



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

## **Διπλωματική Εργασία**

# **Ηλεκτρονικό Σύστημα Μεγιστοποίησης του Βαθμού Απόδοσης Φ/Β Μετατροπών DC-DC**

**Σασών Νεκτάριος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

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

**Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος**

**Αναπλ. Καθηγητής Παπαευσταθίου Ιωάννης**

---

**Χανιά, Νοέμβριος 2017**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ένα σύστημα το οποίο έχει τη δυνατότητα, για μία δεδομένη λαμβάνουσα ενέργεια από μία φωτοβολταϊκή διάταξη, να αυξήσει την ενέργεια που τελικά αποθηκεύεται σε συστοιχίες συσσωρευτών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας DC/DC για τη μετατροπή της τάσης της φωτοβολταϊκής διάταξης σε τάση ικανή να φορτίζει τις συστοιχίες των συσσωρευτών. Η λειτουργία του μετατροπέα DC/DC ελέγχεται από ένα μικροελεγκτή στον οποίο εκτελούνται τρεις εναλλακτικοί αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν. Οι αλγόριθμοι αυτοί επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή αποθήκευση ενέργειας στους συσσωρευτές για ομοιόμορφη και μη-ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοβολταϊκή διάταξη. Η λειτουργία των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν, βασίζεται στον έλεγχο του κύκλου λειτουργίας (duty cycle) και τη συχνότητα διακοπισμού (switching frequency) του μετατροπέα DC/DC σε πραγματικό χρόνο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι με το σύστημα που αναπτύχθηκε, μπορεί να αυξηθεί η ισχύς που μεταφέρεται από τη φωτοβολταϊκή διάταξη στους συσσωρευτές κατά 17.5-18.5% % σε σύγκριση με την ισχύ που μεταφέρεται στην περίπτωση μη-βελτιστοποιημένης λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	7
2.1 Η ηλιακή ισχύς και τρόποι αξιοποίησής της.....	7
2.2 Περιγραφή των δομικών στοιχείων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος .....	9
2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοβολταϊκής κυψέλης .....	11
2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	12
2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας .....	13
2.6 Αλγόριθμοι MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	16
3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC-DC .....	20
3.1 Διακοπτικοί μετατροπείς συνεχούς ρεύματος .....	18
3.2 Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης (buck converter).....	22
3.3 Μετατροπείς ανύψωσης τάσης (boost converter) .....	24
3.4 Βαθμός απόδοσης διακοπτικών μετατροπών DC-DC .....	25
4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ.....	29
4.1 Το συνολικό σύστημα μετατροπής ισχύος .....	27
4.2 Οι αισθητήρες και ο μικροελεγκτής ελέγχου του συστήματος .....	31
4.3 Ο αλγόριθμος μεγιστοποίησης της ισχύος εισόδου του μετατροπέα ανύψωσης της τάσης .....	35
4.4 Ο αλγόριθμος MEPT (Maximum Efficiency Point Tracking) .....	36
4.5 Ο αλγόριθμος PSO (Particle Swarm Optimization).....	38
4.6 Σειρά εκτέλεσης των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO στο μικροεπεξεργαστή.....	40
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	42
5.1 Το πειραματικό σύστημα μετατροπής ισχύος .....	39
5.2 Πειραματικές μετρήσεις σε διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.....	44
5.3 Πειραματικές μετρήσεις σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας .....	56
5.4 Πειραματικά αποτελέσματα του αλγορίθμου MPPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	58
5.5 Πειραματικά αποτελέσματα των αλγορίθμων MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας .....	63
5.6 Πειραματικά αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	69
5.7 Πειραματικά αποτελέσματα των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO σε ξαφνική μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας).....	76
5.8 Πειραματικά αποτελέσματα των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO σε ξαφνική μεταβολή ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση.....	78
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	80
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	82

---

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η ενέργεια απετέλεσε και αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Σε όλη τη διάρκεια της ύπαρξής του, ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε έξυπνα και πολυμήχανα τις δυνατότητες που του παρείχε απλόχερα η ίδια η φύση, όπως τη φωτιά, το νερό, τον άνεμο και τον ήλιο, προκειμένου να βελτιώσει το επίπεδο ζωής του.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιεί την ενέργεια από την καύση των υδρογονανθράκων, όπως το πετρέλαιο και ο λιγνίτης και βρήκε τρόπο να την μετατρέπει σε ηλεκτρική μέσω θερμοηλεκτρικών μονάδων. Αυτοί όμως οι ενεργειακοί πόροι έχουν αρχίσει πλέον να λιγοστεύουν επικίνδυνα, λόγω της ευρείας και χρόνιας χρήσης τους. Επιπροσθέτως, η ευρεία και χρόνια χρήση τους έχει προξενήσει στο περιβάλλον σοβαρές ζημιές, με επιβλαβή για τον άνθρωπο αποτελέσματα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι απρόβλεπτες κλιματολογικές αλλαγές και πολλά άλλα. Κάποια στιγμή, εμφανίστηκε στο προσκήνιο η πυρηνική ενέργεια, η οποία φαινόταν πολλά υποσχόμενη για την επίλυση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος, όμως πολύ σύντομα διαπιστώθηκε, μέσα από δραματικά περιστατικά που σημειώθηκαν, η αδυναμία ασφαλούς παραγωγής πυρηνικής ενέργειας και η απειλητική πιθανότητα ολοσχερούς καταστροφής του πλανήτη από τα πυρηνικά απόβλητα των πυρηνικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αξιοποίησή τους στο μέγιστο δυνατό καθίσταται πλέον άκρως απαραίτητη [1].

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για όλες σχεδόν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η κυματική ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια κλπ. Σημαντικό τμήμα της έρευνας στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας έχει αφοσιωθεί στη μελέτη και στην καλύτερη

---

αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας ηλιακής ενέργειας σε πολλές περιοχές της Γης. Επίσης, άλλοι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρειάζονται πολύ κοστοβόρες εγκαταστάσεις προκειμένου να αξιοποιηθούν σωστά.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία πολύ πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη μορφή ενέργειας, καθώς η ενέργεια που αποδίδει ο Ήλιος στη Γη σε κάθε σημείο της τροχιάς του αλλά και στο χρονικό διάστημα ενός ημερολογιακού έτους είναι πολύ συγκεκριμένη και μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με βάση τις εξισώσεις τροχιάς κίνησης του Ηλίου που προκύπτουν από τον κλάδο της Ηλιακής Μηχανικής. Γι' αυτό το λόγο, οποιαδήποτε σημαντική βελτίωση γίνεται στα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, αξιοποιείται απευθείας από τη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Έως σήμερα, από την έρευνα και την εξέλιξη που έχει γίνει στον τομέα των Ηλεκτρονικών Ισχύος, ο οποίος έχει άμεσο και ζωτικό ρόλο στην σωστή αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, έχει επιτευχθεί η ανάπτυξη τεχνικών και αλγορίθμων οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα, σε κάθε θέση της ηλιακής τροχιάς, να εντοπίζουν τη μέγιστη ηλιακή ισχύ και στη συνέχεια μέσω μετατροπών συνεχούς ρεύματος, αυτή να αποθηκεύεται σε συστοιχίες μπαταριών για μετέπειτα χρήση. Μερικοί από τους πιο διάσημους αλγόριθμους όπως ο Perturb & Observe, ο Incremental Conductance κλπ. χρησιμοποιούνται ευρέως και σε διασυνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, αλλά και σε αυτόνομα οικιακά συστήματα [2].

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος, μέσω του οποίου δίνεται η δυνατότητα, έχοντας μία δεδομένη μέγιστη ισχύ από μία φωτοβολταϊκή διάταξη, να αυξάνεται η ισχύς και άρα και η ενέργεια που αποθηκεύεται σε συστοιχίες συσσωρευτών. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν μικροελεγκτή ο οποίος ελέγχει σε πραγματικό χρόνο τη λειτουργία ενός μετατροπέα DC/DC που φορτίζει μία συστοιχία συσσωρευτών με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει μία φωτοβολταϊκή διάταξη, καθώς επίσης και από αισθητήρες, μέσω των οποίων υπολογίζεται η τιμή της ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα αλλά και στην έξοδό του. Υλοποιήθηκαν τρεις εναλλακτικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι εκτελούνται από τον μικροελεγκτή και που με βάση τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, ρυθμίζουν τη λειτουργία του μετατροπέα DC/DC με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η ισχύς και στην είσοδο αλλά και στην έξοδο του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/DC και επομένως η ισχύς που τελικά μεταφέρεται στη συστοιχία των συσσωρευτών στην έξοδο του.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται τα δομικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς επίσης και οι χαρακτηριστικές λειτουργίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ακόμα αναλύεται, μέσω διαγραμμάτων, το παραγόμενο ρεύμα και η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και θερμοκρασίας, όπως επίσης και τι συμβαίνει στην περίπτωση της μερικής σκίασης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τέλος, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας αλγορίθμων που μεγιστοποιούν την ηλεκτρική ισχύ που λαμβάνεται από μία φωτοβολταϊκή διάταξη, όπως ο αλγόριθμος Perturb & Observe, ο Incremental Conductance και ο Current Sweep

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται η αρχή λειτουργίας των διακοπτικών μετατροπέων ισχύος συνεχούς ρεύματος, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στους μετατροπείς υποβιβασμού της τάσης και στους μετατροπείς ανύψωσης της τάσης. Επίσης περιγράφεται η έννοια του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα και πώς αυτός μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του μετατροπέα μέσω διαγραμμάτων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η δομή του μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, όπως επίσης και ο μικροεπεξεργαστής που ελέγχει τη λειτουργία του με βάση τους αλγόριθμους που υλοποιήθηκαν, οι οποίοι επίσης περιγράφονται αναλυτικά.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του συστήματος που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, όπου μέσω διαγραμμάτων, διαφαίνεται η συμπεριφορά του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και κατά πόσο οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν βελτιώνουν το συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος.

Τέλος, στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και οι δυνατές μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας αυτής.

---

# 2.

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

---

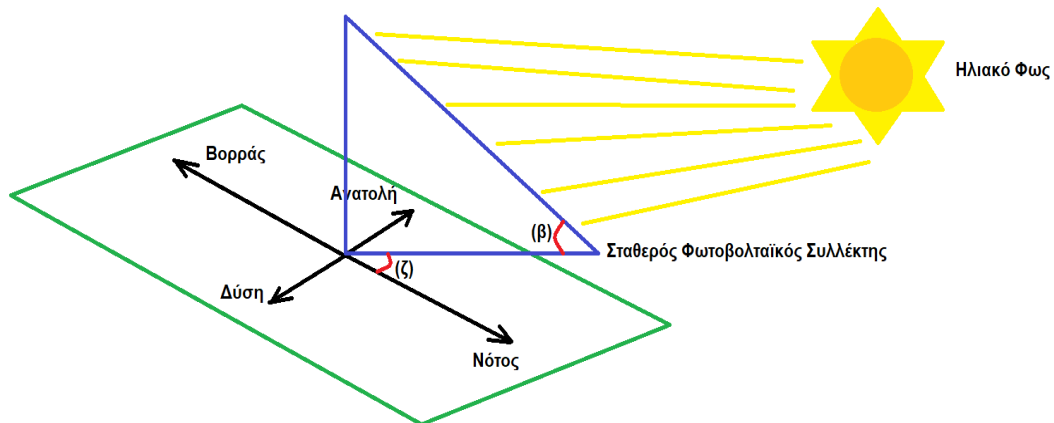
### 2.1 Η ηλιακή ισχύς και τρόποι αξιοποίησής της

Η μέγιστη πυκνότητα της ισχύος που παρέχει ο ήλιος στην ατμόσφαιρα της γης είναι περίπου  $1.37 \text{ kW/m}^2$ . Παρατηρείται λοιπόν, ότι η ηλιακή ισχύς είναι εξαιρετικά υψηλή και θα μπορούσε να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη, αν εκμεταλλευόταν με κάθε τρόπο [4]. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με διάφορες μεθόδους. Οι δύο κυριότερες είναι η συλλογή και μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε εσωτερική θερμική ενέργεια ρευστού (θερμοσιφωνικά συστήματα) και η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (φωτοβολταϊκά συστήματα) [1].

Στη περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χρησιμοποιούνται ειδικές μονάδες συλλογής της ηλιακής ενέργειας που ονομάζονται φωτοβολταϊκά πλαίσια (photovoltaic panels). Όμως, η περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά, καθώς και η περιστροφή της γύρω από τον άξονά της, έχει σαν αποτέλεσμα η ηλιακή ισχύς να είναι διαφορετική κάθε χρονική στιγμή, καθώς και από ημέρα σε ημέρα, στη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους. Επομένως, για την αποδοτικότερη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας, έχει σημαντικό ρόλο ο σωστός προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

---

Για τη μεγιστοποίηση της λαμβάνουσας από τον Ήλιο ηλιακής ισχύος, θα πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα δύο γωνίες αναφορικά με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1: Προσανατολισμός φωτοβολταϊκού συλλέκτη σε σχέση με τη θέση του Ήλιου.

Η γωνία ( $\zeta$ ) που ονομάζεται *αζιμούθιο* ή *αζιμουθιακή γωνία*, είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας του συλλέκτη στο οριζόντιο επίπεδο με τον άξονα Βορρά – Νότου [3] (Σχ. 2-1). Για τη βέλτιστη συλλογή ηλιακής ενέργειας ενός σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου, θα πρέπει ο προσανατολισμός του να είναι όσο το δυνατόν νοτιότερος όταν η εγκατάσταση γίνεται στο Βόρειο Ημισφαίριο ( $\zeta = 0^\circ$ ), ενώ αντίθετα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν βορειότερος, όταν είναι στο Νότιο Ημισφαίριο ( $\zeta = 180^\circ$ ). Όσον αφορά την κλίση του συλλέκτη, που εκφράζεται από τη γωνία ( $\beta$ ), για μεγάλα και μέσα γεωγραφικά πλάτη (δηλαδή πάνω από  $20^\circ$ ), ο εμπειρικός τύπος που δίνει τη βέλτιστη κλίση του συλλέκτη δίνεται από την εξίσωση [1]:

$$\beta = \lambda - (10^\circ \text{ έως } 15^\circ) \quad (1)$$

όπου  $\lambda$  είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου τοποθέτησης του συλλέκτη. Ο σωστός προσανατολισμός του συλλέκτη είναι το πρώτο σημαντικό βήμα για τη μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, καθότι το μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ο χαμηλός



βαθμός απόδοσής τους, που κυμαίνεται από 5% - 17% [4]. Για το λόγο αυτό, όταν είναι επιθυμητή μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε ειδικές ηλεκτρομηχανικές διατάξεις που ονομάζονται *solar trackers*, οι οποίοι φροντίζουν να μετακινούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της διάταξης με τέτοιο τρόπο, ώστε η επιφάνειά τους να είναι πάντα κάθετη στην ακτινοβολία του Ήλιου.

## 2.2 Περιγραφή των δομικών στοιχείων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Για την άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται τα *φωτοβολταϊκά στοιχεία*. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρικά σε σειρά και παράλληλα, για την παραγωγή της απαιτούμενης τάσης και ισχύος, σχηματίζοντας *φωτοβολταϊκά πλαίσια και συστοιχίες* [5]

Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και συστοιχίες, όσο μεγαλύτερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω τους, τόσο μεγαλύτερη ισχύ παράγουν. Για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένα ειδικό όργανο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην εργασία αυτή, που ονομάζεται *πυρανόμετρο*.

Το δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών μονάδων είναι τα *φωτοβολταϊκά ή ηλιακά στοιχεία* (ή *κυψέλες*), τα οποία αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια *Bell* το 1954, με αρχικό προορισμό τις διαστημικές εφαρμογές. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, με βάση έναν κβαντικό μηχανισμό, ο οποίος διατυπώθηκε το 1839 από το Γάλλο φυσικό *Edmund Bequerel* και είναι γνωστός ως *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο* [4].

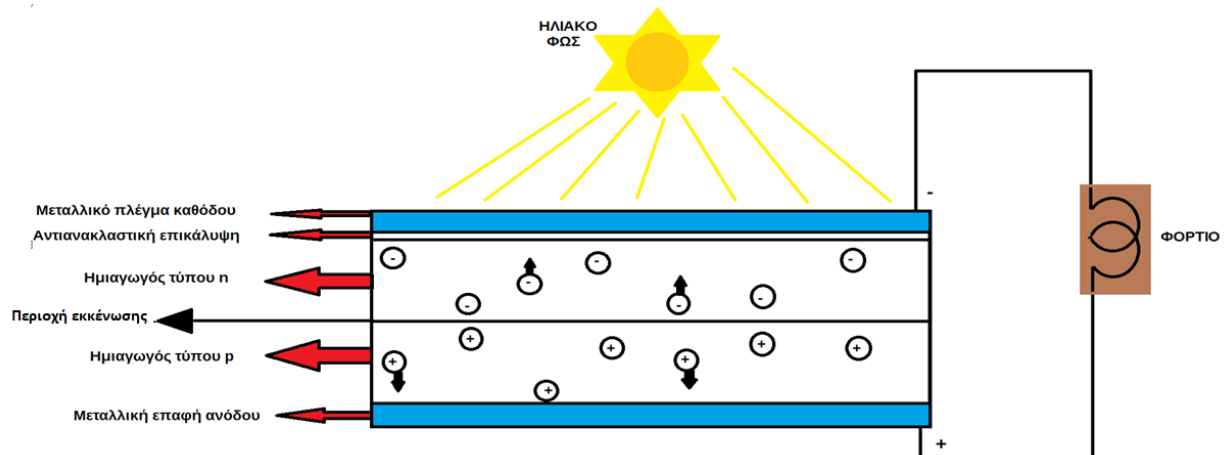
Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν σε ορισμένα υλικά (πχ. πυρίτιο) προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία, της οποίας τα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από μία τιμή που είναι χαρακτηριστική του εκάστοτε υλικού, τότε απελευθερώνονται εντός των υλικών ηλεκτρικά φορτία. Η ενέργεια  $E$  και η συχνότητα  $f$  των φωτονίων συνδέονται με τη σχέση:

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά του *Planck*.

Επομένως, όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας υπερβεί μία χαρακτηριστική για κάθε υλικό τιμή, τότε παράγονται φορείς αγωγιμότητας. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι συνήθως επαφές  $p - n$ ,

όπως οι δίοδοι, κατασκευασμένες από κατάλληλα ημιαγωγά υλικά. Το πιο ευρέως διαδεδομένο υλικό κατασκευής των φωτοβολταϊκών κυψελών είναι το πυρίτιο ( $Si$ ), σε ποσοστό μεγαλύτερο από 95%. Παρακάτω απεικονίζεται η δομή μία φωτοβολταϊκής κυψέλης πυριτίου.



Σχήμα 2-2: Κατασκευαστική δομή μίας φωτοβολταϊκής κυψέλης πυριτίου.

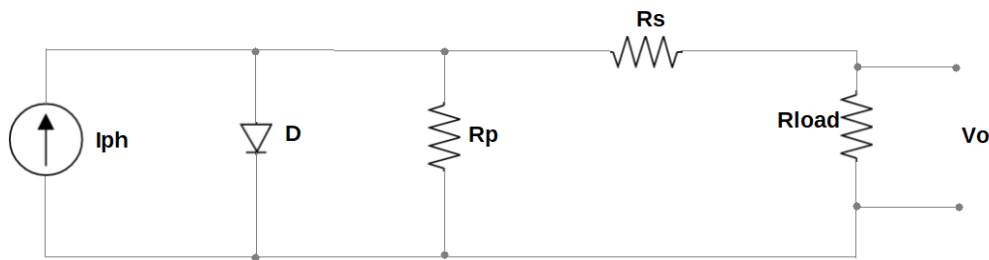
Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες που κατασκευάζονται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (14% - 17%), αλλά έχουν υψηλό κόστος. Οι κυψέλες από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχουν μειωμένο κόστος και βαθμό απόδοσης 13% - 15%.

Όταν στην ηλιακή κυψέλη προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία (Σχ. 2-2), η ενέργεια των φωτονίων παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών. Με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής εκκένωσης, τα ηλεκτρόνια οδηγούνται προς τον ημιαγωγό τύπου  $n$  (κάθοδο) και οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου  $p$  (άνοδο). Στους ακροδέκτες της κυψέλης δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού που προκαλεί ροή ρεύματος στο φορτίο [4].

Ο βαθμός απόδοσης μιας κυψέλης είναι δύσκολο να υπερβεί το 17%. Για να βελτιωθεί χρησιμοποιούνται άλλα υλικά, όπως ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός ( $CuInSe_2$ ), το Τελουριούχο Κάδμιο ( $CdTe$ ) κλπ. Το καλύτερο υλικό έχει αποδειχθεί το Αρσενικούχο Γάλλιο ( $GaAs$ ), με ενεργειακή απόδοση 22%, αλλά έχει πολύ υψηλό κόστος κατασκευής [1].

## 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοβολταϊκής κυψέλης

Για την καλύτερη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μίας φωτοβολταϊκής κυψέλης, σχεδιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα που εικονίζεται στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Το ισοδύναμο κύκλωμα (Σχ. 2-3) περιλαμβάνει μία πηγή ρεύματος, η οποία παράγει το φωτόρευμα  $I_{ph}$  (είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας) και την παράλληλη δίοδο  $D$ . Όταν οι ακροδέκτες της κυψέλης είναι βραχυκυκλωμένοι, η τάση στα άκρα της  $R_{load}$  είναι μηδενική, ενώ το ρεύμα που τη διαρρέει λαμβάνει τη μέγιστη τιμή που είναι περίπου ίση με  $I_{ph}$ . Όταν οι ακροδέκτες της κυψέλης είναι ανοικτοκυκλωμένοι, το ρεύμα της  $R_{load}$  είναι μηδέν, ενώ η τάση στα άκρα της λαμβάνει τη μέγιστη τιμή  $V_o = V_{oc}$ . Συνδέοντας ένα φορτίο στα άκρα της κυψέλης, το ρεύμα  $I_{ph}$  κατανέμεται μεταξύ της διόδου  $D$ , της αντίστασης  $R_p$  και του φορτίου [2]. Η τιμή του ρεύματος εξόδου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

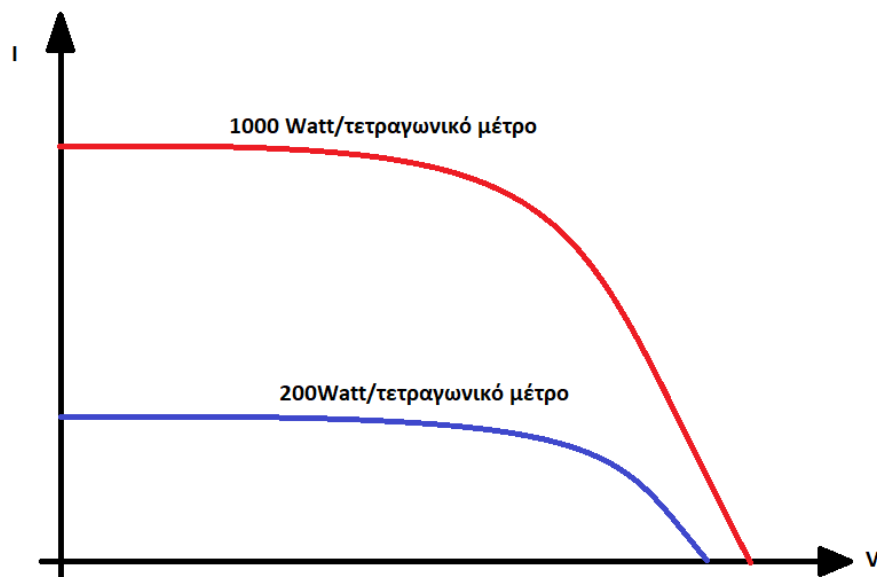
$$I_o = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_s \cdot (e^{V_d/V_t} - 1) - \frac{V_d}{R_p} \quad (3)$$

όπου  $I_d$  το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο,  $I_p$  το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_p$  και  $I_s$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου  $D$ . Η τάση  $V_d$  είναι η τάση στα άκρα της διόδου και  $V_t$  είναι η θερμική τάση, με τιμή 25.7mV σε θερμοκρασία 25°C.

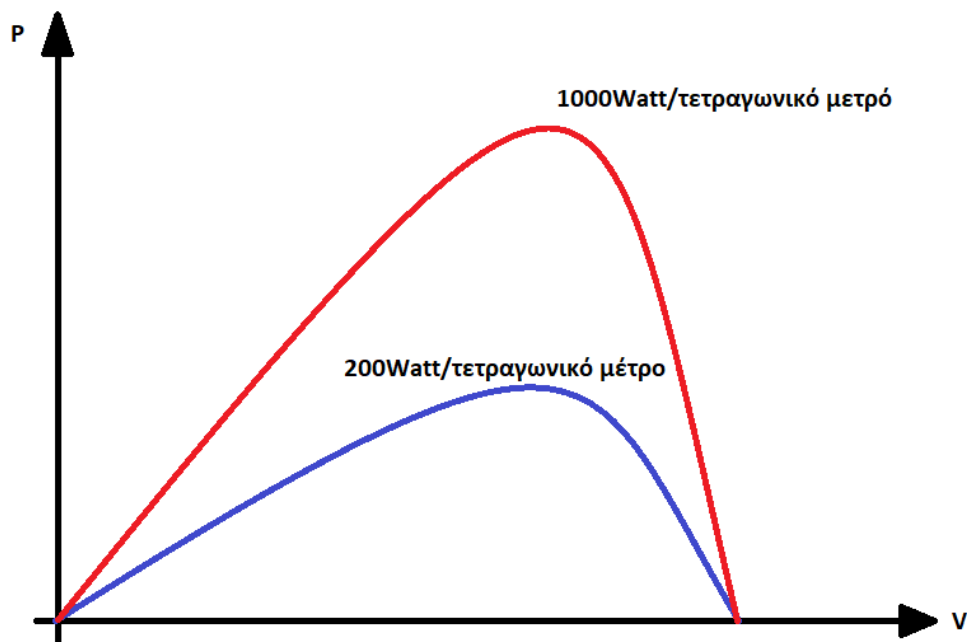
## 2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (2), όσο μεγαλύτερη είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη, τόσο περισσότεροι φορείς αγωγιμότητας παράγονται και ακολούθως τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα αναπτύσσεται. Όταν όμως αυξάνεται το παραγόμενο ρεύμα, αναλόγως αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς της διάταξης.

Για να μπορέσει να μελετηθεί καλύτερα η συμπεριφορά μίας φωτοβολταϊκής διάταξης κάτω από ορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, σχεδιάζονται δύο είδη πολύ βασικών χαρακτηριστικών καμπυλών, η καμπύλη ρεύματος – τάσης ( $I-V$ ) και η καμπύλη ισχύος – τάσης ( $P-V$ ). Στα Σχήματα 2-4 και 2-5 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος- τάσης και ισχύος-τάσης για τιμές έντασης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ίσες με  $1000\text{W/m}^2$  και  $200\text{W/m}^2$ , αντίστοιχα. Στα διαγράμματα αυτά θεωρείται ότι η ίδια τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει σε όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία της συστοιχίας (ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας). Παρατηρείται ότι στην περίπτωση των  $1000\text{W/m}^2$  η παραγωγή ρεύματος και ισχύος είναι εμφανώς μεγαλύτερη, λόγω μεγαλύτερης έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



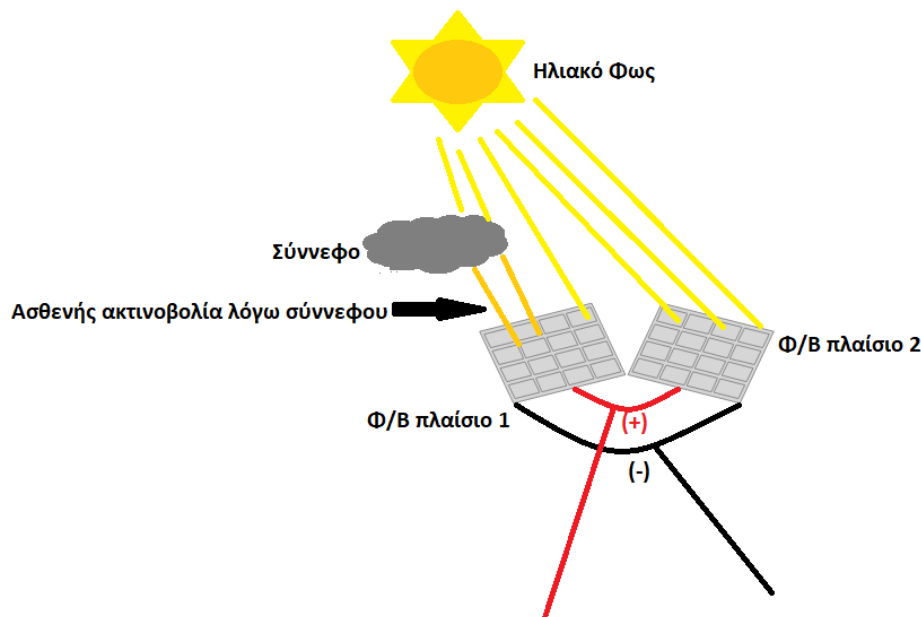
Σχήμα 2-4: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I-V$ ) μίας φωτοβολταϊκής διάταξης σε τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας  $1000\text{W/m}^2$  και  $200\text{W/m}^2$ , αντίστοιχα.



Σχήμα 2-5: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) μίας φωτοβολταϊκής διάταξης σε τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας  $1000\text{W/m}^2$  και  $200\text{W/m}^2$ , αντίστοιχα.

