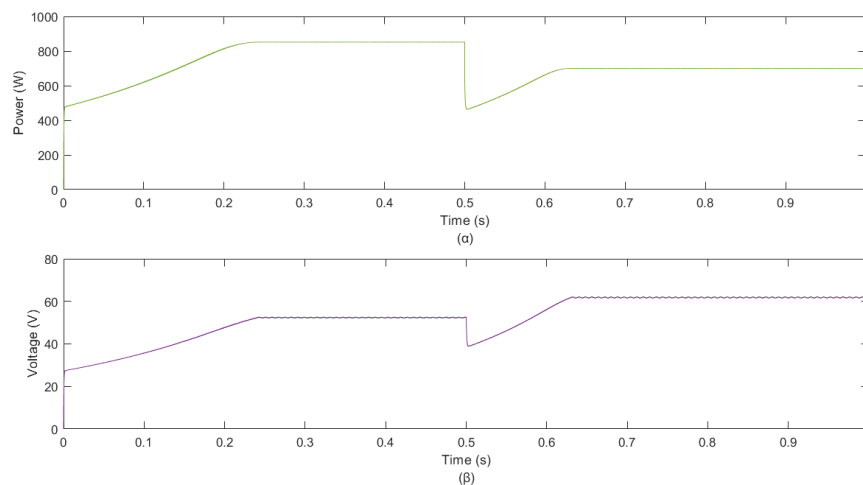


Σχήμα 5-7. Διαγράμματα ισχύος-χρόνου αλγορίθμου P&O για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.



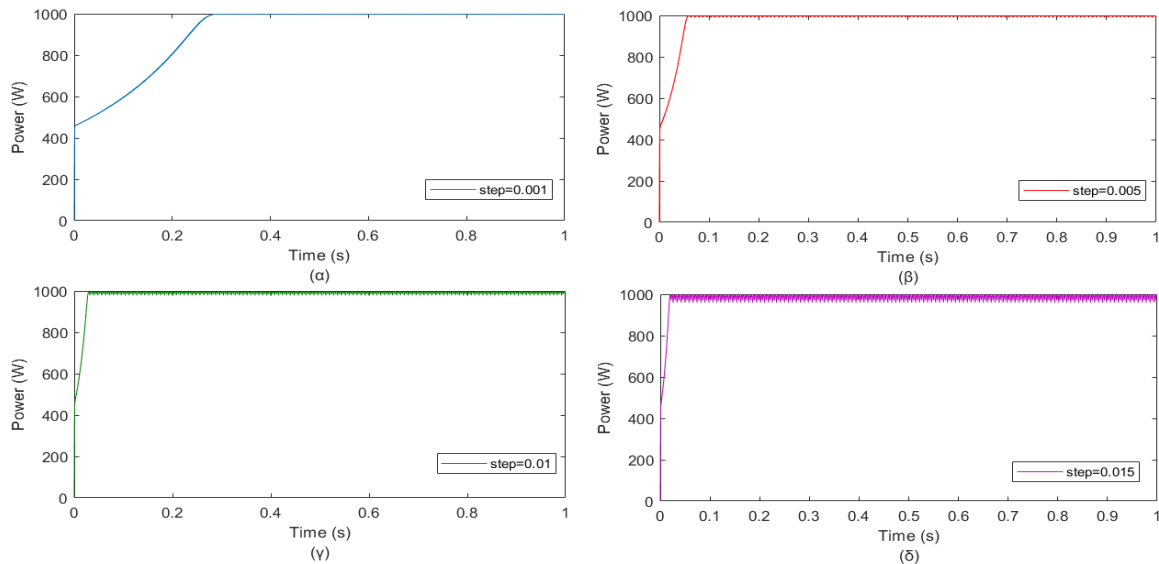
Σχήμα 5-8. Διάγραμμα τάσεως-χρόνου αλγορίθμου P&O για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.

Στα Σχήματα 5-7 και 5-8 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως ως προς τον χρόνο, για τον αλγόριθμο P&O σε συνθήκες σταθερής ομοιόμορφης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που περιγράφονται στα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.

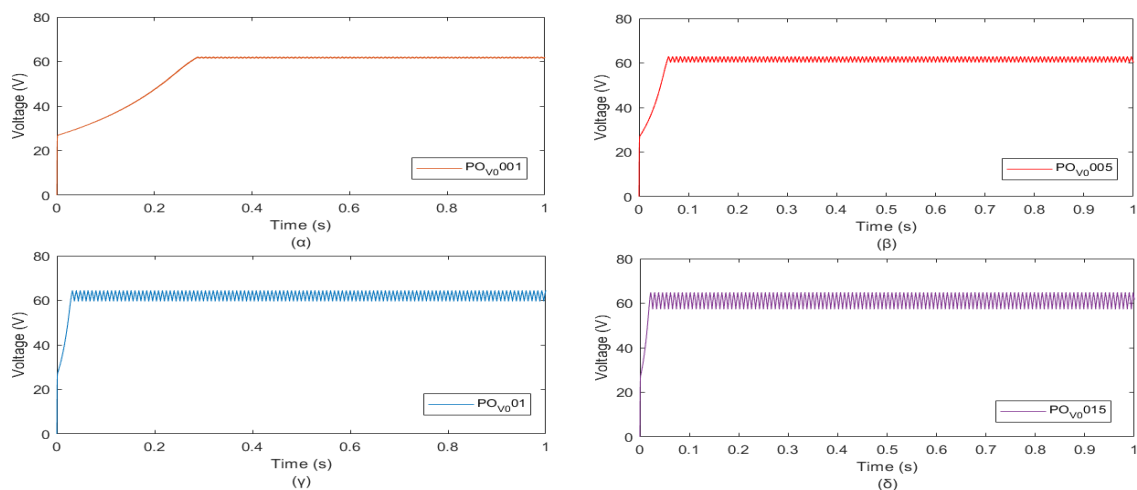


Σχήμα 5-9. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου P&O για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφεται στα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.



Σχήμα 5-10. Διάγραμμα ισχύος-χρόνου αλγορίθμου P&O για τέσσερις διαφορετικές τιμές του βήματος: (α) 0.001, (β) 0.005, (γ) 0.01 και (δ) 0.015 σε STC.



Σχήμα 5-11. Διάγραμμα τάσεως-χρόνου αλγορίθμου P&O για τέσσερις διαφορετικές τιμές του βήματος: (α) 0.001, (β) 0.005, (γ) 0.01 και (δ) 0.015 σε STC.

Στα Σχήματα 5-10 και 5-11 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες STC ($G=1000 \text{ W/m}^2$ και $T=25^\circ\text{C}$). Στο (α), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.001, η ισχύς κυμαίνεται από 997.3 W έως 998 W, ενώ η τάση από 61.9 V έως 62.5 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.26\text{s}$. Στο (β), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.005 η ισχύς κυμαίνεται από 997 W έως 998.3 W,

ενώ η τάση από 61.6 V έως 62.8 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.08s$. Στο (γ), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.01 η ισχύς κυμαίνεται από 995.7 W έως 998.8 W, ενώ η τάση από 59.9 V έως 63 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.04s$. Τέλος, στο (δ), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.015 η ισχύς κυμαίνεται από 994.3 W έως 999.7 W, ενώ η τάση από 58.7 V έως 63.4 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.02s$.

Στις παραπάνω μετρήσεις επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βήμα διαταραχής, ναι μεν υπάρχει γρηγορότερη σύγκλιση στο MPP, αλλά όμως υπάρχει και μεγαλύτερη ταλάντωση γύρω από αυτό.

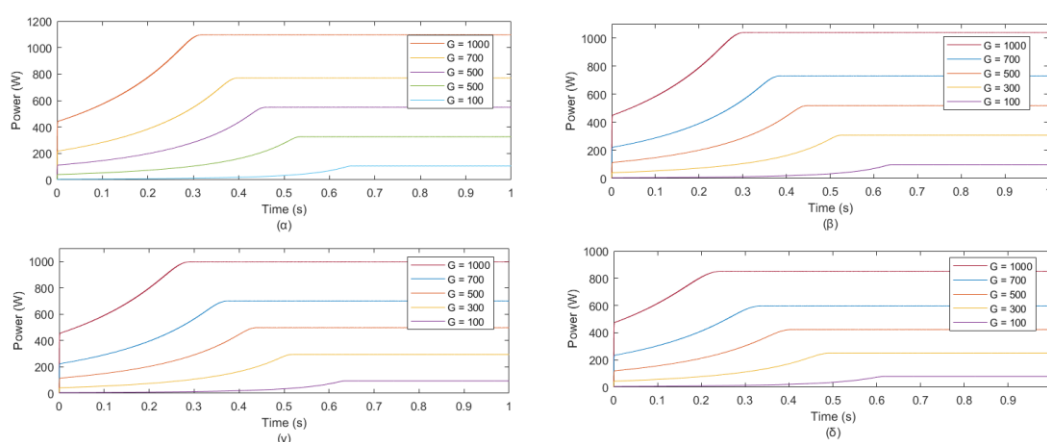
Πίνακας 5-1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου P&O						
Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο MPP	Χρόνος Σύγκλισης στο MPP (s)
1000-0	1097.2	1096.5 - 1097.2	69	68.7 - 69.3	0.48	0.29
700-0	771.3	770.6 - 771.3	69	68.7 - 69.3	0.4	0.37
500-0	548.9	548.2 - 548.9	68.8	68.5 - 69.1	0.34	0.42
300-0	326.3	325.6 - 326.3	68.4	68.1 - 68.7	0.26	0.51
100-0	105	104.3 - 105	65.4	65.1 - 65.7	0.16	0.63
1000-15	1038.9	1038.2 - 1038.9	64.8	64.5 - 65.1	0.5	0.28
700-15	728.8	728.1 - 728.8	64.9	64.6 - 65.2	0.42	0.36
500-15	519	518.3 - 519	64.8	64.5 - 65.1	0.35	0.42
300-15	308	307.3 - 308	64.4	64.1 - 64.7	0.27	0.51
100-15	98	97.3 - 98	62.2	61.9 - 62.5	0.16	0.62
1000-25	998	997.3 - 998	62.2	61.9 - 62.5	0.51	0.26
700-25	699.8	699.1 - 699.8	62.2	61.9 - 62.5	0.43	0.34
500-25	498	497.3 - 498	62	61.7 - 62.3	0.36	0.41
300-25	295.1	294.4 - 295.1	61.3	60.1 - 61.4	0.28	0.5
100-25	94	93.3 - 94	58.2	57.9 - 58.5	0.17	0.61
1000-60	851.6	850.5 - 851.6	52.5	52.2 - 52.8	0.56	0.21
700-60	596	595.3 - 596	52.4	52.1 - 52.7	0.47	0.31
500-60	422.9	422.2 - 422.9	52.1	51.8 - 52.4	0.4	0.38
300-60	249.2	248.5 - 249.2	51.1	50.8 - 51.4	0.31	0.48
100-60	78	77.3 - 78	48.5	48.2 - 48.8	0.19	0.61

Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου P&O με βήμα διαταραχής ίσο με 0.001. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται οι διακυμάνσεις ισχύος και τάσεως εξόδου για όλα τα σετ μετρήσεων όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές P_{mpp} και V_{mpp} , το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο MPP.

