



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

**Διπλωματική Εργασία**

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΑ**  
**ΑΝΑΔΙΑΤΑΣΣΟΜΕΝΩΝ**  
**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ**  
**ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**Ισκής Νικόλαος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος**

**Καθηγητής Δόλλας Απόστολος**

**Χανιά Σεπτέμβριος 2019**

# Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση δυναμικά αναδιατασσόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του.

Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωσταντίνο και τον Καθηγητή κ. Δόλλα Απόστολο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

# Περίληψη

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα συχνά αντιμετωπίζουν φαινόμενα μερικής σκίασης, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή τους. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση δυναμικά αναδιατασσόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Η διαφορά από τις παραδοσιακές φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι η χρήση διακοπών, με τους οποίους επιτυγχάνεται η αναδιάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Τα σήματα ελέγχου των διακοπών παρέχονται από τους αλγορίθμους αναδιάταξης που χρησιμοποιούνται.

Αρχικά παρουσιάζεται η επίδραση της μερικής σκίασης στην απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Στη συνέχεια αναλύονται τρεις εναλλακτικοί αλγόριθμοι αναδιάταξης και εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας τους. Εισάγεται επίσης η έννοια και η χρησιμότητα του εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο ρόλο του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck ή Step Down Converter). Χρησιμοποιώντας μια μονάδα ελέγχου MPPT και έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας και παρέχεται στο φορτίο η μέγιστη ισχύς. Για σύγκριση της απόδοσης των αναδιατασσόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών με συμβατικές διατάξεις, αναλύεται επίσης η μέθοδος Module-Integrated Converter, η οποία χρησιμοποιεί μια μονάδα ελέγχου MPPT και έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τέλος προσομοιώνεται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό διαφορετικές συνθήκες μερικής σκίασης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μεθόδων.

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>7</b>
1.1 Γενικά .....	7
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	8
1.4 Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας .....	9
1.5 Δομή της εργασίας .....	12
<b>2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....</b>	<b>14</b>
2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	14
2.2 Διάταξη φωτοβολταϊκών συστοιχιών .....	16
2.3 Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης .....	20
2.4 Βέλτιστο σημείο λειτουργίας MPP .....	21
2.5 Μερική Σκίαση .....	23
2.6 Μονάδα ελέγχου MPPT .....	26
2.7 Μετατροπείας ισχύος .....	27
<b>3. Μέθοδοι αναδιάταξης φωτοβολταϊκών συστοιχιών .....</b>	<b>30</b>
3.1 Αλγόριθμοι αναδιάταξης .....	32
3.1.1 Αλγόριθμος MPP Candidates .....	32
3.1.2 Αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας .....	38
3.1.3 Αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού .....	42
3.2 Αλγόριθμοι εντοπισμού MPP .....	45
3.2.1 Αλγόριθμος MPPT Perturb and Observe .....	46
3.2.2 Αλγόριθμος MPPT Voltage Window .....	49
3.3 Module-Integrated Converter .....	53
<b>4. Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού συστήματος σε MATLAB/Simulink .....</b>	<b>55</b>
4.1 Υλοποίηση του μοντέλου του φωτοβολταϊκού συστήματος σε Simulink .....	56
4.2 Μετατροπείας DC/DC υποβιβασμού τάσης .....	64
4.4 Μονάδα ελέγχου MPPT .....	66
4.6 Έλεγχος ορθής λειτουργίας μετατροπείας ισχύος και μονάδας ελέγχου MPPT με τη μέθοδο P&O. ....	68
4.7 Έλεγχος ορθής λειτουργίας μετατροπείας ισχύος και μονάδας ελέγχου MPPT με τη μέθοδο VW. ....	72
<b>5. Αποτελέσματα .....</b>	<b>74</b>

5.1	Αλγόριθμος MPP Candidates .....	75
5.1.1	Δύο πλαίσιοσειρές με δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια η κάθε μία .....	75
5.1.2	Δύο πλαίσιοσειρές με έξι φωτοβολταϊκά πλαίσια η κάθε μία .....	81
5.2	Αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας .....	87
5.2.1	Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 18 φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	87
5.2.2	Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 36 φωτοβολταϊκά πλαίσια: 1 <sup>η</sup> περίπτωση .....	91
5.2.3	Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 36 φωτοβολταϊκά πλαίσια: 2 <sup>η</sup> περίπτωση .....	95
5.2.4	Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 16 reconfigurable φωτοβολταϊκά πλαίσια .....	98
5.3	Αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού.....	101
5.4	Σύγκριση των εναλλακτικών μεθόδων .....	105
5.4.1	Σενάριο πρώτο .....	106
5.4.2	Σενάριο δεύτερο .....	109
5.4.3	Σενάριο τρίτο .....	112
<b>6.</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>115</b>
<b>7.</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>119</b>

## Κατάλογος Συμβόλων

$I$	Ένταση του ρεύματος (A)
$V$	Τάση (V)
$P$	Ισχύς (W)
$G$	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ( $\text{W/m}^2$ )
$\Phi/B$	Φωτοβολταϊκό
PV	Φωτοβολταϊκό
SC	Βραχυκύκλωση (Short Circuit)
$I_{sc}$	Ρεύμα βραχυκύκλωσης
OC	Ανοικτοκύκλωση (Open Circuit)
$V_{oc}$	Τάση ανοικτοκύκλωσης
MPPT	Εντοπισμός σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking)
MPP	Σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point)
LMPP	Τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος (Local Maximum Power Point)
GMPP	Ολικό σημείο μέγιστης ισχύος (Global Maximum Power Point)
$I_{mpp}$	Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος
$V_{mpp}$	Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος
$P_{mpp}$	Ισχύς στο σημείο μέγιστης ισχύος
$V_d$	Τάση διόδου του μετατροπέα ισχύος
$I_L$	Ρεύμα πηνίου του μετατροπέα ισχύος
$D$	Duty cycle του μετατροπέα ισχύος
PWM	Pulse Width Modulation
P&O	Perturb and Observe
VW	Voltage Window
LSC	Luminescent Solar Concentrator

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Γενικά

Η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται. Η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί δραματικά. Η αέναη εξέλιξη της τεχνολογίας και η χρήση των νέων τεχνολογιών στην καθημερινότητα των ανθρώπων επηρεάζουν το πρόβλημα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Για αρκετά χρόνια την ανάγκη αυτή προσπαθούσαν να καλύψουν οι συμβατικές πηγές που βασίζονται σε υγρά, στερεά ή αέρια καύσιμα όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Ωστόσο λόγω της συρρίκνωσης των συμβατικών πόρων αλλά και τη μόλυνση που προκαλούν στο περιβάλλον, έχει προκύψει η ανάγκη για την αξιοποίηση άλλων μορφών ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια η παραγωγή ενέργειας έχει στραφεί στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται αυτές που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες όπως ο ήλιος, ο αέρας και το νερό και δεν προκαλούν φθορές στο περιβάλλον. Άλλες ονομασίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ήπιες μορφές ενέργειας και πράσινη ενέργεια. Ονομάζονται ανανεώσιμες καθώς υπάρχουν σε αφθονία στο περιβάλλον και δεν στερεύουν ποτέ.

Αρκετές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν αρχίσει εδώ και χρόνια να ενσωματώνουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο δίκτυο παραγωγής ενέργειας τους. Το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατέχει η Αυστρία με 73 %, ενώ την ακολουθεί η Σουηδία με 65 % και η Λετονία με την Πορτογαλία με 54 %. Στην Ελλάδα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανέρχεται στο 24 % της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μέσος όρος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι 30 %. [1].

## 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι αξιοποίησης των φυσικών πόρων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Αιολική Ενέργεια.** Χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες για να μετατρέψουν κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.
- **Ηλιακή Ενέργεια.** Χρησιμοποιείται για θερμικές εφαρμογές αλλά και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα ή ηλεκτρική ενέργεια.
- **Γεωθερμία.** Χρησιμοποιεί τη θερμική ενέργεια της Γης. Καλύπτει κυρίως τις ανάγκες για θέρμανση αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Βιομάζα.** Χρησιμοποιεί απόβλητα από τη γεωργία, τη βιομηχανία και τις πόλεις.
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια.** Μετατρέπει τη ροή των υδάτων σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Πυρηνική Ενέργεια.** Είναι η ενέργεια που υπάρχει στον πυρήνα του ατόμου και απελευθερώνεται με τη σχάση ή τη σύντηξη.

- **Ενέργεια από τα κύματα.** Χρησιμοποιείται η ενέργεια από τα κύματα και τις παλίρροιες. Μετατρέπει την κινητική ενέργεια των κυμάτων σε ηλεκτρική.

Όλες οι παραπάνω κατηγορίες αξιοποιούν αποκλειστικά φυσικούς πόρους για την παραγωγή ενέργειας και δεν βασίζονται στον ορυκτό πλούτο. Αποτελούν μια λύση, φιλική προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, στο πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα παρακάτω:

- Είναι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλουν στην εξοικονόμηση των ορυκτών πόρων οι οποίοι εξαντλούνται.
- Δεν παράγουν απόβλητα και είναι φιλικές προς το περιβάλλον.
- Έχουν τις περισσότερες φορές χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης.
- Βοηθούν την ενεργειακή ανεξαρτησία μικρών χωρών.

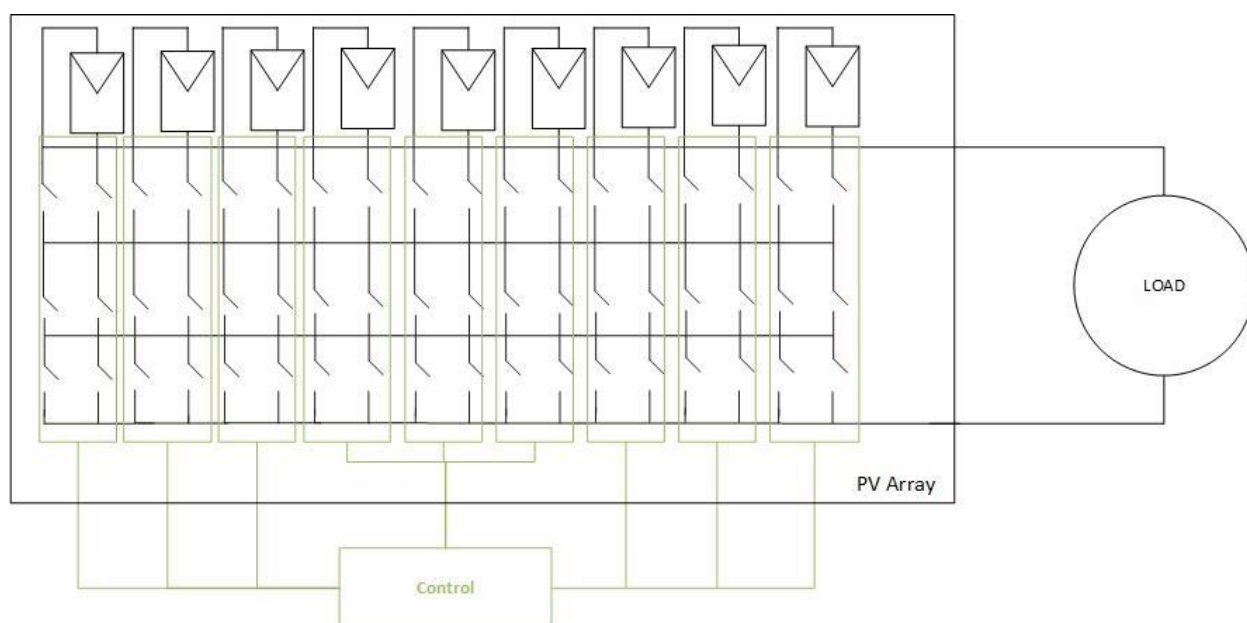
Παρά τα πλεονεκτήματά τους, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Λόγω της εξάρτησής τους από το περιβάλλον, παρουσιάζουν αρκετές φορές διακυμάνσεις στην απόδοσή τους και
- Έχουν αρκετά υψηλό κόστος εγκατάστασης.

## 1.4 Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες έρχονται συχνά αντιμέτωπες με φαινόμενα μερικής ή ολικής σκίασης. Οι συνθήκες αυτές μπορεί να προκληθούν από δέντρα, κτήρια, σύννεφα ή οτιδήποτε άλλο μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο και να προκαλέσει σκίαση. Το πρόβλημα αυτό επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναδιάταξη των φωτοβολταϊκών συστοιχιών για καλύτερη αξιοποίησή τους υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διακόπτες που αναδιατάσσουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας μεταβάλλοντας τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις μεταξύ τους. Μελετήθηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι υπολογίζουν τη βέλτιστη αναδιάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων μίας συστοιχίας και παράγουν τα σήματα ελέγχου των διακοπών αναδιάταξης.

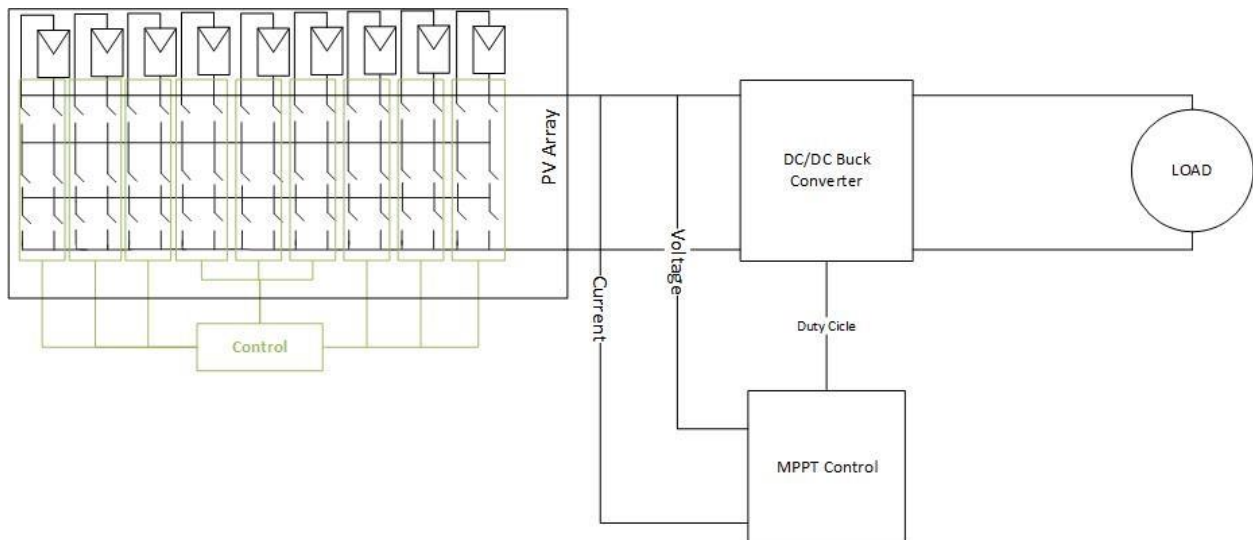


*Σχήμα 1.1: Υλοποίηση αναδιατασσόμενης φωτοβολταϊκής συστοιχίας με δυνατότητα αναδιάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που περιέχει.*

Στο Σχήμα (1.1) παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας με εννιά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η συστοιχία αυτή τροφοδοτεί ένα DC φορτίο. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει συνδεθεί με έξι διακόπτες, τρία ζευγάρια διακοπών για κάθε πλαισιοσειρά. Οι διακόπτες χρησιμοποιούνται σε ζευγάρια, ένας για το θετικό άκρο και ένας για το αρνητικό. Ανάλογα με την εκάστοτε αναδιάταξη που θα υπολογίσει ο αλγόριθμος, προκύπτουν και τα

σήματα ελέγχου των διακοπών και συνδέονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε πλαισιοσειρά. Μια πλαισιοσειρά αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στο σχήμα (1.1) παρουσιάζεται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία που αποτελείται από τρεις πλαισιοσειρές, επομένως τα εννιά φωτοβολταϊκά πλαίσια μοιράζονται σε αυτές.

Για να παρέχεται συνεχώς η μέγιστη δυνατή ισχύς στο φορτίο πρέπει να ανιχνευθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Για αυτό το λόγο συνδέεται στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (DC/DC Buck Converter). Το σήμα ελέγχου του μετατροπέα προέρχεται από την μονάδα ελέγχου MPPT, όπως φαίνεται στο σχήμα (1.2).



Σχήμα 1.2: Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο με ένα φορτίο .

Στο σχήμα (1.2) απεικονίζεται το γενικό διάγραμμα του φωτοβολταϊκού συστήματος με την προσθήκη του μετατροπέα ισχύος και την μονάδας ελέγχου MPPT. Η μονάδα ελέγχου MPPT εφαρμόζει έναν αλγόριθμο εύρεσης σημείου MPP. Δέχεται συνεχώς ως είσοδο την τάση και το ρεύμα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Με τα δεδομένα αυτά η μονάδα ελέγχου εντοπίζει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας και παράγει στην έξοδό της το απαιτούμενο Duty Cycle του μετατροπέα ισχύος. Αυτό είναι το σήμα ελέγχου του μετατροπέα. Η έξοδος του μετατροπέα ισχύος τροφοδοτεί ένα DC φορτίο. Το σημείο βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι ο συνδυασμός ρεύματος-τάσης που δίνει τη μέγιστη ισχύ.

## 1.5 Δομή της εργασίας

- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παρουσιάζεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας και πως επηρεάζονται από τη μερική σκίαση. Επιπλέον γίνεται εκτενής ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και της μονάδας ελέγχου MPPT.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρεις μέθοδοι αναδιάταξης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους και οι πληροφορίες που χρειάζονται ως είσοδο για να καταλήξουν στη βέλτιστη αναδιάταξη. Παρουσιάζονται επίσης οι δύο αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν από τη μονάδα ελέγχου MPPT για τον εντοπισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του μοντέλου του αναδιατασσόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος σε MATLAB & Simulink. Περιγράφεται ξεχωριστά το κάθε τμήμα του Simulink που χρησιμοποιήθηκε και το πως συνδυάστηκαν όλα μαζί ώστε να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα. Πραγματοποιούνται επίσης κάποιες δοκιμές για να αποδειχθεί η ορθή λειτουργία του μετατροπέα ισχύος και της μονάδας ελέγχου MPPT.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται χρήση των αλγορίθμων σε περιβάλλον Simulink. Αρχικά εφαρμόζεται ο κάθε αλγόριθμος ξεχωριστά σε κάποιες υλοποιήσεις για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του καθενός και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση μεταξύ τους σε τρία διαφορετικά σενάρια μερικής σκίασης της ίδιας υλοποίησης. Για σύγκριση της απόδοσης των αναδιατασσόμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων με συμβατικές φωτοβολταϊκές διατάξεις, χρησιμοποιείται επίσης η διάταξη Module-Integrated Converter.
- Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.



# 2.

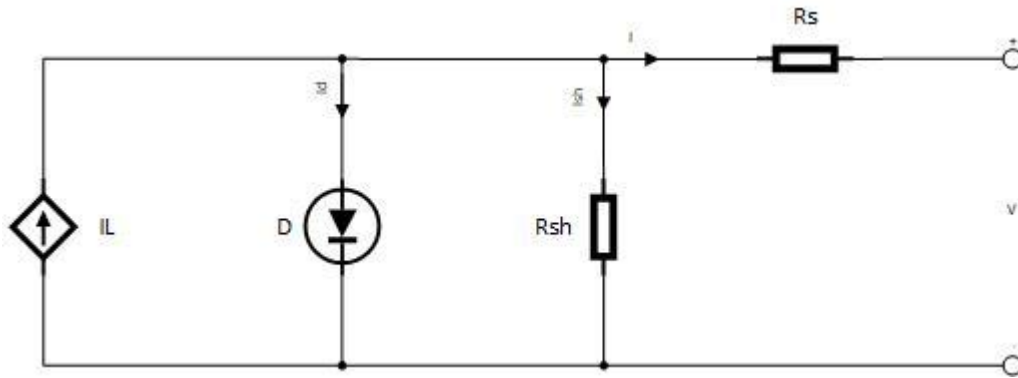
## Φωτοβολταϊκά Συστήματα

---

### 2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Ως φωτοβολταϊκό στοιχείο (solar cell) ή φωτοβολταϊκή κυψέλη ορίζεται η συσκευή που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Το βασικό συστατικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι κάποιος ημιαγωγός. Ο πιο συνηθισμένος ημιαγωγός που χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι το πυρίτιο.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μια πηγή ρεύματος, η οποία συνδέεται με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια οι δύο αντιστάσεις αποτελούν το μη ιδανικό μέρος του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το μέρος αυτό αποτελείται από μια αντίσταση απωλειών ρεύματος διαρροής ( $R_{sh}$ ) και την αντίσταση απωλειών από τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου ( $R_s$ ). Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα (2.1).



Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου.

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει το ισοδύναμο κύκλωμα είναι η Σχέση (2.1):

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

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

όπου:

$I_{ph}$  Η ένταση της πηγής ρεύματος (A)

$I_d$  Το ρεύμα της διόδου (A)

$n$  Συντελεστής της διόδου

$k$  Σταθερά Boltzmann ( $1.38065 \times 10^{-23}$  J/K)

$q$  Φορτίο ηλεκτρονίου ( $1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

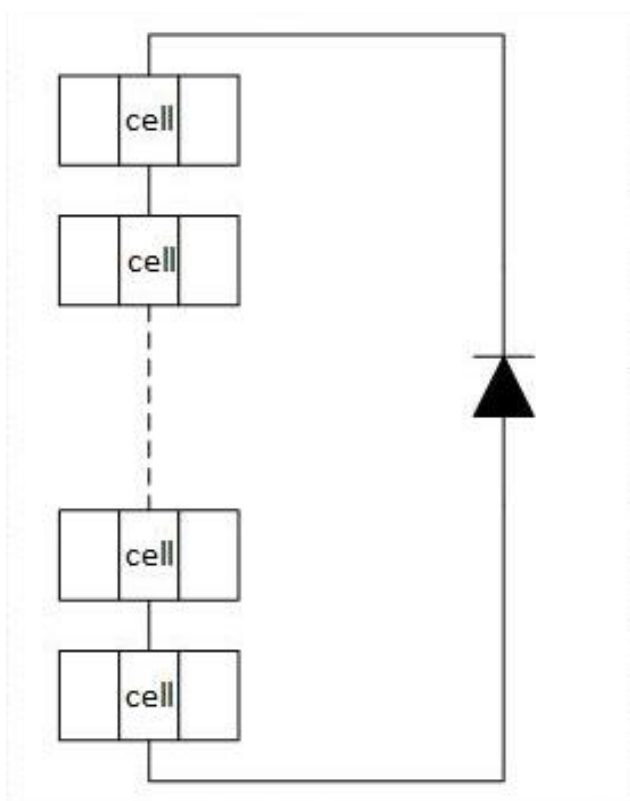
$T_c$  Θερμοκρασία κυψέλης (K)

Η τιμή της έντασης του ρεύματος της πηγής, εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

## 2.2 Διάταξη φωτοβολταϊκών συστοιχιών

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, λόγω της μικρής απόδοσής του, παράγει μικρή διαφορά δυναμικού στην έξοδό του. Για να είναι ικανό να τροφοδοτήσει ένα φορτίο, πρέπει να συνδεθούν πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά και παράλληλα, δημιουργώντας έτσι νέες διατάξεις.

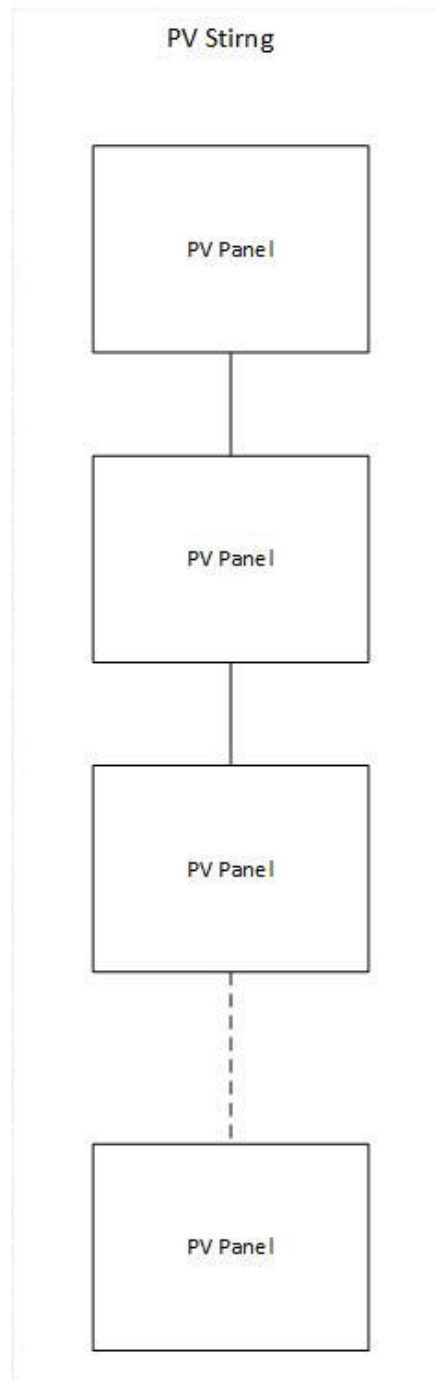
Αρχικά συνδέονται πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά. Η σύνδεση αυτή δημιουργεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV panel).



Σχήμα 2.2: Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

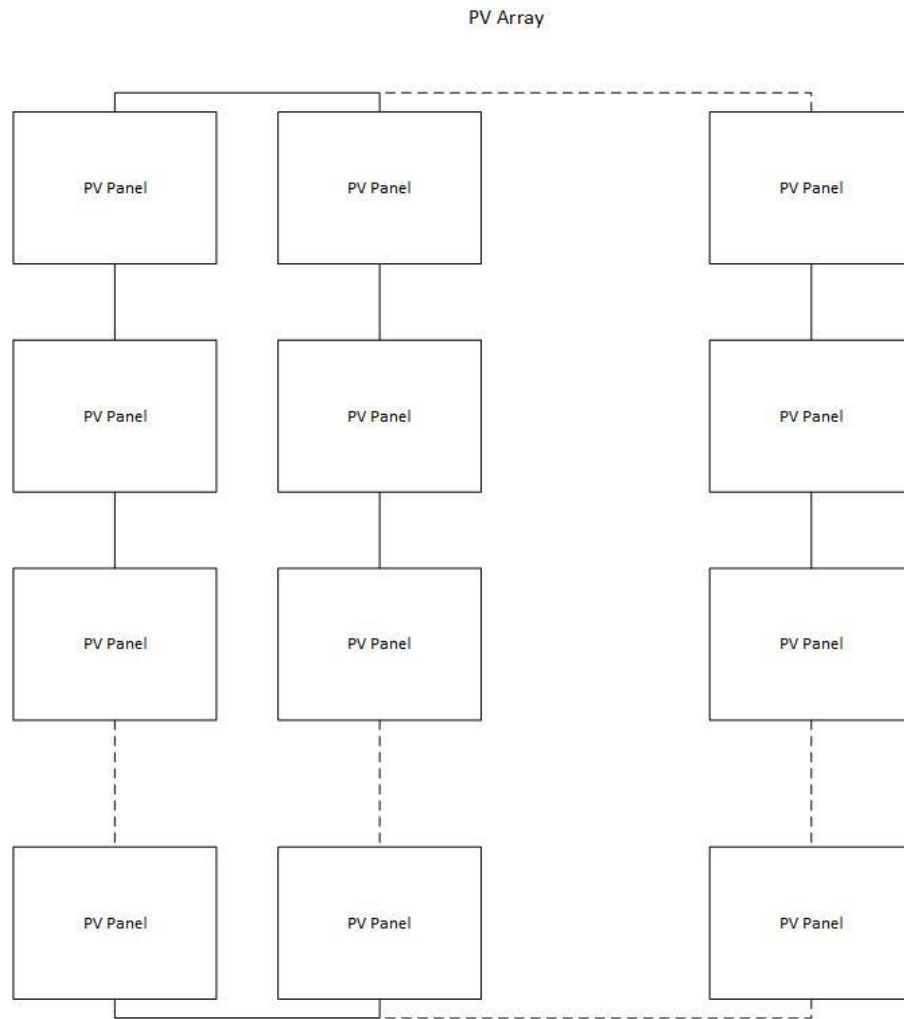
Στο σχήμα (2.2) φαίνεται η σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά. Παράλληλα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέεται μια δίοδος διαφυγής για λόγους προστασίας. Το ρεύμα που διαρρέει τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι το ίδιο και η τάση στην έξοδο του πλαισίου είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων.

Η σύνδεση ενός ή περισσότερων τέτοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά σχηματίζει μια φωτοβολταϊκή πλαισιοσειρά (PV String). Στο σχήμα (2.3) φαίνεται η διάταξη μια φωτοβολταϊκής πλαισιοσειράς.



*Σχήμα 2.3: Μια φωτοβολταϊκή πλαίσιοσειρά.*

Η παράλληλη σύνδεση ενός ή περισσότερων τέτοιων πλαίσιοσειρών δημιουργεί μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV Array), όπως φαίνεται στο Σχήμα (2.4).



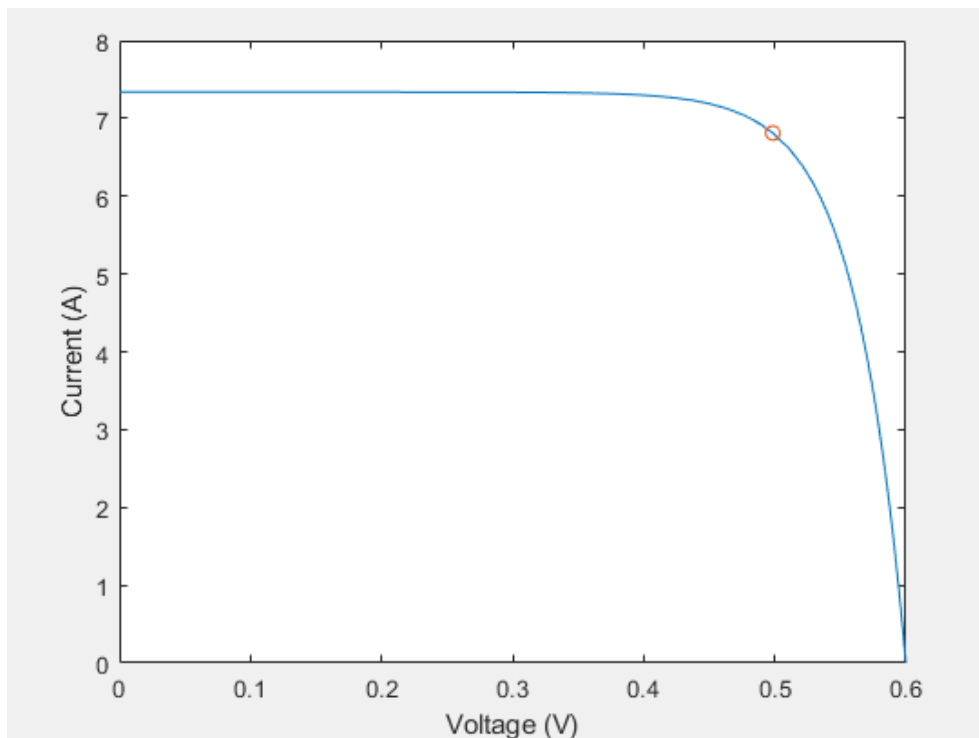
*Σχήμα 2.4: Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία.*

Η ισχύς που παράγεται στην έξοδο μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι ικανή να τροφοδοτήσει ένα φορτίο. Στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μπορεί να συνδεθεί το φορτίο είτε απευθείας είτε μέσω ενός μετατροπέα ισχύος.

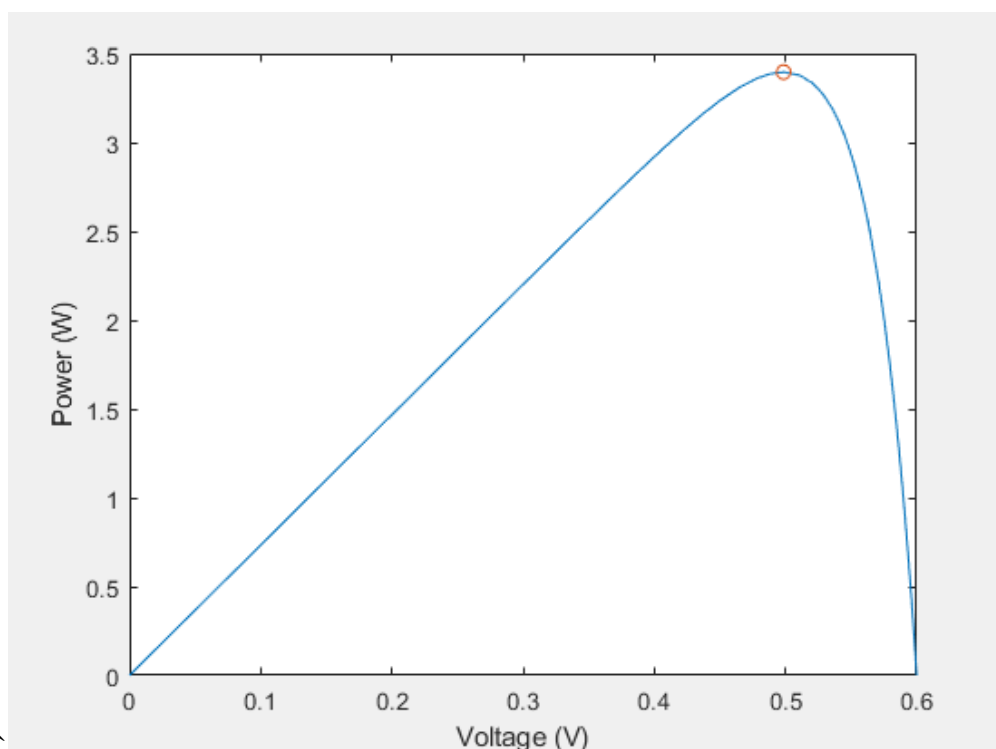
## 2.3 Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια τιμή τάσης ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ) και μια τιμή ρεύματος ανοικτοκύκλωσης ( $I_{sc}$ ). Το ρεύμα εξόδου παίρνει τιμές από 0 έως την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ομοίως και η τάση εξόδου παίρνει τιμές από 0 έως την τιμή της τάσης ανοικτοκύκλωσης.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας. Από το γινόμενο του ρεύματος και της τάσης προκύπτει η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω μπορούν να παραχθούν οι δύο χαρακτηριστικές του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτές είναι η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης (P-V) και ρεύματος-τάσης (I-V).



Σχήμα 2.5: Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ενός Φ/Β στοιχείου.



Σχήμα 2.6: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης ενός  $\Phi/B$  στοιχείου.

Για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με τιμές  $I_{sc}=5.7\text{ A}$  και  $V_{oc}=0.57\text{ V}$ , το οποίο δέχεται προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $1000\text{ W/m}^2$ , οι χαρακτηριστικές που προκύπτουν φαίνονται στο Σχήμα (2.5) και Σχήμα (2.6).

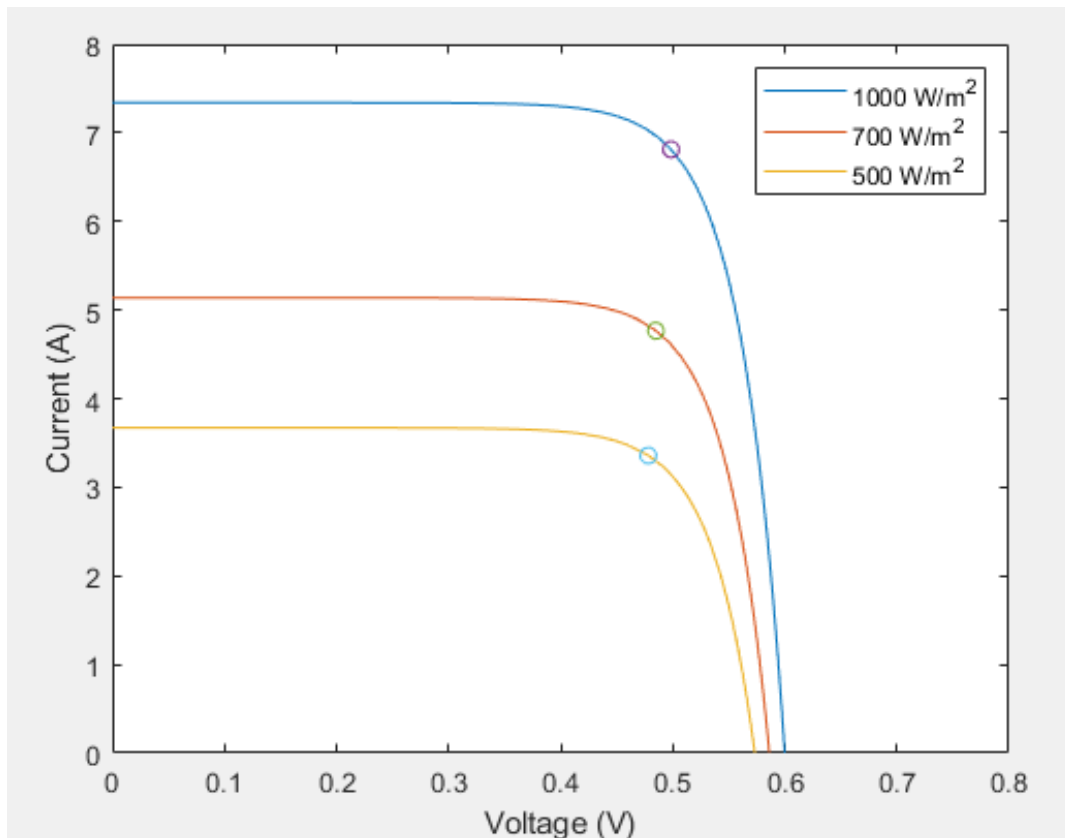
Στην χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του Σχήματος (2.5), η καμπύλη τέμνει τον κάθετο άξονα του ρεύματος στο σημείο του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Επίσης και οι δύο χαρακτηριστικές των παραπάνω σχημάτων, τέμνουν τον οριζόντιο άξονα της τάσης στο σημείο της τάσης ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$ .