## 2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την παραγόμενη ισχύ μίας φωτοβολταϊκής διάταξης είναι το *φαινόμενο μερικής σκίασης*. Στην περίπτωση αυτή, τα επιμέρους φωτοβολταϊκά πλαίσια που σχηματίζουν τη φωτοβολταϊκή διάταξη δε δέχονται όλα την ίδια ακτινοβολία εξαιτίας της σκίασης από κάποιο φυσικό ή τεχνητό παράγοντα (πχ. σύννεφα, σκιά ενός κτιρίου κλπ).

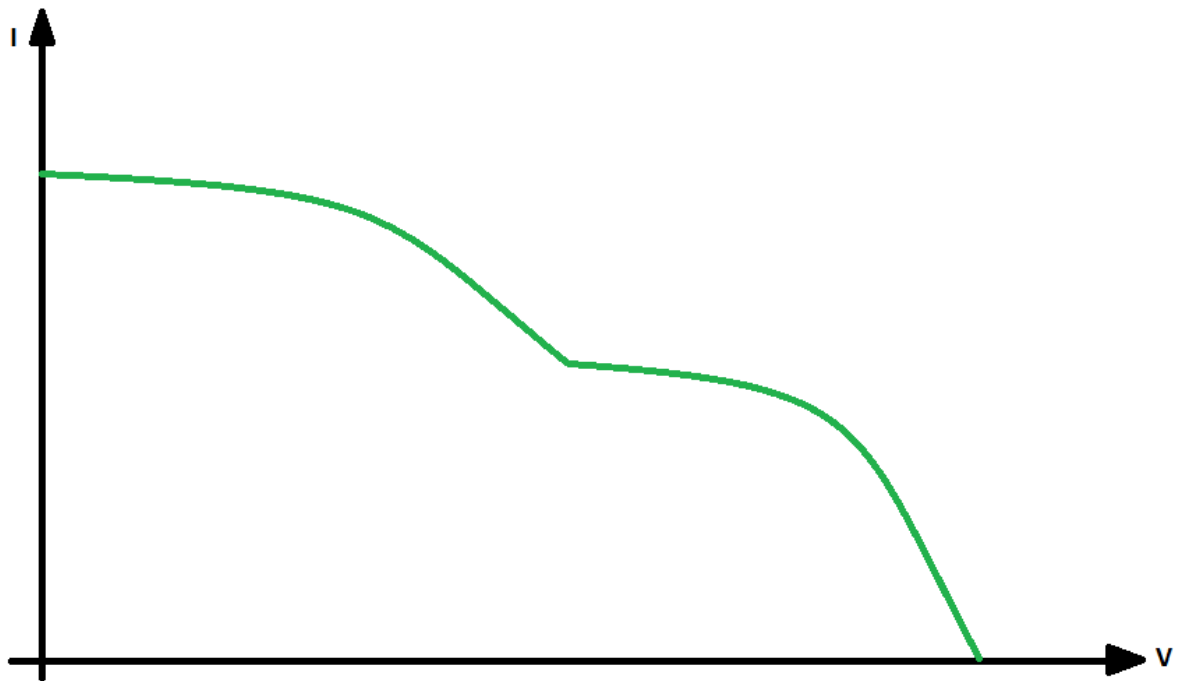


Σχήμα 2-6: Παράδειγμα μερικής σκίασης φωτοβολταϊκής διάταξης λόγω σύννεφου.

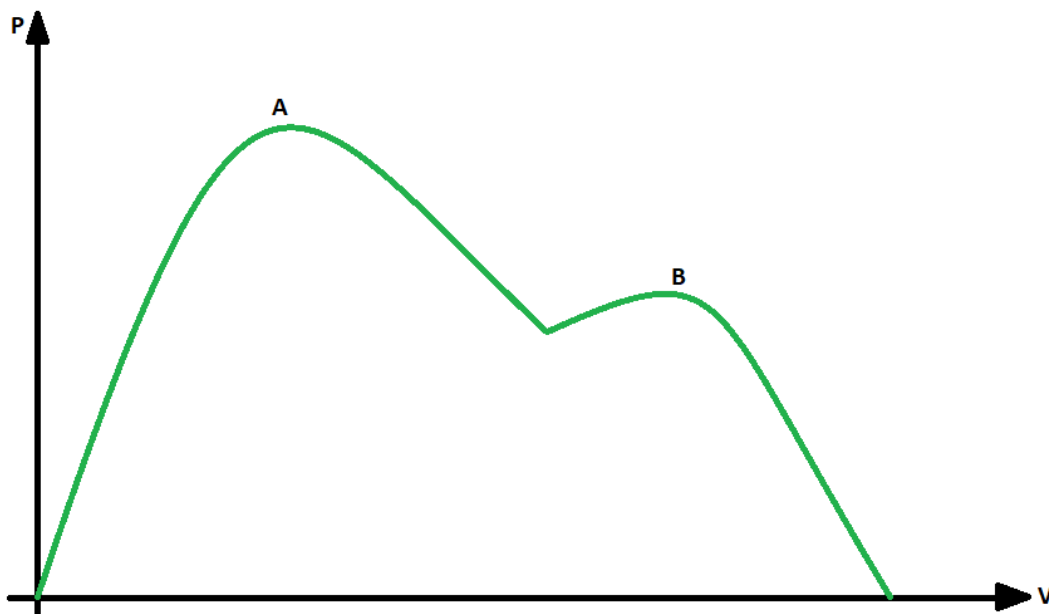
Στο Σχήμα 2-6 φαίνεται μία περίπτωση μερικής σκίασης σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη λόγω σύννεφου που βρίσκεται μεταξύ του Ήλιου και της διάταξης. Η ακτινοβολία που βγαίνει μέσα από το σύννεφο (οι πορτοκαλί ακτίνες), έχει πολύ μικρότερη ισχύ από την αρχική ακτινοβολία του Ήλιου. Έτσι, παρόλο που όλη η διάταξη έχει ακριβώς την ίδια κλίση απέναντι στον Ήλιο, λόγω του σύννεφου, δεν δέχεται όλη την ίδια ακτινοβολία.

Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο όταν η διάταξη είναι εγκατεστημένη σε αστική περιοχή, όπου σκίαση εκτός από τα σύννεφα προκαλείται από τα γειτονικά κτίρια, τα δέντρα και τα εναέρια ηλεκτρικά δίκτυα. Το ρεύμα που παράγει μία φωτοβολταϊκή μονάδα μειώνεται σημαντικά όταν λειτουργεί σε σκίαση, σε σχέση με το παραγόμενο ρεύμα όταν δέχεται απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία [4].

Στην περίπτωση της μερικής σκίασης, τα διαγράμματα ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης έχουν διαφορετική μορφή από την περίπτωση της ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Στα Σχήματα 2-7 και 2-8 φαίνονται παραδείγματα της μορφής που έχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος- τάσης και ισχύος – τάσης, αντίστοιχα, όταν η φωτοβολταϊκή διάταξη δεν δέχεται όλη την ίδια ακτινοβολία λόγω μερικής σκίασης (ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας).



Σχήμα 2-7: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I$ - $V$ ) όταν η φωτοβολταϊκή διάταξη δέχεται ανομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2-8: Διάγραμμα ισχύος-τάσης ( $P$ - $V$ ) όταν η φωτοβολταϊκή διάταξη δέχεται ανομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία.

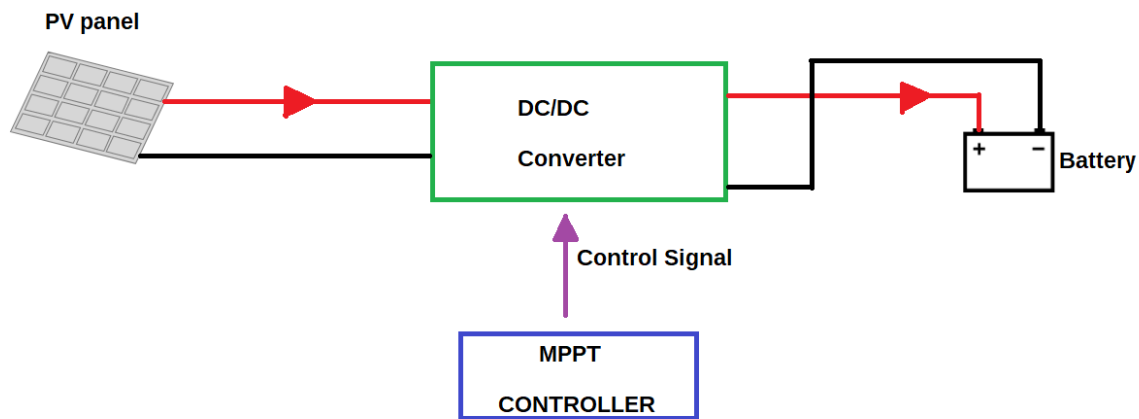
Στην καμπύλη ρεύματος-τάσης παρατηρείται αρχικά πτώση της τιμής του ρεύματος καθώς η τάση αυξάνεται, αλλά στη συνέχεια, για ένα εύρος τιμών της τάσης παραμένει σταθερό και μετά έχει ξανά πτωτική πορεία, σχηματίζοντας έτσι ένα χαρακτηριστικό «διπλό γόνατο» στην καμπύλη. Στις τιμές της τάσης που σχηματίζονται αυτά τα «γόνατα», στο αντίστοιχο διάγραμμα ισχύος τάσης (Σχ. 2-8), εμφανίζονται δύο μέγιστες τιμές ισχύος. Από αυτές, η μικρότερη ονομάζεται *τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος (local maximum power point)* (σημείο Β στο Σχ. 2-8) ενώ η μεγαλύτερη είναι το *καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος (global maximum power point)* (σημείο Α στο Σχ. 2-8).

Η θέση του καθολικού μεγίστου επάνω στο διάγραμμα ισχύος-τάσης, δηλαδή αν θα είναι στα δεξιά του αντίστοιχου τοπικού μεγίστου ή αν θα είναι στα αριστερά του (Σχ. 2-8) καθορίζεται από το ποιο πλαίσιο της διάταξης δέχεται τη μεγαλύτερη ακτινοβολία. Σε κάθε περίπτωση, το επιθυμητό είναι να μπορεί το σύστημα παραγωγής και διαχείρισης της ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας να εντοπίζει το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος. Επομένως, στο σύστημα και στους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία, καλύφθηκε και η περίπτωση του φαινομένου της μερικής σκίασης, έτσι ώστε να μην υπάρχουν απώλειες ισχύος λόγω αυτού. Οι σχετικοί αλγόριθμοι αναλύονται παρακάτω στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

## 2.6 Αλγόριθμοι MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Ο κλάδος της τεχνολογίας ανάπτυξης αλγορίθμων και ηλεκτρονικών συστημάτων για την καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας έχει, μέχρι σήμερα, επικεντρωθεί γύρω από το πώς μεγιστοποιείται η παραγωγή ισχύος από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό τις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Maximum Power Point Tracking (MPPT) και πραγματοποιείται ελέγχοντας κατάλληλα τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές ή στο ηλεκτρικό δίκτυο (Σχ. 2-9).





Σχήμα 2-9: Διάγραμμα που απεικονίζει τη λειτουργία ενός ελεγκτή MPPT.

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι υλοποίησης της διαδικασίας MPPT. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι μέθοδοι Incremental Conductance, Current Sweep και Perturb & Observe, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

#### Μέθοδος Incremental Conductance

Η λειτουργία του αλγορίθμου αυτού βασίζεται στο ότι η εφαπτομένη σε κάθε σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης (Σχ. 2-5) είναι διάφορη του μηδενός, εκτός από το σημείο μέγιστης ισχύος, όπου εκεί η εφαπτομένη είναι ίση με μηδέν. Μέσα από μαθηματική απόδειξη, αυτό ισοδυναμεί με το ότι στο σημείο μέγιστης ισχύος ισχύει ότι  $\Delta I / \Delta V = -I / V$ , όπου  $I$  το ρεύμα που παράγει η φωτοβολταϊκή διάταξη [6].

Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

- $\Delta I / \Delta V = -I / V$  στο σημείο μέγιστης ισχύος
- $\Delta I / \Delta V > -I / V$  αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος
- $\Delta I / \Delta V < -I / V$  δεξιά του σημείου μέγιστης ισχύος

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω συγκρίσεις, μπορεί να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος.

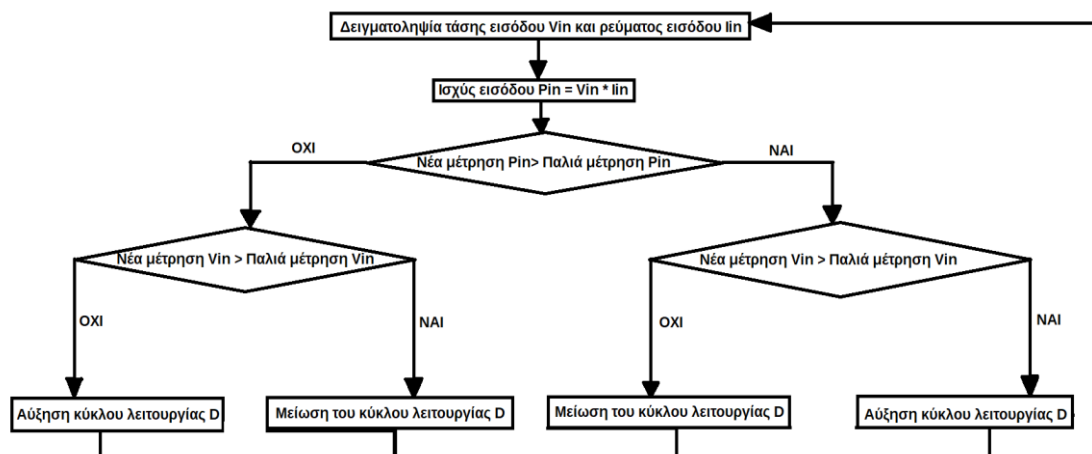
#### Μέθοδος Current Sweep

Σε αυτή τη μέθοδο, η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης μετριέται μέσω σάρωσης σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, ώστε με την αλλαγή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, να υπάρχει διαρκής ενημέρωση για τη μορφή της νέας καμπύλης, βάση της οποίας υπολογίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια η

πραγματική τιμή μέγιστης ισχύος. Όμως, η διαδικασία της σάρωσης χρειάζεται αρκετό χρόνο, μέσα στον οποίο περνάει από σημεία διαφορετικά του μεγίστου, με αποτέλεσμα την απώλεια αρκετού ποσοστού της διαθέσιμης ισχύος [7].

### Αλγόριθμος Perturb & Observe

Οι παραπάνω μέθοδοι MPPT παρουσιάζουν μειονεκτήματα τα οποία είτε αφορούν την πολυπλοκότητα υλοποίησης τους είτε τον συνολικό χρόνο εκτέλεσής τους. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ζωτικής σημασίας το γεγονός ο αλγόριθμος MPPT που έχει υλοποιηθεί να είναι γρήγορος, καθότι η θέση του Ήλιου στη διάρκεια της μέρας αλλάζει συνεχώς και επομένως αν ο αλγόριθμος είναι αργός και πολύπλοκος, μέχρι να εντοπίσει τη μέγιστη ηλιακή ισχύ σε μία συγκεκριμένη θέση της τροχιάς του, η θέση του Ήλιου θα έχει αλλάξει. Γι' αυτό, ο πιο ευρέως διαδεδομένος και χρησιμοποιούμενος είναι ο αλγόριθμος Perturb & Observe λόγω της εύκολης υλοποίησής του και της χαμηλής πολυπλοκότητάς του. Στο Σχήμα 2-10 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 2-10: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Perturb & Observe.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου Perturb & Observe είναι η εξής: σε κάθε βήμα εκτέλεσης του προκαλεί μία «διαταραχή» στο σύστημα και παρατηρεί την ισχύ εισόδου  $P_{in}$  που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή διάταξη. Εάν η ισχύς αυτή είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την ισχύ που μετρήθηκε στο προηγούμενο βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου, αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη ισχύς βρίσκεται προς αυτή τη κατεύθυνση «διαταραχών», ενώ αν είναι μικρότερη τότε η μέγιστη ισχύς βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση. Όταν ανακαλύψει το σημείο μέγιστης ισχύος, οι

διαδοχικές «διαταραχές» λειτουργούν έτσι ώστε ο αλγόριθμος τελικά να ταλαντεύεται γύρω από αυτό.

# 3.

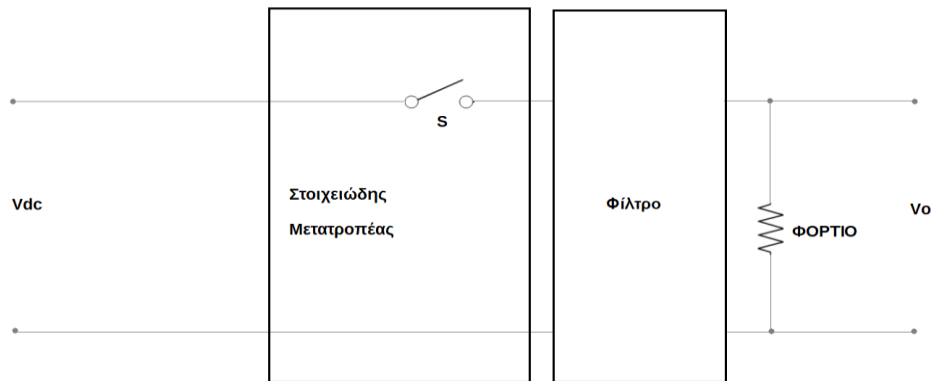
## ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC-DC

---

### 3.1 Διακοπτικοί μετατροπείς συνεχούς ρεύματος

Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (dc-dc converters) είναι οι διατάξεις ισχύος που επιτελούν τη μετατροπή μίας τάσης συνεχούς μορφής, σε συνεχή τάση με ρυθμιζόμενο σταθερό πλάτος ή και πολικότητα. Στους διακοπτικούς μετατροπείς η μετατροπή της συνεχούς τάσης επιτελείται από διακόπτες, οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες. Ειδικότερα, η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται σε μεταβαλλόμενη τάση υψηλής συχνότητας. Η ελεγχόμενη συνεχής τάση εξόδου λαμβάνεται με φιλτράρισμα ή και ανόρθωση, της εσωτερικά παραγόμενης τάσης υψηλής συχνότητας [4].

Οι δύο κυριότερες κατηγορίες διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς ρεύματος είναι ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης (buck converter) και ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης (boost converter). Παρακάτω φαίνεται η στοιχειώδης δομή ενός διακοπτικού μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 3-1: Κυκλωματικό διάγραμμα ενός στοιχειώδη διακοπτικού μετατροπέα με ένα διακόπτη.

Ο μετατροπέας του Σχήματος 3-1 αποτελείται από το διακόπτη  $S$  και τροφοδοτεί ένα φορτίο. Καθώς η τάση εισόδου είναι σταθερή (dc), ο διακόπτης στους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος είναι πλήρως ελεγχόμενος. Ο πιο διαδεδομένος ημιαγωγός διακόπτης είναι το MOSFET, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει όπως η εύκολη οδήγησή του και η λειτουργία του σε πολύ υψηλές συχνότητες. Στην ανάλυση που ακολουθεί, ο διακόπτης  $S$  θεωρείται ιδανικός (μηδενική αντίσταση αγωγιμότητας, μηδενικοί χρόνοι έναυσης και σβέσης κλπ).

Η συχνότητα με την οποία ανοιγοκλείνει ο διακόπτης  $S$  ονομάζεται *διακοπτική συχνότητα* (*switching frequency*)  $f_s$ , ενώ ο αντίστροφος αριθμός της διακοπτικής συχνότητας ονομάζεται *διακοπτική περίοδος* (*switching period*)  $T_s$ . Η διακοπτική περίοδος ισούται με το άθροισμα των χρονικών διαστημάτων αγωγής  $t_{on}$  και αποκοπής  $t_{off}$ :

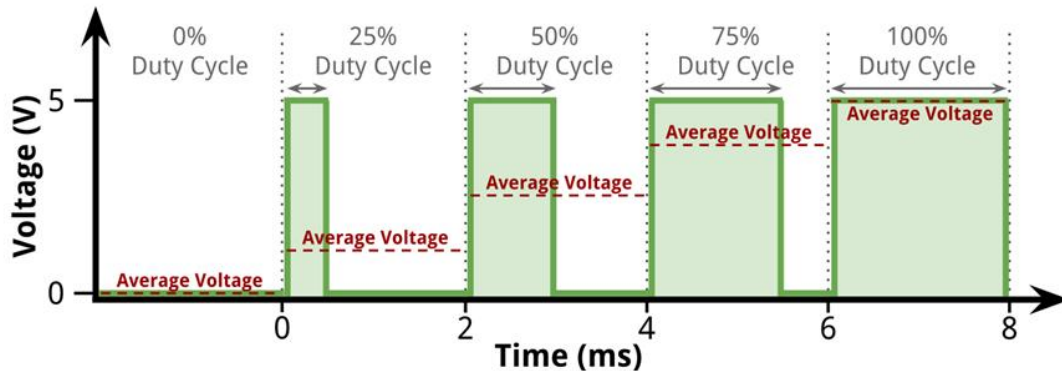
$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (4)$$

Το πηλίκο του χρονικού διαστήματος αγωγής του διακόπτη προς τη διακοπτική περίοδο ονομάζεται *κύκλος λειτουργίας* (*duty cycle*)  $D$ :

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5)$$

Η τεχνική ελέγχου του διακόπτη με μεταβολές της τιμής του κύκλου λειτουργίας  $D$  ονομάζεται *διαμόρφωση εύρους παλμών* (*Pulse Width Modulation, PWM*) και είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος σε όλους τους τύπους διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς ρεύματος[2]. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα κυματομορφής PWM που

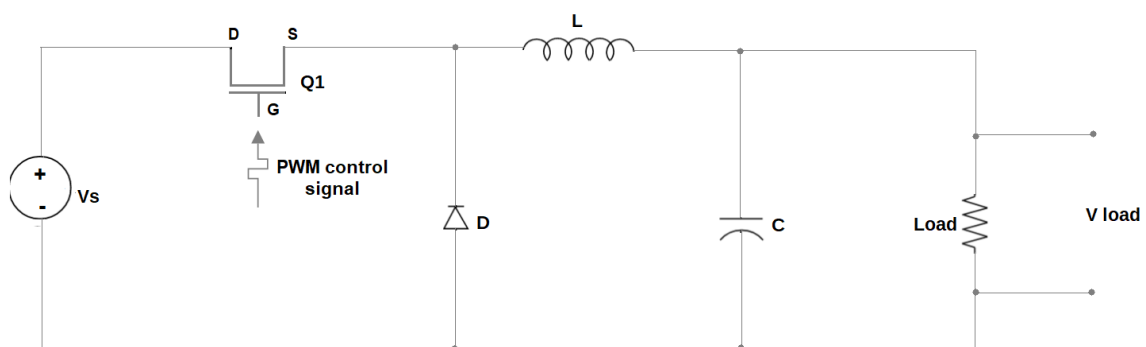
εφαρμόζεται στον ημιαγωγό διακόπτη του μετατροπέα ισχύος, με συχνότητα switching ίση με 500Hz.



Σχήμα 3-2: Παράδειγμα κυματομορφής PWM με συχνότητα switching 500Hz .

### 3.2 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck converter)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (*buck converter*) παρέχει στην έξοδο του μία τάση, η οποία είναι μικρότερη από την τάση της εισόδου του. Παρακάτω φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα αυτού του τύπου.



Σχήμα 3-3: Κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης.

Στο χρονικό διάστημα που ο ημιαγωγός διακόπτης  $Q_1$  βρίσκεται σε αγωγή (Σχ. 3-3), η πηγή εισόδου  $V_s$  παρέχει ενέργεια στην αυτεπαγωγή  $L$  και στο φορτίο ( $Load$ ), ενώ η διόδος ελεύθερης

ροής  $D$  είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει. Κατά τη σβέση του διακόπτη, το ρεύμα της αυτεπαγωγής ρέει μέσω της διόδου. Όταν το ρεύμα ρέει στην αυτεπαγωγή σε όλο το διάστημα αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με *συνεχή αγωγή του ρεύματος (continuous conduction mode)*. Αν το ρεύμα της αυτεπαγωγής δεν ρέει σε όλη τη περίοδο λειτουργίας  $T_s$ , αλλά μηδενίζεται στο διάστημα αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με *ασυνεχή αγωγή του ρεύματος (discontinuous conduction mode)* [4].

Στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής του ρεύματος, η τάση στα άκρα της αυτεπαγωγής ισούται με  $V_s - V_{load}$  για το διάστημα αγωγής του διακόπτη. Οι χρόνοι αγωγής και αποκοπής του διακόπτη δίδονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$t_{on} = D \cdot T_s \quad (6)$$

$$t_{off} = (1 - D) \cdot T_s \quad (7)$$

Στο διάστημα αποκοπής του διακόπτη, το ρεύμα της αυτεπαγωγής ρέει μέσω της διόδου ελεύθερης ροής. Το ρεύμα της αυτεπαγωγής μειώνεται γραμμικά και η τάση της αυτεπαγωγής είναι ίση με την τάση εξόδου. Επειδή η αυτεπαγωγή δεν καταναλώνει ενεργό ισχύ, η μέση τιμή της τάσης στα άκρα της αυτεπαγωγής είναι ίση με το μηδέν. Επομένως ισχύει ότι:

$$(V_s - V_{load}) \cdot D \cdot T_s = V_{load} \cdot (1 - D) \cdot T_s \quad (8)$$

Από την εξίσωση (8) προκύπτει ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου του μετατροπέα:

$$\frac{V_{load}}{V_s} = D \quad (9)$$

Στη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος, η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από τον κύκλο λειτουργίας ( $D$ ) και είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα του φορτίου  $I_{load}$ . Ακόμη, η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον κύκλο λειτουργίας. Θεωρώντας τα στοιχεία του μετατροπέα ιδανικά, η ισχύς εισόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου του. Επομένως:

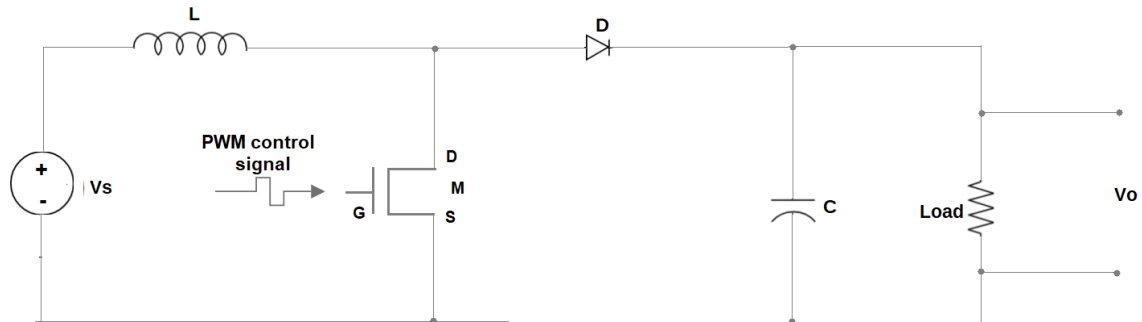
$$V_s \cdot I_s = V_{load} \cdot I_{load} \quad (10)$$

Και από την εξίσωση (10) προκύπτει ότι:

$$\frac{V_{load}}{V_s} = \frac{I_s}{I_{load}} = D \quad (11)$$

### 3.3 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter)

Ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης (*boost converter*) παρέχει στην έξοδο του μία τάση η οποία είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου του. Το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα απεικονίζεται στο Σχ. 3-4.



Σχήμα 3-4: Κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης  $M$  είναι σε αγωγή (Σχ. 3-4), η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στην αυτεπαγωγή  $L$ , η οποία αποθηκεύεται με τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Η διάοδος  $D$  είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει, με αποτέλεσμα η έξοδος να είναι απομονωμένη από την είσοδο. Όταν ο διακόπτης οδηγηθεί στην αποκοπή, το ρεύμα της αυτεπαγωγής τείνει να μειωθεί, ενώ η τάση στα άκρα της αυτεπαγωγής γίνεται ίση με  $V_s - V_o$ , διότι η διάοδος πολώνεται ορθά και η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή και την αυτεπαγωγή στο φορτίο [4].