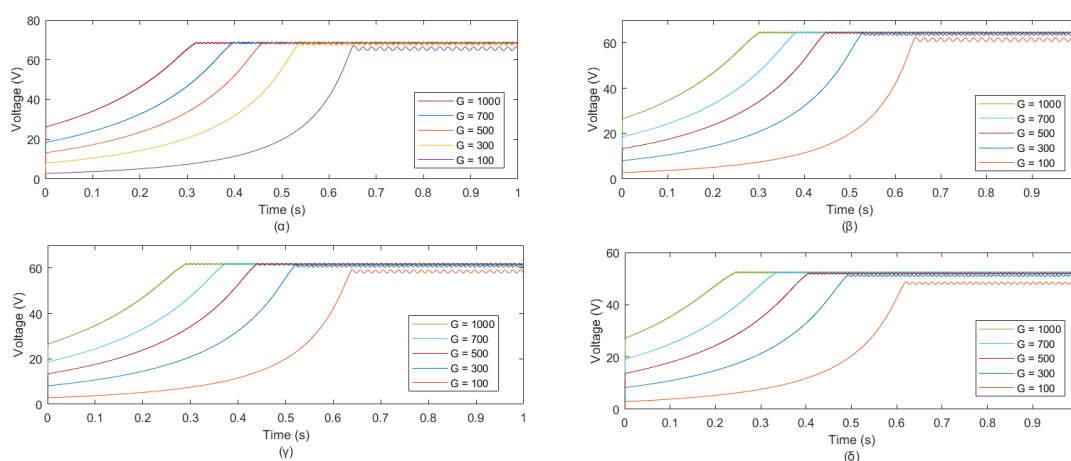
Συμπερασματικά, ο P&O υπολογίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια το MPP, έχοντας ως μέση τιμή βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- ίση με 99.99%. Επίσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-9, προσαρμόζεται με σχετική ευκολία στις απότομες αλλαγές της ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας και είναι απλός στην υλοποίηση.

5.3 Προσομοίωση τεχνικής INCOND

Για την τεχνική INCOND, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως ως προς τον χρόνο, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε ομοιόμορφη σταθερή - αλλά και μεταβαλλόμενη - ακτινοβολία και θερμοκρασία με βάση τα σενάρια μετρήσεων της παραγράφου 4.2. Στη συνέχεια, μελετάται η συμπεριφορά του αλγορίθμου για τέσσερις διαφορετικές τιμές του βήματος μεταβολής του μετατροπέα ισχύος. Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.

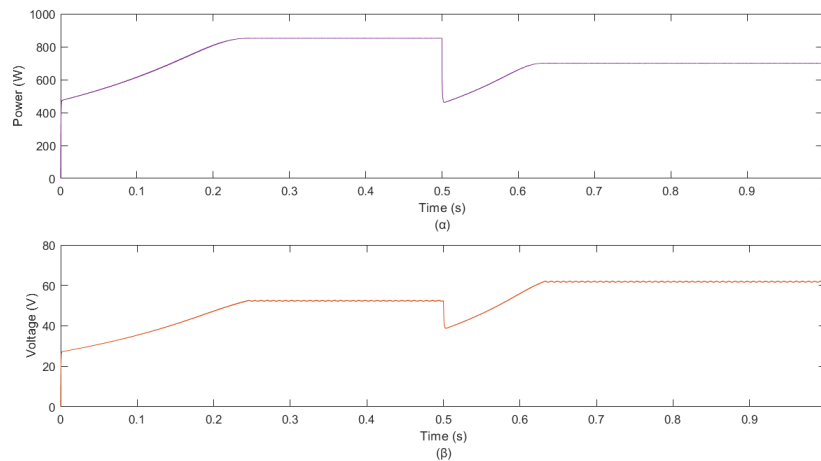


Σχήμα 5-12. Διάγραμμα ισχύος-χρόνου αλγορίθμου INCOND για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.



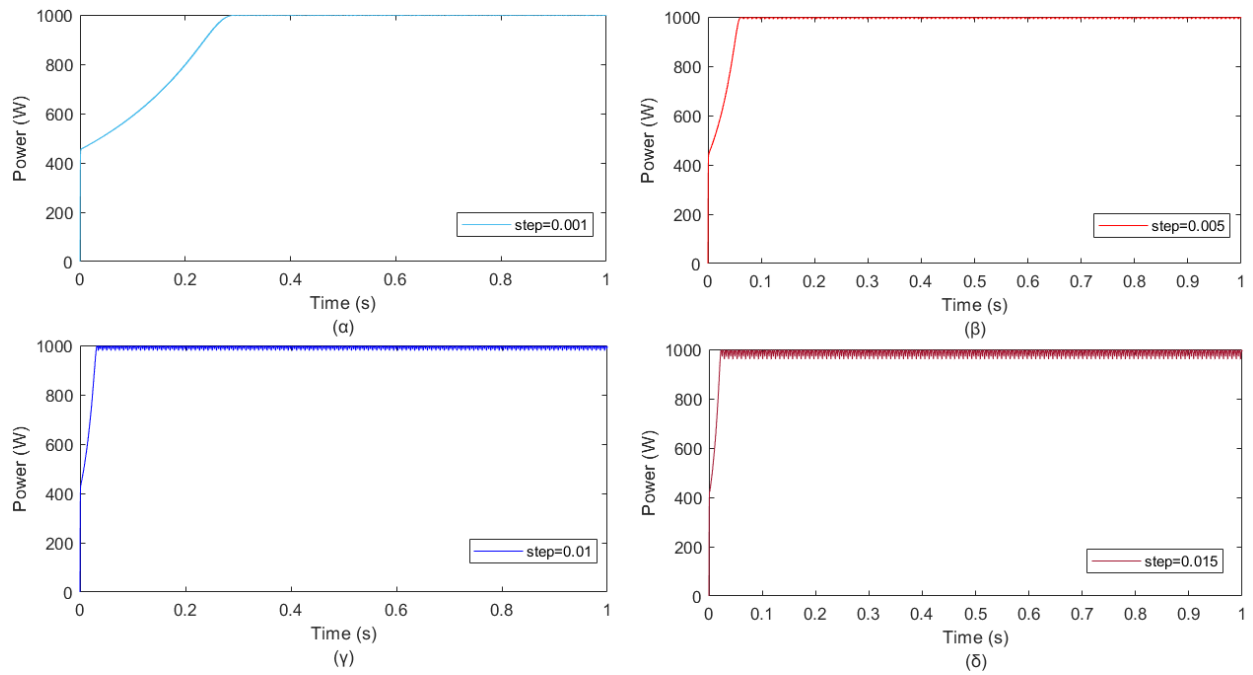
Σχήμα 5-13. Διάγραμμα τάσεως-χρόνου αλγορίθμου INCOND για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.

Στα Σχήματα 5-12 και 5-13 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως ως προς τον χρόνο, για τον αλγόριθμο INCOND, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε συνθήκες σταθερής ομοιόμορφης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.

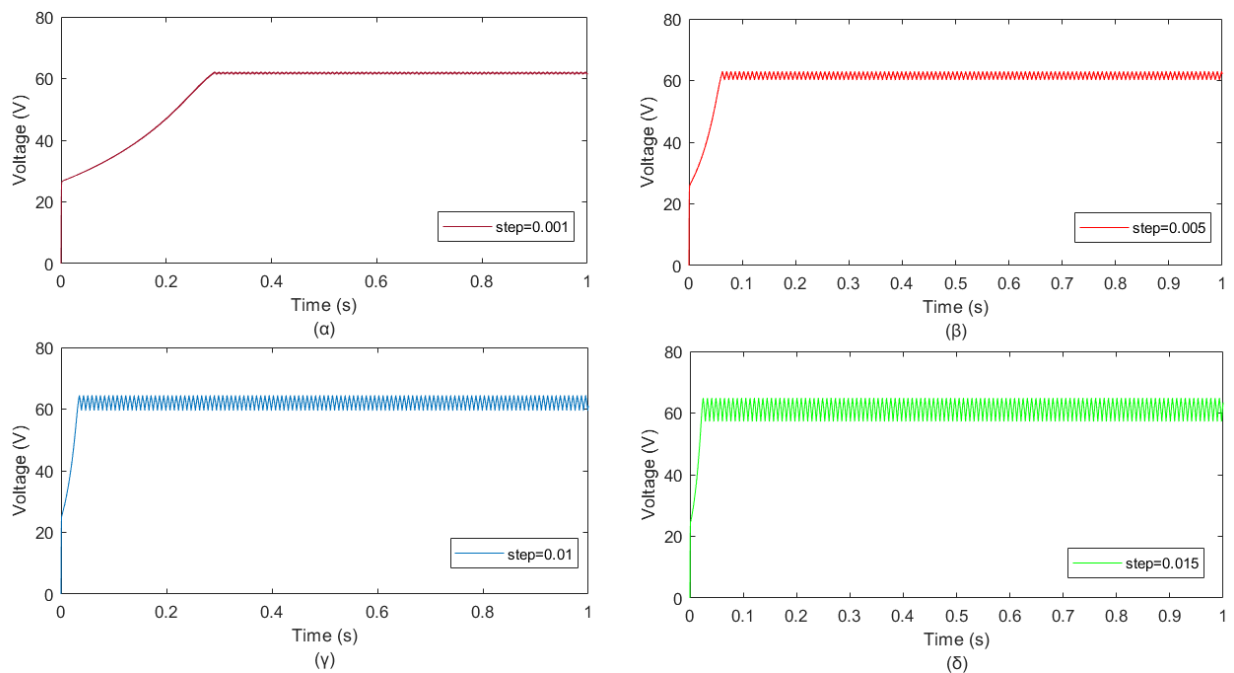


Σχήμα 5-14. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου INCOND για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-14 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία με τη χρήση του signal builder όπως περιγράφεται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.



Σχήμα 5-15. Διάγραμμα ισχύος-χρόνου αλγορίθμου P&O για τέσσερις διαφορετικές τιμές του βήματος: (α) 0.001, (β) 0.005, (γ) 0.01 και (δ) 0.015 σε STC.



Σχήμα 5-16. Διάγραμμα τάσεως-χρόνου αλγορίθμου P&O για τέσσερις διαφορετικές τιμές του βήματος: (α) 0.001, (β) 0.005, (γ) 0.01 και (δ) 0.015 σε STC.

Στα Σχήματα 5-15 και 5-16 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες STC ($G=1000 \text{ W/m}^2$ και $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$). Στο (α), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.001, η ισχύς κυμαίνεται από 997.4 W έως 998 W, ενώ η τάση από 62.1 V έως 62.5 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.27\text{s}$. Στο (β), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.005 η ισχύς κυμαίνεται από 996.8 W έως 998.5 W, ενώ η τάση από 61.4 V έως 62.8 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.08\text{s}$. Στο (γ), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.01 η ισχύς κυμαίνεται από 995.5 W έως 998.9 W, ενώ η τάση από 59.4 V έως 62.8 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.022\text{s}$. Τέλος, στο (δ), όπου το βήμα είναι ίσο με 0.015 η ισχύς κυμαίνεται από 993.9 W έως 999.6 W, ενώ η τάση από 58.9 V έως 63.3 W. Η σύγκλιση στο MPP γίνεται τη χρονική στιγμή $t=0.013\text{s}$.

Στις παραπάνω μετρήσεις παρουσιάζεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βήμα διαταραχής, ναι μεν υπάρχει γρηγορότερη σύγκλιση στο MPP, αλλά όμως υπάρχει και μεγαλύτερη ταλάντωση γύρω από αυτό.