## 2.4 Βέλτιστο σημείο λειτουργίας MPP

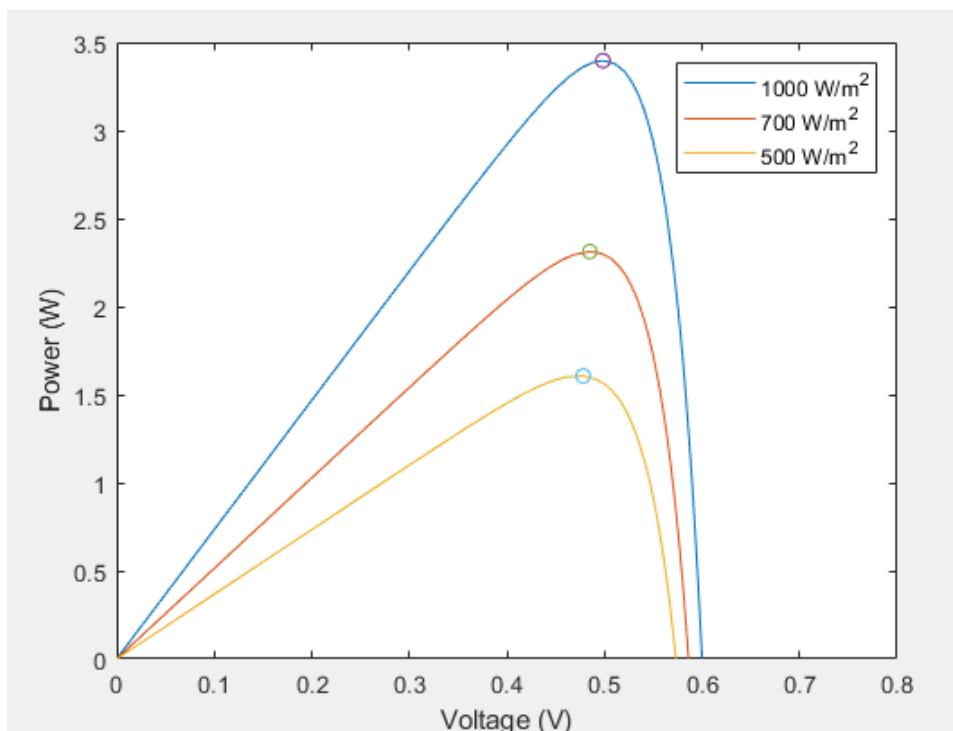
Ως βέλτιστο σημείο λειτουργίας (Maximum Power Point, MPP) του φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται το ζευγάρι ρεύματος-τάσης που παράγει τη μέγιστη ισχύ. Το ρεύμα αυτό συμβολίζεται με  $I_{mpp}$  και η αντίστοιχη τάση με  $V_{mpp}$ . Η παραγόμενη ισχύς στο σημείο αυτό αναφέρεται ως  $P_{mpp}$ .

Στο Σχήμα (2.5) και Σχήμα (2.6) έχει τοποθετηθεί ένα τέτοιο σημείο επάνω στις χαρακτηριστικές. Το ζευγάρι ρεύματος-τάσης που δίνει αυτό το σημείο είναι  $I_{mpp}=5.2883\text{ A}$  και  $V_{mpp}=0.4687\text{ V}$ . Η ισχύς στο σημείο αυτό είναι η μέγιστη και ορίζεται ως το γινόμενο των δύο, επομένως  $P_{mpp} = I_{mpp} \times V_{mpp} = 5.2883\text{ A} \times 0.4687\text{ V} = 2.4787\text{ W}$ .

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τις χαρακτηριστικές του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ανάλογα με την ακτινοβολία που δέχεται το βέλτιστο σημείο λειτουργίας αλλάζει.



Σχήμα 2.7: Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ενός Φ/Β στοιχείου για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.



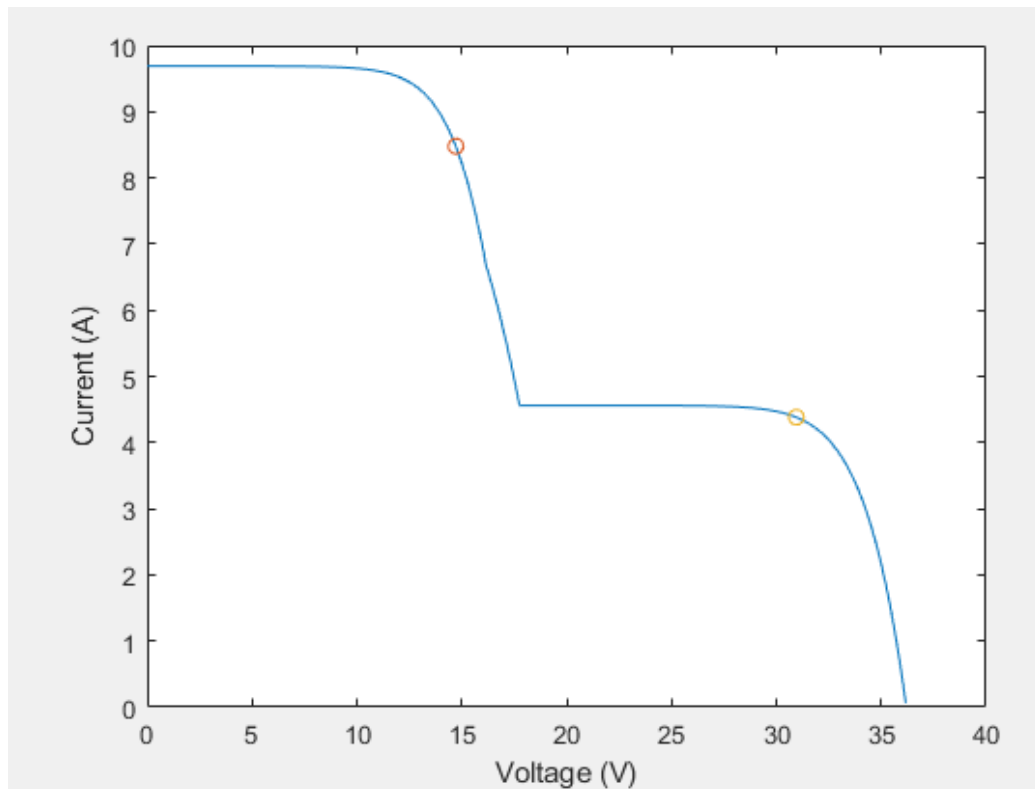
Σχήμα 2.8: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης ενός Φ/Β στοιχείου για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο Σχήμα (2.7) και Σχήμα (2.8) παρουσιάζονται τρεις χαρακτηριστικές του ίδιου φωτοβολταϊκού στοιχείου για τρεις διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Το βέλτιστο σημείο λειτουργίας στις τρεις περιπτώσεις είναι διαφορετικό. Η παραγόμενη ισχύς έχει τη μεγαλύτερη τιμή της όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι  $1000 \text{ W/m}^2$  και τη μικρότερη τιμή για ηλιακή ακτινοβολία  $500 \text{ W/m}^2$ .

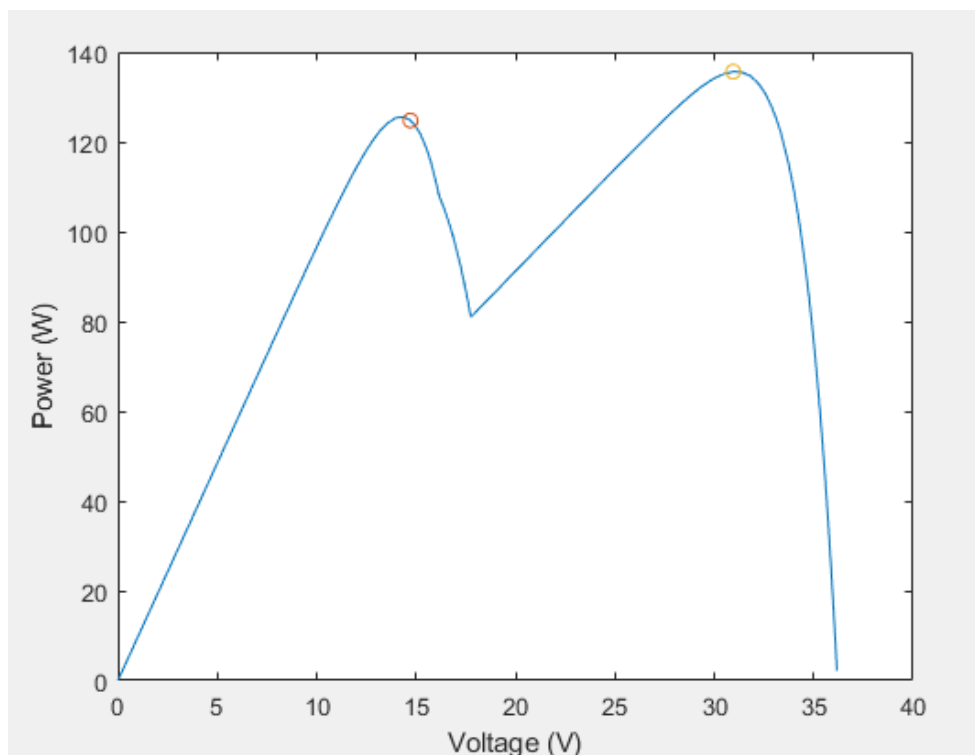
## 2.5 Μερική Σκίαση

Ένα σύνηθες πρόβλημα λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η μερική σκίαση από εμπόδια. Σε αυτή την κατάσταση μερικά φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται διαφορετική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας από τα υπόλοιπα. Η σκίαση μπορεί να προκληθεί από δέντρα, κτήρια, σύννεφα ή οτιδήποτε άλλο μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο.

Η μερική σκίαση σε συνδυασμό με τις διόδους διαφυγής προκαλούν τροποποίηση στις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης. Όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι ομοιόμορφη τότε εμφανίζεται ένα σημείο MPP σε όλη την χαρακτηριστική. Στην περίπτωση της μερικής σκίασης εμφανίζονται τοπικά μέγιστα στις χαρακτηριστικές (Local Maximum Power Points).



Σχήμα 2.9: Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης μιας Φ/Β συστοιχίας υπό συνθήκες μερικής σκίασης.



Σχήμα 2.10: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης μιας Φ/Β συστοιχίας υπό συνθήκες μερικής σκίασης.

Στο Σχήμα (2.9) και Σχήμα (2.10) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης μια φωτοβολταϊκής συστοιχίας που λειτουργεί υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από δύο πλαίσιοσειρές με δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια η κάθε μία. Στην πρώτη τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $1000 \text{ W/m}^2$  το πρώτο και  $300 \text{ W/m}^2$  το δεύτερο. Στη δεύτερη πλαίσιοσειρά  $500 \text{ W/m}^2$  το πρώτο και  $700 \text{ W/m}^2$  το δεύτερο.

Είναι φανερό πως εκτός από το σημείο Global MPP, εμφανίζονται δυο ακόμη σημεία ως τοπικά μέγιστα. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα στον εντοπισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας από την μονάδα ελέγχου MPPT, καθώς μπορεί να εγκλωβιστεί σε ένα τοπικό μέγιστο και να αδυνατεί να βρει το ολικό μέγιστο.

## 2.6 Μονάδα ελέγχου MPPT

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιείται μια μονάδα ελέγχου MPPT με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας όπου παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς. Το σημείο αυτό εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 2.11: Μονάδα ελέγχου MPPT.

Στο Σχήμα (2.11) παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα της μονάδας ελέγχου. Δέχεται συνεχώς ως είσοδο το ρεύμα και την τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου ή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και παράγει στην έξοδο ένα σήμα Duty Cycle. Το σήμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως σήμα ελέγχου του μετατροπέα ισχύος.

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που υλοποιούν το MPPT. Οι περισσότεροι από αυτούς λειτουργούν αποδοτικά υπό συνθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης έχουν ένα σημείο μέγιστης ισχύος. Όμως, αν υπάρχουν τοπικά μέγιστα δεν μπορούν να εφαρμοστούν, καθώς εγκλωβίζονται σε ένα από αυτά. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικοί αλγόριθμοι που μπορούν να εντοπίζουν το ολικό μέγιστο και λειτουργούν με επιτυχία και σε συνθήκες μερικής σκίασης.

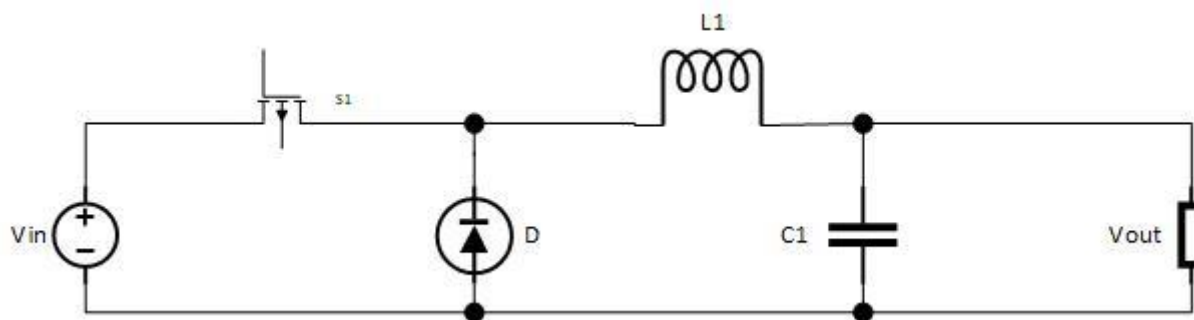
Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Perturb & Observe (P&O) για συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας και ο αλγόριθμος Voltage Window (VW) για συνθήκες μερικής σκίασης, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

## 2.7 Μετατροπέας ισχύος

Ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος DC/DC σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση DC που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Υπάρχουν τρεις τύποι μετατροπέων ισχύος DC/DC [10]:

- Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (DC/DC Boost Converter).
- Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (DC/DC Buck Converter).
- Μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης συνεχούς τάσης (DC/DC Buck-Boost Converter).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck Converter) για τη διασύνδεση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το τροφοδοτούμενο φορτίο.



Σχήμα 2.12: Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης DC/DC.

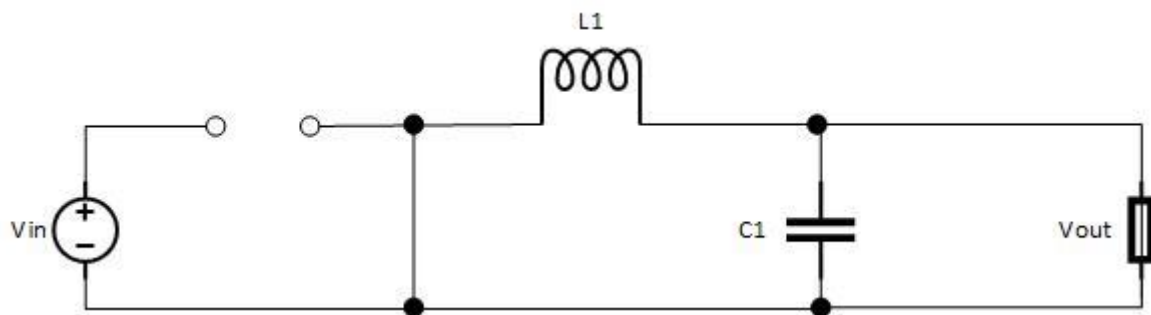
Ο μετατροπέας δέχεται ως είσοδο μια τάση  $V_{in}$  και παράγει στην έξοδο μια τάση  $V_{out}$  με μικρότερο πλάτος. Ως κύκλος λειτουργίας του διακόπτη (D) ορίζεται το πηλίκο του χρόνου  $T_{on}$  κατά τη διάρκεια του οποίου ο διακόπτης άγει, προς το συνολικό  $T$  της περιόδου λειτουργίας. Το  $D$  δίνεται από τη Σχέση (2.3):

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.3)$$

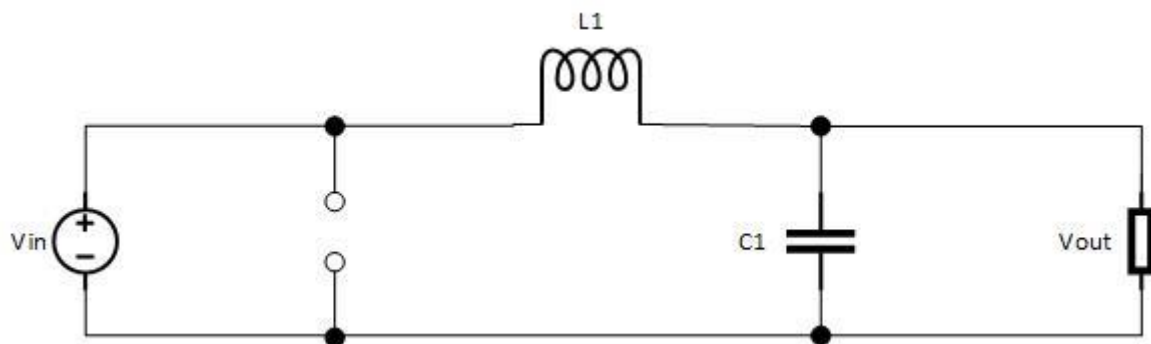
όπου:

$T_{on}$  Το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός.

$T_{off}$  Το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοικτός.



Σχήμα 2.12: Διακόπτης ανοικτός.



Σχήμα 2.12: Διακόπτης κλειστός.

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, χρησιμοποιείται η δίοδος ελεύθερης διέλευσης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται κλειστός βρόχος ρεύματος προκειμένου η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου να τροφοδοτήσει το φορτίο. Το πηνίο έτσι εκφορτίζεται.

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός τότε η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και το ρεύμα διαρρέει το πηνίο.

Η τάση εξόδου του μετατροπέα δίνεται από τη Σχέση (2.4).

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2.4)$$

όπου:

$D$                     Ο κύκλος λειτουργίας του μετατροπέα (Duty Cycle).

$V_{in}$                   Η τάση εισόδου του μετατροπέα (V).

# 3.

## Μέθοδοι αναδιάταξης φωτοβολταϊκών συστοιχιών

---

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστοιχιών σε συνθήκες μερικής σκίασης έχει προβληματίσει αρκετά τον επιστημονικό κλάδο τα τελευταία χρόνια και αποτελεί αντικείμενο συνεχούς έρευνας. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης συνδεσμολογίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μία συστοιχία. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η χρήση αλγορίθμων αναδιάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων με τους οποίους μεταβάλλονται οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας.

Για να εφαρμοστούν οι μέθοδοι αναδιάταξης χρειάζεται να υπάρχουν στο κύκλωμα διακόπτες. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μέσω των διακοπών, μπορεί να συνδεθεί σε οποιαδήποτε πλαισιοσειρά του υποδείξει ο εκάστοτε αλγόριθμος. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδέεται

αποκλειστικά σε μια πλαίσιοσειρά, ενώ μια πλαίσιοσειρά μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά.

Οι αλγόριθμοι αναδιάταξης που εφαρμόζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, μετράνε συνεχώς την τάση, το ρεύμα και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στη συνέχεια επεξεργάζονται τα δεδομένα αυτά και στην έξοδό τους παράγουν τα σήματα ελέγχου διακοπών με τα οποία αναδιατάσσουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας.

Η επίδραση των αλγορίθμων αναδιάταξης φαίνεται στη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης, η οποία αλλάζει λόγω της αύξησης της ισχύος. Επιπλέον, αλλάζει το σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος, καθώς η ισχύς που παράγεται μετά την αναδιάταξη αυξάνεται συγκριτικά με πριν. Στο νέο σημείο βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η ισχύς που παράγεται είναι περισσότερη από αυτή που παρήγαγε η συστοιχία πριν τη χρήση του αλγόριθμου αναδιάταξης.

Για ένα μικρό αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί και η εξαντλητική αναζήτηση (Exhaustive Search). Ο τρόπος λειτουργίας της είναι η δοκιμή όλων των πιθανών συνδυασμών ώστε να καταλήξει σε ένα βέλτιστο, ο οποίος παράγει τη μέγιστη ισχύ. Ωστόσο σε μεσαίες και μεγάλες φωτοβολταϊκές συστοιχίες ο αριθμός των συνδυασμών είναι εξαιρετικά μεγάλος, επομένως η εξαντλητική αναζήτηση δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

Για τη σχεδίαση του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος, εκτός από τους αλγόριθμους αναδιάταξης, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται και με τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP). Για αυτό το λόγο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι Perturb & Observe (P&O) και Voltage Window (VW). Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι δέχονται συνεχώς τις τιμές τάσης και ρεύματος εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και την αναγκάζουν να λειτουργήσει στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας το κατάλληλο σήμα Duty Cycle του μετατροπέα ισχύος DC/DC.

Η διαφορά μεταξύ των αλγορίθμων P&O και VW, είναι πως ο πρώτος λειτουργεί σωστά υπό συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει πως η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης έχει ένα ολικό μέγιστο και καθόλου τοπικά. Αν εφαρμοστεί σε συνθήκες μερικής σκίασης, τότε εγκλωβίζεται σε ένα από τα τοπικά μέγιστα. Ο αλγόριθμος VW έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί και σε συνθήκες μερικής σκίασης, καθώς μπορεί να εντοπίσει το ολικό μέγιστο.

### 3.1 Αλγόριθμοι αναδιάταξης

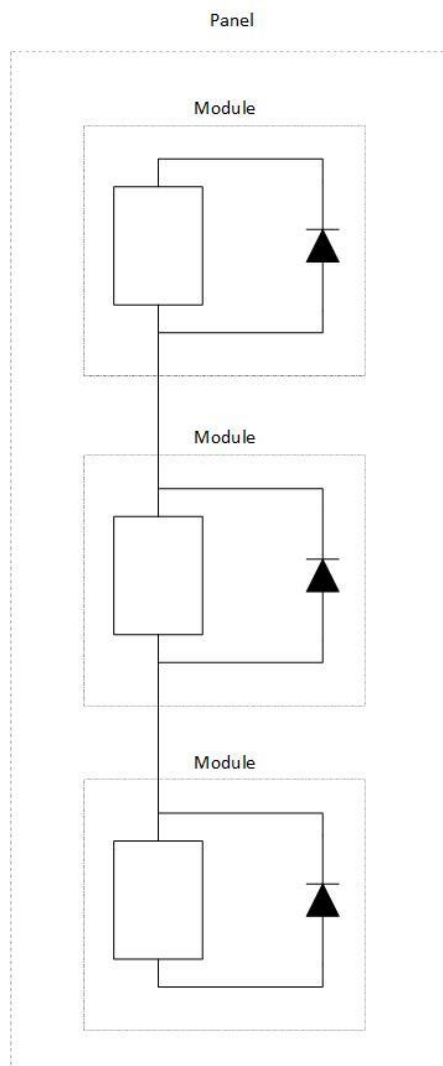
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρεις αλγόριθμοι αναδιάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που εφαρμόστηκαν για τη σχεδίαση των αναδιατασσόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους και τα δεδομένα που χρειάζονται στην είσοδο για να καταλήξουν στο τελικό αποτέλεσμα. Δίνεται επίσης και το διάγραμμα ροής του κάθε αλγορίθμου αναδιάταξης. Στην έξοδό τους παράγουν τα σήματα ελέγχου των διακοπών, με τα οποία μπορεί να γίνει η αναδιάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

#### 3.1.1 Αλγόριθμος MPP Candidates

Μέχρι τώρα χρησιμοποιούνταν ο όρος φωτοβολταϊκό πλαίσιο για να οριστούν πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Ο αλγόριθμος αυτός εισάγει μια νέα έννοια στη διάταξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων [3]. Θεωρεί πως κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να χωριστεί σε τρία κομμάτια, τα οποία ονομάζει “modules”. Κάθε “module” αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κάθε “module” είναι ο ίδιος.

Μέχρι τώρα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου δεχόντουσαν όλα την ίδια ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτόν τον αλγόριθμο είναι εφικτό η ηλιακή ακτινοβολία σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο να δέχεται μέχρι τρεις διαφορετικές τιμές. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενός “module” πρέπει να δέχονται την ίδια ακτινοβολία. Παράλληλα σε κάθε “module” συνδέεται μια δίοδος bypass για λόγους προστασίας.

Στο Σχήμα (3.1) φαίνεται η διάταξη των “modules” μέσα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.



Σχήμα 3.1: Διάταξη ενός Φ/Β πλαισίου στον πρώτο αλγόριθμο.

Για τη λειτουργία του, ο αλγόριθμος αυτός χρειάζεται το ρεύμα και την τάση του κάθε “module” στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Για τη διαδικασία αυτή συνδέεται το κάθε “module” με ένα φορτίο και διαβάσει ο αλγόριθμος τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κάθε ενός ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκαν οι τιμές τάσης  $V_{mpp}$  και του ρεύματος  $I_{mpp}$  σε κάθε “module” ξεχωριστά.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει τους “MPP candidates” που εκφράζουν τιμές τάσης και ρεύματος, πάνω στις οποίες θα βασιστεί για να υπολογίσει τη βέλτιστη αναδιάταξη. Οι candidates του ρεύματος είναι οι τιμές των ρευμάτων στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας των του κάθε “module” ( $I_{mpp}$ ), σε αύξουσα σειρά. Τα ρεύματα που έχουν την ίδια τιμή  $\pm 5\%$

εμφανίζονται μόνο μια φορά. Επίσης, αποθηκεύεται το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή του ρεύματος. Για τον υπολογισμό της τάσης, είναι γνωστό πως μπορεί η τάση σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο να είναι διαφορετική, ωστόσο οι διαφορές των τάσεων  $V_{mpp}$  είναι μικρές. Για αυτό το λόγο υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών τάσης  $V_{mpp}$  των “module”. Στη συνέχεια ορίζεται ως Πίνακας candidates τάσης, ένας Πίνακας που στην πρώτη θέση έχει το μέσο όρο των  $V_{mpp}$ , στη δεύτερη θέση το μέσο όρο  $V_{mpp}$  πολλαπλασιασμένο επί δύο, στην τρίτη θέση επί τρία κλπ.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία με τους candidates ρεύματος και τάσης, υπολογίζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των candidate ρεύματος για το πλήθος των πλαισιοσειρών που αποτελούν τη συστοιχία. Πιο συγκεκριμένα έστω μια φωτοβολταϊκή συστοιχία που αποτελείται από τρεις πλαισιοσειρές και οι candidate ρεύματος είναι τρεις διαφορετικές τιμές ρεύματος (έστω A, B και Γ, με A την μικρότερη τιμή candidate ρεύματος και Γ τη μεγαλύτερη). Το πλήθος των πιθανών συνδυασμών είναι 10 (AAA, AAB, AAG, BBB, BBG, BBA, GGG, GGA, GGB, ABG). Συνδυασμοί που περιέχουν τα ίδια στοιχεία αλλά με διαφορετική σειρά αναγράφονται μία φορά. Ο Πίνακας με την παραπάνω πληροφορία ονομάζεται  $I_{mppk}$ . Στη συνέχεια, υπολογίζεται πόσα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να λειτουργήσουν σε κάθε τιμή του Πίνακα  $I_{mppk}$  που έχουν υπολογιστεί παραπάνω. Χρησιμοποιείται ένας Πίνακας με την ονομασία Q. Στη χαμηλότερη τιμή του candidate ρεύματος (δηλαδή στο πρώτο κελί του Πίνακα Q) μπορούν να λειτουργήσουν όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αν N ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων, στο πρώτο κελί του Πίνακα Q θα υπάρχει το στοιχείο {N,N,N}.

Σε κάθε συνδυασμό πρέπει να υπάρχει ο ίδιος αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων, γιατί κάθε πλαισιοσειρά πρέπει να περιέχει τον ίδιο αριθμό. Για αυτό το λόγο ο αλγόριθμος εφαρμόζει τη σχέση (3.1):

$$Q_m = \min \left\{ \frac{I_{lower}(Q)}{2}, I_{higher}(Q) \right\} \quad (3.1)$$

όπου:

$Q$  Ο Πίνακας με το πλήθος Φ/Β πλαισίων που αντιστοιχούν σε κάθε πιθανό συνδυασμό ρευμάτων.

$I_{lower}$  Το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που αντιστοιχούν στο ρεύμα με τη μικρότερη τιμή από το συνδυασμό.

$I_{higher}$  Το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που αντιστοιχούν στο ρεύμα με τη μεγαλύτερη τιμή από το συνδυασμό.

Πλέον έχουν συλλεχθεί όσες πληροφορίες χρειάζονται για υπολογισμό των τιμών του power matrix. Πρόκειται για έναν Πίνακα με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των candidate ρεύματος με τους candidate τάσης. Το πλήθος των γραμμών του power matrix δίνεται από το εκάστοτε κελί του Πίνακα  $Q_m$ . Το πλήθος των γραμμών στην πρώτη στήλη του power matrix θα είναι ίσο με την τιμή του πρώτου κελιού του Πίνακα  $Q_m$ , της δεύτερης στήλης με την τιμή του δεύτερου κελιού κλπ. Το πλήθος των στηλών είναι ίδιο με το μέγεθος του Πίνακα  $I_{mpp}$ .

Αρχικά υπολογίζει το πρώτο κελί του power matrix. Εκεί βρίσκεται το γινόμενο του πρώτου κελιού του Πίνακα candidate τάσης με το συνδυασμό από το πρώτο κελί του Πίνακα  $I_{mppk}$ . Αν αυτός ο Πίνακας περιέχει τρεις τιμές (A, B και Γ) τότε στο κελί του power matrix θα εισαχθεί το αποτέλεσμα της πράξης  $V(1) \times A + V(1) \times B + V(1) \times \Gamma$ . Στο δεύτερο κελί της ίδιας στήλης (κελί 2×1) βρίσκεται το γινόμενο του πρώτου κελιού του Πίνακα  $I_{mppk}$  με το δεύτερο κελί candidate τάσης, δηλαδή  $V(2) \times A + V(2) \times B + V(2) \times \Gamma$ . Χρησιμοποιώντας κάθε φορά το επόμενο κελί του Πίνακα candidate τάσης, ολοκληρώνει την πρώτη στήλη του power matrix.

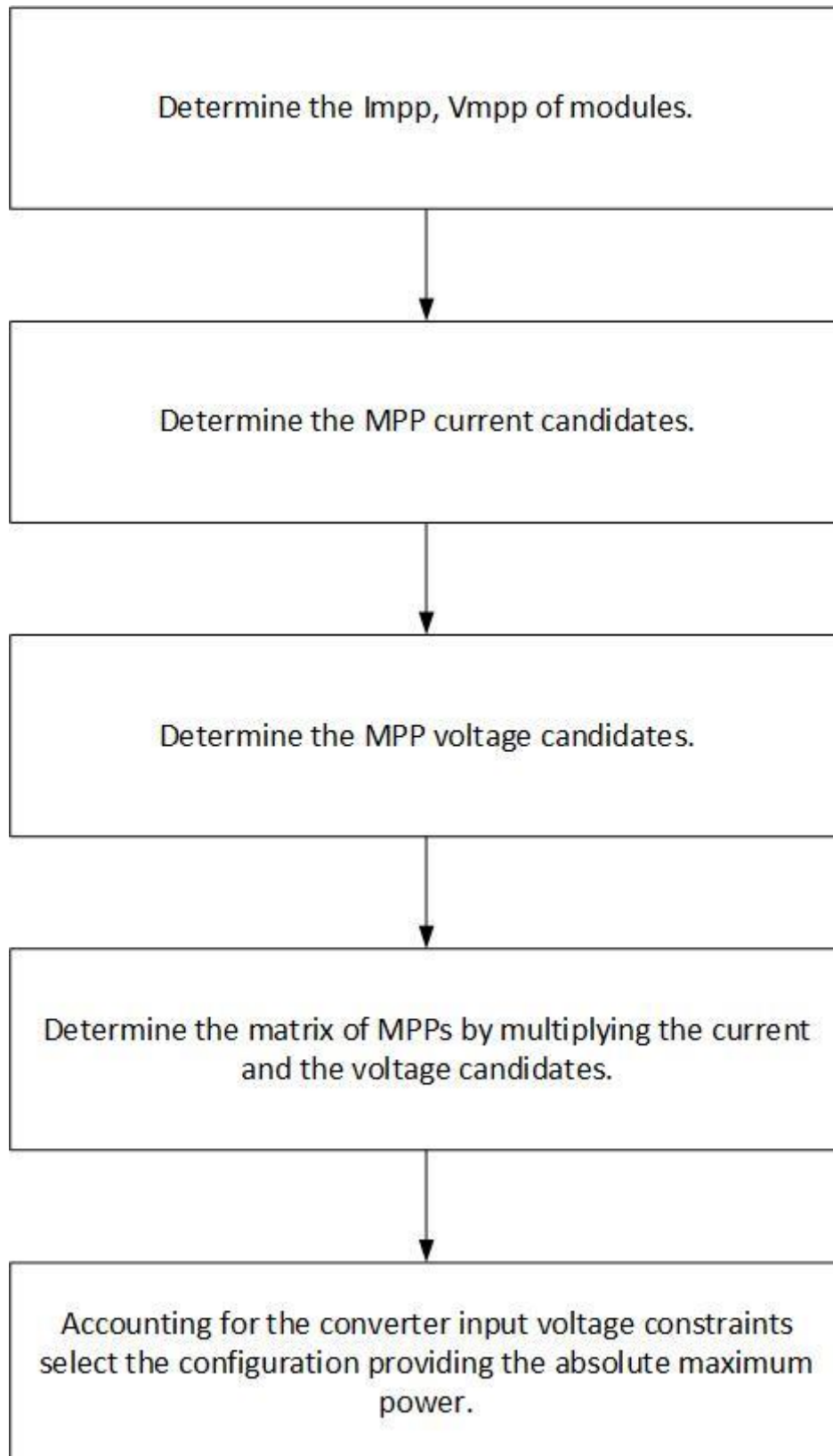
Ο αλγόριθμος συνεχίζει στη δεύτερη στήλη του power matrix. Στην πρώτη γραμμή αυτής της στήλης βρίσκεται το γινόμενο του δεύτερου κελιού του Πίνακα  $I_{mppk}$  και του πρώτου κελιού του candidate τάσης. Στη δεύτερη γραμμή βρίσκεται το γινόμενο του δεύτερου κελιού του Πίνακα  $I_{mppk}$  και του δεύτερου κελιού του candidate τάσης. Με τον τρόπο αυτό γεμίζει τον Πίνακα power matrix. Όταν ένα συνδυασμός δεν ορίζεται, τότε το κελί του power matrix παίρνει την τιμή 0.

Με μια αναζήτηση στον power matrix, ο αλγόριθμος βρίσκει τη μέγιστη ισχύ. Η ισχύς αποτελείται από το βέλτιστο συνδυασμό ρεύματος-τάσης. Η στήλη της μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί σε ένα συνδυασμό ρευμάτων. Αυτό δηλώνει το ποια φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανάλογα με το ρεύμα  $I_{mpp}$  που χαρακτηρίζει το καθένα, πρέπει να συνδεθούν μαζί. Η γραμμή της μέγιστης ισχύος δηλώνει πόσα “module” πρέπει να συνδεθούν σε σειρά σε κάθε πλαισιοσειρά.