Στη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή ρεύματος, ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου υπολογίζεται από τη μηδενική μέση τιμή της τάσης στα άκρα της αυτεπαγωγής, δηλαδή ισχύει ότι [8]:

$$V_s \cdot D \cdot T_s + (V_s - V_o) \cdot (1 - D) \cdot T_s = 0 \quad (12)$$

Από την εξίσωση (12) προκύπτει ότι:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (13)$$

Θεωρώντας και εδώ μηδενικές τις απώλειες του μετατροπέα, ισχύει ότι:

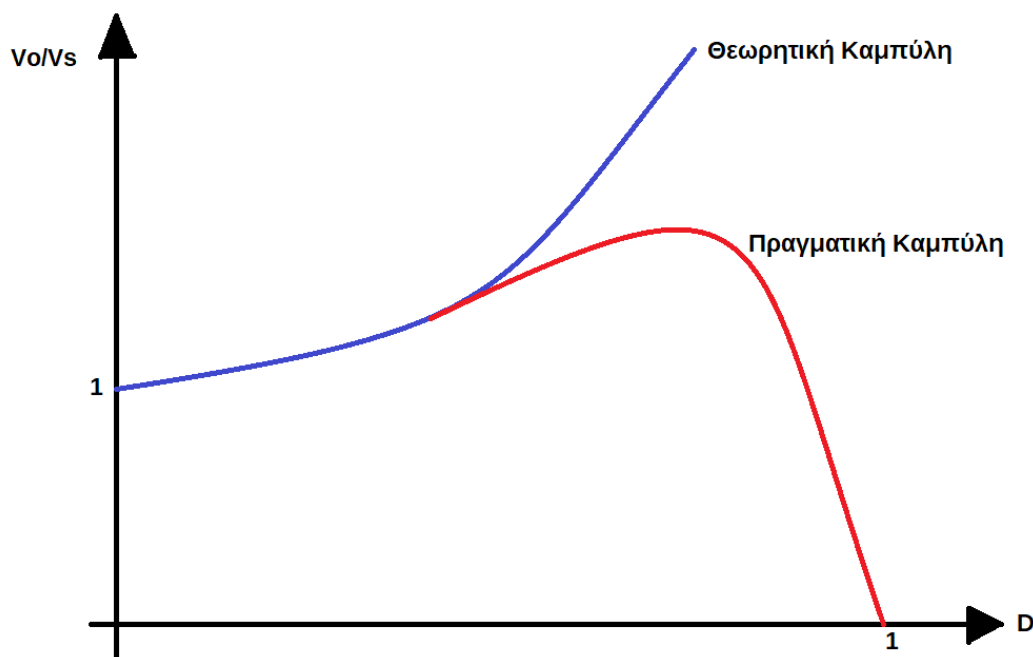
$$V_s \cdot I_s = V_o \cdot I_o \quad (14)$$

Και από την εξίσωση (14) προκύπτει ότι:



$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} = \frac{1}{(1-D)} \quad (15)$$

Από την εξίσωση (15) παρατηρείται ότι η τάση εξόδου λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές όταν ο κύκλος λειτουργίας  $D$  προσεγγίζει τη μονάδα. Όμως, σε ένα πρακτικό μετατροπέα, τα παρασιτικά στοιχεία που σχετίζονται με τους ημιαγωγούς διακόπτες, το πηνίο και τον πυκνωτή, προκαλούν αντί για την αύξηση της τάσης εξόδου τη μείωση της  $V_o$ , όταν ο κύκλος λειτουργίας προσεγγίζει τη μονάδα. Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 3-5 παρακάτω.



Σχήμα 3-5: Θεωρητική και πραγματική καμπύλη του λόγου της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου συναρτήσει του κύκλου λειτουργίας  $D$  σε ένα πρακτικό μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

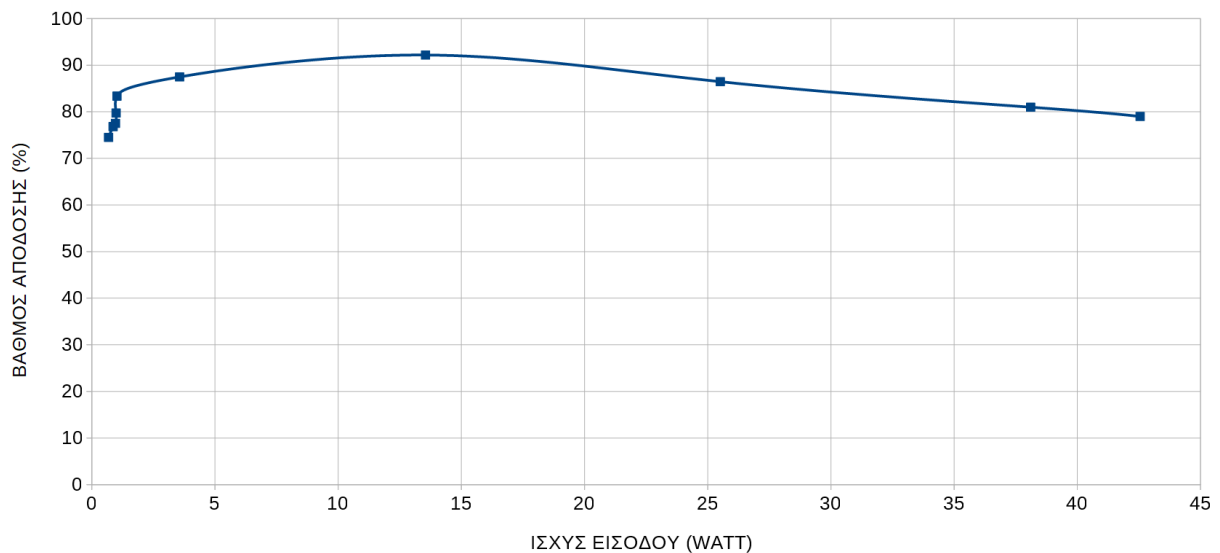
### 3.4 Βαθμός απόδοσης διακοπτικών μετατροπέων DC-DC

Στους διακοπτικούς μετατροπείς συνεχούς ρεύματος, ο βαθμός απόδοσης (*efficiency*) εκφράζει την ικανότητα μετατροπής ισχύος της διάταξης. Όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός απόδοσης, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες ισχύος του μετατροπέα. Οι απώλειες ισχύος στους διακοπτικούς μετατροπείς συνεχούς ρεύματος προέρχονται από τις απώλειες ισχύος στο μαγνητικό υλικό των πυρήνων των πηνίων, από τις απώλειες αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων (conduction losses), καθώς και από τη διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγικών

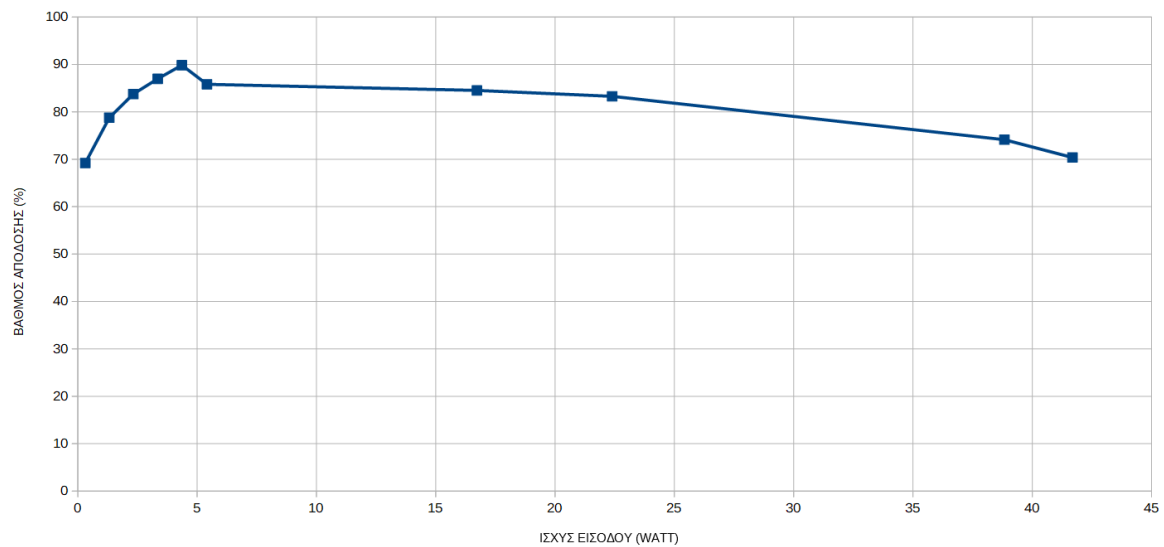
στοιχείων, (*switching losses*). Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου του μετατροπέα ισχύος και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (16)$$

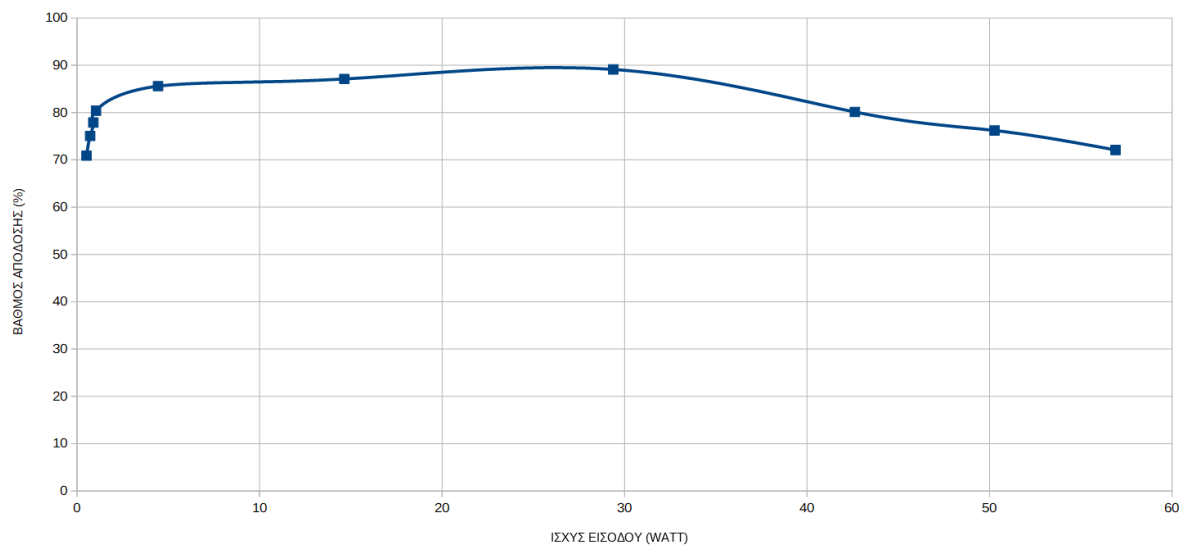
όπου  $P_{out}$  είναι η τιμή της ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα και  $P_{in}$  είναι η τιμή της ισχύος στην είσοδό του. Στους διακοπτικούς μετατροπείς συνεχούς ρεύματος, το μέγεθος εκείνο που καθορίζει το βαθμό απόδοσης της μετατροπής ισχύος είναι η διακοπτική συχνότητα. Επομένως, η επιλογή της κατάλληλης διακοπτικής συχνότητας, για την εφαρμογή που ζητείται, είναι πολύ κρίσιμη. Παρακάτω παρατίθενται κάποια πειραματικά διαγράμματα του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα ανύψωσης της τάσης για διάφορες τιμές της διακοπτικής συχνότητας που επιλέχθηκε να λειτουργεί.



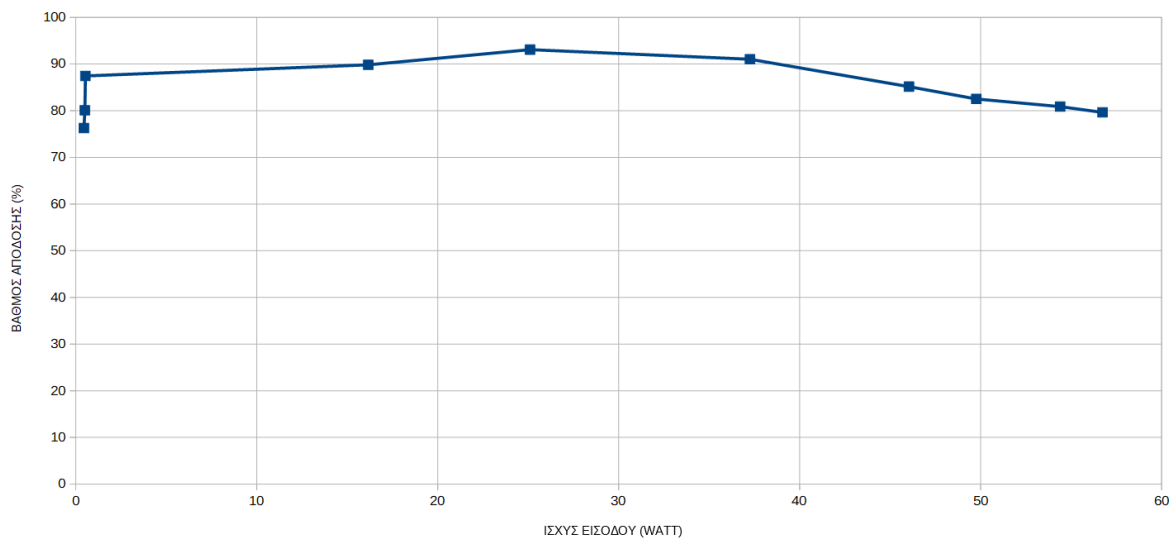
Σχήμα 3-6: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου για τάση εισόδου 6 Volt και διακοπτική συχνότητα 50kHz.



Σχήμα 3-7: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου για τάση εισόδου 6 Volt και διακοπτική συχνότητα 150kHz.



Σχήμα 3-8: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου για τάση εισόδου 9 Volt και διακοπτική συχνότητα 50kHz.



Σχήμα 3-9: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου για τάση εισόδου 9 Volt και διακοπτική συχνότητα 150kHz.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3-6 και 3-7, παρατηρείται ότι ο μετατροπέας, για τάση εισόδου 6 Volt και σε υψηλές τιμές ισχύος, λειτουργεί με υψηλότερο βαθμό απόδοσης όταν η διακοπτική συχνότητα είναι στα 50kHz, όπου ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 78% έως 93%, σε αντίθεση με τη περίπτωση λειτουργίας στα 150kHz, όπου εκεί κυμαίνεται από 70% έως 85%.

Αντιστοίχως, στα Σχήματα 3-8 και 3-9, όπου ο μετατροπέας δέχεται σαν τάση εισόδου 9 Volt, είναι προτιμότερο να λειτουργεί σε συχνότητα 150kHz, όπου ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 80% έως 94%, τη στιγμή που στη περίπτωση λειτουργίας στα 50kHz κυμαίνεται από 70% έως 89%.

Επομένως, διαπιστώνεται και πειραματικά ότι η τιμή της διακοπτικής συχνότητας που εξασφαλίζει τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα ισχύος δεν είναι σταθερή για όλες τις τιμές ισχύος και τάσης εισόδου του, αλλά σε άλλες τιμές ισχύος και τάσης εισόδου χρειάζεται να είναι υψηλή και σε άλλες χαμηλή. Η παραπάνω διαπίστωση είναι πολύ σημαντική για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, διότι δεδομένου ότι οι διακοπτικοί μετατροπείς συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ευρέως σε αυτές τις εφαρμογές, με την κατάλληλη ρύθμιση της διακοπτικής συχνότητας μπορεί να μεγιστοποιηθεί η ισχύς στην έξοδο ενός μετατροπέα, με αποτέλεσμα να αποθηκεύεται πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει μία φωτοβολταϊκή διάταξη στις συστοιχίες των συσσωρευτών.

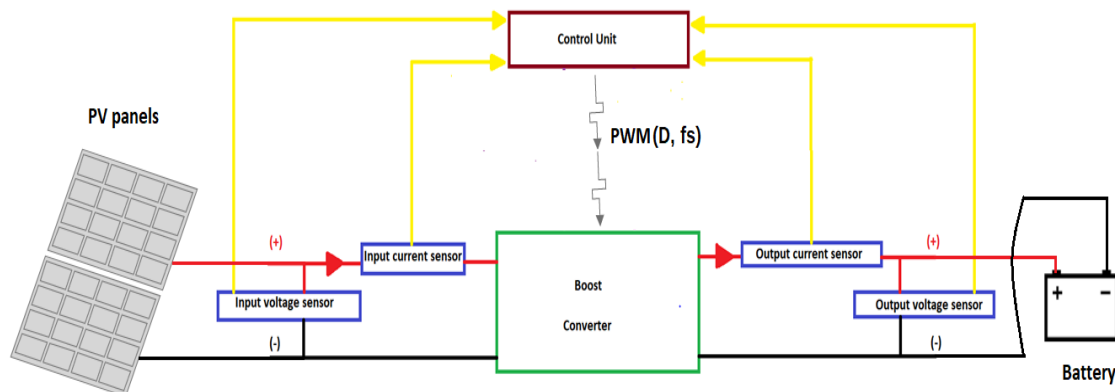
# 4.

## ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

---

### 4.1 Το συνολικό σύστημα μετατροπής ισχύος

Στο Σχήμα 4-1 φαίνεται το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Οι αισθητήρες ρεύματος και τάσης στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα ενημερώνουν συνεχώς το μικροελεγκτή για τις αντίστοιχες τιμές των ρευμάτων και των τάσεων εισόδου/εξόδου. Ο μικροελεγκτής εν συνεχεία, βάση αυτών, υπολογίζει τις τιμές ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC και ακολούθως, γνωρίζοντας τις τιμές ισχύος, παράγει ένα σήμα ελέγχου PWM, του οποίου οι τιμές του κύκλου λειτουργίας  $D$  και της διακοπτικής συχνότητας  $f_s$  είναι εκείνες που μεγιστοποιούν την ισχύ στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα, αντίστοιχα, υπό τις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



Σχήμα 4-1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4-1, το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελείται από τις παρακάτω επιμέρους μονάδες:

- Μία φωτοβολταϊκή διάταξη
- Αισθητήρες τάσης για μέτρηση της τάσης εισόδου και εξόδου.
- Αισθητήρες ρεύματος για τη μέτρηση του ρεύματος εισόδου και εξόδου.
- Ένα μετατροπέα ανύψωσης της τάσης (*Boost Converter*), για ανύψωση της τάσης των πλαισίων, ο οποίος κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων & Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής ΗΜΜΥ του Πολυτεχνείου Κρήτης στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διατριβής [9].
- Μία μονάδα ελέγχου (*Control Unit*) βασισμένη σε μικρολεγκτή, η οποία λαμβάνει σήματα από τους αισθητήρες και αναλόγως διαμορφώνει έναν PWM παλμό που ελέγχει τον μετατροπέα DC/DC.
- Μία συστοιχία συσσωρευτών για αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται.

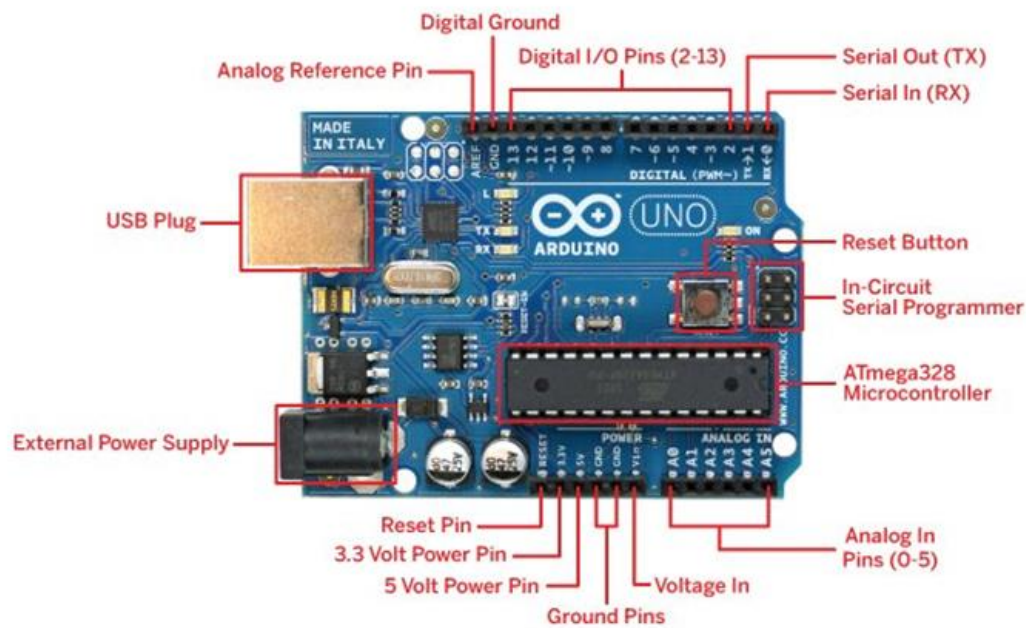
Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη μπορεί να είναι ομοιόμορφη αλλά σε κάποιες περιπτώσεις, λόγω μερικής σκίασης, να είναι ανομοιόμορφη. Το σύστημα του Σχήματος 4-1 παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι και στις δύο περιπτώσεις λειτουργεί με το μέγιστο δυνατό βαθμό απόδοσης. Αυτό οφείλεται στους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν και

εκτελούνται μέσα στο μικροελεγκτή, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε για οποιαδήποτε μορφή πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοβολταϊκή διάταξη, να μεγιστοποιείται τόσο η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, όσο και η ισχύς που παράγεται στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Η λειτουργία του κάθε αλγορίθμου περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

## 4.2 Οι αισθητήρες και ο μικροελεγκτής ελέγχου του συστήματος

Για να μπορεί ένα σύστημα ελέγχου να προβεί σε μεταβολές της λειτουργίας μίας διάταξης θα πρέπει, ανά πάσα στιγμή, να ενημερώνεται για τη συμπεριφορά της διάταξης από τις μεταβολές που δέχεται. Στον πειραματικό μετατροπέα DC/DC του συστήματος που αναπτύχθηκε, τα μεγέθη για τα οποία θα πρέπει το σύστημα ελέγχου να είναι ενήμερο είναι οι τάσεις εισόδου και εξόδου, καθώς και τα ρεύματα εισόδου και εξόδου του μετατροπέα ισχύος.

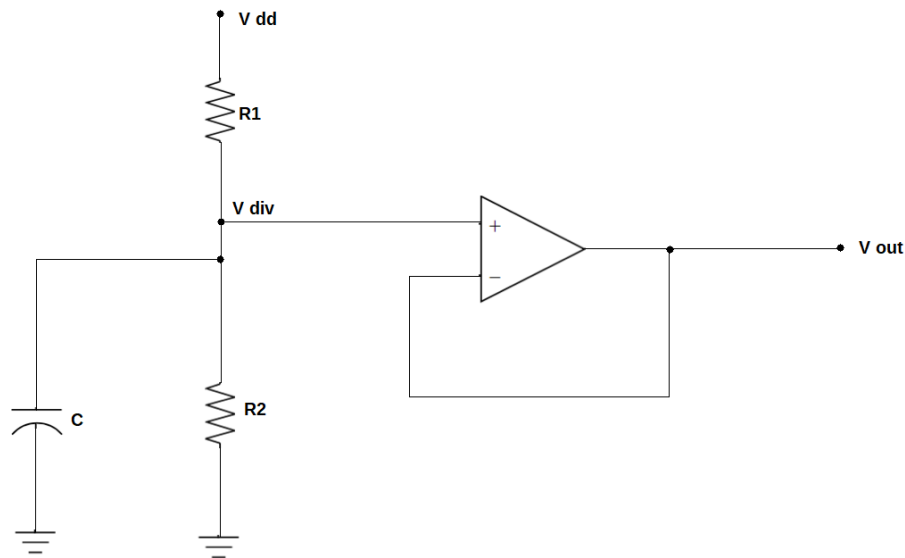
Η μονάδα ελέγχου του μετατροπέα ισχύος (*Control Unit*) που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-2 και που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία είναι ο μικροελεγκτής *Arduino Uno R3*, που είναι ο πλέον διαδεδομένος για έλεγχο συστημάτων λόγω του εύκολου προγραμματισμού του σε γλώσσα C++. Ο μικροελεγκτής αυτός εικονίζεται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Ο μικροελεγκτής Arduino Uno R<sub>3</sub> που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Τα σήματα των τεσσάρων αισθητήρων του συστήματος συνδέθηκαν στις αναλογικές εισόδους του Arduino (*Analog In Pins*) που εικονίζονται στο Σχήμα 4-2. Οι αναλογικές εισόδους του Arduino μπορούν να δεχτούν τάσεις από 0 Volt έως 5 Volt. Επομένως, θα πρέπει τα σήματα που στέλνουν οι αισθητήρες στον μικροελεγκτή να κυμαίνονται στο ίδιο εύρος τιμών, διαφορετικά ο μικροελεγκτής θα καταστρεφόταν. Για τη μέτρηση τάσης, ο πιο γνωστός αισθητήρας είναι ο *διαιρέτης τάσης*. Παρακάτω φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός διαιρέτη τάσης.





Σχήμα 4-3: Κυκλωματικό διάγραμμα διαιρέτη τάσης, ως αισθητήρας μέτρησης της τάσης.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-3, η επιλογή των τιμών των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  καθορίζεται από το εύρος τιμών της μετρούμενης τάσης  $V_{dd}$ . Όσον αφορά την τάση  $V_{div}$ , θα πρέπει να λαμβάνει την τιμή 0 Volt στην ελάχιστη τιμή της  $V_{dd}$  και την τιμή 5 Volt στη μέγιστη. Η σχέση που συνδέει τις τάσεις  $V_{dd}$  και  $V_{div}$  είναι η παρακάτω:

$$V_{div} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{dd} \quad (17)$$

Από την εξίσωση (17) προκύπτει ότι, με κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , μπορεί το εύρος τιμών της  $V_{div}$  να προσαρμοστεί στα επιθυμητά όρια. Η  $V_{div}$  ενισχύεται στον τελεστικό ενισχυτή, δίνοντας την  $V_{out}$ .

Για τη μέτρηση του ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες που βασίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο *Hall*. Ο μετατροπέας ισχύος που χρησιμοποιήθηκε, διαθέτει εμπορικούς αισθητήρες *Hall*, συγκεκριμένα τους *ACS712* της *Allegro Microsystems*, οι οποίοι διέφεραν ως προς το ρεύμα διέλευσής τους. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας του ρεύματος εισόδου μπορεί να μετρήσει ρεύμα μέχρι και 30 Ampere, ενώ της εξόδου μέχρι 5 Ampere.

Όμως ο μικροελεγκτής *Arduino*, όταν διαβάζει ένα σήμα από έναν αισθητήρα, δεν εμφανίζει την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αλλά επιστρέφει μία ακέραια τιμή που κυμαίνεται από 0 έως 1023. Για να μετατραπεί η τιμή αυτή στην πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους, απαιτείται η διαδικασία της *βαθμονόμησης*. Στη διαδικασία της βαθμονόμησης γίνεται

αντιστοίχιση των τιμών που επιστρέφει ο μικροελεγκτής με τις πραγματικές τιμές του υπό μέτρηση φυσικού μεγέθους και στη συνέχεια σχεδιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα. Γνωρίζοντας τη μορφή του διαγράμματος, βρίσκεται η εξίσωση που το δημιουργεί και κατά συνέπεια οι σταθεροί συντελεστές της εξίσωσης.

Από την εξίσωση (17) φαίνεται ότι η τάση εξόδου ενός διαιρέτη τάσης μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει της τάσης εισόδου. Επιπροσθέτως, στα εγχειρίδια των αισθητήρων ACS712 αναφέρεται ότι η τάση εξόδου τους μεταβάλλεται επίσης γραμμικά συναρτήσει του ρεύματος διέλευσης. Επομένως, για τα τέσσερα μετρούμενα μεγέθη, η εξίσωση που συνδέει τις τιμές του μικροεπεξεργαστή και τις πραγματικές τιμές των μεγεθών είναι η *εξίσωση της ευθείας*. Η εξίσωση της ευθείας δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$y = a \cdot x + b \quad (18)$$

Με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Matlab βρέθηκαν οι τιμές των συντελεστών  $a$  και  $b$  της εξίσωσης (19) για τις τάσεις εισόδου και εξόδου, καθώς και για τα ρεύματα εισόδου και εξόδου του μετατροπέα ισχύος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `polyfit`, η οποία δέχεται ως ορίσματα τις τιμές της μεταβλητής  $x$  (Εξ. 18), της  $y$  και το βαθμό της εξίσωσης που εδώ είναι ίσος με ένα, και επιστρέφει τις τιμές των συντελεστών  $a$  και  $b$ . Έτσι ο μικροελεγκτής είναι σε θέση πλέον να απεικονίζει τις πραγματικές τιμές των μεγεθών αυτών. Γνωρίζοντας τις πραγματικές τιμές των ρευμάτων και των τάσεων εισόδου/εξόδου, ο μικροελεγκτής μπορεί να υπολογίσει την ισχύ στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος σύμφωνα με την εξίσωση (19):

$$P = V \cdot I \quad (19)$$

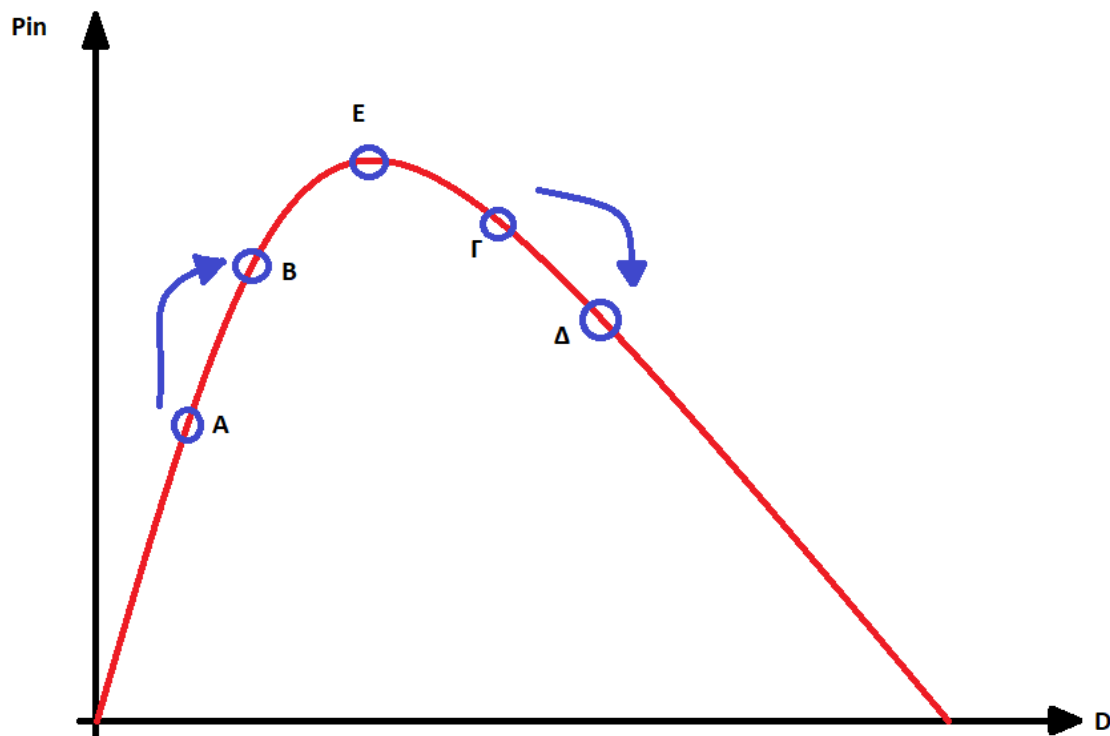
όπου  $V$  είναι η μετρούμενη τάση και  $I$  είναι το μετρούμενο ρεύμα.