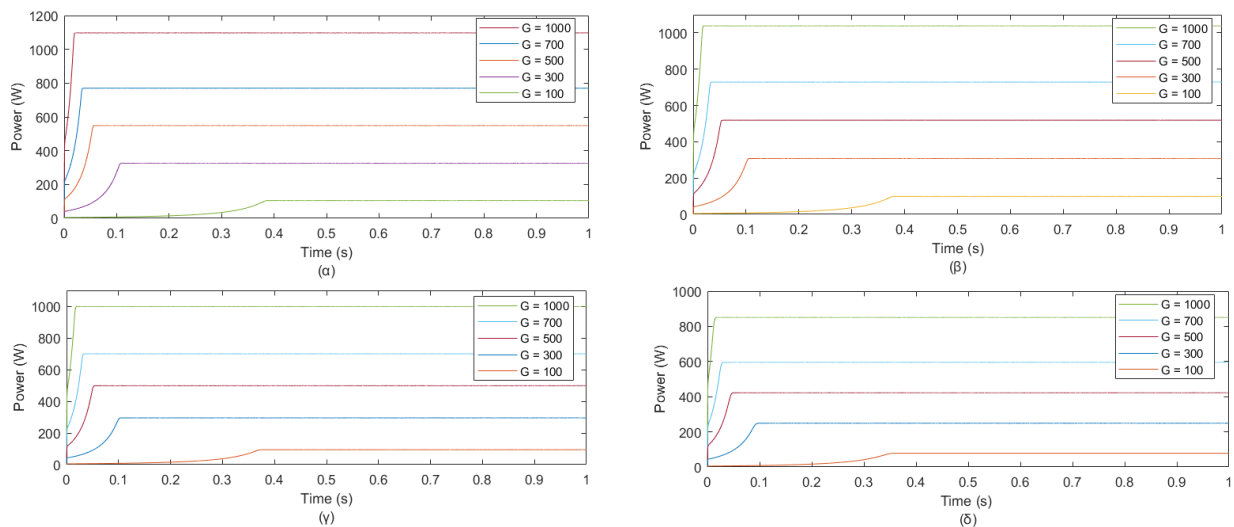
Πίνακας 5-2. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου INCOND						
Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο MPP	Χρόνος Σύγκλισης στο MPP (s)
1000-0	1097.2	1096.6 - 1097.3	69	68.9 - 69.3	0.48	0.29
700-0	771.3	770.7 - 771.3	69	68.9 - 69.3	0.4	0.36
500-0	548.9	548.3 - 548.9	68.8	68.7 - 69.1	0.34	0.42
300-0	326.3	325.7 - 326.3	68.4	68.3 - 68.7	0.27	0.51
100-0	105	104.4 - 105	65.4	65.3 - 65.7	0.16	0.62
1000-15	1038.9	1038.3 - 1038.9	64.8	64.7 - 65.2	0.5	0.28
700-15	728.8	728.2 - 728.8	64.9	64.8 - 65.2	0.41	0.37
500-15	519	518.4 - 519	64.8	64.7 - 65.1	0.35	0.41
300-15	308	307.4 - 308	64.4	64.3 - 64.7	0.27	0.51
100-15	98	97.4 - 98	62.2	61.1 - 62.5	0.16	0.62
1000-25	998	997.4 - 998	62.2	62.1 - 62.5	0.51	0.27
700-25	699.8	699.2 - 699.8	62.2	62.1 - 62.5	0.43	0.33
500-25	498	497.4 - 498	62	58.9 - 62.3	0.36	0.41
300-25	295.1	294.5 - 295.1	61.3	61.2 - 61.6	0.28	0.5
100-25	94	93.4 - 94	58.2	58.1 - 58.5	0.17	0.62
1000-60	851.6	851 - 851.6	52.5	52.4 - 52.8	0.56	0.21
700-60	596	595.4 - 596	52.4	52.3 - 52.7	0.46	0.3
500-60	422.9	422.3 - 422.9	52.1	52 - 52.4	0.4	0.39
300-60	249.2	248.6 - 249.2	51.1	51 - 51.4	0.31	0.44
100-60	78	77.4 - 78	48.5	48.4 - 48.8	0.18	0.6

Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου INCOND με βήμα διαταραχής ίσο με 0.001. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται οι διακυμάνσεις ισχύος και τάσεως εξόδου για όλα τα σετ μετρήσεων όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές P_{mpp} και V_{mpp} , το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο MPP.

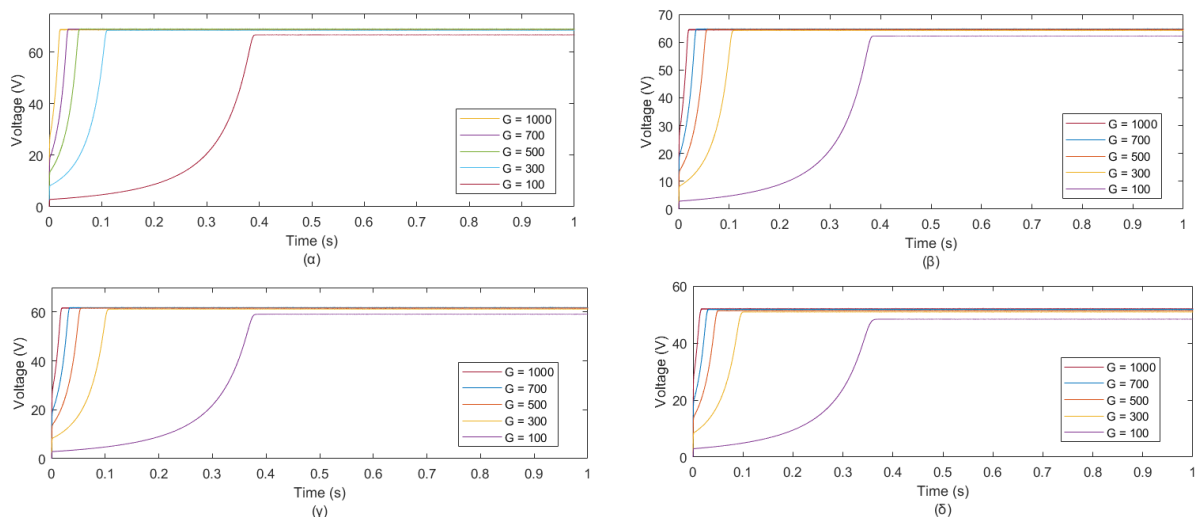
Συμπερασματικά, ο INCOND, όπως και ο P&O, υπολογίζει με πολύ καλή ακρίβεια το MPP, έχοντας ως μέση τιμή βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- ίση με 99.99%. Επίσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-14, προσαρμόζεται με ευκολία στις απότομες αλλαγές της ακτινοβολίας/θερμοκρασίας. Τέλος, η πολυπλοκότητα, του αλγορίθμου χαρακτηρίζεται ως μέτρια.

5.4 Προσομοίωση τεχνικής Variable Step Size P&O

Για την τεχνική VSS P&O, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως ως προς τον χρόνο, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε ομοιόμορφη σταθερή αλλά και μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία με βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.2. Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.

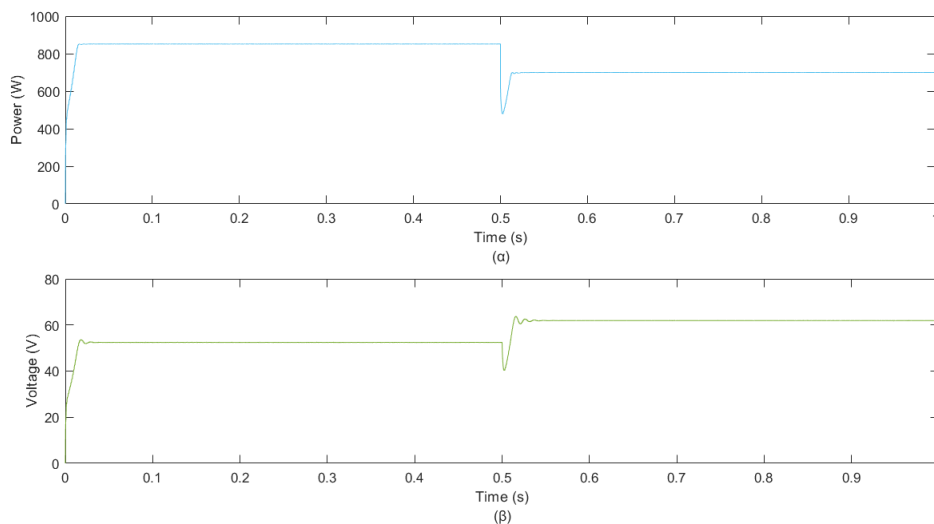


Σχήμα 5-17. Διάγραμμα ισχύος-χρόνου αλγορίθμου VSS P&O για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.



Σχήμα 5-18. Διάγραμμα τάσεως-χρόνου αλγορίθμου VSS P&O για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.

Στα Σχήματα 5-17 και 5-18 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως ως προς τον χρόνο, για τον αλγόριθμο VSS P&O, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε συνθήκες σταθερής ομοιόμορφης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.



Σχήμα 5-19. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου VSS P&O για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου VSS P&O για μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία με τη χρήση του signal builder όπως περιγράφεται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.

Πίνακας 5-3. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου VSS P&O						
Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο MPP	Χρόνος Σύγκλισης στο MPP (s)
1000-0	1097.2	1097 - 1097.2	69	68.8 - 69.1	0.48	0.02
700-0	771.3	771.1 - 771.3	69	68.8 - 69.1	0.4	0.03
500-0	548.9	548.7 - 548.9	68.8	68.6 - 68.9	0.34	0.05
300-0	326.3	326.1 - 326.3	68.4	68.2 - 68.5	0.26	0.1
100-0	105	104.8 - 105	65.4	65.2 - 65.5	0.15	0.38
1000-15	1038.9	1038.7 - 1038.9	64.8	64.6 - 64.9	0.5	0.02
700-15	728.8	728.6 - 728.8	64.9	64.7 - 65	0.42	0.03
500-15	519	518.8 - 519	64.8	64.6 - 64.9	0.35	0.05
300-15	308	307.8 - 308	64.4	64.2 - 64.5	0.28	0.1
100-15	98	97.8 - 98	62.2	62 - 62.3	0.15	0.38
1000-25	998	997.8 - 998	62.2	62 - 62.3	0.51	0.02
700-25	699.8	699.6 - 699.8	62.2	62 - 62.3	0.43	0.03
500-25	498	497.8 - 498	62	61.8 - 62.1	0.36	0.05
300-25	295.1	294.9 - 295.1	61.3	61.1 - 61.4	0.28	0.1
100-25	94	93.8 - 94	58.2	58 - 58.3	0.16	0.37
1000-60	851.6	851.4 - 851.6	52.5	52.3 - 52.6	0.56	0.01
700-60	596	595.8 - 596	52.4	52.2 - 52.5	0.47	0.02
500-60	422.9	422.7 - 422.9	52.1	51.9 - 52.2	0.4	0.04
300-60	249.2	249 - 249.2	51.1	50.9 - 51.2	0.31	0.09
100-60	78	77.8 - 78	48.5	48.3 - 48.6	0.18	0.35

Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου P&O με μεταβλητό βήμα. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται οι διακυμάνσεις ισχύος και τάσεως εξόδου για όλα τα σετ μετρήσεων όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές P_{mpp} και V_{mpp} , το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο MPP.