Έστω πως ο αλγόριθμος αποφασίζει πως η βέλτιστη αναδιάταξη αποτελείται από το ζευγάρι ρεύματος  $[A, B]$  και πως πρέπει να συνδεθούν  $N$  “modules” σε σειρά σε κάθε πλαίσιοσειρά. Αυτό σημαίνει πως στην πρώτη πλαίσιοσειρά πρέπει να υπάρχουν  $N$  “modules” με ρεύμα  $I_{mpp}$  μεγαλύτερο ή ίσο του  $A$ . Το άθροισμα των “modules” με ρεύμα  $I_{mpp}$  μεγαλύτερο του  $A$  στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα επιλέξει ο αλγόριθμος να τοποθετήσει στην πρώτη πλαίσιοσειρά, θα πρέπει να είναι ίσο με  $N$ . Ομοίως συμπληρώνει και τη δεύτερη πλαίσιοσειρά.

Υπάρχει ακόμη ένας περιορισμός που πολλές φορές καλείται να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος. Η τάση στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας που έχει υπολογίσει ο αλγόριθμος μπορεί να είναι εκτός των ορίων τάσης του μετατροπέα που θα συνδεθεί στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Για αυτό το λόγο είναι πιθανό η βέλτιστη λύση να απορριφθεί και να χρησιμοποιηθεί η αμέσως επόμενη, ψάχνοντας στον power matrix την επόμενη μέγιστη τιμή.

Στο Σχήμα (3.2) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου [3].



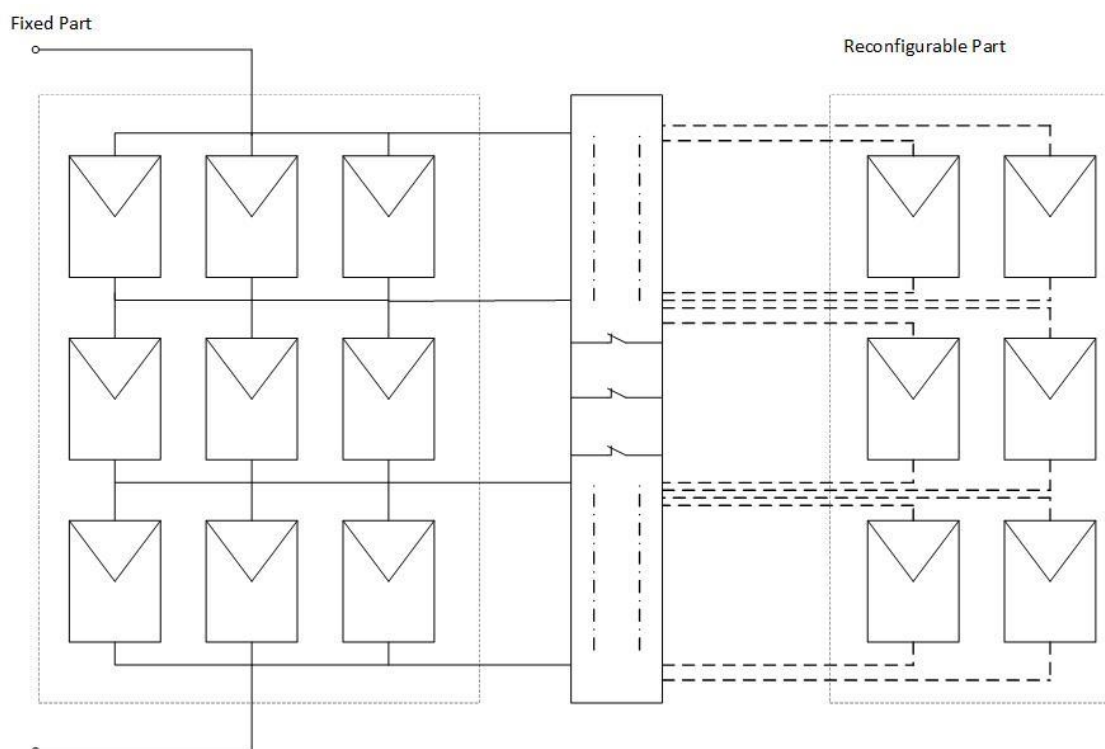
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής πρώτου αλγορίθμου.

### 3.1.2 Αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα σημαντικό πρόβλημα που εμφανίζεται στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι η απόκλιση της μέγιστης ισχύος μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κάθε γραμμή. Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι τοποθετημένα στην ίδια γραμμή, δεν έχουν το ίδιο ρεύμα βέλτιστης λειτουργίας ( $I_{mpp}$ ), λόγω διαφορετικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Εξ αιτίας του φαινομένου αυτού δεν παράγουν τη μέγιστη ισχύ που είναι δυνατό να παραχθεί από το καθένα.

Ο αλγόριθμος αυτός καλείται να αντιμετωπίσει το παραπάνω πρόβλημα. Η μόνη πληροφορία που χρειάζεται είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αυτό που προσπαθεί να πετύχει είναι όλες οι γραμμές φωτοβολταϊκών πλαισίων να δέχονται την ίδια ηλιακή ακτινοβολία, ή η διαφορά τους να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

Αρχικά χωρίζει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας σε fixed και reconfigurable, όπως φαίνεται στο Σχήμα (3.3).



Σχήμα 3.3: Φ/Β συστοιχία με τα Φ/Β πλαίσια χωρισμένα σε fixed και reconfigurable.

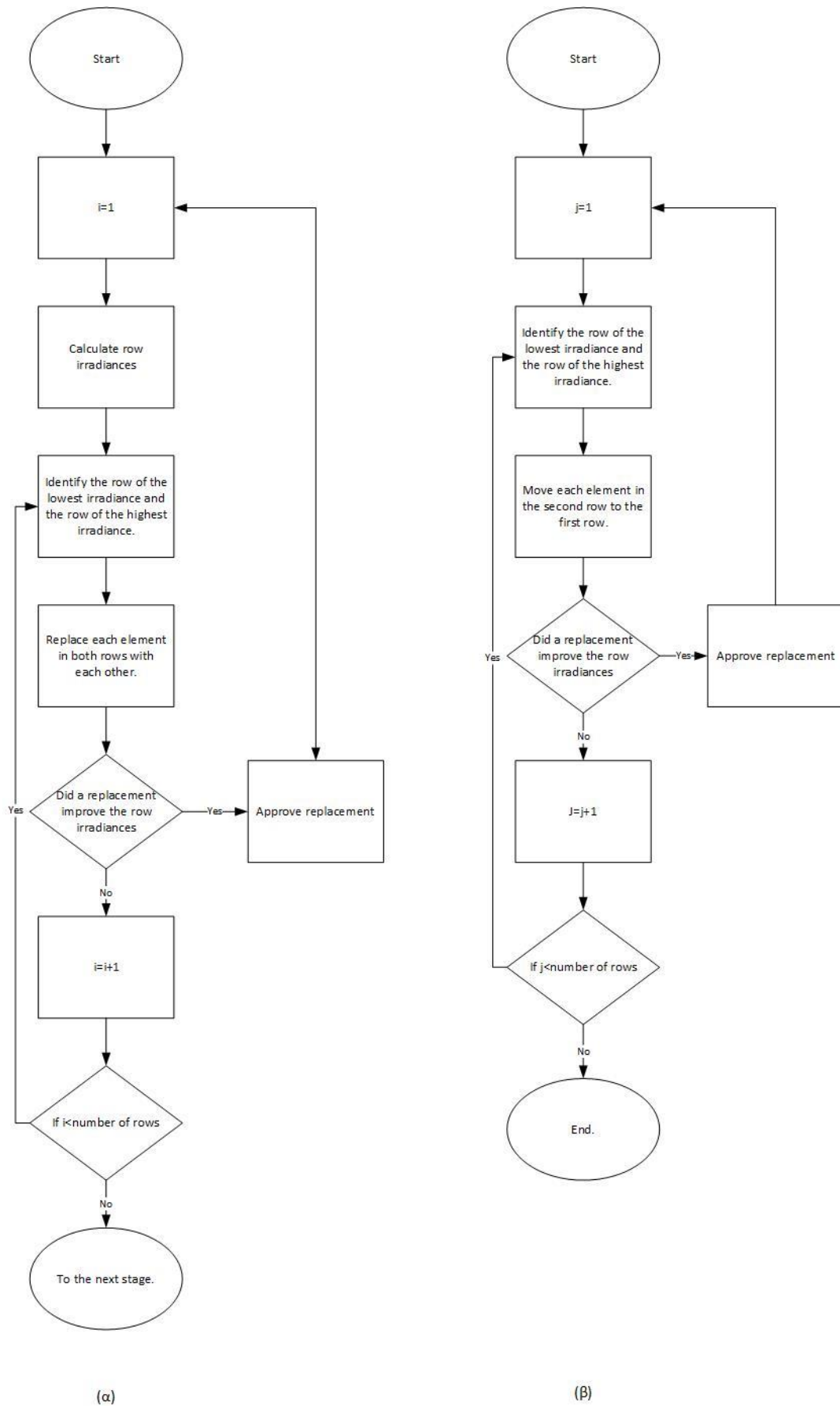
Fixed ονομάζει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία παραμένουν στη θέση τους μετά την αναδιάταξη, ενώ reconfigurable αυτά που αναδιατάσσονται. Το reconfigurable τμήμα συνδέεται με το fixed με χρήση διακοπών. Ο αλγόριθμος στην έξοδό του παράγει τα σήματα ελέγχου των διακοπών και έτσι το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο από το reconfigurable τμήμα, συνδέεται σε οποιαδήποτε γραμμή του υποδείξει ο αλγόριθμος αναδιάταξης.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου χωρίζεται σε δύο τμήματα. Αρχικά, υπολογίζει το άθροισμα των ακτινοβολιών ανά γραμμή. Εντοπίζει τη γραμμή με το μικρότερο άθροισμα και τη γραμμή με το μεγαλύτερο. Στη συνέχεια ανταλλάσσει κάθε τιμή ακτινοβολίας από τη μία γραμμή στην άλλη. Αν μια ανταλλαγή βελτιώσει τη διαφορά ακτινοβολίας μεταξύ τους, την αποθηκεύει. Αφού εξετάσει όλες τις πιθανές ανταλλαγές μεταξύ των δύο γραμμών, υπολογίζει ξανά το άθροισμα των ακτινοβολιών όλων των γραμμών.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να βρει το βέλτιστο συνδυασμό. Αυτός ο συνδυασμός δίνει τη μικρότερη δυνατή διαφορά μεταξύ της γραμμής με τη μεγαλύτερη ακτινοβολία και αυτής με τη μικρότερη.

Το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου εκτελείται αφού έχει ολοκληρωθεί το πρώτο και έχουν γίνει οι ανταλλαγές. Υπολογίζει ξανά τη γραμμή με το μικρότερο άθροισμα ηλιακής ακτινοβολίας και τη γραμμή με το μεγαλύτερο. Τότε αρχίζει να μετακινεί κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο από τη γραμμή με το μεγαλύτερο άθροισμα, προς αυτή με το μικρότερο, χωρίς όμως να το αντικαθιστά με κάποιο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αν μια μετακίνηση βελτιώσει τη διαφορά μεταξύ των δύο ακτινοβολιών την αποθηκεύει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην υπάρχει περαιτέρω βελτίωση. Είναι πιθανό μετά την ολοκλήρωση του δεύτερου μέρους κάποιες γραμμές να έχουν περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια από κάποιες άλλες.

Αφού ολοκληρωθεί και το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου, δίνονται τιμές στα σήματα ελέγχου ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός που έχει υπολογιστεί. Στο Σχήμα (3.4) φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου [4].



Σχήμα 3.4: Το πρώτο μέρος του αλγορίθμου (α) και το δεύτερο μέρος (β).

### 3.1.3 Αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού

Ο αλγόριθμος αυτός χωρίζεται σε δύο τμήματα. Ομοίως με τον πρώτο αλγόριθμο θα χρειαστεί να υπολογιστούν οι τάσεις και τα ρεύματα του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου της συστοιχίας στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους. Αρχικά, συνδέεται κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο μόνο του. Ο αλγόριθμος επεξεργάζεται την χαρακτηριστική ισχύος-τάσης του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου ξεχωριστά και υπολογίζει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας για κάθε ένα. Το ρεύμα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας ονομάζεται  $I_{mpp}$ , η τάση  $V_{mpp}$  και η ισχύς  $P_{mpp}$ .

Ο αλγόριθμος δέχεται ως είσοδο τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων ( $N$ ) και υπολογίζει την τάση  $V_{mpp}$  και το ρεύμα  $I_{mpp}$  του κάθε ενός. Μόλις δεχθεί τα δεδομένα, αρχικοποιεί τη μεταβλητή  $g$  στην τιμή 1 και καλεί αμέσως το δεύτερο τμήμα, το οποίο αποτελείται από μια συνάρτηση.

Το δεύτερο τμήμα είναι ένας αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού. Για να υλοποιήσει τους απαραίτητους υπολογισμούς χρησιμοποιεί δύο ακέραιους μετρητές, τον  $l1$  και τον  $l2$ . Αρχικοποιεί τον Πίνακα  $Min\_Sum\_Opt$  με την τιμή 0 στο πρώτο κελί. Ομοίως και για τον Πίνακα  $Last\_Par$ . Οι τιμές των δύο πινάκων δίνονται από τις Σχέσεις (3.2) και (3.3).

$$Min\_Sum\_Opt(l1, l2) = \max_{l2-1 \leq l < l1} \{ \min \{ Min\_Sum\_Opt(l, l2 - 1), \sum_{i=l}^{l1} V_{mpp}(i) \times I_{mpp}(i) \} \} \quad (3.2)$$

$$Last\_Par(l1, l2) = \operatorname{argmax}_{l2-1 \leq l < l1} \{ \min \{ Min\_Sum\_Opt(l, l2 - 1), \sum_{i=l}^{l1} V_{mpp}(i) \times I_{mpp}(i) \} \} \quad (3.3)$$

Κάθε φορά που υπολογίζει κάποιο κελί των πινάκων, αυξάνει την τιμή της μεταβλητής  $l1$ . Όταν αυτή γίνει ίση με το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τότε αυξάνει την τιμή της μεταβλητής  $l2$  κατά 1 και δίνει στη μεταβλητή  $l1$  τη μεταβλητή της  $l2$ . Όταν και η τιμή της μεταβλητής  $l2$  γίνει ίση με  $N$ , τότε οι πίνακες θα έχουν γεμίσει. Ο Πίνακας  $Min\_Sum\_Opt$  χρησιμοποιεί τις τιμές  $V_{mpp}$  και  $I_{mpp}$  των φωτοβολταϊκών πλαισίων ώστε να συμπληρωθεί με

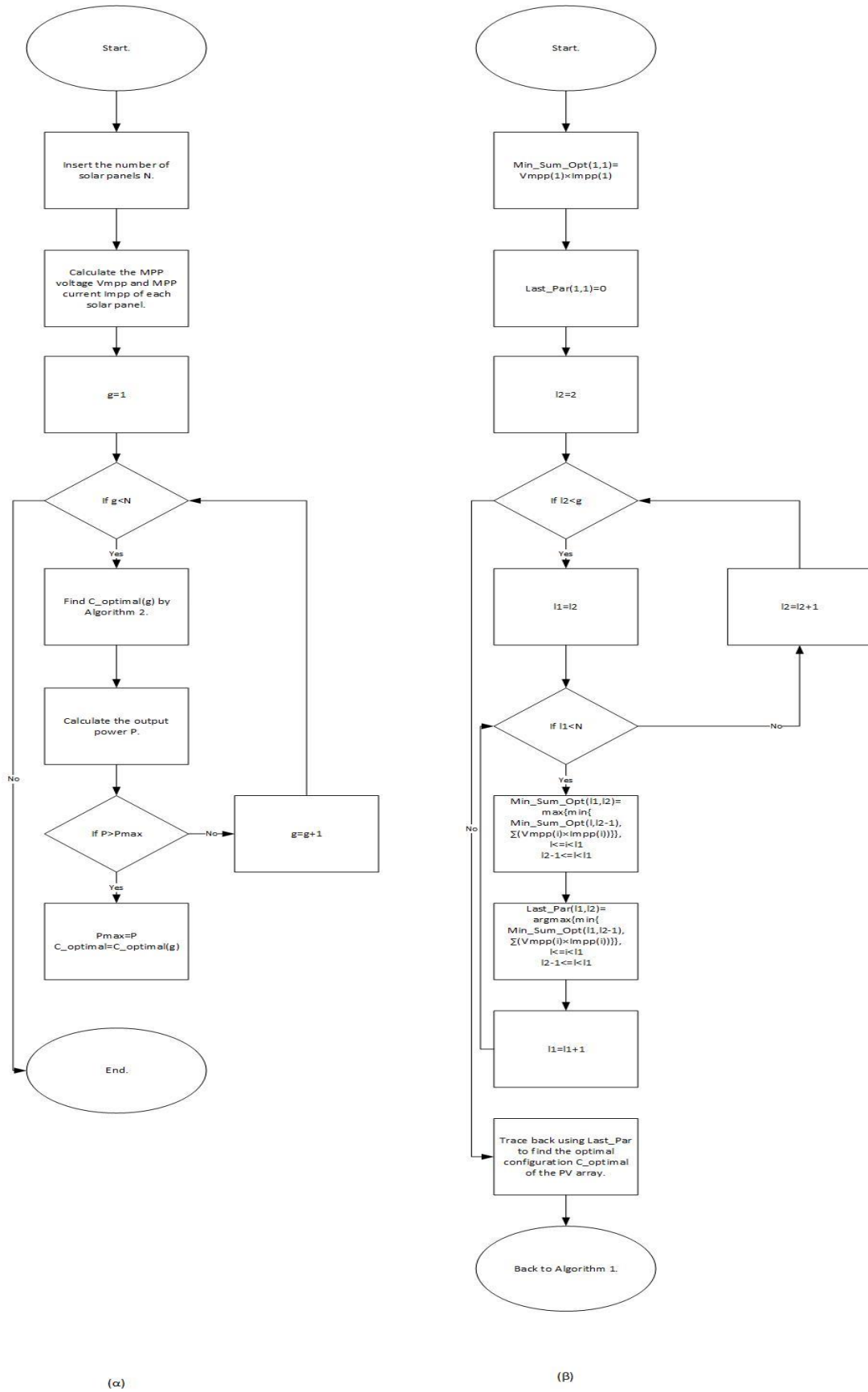
τιμές ισχύος. Ο Πίνακας Last\_Par κρατάει την πληροφορία για το ποια φωτοβολταϊκά πλαίσια οδήγησαν σε κάθε τιμή της ισχύος.

Αφού συμπληρωθεί ο Πίνακας, ο αλγόριθμος ξεκινάει από την τελευταία τιμή του Πίνακα Last\_Par και εφαρμόζει δυναμικό προγραμματισμό. Ψάχνει να βρει ποια τιμή της προηγούμενης στήλης του Πίνακα Last\_Par οδήγησε στην επόμενη βέλτιστη. Αφού ολοκληρώσει την αναζήτηση προκύπτει ένα σύνολο αριθμών που αντιστοιχούν στις πλαισιοσειρές που πρέπει να συνδεθεί το εκάστοτε φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Αφού ολοκληρωθεί η εκτέλεση της συνάρτησης συγκρίνει τη μέχρι τώρα ισχύ που έχει αποθηκεύσει, με την ισχύ της αναδιάταξης που επέστρεψε η συνάρτηση. Αν η ισχύς που προήλθε από τη συνάρτηση είναι μεγαλύτερη από την ήδη υπάρχουσα, την αποθηκεύει και κρατάει την αναδιάταξη που έχει ορίσει. Αν όχι, τότε κρατάει την προηγούμενη τιμή ισχύος και την προηγούμενη αναδιάταξη.

Όταν πλέον ολοκληρωθεί η διαδικασία, δίνονται τα σήματα ελέγχου στους διακόπτες ανάλογα με τη βέλτιστη αναδιάταξη που έχει υπολογιστεί από τον αλγόριθμο.

Στο Σχήμα (3.5) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου [5].



Σχήμα 3.5: Το διάγραμμα ροής του κύριου αλγορίθμου (α) και το διάγραμμα ροής της συνάρτησης που επιστρέφει την αναδιάταξη (β).

### 3.2 Αλγόριθμοι εντοπισμού MPP

Στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας συνδέεται ένας μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck Converter). Το σήμα Duty Cycle (D) του μετατροπέα παρέχεται από τη μονάδα ελέγχου. Για να λειτουργήσει η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο εντοπισμού Maximum Power Point (MPP).

Οι αλγόριθμοι MPPT δέχονται συνεχώς δεδομένα για την τάση και το ρεύμα που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Ανάλογα με την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας μπορεί να διαφέρει. Σκοπός των αλγορίθμων MPPT είναι να εντοπίσουν το σημείο αυτό και να αναγκάσουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία να λειτουργεί στην επιθυμητή τάση. Ως βέλτιστο σημείο λειτουργίας χαρακτηρίζεται ο συνδυασμός ρεύματος ( $I_{mpp}$ ) και τάσης ( $V_{mpp}$ ) που παράγουν τη μέγιστη ισχύ ( $P_{mpp}$ ). Στην έξοδό του ο αλγόριθμος MPPT παράγει το σήμα ελέγχου (D) του μετατροπέα ισχύος.

Οι περισσότερες τεχνικές MPPT εφαρμόζονται υπό συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης σε αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζει ένα ολικό μέγιστο. Οι αλγόριθμοι MPPT εντοπίζουν την τάση και το ρεύμα που παρέχουν αυτό το ολικό μέγιστο.

Στην περίπτωση που η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι ομοιόμορφη, η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης μεταβάλλεται και εμφανίζονται τότε πολλά τοπικά μέγιστα. Οι αλγόριθμοι πρέπει να καταλήξουν στο ολικό μέγιστο παραβλέποντας τα τοπικά μέγιστα. Πολλοί αλγόριθμοι MPPT αδυνατούν να ανταπεξέλθουν και εγκλωβίζονται σε ένα από τα τοπικά μέγιστα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται δύο αλγόριθμοι εντοπισμού MPP. Ο πρώτος ονομάζεται Perturb and Observe (P&O) και χρησιμοποιείται υπό συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ ο δεύτερος ονομάζεται Voltage Window (VW) και χρησιμοποιείται όταν η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης παρουσιάζει δύο ή περισσότερα τοπικά μέγιστα.

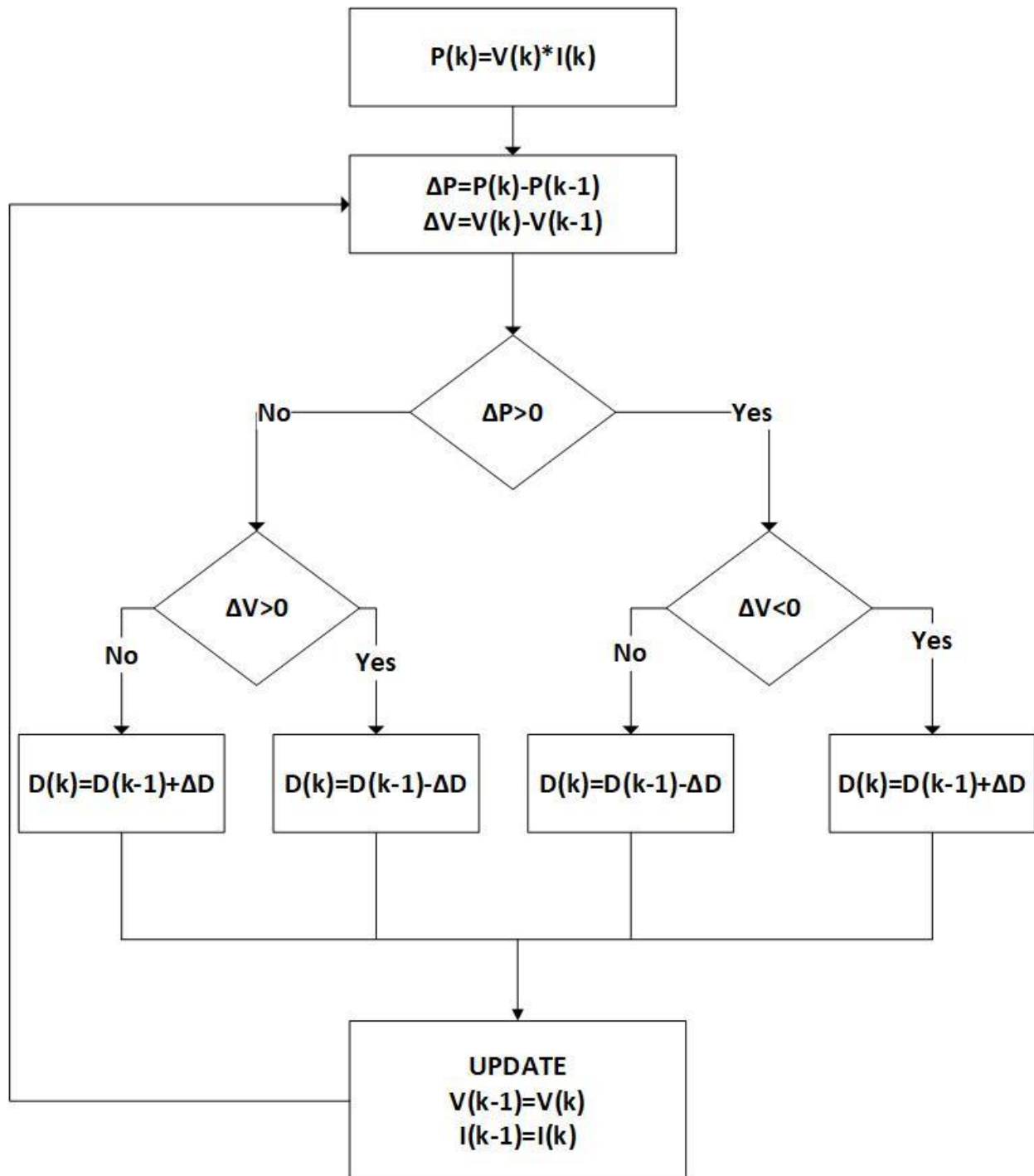
Επιπλέον, ο αλγόριθμος P&O, στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιείται στη διάταξη Module-Integrated Converter, όπου εφαρμόζεται ένας μετατροπέας ισχύος σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο καθώς η χαρακτηριστική του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου ξεχωριστά παρουσιάζει ένα ολικό μέγιστο. Ο αλγόριθμος VW χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της

ισχύος στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε συνθήκες μερικής σκίασης, οπότε η αντίστοιχη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης παρουσιάζει πολλά τοπικά μέγιστα.

### **3.2.1 Αλγόριθμος MPPT Perturb and Observe**

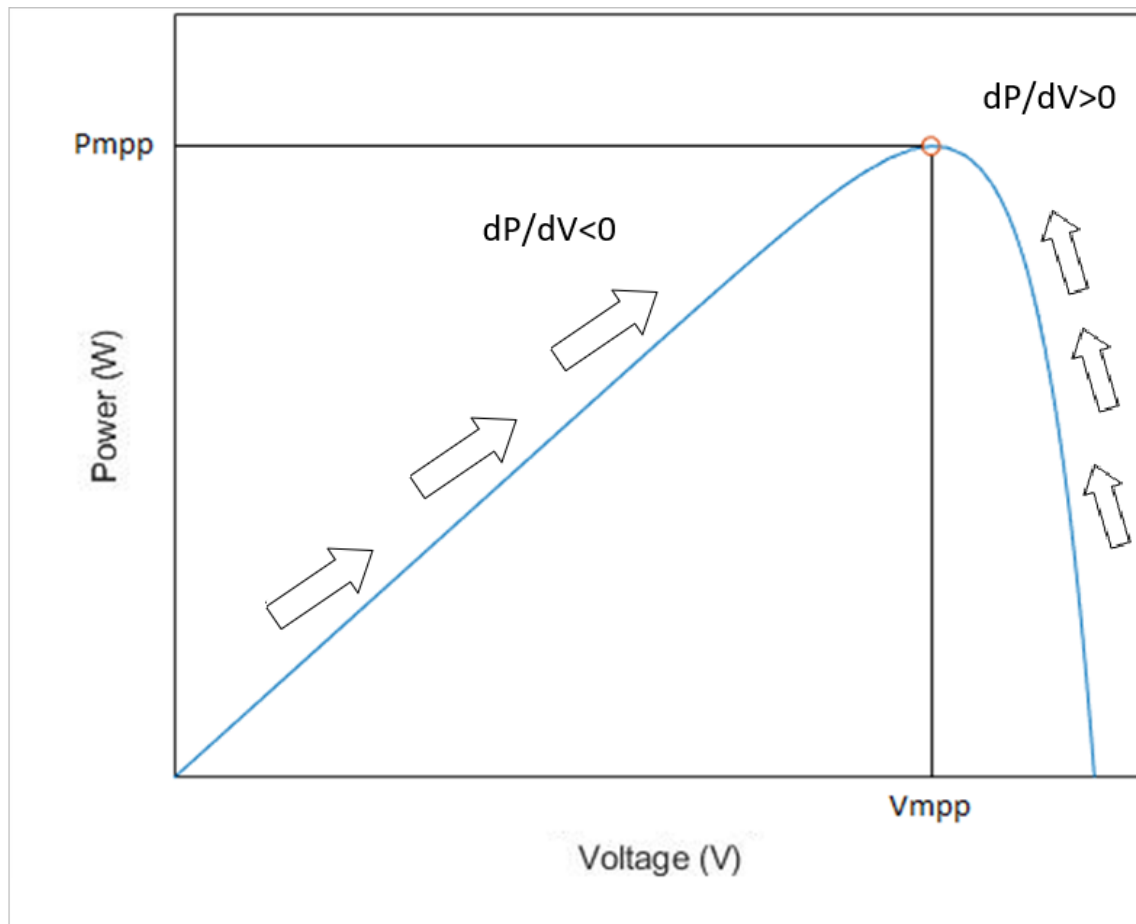
Ο αλγόριθμος διαταραχής και παρατήρησης (P&O) αποτελεί έναν από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους MPPT. Χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της μικρής υπολογιστικής πολυπλοκότητάς του. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνική, επιλέγεται μια σταθερή τιμή  $C$ . Την τιμή αυτή τη χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για να προκαλεί διαταραχές στο Duty Cycle ( $D$ ) του μετατροπέα ισχύος. Οι διαταραχές αυτές προκαλούν διαταραχές στην τάση στην οποία λειτουργεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η παραγόμενη τάση μετά τη διαταραχή συμβολίζεται ως  $V_{ref}$ . Με αυτές τις διαταραχές αναγκάζει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να λειτουργήσει στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Στο σημείο αυτό ισχύει ότι  $V_{ref}=V_{mpp}$ . Ο αλγόριθμος P&O λειτουργεί αποδοτικά υπό συνθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, διαφορετικά δεν συγκλίνει στο ολικό μέγιστο αλλά εγκλωβίζεται σε τοπικό μέγιστο.

Στο Σχήμα (3.6) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου P&O.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου P&O.

Ο αλγόριθμος μεταβάλλει με σταθερό βήμα την τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Στη συνέχεια συγκρίνει την τιμή της παραγόμενης ισχύος με την προηγούμενη τιμή της. Αν είναι μεγαλύτερη, τότε η επόμενη διαταραχή θα είναι προς την ίδια κατεύθυνση, ειδάλλως προς την αντίθετη.



Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης.

Στο Σχήμα (3.7) φαίνεται πως όταν αυξάνεται η τάση και το σημείο βέλτιστης λειτουργίας βρίσκεται δεξιά, αυξάνεται και η ισχύς. Ειδικά, όταν αυξάνεται η τάση και το σημείο βέλτιστης λειτουργίας βρίσκεται αριστερά, η ισχύς μειώνεται.

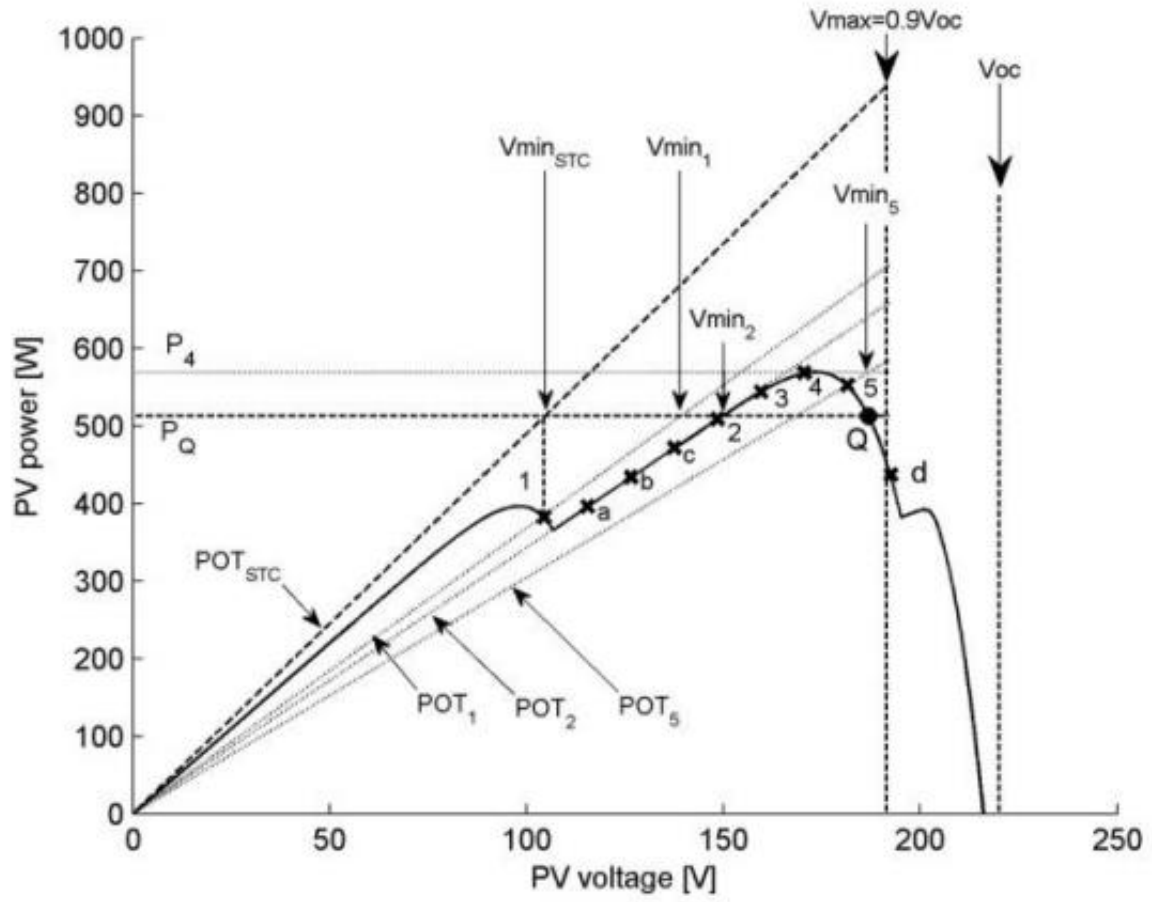
Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρις ότου να βρεθεί το σημείο MPP. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος δεν σταματάει, αλλά συνεχίζει να ταλαντεύεται γύρω από το σημείο MPP.

### 3.2.2 Αλγόριθμος MPPT Voltage Window

Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο P&O, ο αλγόριθμος Voltage Window μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις περιπτώσεις των συνθηκών λειτουργίας, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Επιλέχθηκε αυτός ο αλγόριθμος έναντι άλλων λόγω της καταλληλότητάς του σε περιπτώσεις μερικής σκίασης και τη χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησής του.

Βασίζεται σε ένα τρίγωνο ισχύος το οποίο ονομάζεται Power Operating Triangle (POT). Για να υπολογιστεί το τρίγωνο POT χρειάζονται τρεις ευθείες. Η πρώτη ευθεία είναι ο οριζόντιος άξονας των  $x$  (της τάσης), η δεύτερη ευθεία είναι αυτή που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων, δηλαδή το σημείο  $(0,0)$ , και έχει κλίση ίση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ) και η τρίτη ευθεία είναι μια κάθετη γραμμή που διέρχεται από το σημείο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης ( $x=V_{oc}$ ).

Στο Σχήμα (3.8) παρουσιάζεται το τρίγωνο ισχύος POT, που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο.



Σχήμα 3.8: Τρίγωνο ισχύος αλγόριθμου VW [2].

Στη συνέχεια, υπολογίζει τις τιμές  $V_{min}$  και  $V_{max}$  ως εξής:

$$V_{min} = \frac{P_{store}}{I_{sc}} \quad (3.4)$$

$$V_{max} = 0.9 \times V_{oc} \quad (3.5)$$

όπου:

$P_{store}$  Η αποθηκευμένη τιμή ισχύος (W).