Με βάση όλες τις παραπάνω πληροφορίες, ο μικροελεγκτής παράγει ένα σήμα PWM, το οποίο οδηγεί το gate του MOSFET του μετατροπέα DC/DC. Στο σήμα αυτό, ο μικροελεγκτής ρυθμίζει τον κύκλο λειτουργίας του  $D$  που καθορίζει την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα και την διακοπτική συχνότητα  $f_s$ , που καθορίζει την ισχύ στην έξοδό του. Ο παλμός παράγεται στη ψηφιακή έξοδο 9 (*Digital I/O pins*) του Arduino (Σχ. 4-2). Η παραγωγή του παλμού PWM στο Arduino γίνεται χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις της βιβλιοθήκης “PWM.h”. Καλείται αρχικά η συνάρτηση “InitTimersSafe”, η οποία αρχικοποιεί τους μετρητές του Arduino ώστε να μπορεί στη συνέχεια να αλλάξει η συχνότητα και ο κύκλος λειτουργίας της παραγόμενης παλμοσειράς. Στη συνέχεια, καλείται η συνάρτηση “SetPinFrequencySafe”, η οποία θέτει την επιθυμητή συχνότητα στον ακροδέκτη (pin) όπου θα παραχθεί ο παλμός (η επιτρεπτή συχνότητα

κυμαίνεται από 1Hz έως 2MHz). Τέλος, καλείται η συνάρτηση “pwmWriteHR”, η οποία δημιουργεί μία παλμοσειρά PWM με τον επιθυμητό κύκλο λειτουργίας (ο επιτρεπτός κύκλος λειτουργίας κυμαίνεται από 1% έως 99% ).

### **4.3 Ο αλγόριθμος μεγιστοποίησης της ισχύος εισόδου του μετατροπέα ανύψωσης της τάσης**

Μέσα στο μικροελεγκτή Arduino, ο αλγόριθμος που εκτελείται για την αναζήτηση και εύρεση της μέγιστης ισχύος εισόδου του μετατροπέα από τη φωτοβολταϊκή διάταξη είναι ο αλγόριθμος Perturb & Observe (Σχ. 2-10). Ο αλγόριθμος προκαλεί μία αύξηση της τιμής του κύκλου λειτουργίας D στην παλμοσειρά PWM και μετράει την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα. Εάν η προκύπτουσα ισχύς είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη ισχύ που μετρήθηκε, αυτό σημαίνει ότι για τον εντοπισμό του μέγιστου σημείου ισχύος θα πρέπει διαδοχικά να αυξάνεται ο κύκλος λειτουργίας. Διαφορετικά, αν προκύψει να είναι μικρότερη από την προηγούμενη μέτρηση, ο κύκλος λειτουργίας θα πρέπει διαδοχικά να μειώνεται. Και στις δύο περιπτώσεις, όταν το σύστημα βρεθεί να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, τότε ο αλγόριθμος παρατηρεί ότι όλες οι επόμενες μεταβολές του κύκλου λειτουργίας προκαλούν τη μείωση της ισχύος εισόδου, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία ταλάντωση γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος εισόδου. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου επεξηγείται γραφικά στο Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-4: Γραφική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου *Perturb & Observe*.

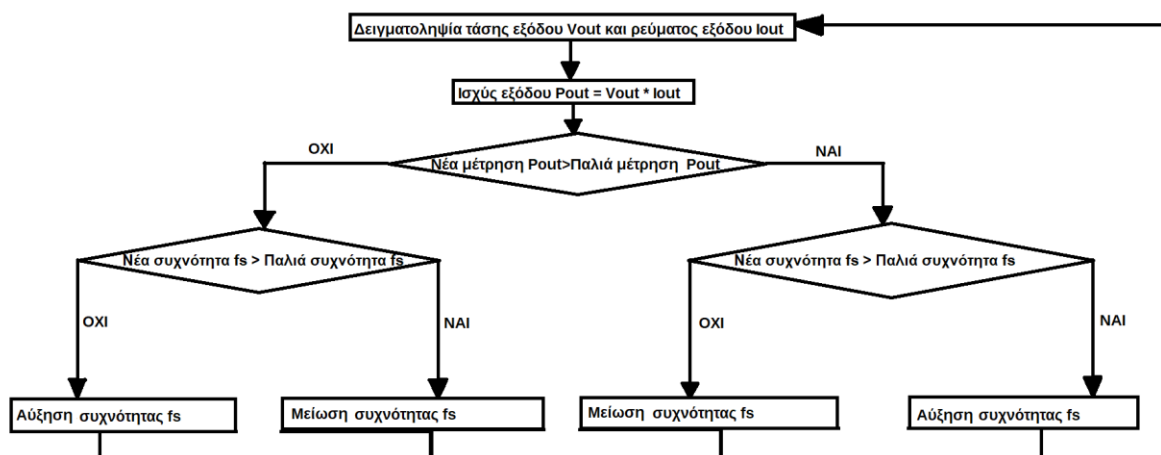
Έστω ότι η αρχική μετρούμενη ισχύς εισόδου είναι η Α (Σχ. 4-4). Η αύξηση του κύκλου λειτουργίας οδηγεί στην αύξηση της ισχύος εισόδου (σημείο Β), επομένως για την εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος (σημείο Ε) θα πρέπει διαδοχικά να αυξάνεται ο κύκλος λειτουργίας. Αν όμως η αρχική μετρούμενη ισχύς είναι η Γ, τότε η αύξηση του κύκλου λειτουργίας οδηγεί σε πιο χαμηλή ισχύ εισόδου (σημείο Δ), επομένως θα πρέπει διαδοχικά να μειώνεται ο κύκλος λειτουργίας για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (σημείο Ε).

#### 4.4 Ο αλγόριθμος MEPT (Maximum Efficiency Point Tracking)

Η διακοπτική συχνότητα της παλμοσειράς PWM είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την αύξηση της ισχύος εξόδου στον μετατροπέα ισχύος (Σχ. 3-6, 3-9). Επομένως, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος, αφού εκτελείται ο *Perturb & Observe* για την εύρεση της μέγιστης ισχύος εισόδου, στη συνέχεια εκτελείται αυτός για την ανεύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος εξόδου.

Όταν όμως αυξάνεται η ισχύς εξόδου για μία δεδομένη ισχύ εισόδου, αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε ονομάστηκε *Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)*.

Η λογική λειτουργίας αυτού του αλγορίθμου είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του Perturb & Observe, με μόνες διαφορές ότι αυτός αντί για την ισχύ εισόδου, υπολογίζει και συγκρίνει τιμές της ισχύος εξόδου και αντί για τον κύκλο λειτουργίας, αυτός μεταβάλλει τη διακοπτική συχνότητα στην παραγόμενη PWM κυματομορφή, με σκοπό την ανεύρεση της μέγιστης ισχύος εξόδου. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου MEPT φαίνεται στο Σχ. 4-5.



Σχήμα 4-5: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου *Maximum Efficiency Point Tracking*.

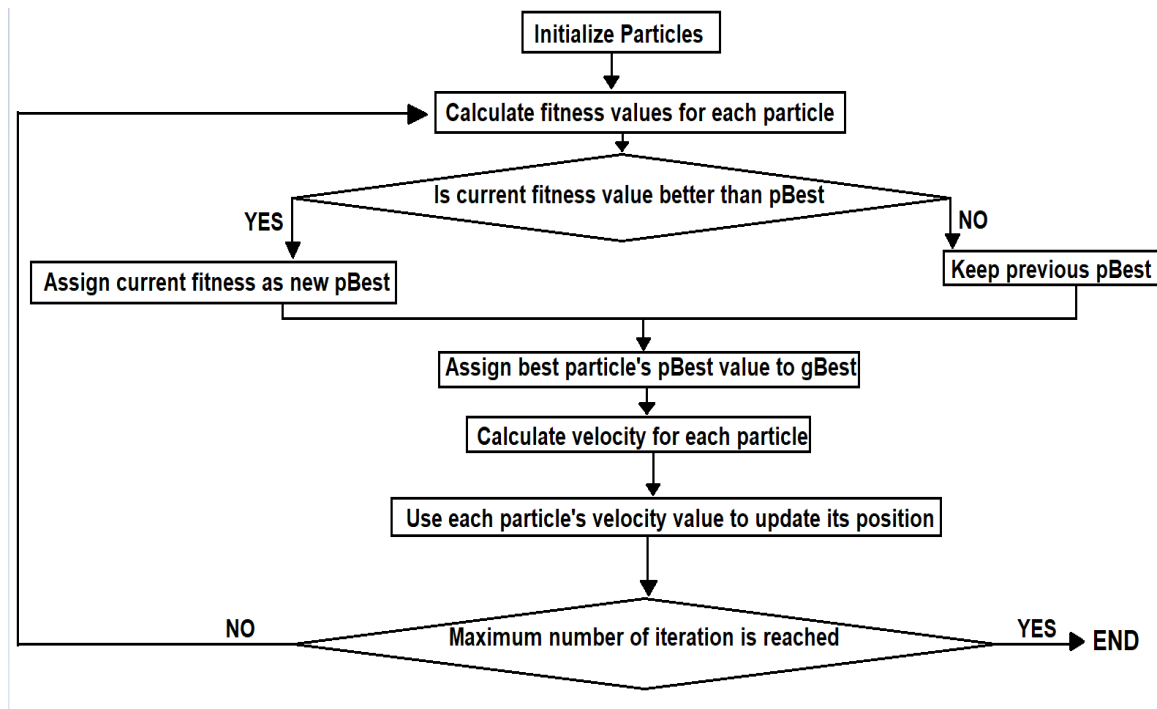
Ο αλγόριθμος MEPT προκαλεί μία αύξηση στη διακοπτική συχνότητα του παλμού PWM και παρατηρεί την ισχύ εξόδου (Σχ. 4-5). Αν η προκύπτουσα ισχύς είναι μεγαλύτερη της προηγούμενης ισχύος, τότε η εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος εξόδου γίνεται με διαδοχικές αυξήσεις της διακοπτικής συχνότητας. Εάν όμως προκύψει ισχύς εξόδου μικρότερη της προηγούμενης μέτρησης, τότε η διακοπτική συχνότητα θα πρέπει διαδοχικά να μειώνεται προκειμένου να βρεθεί η μέγιστη ισχύς εξόδου. Όπως και στον Perturb & Observe, έτσι και εδώ, όταν βρεθεί το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου, όλες οι επόμενες μεταβολές της διακοπτικής συχνότητας οδηγούν σε μείωση της ισχύος με αποτέλεσμα και εδώ ο αλγόριθμος να αρχίσει να ταλαντώνεται γύρω από το μέγιστο σημείο ισχύος.

## 4.5 Ο αλγόριθμος PSO (Particle Swarm Optimization)

Μία φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν λειτουργεί πάντα υπό συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Υπάρχει περίπτωση κάποιο τμήμα της να βρίσκεται σε σκίαση λόγω κάποιου εξωγενούς παράγοντα (πχ. γειτονικά δέντρα, κτήρια κλπ. - Σχ. 2-6). Στην περίπτωση αυτή, από τις χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος – τάσης φαίνεται ότι η ισχύς μεγιστοποιείται σε παραπάνω από ένα σημείο (Σχ. 2-8). Από αυτά τα σημεία που προκύπτουν, υπάρχει πάντα ένα σημείο όπου η ισχύς είναι μέγιστη έναντι των υπολοίπων. Το σημείο αυτό, που ονομάζεται *καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος (Global Maximum Power Point, GMPP)*, είναι το επιθυμητό σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Οι αλγόριθμοι Perturb & Observe και MEPT δεν είναι ικανοί, σε αυτή τη περίπτωση λειτουργίας της διάταξης, να εντοπίσουν τα μέγιστα σημεία ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι, η αρχή λειτουργίας τους είναι τέτοια, που αν βρεθούν σε κάποιο τοπικό μέγιστο σημείο ισχύος (*local maximum power point*), θα αρχίσουν να ταλαντώνονται γύρω από αυτό, με απόρροια να χάσουν το καθολικό μέγιστο σημείο ισχύος, λειτουργώντας το σύστημα με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης.

Για την περίπτωση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε συνθήκες μερικής σκίασης, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος ακολουθεί τη βασική αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου *PSO (Particle Swarm Optimization)*. Αυτός ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές όπως στα μαθηματικά, στις τηλεπικοινωνίες κλπ., επομένως αν προσαρμοστεί καταλλήλως, μπορεί να επιλύσει και το πρόβλημα μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος σε συνθήκες μερικής σκίασης [10]. Ο αλγόριθμος PSO είναι σε θέση να βρίσκει κάθε φορά το συνδυασμό κύκλου λειτουργίας και διακοπτικής συχνότητας, χρησιμοποιώντας μία μορφή «μνήμης» των τιμών της ισχύος από τις οποίες πέρασε και εφαρμόζοντας την *αρχή του εγγύτερου γείτονα*, να οδηγείται σταδιακά στην καθολική μέγιστη ισχύ. Στο Σχήμα 4-6 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO.



Σχήμα 4-6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization [10].

Στον αλγόριθμο PSO που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, αρχικά δημιουργούνται κάποια σωματίδια (*particles*) που το καθένα αναπαριστάται σαν ένα δισδιάστατο διάνυσμα που εμπεριέχει μία τιμή για τον κύκλο λειτουργίας του σήματος PWM του μετατροπέα DC/DC και μία τιμή για την διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα ισχύος. Αρχίζοντας τις επαναλήψεις του αλγορίθμου, συγκρίνονται οι τιμές της ισχύος που προκύπτουν από τις τιμές του διανύσματος του κάθε σωματιδίου. Το σωματίδιο για το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς θεωρείται το καθολικά καλύτερο, επομένως το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος βρίσκεται σε εκείνη την κατεύθυνση και οι τιμές των διανυσμάτων των σωματιδίων ενημερώνονται κατάλληλα. Έτσι, το σμήνος (*swarm*) των σωματιδίων αρχίζει διαδοχικά να μετατοπίζεται προς το σημείο εκείνο για το οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται. Η μετατόπιση των σωματιδίων (*velocity*) προκύπτει από την εξίσωση [10]:

$$v_{i,d}(\text{next}) = w v_{i,d}(\text{prev}) + f_p r_p (p_{i,d} - x_{i,d}(\text{prev})) + f_g r_g (g_d - x_{i,d}(\text{prev})) \quad (20)$$

όπου  $v_{i,d}(\text{next})$  είναι η νέα ταχύτητα του  $i$ -οστού σωματιδίου και  $v_{i,d}(\text{prev})$  η προηγούμενη ταχύτητα του,  $p_{i,d}$  είναι το  $i$ -οστό καλύτερο σωματίδιο που προκύπτει από τις συγκρίσεις των σωματιδίων μεταξύ τους και το  $g_d$  είναι το καθολικά καλύτερο σωματίδιο.

Οι παράμετροι  $w$ ,  $f_p, f_g$  είναι σταθερές ενώ οι παράμετροι  $r_p$ ,  $r_g$  λαμβάνουν σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου νέα τυχαία τιμή με βάση την ομοιόμορφη κατανομή. Η παραπάνω ταχύτητα

προστίθεται στο  $x_{i,d}(\text{prev})$  που είναι η τρέχουσα θέση του  $i$ -οστού σωματιδίου και συνεπώς προκύπτει η νέα του θέση, δηλαδή:

$$x_{i,d}(\text{next}) = x_{i,d}(\text{prev}) + v_{i,d}(\text{next}) \quad (21)$$

όπου  $x_{i,d}(\text{next})$  η νέα θέση του  $i$ -οστού σωματιδίου [10].

Στο τέλος των επαναλήψεων του αλγορίθμου, τα σωματίδια έχουν προσεγγίσει στο σημείο καθολικής μέγιστης ισχύος, με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί στον βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

Η απόδοση του αλγορίθμου PSO εξαρτάται κυρίως από τρεις βασικούς παράγοντες:

- Τον αριθμό των σωματιδίων (*particles*) που χρησιμοποιεί
- Τον αριθμό των επαναλήψεων (*iterations*) που εκτελείται ο αλγόριθμος
- Τις τιμές των παραμέτρων  $w$ ,  $f_p$ ,  $f_g$  στη σχέση υπολογισμού της ταχύτητας των σωματιδίων, όπου οι καλύτερες δυνατές τιμές τους υπολογίζονται πειραματικά.

## 4.6 Σειρά εκτέλεσης των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO στο μικροεπεξεργαστή

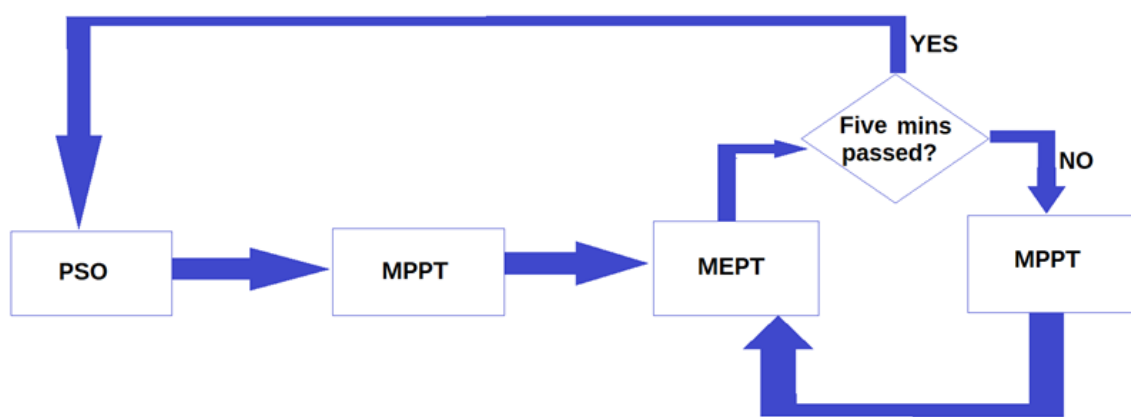
Για τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος με το βέλτιστο βαθμό απόδοσης σε οποιοσδήποτε συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας λειτουργεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία, υλοποιήθηκαν οι τρεις αλγόριθμοι που έχουν περιγραφεί παραπάνω. Το επόμενο ζήτημα που έπρεπε να επιλυθεί ήταν με ποια σειρά θα εκτελούνταν αυτοί οι αλγόριθμοι από τον μικροελεγκτή, καθότι ο κάθε ένας από αυτούς έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT εκτελούνται σε πολύ λίγα βήματα, αλλά σε περίπτωση μερικής σκίασης δεν αποδίδουν στον επιθυμητό βαθμό. Στον αντίποδα, ο αλγόριθμος PSO μπορεί να βρίσκει τη μέγιστη ισχύ λειτουργίας για οποιασδήποτε μορφής πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη και μη) αλλά ολοκληρώνεται μετά από πολλά βήματα.

Όταν λειτουργήσει το σύστημα για πρώτη φορά, επειδή υπάρχει η πιθανότητα η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας να είναι ανομοιόμορφη, είναι προτιμότερο να εκτελείται αρχικά ο αλγόριθμος PSO, ώστε να υπάρχει η σιγουριά της ανεύρεσης του καθολικού σημείου μέγιστης ισχύος. Στη συνέχεια, έχοντας σαν αφετηρία το σημείο αυτό, να εκτελούνται οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT, για να διατηρούν το σύστημα στο σημείο μέγιστης παραγωγής ενέργειας.



Ο αλγόριθμος PSO αρκεί να επανεκτελείται με μία συχνότητα της τάξεως μερικών λεπτών της ώρας, ώστε να εντοπίζει τυχόν μετακινήσεις του καθολικού σημείου μέγιστης ισχύος λόγω μεταβολής της μορφής της μερικής σκίασης επάνω στην φωτοβολταϊκή συστοιχία. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT θα εξασφαλίζουν στη συνέχεια τη διατήρηση της λειτουργίας του συστήματος στο καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος που είχε εντοπίσει προηγουμένως ο αλγόριθμος PSO.

Με βάση τα παραπάνω, στο ακόλουθο Σχήμα 4-7 απεικονίζεται η σειρά με την οποία εκτελούνται οι αλγόριθμοι από τον μικρολεγκτή του συστήματος που υλοποιήθηκε.



Σχήμα 4-7: Σειρά εκτέλεσης των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO από τον μικροελεγκτή.

Αρχικά εκτελείται ο αλγόριθμος PSO (Σχ. 4-7), ο οποίος εντοπίζει το σημείο μέγιστης ισχύος σε κάθε μορφή πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Εν συνεχεία, εκτελείται ο αλγόριθμος MPPT, συνεχίζοντας από το σημείο που εντόπισε ο PSO, για διατήρηση της μέγιστης ισχύος εισόδου (δηλ. για τη μεγιστοποίηση της ισχύος που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία). Συνεχίζοντας εκτελείται ο MEPT για την ανεύρεση της μέγιστης ισχύος εξόδου. Αν μέχρι να εκτελεστεί ο αλγόριθμος MEPT έχει παρέλθει χρονικό διάστημα πέντε λεπτών, τότε εκτελείται ξανά ο αλγόριθμος PSO, διαφορετικά εκτελείται ο MPPT, για να διατηρεί την παραγωγή μέγιστης ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα, στη συνέχεια ξανά ο MEPT και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την πάροδο των πέντε λεπτών.

# 5.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

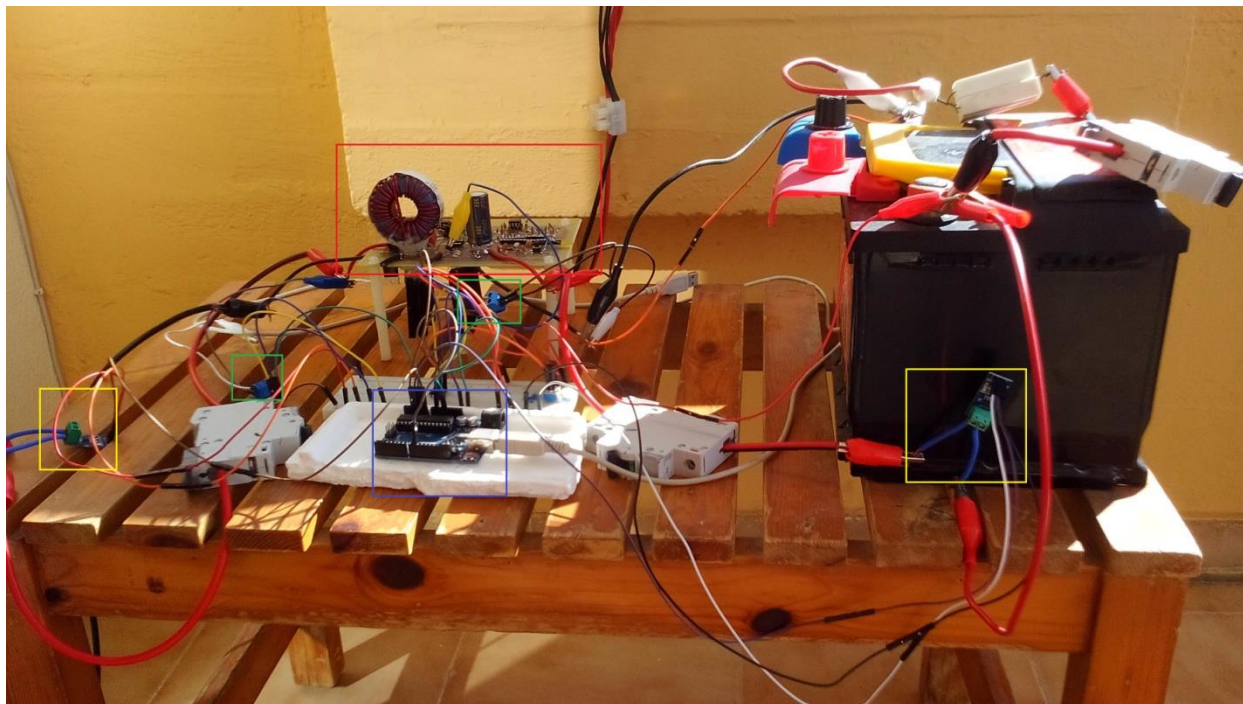
### 5.1 Το πειραματικό σύστημα μετατροπής ισχύος

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας.



*Σχήμα 5-1: Η πειραματική διάταξη: Φ/Β συστοιχία (κίτρινο), μπαταρία (κόκκινο), σύστημα ελέγχου και μετατροπείας DC/DC (μπλε).*

Το κάθε ένα από τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτοβολταϊκή διάταξη της εργασίας αυτής (Σχ. 5-1), σε τυποποιημένες συνθήκες δοκιμής (*Standard Test Conditions, STC*), οι οποίες αναφέρονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 1kW/m<sup>2</sup>, μπορούσε να αποδώσει μέγιστο ρεύμα (ή ρεύμα βραχυκύκλωσης) 3 Ampere και μέγιστη τάση (ή τάση ανοικτοκύκλωσης) 6 Volt. Τα πλαίσια συνδέθηκαν παράλληλα. Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε μία μπαταρία τάσης 12 Volt και χωρητικότητας 50Ah (Σχ. 5-1). Στο μπλε πλαίσιο του Σχήματος 5-1 φαίνεται το συνολικό σύστημα μετατροπής ισχύος (μονάδα ελέγχου και μετατροπείας DC/DC).

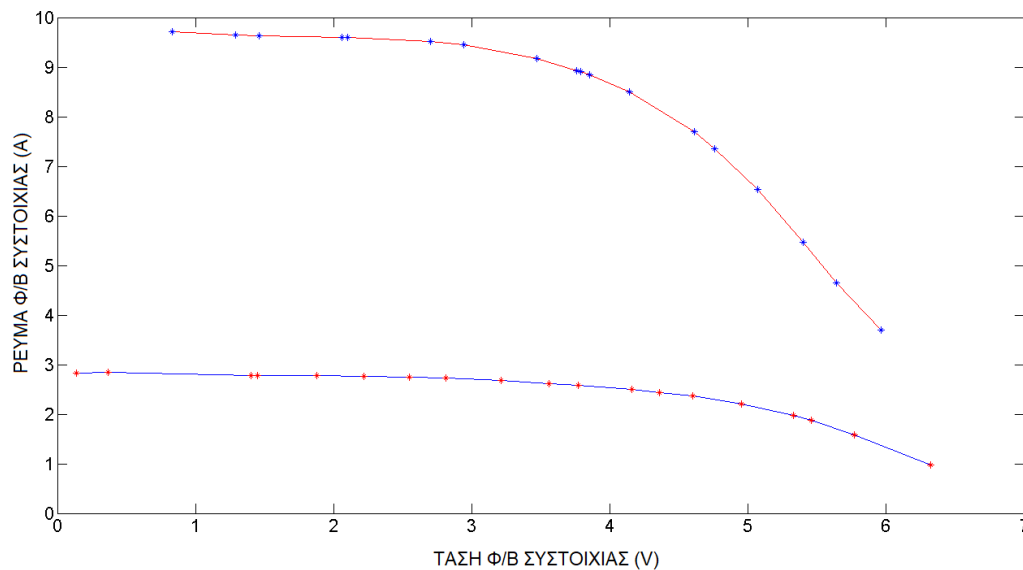


*Σχήμα 5-2: Το πειραματικό σύστημα μετατροπής ισχύος: αισθητήρες ρεύματος (κίτρινο), αισθητήρες τάσης (πράσινο), μικροελεγκτής (μπλε), μετατροπέας DC/DC (κόκκινο).*

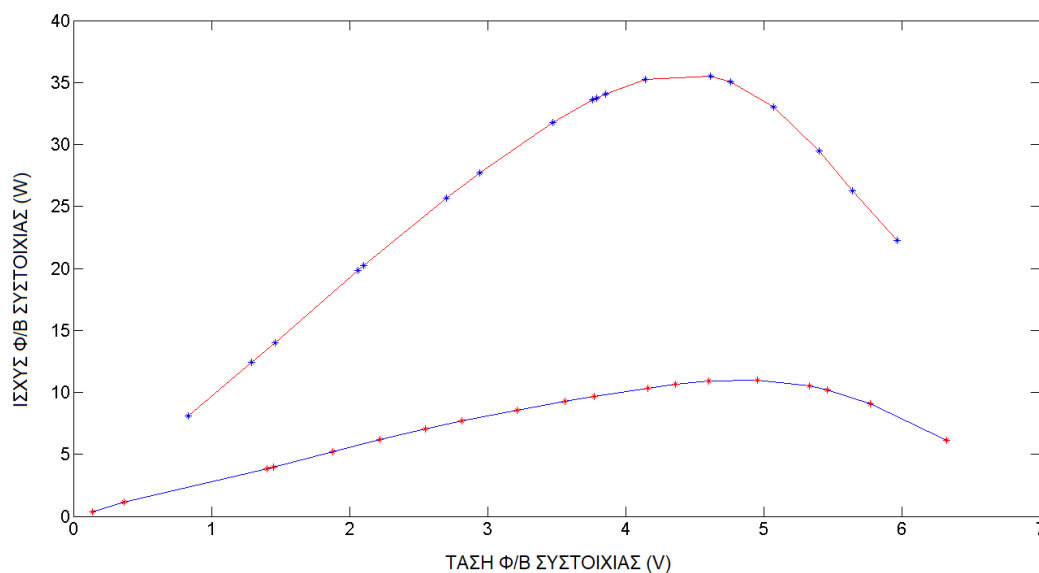
Στο Σχήμα 5-2 φαίνεται αναλυτικά το συνολικό σύστημα μετατροπής, που αποτελείται από τους αισθητήρες ρεύματος, για μέτρηση ρεύματος εισόδου και εξόδου, τους αισθητήρες τάσης, πάλι αντιστοίχως για μέτρηση τάσης εισόδου και εξόδου και το μικροεπεξεργαστή Arduino, στον οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα των αισθητήρων μέσω των αλγορίθμων που εκτελούνται σε αυτόν.