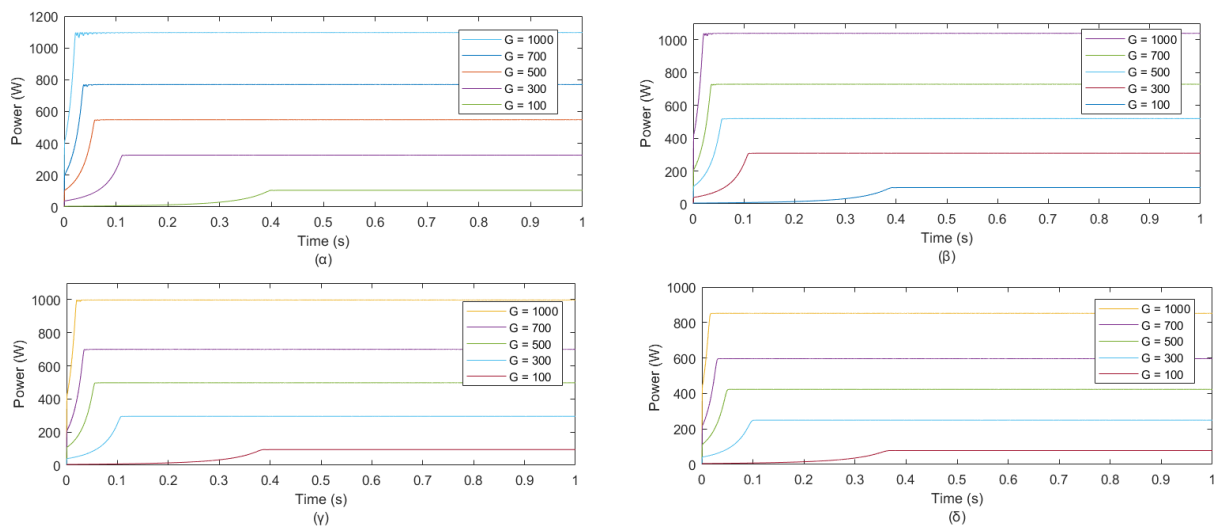
Συμπερασματικά, ο VSS P&O, υπολογίζει γρήγορα και με πολύ καλή ακρίβεια το MPP. Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 99.99%. Τέλος έχει μέτρια πολυπλοκότητα υλοποίησης και είναι προσαρμόσιμος στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19. Συγκριτικά με τον απλό

P&O, είναι πολύ πιο γρήγορος στον εντοπισμό του MPP αν και έχουν την ίδια μέση τιμή βαθμού απόδοσης.

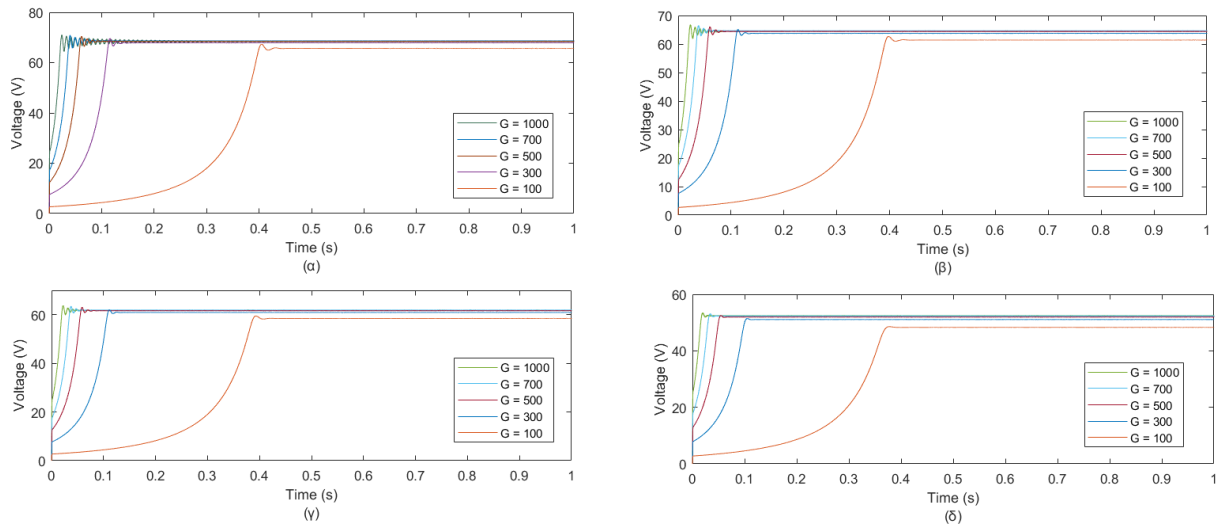
5.5 Προσομοίωση τεχνικής Variable Step Size INCOND

Για την τεχνική VSS INCOND, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε ομοιόμορφη σταθερή αλλά και μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία με βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.

Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.

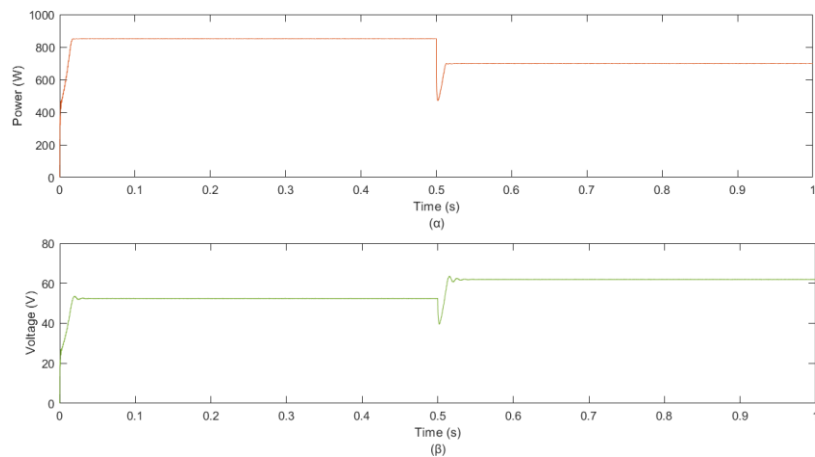


Σχήμα 5-20. Διάγραμμα ισχύος -χρόνου αλγορίθμου VSS INCOND για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.



Σχήμα 5-21. Διάγραμμα τάσεως-χρόνου αλγορίθμου VSS INCOND για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία ίση με: (α) 0 °C, (β) 15 °C, (γ) 25 °C και (δ) 60 °C.

Στα Σχήματα 5-20 και 5-21 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως ως προς τον χρόνο, για τον αλγόριθμο VSS INCOND, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε συνθήκες σταθερής ομοιόμορφης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.



Σχήμα 5-22. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου VSS INCOND για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου VSS INCOND για μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία με τη χρήση του signal builder όπως περιγράφεται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.2.

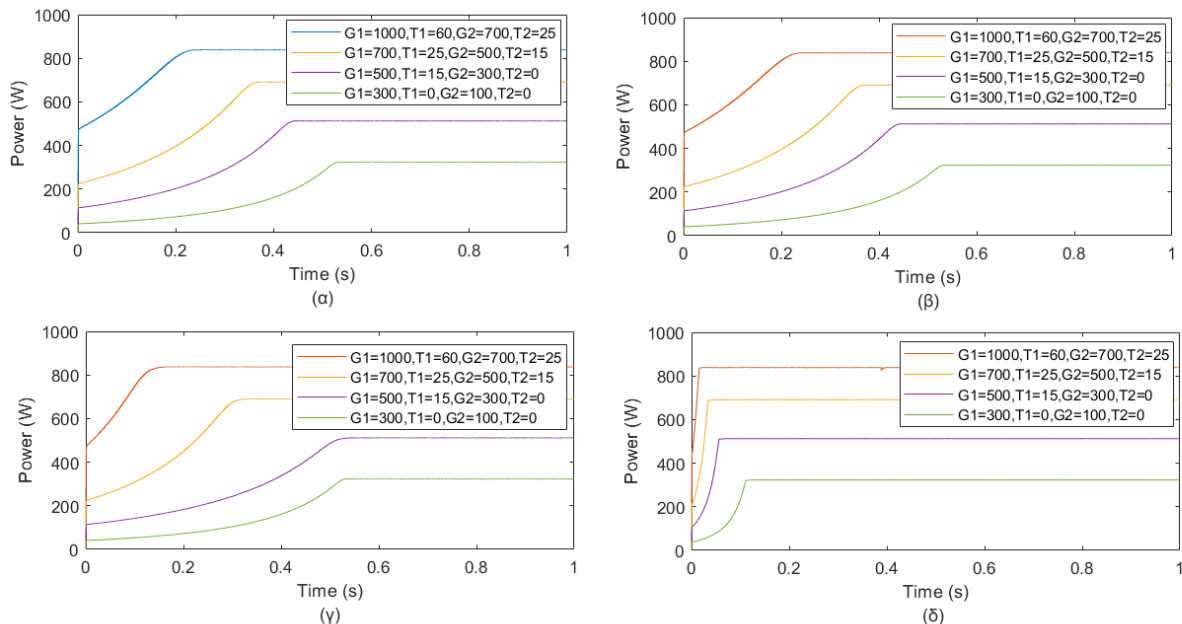
Πίνακας 5-4. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου VSS INCOND						
Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο MPP	Χρόνος Σύγκλισης στο MPP (s)
1000-0	1097.2	1096.9 - 1097.2	69	68.7 - 69.1	0.48	0.03
700-0	771.3	771 - 771.3	69	68.7 - 69.1	0.4	0.06
500-0	548.9	548.6 - 548.9	68.8	68.5 - 68.9	0.34	0.06
300-0	326.3	326 - 326.3	68.4	68.1 - 68.5	0.26	0.1
100-0	105	104.7 - 105	65.4	65.1 - 65.5	0.16	0.39
1000-15	1038.9	1038.6 - 1038.9	64.8	64.5 - 64.9	0.5	0.03
700-15	728.8	728.5 - 728.8	64.9	64.8 - 65.1	0.42	0.04
500-15	519	518.3 - 519.1	64.8	64.5 - 64.9	0.35	0.06
300-15	308	307.7 - 308	64.4	64.1 - 64.5	0.27	0.12
100-15	98	97.7 - 98	62.2	61.9 - 62.3	0.16	0.39
1000-25	998	997.7 - 998	62.2	61.9 - 62.3	0.51	0.02
700-25	699.8	699.5 - 699.8	62.2	61.9 - 62.3	0.43	0.03
500-25	498	497.7 - 498	62	58.7 - 62.1	0.36	0.06
300-25	295.1	294.8 - 295.1	61.3	61 - 61.4	0.28	0.11
100-25	94	93.7 - 94	58.2	57.9 - 58.3	0.38	0.17
1000-60	851.6	851.3 - 851.6	52.5	52.2 - 52.6	0.55	0.02
700-60	596	595.7 - 596	52.4	52.1 - 52.5	0.47	0.03
500-60	422.9	422.6 - 422.9	52.1	51.8 - 52.2	0.39	0.05
300-60	249.2	248.9 - 249.2	51.1	50.8 - 51.2	0.31	0.1
100-60	78	77.7 - 78	48.5	48.2 - 48.6	0.18	0.36

Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου INCOND με μεταβλητό βήμα. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται οι διακυμάνσεις ισχύος και τάσεως εξόδου για όλα τα σετ μετρήσεων όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές P_{mpp} και V_{mpp}, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο MPP.

Συμπερασματικά, ο VSS INCOND, υπολογίζει γρήγορα και με πολύ καλή ακρίβεια το MPP, έχοντας ως μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- ίση με 99.99%. Μπορεί να εντοπίσει το MPP σε απότομες αλλαγές ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-22, και έχει μέτρια πολυπλοκότητα υλοποίησης. Συγκριτικά με την απλή εκδοχή του είναι πολύ πιο γρήγορος στο εντοπισμό του MPP, έχοντας την ίδια μέση τιμή βαθμού απόδοσης.