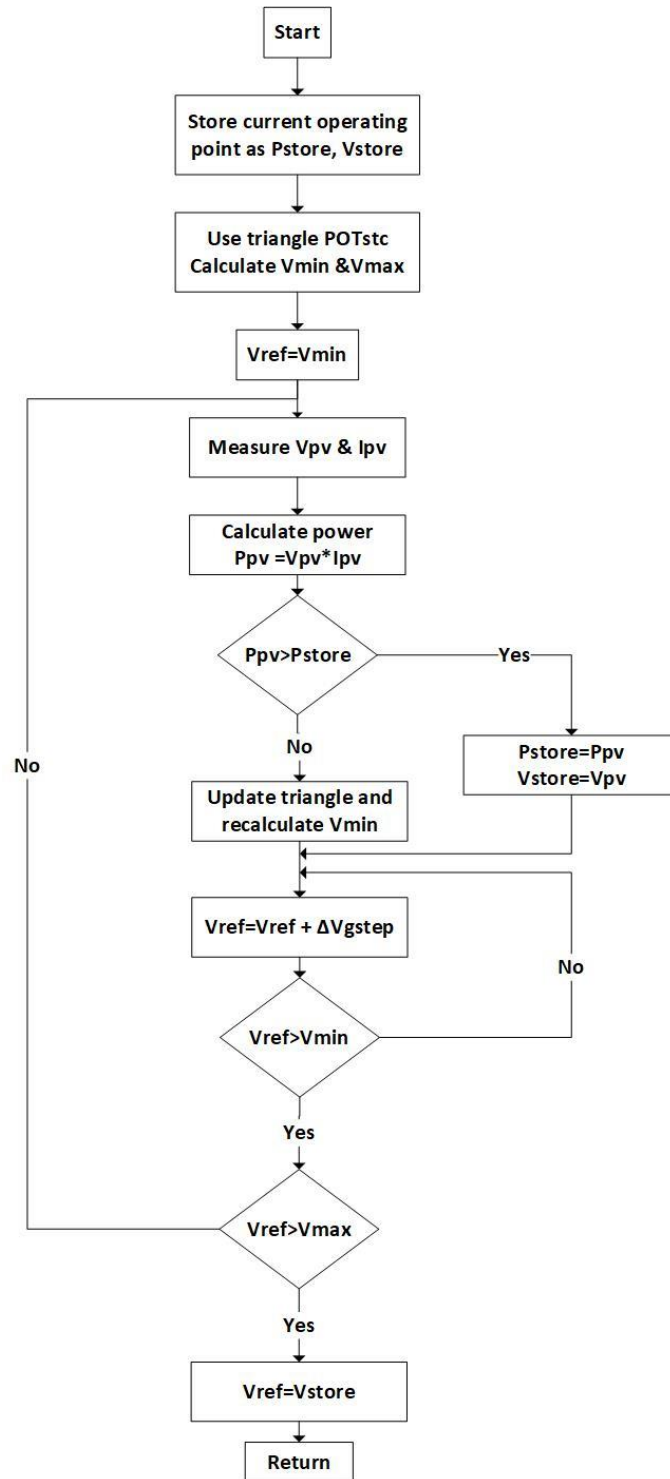
$I_{sc}$  Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (A).

$V_{oc}$  Η τάση ανοιχτοκύκλωσης (V).

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος δίνει στη μεταβλητή  $V_{ref}$  την τιμή του  $V_{min}$  ( $V_{ref} = V_{min}$ ). Μετράει το ρεύμα και την τάση, τα πολλαπλασιάζει και υπολογίζει την παραγόμενη ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Αν η ισχύς που μέτρησε είναι μικρότερη της προηγούμενης, τότε μικραίνει το τρίγωνο POT γύρω από το σημείο MPP. Για να το επιτύχει αυτό μεταβάλλει τη βάση του τριγώνου η οποία ανήκει στο διάστημα  $[V_{min}, V_{max}]$ . Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη Σχέση (3.4) και αλλάζοντας το  $V_{min}$ .

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι ο αλγόριθμος να καταλήξει στο μοναδικό ολικό μέγιστο της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Στο Σχήμα (3.9) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου VW.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου VW.

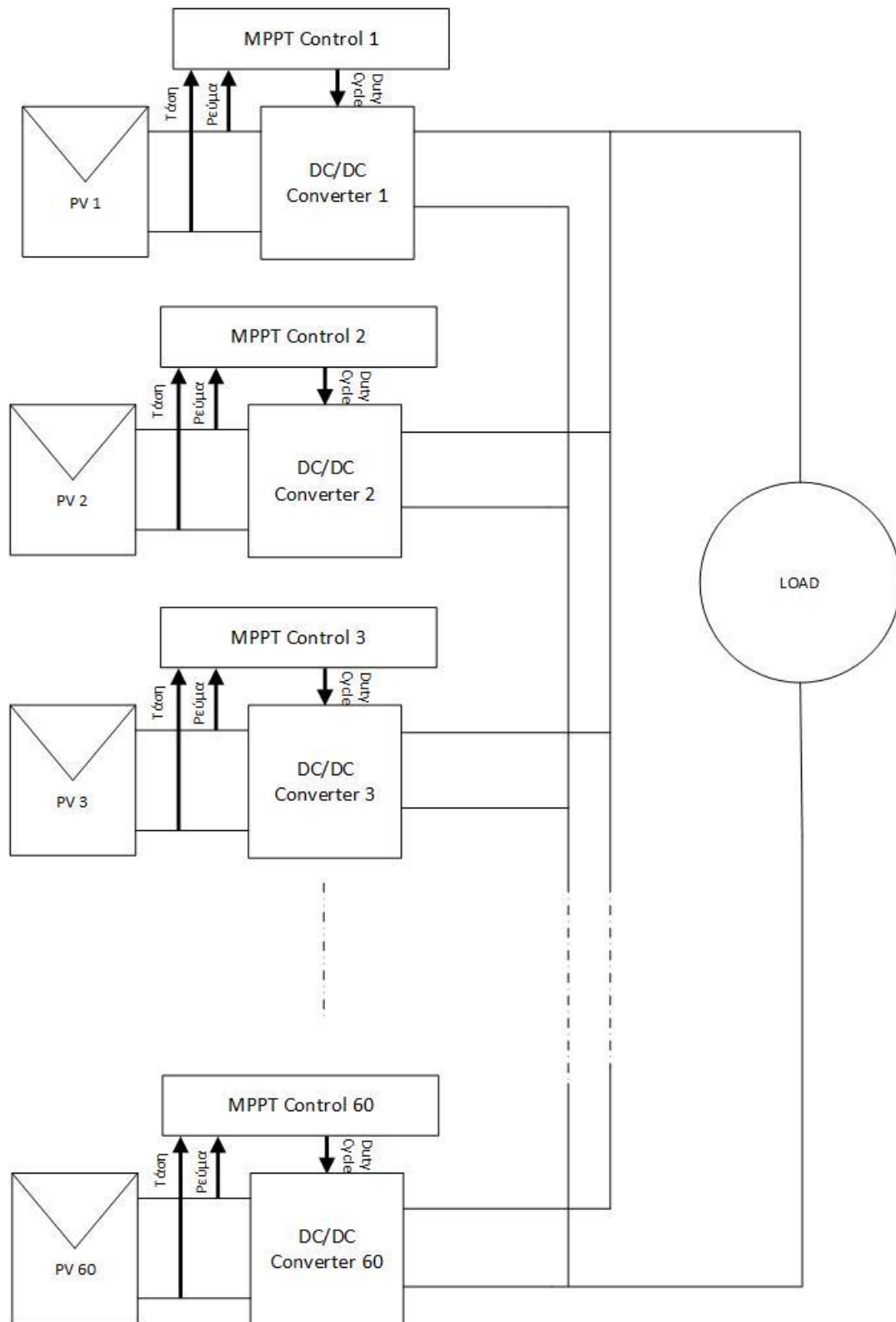
### 3.3 Module-Integrated Converter

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν Buck Converter με μια μονάδα ελέγχου MPPT σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Σκοπός της είναι να λειτουργεί κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του και να παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ που είναι δυνατό, ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία που δέχεται.

Η κάθε μονάδα ελέγχου δέχεται συνεχώς πληροφορία για την τάση και το ρεύμα του εκάστοτε φωτοβολταϊκού πλαισίου και εφαρμόζει τον αλγόριθμο εντοπισμού MPP. Στην έξοδο της μονάδας ελέγχου παράγεται το σήμα ελέγχου  $D$  του εκάστοτε μετατροπέα ισχύος.

Ο αλγόριθμος εντοπισμού του MPP που χρησιμοποιείται είναι ο P&O, καθώς δεν υπάρχουν τοπικά μέγιστα στην χαρακτηριστική ισχύος-τάσης όταν εφαρμόζεται σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να μην δέχονται την ίδια ακτινοβολία.

Στο σχήμα (3.10) παρουσιάζεται ένα τέτοιο φωτοβολταϊκό σύστημα με 60 φωτοβολταϊκά πλαίσια, το οποίο τροφοδοτεί ένα φορτίο.



Σχήμα 3.10: Φωτοβολταϊκή διάταξη τύπου *Module-Integrated Converter*.

---

# 4.

## **Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού συστήματος σε MATLAB/Simulink**

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB/Simulink. Το Simulink χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του κυκλώματος και η MATLAB για να υλοποιηθούν οι αλγόριθμοι αναδιάταξης και MPPT που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

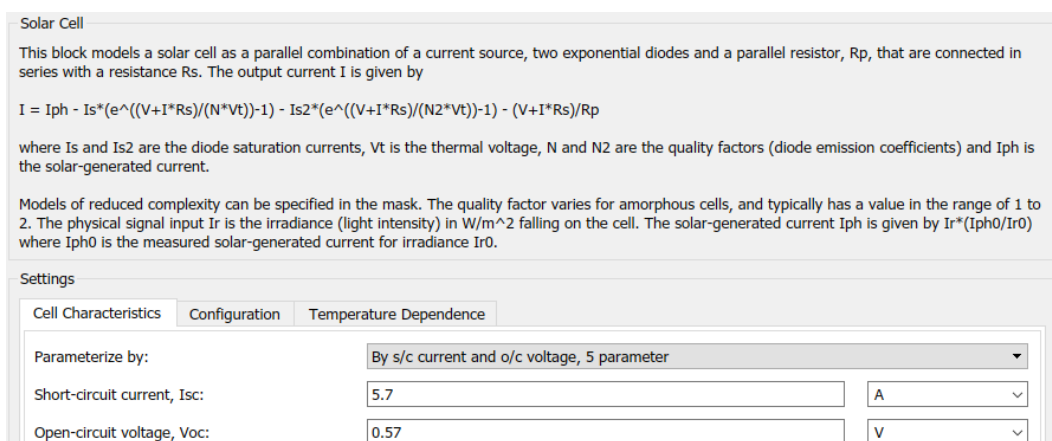
## 4.1 Υλοποίηση του μοντέλου του φωτοβολταϊκού συστήματος σε Simulink

Η βιβλιοθήκη του Simulink που χρησιμοποιήθηκε είναι η Simscape. Περιέχει όλα τα components που αναλύονται παρακάτω. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το photovoltaic solar cell.



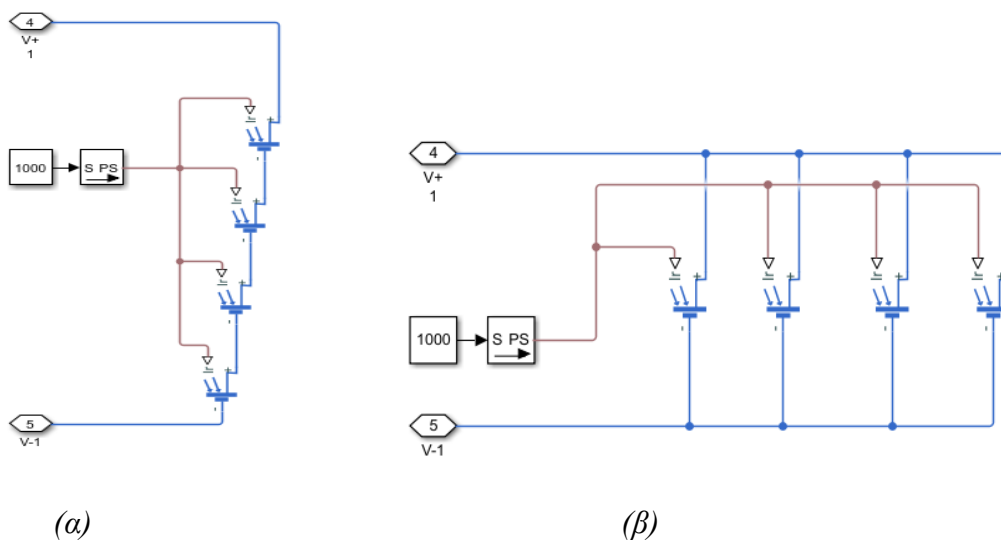
Σχήμα 4.1: Φ/Β στοιχείο (Solar cell).

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (solar cell) του σχήματος (4.1), δέχεται ως είσοδο την ακτινοβολία (το σύμβολο με το τρίγωνο) και έχει δύο ακροδέκτες, έναν θετικό (πάνω) και έναν αρνητικό (κάτω). Υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγθούν από το χρήστη το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτοκύκλωσης σε κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2).



Σχήμα 4.2: Επιλογή  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ .

Για να ενωθούν πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά μεταξύ τους, πρέπει να ενωθεί ο θετικός ακροδέκτης του ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με τον αρνητικό του επόμενου. Αν πρέπει να συνδεθούν παράλληλα, ενώνονται όλοι οι θετικοί ακροδέκτες μεταξύ τους, ομοίως και οι αρνητικοί, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.3).



Σχήμα 4.3: Τέσσερα Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα (α) σε σειρά και (β) παράλληλα.

Στο Simulink υπάρχει η δυνατότητα αντί να συνδέονται πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά, ενώνοντας το ένα με το άλλο, αυτό να γίνεται από το ίδιο το Simulink. Το Σχήμα (4.4) είναι ισοδύναμο με το να συνδέονταν τέσσερα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά, όπως στο σχήμα (4.2).

**Solar Cell**

This block models a solar cell as a parallel combination of a current source, two exponential diodes and a parallel resistor,  $R_p$ , that are connected in series with a resistance  $R_s$ . The output current  $I$  is given by

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V+I R_s}{N V_t}} - 1 \right) - I_{s2} \left( e^{\frac{V+I R_s}{N_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{V+I R_s}{R_p}$$

where  $I_s$  and  $I_{s2}$  are the diode saturation currents,  $V_t$  is the thermal voltage,  $N$  and  $N_2$  are the quality factors (diode emission coefficients) and  $I_{ph}$  is the solar-generated current.

Models of reduced complexity can be specified in the mask. The quality factor varies for amorphous cells, and typically has a value in the range of 1 to 2. The physical signal input  $I_r$  is the irradiance (light intensity) in  $W/m^2$  falling on the cell. The solar-generated current  $I_{ph}$  is given by  $I_r \cdot (I_{ph0}/I_{r0})$  where  $I_{ph0}$  is the measured solar-generated current for irradiance  $I_{r0}$ .

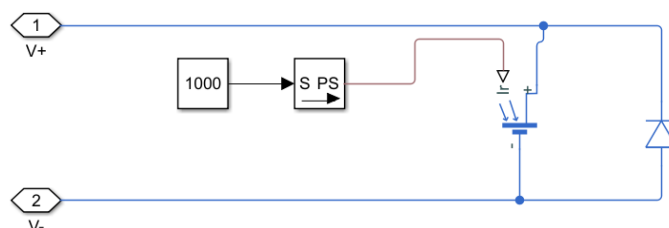
**Settings**

Cell Characteristics   Configuration   Temperature Dependence

Number of series cells:

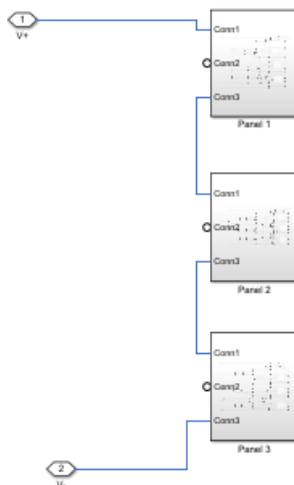
Σχήμα 4.4: Τέσσερα photovoltaic solar cells συνδεδεμένα σε σειρά.

Η σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά, δημιουργεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο (solar panel). Αν χρησιμοποιηθεί το παράδειγμα του σχήματος (4.4), αυτό σημαίνει πως κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από τέσσερα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Στο σχήμα (4.5) φαίνεται το εσωτερικό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.



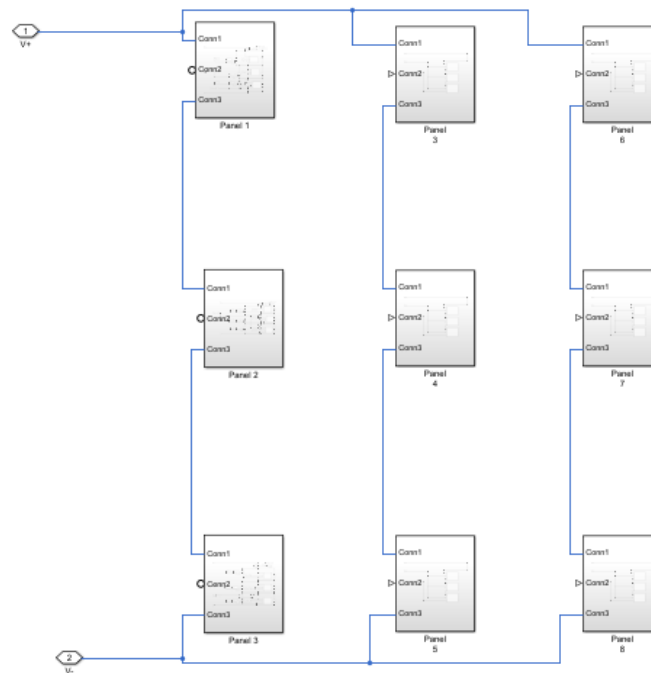
Σχήμα 4.5: Το εσωτερικό ενός Φ/Β πλαισίου.

Πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά σχηματίζουν μια πλαίσιοσειρά (string). Η πλαίσιοσειρά του σχήματος (4.6) αποτελείται από 3 φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, άρα  $4 \times 3 = 12$  φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.



Σχήμα 4.6: Φωτοβολταϊκή πλαίσιοσειρά (string).

Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (solar array) αποτελείται από μία ή περισσότερες πλαίσιοσειρές, συνδεδεμένες παράλληλα. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία του σχήματος (4.7) περιέχει 3 πλαίσιοσειρές, με 3 φωτοβολταϊκά πλαίσια στην καθεμία, οπότε αποτελείται από συνολικά 9 φωτοβολταϊκά πλαίσια.



Σχήμα 4.7: Μια Φ/Β συστοιχία με εννιά Φ/Β πλαίσια.

Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται λέγονται Switch (Σχήμα 4.8). Αυτοί ενεργοποιούνται αν το σήμα εισόδου είναι μεγαλύτερο από ένα Threshold (επιλέχθηκε η τιμή 0). Επομένως, όταν το σήμα εισόδου είναι μεγαλύτερο από 0, ο διακόπτης είναι κλειστός, αλλιώς είναι ανοικτός.



Σχήμα 4.8: Switch (διακόπτης).

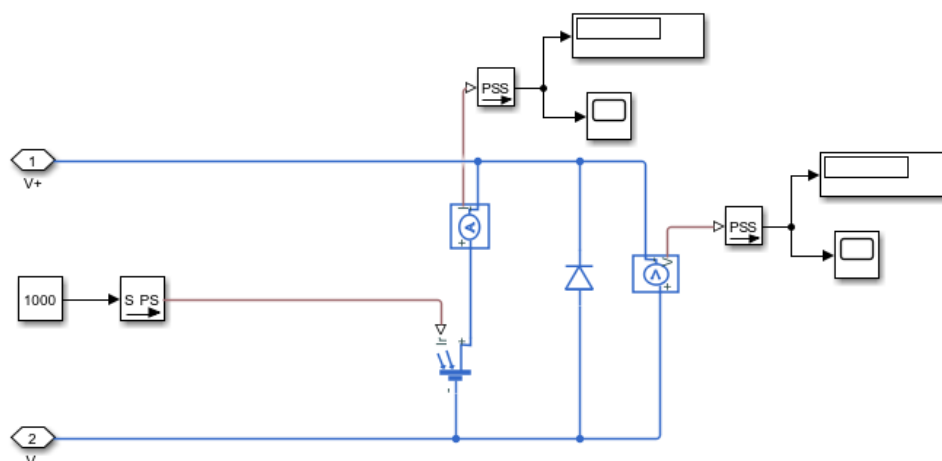
Για να μετρηθεί η τάση και το ρεύμα χρησιμοποιήθηκε Current Sensor και Voltage Sensor (Σχήμα 4.9). Ο Current Sensor συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα, ενώ ο Voltage Sensor

συνδέεται παράλληλα στο κύκλωμα. Ως έξοδο έχουν την τιμή της έντασης του ρεύματος και της τάσης, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9: Current Sensor και Voltage Sensor.

Αφού γίνει η σύνδεση οδηγείται το σήμα σε ένα scope ή σε ένα display για την απεικόνιση του (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Μέτρηση τάσης και ρεύματος σε ένα Φ/Β πλαίσιο.

Με το scope φαίνεται η εξέλιξη του σήματος, για το χρονικό ορίζοντα που έχει ορισθεί, ενώ με το display φαίνεται την τιμή του σήματος κάθε χρονική στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο μετρίεται το ρεύμα και η τάση του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου.

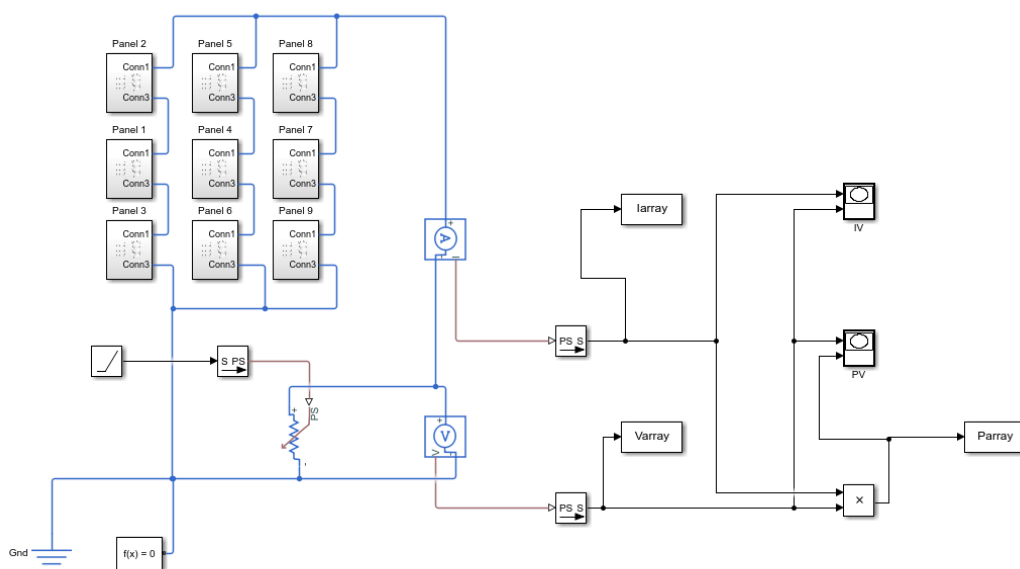
Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης. Για να παρουσιαστεί όλη η χαρακτηριστική, χρησιμοποιείται μια αντίσταση η οποία ξεκινάει από την τιμή 0 και

φτάνει μέχρι μια πολύ μεγάλη τιμή (σχεδόν άπειρο). Το component που χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η αντίσταση λέγεται Variable Resistor (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Variable Resistor.

Ως είσοδος στην αντίσταση έχει οριστεί ένα σήμα που ξεκινάει από την τιμή 0 και συνεχώς αυξάνεται όσο εκτελείται η προσομοίωση. Το τελικό κύκλωμα που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα (4.12).

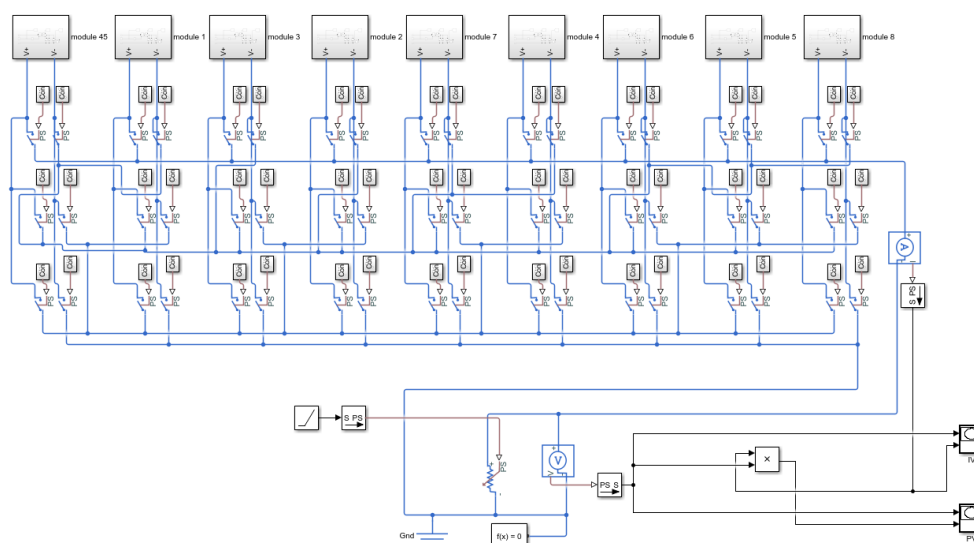


Σχήμα 4.12: Μια Φ/Β συστοιχία με εννιά Φ/Β πλαίσια τροφοδοτεί ένα ηλεκτρικό φορτίο.

Το σύστημα αυτό περιέχει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με 9 φωτοβολταϊκά πλαίσια, μια αντίσταση που αυξάνει την τιμή της, έναν μετρητή ρεύματος και έναν μετρητή τάσης.

Για τον υπολογισμό της ισχύος πολλαπλασιάζεται το ρεύμα με την τάση κάθε χρονική στιγμή.

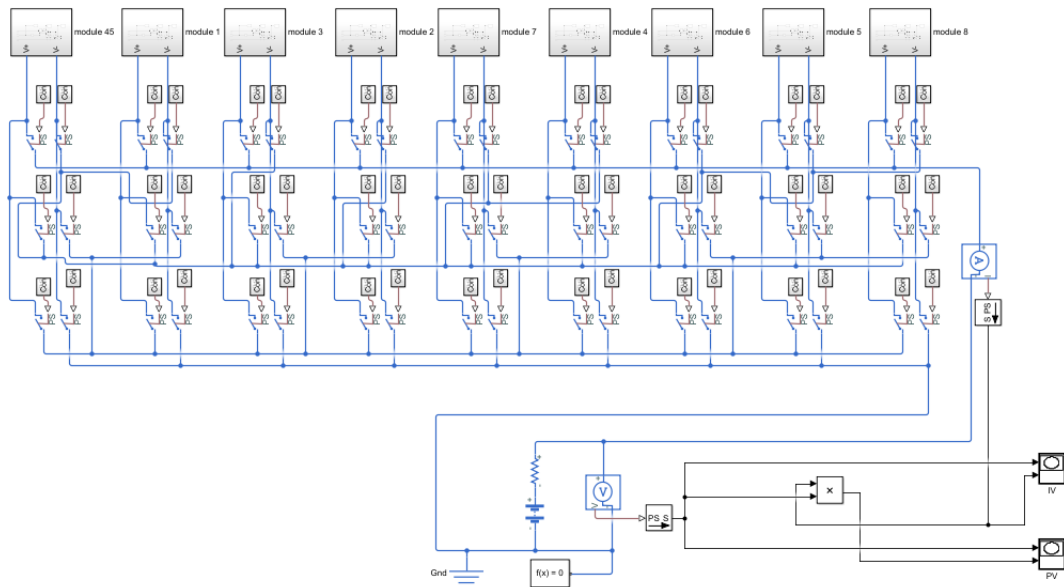
Σκοπός είναι να χρησιμοποιηθούν οι διακόπτες ώστε να αλλάζουν οι συνδέσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τη μεγιστοποίηση της ισχύος. Ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται οι διακόπτες φαίνεται στο σχήμα (4.13).



Σχήμα 4.13: Υλοποίηση Φ/Β συστοιχίας με δυνατότητα αναδιάταξης των Φ/Β πλαισίων στο Simulink.

Στο σχήμα (4.13) φαίνονται τα 9 φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με 6 διακόπτες το καθένα, τρία ζευγάρια διακοπών για κάθε πλαισιοσειρά. Οι διακόπτες χρησιμοποιούνται σε ζευγάρια, ένας για το θετικό άκρο και ένας για το αρνητικό. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές πλαισιοσειρές. Με τα κατάλληλα σήματα ελέγχου ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες και συνδέονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε όποια πλαισιοσειρά τους υποδείξει ο αλγόριθμος. Με αυτόν τον τρόπο αναδιατάσσονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο.

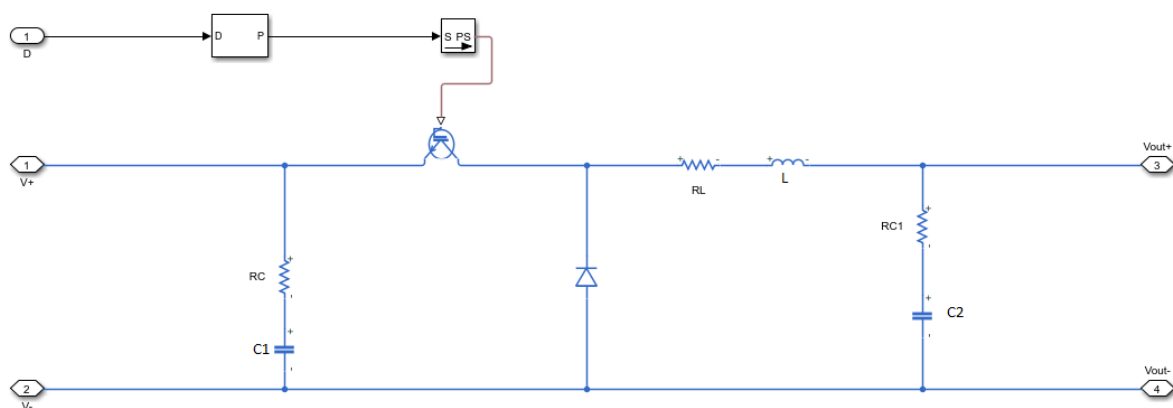
Σε ένα πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα υπάρχει κάποιος καταναλωτής στην έξοδο στην φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ο καταναλωτής που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια μπαταρία 12 V. Στο σχήμα (4.14) φαίνεται η σύνδεση της μπαταρίας με το φωτοβολταϊκό σύστημα του Σχήματος (4.13).



Σχήμα 4.14: Φ/Β συστοιχία με μια μπαταρία στην έξοδο.

## 4.2 Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης

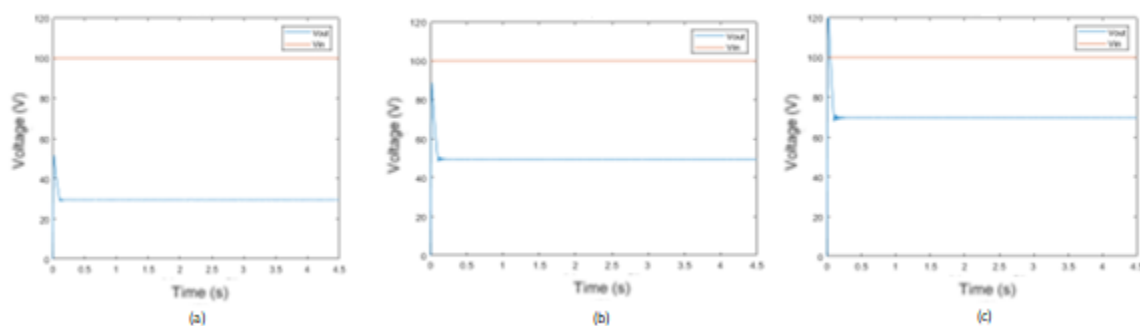
Ένας μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης συνδέεται στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος συνδέεται στο φορτίο. Το κύκλωμα του μετατροπέα DC/DC φαίνεται στο σχήμα (4.15).



Σχήμα 4.15: Το κύκλωμα του μετατροπέα DC./DC υποβιβασμού τάσης στο Simulink.

Ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης αποτελείται από τον πυκνωτή εξόδου C2 με χωρητικότητα 200  $\mu\text{F}$ , τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης και το πηνίο L με αυτεπαγωγή 1 mH. Το ημιαγωγικό στοιχείο που χρησιμοποιείται ως διακόπτης είναι ένα IGBT τρανζίστορ. Η συχνότητα PWM που ελέγχει τον μετατροπέα είναι 10 kHz. Συνδέεται επίσης ένας πυκνωτής C1 στην είσοδο για μείωση της κυμάτωσης του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα.

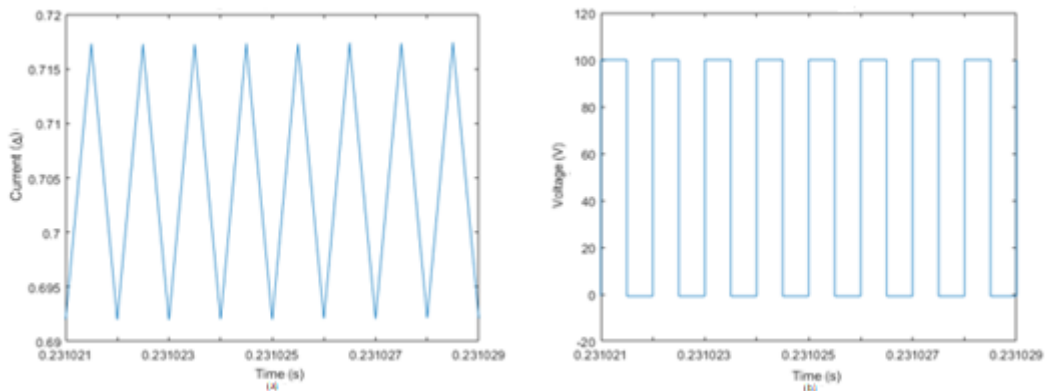
Για να δοκιμαστεί η ορθή λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, τοποθετήθηκε στην είσοδο μια σταθερή πηγή τάσης 100 V. Δοκιμάστηκε για τρεις διαφορετικές τιμές του σήματος εισόδου D (duty cycle του σήματος ελέγχου του διακόπτη).



Σχήμα 4.16: Οι τιμές της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου για (α)  $D=0.3$ , (β)  $D=0.5$  και (γ)  $D=0.7$ .

Στο σχήμα (4.16) φαίνεται η τιμή της τάσης εισόδου 100 V, καθώς και η τιμή της τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου διαφέρει ανάλογα με το σήμα ελέγχου D. Στην πρώτη χαρακτηριστική το D είναι ίσο με 0.3 και η τάση εξόδου είναι ίση με 29.44 V. Στη δεύτερη το D είναι ίσο με 0.5 και η τάση εξόδου ίση με 49.51 V και στην τρίτη το D είναι 0.7 και η τάση εξόδου ίση με 69.61 V.

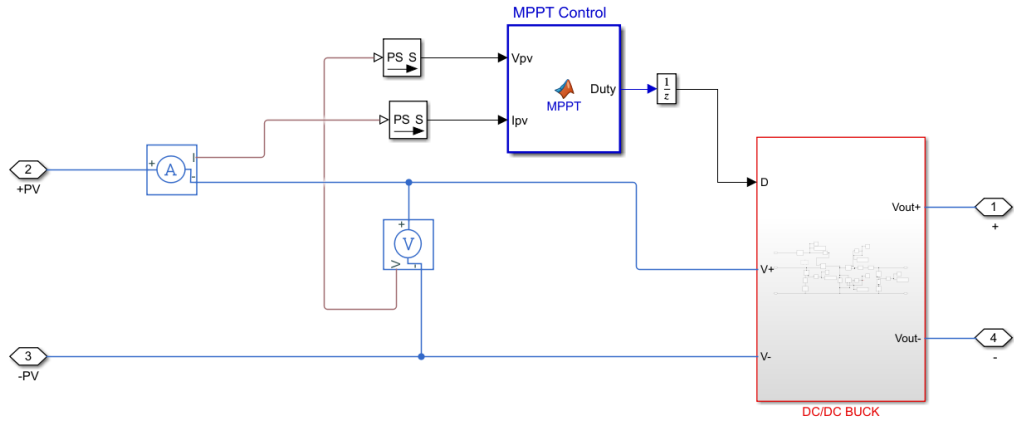
Στο σχήμα (4.17) παρουσιάζονται στιγμιότυπα της χαρακτηριστικής του ρεύματος του πηνίου και της τάσης της διόδου.