## **5.2 Πειραματικές μετρήσεις σε διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας περιβάλλοντος**

Εν συνεχεία, ακολούθησαν πειραματικές μετρήσεις του συστήματος σε διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, προκειμένου να διαπιστωθούν πειραματικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων:



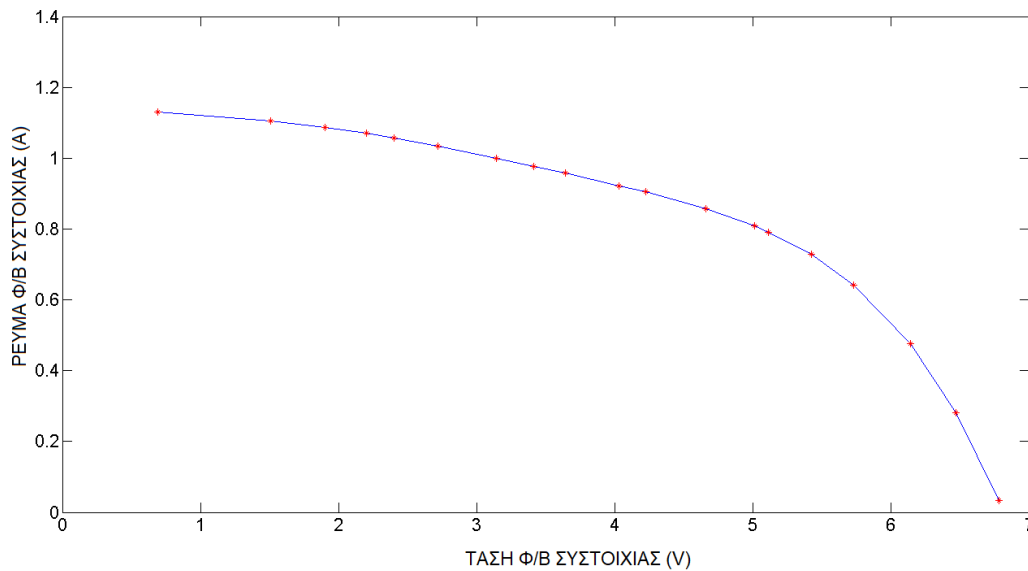
Σχήμα 5-3: Διαγράμματα ρεύματος-τάσης ( $I$ - $V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [ $1344 \text{ W/m}^2$  &  $29.5^\circ\text{C}$  (κόκκινο),  $300 \text{ W/m}^2$  &  $25.5^\circ\text{C}$  (μπλε)].



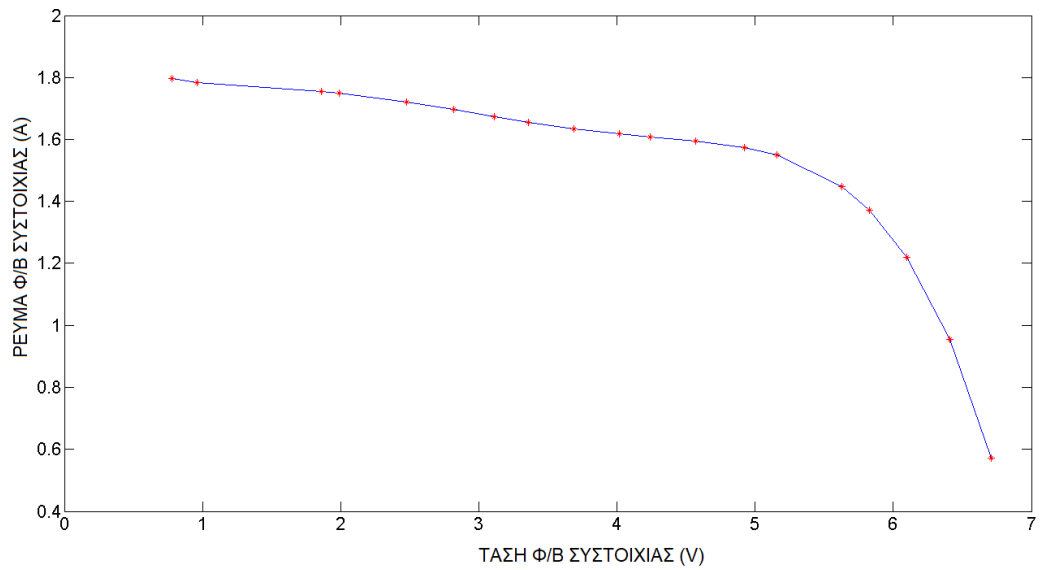
Σχήμα 5-4: Διαγράμματα ισχύος-τάσης ( $P$ - $V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [ $1344 \text{ W/m}^2$  &  $29.5^\circ\text{C}$  (κόκκινο),  $300 \text{ W/m}^2$  &  $25.5^\circ\text{C}$  (μπλε)].

Στα Σχήματα 5-3 και 5-4 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος- τάσης και ισχύος-τάσης σε ακτινοβολίες  $1344\text{W/m}^2$  και  $300\text{W/m}^2$  και θερμοκρασίες  $25.5\text{ }^\circ\text{C}$  &  $29.5\text{ }^\circ\text{C}$  αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση των  $1344\text{W/m}^2$  και  $29.5\text{ }^\circ\text{C}$  η παραγωγή ρεύματος και ισχύος είναι εμφανώς πολύ μεγαλύτερη.

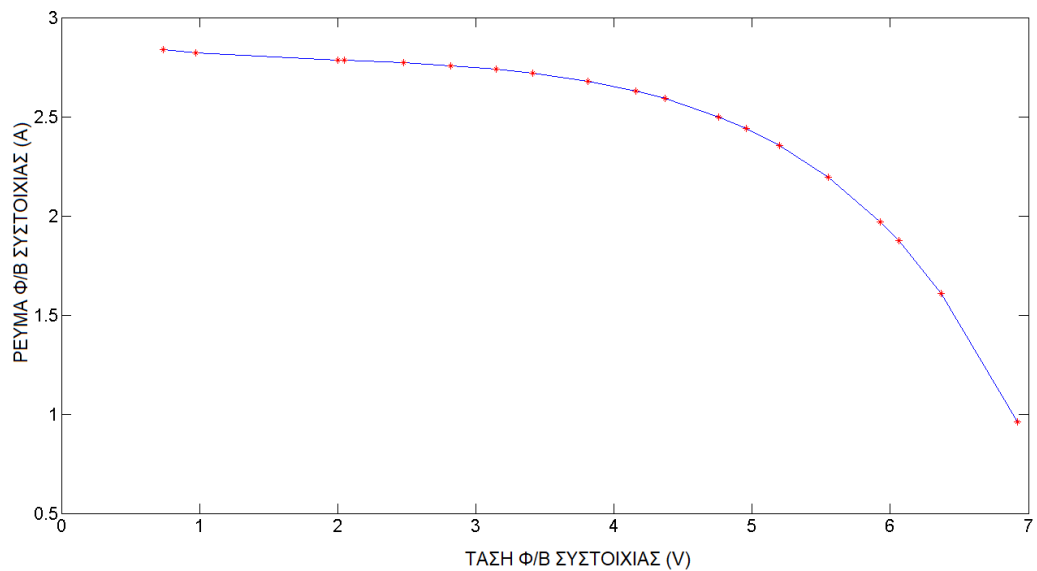
Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής διάταξης σε διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά σε ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία κυμαίνεται από  $26.5^\circ\text{C}$  έως  $27.5^\circ\text{C}$ .



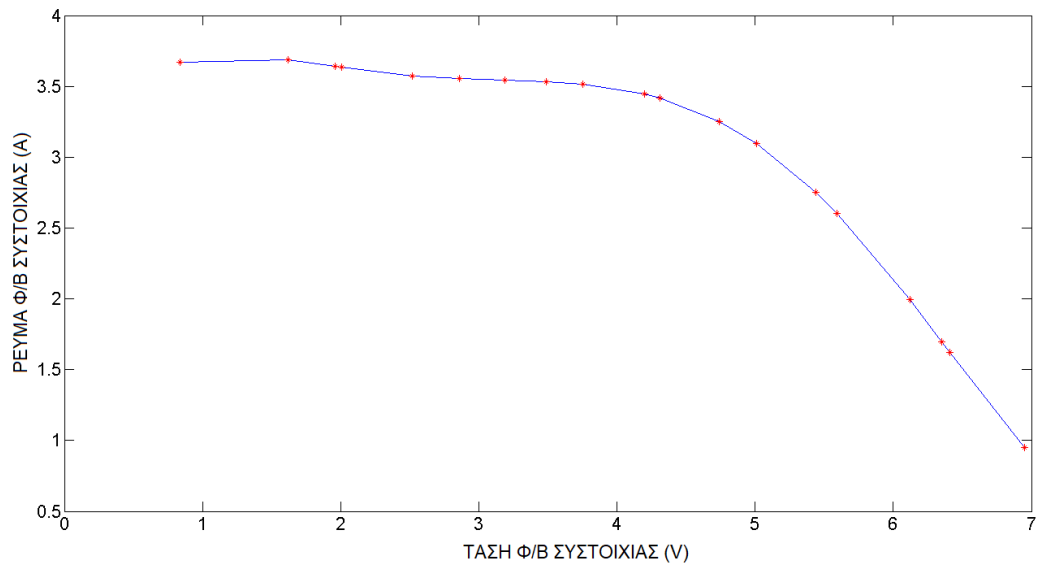
Σχήμα 5-5: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $200\text{W/m}^2$ .



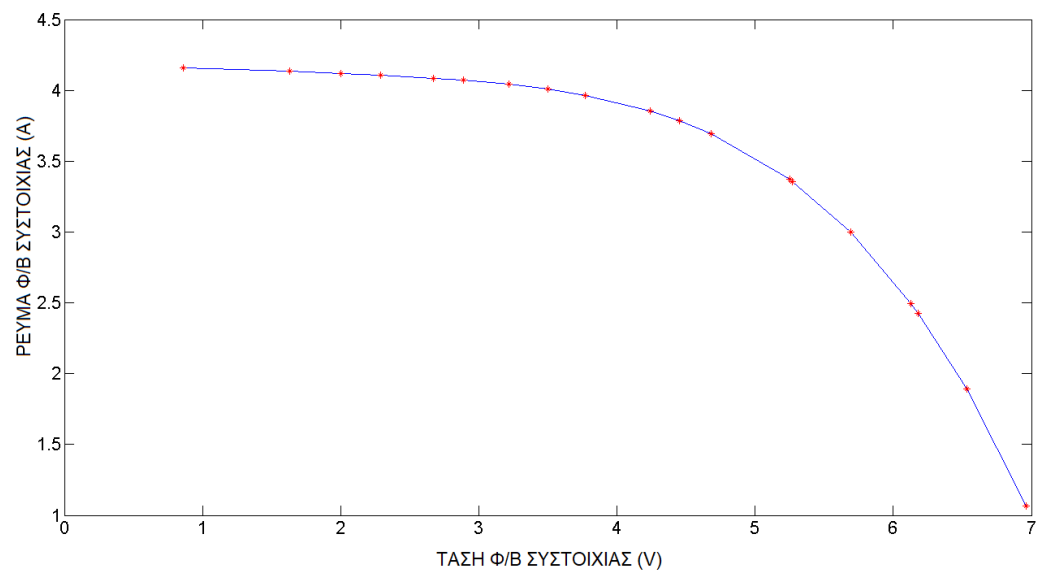
Σχήμα 5-6: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I$ - $V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $300\text{W/m}^2$ .



Σχήμα 5-7: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I$ - $V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $400\text{W/m}^2$ .

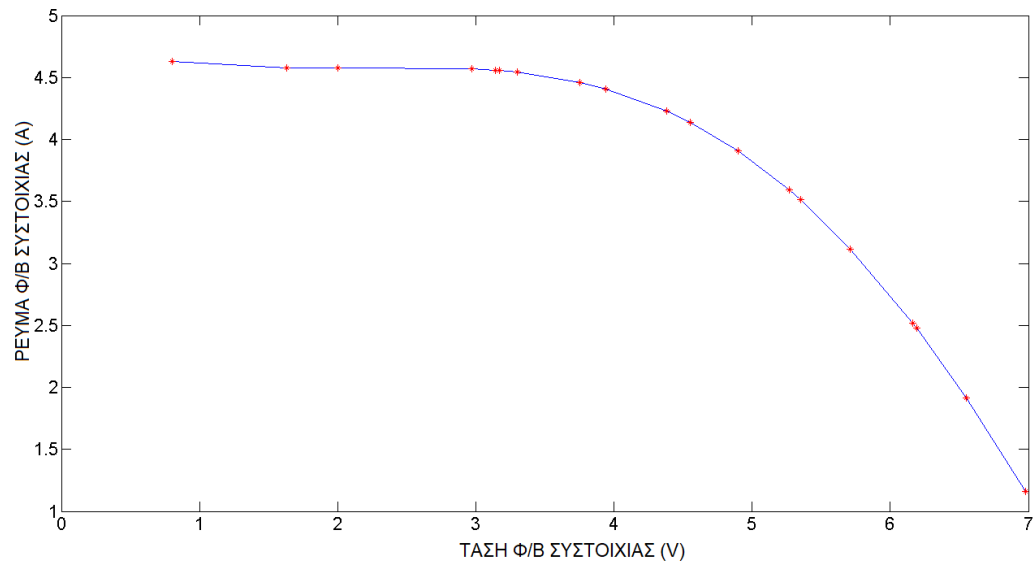


Σχήμα 5-8: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $500\text{W/m}^2$ .

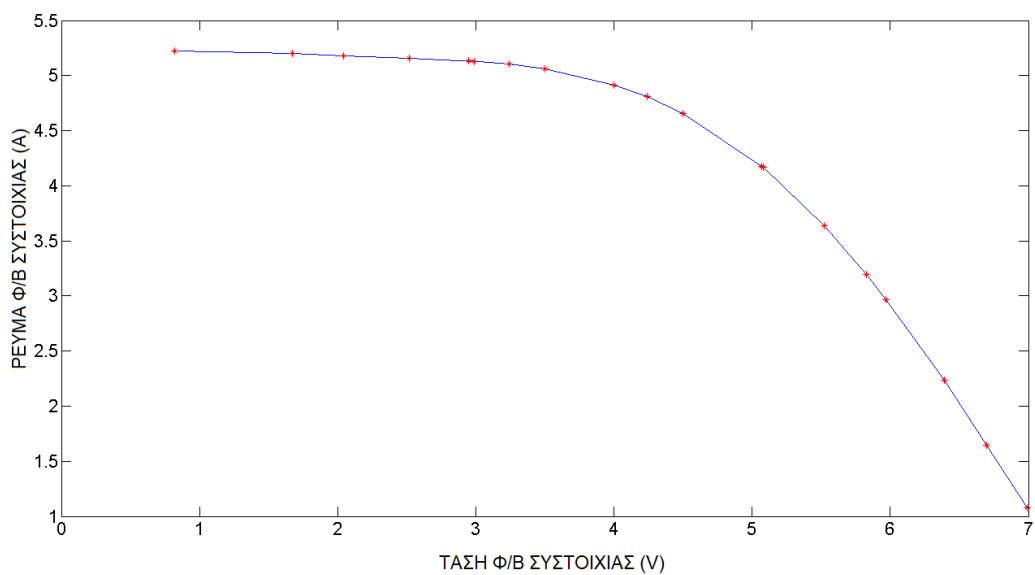


Σχήμα 5-9: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $600\text{W/m}^2$ .

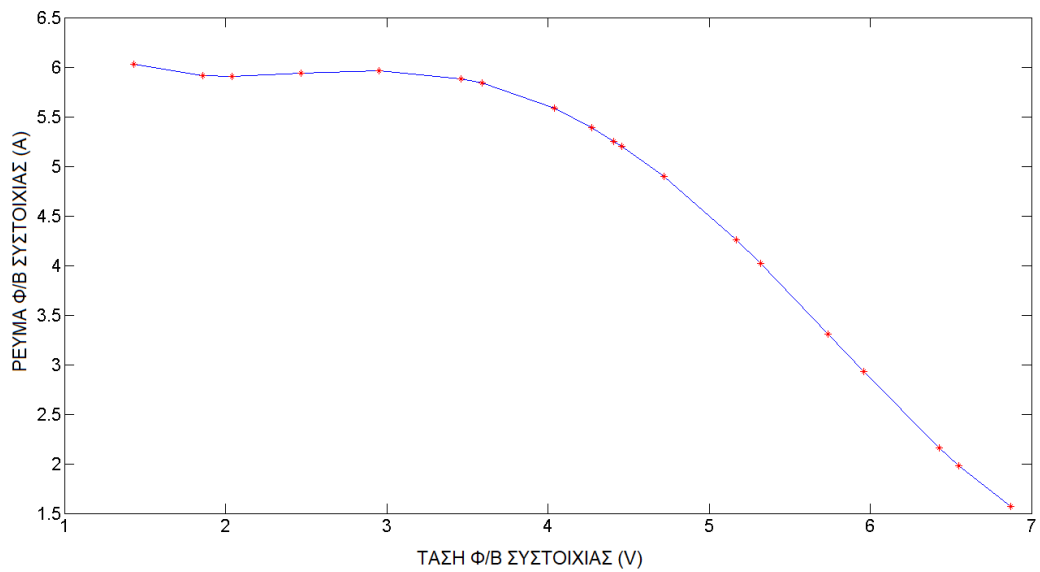




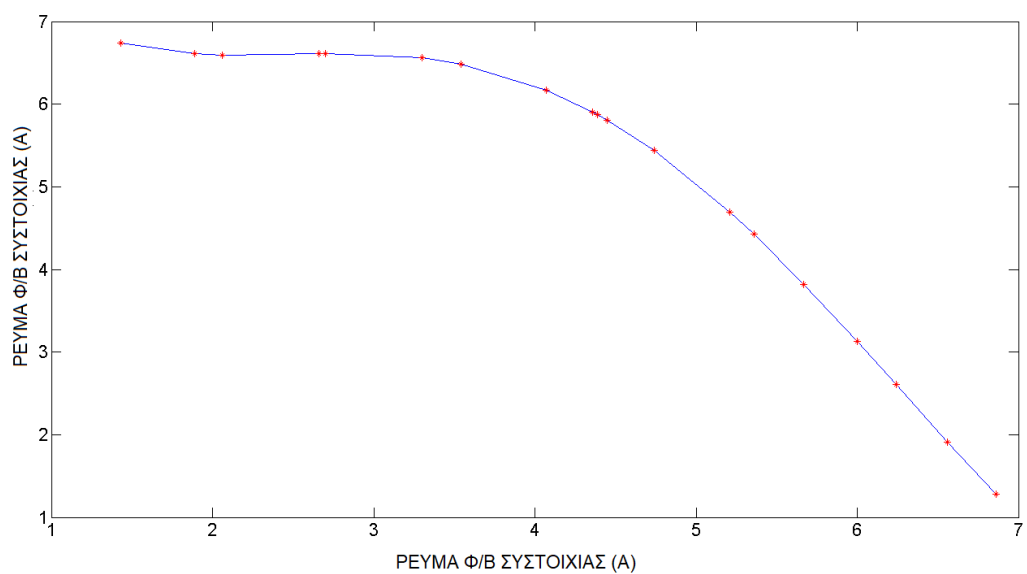
Σχήμα 5-10: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I-V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $700 \text{ W/m}^2$ .



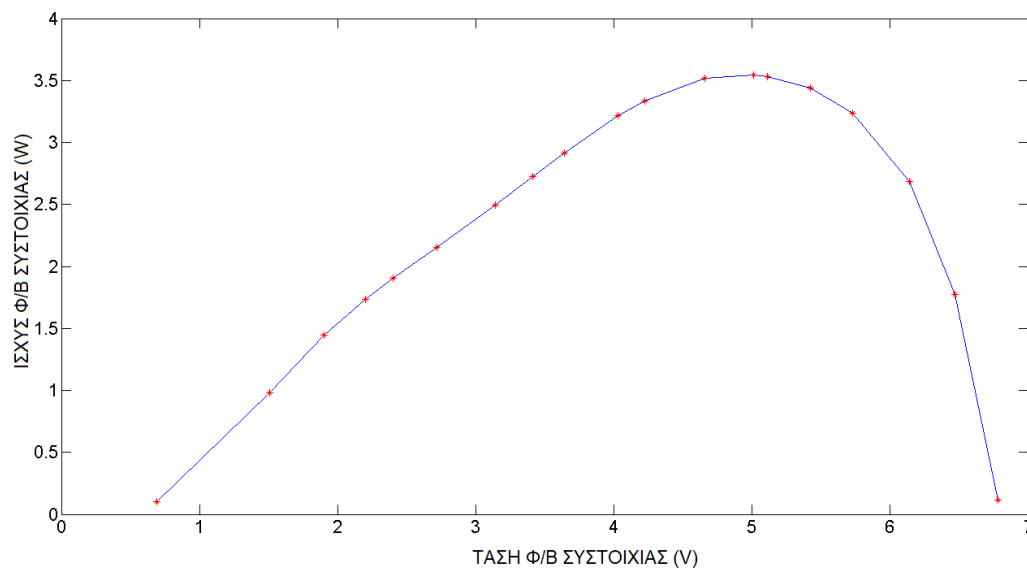
Σχήμα 5-11: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I-V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $800 \text{ W/m}^2$ .



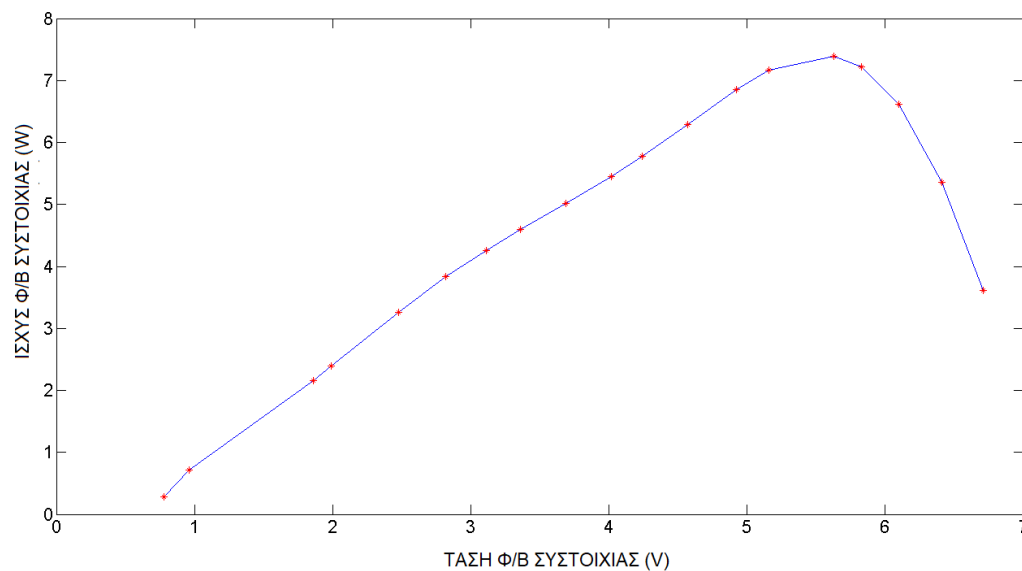
Σχήμα 5-12: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $900\text{W/m}^2$ .



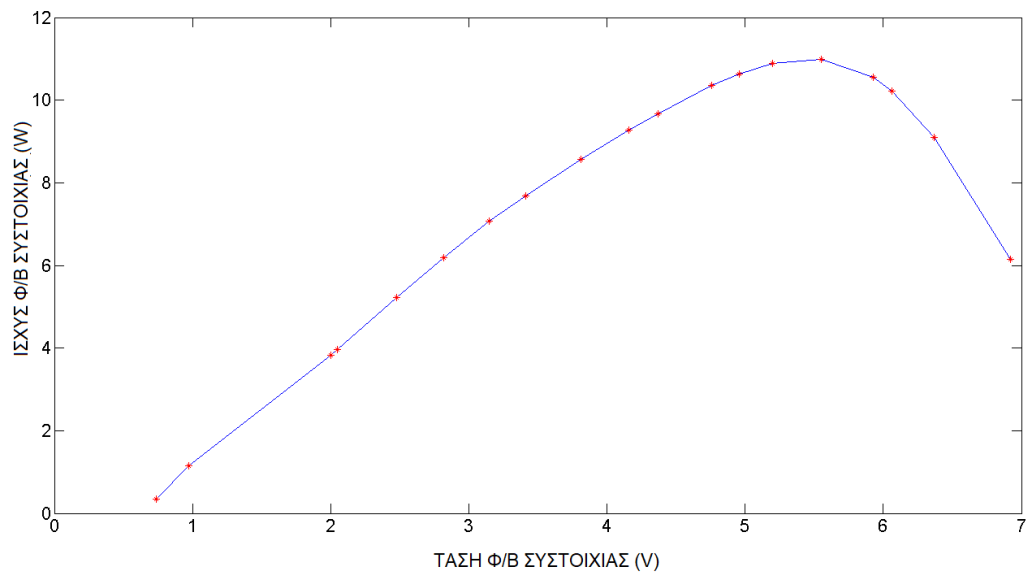
Σχήμα 5-13: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $1000\text{W/m}^2$ .



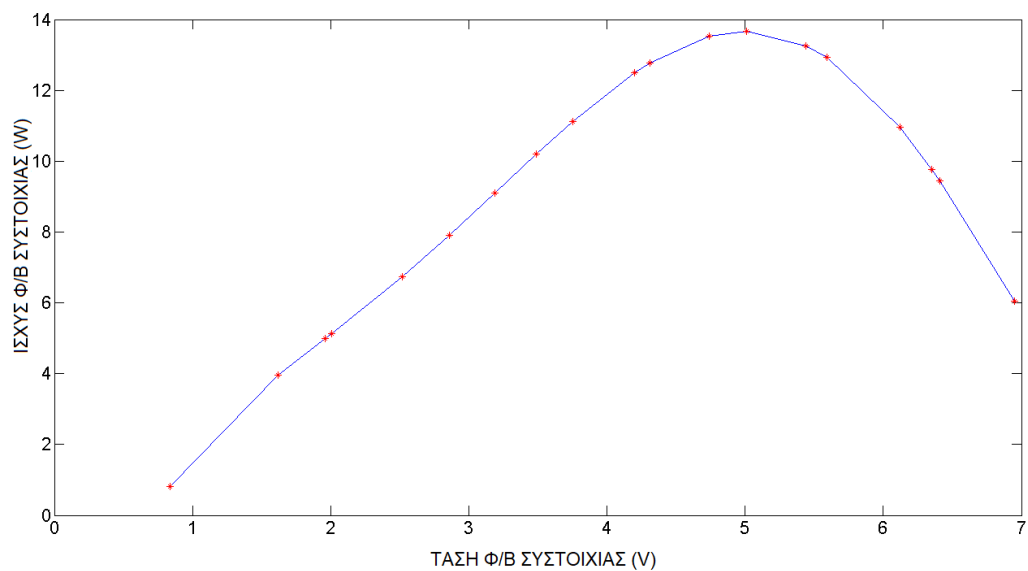
Σχήμα 5-14: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $200\text{W/m}^2$ .



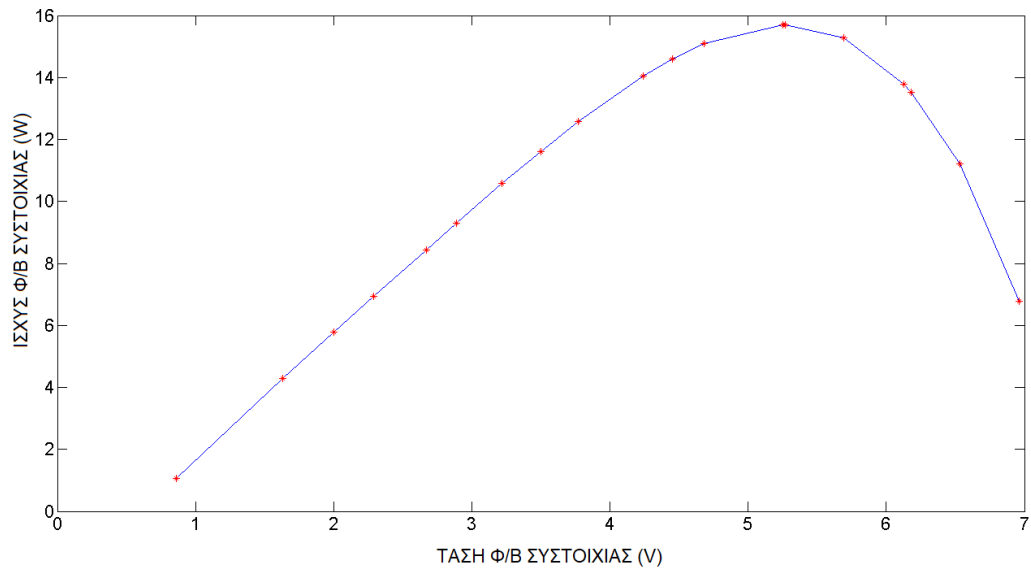
Σχήμα 5-15: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $300\text{W/m}^2$ .