5.6 Προσομοίωση συμβατικών τεχνικών σε συνθήκες μερικής σκίασης

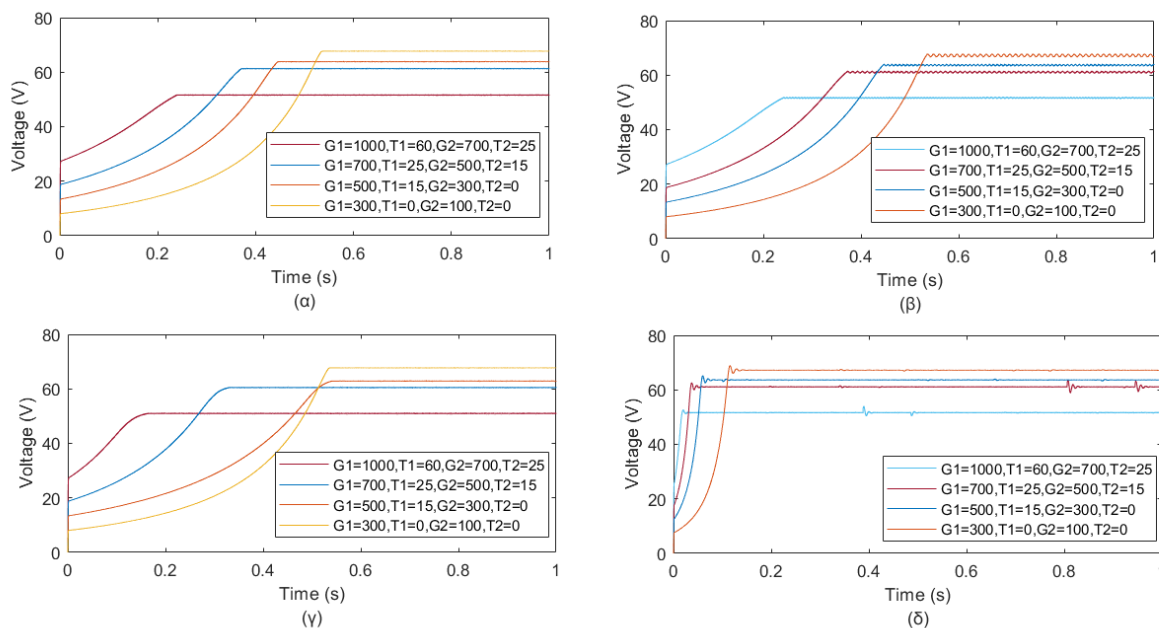
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των τεσσάρων συμβατικών τεχνικών MPPT σε συνθήκες μερικής σκίασης.



Σχήμα 5-23. Διαγράμματα ισχύος-χρόνου για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας/

θερμοκρασίας για την τεχνική: (α) P&O, (β) INCOND, (γ) VSS P&O και (δ) VSS INCOND

σε συνθήκες μερικής σκίασης.



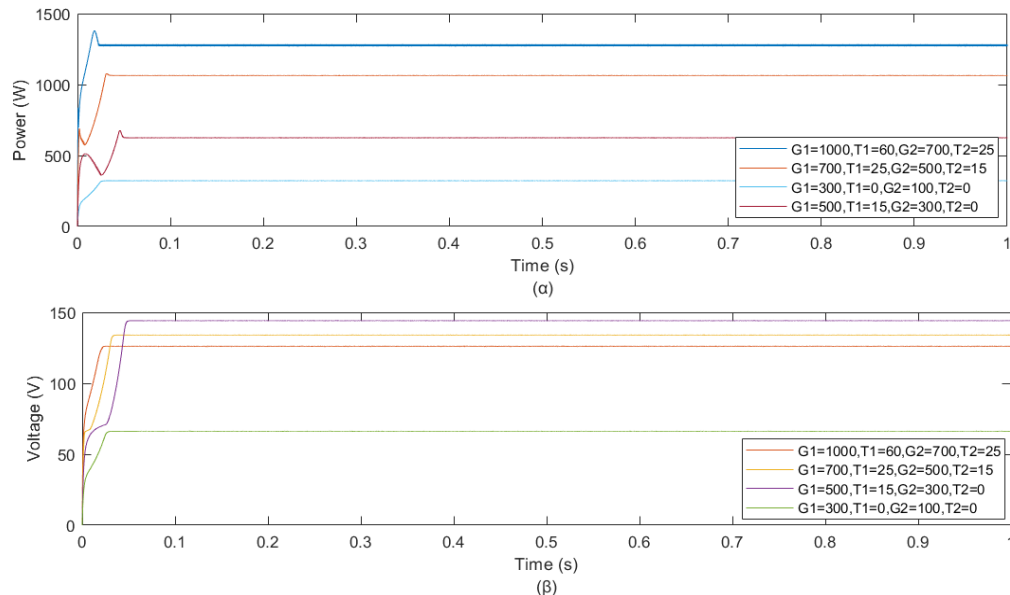
Σχήμα 5-24. Διαγράμματα τάσεως-χρόνου για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας/θερμοκρασίας για την τεχνική: (α) P&O, (β) INCOND, (γ) VSS P&O και (δ) VSS INCOND σε συνθήκες μερικής σκίασης.

Στο Σχήματα 5-23 και 5-24 παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των συμβατικών αλγορίθμων σε συνθήκες μερικής σκίασης. Πιο συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι μελετήθηκαν για πολλούς συνδυασμούς σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για τις δυο Φ/Β συστοιχίες. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι σε όλες τις περιπτώσεις κανένας αλγόριθμος δεν κατάφερε να εντοπίσει το θεωρητικό ολικό MPP (για κανέναν συνδυασμό ακτινοβολίας-θερμοκρασίας) που υπολογίστηκε στην παράγραφο 5.1.2.

5.7 Προσομοίωση τεχνικής GSS

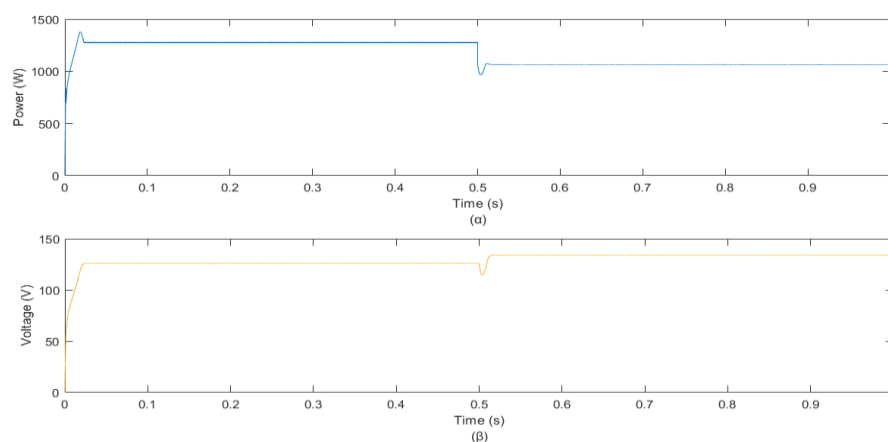
Αρχικά, για την τεχνική GSS, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθηκών μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, εισάγεται ως είσοδος του Φ/Β συστήματος μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία, με

βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Τέλος, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.



Σχήμα 5-25. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου GSS για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου GSS για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, όπως περιγράφονται στα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.



Σχήμα 5-26. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου GSS για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-26 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.

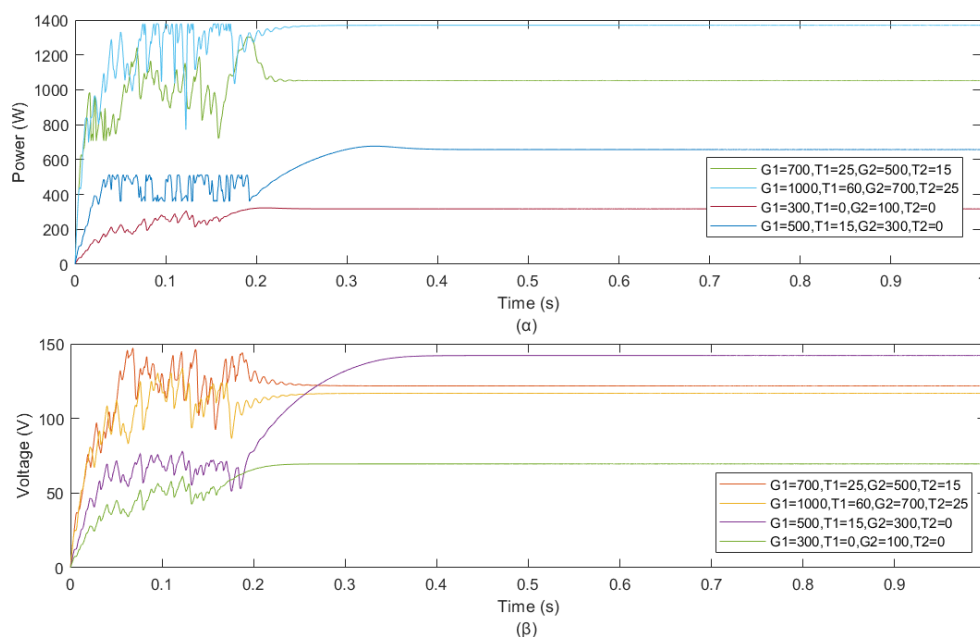
Πίνακας 5-5. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου GSS							
Φ/Β Συστοιχία 1, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Φ/Β Συστοιχία 2, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο GMPP	Χρόνος Σύγκλισης στο GMPP (s)
1000-60	700-25	1379.2	1272 - 1282	126.2	125.9 - 126.3	0.28	0.03
700-25	500-15	1077.4	1065.2 - 1067.7	134.1	133.8 - 134.2	0.24	0.04
500-15	300-0	677	623.4 - 627.9	144.1	143.8 - 144.2	0.17	0.05
300-0	100-0	323.2	309 - 311	64.6	64.3 – 64.5	0.28	0.02

Στον Πίνακα 5-5 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου GSS. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται η διακύμανση της ισχύος εξόδου του Φ/Β συστήματος, η διακύμανση της τάσης εξόδου του Φ/Β συστήματος, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο ολικό μέγιστο.

Συμπερασματικά, ότι ο GSS συγκλίνει με καλή προσέγγιση στο GMPP. Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 95%. Συγκλίνει εξαιρετικά γρήγορα στο GMPP, προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καθώς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-26, εντοπίζει το GMPP μετά από κάθε μεταβολή ακτινοβολίας/θερμοκρασίας. Τέλος, έχει μέτρια πολυπλοκότητα υλοποίησης.

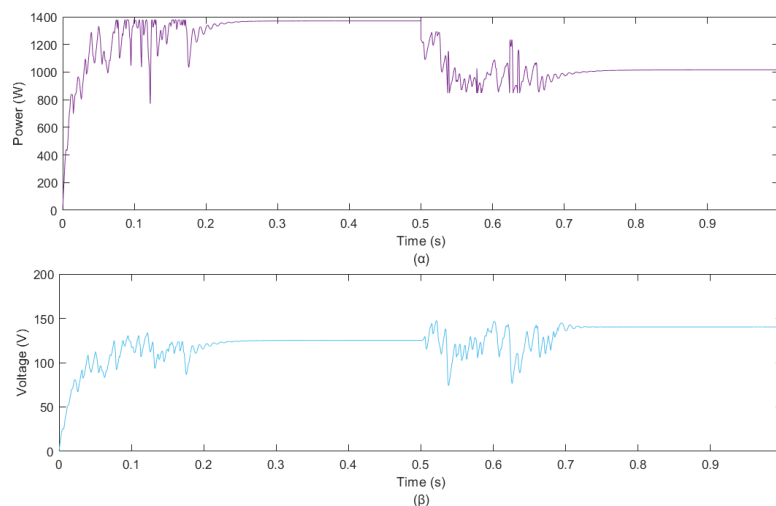
5.8 Προσομοίωση τεχνικής RS

Αρχικά, για την τεχνική RS, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθηκών μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, εισάγεται ως είσοδος του Φ/Β συστήματος μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία, με βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Τέλος, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.