Σχήμα 4.17: (α) Το Ρεύμα του πηνίου και (β) Η τάση της διόδου.

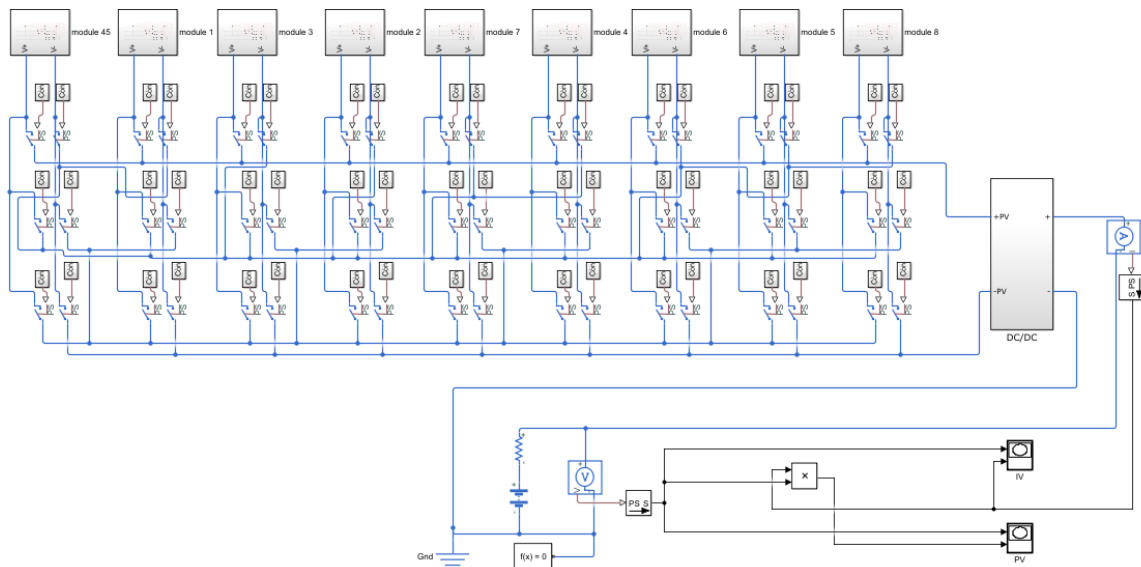
## 4.4 Μονάδα ελέγχου MPPT

Η μονάδα ελέγχου MPPT δέχεται συνεχώς την τιμή του ρεύματος και της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και υλοποιεί τον εκάστοτε αλγόριθμο εύρεσης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Επιστρέφει την τιμή D του σήματος ελέγχου του μετατροπέα ισχύος. Στο Σχήμα (4.18) παρουσιάζεται η μονάδα ελέγχου με τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης του Σχήματος (4.15) στο Simulink.



Σχήμα 4.18: Η μονάδα ελέγχου MPPT και ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης στο Simulink.

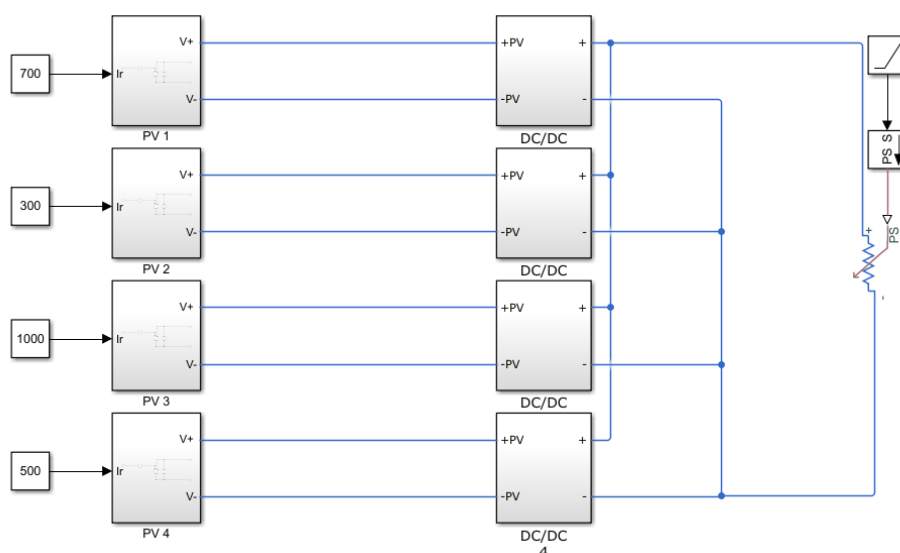
Στο Σχήμα (4.19) παρουσιάζεται η χρήση του μετατροπέα ισχύος με την μονάδα ελέγχου MPPT στην υλοποίηση του Σχήματος (4.14). Η υλοποίηση αυτή αφορά μία φωτοβολταϊκή συστοιχία με εννιά φωτοβολταϊκά πλαίσια, έναν μετατροπέα ισχύος, μια μονάδα ελέγχου MPPT και μία μπαταρία 12 V.



Σχήμα 4.19: Φ/Β συστοιχία με μετατροπέα ισχύος στην έξοδο.

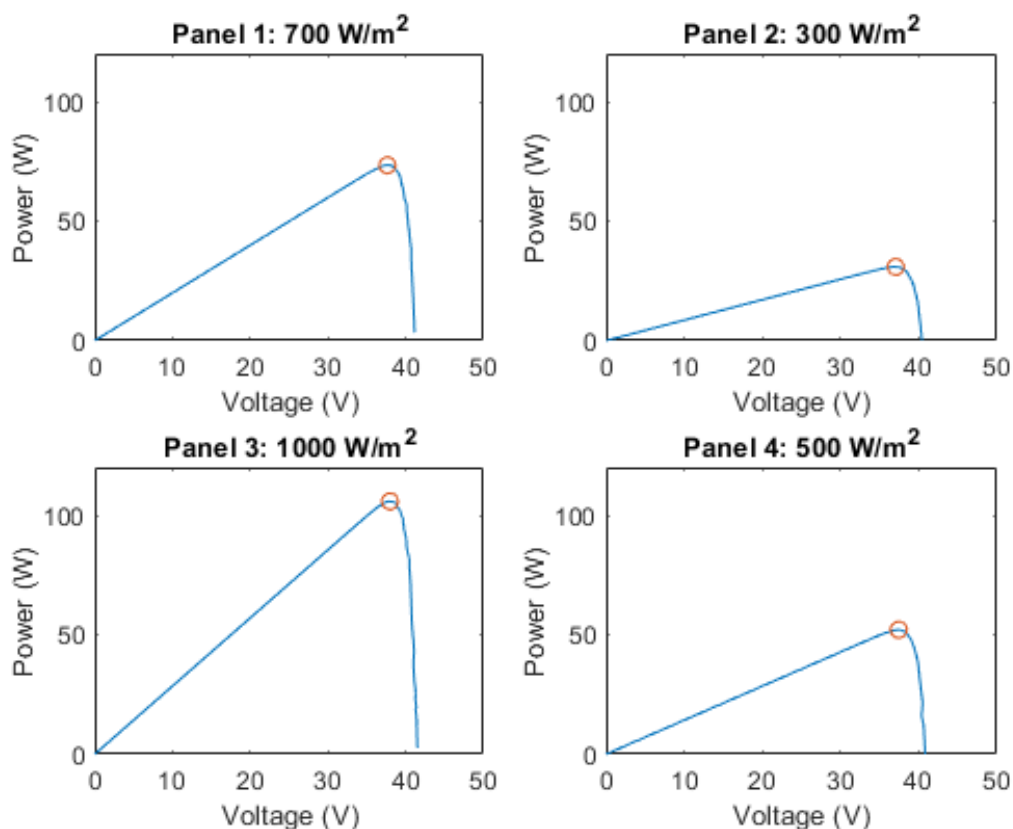
## 4.6 Έλεγχος ορθής λειτουργίας μετατροπέα ισχύος και μονάδας ελέγχου MPPT με τη μέθοδο P&O.

Σε αυτή την ενότητα ελέγχεται η ορθή λειτουργία του μετατροπέα ισχύος με τη χρήση της μονάδας ελέγχου MPPT στη διάταξη Module-Integrated Converter. Χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η ηλιακή ακτινοβολία σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι διαφορετική. Στο Σχήμα (4.20) παρουσιάζεται το σύστημα αυτό στο Simulink.



Σχήμα 4.20: Φ/B συστοιχία με μετατροπέα ισχύος DC/DC σε κάθε Φ/B πλαίσιο.

Στο σχήμα (4.21) φαίνονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 4.21: Οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης του κάθε  $\Phi/B$  πλαισίου.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται διαφορετική ηλιακή ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό οι χαρακτηριστικές τους είναι διαφορετικές όπως φαίνεται στο Σχήμα (4.21). Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο περισσότερη ισχύς παράγεται. Το βέλτιστο σημείο λειτουργίας σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι διαφορετικό λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται.

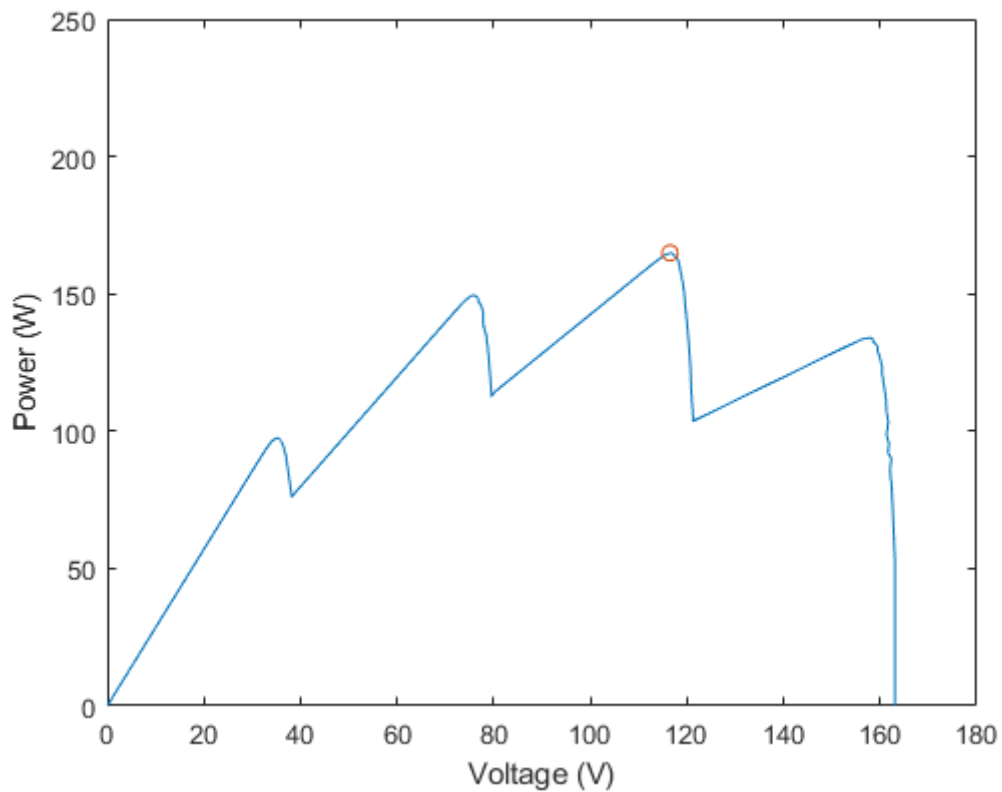
Με τη χρήση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και της μονάδας ελέγχου MPPT κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του. Μετρώντας την ισχύ στην έξοδο του κάθε μετατροπέα, τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

<b>Πίνακας 4.1. Ισχύς στην έξοδο του κάθε μετατροπέα σε κάθε Φ/Β πλαίσιο.</b>			
<b>Φ/Β πλαίσιο</b>	<b>Ηλιακή ακτινοβολία (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ισχύς (W)</b>	<b>Τάση V<sub>mpp</sub> (V)</b>
Panel 1	700	73.48	37.63
Panel 2	300	30.83	37.07
Panel 3	1000	105.89	37.98
Panel 4	500	52.05	37.44

Ο αλγόριθμος MPPT εντοπίζει σε κάθε περίπτωση το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στη συνέχεια με το σήμα ελέγχου του μετατροπέα που παράγει στην έξοδό του, αναγκάζει το εκάστοτε φωτοβολταϊκό πλαίσιο να λειτουργήσει στο σημείο αυτό.

Ο αλγόριθμος P&O έχει κάποια απόκλιση από το βέλτιστο σημείο. Οι πραγματικές τιμές είναι για το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 73.62 W, για το δεύτερο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 38.9 W, για το τρίτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 106.1 W και για το τέταρτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 52.3 W. Αυτό σημαίνει πως η ισχύς που παράγεται στην έξοδο του μετατροπέα έχει μια απόκλιση περίπου 99.8 % από την πραγματική μέγιστη ισχύ. Η συνολική ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι 261.6 W.

Εάν συνδέονταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά, χωρίς τη χρήση του μετατροπέα ισχύος και της μονάδας ελέγχου, η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας θα παρουσίαζε πολλά τοπικά μέγιστα Σχήμα (4.22).



*Σχήμα 4.22: Οι χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της  $\Phi/B$  συστοιχίας εάν συνδέονταν τα  $\Phi/B$  πλαίσια σε σειρά.*

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται είναι 164.8 W. Επομένως η μέθοδος Module-Integrated Converter με τη χρήση του αλγορίθμου P&O για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου προσφέρει μια αύξηση 58.7 % στην παραγόμενη ισχύ.

## 4.7 Έλεγχος ορθής λειτουργίας μετατροπέα ισχύος και μονάδας ελέγχου MPPT με τη μέθοδο VW.

Σε αυτή την ενότητα ελέγχεται η ορθή λειτουργία του μετατροπέα ισχύος με τη χρήση της μονάδας ελέγχου MPPT στη διάταξη Module-Integrated Converter. Χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ίδια με του προηγούμενου κεφαλαίου, Σχήμα (4.20). Η διαφορά είναι πως για τον εντοπισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Voltage Window.

Με τη χρήση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και της μονάδας ελέγχου MPPT κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του. Μετρώντας την ισχύ στην έξοδο του κάθε μετατροπέα, τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.1. Ισχύς στην έξοδο του κάθε μετατροπέα σε κάθε Φ/Β πλαίσιο.			
Φ/Β πλαίσιο	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Ισχύς (W)	Τάση $V_{mpp}$ (V)
Panel 1	700	69.8	35.78
Panel 2	300	29.9	35.21
Panel 3	1000	100.6	36.1
Panel 4	500	49.45	35.6

Ο αλγόριθμος VW έχει κάποια απόκλιση από το βέλτιστο σημείο. Οι πραγματικές τιμές είναι για το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 73.62 W, για το δεύτερο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 38.9 W, για το τρίτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 106.1 W και για το τέταρτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 52.3 W. Αυτό σημαίνει πως η ισχύς που παράγεται στην έξοδο του μετατροπέα έχει μια απόκλιση περίπου 95.1 % από την πραγματική μέγιστη ισχύ. Η συνολική ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι 248.6 W.

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται αν συνδεθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά είναι 164.8 W. Επομένως η μέθοδος Module-Integrated Converter με τη χρήση του αλγορίθμου VW για την

εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου προσφέρει μια αύξηση 50.8 % στην παραγόμενη ισχύ.

# 5.

## Αποτελέσματα

---

Στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο σε παραδείγματα για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματά τους. Αρχικά παρουσιάζεται ο κάθε αλγόριθμος σε κάποια παραδείγματα μόνος του και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των τριών αλγορίθμων σε ένα μεγαλύτερο παράδειγμα.

Έχουν υλοποιηθεί τρία παραδείγματα για τον πρώτο αλγόριθμο, τέσσερα για τον δεύτερο και πέντε για τον τρίτο. Για τη σύγκρισή τους έχουν υλοποιηθεί τρία διαφορετικά παραδείγματα σε μια κοινή υλοποίηση. Σε αυτά τα τρία παραδείγματα χρησιμοποιείται επίσης η μέθοδος Module-Integrated Converter.

## 5.1 Αλγόριθμος MPP Candidates

Για τον πρώτο αλγόριθμο έχουν υλοποιηθεί δύο διαφορετικά παραδείγματα.

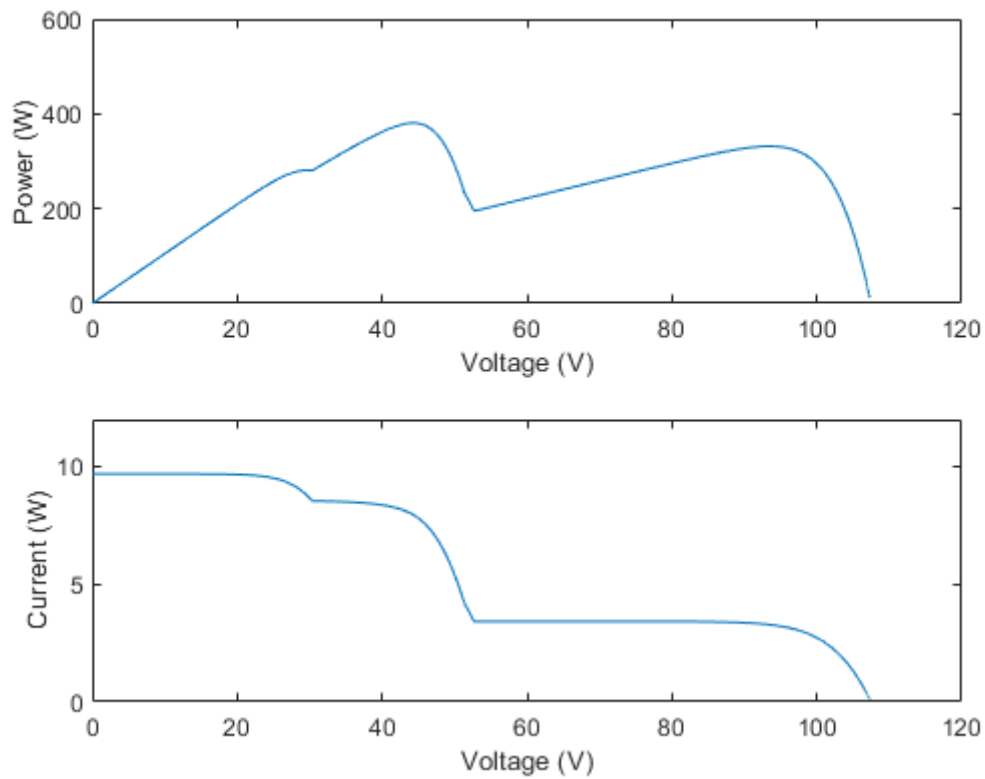
5.1.1  
5.1.1  
5.1.1  
5.1.1  
5.1.1

### 5.1.1 Δύο πλαισιοσειρές με δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια η κάθε μία

Σε αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με δύο πλαισιοσειρές και δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια στην καθεμία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος φαίνονται στον Πίνακα (5.1).

Πίνακας 5.1. Σύνολο δεδομένων Φ/Β πλαισίων στο πρώτο παράδειγμα.				
Φ/Β πλαίσιο	V <sub>mpp</sub> (V)	I <sub>mpp</sub> (A)	M <sub>pp</sub> (W)	G <sub>m</sub> (W/m <sup>2</sup> )
P1	[19.1,19.1,19.1]	[4.7,4.7,4.7]	[89.8,89.8,89.8]	[900,900,900]
P2	[17.4,17.4,17.4]	[1.5,1.5,1.5]	[26.1,26.1,26.1]	[300,300,300]
P3	[18.8,18.8,17.4]	[4.2,4.2,1.5]	[79,79,26.1]	[800,800,300]
P4	[17.4,17.4,17.4]	[3.1,1.5,1.5]	[53.9,26.1,26.1]	[600,300,300]

Στο Σχήμα (5.1) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης του συστήματος πριν την αναδιάταξη.



Σχήμα 5.1: Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης του δεύτερου παραδείγματος πριν την αναδιάρθρωση.

Ο αλγόριθμος ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Δέχεται την τάση και το ρεύμα του κάθε “module”.
- Υπολογίζει τη μέγιστη ισχύ  $M_{pp}$  που είναι ικανό να παράξει το κάθε “module” και αποθηκεύει το ρεύμα και την τάση που δίνουν αυτή την ισχύ ( $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ).
- Παίρνει όλα τα ρεύματα  $I_{mpp}$  και τα αποθηκεύει σε ένα Πίνακα με αύξουσα σειρά. Στη συνέχεια τα ρεύματα που έχουν την ίδια τιμή  $\pm 5\%$  τα αποθηκεύει μία φορά και αυξάνει το δείκτη τους κατά ένα. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στον Πίνακα (5.2).

<b>Πίνακας 5.2. Τα ρεύματα <math>I_{mpp}</math> σε αύξουσα σειρά και οι δείκτες τους.</b>				
<b><math>I_{mpp}</math> (A)</b>	1.5	3.1	4.2	4.7
<b>Pointer</b>	6	1	2	3

Όπως φαίνεται στον Πίνακα (5.2), στη συστοιχία υπάρχουν έξι “modules” με ρεύμα  $I_{mpp} = 1.5$  A, ένα με ρεύμα  $I_{mpp} = 3.1$  A, δύο με ρεύμα  $I_{mpp} = 4.2$  A και τρία με ρεύμα  $I_{mpp} = 4.7$  A.

Σε αυτό το παράδειγμα υπάρχουν δύο δυνατές πλαισιοσειρές όπου μπορούν να συνδεθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για αυτό το λόγο ορίζεται ο Πίνακας  $I_{mppk}$ , Πίνακας (5.3), ο οποίος περιέχει ζευγάρια ρεύματος  $I_{mpp}$ . Αυτό συμβαίνει γιατί οι δύο πλαισιοσειρές είναι πιθανό να έχουν διαφορετικό ρεύμα. Ο Πίνακας (5.3) περιέχει τα ζευγάρια ρεύματος.

<b>Πίνακας 5.3. Τα ζευγάρια ρεύματος (<math>I_{mppk}</math>).</b>				
[1.5,1.5]	[1.5,3.1]	[1.5,4.2]	[1.5,4.7]	[3.1,3.1]
[3.1,4.2]	[3.1,4.7]	[4.2,4.2]	[4.2,4.7]	[4.7,4.7]

Η τάση που δίνει τη μέγιστη ισχύ σε ένα “module” είναι ίση με το 73–80% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Συνεπώς τα ενεργά modules λειτουργούν στο εύρος τάσεων  $[V_{mpp}, 1.37 \times V_{mpp}]$ , όπου  $1/0.73 = 1.37$ . Ενεργά λέγονται τα modules που έχουν ρεύμα  $I_{mppi}$  μεγαλύτερο από το  $I_{mpp}$ . Αν  $N$  ο αριθμός των ενεργών modules τότε η τιμή της τάσης σε αυτά τα modules είναι μεταξύ του εξής εύρους τιμών:

$$\left[ \sum_{i=1}^N V_{mppi}, 1.37 \times \sum_{i=1}^N V_{mppi} \right] \quad (5.1)$$

Το πρόβλημα στο άθροισμα της σχέσης (5.1) είναι πως προσθέτει και την τάση ανοιχτοκύκλωσης στο τελικό αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο μέσος όρος του  $V_{mpp}$  και  $1.37 \times V_{mpp}$ , άρα το  $1.18 \times V_{mpp}$ . Μπορεί η τάση σε κάθε “module” να είναι διαφορετική, όμως οι διαφορές των τάσεων  $V_{mpp}$  είναι μικρές. Έτσι, χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των  $V_{mpp}$  και συμπληρώνεται το κάθε κελί του Πίνακα (5.4) με το γινόμενο του πρώτου με τον αριθμό της στήλης. Ο μέσος όρος των τάσεων είναι 19.1 V . Το δεύτερο στοιχείο του Πίνακα θα έχει την τιμή  $19.1 \text{ V} \times 2$ , το τρίτο  $19.1 \text{ V} \times 3$  κλπ. Για τα στοιχεία του Πίνακα υπάρχει μια ανοχή  $\pm 18\%$  για τον λόγο που εξηγήθηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα (5.4).

<b>Πίνακας 5.4. Οι τιμές της τάσης <math>V_{mpp}</math>.</b>						
<b><math>V_{mpp}(\text{V})</math></b>	19.1	38.2	57.3	76.5	95.5	114.6

Πλέον έχουν υπολογιστεί οι πίνακες  $V_{mpp}$  και  $I_{mpp}$ . Ο αλγόριθμος αναζητά το ζευγάρι ρεύματος-τάσης για να καταλήξει στη βέλτιστη αναδιάταξη. Για να επιτευχθεί αυτό, εξετάζει πόσα “modules” λειτουργούν σε κάθε τιμή του Πίνακα  $I_{mppk}$ , Πίνακας (5.3). Για παράδειγμα στην τιμή  $I_{mppk} = 4.2 \text{ A}$  λειτουργούν πέντε “modules”. Για να υπολογιστούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί χρησιμοποιείται ο Πίνακας Q, ο οποίος είναι ίδιου μεγέθους με τον Πίνακα  $I_{mpp}$  και έχει την πληροφορία για το πλήθος των modules που λειτουργούν στην αντίστοιχη τιμή του ρεύματος του Πίνακα  $I_{mppk}$ .

Ο Πίνακας Q (Πίνακας 5.5) θα περιέχει σε κάθε κελί δύο τιμές αφού το σύστημα αποτελείται από δύο πλαισιοσειρές. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στο πλήθος των “modules” που λειτουργούν για κάθε τιμή  $I_{mpp}$ .

<b>Πίνακας 5.5. Το πλήθος των modules που λειτουργούν σε κάθε τιμή <math>I_{mpp}</math>.</b>										
<b>Q</b>	[12,12]	[12,6]	[12,5]	[12,3]	[6,6]	[6,5]	[6,3]	[5,5]	[5,3]	[3,3]

Εφαρμόζοντας τη Σχέση (3.1), τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα (5.6).

**Πίνακας 5.6. Το τελικό πλήθος των modules που λειτουργούν σε κάθε τιμή  $I_{mpp}$ .**

<b>Q</b>	[6,6]	[6,6]	[5,5]	[3,3]	[3,3]	[3,3]	[3,3]	[2,2]	[2,2]	[1,1]
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

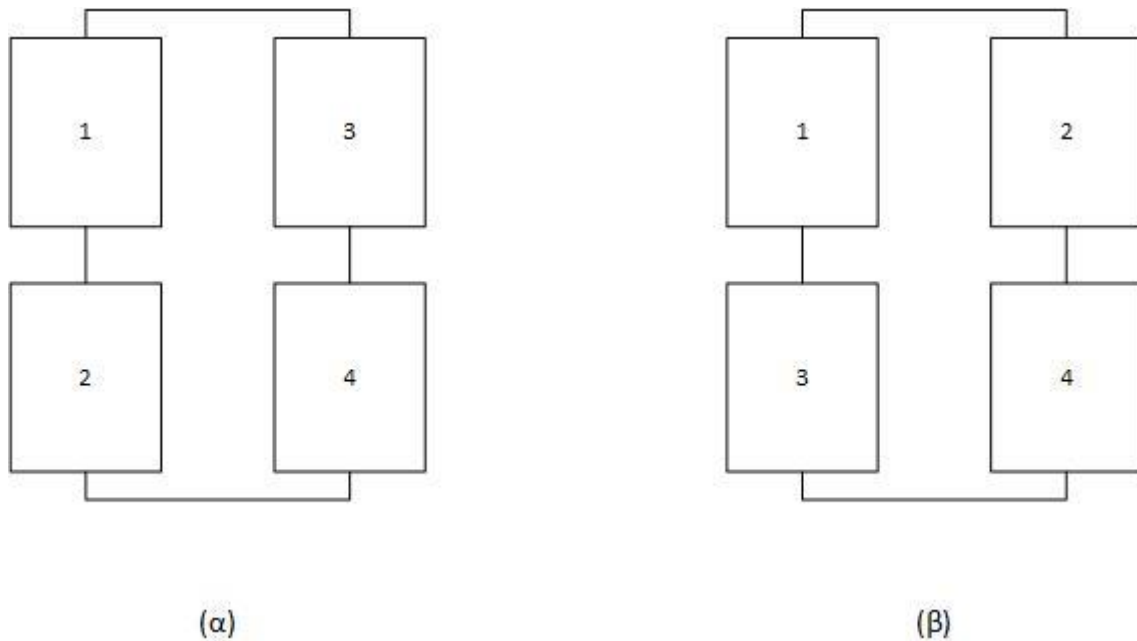
Με τη χρήση όλων των παραπάνω προκύπτει ο power matrix του Πίνακα (5.7). Το πλήθος των γραμμών σε κάθε στήλη του power matrix δίνεται από το εκάστοτε κελί του Πίνακα Q. Η πρώτη στήλη θα έχει 0 μη-μηδενικές γραμμές, η δεύτερη 0, η τρίτη 1 κλπ. Στο πρώτο κελί της πρώτης στήλης του Πίνακα (5.7) αποθηκεύεται το γινόμενο του πρώτου κελιού του Πίνακα  $I_{mppk}$  με το πρώτο κελί του Πίνακα  $V_{mpp}$ , δηλαδή  $1.5 \text{ A} \times 19.1 \text{ V} + 1.5 \text{ A} \times 19.1 \text{ V} = 57.3 \text{ W}$ . Στο δεύτερο κελί της πρώτης στήλης αποθηκεύεται το γινόμενο της πρώτης στήλης του Πίνακα  $I_{mpp}$  με το δεύτερο κελί του Πίνακα  $V_{mpp}$ , δηλαδή  $1.5 \text{ A} \times 38.2 \text{ V} + 1.5 \text{ A} \times 38.2 \text{ V} = 114.6 \text{ W}$ . Αφού ολοκληρώσει την πρώτη στήλη συνεχίζει στη δεύτερη. Στο πρώτο κελί της δεύτερης στήλης του Πίνακα αποθηκεύεται το γινόμενο του δεύτερου κελιού του Πίνακα  $I_{mpp}$  με το πρώτο κελί του Πίνακα  $V_{mpp}$ , δηλαδή  $1.5 \text{ A} \times 19.1 \text{ V} + 3.1 \text{ A} \times 19.1 \text{ V} = 87.9 \text{ W}$ . Ο αλγόριθμος συνεχίζει τους υπολογισμούς μέχρις ότου ολοκληρωθεί ο Πίνακας (5.7).

**Πίνακας 5.7. Power Matrix με τιμές ισχύος (W).**

<b>V/I</b>	1.5,1.5	1.5,3.1	1.5,4.2	1.5,4.7	3.1,3.1	3.1,4.2	3.1,4.7	4.2,4.2	4.2,4.7	4.7,4.7
19.1	57.3	87.9	108.9	118.4	118.4	139.4	150	160.4	170	179.6
38.2	114.6	175.7	217.7	236.8	236.8	278.9	278	320.9	340	0
57.3	171.9	263.6	326.6	355.3	355.3	418.3	<b>446.9</b>	0	0	0
76.5	229.5	351.9	<b>436.1</b>	0	0	0	0	0	0	0
95.5	286.5	<b>439.3</b>	<u><b>544.4</b></u>	0	0	0	0	0	0	0
114.6	343.8	<b>527.2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

Η μέγιστη συνολική ισχύς είναι 544.4 W, η οποία παράγεται αν συνδεθούν πέντε modules σε σειρά σε κάθε πλαισιοσειρά. Η μία πλαισιοσειρά έχει ρεύμα 1.5 A και η άλλη ρεύμα 4.2 A. Αυτό σημαίνει πως στη μία πλαισιοσειρά πρέπει να υπάρχουν πέντε “modules” με ρεύμα τουλάχιστον 1.5 A και στην άλλη πλαισιοσειρά πέντε “modules” με ρεύμα τουλάχιστον 4.2 A.

Επομένως στη μία πλαίσιοσειρά (αυτή με τα 4.2 A) θα συνδεθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια 1 και 3 καθώς αποτελούνται από τρία και δύο τέτοια “modules” αντίστοιχα. Ομοίως και στη δεύτερη πλαίσιοσειρά (αυτή με τα 1.5 A) θα συνδεθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια 2 και 4. Στο Σχήμα (5.2) παρουσιάζεται η διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας πριν και μετά τη χρήση του αλγορίθμου.

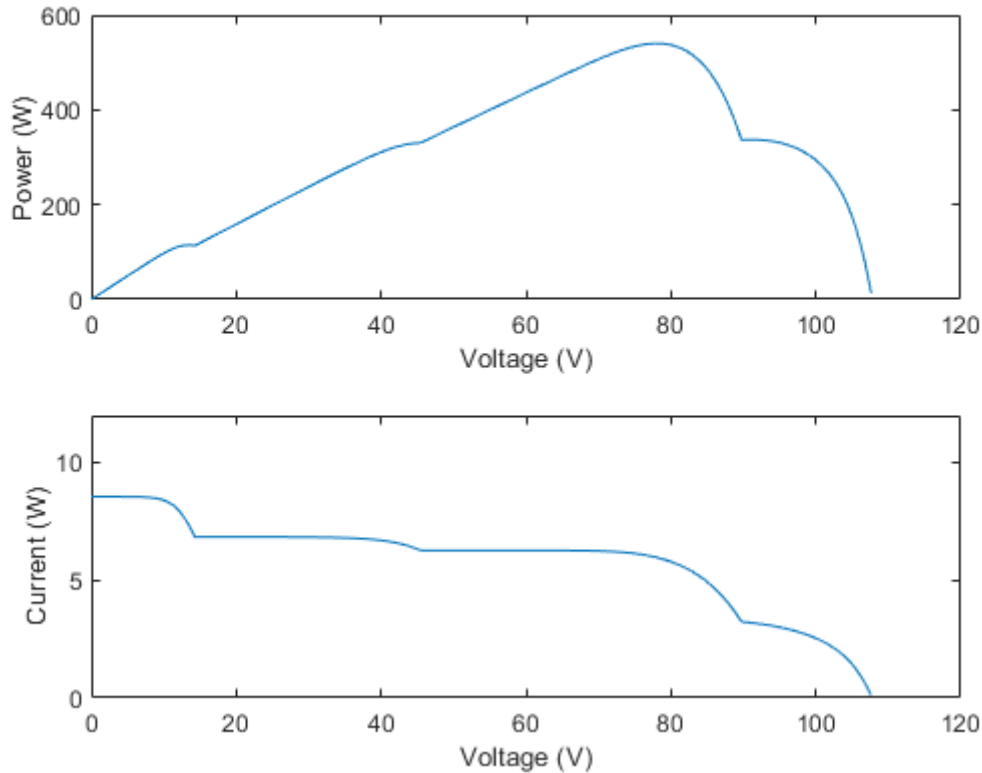


Σχήμα 5.2: Η διάταξη της Φ/Β συστοιχίας (α) πριν και (β) μετά τη χρήση του αλγορίθμου.

Ωστόσο οι τιμές των  $I_{mpk}$  και  $V_{mpk}$  έχουν ανοχή  $\pm 5\%$  και  $\pm 18\%$  αντίστοιχα, επομένως ο power matrix θα έχει μια ανοχή  $\pm 23\%$ . Για αυτό το λόγο πρέπει να ληφθούν υπόψη και τιμές που είναι μεγαλύτερες από  $544 - 23\% = 419.2$  W. Οι τιμές αυτές είναι με έντονα νούμερα στον power matrix, Πίνακας (5.7).

Ένας τελευταίος περιορισμός είναι αυτός που δίνει ο μετατροπέας ισχύος. Ο μετατροπέας DC/DC που θα συνδεθεί στη φωτοβολταϊκή συστοιχία, δέχεται ως είσοδο μια τάση που πρέπει να είναι ανάμεσα στο εύρος τιμών  $[V_{inmin}, V_{inmax}]$ , όπου  $V_{inmin}$  η ελάχιστη τάση εισόδου του μετατροπέα και  $V_{inmax}$  η μέγιστη. Αν η τάση που έχει δώσει ως βέλτιστη ο αλγόριθμος, είναι εκτός των ορίων του μετατροπέα ισχύος, τότε επιλέγεται ο αμέσως επόμενος συνδυασμός. Στο παράδειγμα αυτό ο επόμενος συνδυασμός βρίσκεται στη γραμμή 6 και στήλη 2 και έχει ως αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να είναι 527.2 W. Επιλέγει δηλαδή ο αλγόριθμος την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή του Πίνακα (5.7).

Οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης μετά την αναδιάταξη φαίνονται στο σχήμα (5.3).



Σχήμα 5.3: Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης του δεύτερου παραδείγματος μετά την αναδιάταξη.