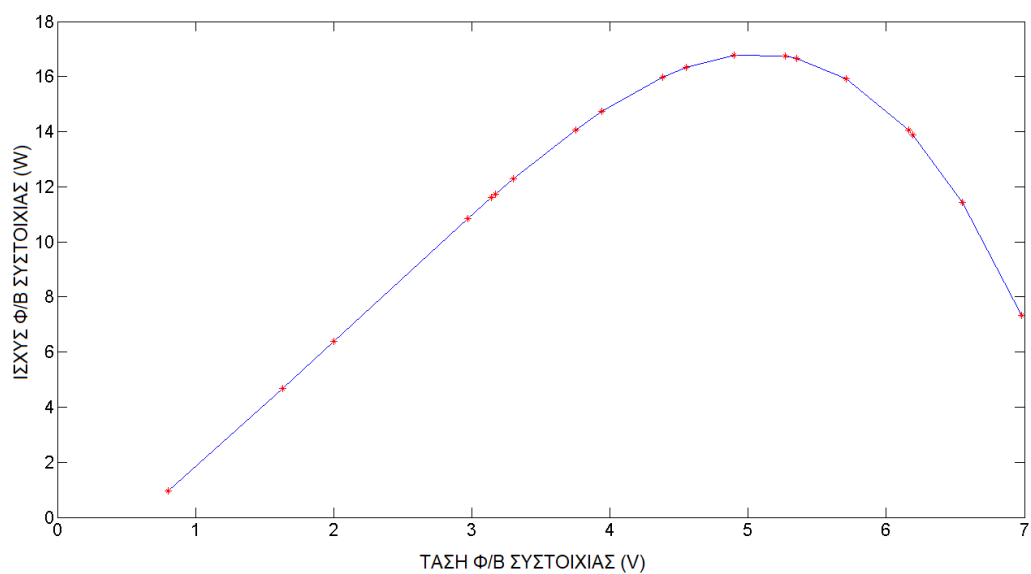
Σχήμα 5-16: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $400\text{W/m}^2$ .



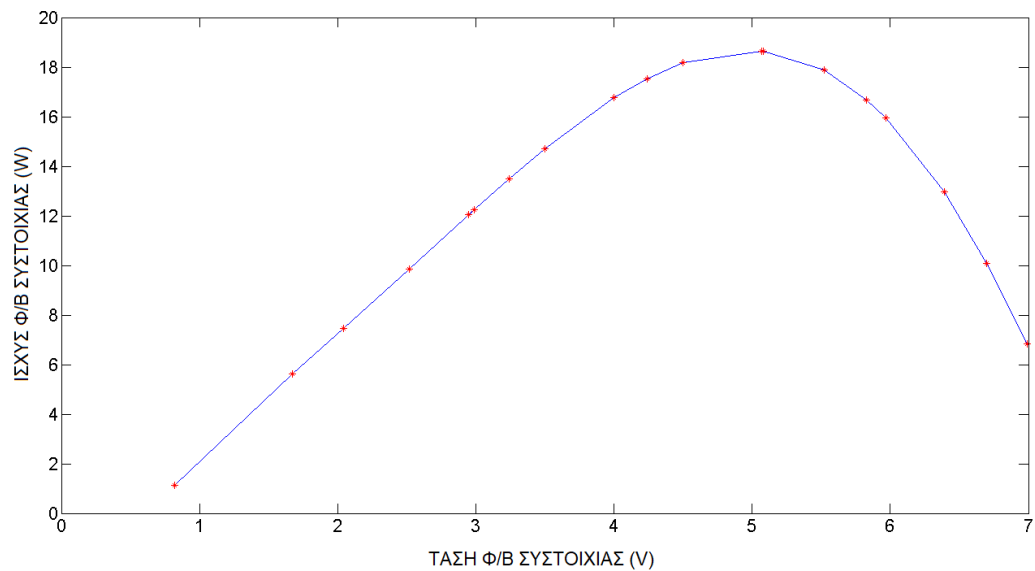
Σχήμα 5-17: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $500\text{W/m}^2$ .



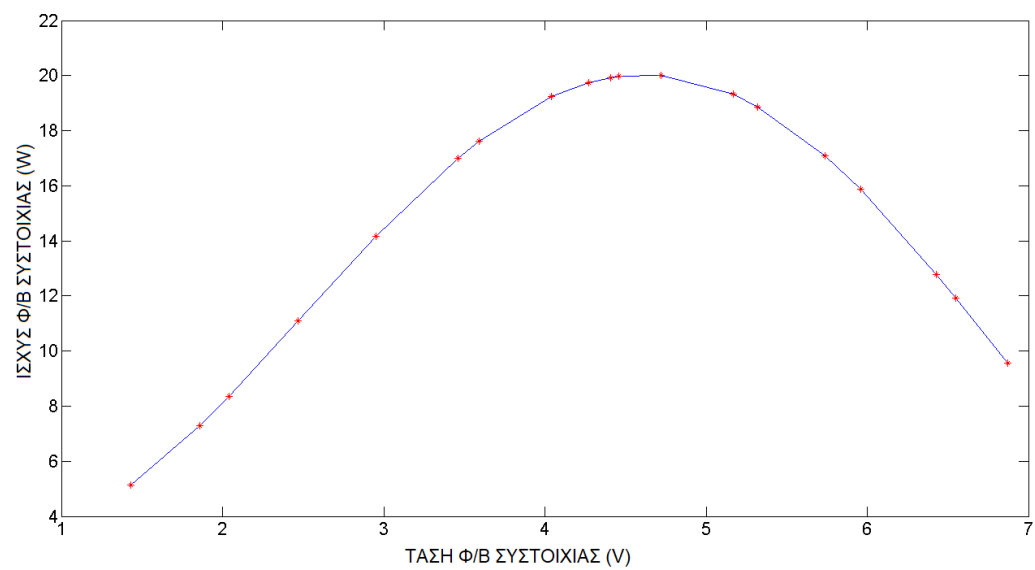
Σχήμα 5-18: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $600\text{W/m}^2$ .



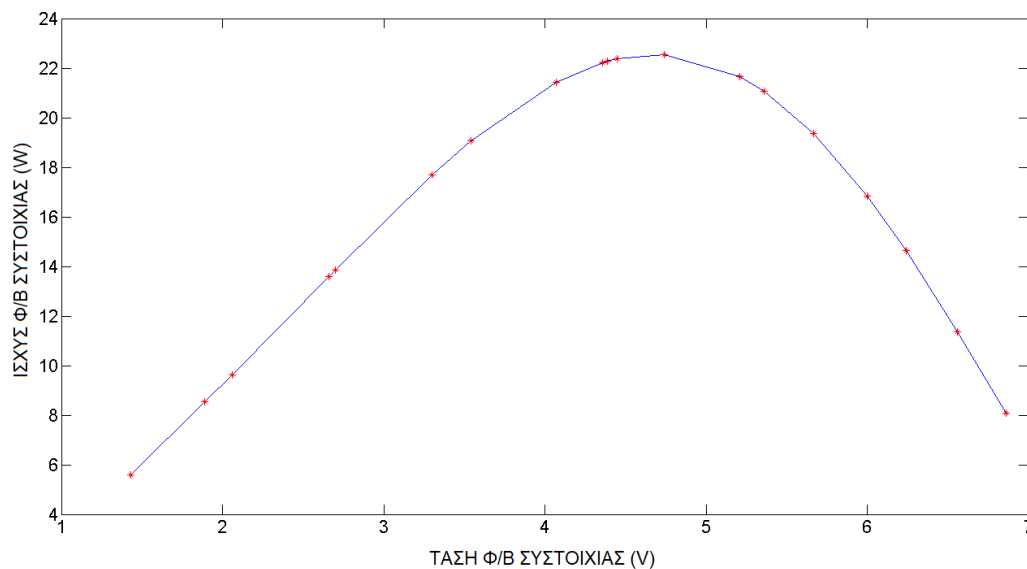
Σχήμα 5-19: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $700\text{W/m}^2$ .



Σχήμα 5-20: Διάγραμμα ισχύος-τάσης ( $P$ - $V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $800 \text{ W/m}^2$ .



Σχήμα 5-21: Διάγραμμα ισχύος-τάσης ( $P$ - $V$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $900 \text{ W/m}^2$ .

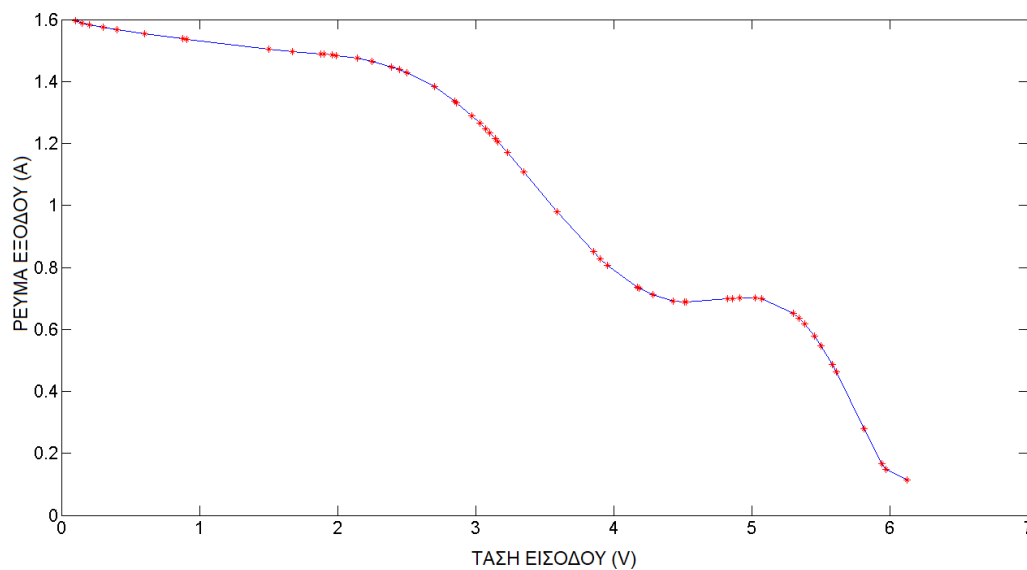


*Σχήμα 5-22: Διάγραμμα ισχύος-τάσης (P-V) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε ακτινοβολία  $1000\text{W/m}^2$ .*

Στα Σχήματα 5-5 έως 5-22 φαίνονται οι τιμές του παραγόμενου ρεύματος και της παραγόμενης ισχύος αντίστοιχα, της φωτοβολταϊκής διάταξης, σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας που ξεκινάει από  $200\text{W/m}^2$  και με βήμα  $100\text{W/m}^2$  φτάνει μέχρι και τα  $1000\text{W/m}^2$ . Είναι εμφανές λοιπόν ότι η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση του ρεύματος αλλά και της ισχύος που παράγει η φωτοβολταϊκή διάταξη.

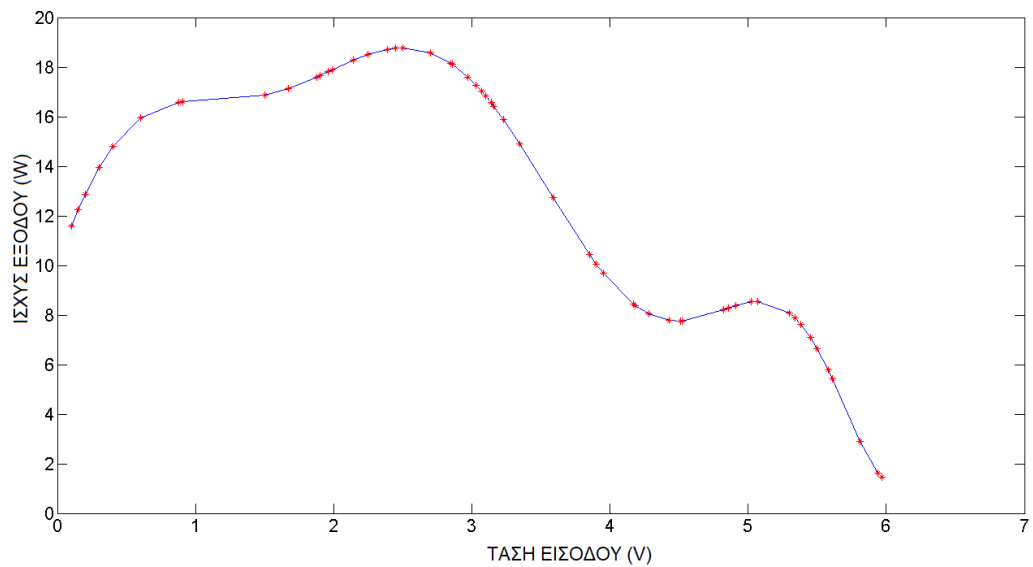
### 5.3 Πειραματικές μετρήσεις σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Για να επιτευχθεί πειραματικά η καταγραφή των επιδράσεων που έχει το φαινόμενο της μερικής σκίασης, το οποίο προκαλεί ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοβολταϊκή διάταξη, τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης τοποθετήθηκαν με διαφορετική κλίση το καθένα, ώστε να δέχονται διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία και έπειτα συνδέθηκαν ηλεκτρικά παράλληλα. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής διάταξης καθώς και η ακτινοβολία που δέχεται το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

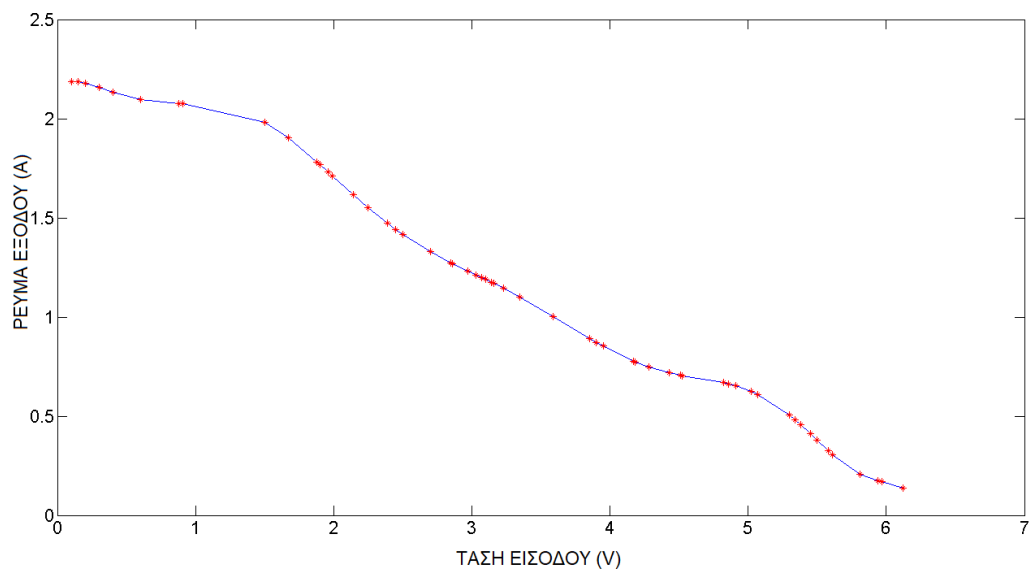


Σχήμα 5-23: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης (I-V) όταν το ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της συστοιχίας δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $900\text{W/m}^2$  και το άλλο  $385\text{W/m}^2$ .

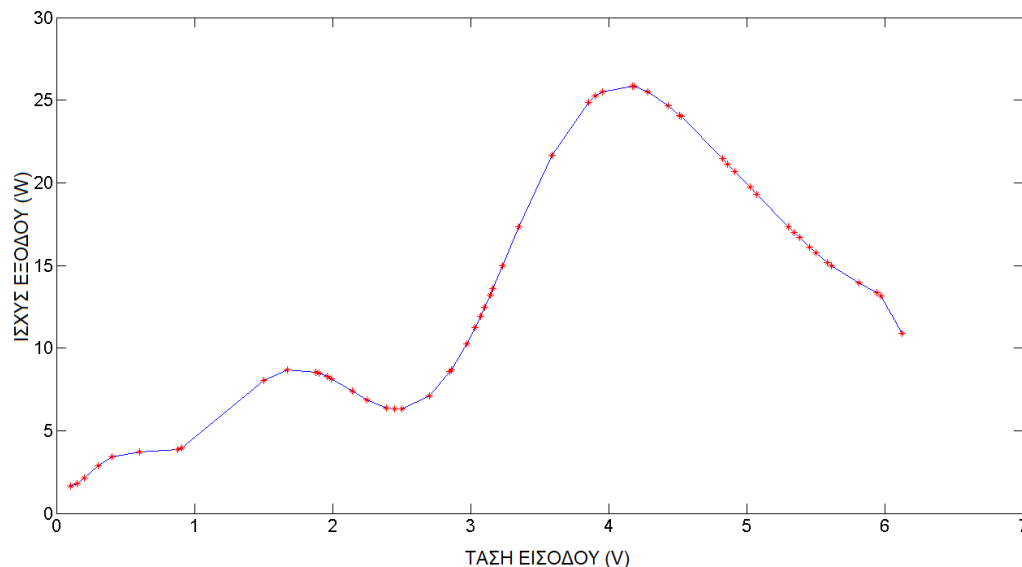




Σχήμα 5-24: Διάγραμμα ισχύος-τάσης ( $P$ - $V$ ) όταν το ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της συστοιχίας δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $900\text{W/m}^2$  και το άλλο  $385\text{W/m}^2$ .



Σχήμα 5-25: Διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $I$ - $V$ ) όταν το ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της συστοιχίας δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $1142\text{W/m}^2$  και το άλλο  $408\text{W/m}^2$ .

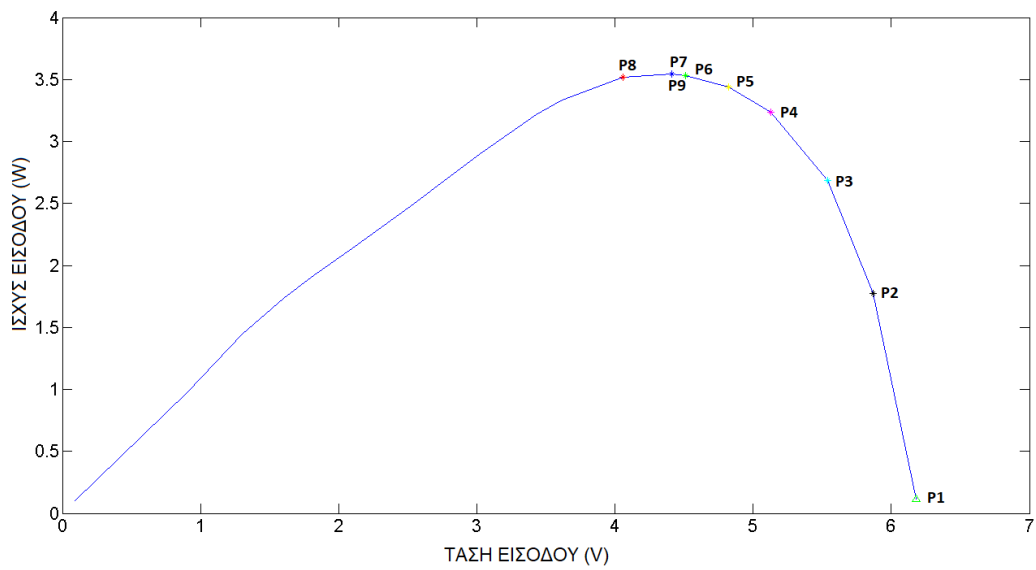


Σχήμα 5-26: Διάγραμμα ισχύος-τάσης ( $P$ - $V$ ) όταν το ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της συστοιχίας δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $1142\text{W/m}^2$  και το άλλο  $408\text{W/m}^2$ .

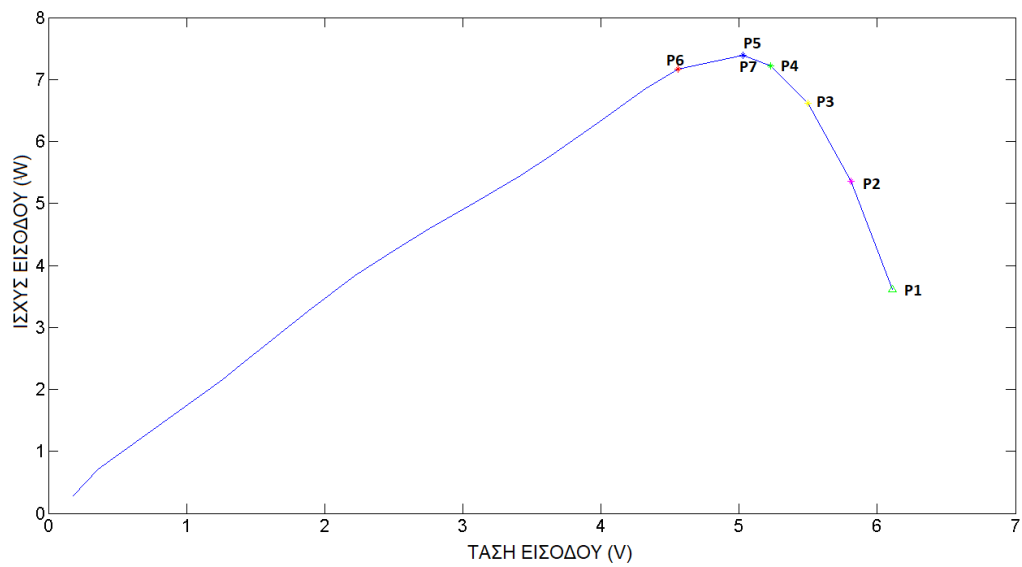
Παρατηρείται λοιπόν και πειραματικά αυτό που ισχύει και θεωρητικά, δηλαδή στις καμπύλες ρεύματος – τάσης το «διπλό γόνατο» (όπως και στο θεωρητικό Σχ. 2-7), στα σημεία των οποίων εμφανίζονται και τα σημεία μέγιστης ισχύος στις αντίστοιχες καμπύλες ισχύος – τάσης (όπως και στο θεωρητικό Σχ. 2-8). Το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος είναι είτε αριστερά (Σχ. 5-24), είτε δεξιά (Σχ. 5-26), αναλόγως με το ποιο από τα δύο πλαίσια δέχεται τη μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία.

## 5.4 Πειραματικά αποτελέσματα του αλγορίθμου MPPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

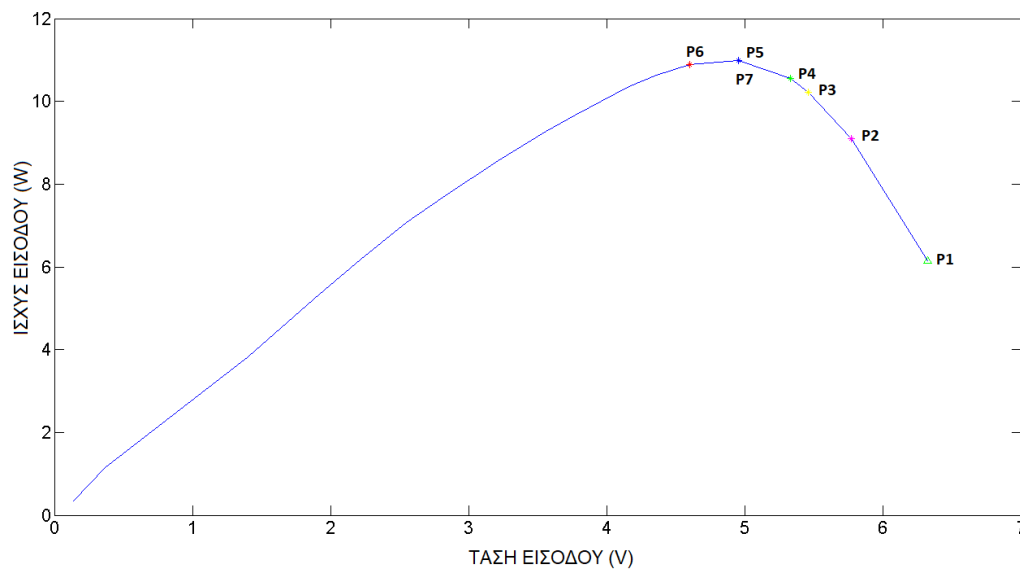
Αρχικά το σύστημα που αναπτύχθηκε δοκιμάστηκε σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας και ο μόνος αλγόριθμος που εκτελούνταν ήταν ο MPPT. Έγινε λοιπόν μία σειρά πειραμάτων σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, της οποίας οι τιμές της ισχύος κινούνταν από  $200\text{W/m}^2$  έως  $1000\text{W/m}^2$  με βήμα  $100\text{W/m}^2$ . Στα Σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η αναζήτηση της μέγιστης ισχύος εισόδου από τον αλγόριθμο MPPT στις διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.



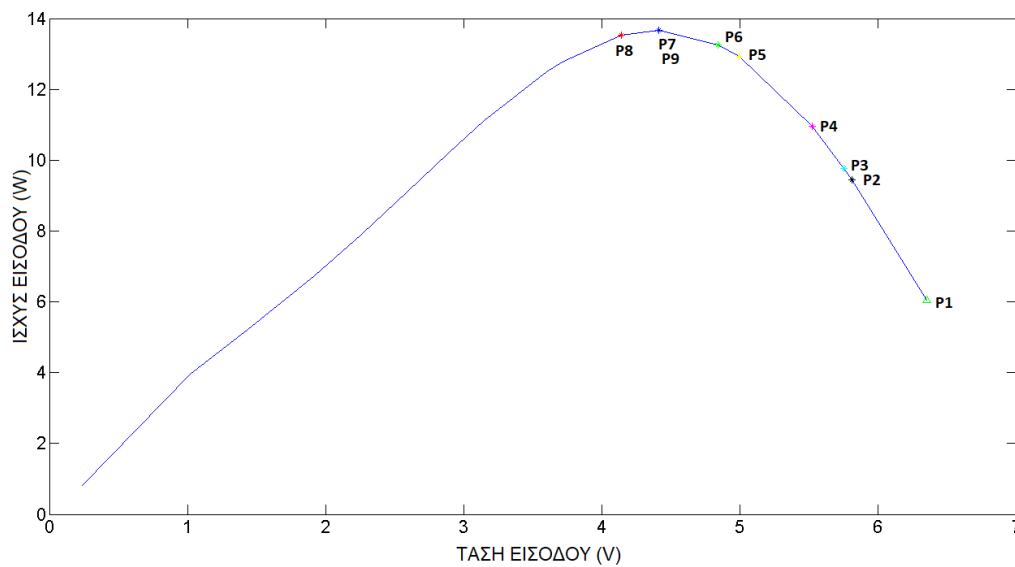
Σχήμα 5-27: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 200W/m².



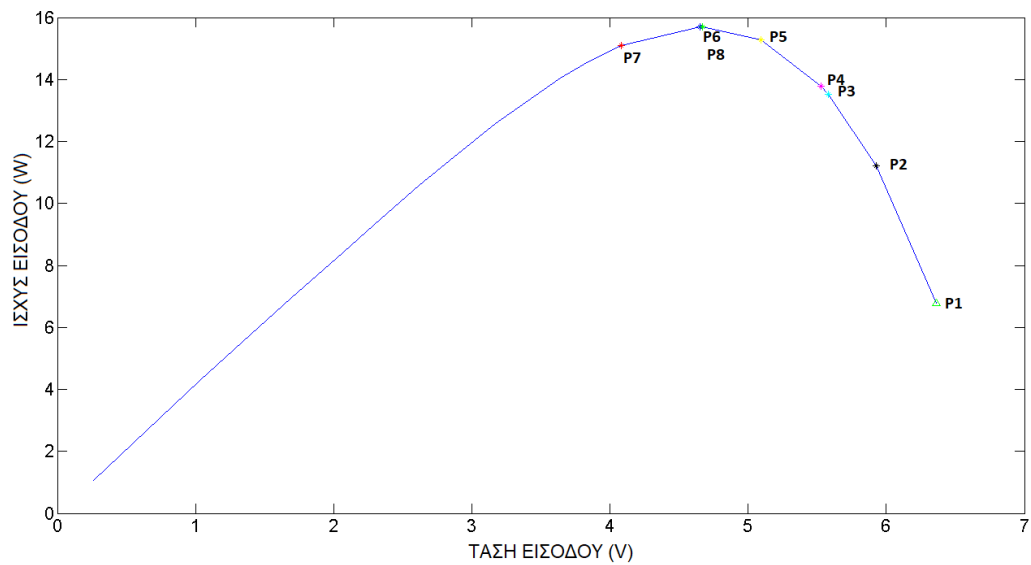
Σχήμα 5-28: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 300W/m².