Σχήμα 5-27. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου RS για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-27 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου RS για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, όπως περιγράφονται στα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.



Σχήμα 5-28. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου RS για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-28 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.

Πίνακας 5-6. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου RS							
Φ/Β Συστοιχία 1, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Φ/Β Συστοιχία 2, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο GMPP	Χρόνος Σύγκλισης στο GMPP (s)
1000-60	700-25	1379.2	1368.3 - 1368.4	126.2	126.1 - 126.3	0.29	0.24
700-25	500-15	1077.4	1050.4 - 1052.4	134.1	133.8 - 134.1	0.23	0.25
500-15	300-0	677	657.2 - 658.1	144.1	143.8 - 144.2	0.3	0.39
300-0	100-0	323.2	313.6 - 315.3	64.6	63.9 - 64.7	0.16	0.18

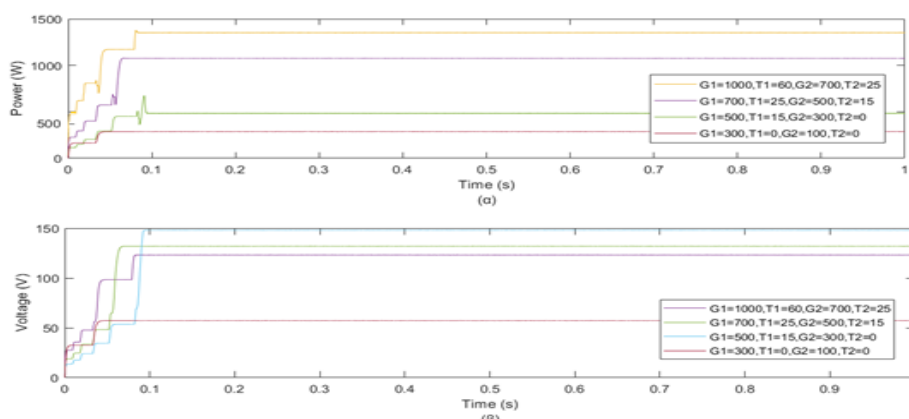
Στον Πίνακα 5-6 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου RS. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται η διακύμανση της ισχύος εξόδου του Φ/Β

συστήματος, η διακύμανση της τάσης εξόδου του Φ/Β συστήματος και οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο GMPP.

Συμπερασματικά, ο RS συγκλίνει με πολύ καλή προσέγγιση στο GMPP. Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 97.8%. Συγκλίνει γρήγορα στο GMPP και προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καθώς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-28 εντοπίζει το GMPP μετά από κάθε μεταβολή ακτινοβολίας/θερμοκρασίας. Το μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι πως χρειάζεται επανεκκίνηση με την αλλαγή της ακτινοβολίας/θερμοκρασίας για εντοπίσει το νέο GMPP. Η πολυπλοκότητα υλοποίησης του χαρακτηρίζεται ως μέτρια.

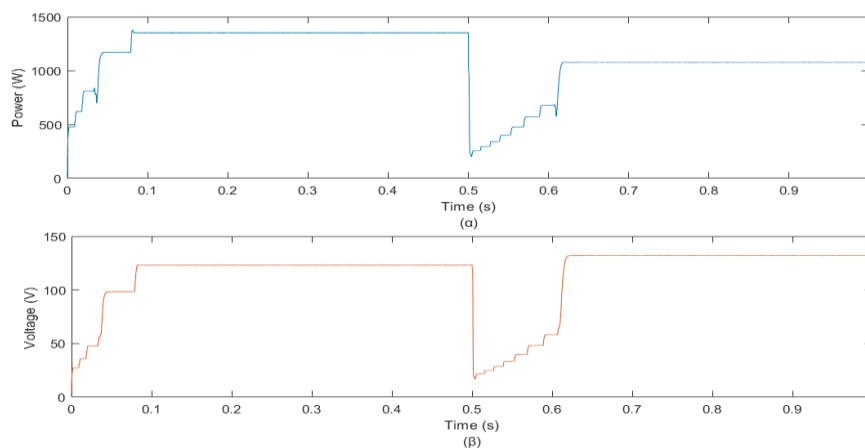
5.9 Προσομοίωση τεχνικής VW

Αρχικά, για την τεχνική VW, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθηκών μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, εισάγεται ως είσοδος του Φ/Β συστήματος μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία, με βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Τέλος, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.



Σχήμα 5-29. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου VW για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-29 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του αλγορίθμου VW για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.



Σχήμα 5-30. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου VW για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-30 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.

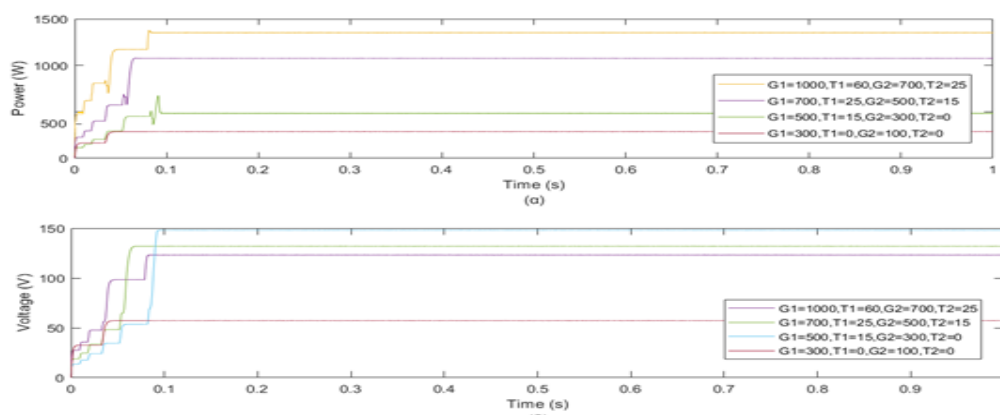
Πίνακας 5-7. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου VW							
Φ/Β Συστοιχία 1, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Φ/Β Συστοιχία 2, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο GMPP	Χρόνος Σύγκλισης στο GMPP (s)
1000-60	700-25	1379.2	1348.1 - 1355.7	126.2	126.1 - 126.4	0.3	0.08
700-25	500-15	1077.4	1075.6 - 1076.4	134.1	134 - 134.3	0.25	0.07
500-15	300-0	677	616 - 617.2	144.1	144 - 144.3	0.15	0.1
300-0	100-0	323.2	293.1 - 295	64.6	64.5 - 66.8	0.18	0.05

Στον Πίνακα 5-7 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου VW. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται η διακύμανση της ισχύος εξόδου του Φ/Β συστήματος, η διακύμανση της τάσης εξόδου του Φ/Β συστήματος, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο ολικό μέγιστο.

Συμπερασματικά, ο VW συγκλίνει με καλή προσέγγιση στο GMPP. Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 94.98%. Συγκλίνει γρήγορα στο GMPP και έχει χαμηλή πολυπλοκότητα. Παρόλο που προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-30, χρειάζεται επανεκκίνηση για να εντοπίσει το νέο GMPP.

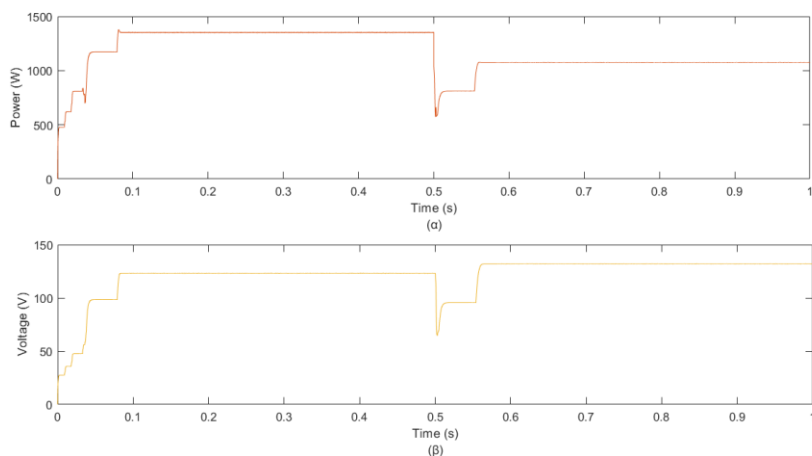
5.10 Προσομοίωση τεχνικής VW και P&O

Αρχικά, για την τεχνική VW και P&O, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθηκών μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, εισάγεται ως είσοδος του Φ/Β συστήματος μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία, με βάση τα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Τέλος, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.



Σχήμα 5-31. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου VW και P&O για διάφορες τιμές σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου VW και P&O για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.



Σχήμα 5-32. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου VW P&O για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-32 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.

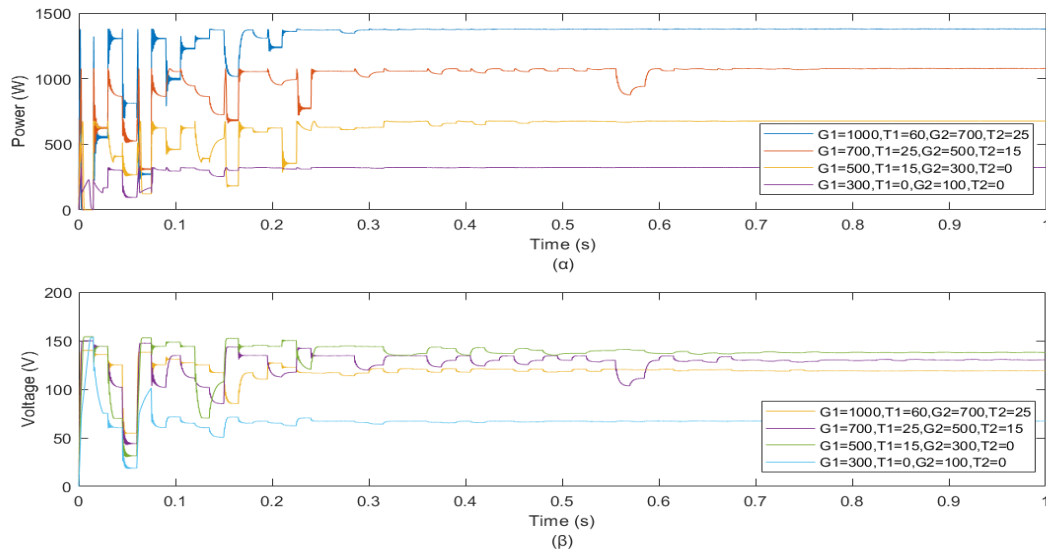
Πίνακας 5-8. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου VW P&O							
Φ/Β Συστοιχία 1, Ακτινοβολία (W/m ²)– Θερμοκρασία (°C)	Φ/Β Συστοιχία 2, Ακτινοβολία (W/m ²)– Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο GMPP	Χρόνος Σύγκλισης στο GMPP (s)
1000-60	700-25	1379.2	1334.1 - 1336.4	126.2	126 - 126.2	0.35	0.09
700-25	500-15	1077.4	1075.4 - 1076.2	134.1	133.9 - 134.1	0.25	0.08
500-15	300-0	677	643.3 - 644.2	144.1	143.9 - 144.1	0.29	0.1
300-0	100-0	323.2	316.9 - 317.8	64.6	64.4 - 64.6	0.15	0.03

Στον Πίνακα 5-8 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου VW P&O. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται η διακύμανση της ισχύος εξόδου του Φ/Β συστήματος, η διακύμανση της τάσης εξόδου του Φ/Β συστήματος, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο ολικό μέγιστο.