Η μέγιστη ισχύς πριν την αναδιάταξη είναι 380.8 W, ενώ μετά την αναδιάταξη είναι 540.1 W. Μετά την αναδιάταξη η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται κατά 41.8 %.

### 5.1.2 Δύο πλαισιοσειρές με έξι φωτοβολταϊκά πλαίσια η κάθε μία

Σε αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με δύο πλαισιοσειρές με έξι φωτοβολταϊκά πλαίσια στην καθεμία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος φαίνονται στον Πίνακα (5.8).

**Πίνακας 5.8. Σύνολο δεδομένων Φ/Β πλαισίων στο δεύτερο παράδειγμα.**

<b>Φ/Β πλαίσιο</b>	<b><math>V_{mpp}</math> (V)</b>	<b><math>I_{mpp}</math> (A)</b>	<b><math>M_{pp}</math> (W)</b>	<b><math>G_m</math> (W/m<sup>2</sup>)</b>
P1	[19.2,15.8,15.8]	[5.2,0.5,0.5]	[99.8,7.9,7.9]	[1000,100,100]
P2	[19.2,18.2,18.2]	[5.2,2.6,2.6]	[99.8,47.3,47.3]	[1000,500,500]
P3, P6 έως P12	[19.2,19.2,19.2]	[5.2,5.2,5.2]	[99.8, 99.8, 99.8]	[1000,1000,1000]
P4, P5	[19.2,18.1,17.5]	[5.2,2.6,1.6]	[99.8,47,28]	[1000,500,300]

Οι τιμές  $I_{mpp}$  φαίνονται στον Πίνακα (5.9).

**Πίνακας 5.9. Τα ρεύματα  $I_{mpp}$  σε αύξουσα σειρά και οι δείκτες τους.**

<b><math>I_{mpp}</math> (A)</b>	0.5	1.6	2.6	5.2
<b>Pointer</b>	2	2	4	28

Τα ζευγάρια  $I_{mppk}$  φαίνονται στον Πίνακα (5.10).

**Πίνακας 5.10. Τα ζευγάρια ρεύματος ( $I_{mppk}$ ).**

[0.5,0.5]	[0.5,1.6]	[0.5,2.6]	[0.5,5.2]	[1.6,1.6]
[1.6,2.6]	[1.6,5.2]	[2.6,2.6]	[2.6,5.2]	[5.2,5.2]

Οι τάσεις φαίνονται στον Πίνακα (5.11).

<b>Πίνακας 5.11. Οι τιμές της τάσης <math>V_{mpp}</math>.</b>					
19.9	39.8	59.7	79.7	99.6	119.6
139.5	159.4	179.3	199.3	219.2	239.2
259.1	279	299	318.9	338	359

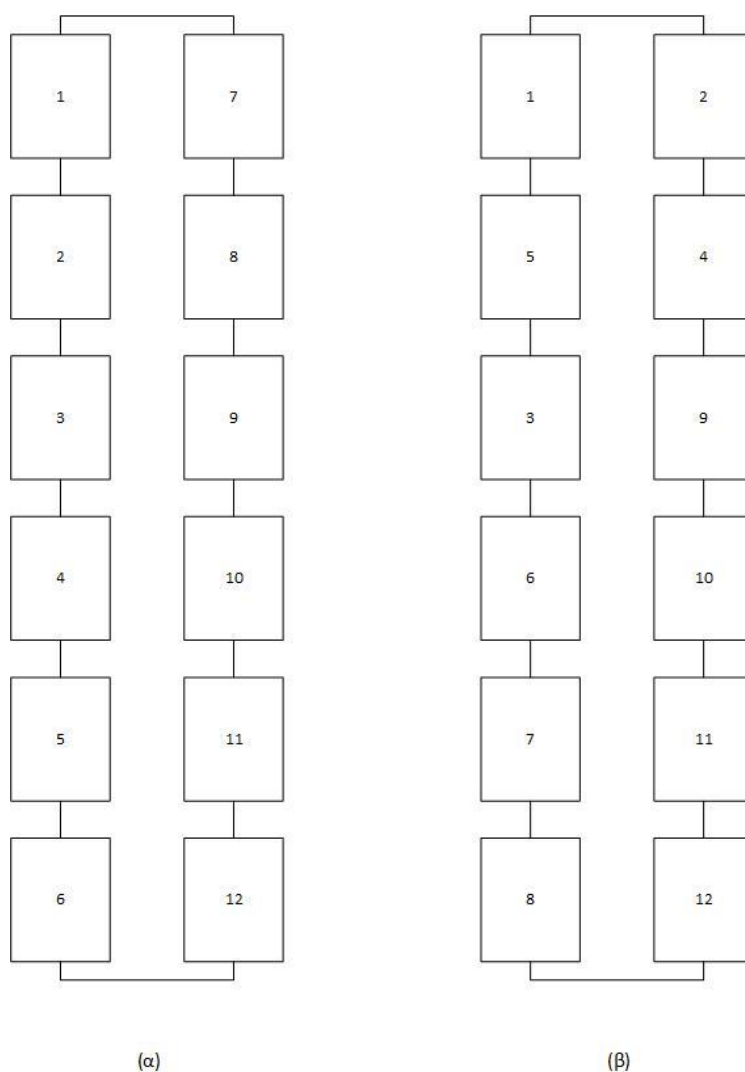
Ο power matrix που προκύπτει είναι ο Πίνακας (5.12).

**Πίνακας 5.12. Power Matrix με τιμές ισχύος (W).**

<b>V/I</b>	<b>0.5,0.5</b>	<b>0.5,1.6</b>	<b>0.5,2.6</b>	<b>0.5,5.2</b>	<b>1.6,1.6</b>	<b>1.6,2.6</b>	<b>1.6,5.2</b>	<b>2.6,2.6</b>	<b>2.6,5.2</b>	<b>5.2,5.2</b>
19.9	19.9	41.8	61.7	113.43	63.8	83.6	135.3	103.5	155.2	206.7
39.8	39.8	83.6	123.4	226.9	127.4	167.2	270.6	207	310.4	413.9
59.7	59.7	123.4	185.1	340.3	191.1	250.7	506	310.4	465.6	620.9
79.7	79.6	167.2	246.8	453.7	254.7	334.3	541.3	413.9	620.9	827.9
99.6	99.5	208.9	308.5	567.2	318.4	417.9	676.6	517.4	776.1	1034.8
119.6	119.4	250.7	370.1	680.6	382.1	501.5	811.9	620.9	931.3	1241.8
139.5	139.3	292.5	431.8	794.1	445.7	585.1	947.2	724.4	1086.5	1448.7
159.4	159.2	334.3	493.5	907.4	509.4	668.6	1080.6	827.8	1241.8	1655.7
179.3	179.1	376.1	555.2	1020.9	573.1	752.2	1217.9	931.3	139.7	1862.6
199.3	199	417.9	616.9	1134.3	636.8	835.8	1353.2	1034.8	1552.2	2069.6
219.2	218.9	459.7	678.6	1247.7	700.5	919.4	1488.5	1138.3	1707.4	<b>2276.6</b>
239.2	238.8	501.5	740.3	1361.2	764.2	1003	1623.8	1241.8	1862.6	<b>2483.5</b>
259.1	258.7	543.3	802	1474.7	827.8	1086.5	1759.2	1345.2	2018	<b>2694.5</b>
279	278.6	585.1	863.7	1588	891.5	1170.1	1894.5	1448.7	2173.1	<b><u>2901.6</u></b>
299	298.5	626.9	925.4	1701.5	955.2	1253.7	2029.8	1552.2	<b>2328.3</b>	0
318.9	318.4	668.6	987.1	1814.9	1018.9	1337.3	2165.1	1655.7	<b>2483.5</b>	0
338	338.3	710.4	1048.7	1928.3	1082.6	1420.9	<b>2300.4</b>	0	0	0
359	358.2	752.2	1110.4	2041.7	0	0	0	0	0	0

Η μέγιστη ισχύς είναι 2901.1 W και δίνεται για το ζεύγος ρεύματος [5.2, 5.2] και για τάση 279 V ( $V_{mpp}[14] = 279$  V). Σε κάθε πλαίσιοσειρά πρέπει το άθροισμα των modules με ρεύμα  $I_{mpp}$

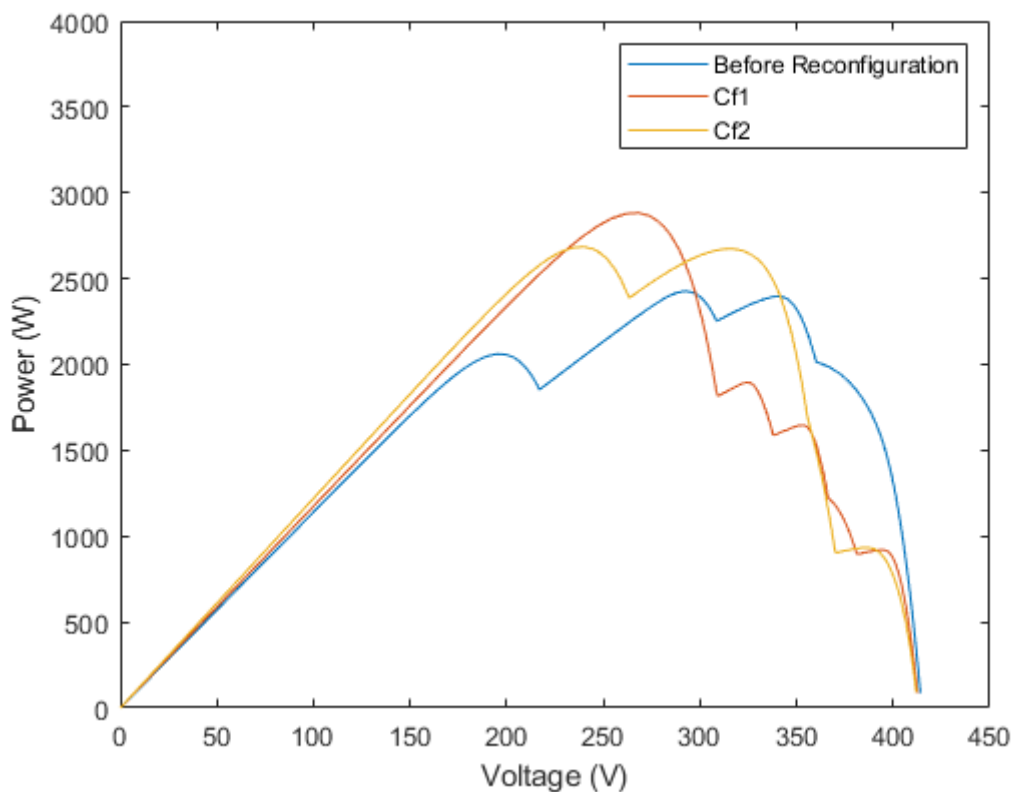
μεγαλύτερο ή ίσο του 5.2 να είναι ίσο με 14. Πολλοί συνδυασμοί μπορούν να καταλήξουν σε αυτό το αποτέλεσμα. Ο αλγόριθμος καταλήγει στο συνδυασμό Cf1 (configuration 1), οποίος περιέχει τις παρακάτω συνδέσεις:  $St1=[P1,P5,P3,P6,P7,P8]$ ,  $St2=[P2,P4,P9,P10,P11,P12]$  (String 1, String 2). Στο St1 τα “modules” με ρεύμα μεγαλύτερο ή ίσο του 5.2 είναι 14 και πιο συγκεκριμένα το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1 και 5 έχουν από 1 τέτοιο “module” και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια 3,6,7 και 8 έχουν από 3 τέτοια “modules”. Ομοίως και στο St2. Η αναδιάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας φαίνεται στο Σχήμα (5.4).



Σχήμα 5.4: Η διάταξη της Φ/Β συστοιχίας (α) πριν και (β) μετά τη χρήση του αλγορίθμου (Cf1).

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται από το συνδυασμό Cf1 είναι 2901.6 W και η τάση  $V_{mpp}$  είναι 268.2 V. Ομοίως με τα προηγούμενα παραδείγματα μπορεί να χρειαστεί να καταφύγει ο αλγόριθμος σε μια λύση που δεν είναι η ολική βέλτιστη λόγω του περιορισμού στο εύρος τάσης εισόδου του μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στην έξοδο της συστοιχίας. Για παράδειγμα αν ο μετατροπέας είχε ένα περιορισμό, η τάση εισόδου να είναι μεταξύ του εύρους [200,250], τότε ο συνδυασμός Cf1 απορρίπτεται. Ο αλγόριθμος ψάχνει στον power matrix την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή η οποία είναι 2694.5 W. Ο συνδυασμός που οδηγεί σε αυτή την ισχύ είναι ο συνδυασμός Cf2, St1=[P1,P9,P3,P6,P7,P8], St2=[P2,P4,P5,P10,P11,P12], ο οποίος έχει τάση  $V_{mpp}$  ίση με 240 V.

Στο Σχήμα (5.5) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά την αναδιάταξη. Οι αναδιατάξεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι οι Cf1 και Cf2.



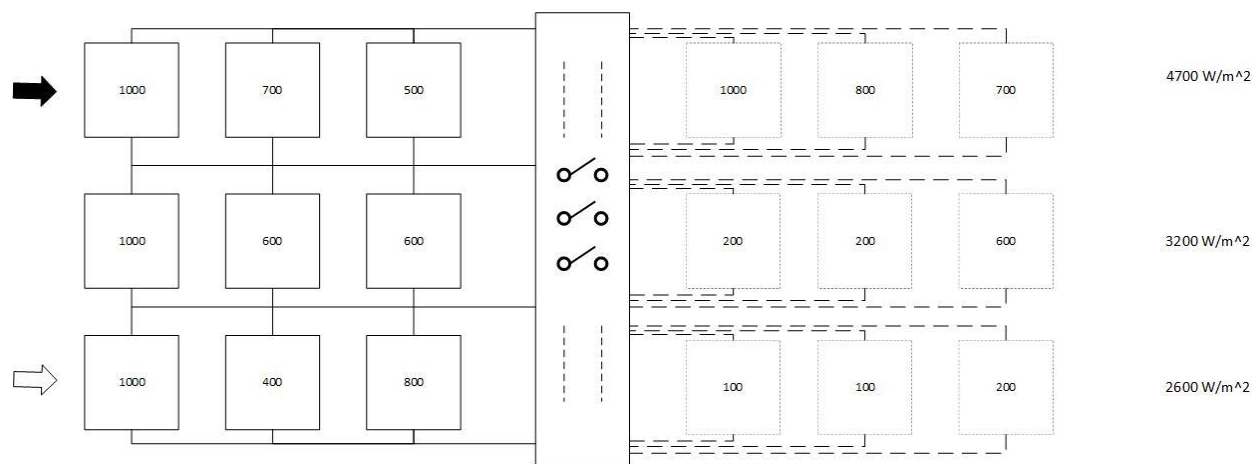
Σχήμα 5.5: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης του τρίτου παραδείγματος πριν και μετά την αναδιάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

## 5.2 Αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Για τον αλγόριθμο αυτό έχουν υλοποιηθεί τέσσερα διαφορετικά παραδείγματα. Αυτά τα παραδείγματα ασχολούνται με τη χρήση ενός αλγορίθμου αναδιάταξης βασισμένο σε μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό μερική σκίαση. Οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε παράδειγμα έχουν χρησιμοποιηθεί από τη βιβλιογραφία [4].

### 5.2.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 18 φωτοβολταϊκά πλαίσια

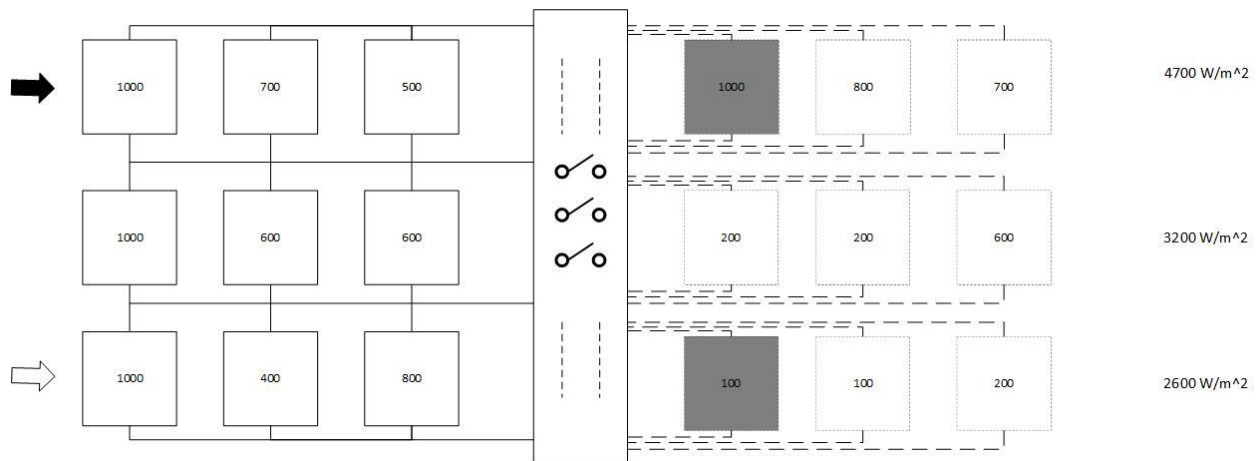
Στην υλοποίηση αυτή χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με 18 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα 9 από αυτά είναι fixed και τα υπόλοιπα 9 reconfigurable, όπως φαίνεται στο Σχήμα (5.6). Αριστερά βρίσκονται τα fixed και δεξιά με διακεκομμένες γραμμές τα reconfigurable.



Σχήμα 5.6: Τιμές ακτινοβολίας στη Φ/Β συστοιχία του πρώτου παραδείγματος.

Σε κάθε γραμμή υπολογίζεται το άθροισμα των ακτινοβολιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές τιμές αθροίσματος ηλιακής ακτινοβολίας:  $4700 \text{ W/m}^2$ ,  $3200 \text{ W/m}^2$  και  $2600 \text{ W/m}^2$ . Στόχος του αλγορίθμου αυτού είναι οι τρεις αυτές τιμές να είναι ίσες ή να έχουν

όσο το δυνατό μικρότερη διαφορά. Ο αλγόριθμος ξεκινάει εφαρμόζοντας τα εξής βήματα: αρχικά βρίσκει τη γραμμή με τη μικρότερη ακτινοβολία και τη γραμμή με τη μεγαλύτερη. Στη διάταξη του σχήματος (5.4) αυτές είναι η πρώτη (μαύρο βέλος) και η τρίτη (λευκό βέλος), με ακτινοβολίες  $4700 \text{ W/m}^2$  και  $2600 \text{ W/m}^2$  αντίστοιχα. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο reconfigurable τμήμα από τη γραμμή με τη μικρότερη ακτινοβολία ( $2600 \text{ W/m}^2$ ), θα αντικατασταθεί με κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο από τη γραμμή με τη μεγαλύτερη ( $4700 \text{ W/m}^2$ ). Αυτό σημαίνει πως θα αντικατασταθεί αρχικά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τιμή  $100 \text{ W/m}^2$  της τρίτης γραμμής (λευκό βέλος) με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που έχει  $1000 \text{ W/m}^2$  της πρώτης γραμμής (μαύρο βέλος), Σχήμα (5.7). Με γκριζο χρώμα έχουν σημειωθεί αυτά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

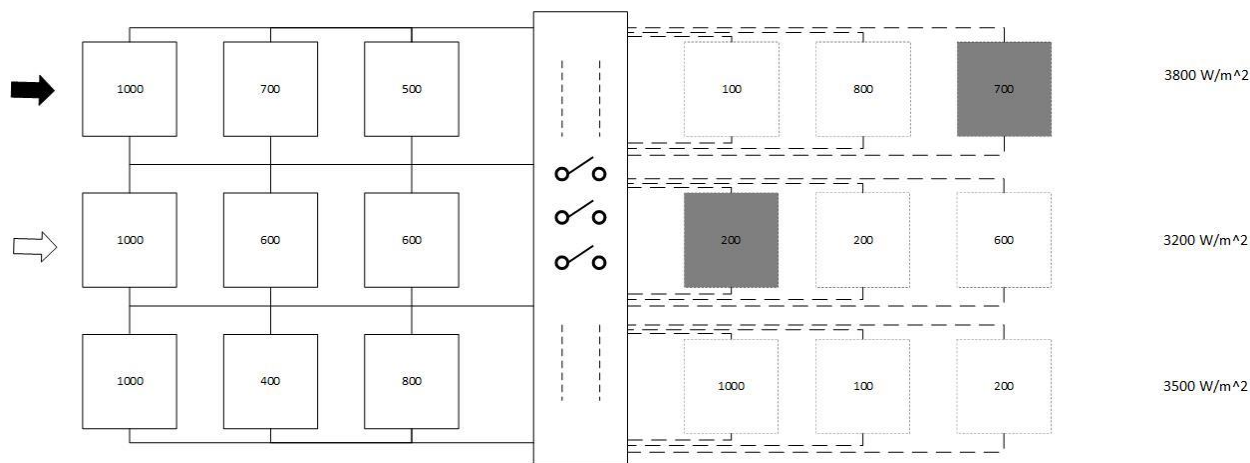


Σχήμα 5.7: Τιμές ακτινοβολίας πριν την πρώτη αναδιάταξη.

Η αλλαγή αυτή επιφέρει βελτίωση στη διαφορά της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ των γραμμών καθώς η γραμμή με τη μικρότερη ακτινοβολία θα έχει τώρα τιμή  $3200 \text{ W/m}^2$  και αυτή με τη μεγαλύτερη θα έχει τιμή  $3800 \text{ W/m}^2$ .

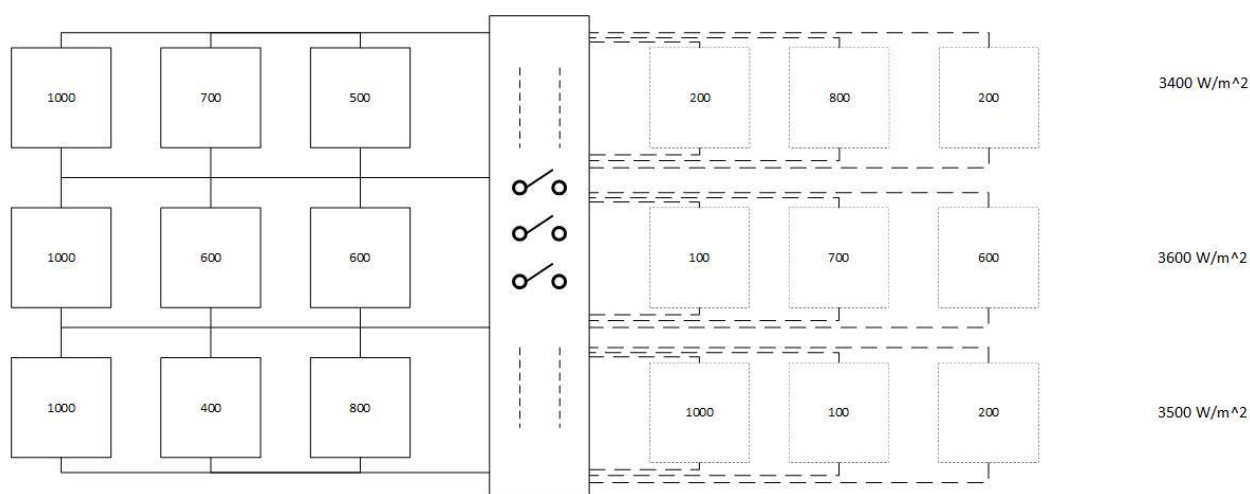
Αφού η αλλαγή έγινε δεκτή η διαδικασία θα επαναληφθεί. Πλέον η γραμμή με τη μικρότερη ακτινοβολία είναι η δεύτερη (λευκό βέλος στο Σχήμα 5.6) με  $3200 \text{ W/m}^2$  και με μεγαλύτερη εξακολουθεί να είναι η πρώτη (μαύρο βέλος στο Σχήμα 5.6) με  $3800 \text{ W/m}^2$ . Αρχικά θα προσπαθήσει να αντικαταστήσει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τιμή  $200 \text{ W/m}^2$  της δεύτερης γραμμής με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τιμή  $100 \text{ W/m}^2$  της πρώτης. Αυτή η αλλαγή δεν θα γίνει δεκτή καθώς δεν επιφέρει καμία βελτίωση, αντίθετα αυξάνει τη διαφορά μεταξύ των

γραμμών. Στη συνέχεια θα αντικαταστήσει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τιμή  $200 \text{ W/m}^2$  της δεύτερης γραμμής με το  $700 \text{ W/m}^2$  της πρώτης, Σχήμα (5.6).



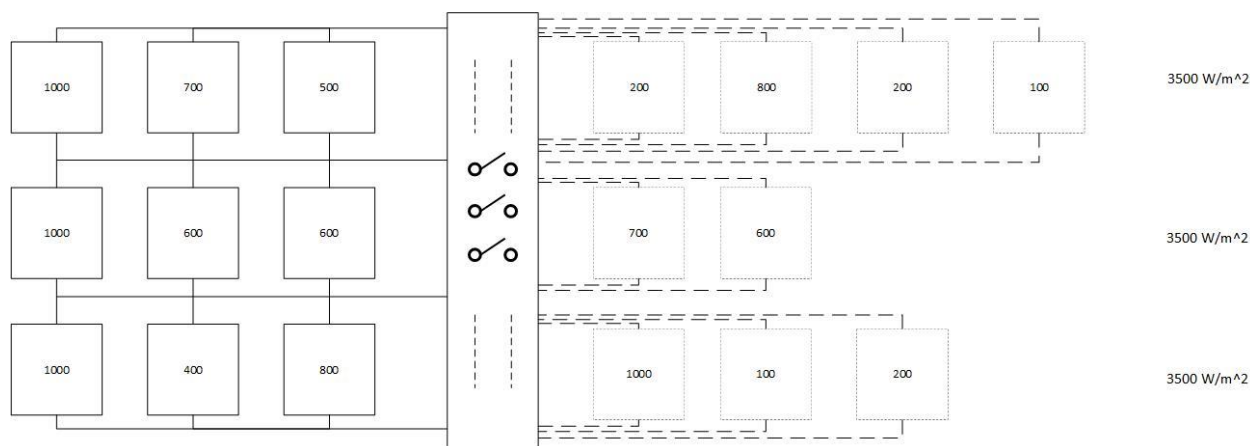
Σχήμα 5.8: Τιμές ακτινοβολίας μετά την πρώτη αναδιάταξη.

Η διαφορά των ακτινοβολιών μειώνεται, επομένως η αλλαγή γίνεται δεκτή. Εξετάζει λοιπές αλλαγές, αλλά καμία δεν επιφέρει περεταίρω βελτίωση και έτσι ολοκληρώνεται το πρώτο τμήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στο Σχήμα (5.9) παρουσιάζεται η διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετά το τέλος του πρώτου σταδίου του αλγορίθμου.



Σχήμα 5.9: Η διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετά το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου.

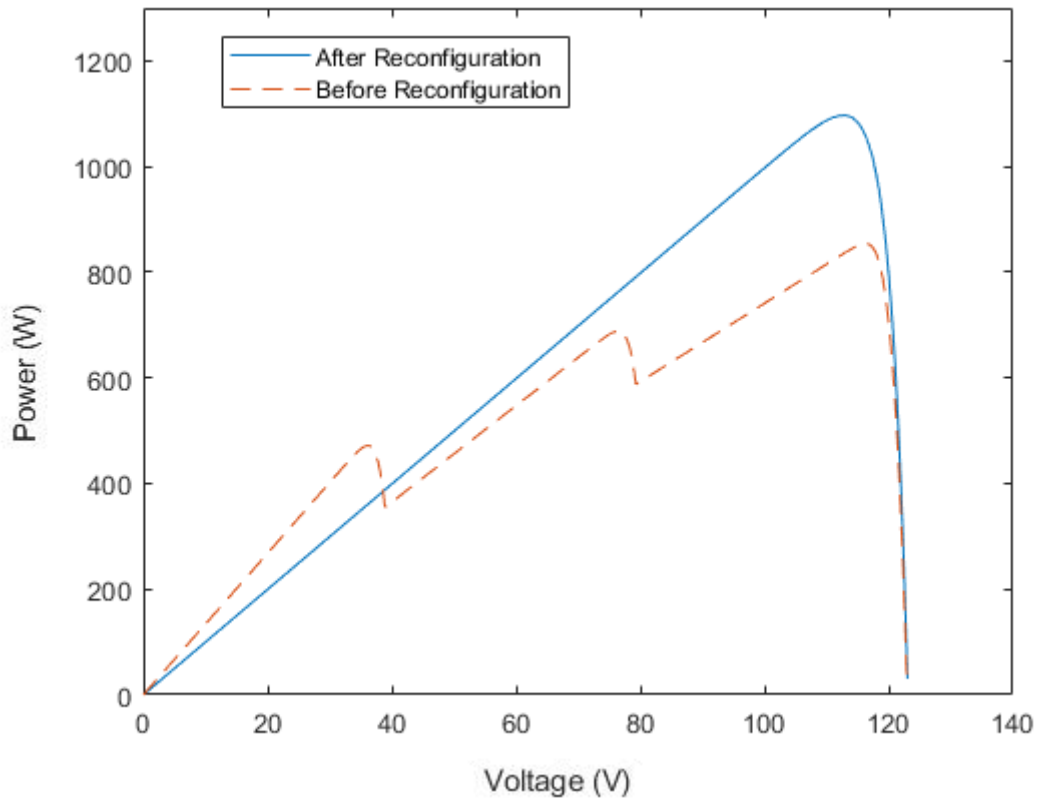
Αφού ολοκληρωθεί το πρώτο μέρος, ο αλγόριθμος προχωράει στο δεύτερο. Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια από τη δεύτερη γραμμή, αυτή με τη μεγαλύτερη ακτινοβολία, μετακινούνται στην πρώτη, αυτή με την μικρότερη ακτινοβολία. Η μεταφορά αυτή γίνεται με ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο κάθε φορά και ελέγχεται αν η ανταλλαγή επιφέρει κάποια βελτίωση.



Σχήμα 5.10: Η τελική διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο πρώτο παράδειγμα.

Όταν μεταφερθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με τιμές 600 W/m<sup>2</sup> και 700 W/m<sup>2</sup> δεν θα υπάρξει κάποια διαφορά. Όταν όμως μετακινηθεί αυτό με 100 W/m<sup>2</sup>, τότε όλες οι γραμμές θα έχουν την ίδια τιμή (3500 W/m<sup>2</sup>), όπως φαίνεται στο Σχήμα (5.10). Πλέον όλες οι γραμμές έχουν το ίδιο άθροισμα ηλιακής ακτινοβολίας. Ο αλγόριθμος δεν μπορεί να κάνει περεταίρω βελτιώσεις και έτσι ολοκληρώνεται.

Στο σχήμα (5.11) παρουσιάζεται η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης πριν και μετά την αναδιάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

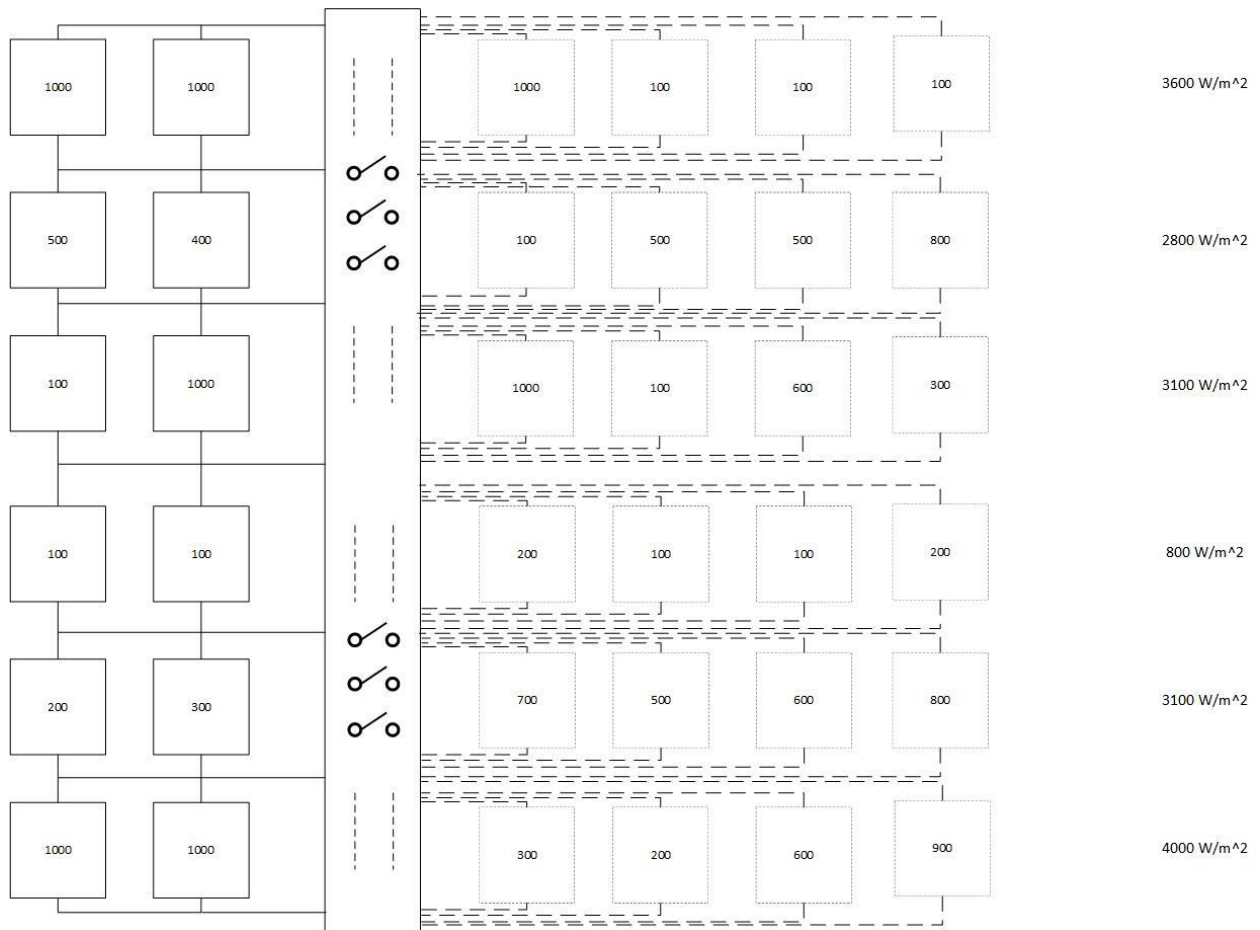


Σχήμα 5.11: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης πριν και μετά την αναδιάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Η μέγιστη ισχύς πριν την αναδιάταξη είναι 854.2 W, ενώ μετά την αναδιάταξη είναι 1097 W. Αυτό συνεπάγεται με μία αύξηση 28 % στην ισχύ στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

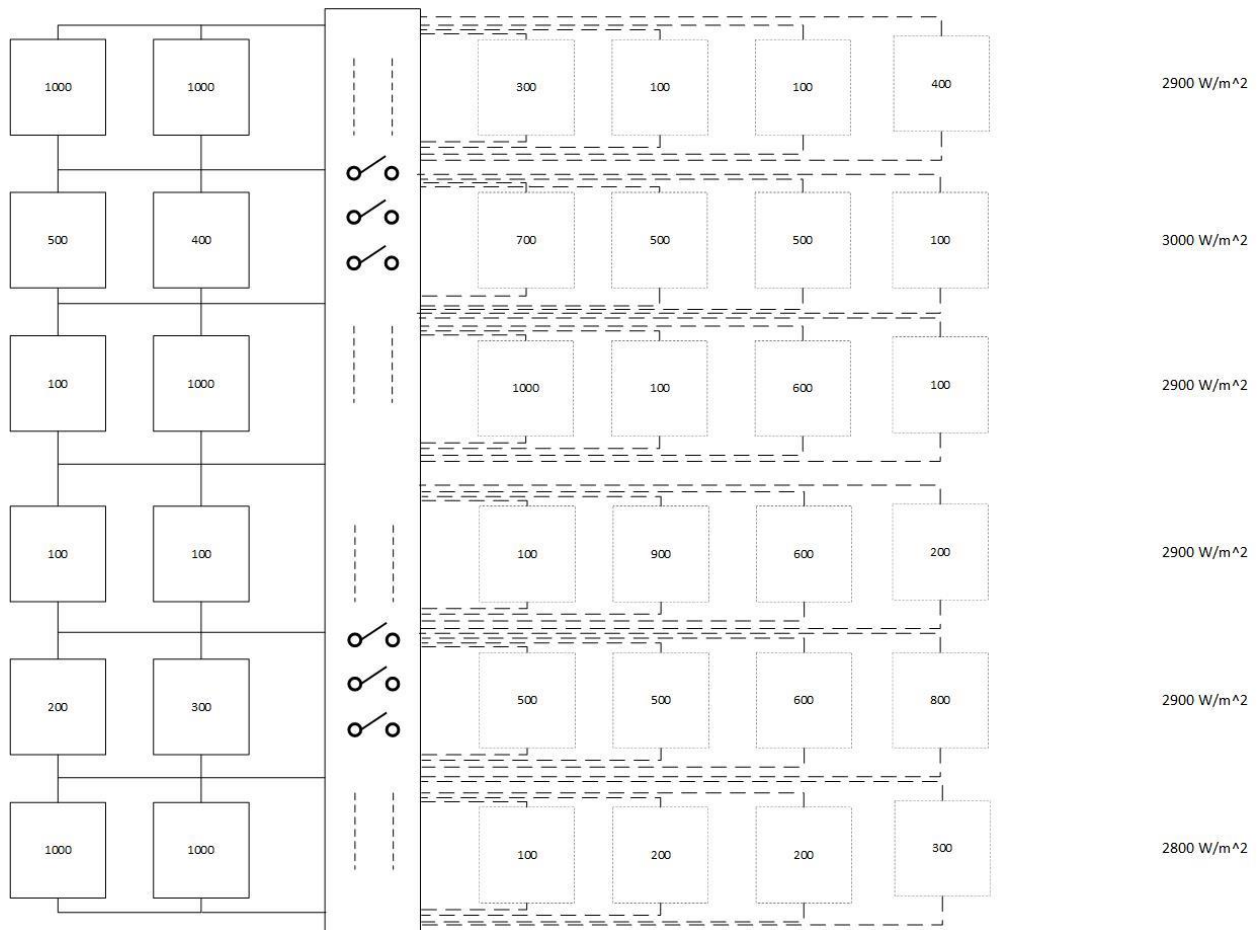
### 5.2.2 Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 36 φωτοβολταϊκά πλαίσια: 1<sup>η</sup> περίπτωση

Στην υλοποίηση αυτή χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με 36 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα 12 από αυτά είναι fixed και τα υπόλοιπα 24 reconfigurable, όπως φαίνεται στο Σχήμα (5.12).