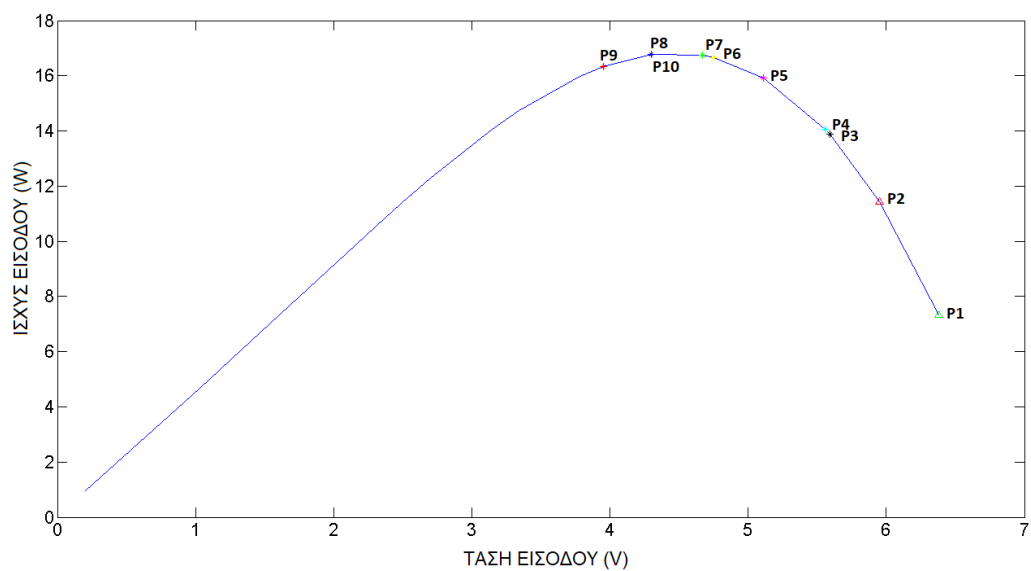
Σχήμα 5-29: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $400\text{W/m}^2$ .



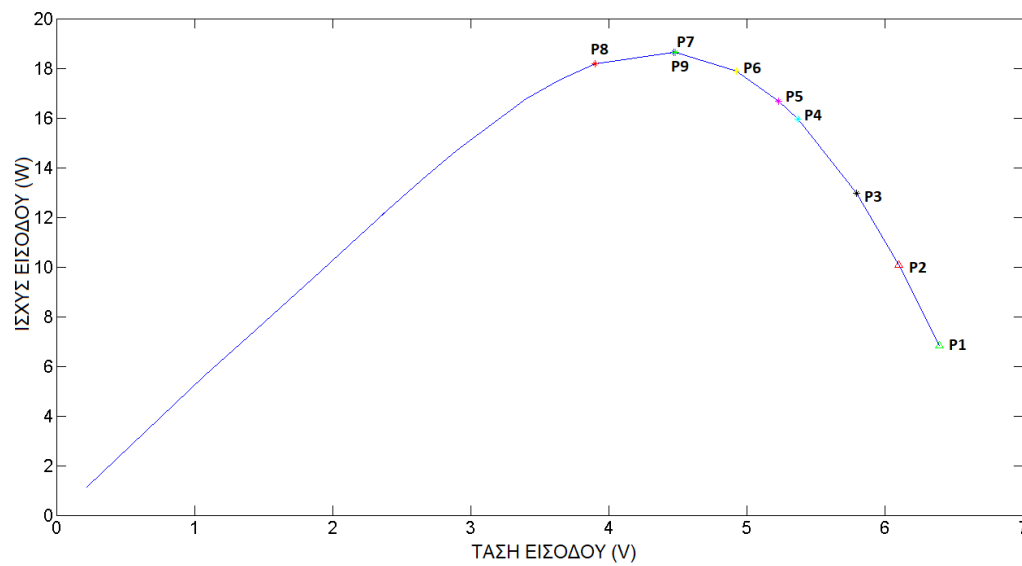
Σχήμα 5-30: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $500\text{W/m}^2$ .



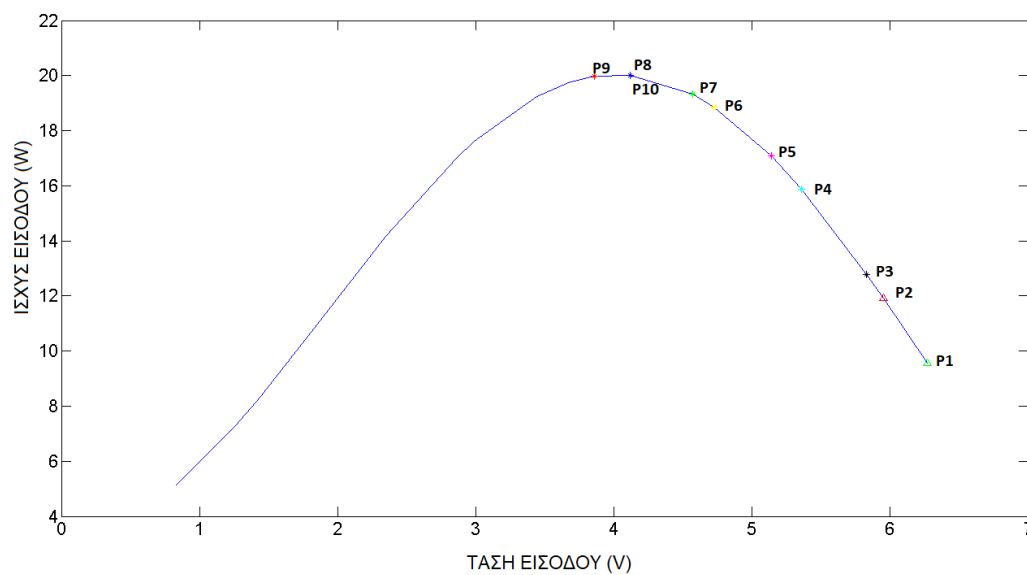
Σχήμα 5-31: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 600W/m².



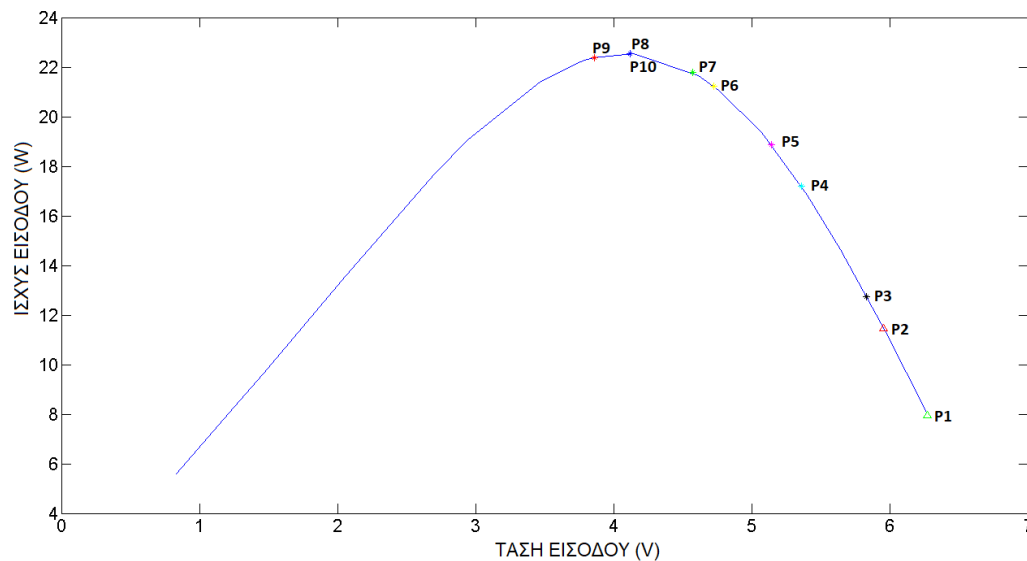
Σχήμα 5-32: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 700W/m².



Σχήμα 5-33: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800W/m<sup>2</sup>.



Σχήμα 5-34: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 900W/m<sup>2</sup>.



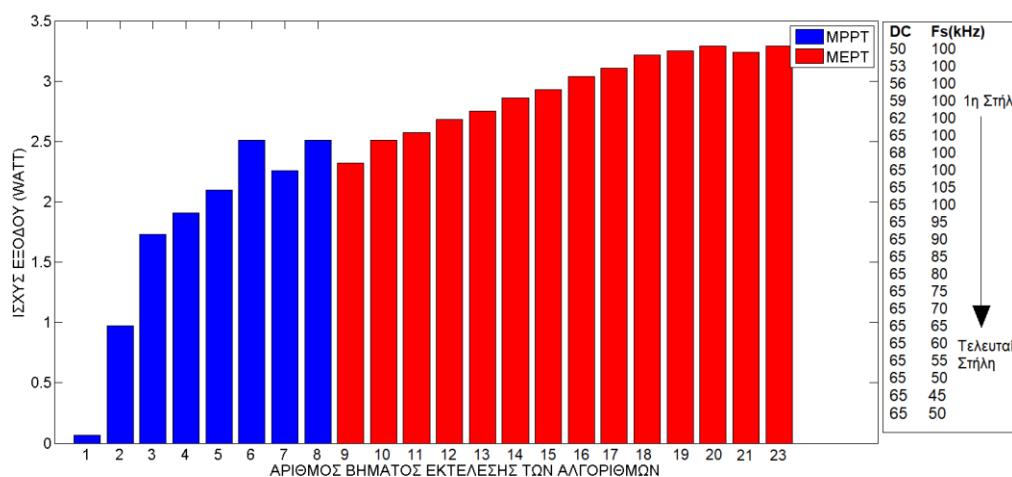
Σχήμα 5-35: Εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1000\text{W/m}^2$ .

Στα Σχήματα 5-27 έως 5-35 φαίνεται η πρακτική εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT σε διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα ισχύος ίση με 100kHz. Ο αλγόριθμος ξεκινάει ρυθμίζοντας αρχικά τον κύκλο λειτουργίας στο 50% και αρχίζει σταδιακά να τον αυξάνει με βήμα 3%. Κάποια στιγμή, φτάνει σε ένα σημείο μέγιστης ισχύος (πχ. το σημείο P8 στο Σχ. 5-35), και η επόμενη αύξηση του κύκλου λειτουργίας οδηγεί σε χαμηλότερη ισχύ (το σημείο P9 στο Σχ. 5-35). Τότε επαναφέρει τον κύκλο λειτουργίας στην προηγούμενη τιμή του, ώστε να ξαναβρεί το σημείο μέγιστης ισχύος (το σημείο P10 στο Σχ. 5-35). Η εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT οδηγεί το σύστημα μετατροπής ισχύος να λειτουργεί με ένα βαθμό απόδοσης της τάξης του 70% - 75% κατά τη διάρκεια της αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος. Όταν ο αλγόριθμος βρίσκει το πραγματικό σημείο μέγιστης ισχύος, ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 74.5 % έως 75.5% και άρα το συνολικό σύστημα λειτουργεί με αυτό το βαθμό απόδοσης με τη χρήση του MPPT και διακοπτική συχνότητα 100kHz.

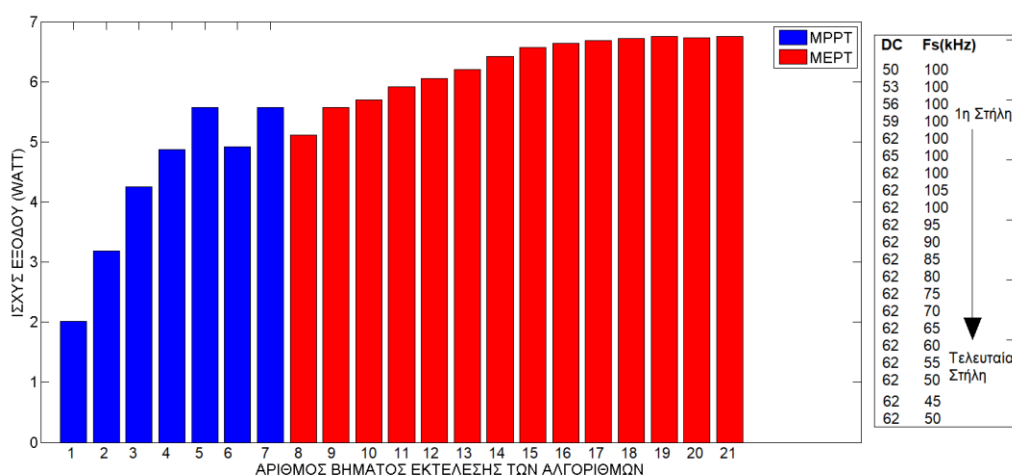
## 5.5 Πειραματικά αποτελέσματα των αλγορίθμων MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, μαζί με τον αλγόριθμο MPPT, στον μικροελεγκτή εκτελούνταν και ο αλγόριθμος MEPT. Το σύστημα δοκιμάστηκε πάλι σε συνθήκες ομοιόμορφης

πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας με εύρος τιμών ισχύος ίδιο με τη δοκιμή του MPPT και αρχική διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα DC/DC ίση με 100kHz. Παρακάτω φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου MEPT σε συνεργασία με τον MPPT.

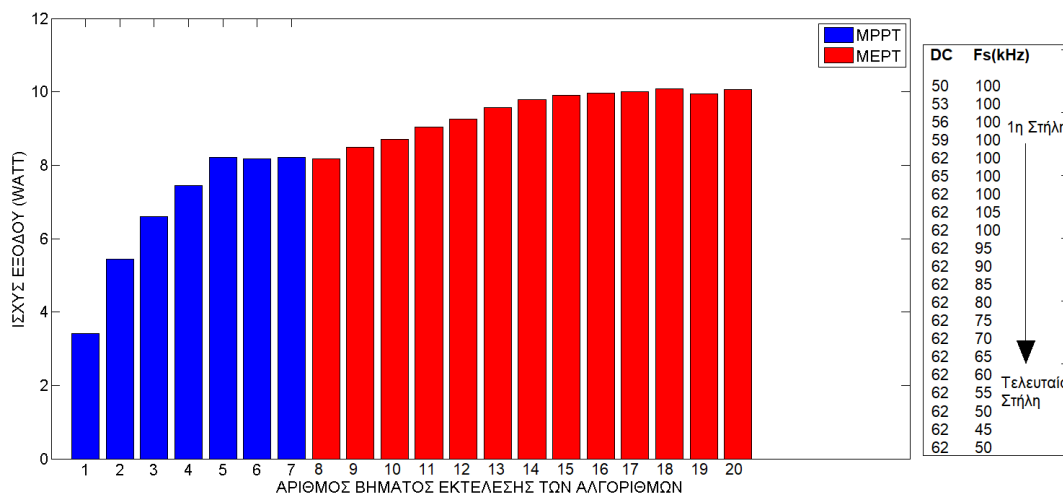


Σχήμα 5-36: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 200W/m<sup>2</sup> (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).

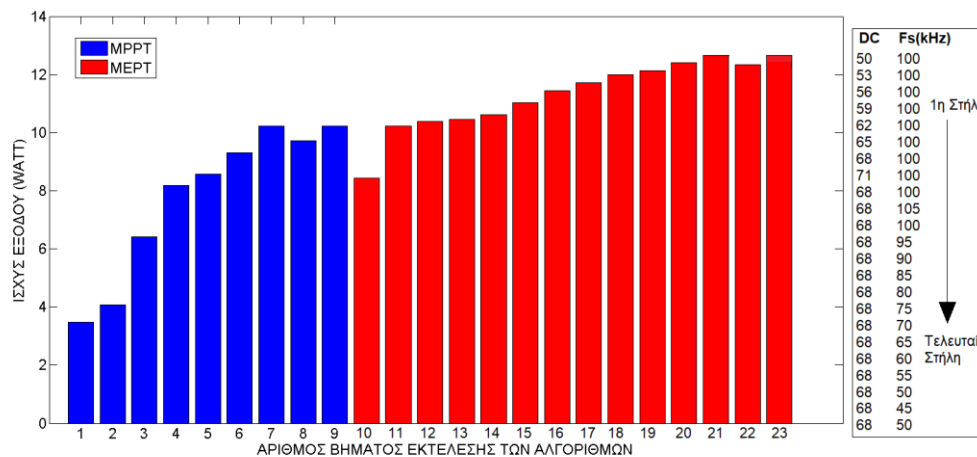




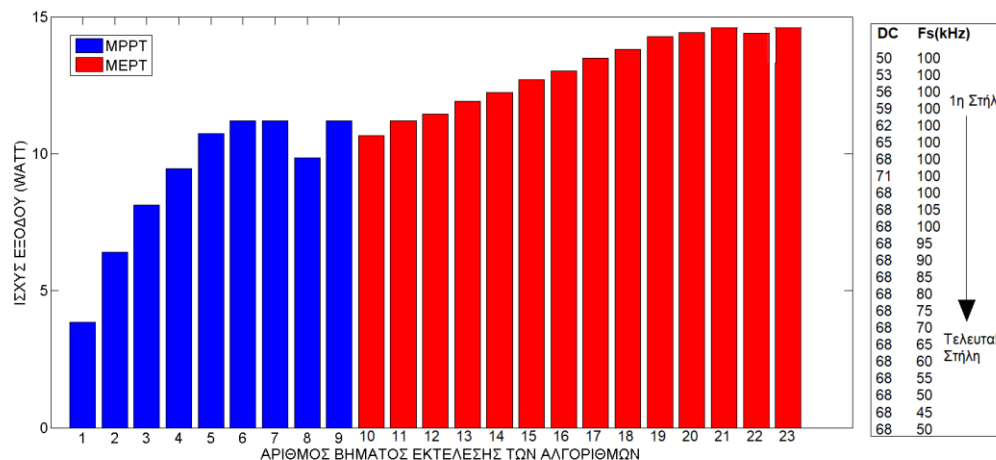
Σχήμα 5-37: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $300\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).



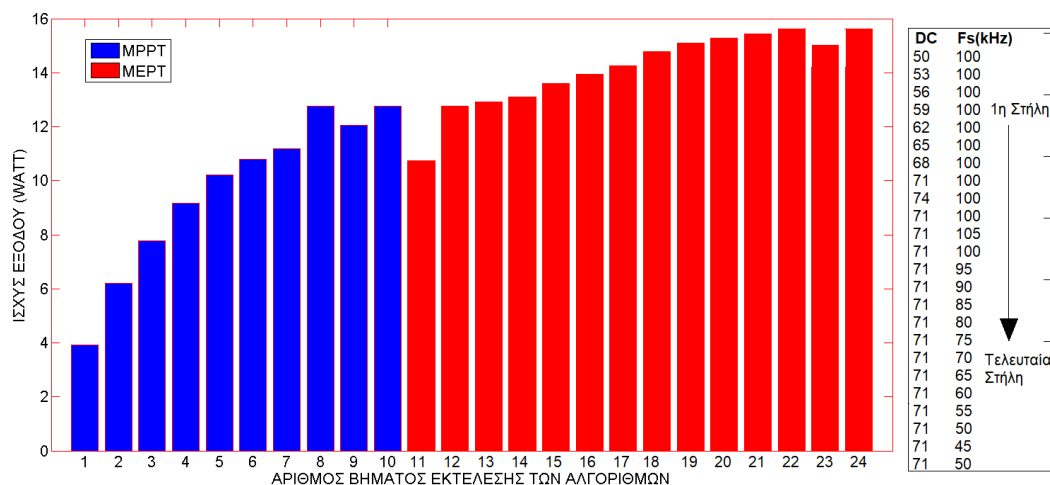
Σχήμα 5-38: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $400\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).



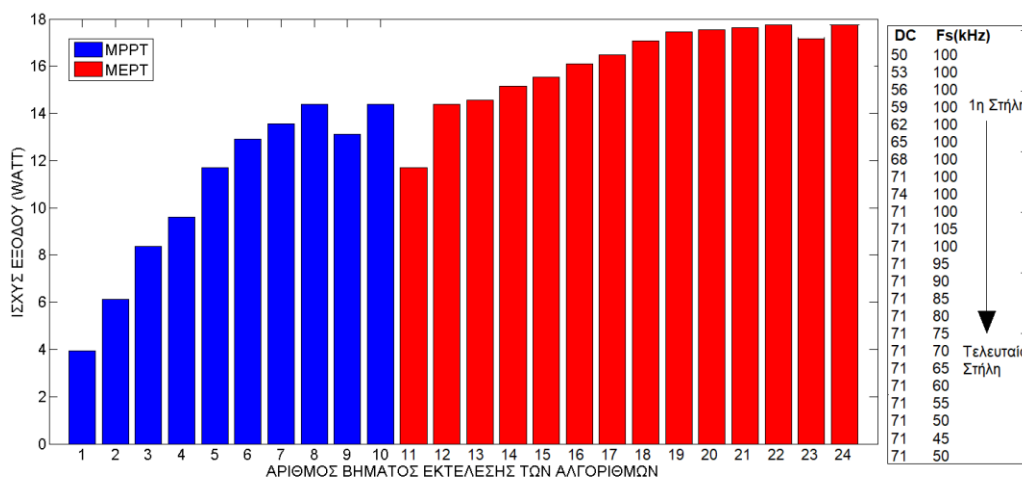
Σχήμα 5-39: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $500\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).



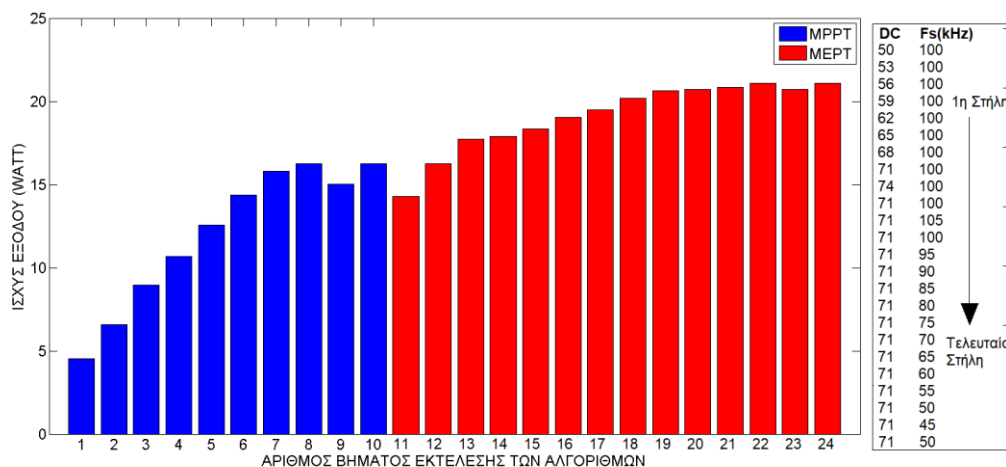
Σχήμα 5-40: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $600\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).



Σχήμα 5-41: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $700\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).



Σχήμα 5-42: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $800\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).



Σχήμα 5-43: Μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT & MEPT σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $900\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).

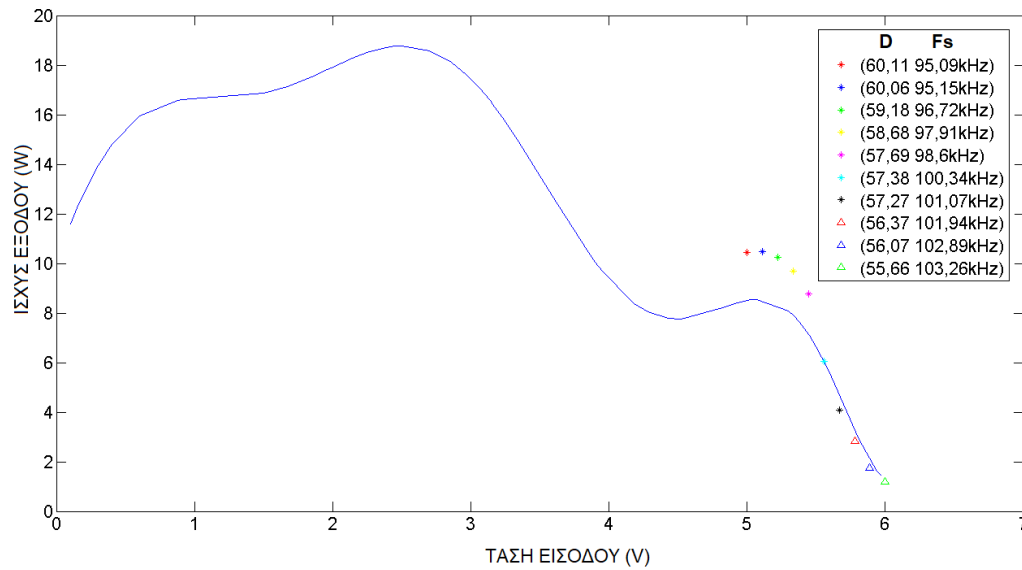
Στα Σχήματα 5-36 έως 5-43 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC κατά τη διάρκεια εφαρμογής των αλγορίθμων MPPT και MEPT. Αρχικά ενεργοποιείται ο αλγόριθμος MPPT (Σχ. 5-42 οι μπλε στήλες), ο οποίος, με το να εντοπίζει τη μέγιστη ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα, αυξάνει και την ισχύ στην έξοδό του. Εν συνεχεία, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος MEPT (Σχ. 5-42 οι κόκκινες στήλες), ο οποίος αυξάνει τη διακοπτική συχνότητα κατά 5kHz και παρατηρεί ότι η ισχύς εξόδου μειώνεται. Για το λόγο αυτό, αρχίζει μετά να μειώνει διαδοχικά ανά 5kHz τη διακοπτική συχνότητα, με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου να αρχίζει να αυξάνεται, παίρνοντας τελικά τη μέγιστη τιμή της κοντά στα 50kHz. Η εφαρμογή του αλγορίθμου MEPT οδήγησε το σύστημα να λειτουργεί με ένα βαθμό απόδοσης 90% - 93%, κατά τη διάρκεια του εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος. Όταν εντοπίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου με τον MEPT, το σύστημα λειτουργεί με βαθμό απόδοσης 93% που είναι μία αξιοσημείωτη αύξηση συγκριτικά με το να εκτελείται μόνο ο MPPT, ο οποίος λειτουργούσε το σύστημα με βαθμό απόδοσης 74.5 έως 75.5%. Επομένως, με το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται κατά

17.5-18.5%. Αντιστοίχως, η ποσοστιαία αύξηση της ισχύος εξόδου που μετρήθηκε μέσα από τις τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι στο 21.5 έως 23.5%, αξιοποιώντας έτσι πολύ καλύτερα την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή διάταξη.

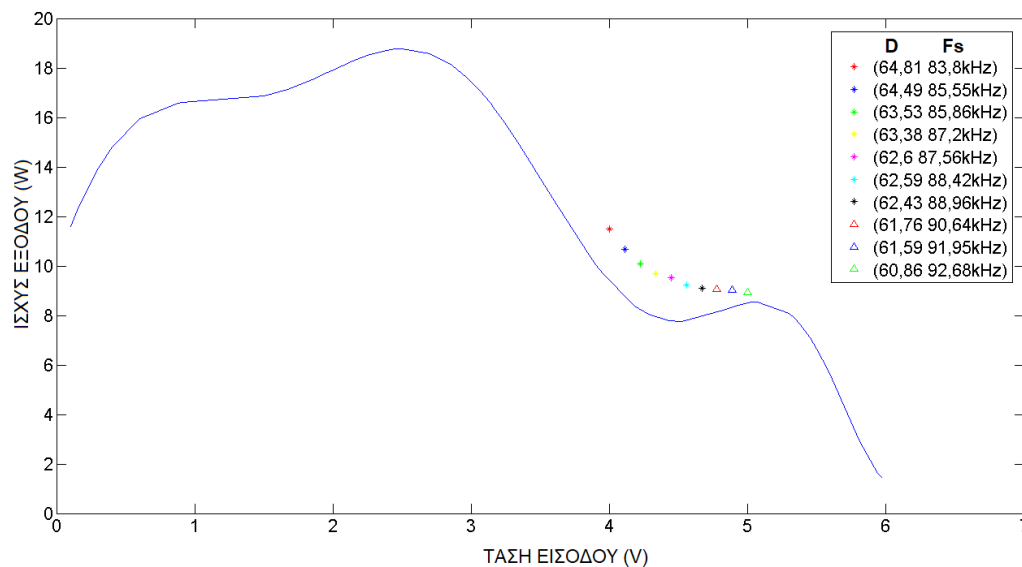
## **5.6 Πειραματικά αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO σε ανομοιομορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας**

Συνεχίζοντας την πειραματική διαδικασία, έπρεπε να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του αλγορίθμου PSO, ο οποίος επιλύει το πρόβλημα της μεγιστοποίησης ισχύος σε συνθήκες μερικής σκίασης της φωτοβολταϊκής διάταξης. Στο φαινόμενο αυτό, η διάταξη δε δέχεται όλη ίδιας έντασης ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, για να δημιουργηθεί τεχνητά το φαινόμενο αυτό, τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια της διάταξης τοποθετήθηκαν με διαφορετική κλίση το καθένα, ώστε να δέχονται διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία. Στο στάδιο αυτό έγιναν δύο πειράματα: στο πρώτο πείραμα το ένα πλαίσιο δεχόταν ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $900\text{W/m}^2$  και το δεύτερο πλαίσιο  $385\text{W/m}^2$ . Στο δεύτερο πείραμα το ένα πλαίσιο δεχόταν ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $1142\text{W/m}^2$  και το δεύτερο  $408\text{W/m}^2$ . Ο αλγόριθμος PSO που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ολοκληρώνεται κάθε φορά που εκτελείται σε τριάντα επαναλήψεις, χρησιμοποιεί δέκα σωματίδια για την ανεύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος και οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας του είναι  $w = 0.3$ ,  $f_p = 1.8$  και  $f_g = 1.3$ . Οι τιμές αυτές προσδιορίστηκαν πειραματικά για διάφορες συνθήκες έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός βημάτων εκτέλεσης του αλγορίθμου για την εύρεση του καθολικού σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος.