Συμπερασματικά, ο VW P&O συγκλίνει με καλή προσέγγιση στο GMPP (λίγο καλύτερη από τον VW). Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 97.48%. Συγκλίνει πολύ γρήγορα στο GMPP, προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καθώς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-32, εντοπίζει το GMPP μετά από κάθε μεταβολή ακτινοβολίας/θερμοκρασίας. Η πολυπλοκότητα υλοποίησης του χαρακτηρίζεται επίσης ως χαμηλή. Ωστόσο, Ο VW P&O, όπως και ο VW, πρέπει να επανεκτιμηθεί έτσι ώστε να μπορέσει να εντοπίσει σωστά το νέο GMPP μετά από απότομη αλλαγή ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας.

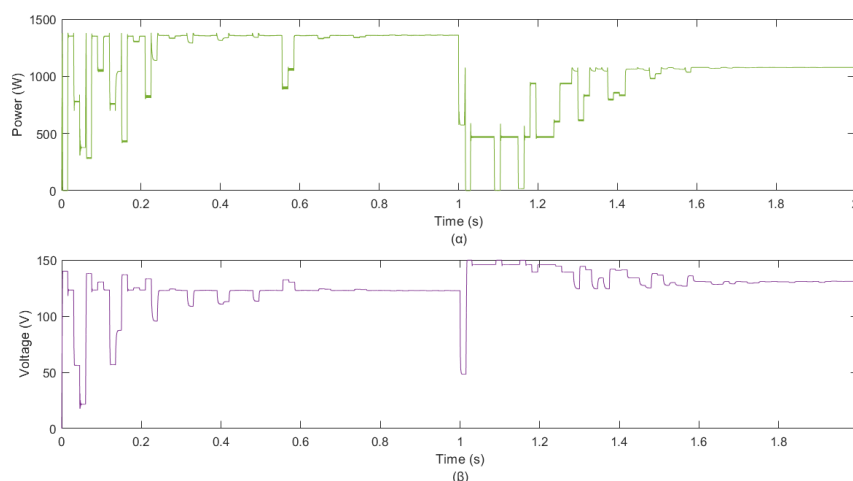
5.11 Προσομοίωση τεχνικής Cuckoo Search

Αρχικά, για την τεχνική CS, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθηκών μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, εισάγεται ως είσοδος του Φ/Β συστήματος μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία, με βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Τέλος, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.



Σχήμα 5-33. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου CS για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-33 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου CS για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Σημειώνεται ότι οι τιμές ισχύος και τάσης προκύπτουν καθώς ο αλγόριθμος εκτελείται για όλα τα χρωμοσώματα της κάθε γενιάς.



Σχήμα 5-34. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου CS για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-34 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.

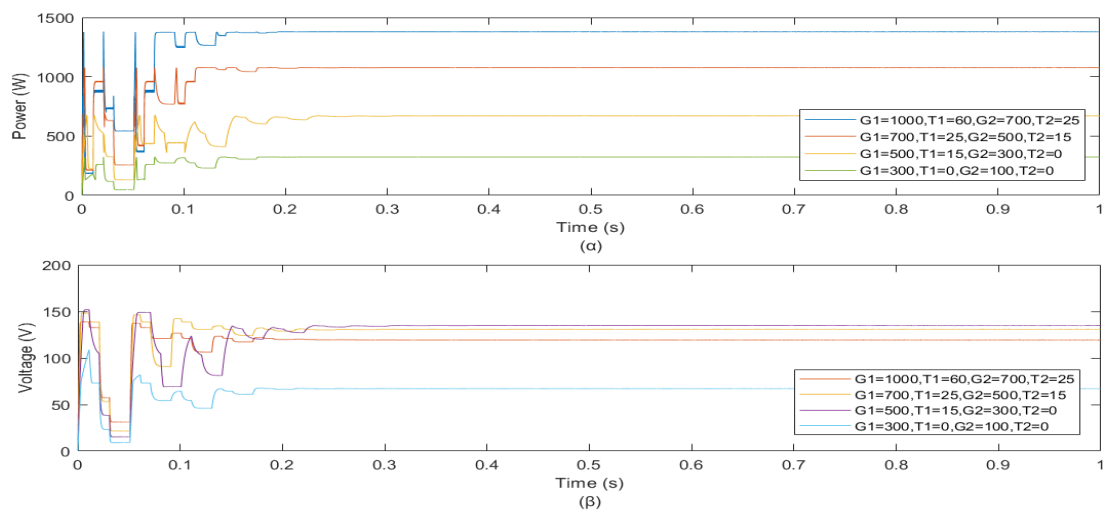
Πίνακας 5-9. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου Cuckoo Search							
Φ/Β Συστοιχία 1, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Φ/Β Συστοιχία 2, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο GMPP	Χρόνος Σύγκλισης στο GMPP (s)
1000-60	700-25	1379.2	1352 - 1358	126.2	125.9 - 126.3	0.54	0.3
700-25	500-15	1077.4	1069.1 - 1071	134.1	133.8 - 134.3	0.44	0.31
500-15	300-0	677	668 - 671	144.1	138.4 - 144.3	0.32	0.31
300-0	100-0	323.2	319.7 - 321.4	64.6	64.3 - 64.9	0.47	0.15

Στον Πίνακα 5-9 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου CS. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται η διακύμανση της ισχύος εξόδου του Φ/Β συστήματος, η διακύμανση της τάσης εξόδου του Φ/Β συστήματος, οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο ολικό μέγιστο.

Συμπερασματικά, ο CS συγκλίνει με εξαιρετικά καλή προσέγγιση στο GMPP. Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 98.9%. Δε συγκλίνει σχετικά γρήγορα στο GMPP και προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καθώς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-34, εντοπίζει το GMPP μετά από κάθε μεταβολή ακτινοβολίας/θερμοκρασίας. Η πολυπλοκότητα υλοποίησης του χαρακτηρίζεται ως αρκετά υψηλή. Τέλος, ο αλγόριθμος χρειάζεται επανεκκίνηση σε απότομες αλλαγές ακτινοβολίας/θερμοκρασίας έτσι ώστε να εντοπίσει το νέο GMPP.

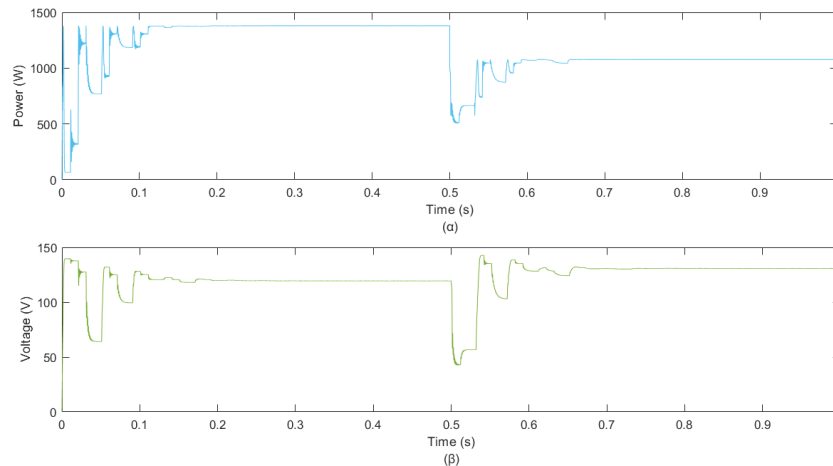
5.12 Προσομοίωση τεχνικής DIRECT

Αρχικά, για την τεχνική DIRECT, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου και τάσεως-χρόνου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθηκών μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, εισάγεται ως είσοδος του Φ/Β συστήματος μεταβαλλόμενη ακτινοβολία και θερμοκρασία, με βάση τα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3. Τέλος, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.



Σχήμα 5-35. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου DIRECT για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-35 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου του αλγορίθμου DIRECT για τέσσερα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σε συνθήκες μερικής σκίασης, όπως περιγράφονται στα σεντ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.



Σχήμα 5-36. Διάγραμμα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου αλγορίθμου DIRECT για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 5-36 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: (α) ισχύος-χρόνου και (β) τάσεως-χρόνου για διάφορες τιμές μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση signal builder, όπως περιγράφονται στα σετ μετρήσεων της παραγράφου 4.3.

Πίνακας 5-10. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλγορίθμου DIRECT							
Φ/Β Συστοιχία 1, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Φ/Β Συστοιχία 2, Ακτινοβολία (W/m ²) – Θερμοκρασία (°C)	Θεωρητική P _{mpp} (W)	Εύρος Τιμών Ισχύος Προσομοίωσης (W)	Θεωρητική V _{mpp} (V)	Εύρος Τιμών Τάσεως Προσομοίωσης (V)	Duty Cycle στο GMPP	Χρόνος Σύγκλισης στο GMPP (s)
1000-60	700-25	1379.2	1378.9 - 1379.2	126.2	126.1 - 126.2	0.54	0.16
700-25	500-15	1077.4	1077.3 - 1077.4	134.1	134 - 134.1	0.43	0.19
500-15	300-0	677	670.8 - 672.2	144.1	144 - 144.1	0.2	0.22
300-0	100-0	323.2	323-323.2	64.6	64.5-64.6	0.27	0.19

Στον Πίνακα 5-10 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις από τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου DIRECT. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται η διακύμανση της ισχύος εξόδου του Φ/Β συστήματος, η διακύμανση της τάσης εξόδου του Φ/Β συστήματος και οι αντίστοιχες

θεωρητικές τιμές, το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και ο χρόνος σύγκλισης στο ολικό μέγιστο.

Συμπερασματικά, ο DIRECT συγκλίνει με εξαιρετικά καλή προσέγγιση στο GMPP. Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης -σύμφωνα με την εξίσωση 5.1- είναι ίση με 99.77%. Επιπλέον, συγκλίνει πολύ γρήγορα στο GMPP και προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-36 εντοπίζει το GMPP μετά από κάθε μεταβολή ακτινοβολίας/θερμοκρασίας. Βασικό μειονέκτημα της τεχνικής DIRECT είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα υλοποίησης της. Τέλος, και αυτός ο αλγόριθμος χρειάζεται επανεκκίνηση σε απότομες αλλαγές ακτινοβολίας/θερμοκρασίας έτσι ώστε να μπορέσει να εντοπίσει το νέο GMPP.

5.13 Συγκεντρωτική αξιολόγηση μεθόδων MPPT

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

$$n = \frac{P_{out_simulation}}{P_{out_theoretical}} \times 100\% \quad (5.1)$$

όπου:

n τιμή απόδοσης για ένα σετ μέτρησης κάθε τεχνικής.

$P_{out_simulation}$ τιμή ισχύος προσομοίωσης στο τελικό σημείο σύγκλισης (W).