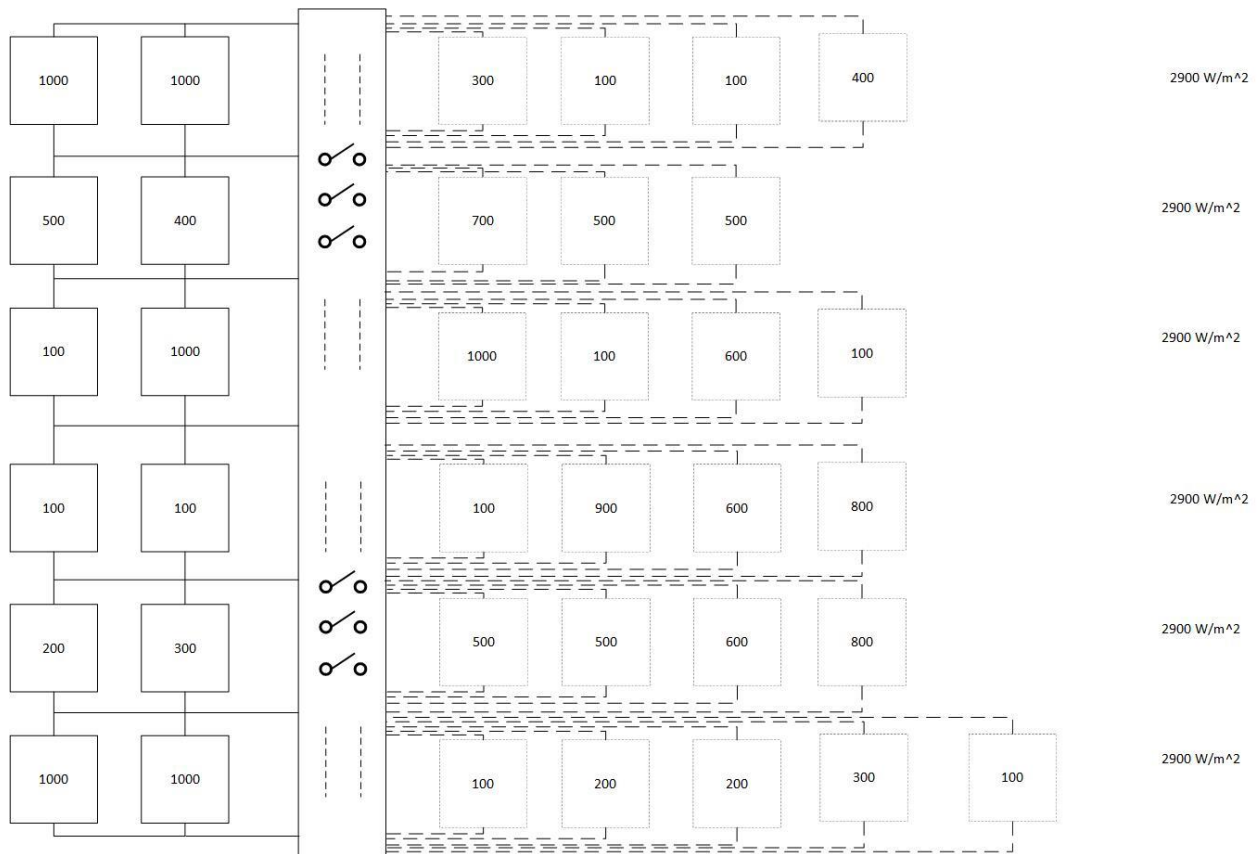
Σχήμα 5.12: Τιμές ακτινοβολίας στη Φ/Β συστοιχία του δεύτερου παραδείγματος.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζει τα ίδια βήματα με το πρώτο παράδειγμα. Μετά το πέρας του πρώτου μέρους, τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα (5.13).



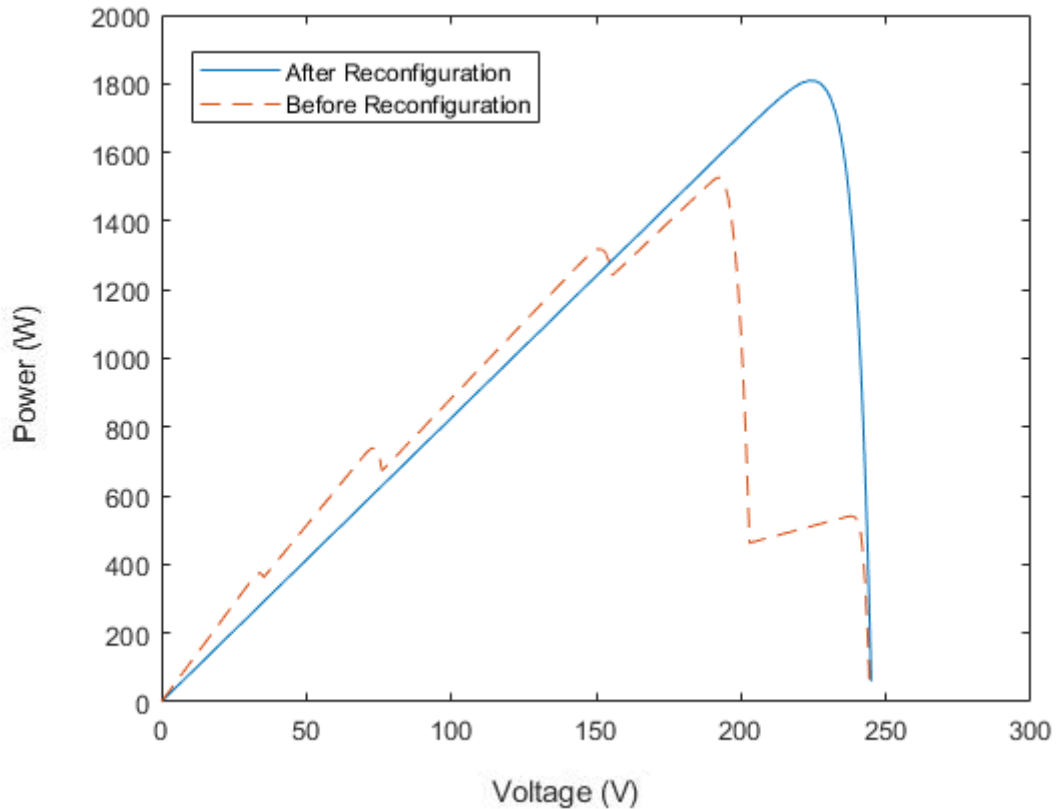
Σχήμα 5.13: Τιμές ακτινοβολίας στα επιμέρους φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας μετά το πρώτο μέρος του αλγορίθμου.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται και το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα (5.14).



Σχήμα 5.14: Τελική διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετά το τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Πλέον όλες οι γραμμές έχουν το ίδιο άθροισμα ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα που επιφέρει η αναδιάταξη που ορίζει ο αλγόριθμος, παρουσιάζονται στο Σχήμα (5.15).

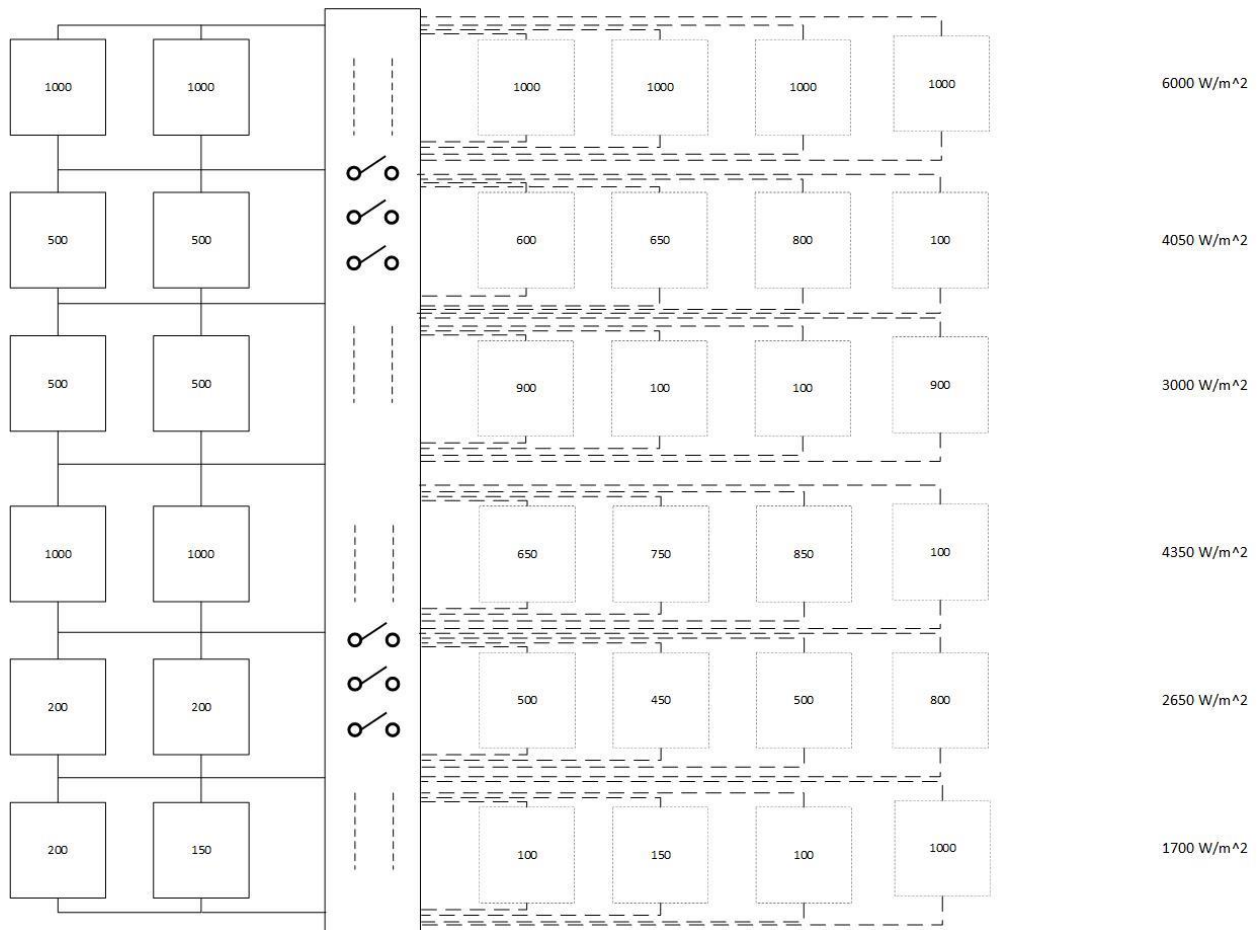


Σχήμα 5.15: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης πριν και μετά την αναδιάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Η μέγιστη ισχύς πριν την αναδιάταξη είναι 1526.3 W, ενώ μετά την αναδιάταξη είναι 1808.8 W. Αυτό συνεπάγεται με μία αύξηση 18.5 % στην ισχύ στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

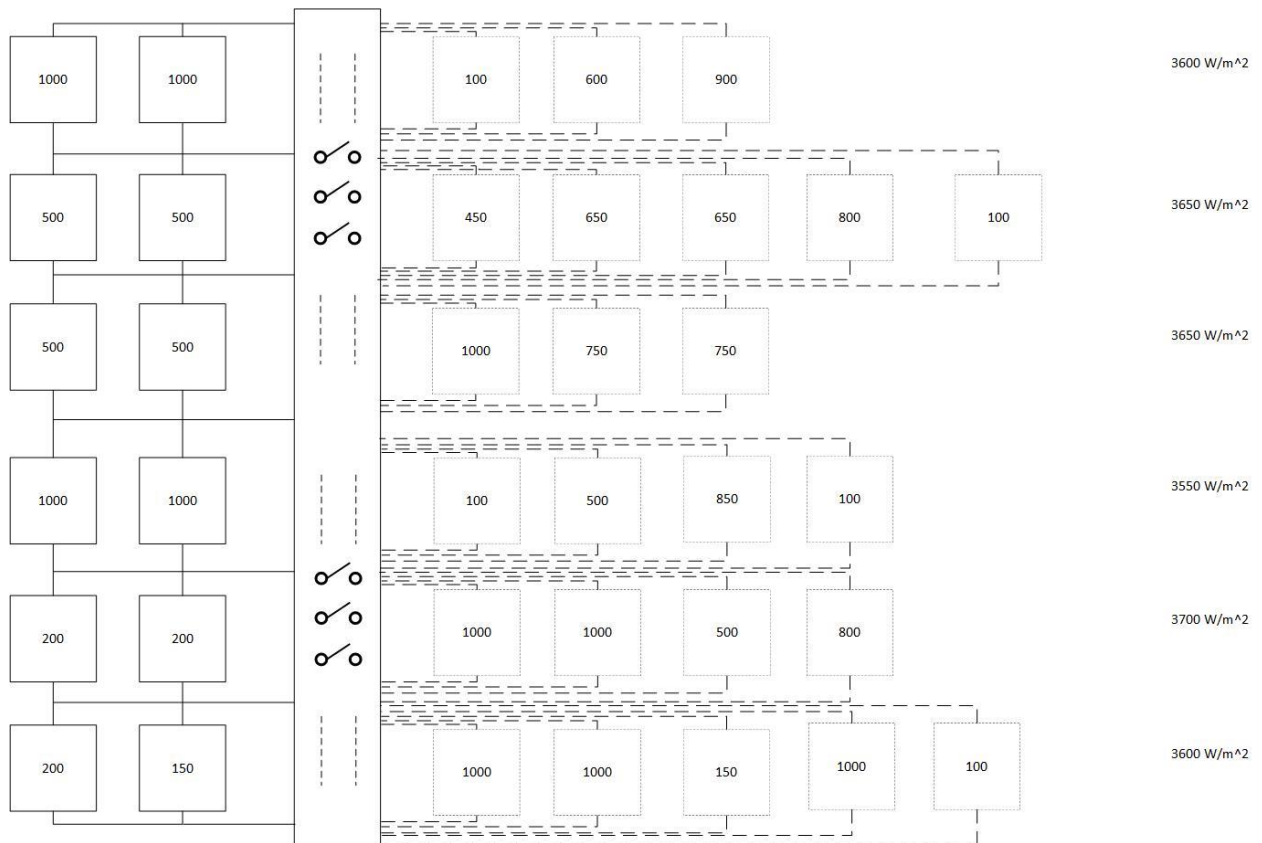
### 5.2.3 Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 36 φωτοβολταϊκά πλαίσια: 2<sup>η</sup> περίπτωση

Σε αυτό το παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου αναδιάταξης χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με 36 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα 12 από αυτά είναι fixed και τα υπόλοιπα 24 reconfigurable. Πρόκειται για την ίδια υλοποίηση με αυτήν της παραγράφου 5.2.2, αλλά με διαφορετικές συνθήκες σκίασης, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.16).



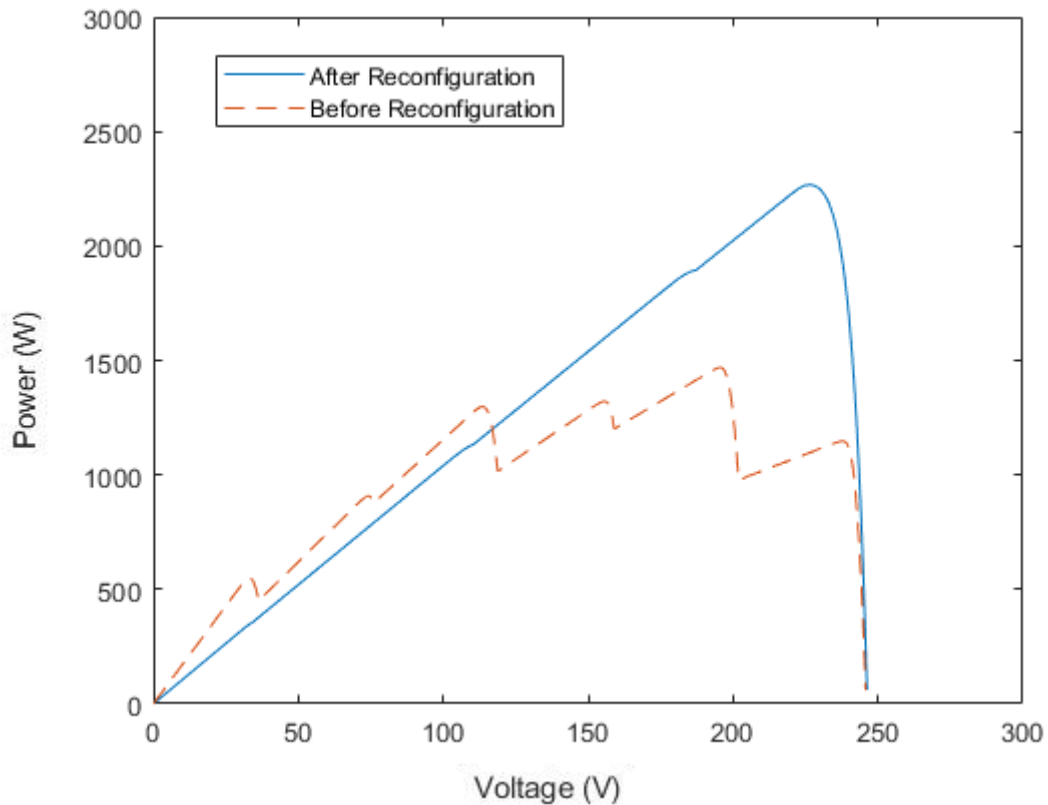
Σχήμα 5.16: Τιμές ακτινοβολίας στη Φ/Β συστοιχία του τρίτου παραδείγματος.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζει τα ίδια βήματα με το πρώτο παράδειγμα. Μετά τη χρήση του αλγορίθμου, η τελική μορφή του Πίνακα φαίνεται στο σχήμα (5.14).



Σχήμα 5.17: Τελική διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετά το τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Οι γραμμές δεν έχουν το ίδιο άθροισμα ηλιακής ακτινοβολίας, ωστόσο η διαφορά τους είναι μικρότερη από ότι ήταν αρχικά. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας,  $3600 \text{ W/m}^2$ ,  $3650 \text{ W/m}^2$  και  $3700 \text{ W/m}^2$ . Τα αποτελέσματα που επιφέρει η αναδιάταξη που ορίζει ο αλγόριθμος, παρουσιάζονται στο Σχήμα (5.15).



Σχήμα 5.17: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης πριν και μετά την αναδιάταξη.

Η μέγιστη ισχύς πριν την αναδιάταξη είναι 1468.9 W, ενώ μετά την αναδιάταξη είναι 2267 W. Αυτό συνεπάγεται με μία αύξηση 54.3 % στην ισχύ στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

#### 5.2.4 Φωτοβολταϊκή συστοιχία με 16 reconfigurable φωτοβολταϊκά πλαίσια

Στην υλοποίηση αυτή χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με 16 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θεωρούνται reconfigurable. Οι τιμές της ακτινοβολίας φαίνονται στο Σχήμα (5.18).



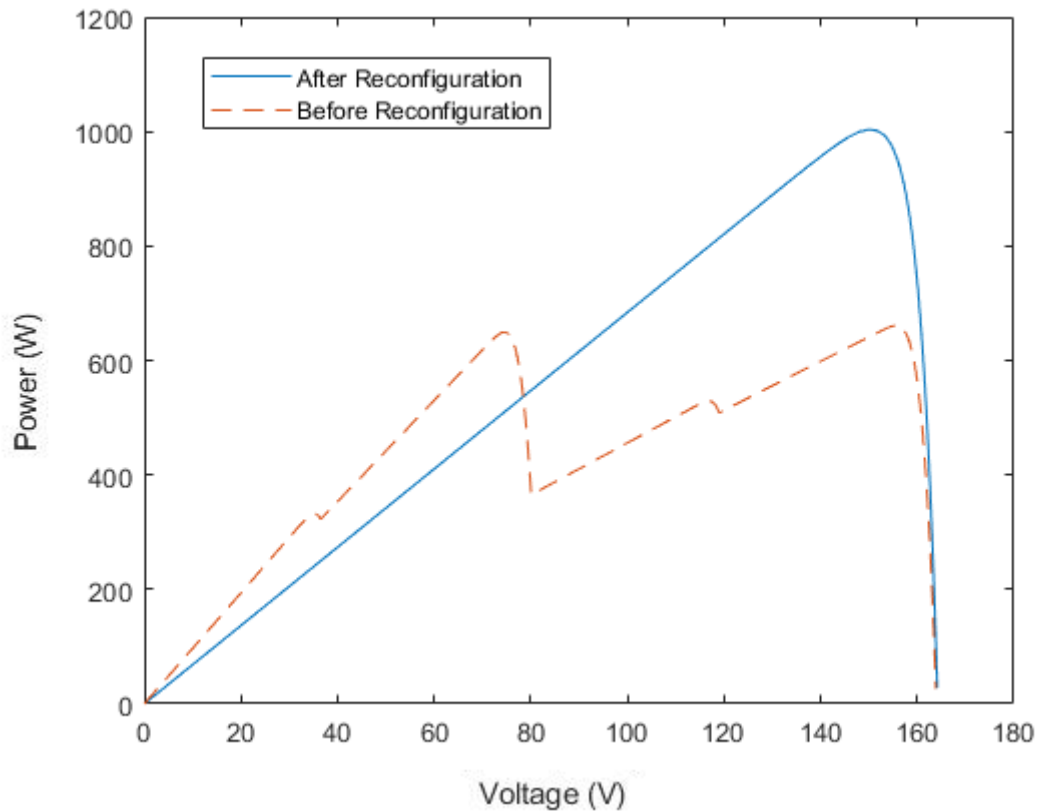
Σχήμα 5.18: Τιμές ακτινοβολίας στη Φ/Β συστοιχία του τέταρτου παραδείγματος.

Ο αλγόριθμος σε αυτό το παράδειγμα αναδιατάσσει όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και δεν κρατάει κάποια σταθερά. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου φαίνονται στο σχήμα (5.19).



Σχήμα 5.19: Τελική διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετά το τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Πλέον όλες οι γραμμές έχουν το ίδιο άθροισμα ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα που επιφέρει η αναδιάταξη που έχει οριστεί από τον αλγόριθμο, παρουσιάζονται στο σχήμα (5.20).



Σχήμα 5.20: Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης πριν και μετά την αναδιάταξη.

Η μέγιστη ισχύς πριν την αναδιάταξη είναι 660.7 W, ενώ μετά την αναδιάταξη είναι 1003.3 W. Αυτό συνεπάγεται με μία αύξηση 51.8 % στην ισχύ στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

### 5.3 Αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού

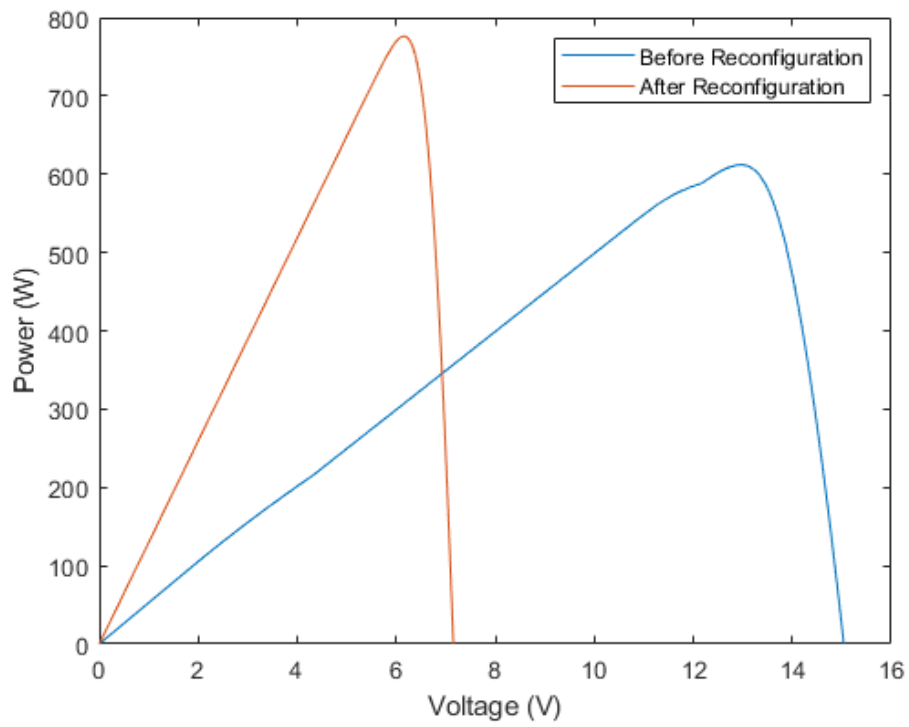
Για την προσομοίωση του αλγορίθμου αυτού χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα με πέντε φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η προσομοίωση έγινε για πέντε διαφορετικές συνθήκες μερικής σκίασης. Οι συνθήκες σκίασης έχουν επιλεγεί τυχαία.

Ο αλγόριθμος δέχεται ως είσοδο το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων ( $N=5$ ), την ακτινοβολία που δέχεται το καθένα, την τάση και το ρεύμα το καθενός στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας (MPP).

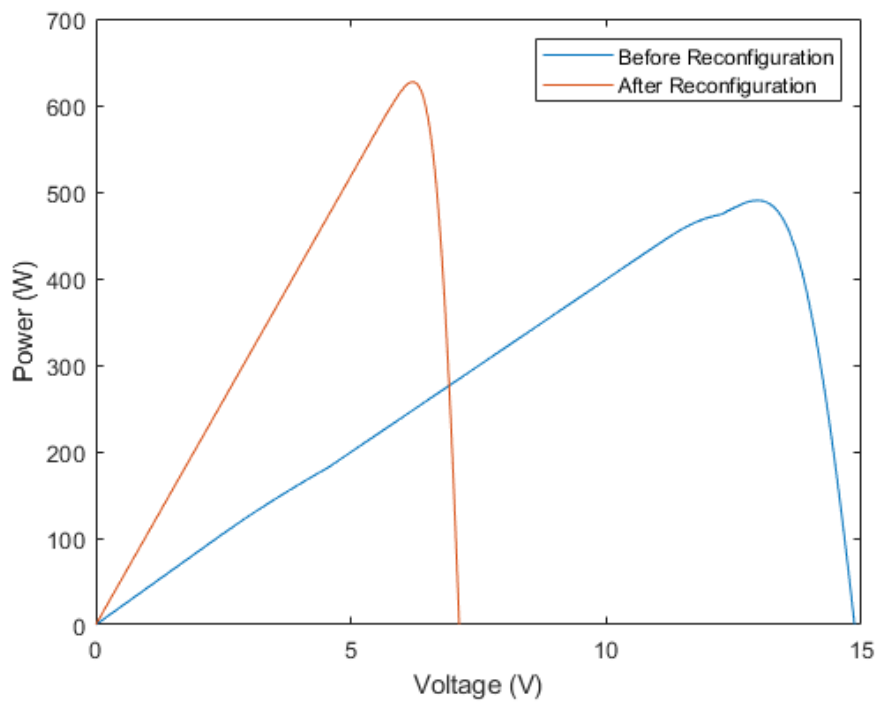
Στον Πίνακα (5.18) παρουσιάζεται η ισχύς στο global MPP πριν και μετά τη χρήση του αλγορίθμου καθώς και η ποσοστιαία αύξηση της ισχύος στο global MPP.

<b>Πίνακας 5.18. Αποτελέσματα εφαρμογής του τρίτου αλγορίθμου για διάφορα σενάρια σκίασης.</b>			
	<b>Μέγιστη ισχύς πριν τον αλγόριθμο</b>	<b>Μέγιστη ισχύς μετά τον αλγόριθμο</b>	<b>Αύξηση ισχύος στο global MPP</b>
<b>Σενάριο σκίασης 1</b>	612.1 W	776.1 W	26.7 %
<b>Σενάριο σκίασης 2</b>	490.1 W	629.1 W	28.3 %
<b>Σενάριο σκίασης 3</b>	853.1 W	1062.1 W	24.4 %
<b>Σενάριο σκίασης 4</b>	972 W	1198.2 W	23.27 %
<b>Σενάριο σκίασης 5</b>	428.9 W	551 W	28.4 %

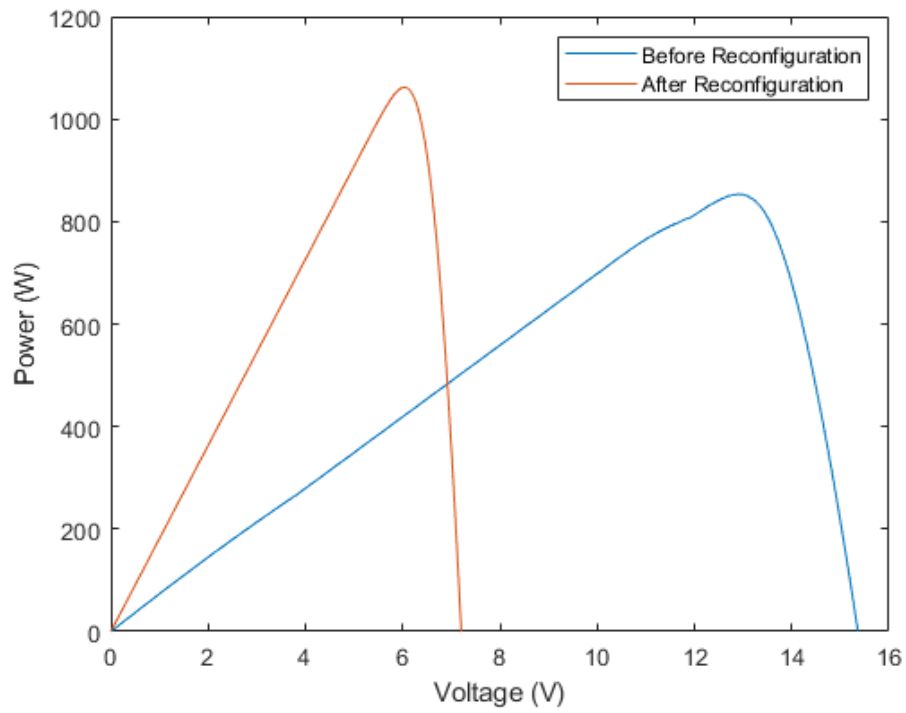
Στα παρακάτω Σχήματα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης των πέντε διαφορετικών υλοποιήσεων.



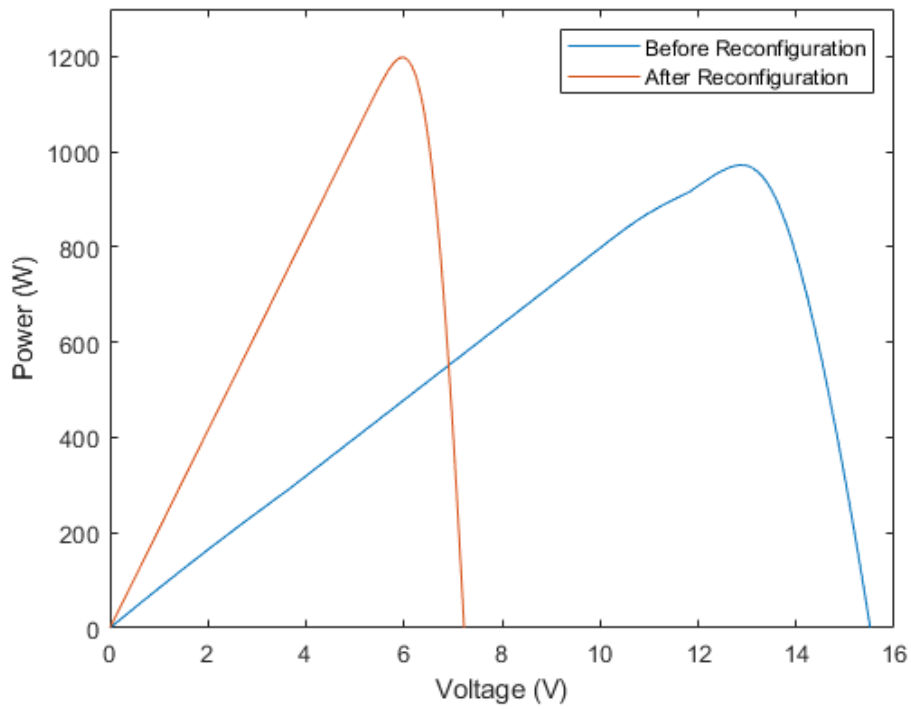
Σχήμα 5.21: Σενάριο σκίασης 1 πριν και μετά την αναδιάταξη.



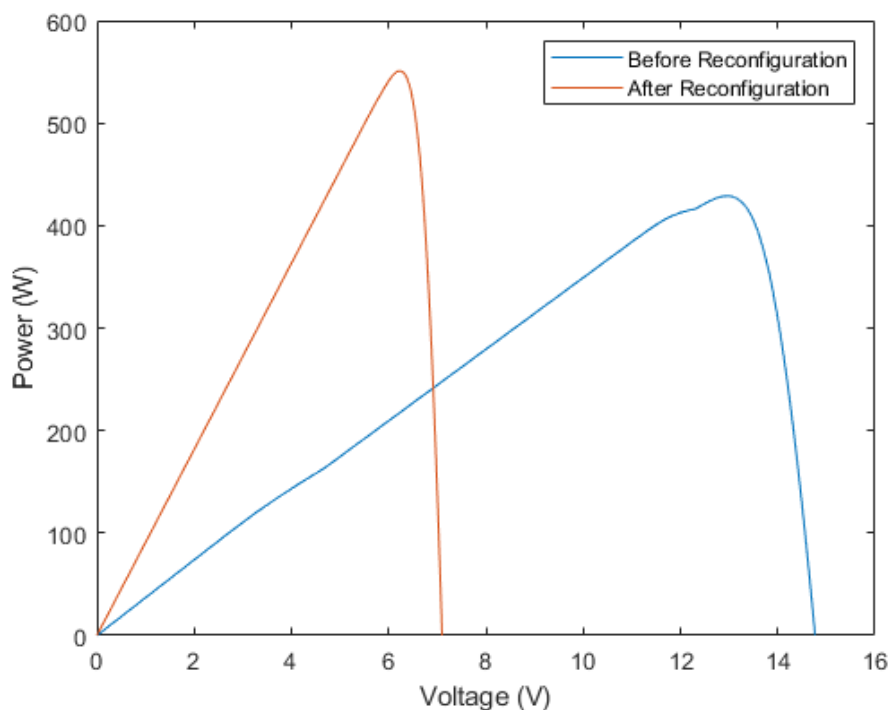
Σχήμα 5.22: Σενάριο σκίασης 2 πριν και μετά την αναδιάταξη.



Σχήμα 5.23: Σενάριο σκίασης 3 πριν και μετά την αναδιάταξη.



Σχήμα 5.24: Σενάριο σκίασης 4 πριν και μετά την αναδιάταξη.



Σχήμα 5.25: Σενάριο σκίασης 5 πριν και μετά την αναδιάταξη.

## 5.4 Σύγκριση των εναλλακτικών μεθόδων

Σε αυτή την παράγραφο συγκρίνονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των τριών αλγορίθμων αναδιάταξης με τα αντίστοιχα που προκύπτουν συνδέοντας την φωτοβολταϊκή συστοιχία με τη διάταξη Module-Integrated Converter. Το σύστημα που προσομοιώθηκε αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με 60 φωτοβολταϊκά πλαίσια, μια μονάδα ελέγχου MPPT, έναν μετατροπέα ισχύος DC/DC και μία μπαταρία 12 V (σχήμα 1.2).

Η διάταξη αυτή προσομοιώθηκε για τρεις διαφορετικές συνθήκες μερικής σκίασης. Η τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας επιλέχθηκαν τυχαία.

- Σενάριο πρώτο: μια πλαισιοσειρά δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $700 \text{ W/m}^2$ , ενώ οι υπόλοιπες δέχονται  $100 \text{ W/m}^2$ .
- Σενάριο δεύτερο: Τα δύο τελευταία φωτοβολταϊκά πλαίσια σε κάθε πλαισιοσειρά δέχονται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $700 \text{ W/m}^2$ , ενώ τα υπόλοιπα  $1000 \text{ W/m}^2$ .

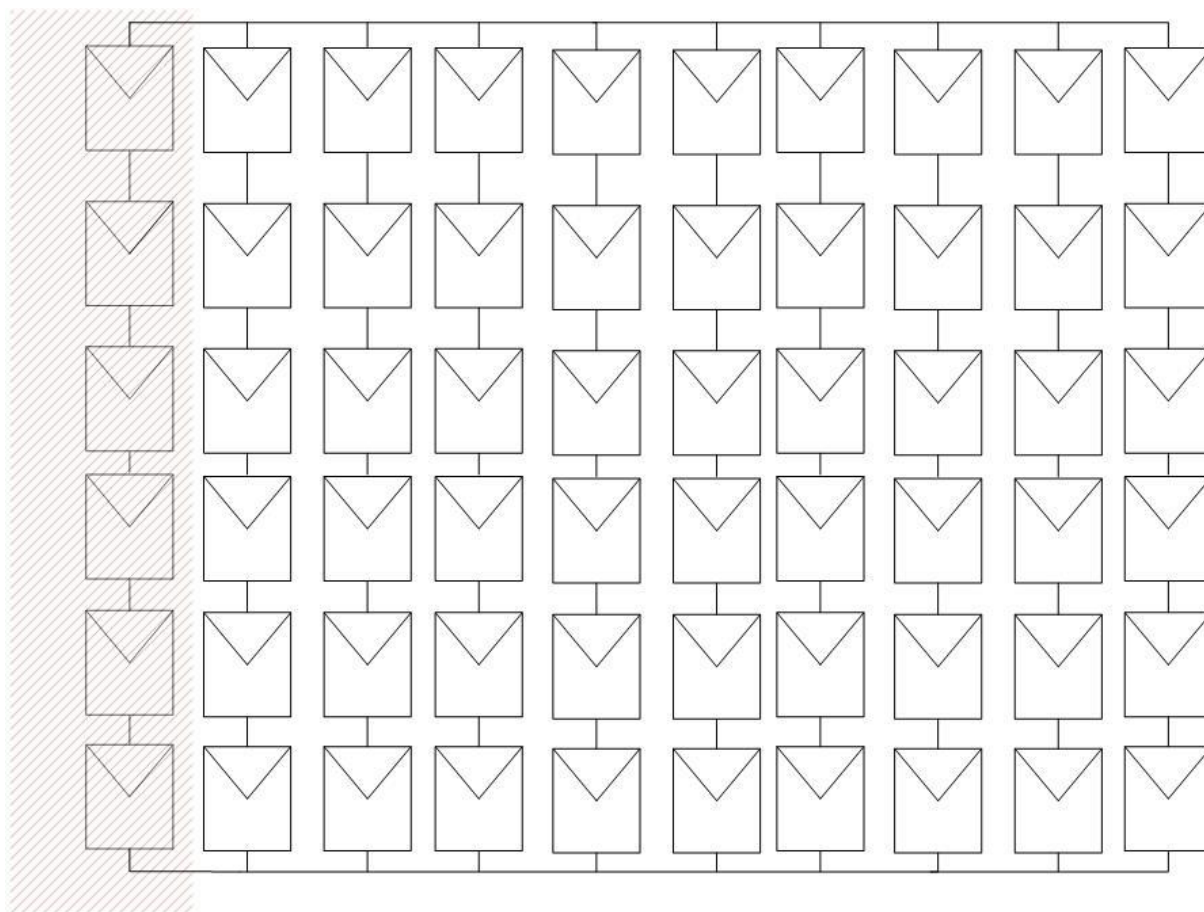
- Σενάριο τρίτο: Διάσπαρτα φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $200 \text{ W/m}^2$ , ενώ τα υπόλοιπα  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Σε κάθε σενάριο εφαρμοστήκαν ξεχωριστά οι μέθοδοι που έχουν περιγραφεί παραπάνω και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους.

Στο φορτίο παρέχεται η μέγιστη ισχύς που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία, λόγω του μετατροπέα ισχύος και της μονάδας ελέγχου MPPT που έχουν συνδεθεί στην έξοδό της. Η μονάδα ελέγχου MPPT χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Voltage Window, καθώς η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας παρουσιάζει τοπικά μέγιστα.

#### **5.4.1 Σενάριο πρώτο**

Το πρώτο σενάριο προσομοιώνει τη λειτουργία μια φωτοβολταϊκής συστοιχία με 60 φωτοβολταϊκά πλαίσια με ονομαστική ισχύ  $120 \text{ W}_p$ . Μία πλαισιοσειρά δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $700 \text{ W/m}^2$ , ενώ οι υπόλοιπες  $1000 \text{ W/m}^2$  (σχήμα 5.26).



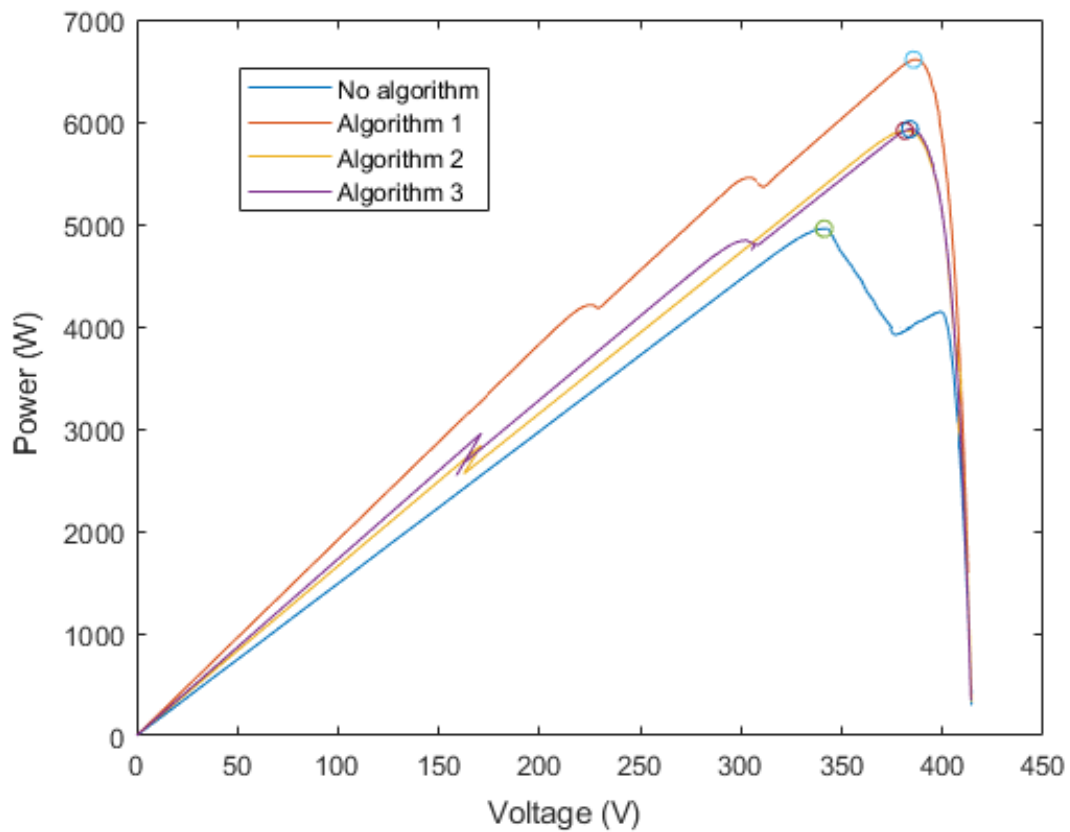
Σχήμα 5.26: Η σκίαση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο πρώτο σενάριο.

Στο φωτοβολταϊκό σύστημα εφαρμόστηκαν οι τρεις αλγόριθμοι αναδιάταξης που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και η διάταξη Module-Integrated Converter. Τα αποτελέσματα που επιφέρουν οι μέθοδοι φαίνονται στον Πίνακα (5.19). Στα αποτελέσματα παρατηρείται πως ο πρώτος αλγόριθμος (MPP Candidates) επιφέρει αύξηση 34.1 % στην ισχύ στο global MPP, ο δεύτερος αλγόριθμος (βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας) 18.6 % και ο τρίτος αλγόριθμος (αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού) 19.3 %. Η μέθοδος Module-Integrated Converter επιφέρει αύξηση 38.6 % στην ισχύ στο global MPP.

Στο Σχήμα (5.27) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά τη χρήση των αλγορίθμων αναδιάταξης.

**Πίνακας 5.19. Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου σκίασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.**

Μέθοδος	Ισχύς εξόδου συστοιχίας (W)	Τάση εξόδου συστοιχίας (V)
Χωρίς αλγόριθμο αναδιάταξης	4973.2	341.24
1 <sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης	6669.3	385.58
2 <sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης	5899.1	381.31
3 <sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης	5936.4	382.54
Module-Integrated Converter	6894.1	37.82

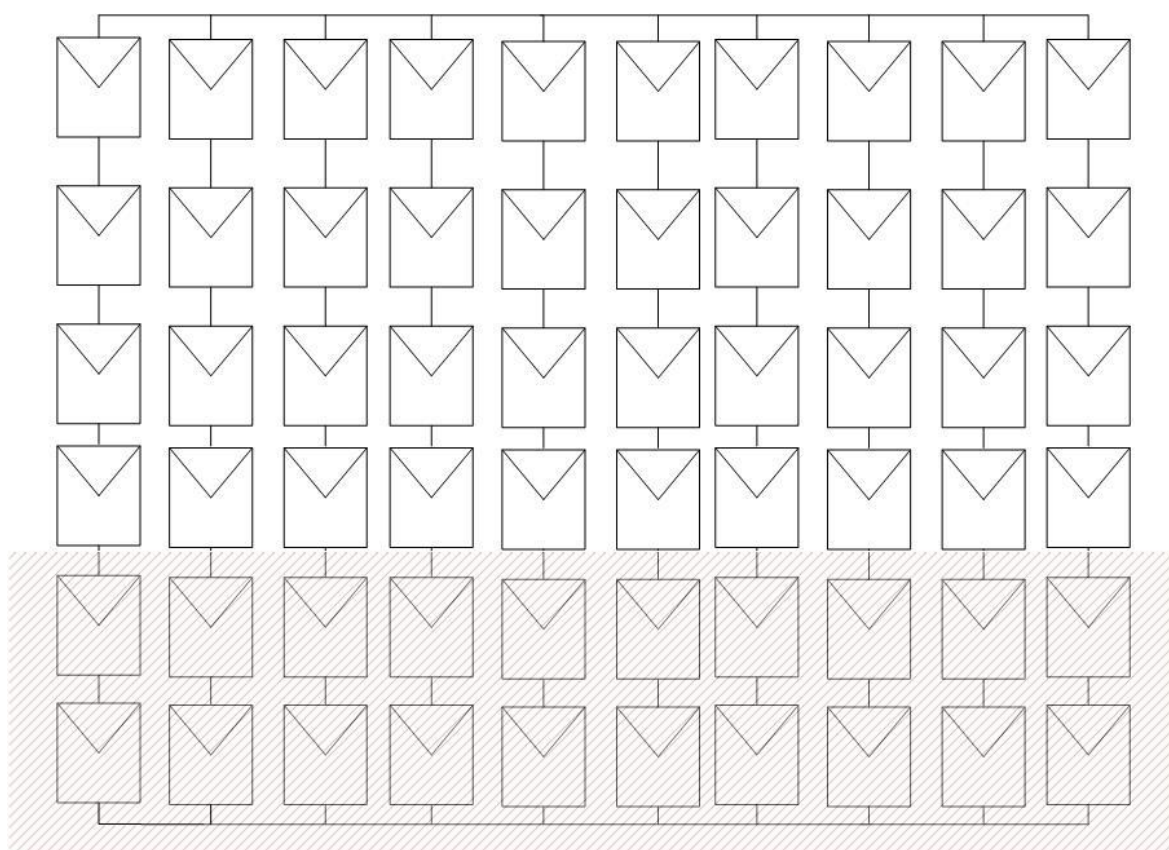


Σχήμα 5.27: Οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά την εφαρμογή των αλγορίθμων αναδιάταξης.

Ο αλγόριθμος VW που χρησιμοποιείται στη μονάδα ελέγχου για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας αποκλίνει από το πραγματικό MPP. Η πραγματική τιμή MPP πριν τη χρήση αλγορίθμου αναδιάταξης είναι 5072.7 W. Οι πραγματικές τιμές MPP μετά τη χρήση των αλγορίθμων αναδιάταξης είναι επίσης διαφορετικές. Στον πρώτο αλγόριθμο αναδιάταξης η πραγματική τιμή MPP είναι 6802.4 W, στο δεύτερο αλγόριθμο αναδιάταξης 6017.1 W και στον τρίτο αλγόριθμο αναδιάταξης 6054.7 W.

#### **5.4.2 Σενάριο δεύτερο**

Στο σενάριο αυτό προσομοιώνεται η λειτουργία της ίδιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας υπό συνθήκες διαφορετικής σκίασης: τα δύο τελευταία φωτοβολταϊκά πλαίσια της κάθε πλαισιοσειράς δέχονται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $700 \text{ W/m}^2$ , ενώ τα υπόλοιπα  $1000 \text{ W/m}^2$  (σχήμα 5.28).



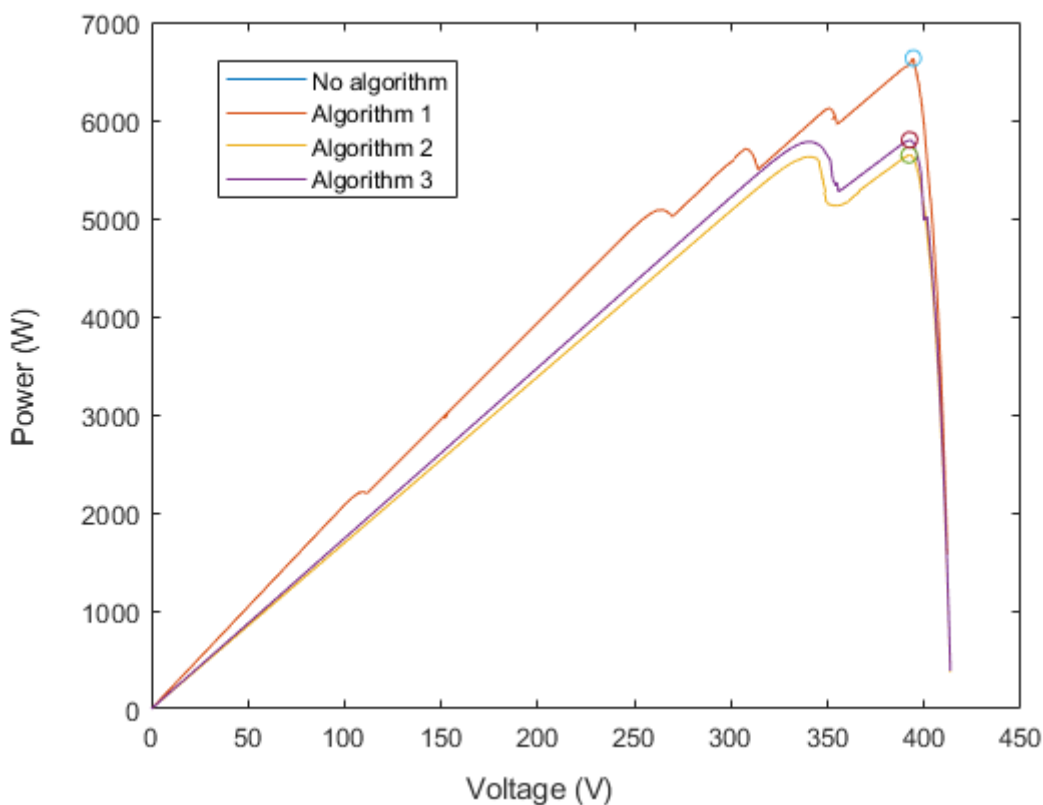
Σχήμα 5.28: Η σκίαση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο δεύτερο σενάριο.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν στο φωτοβολταϊκό σύστημα οι τρεις αλγόριθμοι αναδιάταξης που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και η διάταξη Module-Integrated Converter. Τα αποτελέσματα που επιφέρουν οι μέθοδοι φαίνονται στον Πίνακα 5.20. Στα αποτελέσματα παρατηρείται πως ο πρώτος αλγόριθμος (MPP Candidates) επιφέρει αύξηση 16.9 % στην ισχύ στο global MPP, ο δεύτερος αλγόριθμος (βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας) 0 % και ο τρίτος αλγόριθμος (αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού) 7 %. Η μέθοδος Module-Integrated Converter επιφέρει αύξηση 22 % στην ισχύ στο global MPP.

Στο Σχήμα (5.29) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά τη χρήση των αλγορίθμων αναδιάταξης.

**Πίνακας 5.21. Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου σκίασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.**

Μέθοδος	Ισχύς εξόδου συστοιχίας (W)	Τάση εξόδου συστοιχίας (V)
Χωρίς αλγόριθμο αναδιάταξης	5682	392.19
1 <sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης	6647	394.27
2 <sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης	5682	392.19
3 <sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης	6081.2	392.3
Module-Integrated Converter	6936.4	37.69



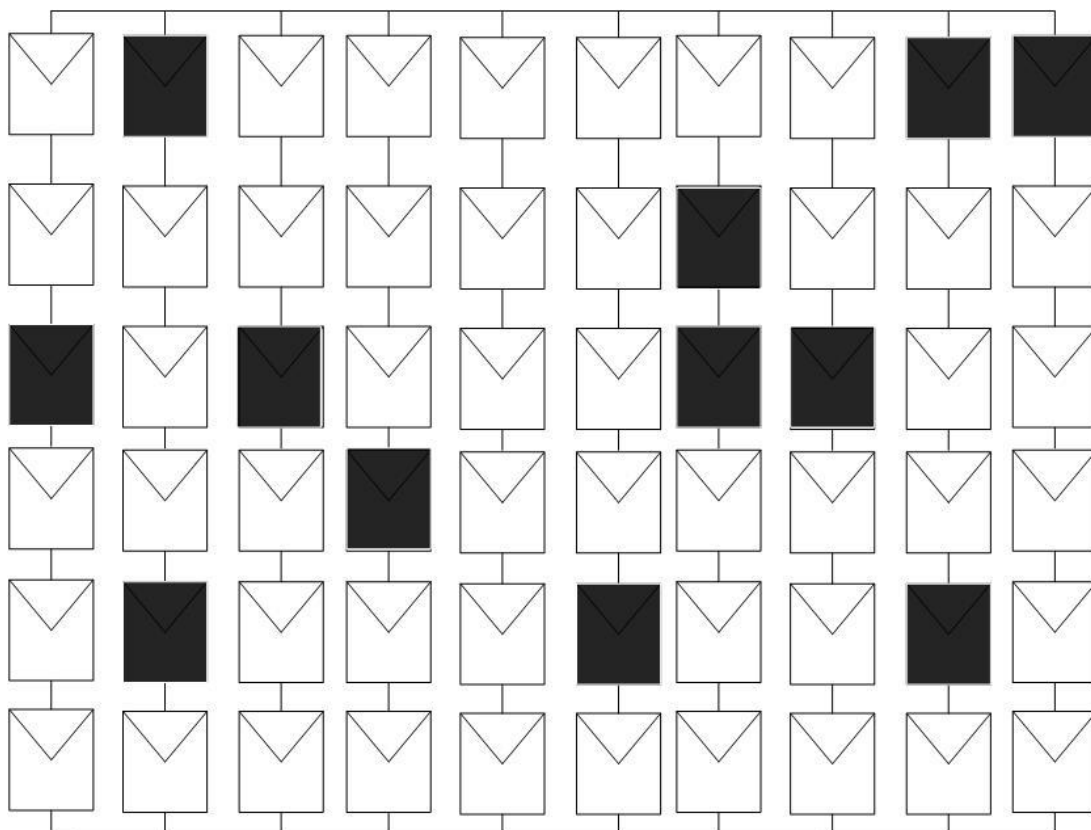
Σχήμα 5.29: Οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά την εφαρμογή των αλγορίθμων αναδιάταξης.

Ο αλγόριθμος VW που χρησιμοποιείται στη μονάδα ελέγχου για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας αποκλίνει από το πραγματικό MPP. Η πραγματική τιμή MPP πριν τη χρήση αλγορίθμου αναδιάταξης είναι 5795.6 W. Οι πραγματικές τιμές MPP μετά τη χρήση των

αλγορίθμων αναδιάταξης είναι επίσης διαφορετικές. Στον πρώτο αλγόριθμο αναδιάταξης η πραγματική τιμή MPP είναι 6779.9 W, στο δεύτερο αλγόριθμο αναδιάταξης 5795.6 W και στον τρίτο αλγόριθμο αναδιάταξης 6202.6 W.

### 5.4.3 Σενάριο τρίτο

Στο σενάριο αυτό προσομοιώνεται η λειτουργία της ίδιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας υπό συνθήκες διαφορετικής σκίασης: διάσπαρτα φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $200 \text{ W/m}^2$ , ενώ τα υπόλοιπα  $1000 \text{ W/m}^2$  (σχήμα 5.30).

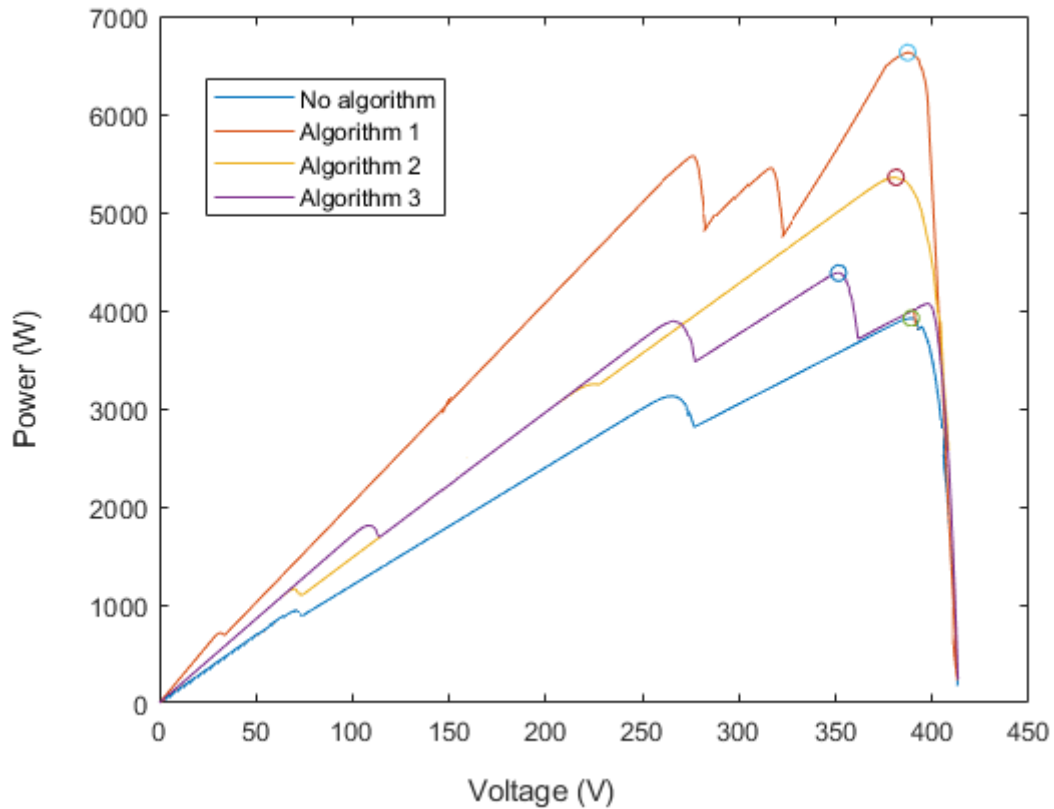


Σχήμα 5.30: Η σκίαση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο τρίτο σενάριο.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν στο φωτοβολταϊκό σύστημα οι τρεις αλγόριθμοι αναδιάταξης που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και η διάταξη Module-Integrated Converter. Τα αποτελέσματα που επιφέρουν οι μέθοδοι φαίνονται στον Πίνακα (5.21). Στο αποτέλεσμα παρατηρείται πως ο πρώτος αλγόριθμος (MPP Candidates) επιφέρει αύξηση 62.5 % στην ισχύ στο global MPP, ο δεύτερος αλγόριθμος (βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας) 28.6 % και ο τρίτος αλγόριθμος (αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού) 17.7 %. Η μέθοδος Module-Integrated Converter επιφέρει αύξηση 71 % στην ισχύ στο global MPP.

Στο Σχήμα (5.31) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά τη χρήση των αλγορίθμων αναδιάταξης.

<b>Πίνακας 5.21. Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου σκίασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.</b>		
<b>Μέθοδος</b>	<b>Ισχύς εξόδου συστοιχίας (W)</b>	<b>Τάση εξόδου συστοιχίας (V)</b>
<b>Χωρίς αλγόριθμο αναδιάταξης</b>	3919.5	389.17
<b>1<sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης</b>	6630.9	387.26
<b>2<sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης</b>	5251.7	381.25
<b>3<sup>ος</sup> αλγόριθμος αναδιάταξης</b>	4786.4	351.44
<b>Module-Integrated Converter</b>	6980.6	37.61



Σχήμα 5.31: Οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης πριν και μετά την εφαρμογή των αλγορίθμων αναδιάταξης.

Ο αλγόριθμος VW που χρησιμοποιείται στη μονάδα ελέγχου για την εύρεση του βέλτιστου σημείο λειτουργίας αποκλίνει από το πραγματικό MPP. Η πραγματική τιμή MPP πριν τη χρήση αλγορίθμου αναδιάταξης είναι 4007.6 W. Οι πραγματικές τιμές MPP μετά τη χρήση των αλγορίθμων αναδιάταξης είναι επίσης διαφορετικές. Στον πρώτο αλγόριθμο αναδιάταξης η πραγματική τιμή MPP είναι 6763.5 W, στο δεύτερο αλγόριθμο αναδιάταξης 5356.7 W και στον τρίτο αλγόριθμο αναδιάταξης 4883.2 W.

# 6.

## Συμπεράσματα

---

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση φωτοβολταϊκών συστοιχιών με δυνατότητα αναδιάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας συνδέεται ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης και μια μονάδα ελέγχου MPP (Σχήμα 1.2). Για τον υπολογισμό της βέλτιστης αναδιάταξης χρησιμοποιήθηκαν τρεις εναλλακτικοί αλγόριθμοι. Η σχεδίαση αυτή συνίσταται σε φωτοβολταϊκές συστοιχίες που αντιμετωπίζουν προβλήματα μερικής σκίασης.

Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του κάθε αλγορίθμου ξεχωριστά και πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά που προκύπτουν εφαρμόζοντας τη διάταξη Module-Integrated Converter για διάφορες συνθήκες σκίασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας. Οι μέθοδοι συγκρίθηκαν ως προς την τελική ισχύ που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Για την επιλογή ενός αλγορίθμου σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, συνυπολογίζονται αρκετοί παράγοντες. Σημαντικό ρόλο έχει το κόστος. Η εφαρμογή της διάταξης Module-Integrated Converter έχει τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς η αύξηση στην ισχύ εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας που προσφέρει είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Ωστόσο η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος και μιας μονάδας ελέγχου MPPT σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει πολύ υψηλό κόστος.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα του έκτου κεφαλαίου είναι φανερό πως σε όλες τις περιπτώσεις σκίασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, οι αλγόριθμοι αναδιάταξης βελτιώνουν την τελική ισχύ που παρέχεται στο εκάστοτε φορτίο. Αυτό φαίνεται από τα πρώτα παραδείγματα, στα οποία χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος κάθε φορά και συγκρίνεται η τελική ισχύς με την αρχική.

Στο πρώτο σενάριο ο πρώτος αλγόριθμος προσφέρει βελτίωση 34.1 %, ο δεύτερος αλγόριθμος 18.6 %, ο τρίτος αλγόριθμος 19.3 % και η μέθοδος Module-Integrated Converter 38.6 %. Στο δεύτερο σενάριο ο πρώτος αλγόριθμος προσφέρει βελτίωση 16.9 %, ο δεύτερος αλγόριθμος 0 %, ο τρίτος αλγόριθμος 7 % και η μέθοδος Module-Integrated Converter 22 %. Στο τρίτο σενάριο ο πρώτος αλγόριθμος προσφέρει βελτίωση 69.1 %, ο δεύτερος αλγόριθμος 34 %, ο τρίτος αλγόριθμος 22 % και η μέθοδος Module-Integrated Converter 78 %.

Στη μεταξύ τους σύγκριση, η μέθοδος Module-Integrated Converter προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα και τις τρεις φορές. Μεταξύ των εναλλακτικών αλγορίθμων αναδιάταξης, ο αλγόριθμος MPP Candidates (πρώτος αλγόριθμος) επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση της ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο global MPP σε όλα τα παραδείγματα. Μεταξύ των υπόλοιπων δύο αλγορίθμων, ο αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού (τρίτος αλγόριθμος) επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση στην ισχύ εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας συγκριτικά με τον αλγόριθμο βασισμένο σε μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας (δεύτερος αλγόριθμος) στο πρώτο και το δεύτερο σενάριο σκίασης, ενώ ο αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση στην ισχύ από τον αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού στο τρίτο σενάριο σκίασης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού έχει καλύτερη απόδοση όταν η σκίαση μοιράζεται ομοιόμορφα στις πλαισιοσειρές ή καλύπτει εξ ολοκλήρου μια εξ αυτών. Ο αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας έχει καλύτερη απόδοση όταν η σκίαση είναι διάσπαρτη στη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι στο δεύτερο σενάριο ο δεύτερος αλγόριθμος δεν προσφέρει καμία αύξηση της ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί η σκίαση περιορίζεται στα δύο τελευταία φωτοβολταϊκά πλαίσια της κάθε πλαισιοσειράς. Το άθροισμα της ηλιακής ακτινοβολίας της κάθε γραμμής είναι το ίδιο, επομένως ο αλγόριθμος δεν μπορεί να προχωρήσει σε κάποια αναδιάταξη και η τελική ισχύς είναι ίδια με την αρχική.

Αναλύοντας όλα τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει καταλήγουμε στις εξής επιλογές:

- Αν δεν συνυπολογιστεί το κόστος, τότε η βέλτιστη λύση είναι η μέθοδος Module-Integrated Converter. Σε όλα τα παραδείγματα παρέχει τη μέγιστη ισχύ στο φορτίο.

- Αν το υψηλό κόστος αποτελεί πρόβλημα, τότε η αμέσως επόμενη λύση είναι ο αλγόριθμος MPP Candidates (πρώτος αλγόριθμος). Σε όλα τα παραδείγματα της σύγκρισης μεταξύ των αλγορίθμων, παρέχει στο φορτίο μέγιστη ισχύ.
- Αν για οποιοδήποτε λόγο επιλεγθεί να μην χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος MPP Candidates (πρώτος αλγόριθμος), τότε αν η σκίαση έχει μοιραστεί ομοιόμορφα στις πλαίσιοσειρές ή καλύπτει κάποιες από αυτές εξ ολοκλήρου η επιλογή είναι ο αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού (τρίτος αλγόριθμος). Συγκριτικά με τον αλγόριθμο βασισμένο σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας (δεύτερος αλγόριθμος) έχει μεγαλύτερη αύξηση της ισχύος στο global MPP σε δύο από τα τρία σενάρια και δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα που αναφέρθηκε παραπάνω για τον δεύτερο αλγόριθμο στο δεύτερο σενάριο.
- Αν η σκίαση είναι διάσπαρτη στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και δεν έχει επιλεγθεί ο αλγόριθμος MPP Candidates (πρώτος αλγόριθμος), τότε η αμέσως επόμενη επιλογή είναι ο αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας (τρίτος αλγόριθμος).

Στη σύγκριση των μεθόδων με βάση το κόστος η μέθοδος Module-Integrated Converter είναι η πιο ακριβή, λόγω του μετατροπέα ισχύος και της μονάδας ελέγχου που πρέπει να συνδεθούν σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο αλγόριθμος MPP Candidates (πρώτος) και ο αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού (τρίτος) χρησιμοποιούν μετρητές ρεύματος και τάσης. Επιπλέον χρειάζονται αρκετή μνήμη για να αποθηκεύσουν τους πίνακες που χρησιμοποιούν. Ο αλγόριθμος βασισμένος σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας (δεύτερος) χρησιμοποιεί μετρητές ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η μνήμη που χρειάζεται είναι πολύ λιγότερη συγκριτικά με τους άλλους δύο αλγορίθμους.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Ένα κομμάτι για την επέκταση της εργασίας θα μπορούσε να είναι η χρήση των μεθόδων που αναλύθηκαν, σε ένα πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Αυτό θα οδηγούσε σε μια επαλήθευση των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν από την προσομοίωση. Η διασταύρωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων, θα μπορούσε να δώσει μια πιο

σφαιρική εικόνα της συγκριτικής αξιολόγησης των μεθόδων αναδιάταξης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.

# 7.

## Βιβλιογραφία

---

- [1] EEA — Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, “Η ενέργεια και το περιβάλλον στην Ευρωπαϊκή Ένωση”, Εκδόσεις Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2002.
- [2] 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 Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, pp. 182-190, July 2014.
- [3] M.L. Orozco Gutierrez, G. Spanguolo, J. M. Ramirez-Scarpetta, G. Petrone and C.A. Ramos-Paja, “Optimized Configuration of Mismatched Photovoltaic Arrays”, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 6, no. 5, pp. 1210 – 1220, July 2016.
- [4] Yousef Mahmoud, Ehab F. ElSaadany, “Enhanced Reconfiguration Method for Reducing Mismatch Losses in PV Systems”, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 7, no. 6, pp. 1746 – 1754, September 2017.
- [5] Yihua Hu, Jiangfeng Zhang, Peng Li, Dongsheng Yu, Lin Jiang, “Non-Uniform Aged Modules Reconfiguration for Large-Scale PV Array”, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 17, no. 3, pp. 560 – 569, July 2017.

- [6] Sally Sajadian, Reza Ahmadi, “Distributed Maximum Power Point Tracking Using Model Predictive Control for Photovoltaic Energy Harvesting Architectures Based on Cascaded Power Optimizers”, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 7, no. 3, pp. 849 – 857, March 2017.
- [7] Dmitri Vinnikov, Andrii Chub, Elizaveta Liivik, Roman Kosenko, Oleksandr Korkh, “Solar Optiverter –A Novel Hybrid Approach to the Photovoltaic Module Level Power Electronics”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 5, pp. 3869 – 3880, July 2018.
- [8] Thanikanti Sudhakar Babu, J. Prasanth Ram, Tomislav Dragicevi, Masafumi Miyatake, Frede Blaabjerg, Natarajan Rajasekar, “Particle Swarm Optimization Based Solar PV Array Reconfiguration of the Maximum Power Extraction Under Partial Shading Conditions”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 74 – 85, June 2017.
- [9] M.L. Orozco-Gutierrez, J.M. Ramirez-Scarpetta, G. Spagnuolo, G. Petrone, C.A. Ramos-Paja, “Fast Estimation of MPPs in Mismatched PV Arrays based on Lossless Model”, 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), August 2015.
- [10] N. Mohan and T. M. Undeland, “Power Electronics: Converters, Applications, and Design”, John Wiley & Sons, 2007.
- [11] Γ. Δημητρίου, “Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Φωτοβολταϊκών Στοιχείων”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2019.