$P_{out_theoretical}$ θεωρητική τιμή ισχύος ολικό MPP (W).

Αρχικά, υπολογίζεται η απόδοση του κάθε αλγορίθμου για κάθε σετ μέτρησης ξεχωριστά και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή όλων των αποδόσεων. Τέλος, υπολογίζεται και η μέση τιμή του χρόνου στο σημείο σύγκλισης για κάθε έναν αλγόριθμο και τα αποτελέσματα καταγράφονται μαζί με την πολυπλοκότητα υλοποίησης τους σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.

Πίνακας 5-11. Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης μεθόδων MPPT				
Τεχνική MPPT	Μέση τιμή βαθμού απόδοσης (%)	Μέση τιμή χρόνου στο σημείο σύγκλισης (s)	Πολυπλοκότητα υλοποίησης	Κατάλληλη για Μερική Σκίαση
P&O	99.99	0.44	Χαμηλή	Όχι
INCOND	99.99	0.46	Μέτρια	Όχι
VSS P&O	99.99	0.112	Μέτρια	Όχι
VSS INCOND	99.99	0.115	Μέτρια	Όχι
GSS	95	0.035	Μέτρια	Ναι
RS	97.8	0.265	Μέτρια	Ναι
VW	94.98	0.075	Χαμηλή	Ναι
VW P&O	97.48	0.075	Χαμηλή	Ναι
CS	98.9	0.26	Υψηλή	Ναι
DIRECT	99.77	0.19	Υψηλή	Ναι

Συνοψίζοντας, οι συμβατικές τεχνικές συνθηκών ομοιόμορφης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι εξαιρετικά αποδοτικές. Οι αλγόριθμοι P&O και INCOND είναι πιο απλοί στην υλοποίηση σε σχέση με τις παραλλαγές τους με μεταβλητό βήμα, αλλά ταυτόχρονα πιο αργοί όσον αφορά τη σύγκλιση στο MPP. Τέλος, μπορούν και προσαρμόζονται σε απότομες αλλαγές ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας αλλά καμία από τις δεν είναι ικανή στο να εντοπίσει το GMPP σε συνθήκες μερικής σκίασης.

Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τις τεχνικές MPPT συνθηκών μερικής σκίασης, αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία τοποθετούνται οι αλγόριθμοι VW και VW P&O, οι οποίοι είναι απλοί στην υλοποίηση του - έχουν δηλαδή χαμηλή πολυπλοκότητα, εντοπίζουν εξαιρετικά γρήγορα το ολικό μέγιστο, έχουν σχετικά καλή απόδοση και χρειάζονται επανεκκίνηση για τον εντοπισμού του νέου GMPP κατά την απότομη αλλαγή ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι GSS και

RS, οι οποίοι έχουν μέτρια πολυπλοκότητα, εντοπίζουν αρκετά γρήγορα το GMPP και έχουν καλή απόδοση. Ο GSS, σε αντίθεση με τον RS, δεν χρειάζεται επανεκκίνηση για τον εντοπισμού του νέου GMPP κατά την απότομη αλλαγή ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας. Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές CS και DIRECT. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν εξαιρετικά καλή προσέγγιση στο GMPP κάτι που τους καθιστά πολύ αποδοτικούς. Ωστόσο, η μεγάλη πολυπλοκότητα υλοποίησης τους, συνεπάγεται αργή σύγκλιση στο GMPP. Τέλος, χρειάζονται και εκείνοι επανεκκίνηση για τον εντοπισμού του νέου GMPP κατά την απότομη αλλαγή ακτινοβολίας/ θερμοκρασίας

6.

Συμπεράσματα

6.1 Ανασκόπηση της εργασίας και επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για ένα υπό μελέτη Φ/Β σύστημα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν συγκριτική αξιολόγηση εννέα εναλλακτικών αλγορίθμων MPPT. Οι τεχνικές συγκρίθηκαν ως προς την απόδοση τους (απόκλιση από το θεωρητικό MPP), την πολυπλοκότητα υλοποίησης τους και τον χρόνο σύγκλισης στο MPP.

Για την επιλογή, ενός αλγορίθμου σε μια υπό μελέτη εγκατάσταση Φ/Β συστήματος, συνυπολογίζονται πολλοί παράγοντες. Για παράδειγμα, σημαντικό ρόλο παίζει η τοποθεσία, αν δηλαδή ο χώρος εγκατάστασης είναι ανοιχτός με αρκετό ήλιο και λίγες σκιάσεις μικρής μεταβολής, ή αν το Φ/Β πρόκειται να τοποθετηθεί σε οροφή με αρκετές ηλιόλουστες ημέρες αλλά ταυτόχρονα με πολλές σκιάσεις διαφόρων τύπων, ή ακόμα και αν η περιοχή εγκατάστασης έχει πολλά σύννεφα και δυνατούς ανέμους. Επιπροσθέτως, βασικό ρόλο παίζει και το κόστος εγκατάστασης.

Επομένως, αναλύοντας όλα τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από όλες τις δοκιμές και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταλήγουμε στις εξής επιλογές αλγορίθμων MPPT:

- Για ένα Φ/Β σύστημα που πρόκειται να εγκατασταθεί σε ανοιχτό χώρο με πάρα πολλές ηλιόλουστες ημέρες, με ελάχιστες σκιάσεις και συχνές (ή μη) αλλαγές στην ακτινοβολία και την θερμοκρασία, έχοντας ως κριτήριο:
 - Την καλύτερη απόδοση, θα επιλέγαμε την τεχνική VSS P&O ή VSS INCOND.
 - Την ταχύτητα σύγκλισης στο MPP, θα επιλέγαμε την τεχνική VSS P&O.
 - Το χαμηλό κόστος ή αλλιώς την μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, θα επιλέγαμε την τεχνική P&O.
- Για ένα Φ/Β σύστημα που πρόκειται να εγκατασταθεί σε ανοιχτό χώρο με λίγες ηλιόλουστες ημέρες, με πολλές σκιάσεις και συχνές (ή μη) αλλαγές στην ακτινοβολία και την θερμοκρασία, έχοντας ως κριτήριο:
 - Την καλύτερη απόδοση, θα επιλέγαμε την τεχνική DIRECT.
 - Την ταχύτητα σύγκλισης στο MPP, θα επιλέγαμε την τεχνική GSS.
 - Το χαμηλό κόστος ή αλλιώς την μικρότερη πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, θα επιλέγαμε την τεχνική VW ή VW P&O.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζει αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον. Πραγματεύεται ζητήματα που παρέχουν τη δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης ώστε να βελτιστοποιηθεί ο έλεγχος των Φ/Β συστημάτων σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας και μερικής σκίασης. Το σημαντικότερο επόμενο βήμα για την επέκταση της

εργασίας είναι η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων σε πραγματικές συνθήκες.

Για το σκοπό αυτό, αναγκαία είναι η ύπαρξη ενός πραγματικού Φ/Β συστήματος, μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και ενός μικροεπεξεργαστή/ μικροελεγκτή στον οποίο θα υλοποιείται ο εκάστοτε αλγόριθμος MPPT, καθώς και κάποιο ηλεκτρικό φορτίο (πχ. μία συστοιχία μπαταριών για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας). Η διασταύρωση την αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των πειραμάτων, θα δώσει μια πιο σφαιρική εικόνα της συγκριτικής αξιολόγησης των τεχνικών MPPT που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

7.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Χατζής, “Το Ενεργειακό Πρόβλημα και η Λύση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – Παράδειγμα Δημιουργίας Φωτοβολταϊκού Πάρκου 100 kW στο Αεροδρόμιο της Ν. Αγχιάλου”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2008.
- [2] www.ypeka.gr.
- [3] Jo Abbess, “Renewable Gas, The Transition to Low Carbon Energy Fuels”, pp. 45-75, Palgrave Macmillan UK, ISBN 978-1-137-44180-5.
- [4] I. K. Roberson, Mott MacDonald, and I. A. Lamont, Mott Macdonald Ltd, “An Overview of Nuclear Power”, 5th International Youth Conference on Energy (IYCE), Pisa, 2015
- [5] Guarnieri, M., “More light on information”, IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, no. 4, pp. 58-61, 2015.
- [6] “April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell”, APS News, American Physical Society, vol. 18, no. 9, 2009.
- [7] Tsokos K. A., “Physics for the IB Diploma”, ISBN: 9781107628199, Cambridge University Press, 2014.

- [8] Κ. Καλομοίρης. “Σύγκριση αλγορίθμων MPPT για φωτοβολταϊκά συστήματα σε συνθήκες μερικής σκίασης”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2017.
- [9] Δ. Ροδόπουλος. “Μελέτη Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης Ισχύος 100 kW”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [10] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, “A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions”, IEEE J. Photovoltaics, vol. 2, pp. 184-190, 2012.
- [11] M. C. Alonso-Garcia and J. M. Ruiz, “Analysis and modeling the reverse characteristic of photovoltaic cells”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 90, pp. 1105-1120, 2006.
- [12] The German Energy Society, “Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers”, 2nd ed., ISBN-13:978-1-84407-442-6, London, 2008.
- [13] S. Palanidos, V. Theja V. S. “Experimental Analysis of Conventional Buck and Boost Converter with Integrated Dual Output Converter”, 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECOT), Mysuru, 2017.
- [14] Trishan Eswam and Patrick L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Technique”, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, June 2007.
- [15] F. A. Aashoor, F. P. V. Robinshon, “A Variable step size Perturb and Observe Algorithm for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking”, 47th International Universities Power Engineering Conference, London, 2012.
- [16] P. Anish, D. Nivedita, K. M. Ashok, “High Performance Algorithms for Drift Avoidance and Fast Tracking in Solar MPPT Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, 2008, pp. 681-689.

- [17] B. R. Peng, J.H Chen, Y.H Liu, Y. H. Chiu, “Comparison Between Three Different Types of Variable Step Size P&O MPPT Technique”, International Conference on Computer Information Systems and Industrial Application, CISIA, 2015.
- [18] N. H. Abdul Rahman, A. M. Omar, E. H. Omar E. H. Mat Saat, “A Modification of Variable Step Size INC MPPT in PV System”, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, Malaysia, 2013.
- [19] Jaya Agrawal, Mohan Aware, “Golden Section Search Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System”, 5th India IICPE, Delhi, 2012.
- [20] Kinattingal Sundareswaran, Sankar Peddapati, S. Palani, “Application of random search method for maximum power point tracking in partial shaded photovoltaic systems”, IET Renewable Power Generation, vol. 8, no. 10, pp. 670-678, Dec. 2013.
- [21] Mutlu Boztepe, Francesc Guinjoan, Guillermo Velasco-Quesada, Santiago Silvestre, Aissa Chouder and Engin Karatepe, “Global MPPT Scheme for Photovoltaic String Inverters Based on Restricted Voltage Window Search Algorithm”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, pp. 182-190, July 2014.
- [22] Jubaer Ahmed, Zainal Salam, “A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability”, Applied Energy, vol. 119, pp. 118-130, 2014.
- [23] Asmi Assis, Shinosh Mathew, “CUCKOO SEARCH ALGORITHM BASED MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR SOLAR PV SYSTEMS”, Amal Juothi College of Engineering, ISSN: 2395-6151, vol. 2, India, 2016.
- [24] Texas Instruments, “Basic Calculation of a Buck Converter’s Power Stage”, Application Report, SLVA477B, Dec. 2011, Revised Aug. 2015.

- [25] Tat Luat Nguyen, Kay-Soon Low, “A Global Maximum Power Point Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3456-3467, 2010.