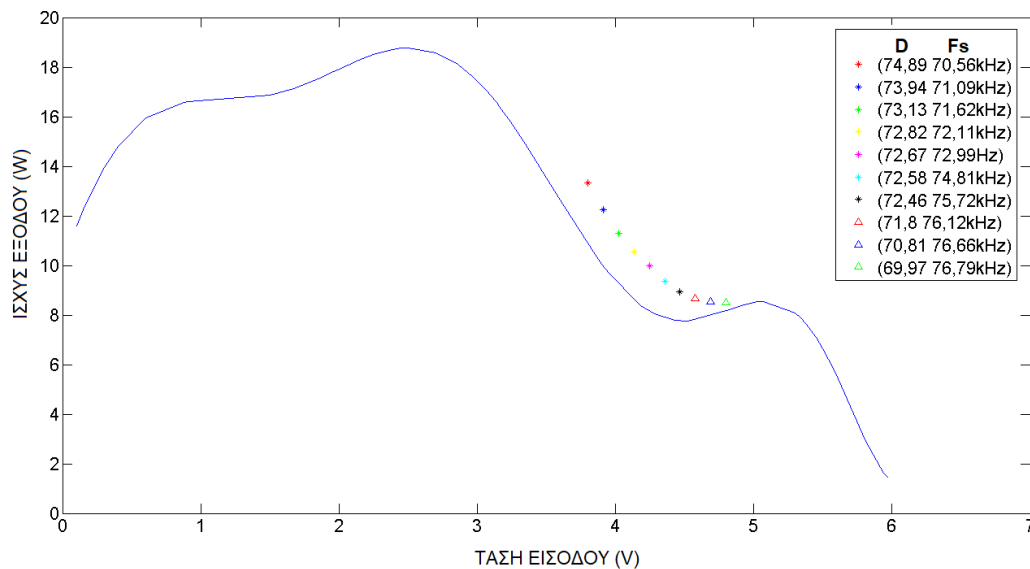
Στα Σχήματα που ακολουθούν φαίνεται πώς τα σωματίδια (*particles*) του αλγορίθμου PSO προσεγγίζουν σταδιακά στο καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος.



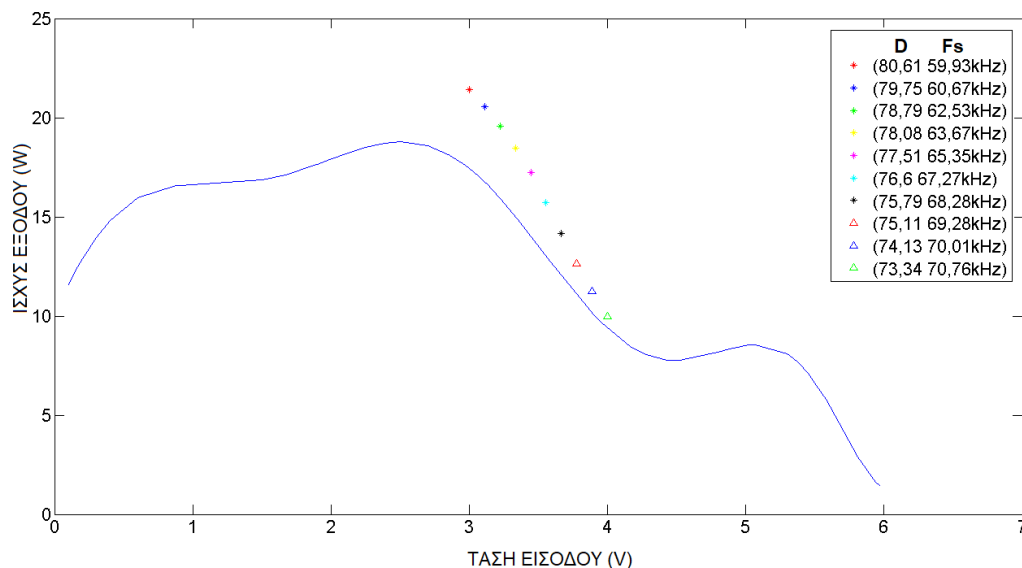
Σχήμα 5-44: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της πρώτης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $900\text{W/m}^2$  &  $385\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).



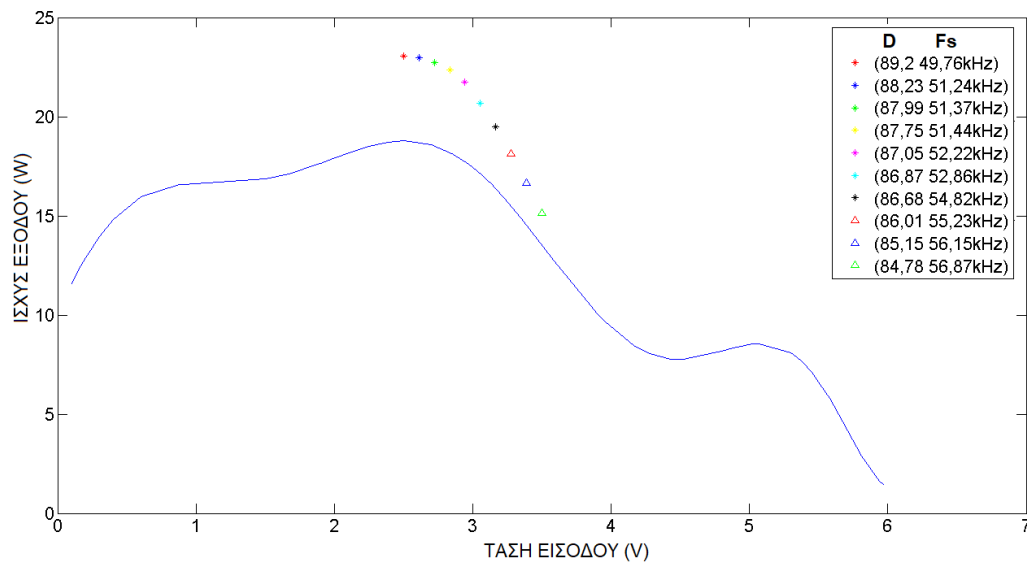
Σχήμα 5-45: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της έβδομης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $900\text{W/m}^2$  &  $385\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).



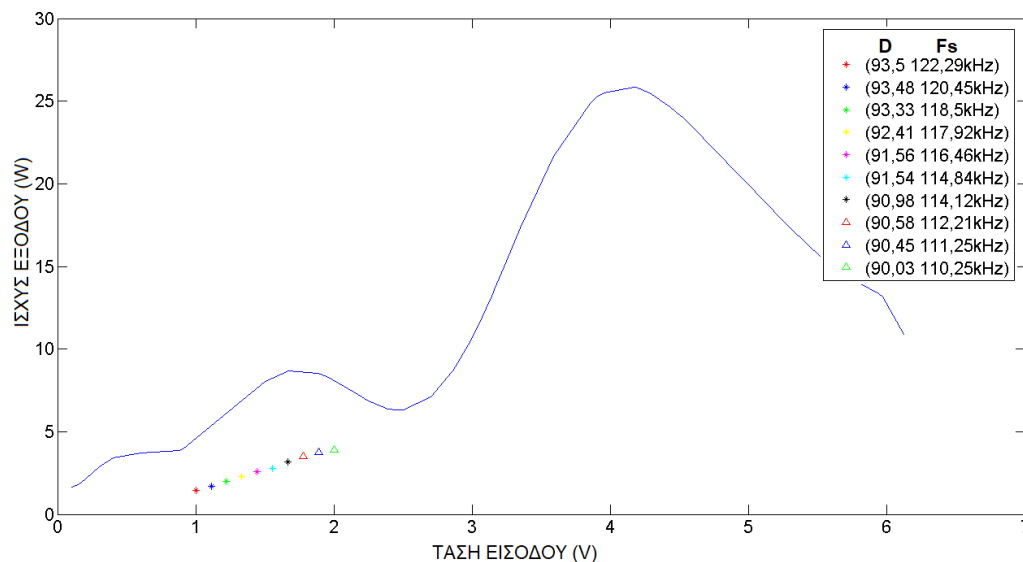
Σχήμα 5-46: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της δέκατης έκτης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $900\text{W/m}^2$  &  $385\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).



Σχήμα 5-47: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της εικοστής τέταρτης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $900\text{W/m}^2$  &  $385\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).

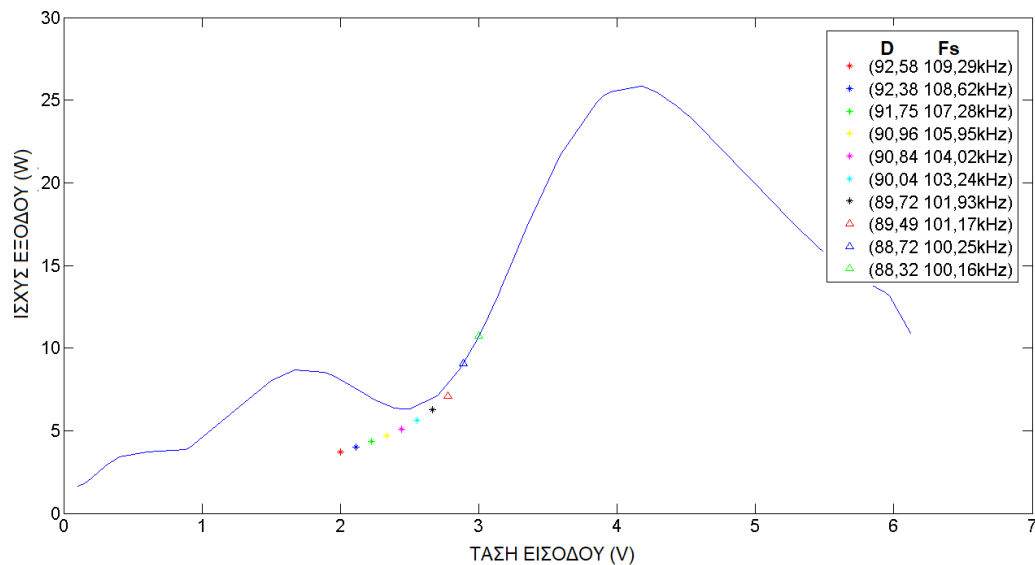


Σχήμα 5-48: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της τριακοστής γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $900\text{W/m}^2$  &  $385\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).

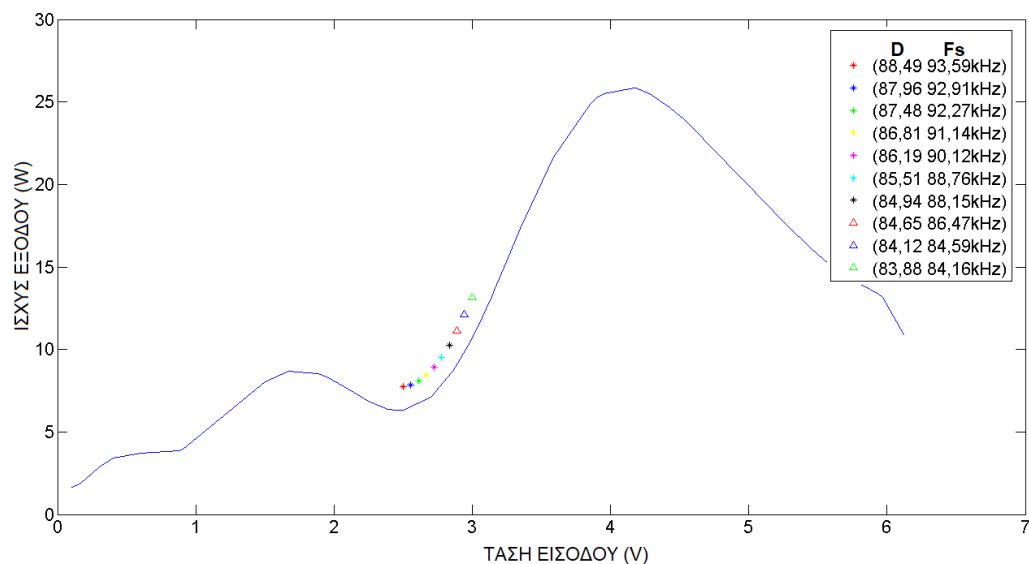


Σχήμα 5-49: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της πρώτης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $1142\text{W/m}^2$  &  $408\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).

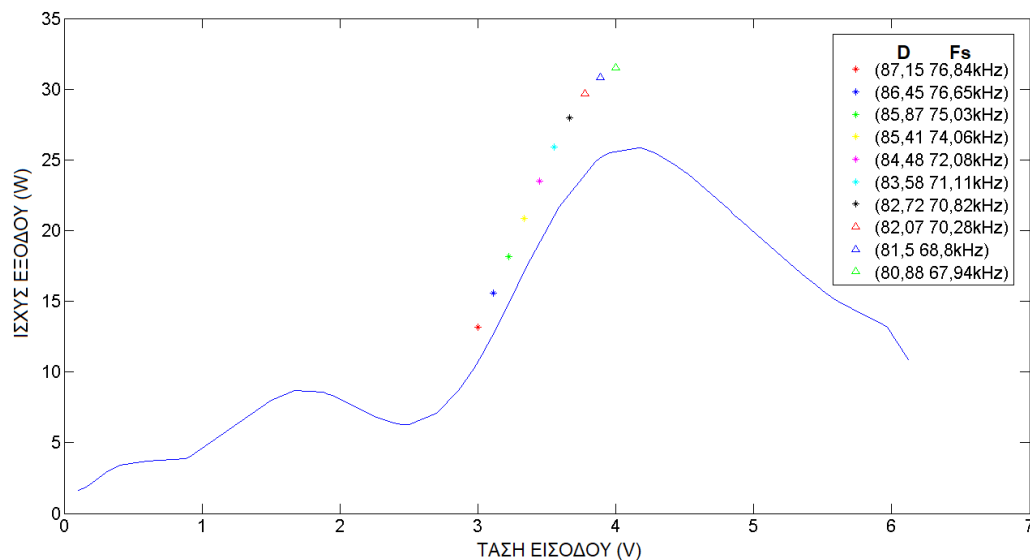




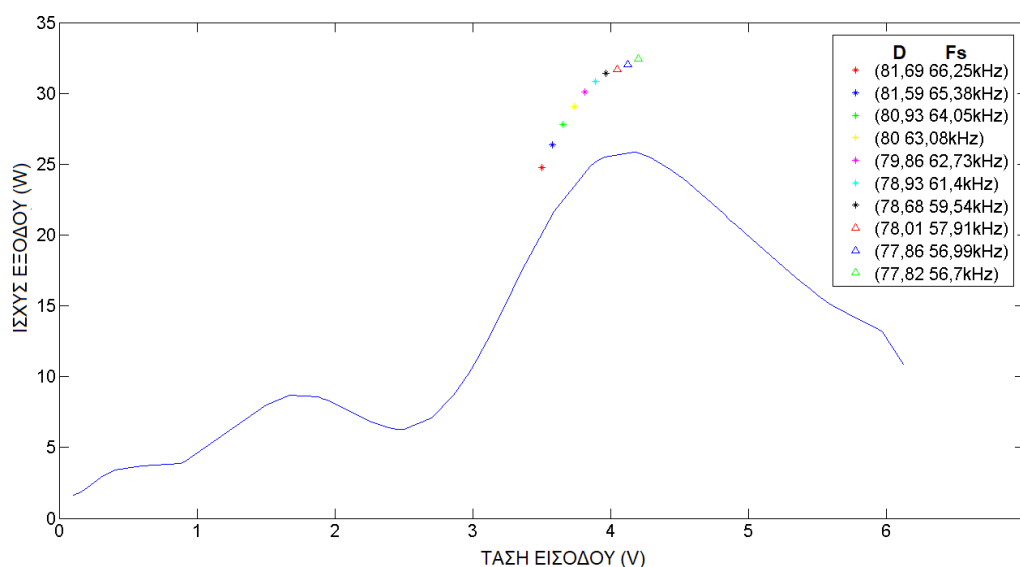
Σχήμα 5-50: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της έβδομης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $1142\text{W/m}^2$  &  $408\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).



Σχήμα 5-51: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της δέκατης έκτης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $1142\text{W/m}^2$  &  $408\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπτισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).



Σχήμα 5-52: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της εικοστής τέταρτης γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $1142\text{W/m}^2$  &  $408\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).



Σχήμα 5-53: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ως προς την τάση εισόδου του όταν  $f_s=100\text{kHz}$  και οι αντίστοιχες θέσεις της τριακοστής γενιάς σωματιδίων του αλγορίθμου PSO σε ακτινοβολίες  $1142\text{W/m}^2$  &  $408\text{W/m}^2$  (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου).

Στα Σχήματα 5-44 έως 5-53 φαίνεται πειραματικά η λειτουργία του αλγορίθμου PSO σε συνθήκες μερικής σκίασης. Αρχικά, παρατηρείται η τυχαία τοποθέτηση των σωματιδίων στο πεδίο της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC, όπου οι τιμές των διανυσμάτων του καθενός από αυτά (κύκλος λειτουργίας και διακοπτική συχνότητα), είναι τυχαίες. Καθώς όμως ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται, οι θέσεις των σωματιδίων ενημερώνονται με κριτήριο το σωματίδιο που βρίσκεται πιο κοντά στη μέγιστη τιμή ισχύος εξόδου, με αποτέλεσμα όλα μαζί να προσεγγίζουν το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος. Οι θέσεις των σωματιδίων καθορίζονται από τις τιμές του κύκλου λειτουργίας και της διακοπτικής συχνότητας, επομένως, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5-44 έως 5-48, οι τιμές τους ενημερώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε η βέλτιστη ισχύς εξόδου σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, να προσεγγίζει την πραγματική μέγιστη ισχύ.

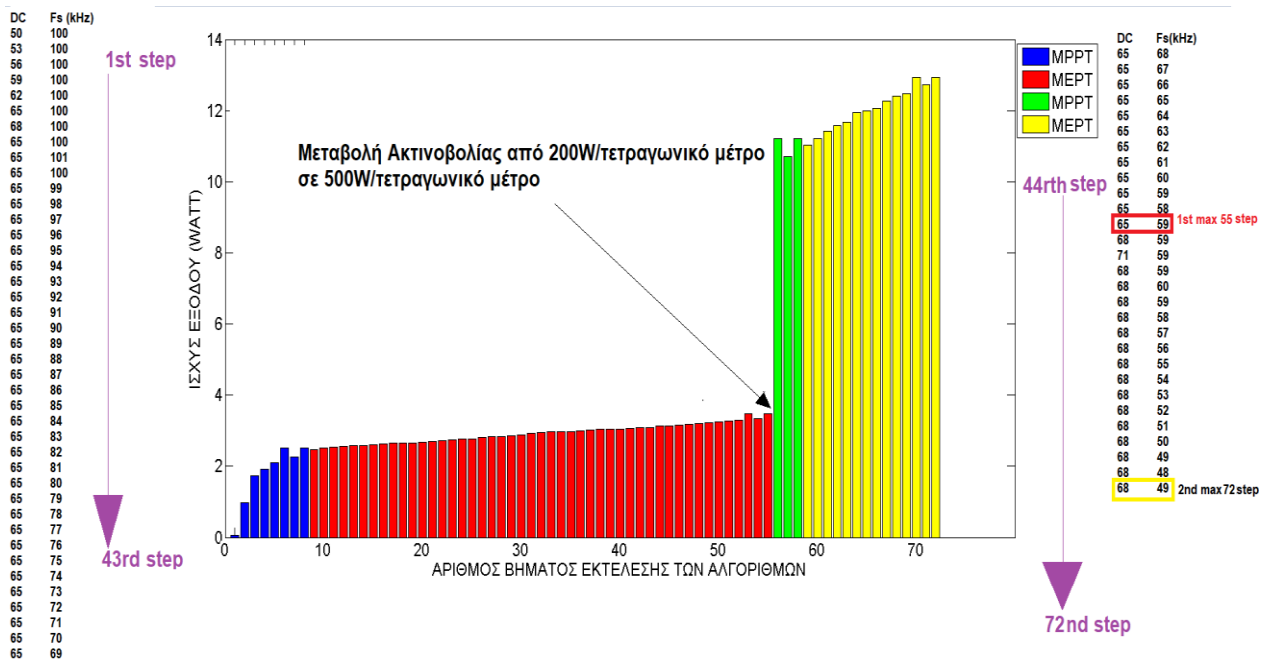
Ειδικότερα, στα Σχήματα 5-49 έως 5-53 πρέπει να παρατηρηθεί ότι το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος, δηλαδή σε μεγάλη τιμή του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC. Εάν σε αυτή τη σειρά πειραμάτων εκτελούνταν ο αλγόριθμος MPPT, ο οποίος όταν ξεκινάει την εκτέλεσή του, θέτει αρχικό κύκλο λειτουργίας στο 50%, πολύ κοντά δηλαδή στη δεξιά περιοχή των διαγραμμάτων, όταν θα εντόπιζε το τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος, θα άρχιζε να ταλαντεύεται γύρω από αυτό, έχοντας χάσει το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος. Αντίθετα, ο αλγόριθμος PSO, παρότι θα βρεθεί σε τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος (Σχ. 5-23), συνεχίζει την αναζήτηση του πραγματικού μεγίστου.

Άλλος ένας αλγόριθμος που μπορεί να εντοπίσει τη μέγιστη τιμή ισχύος είναι ο *Exhaustive Search*. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτόν, για κάθε τιμή κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC, μεταβάλλεται η συχνότητα διακοπτισμού του μετατροπέα DC/DC σε όλες τις επιτρεπτές τιμές της. Για κάθε συνδυασμό τιμών κύκλου λειτουργίας και συχνότητας διακοπτισμού, μετρίεται η ισχύς εξόδου του μετατροπέα DC/DC. Στο τέλος, μέσα από τις συγκρίσεις των επιμέρους τιμών ισχύος που έχουν μετρηθεί, βρίσκεται ο συνδυασμός τιμών για τον οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου του μετατροπέα ισχύος. Ο αριθμός των βημάτων που απαιτούνται από αυτόν τον αλγόριθμο προκύπτει ως εξής: ο κύκλος λειτουργίας παίρνει τιμές από 50% έως περίπου 95%. Έχοντας βήμα 3%, προκύπτουν 16 διαφορετικές τιμές. Αντιστοίχως, η συχνότητα κυμαίνεται από τα 50kHz έως τα 150kHz. Με βήμα 5kHz, υπολογίζονται 21 διαφορετικές τιμές. Επομένως, το σύνολο των βημάτων αναζήτησης είναι  $21 \cdot 16 = 336$ . Ο PSO ολοκληρώνεται σε 30 επαναλήψεις με 10 σωματίδια σε κάθε επανάληψη, αλλά επιπλέον θα εντοπίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη θέση του σημείου μέγιστης ισχύος από τον Exhaustive Search όπου το βήμα μεταβολής πρέπει να αυξηθεί για να μειωθεί ο χρόνος αναζήτησης.

## **5.7 Πειραματικά αποτελέσματα των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO σε ξαφνική μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας)**

Στο τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, έπρεπε να διαπιστωθεί η ομαλή λειτουργία και των τριών αλγορίθμων που εκτελούνται στον μικροελεγκτή. Ο αλγόριθμος PSO, λόγω του χρόνου που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί, εκτελείται κάθε πέντε λεπτά (Σχ. 4-8) για την κάλυψη της πιθανότητας μερικής σκίασης της διάταξης. Στο χρονικό διάστημα μέχρις ότου παρέλθουν τα πέντε λεπτά, λειτουργούν οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT. Στο στάδιο αυτό έγιναν και πάλι δύο πειράματα: στο πρώτο δημιουργήθηκε μία απότομη μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, με ομοιόμορφη πρόσπτωσή της στη φωτοβολταϊκή διάταξη, με κοινή μεταβολή της κλίσης των δύο φωτοβολταϊκών πλαισίων, προτού παρέλθουν τα πέντε λεπτά για να εκτελεστεί ο PSO. Στο δεύτερο πείραμα, με την πάροδο των πέντε λεπτών, η κλίση των φωτοβολταϊκών μεταβλήθηκε με διαφορετικό τρόπο, ούτως ώστε το καθένα να δέχεται διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία.

Στο Σχήμα που φαίνεται παρακάτω, διακρίνονται οι μεταβολές στην ισχύ εξόδου του μετατροπέα DC/DC, σε ξαφνική μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη πρόσπτωση στη φωτοβολταϊκή διάταξη), η οποία πραγματοποιήθηκε στο πεντηκοστό έκτο βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων (η πρώτη πράσινη στήλη στο Σχ. 5-54).



Σχήμα 5-54: Η ισχύς εξόδου του μετατροπέα DC/DC για μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από 200W/m<sup>2</sup> σε 500W/m<sup>2</sup> (ομοιόμορφη πρόσπτωση), όπου ενεργοποιούνται οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).

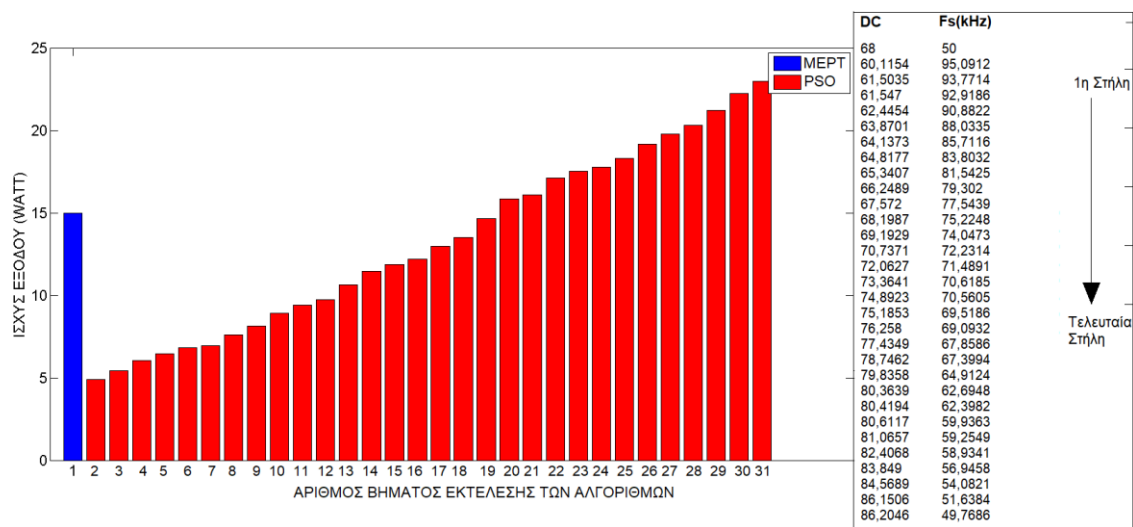
Σε τιμή έντασης ακτινοβολίας 200W/m<sup>2</sup> ενεργοποιείται αρχικά ο αλγόριθμος MPPT και εν συνεχεία ο MEPT, ο οποίος μεταβάλλει τη συχνότητα με βήμα 1kHz (Σχ. 5-54), βρίσκοντας μέγιστη τιμή ισχύος εξόδου περίπου στα 3.5 Watt σε διακοπτική συχνότητα 59kHz. Στη συνέχεια μεταβάλλεται η ένταση της ακτινοβολίας στα 500W/m<sup>2</sup> στο πενήτηκοστό έκτο βήμα (η πρώτη πράσινη στήλη στο Σχ. 5-54), όπου εκτελείται πάλι ο αλγόριθμος MPPT και μετά ο MEPT, ο οποίος βρίσκει τη μέγιστη τιμή ισχύος εξόδου στα 13.47 Watt και σε διακοπτική συχνότητα 49kHz.

Συμπερασματικά, και συγκριτικά με τα Σχήματα 5-36 έως 5-43 προκύπτει ότι αναλόγως της τιμής της έντασης της ακτινοβολίας, επομένως και της ισχύος που λαμβάνεται στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC, η διακοπτική συχνότητα για την οποία μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου διαφέρει. Επομένως, αναλόγως της τάξης της ισχύος και της τάσης εισόδου του συστήματος στο οποίο θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος MEPT, σημαντικό ρόλο έχει η επιλογή του κατάλληλου βήματος με το οποίο θα μεταβάλλεται η συχνότητα διακοπισμού κατά την αναζήτηση της μέγιστης ισχύος εξόδου.

## 5.8 Πειραματικά αποτελέσματα των αλγορίθμων MPPT, MEPT και PSO σε ξαφνική μεταβολή ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση

Στο δεύτερο πείραμα αυτού του σταδίου, δοκιμάστηκε το σύστημα στην περίπτωση όπου, ενώ η φωτοβολταϊκή διάταξη δέχεται μία ομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία, ξαφνικά μετατρέπεται σε ανομοιόμορφη. Δηλαδή, ενώ αρχικά τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν την ίδια κλίση, ξαφνικά μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο στο καθένα, προσομοιώνοντας έτσι το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Στο πείραμα αυτό εξετάζεται η περίπτωση όπου έχει παρέλθει το χρονικό διάστημα των πέντε λεπτών (Σχ. 4-8) και ενεργοποιείται ο αλγόριθμος PSO.

Στο παρακάτω Σχήμα φαίνονται οι μεταβολές της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC λόγω της μεταβολής της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας από ομοιόμορφη σε ανομοιόμορφη. Η μεταβολή πραγματοποιείται στο πρώτο βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων.



Σχήμα 5-55: Η ισχύς εξόδου του μετατροπέα DC/DC για μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από  $600\text{W/m}^2$  και στα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια σε  $870\text{W/m}^2$  και  $415\text{W/m}^2$  αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή που ενεργοποιείται ο αλγόριθμος PSO (στην στήλη “DC” φαίνονται οι τιμές του κύκλου λειτουργίας και στην στήλη “Fs” οι τιμές της συχνότητας διακοπισμού σε κάθε βήμα εκτέλεσης των αλγορίθμων).

Στην αρχή, το σύστημα λειτουργεί με μέγιστη τιμή ισχύος εξόδου κοντά στα 15W, που εντοπίστηκε από τον αλγόριθμο MEPT (Σχ. 5-55). Η αρχική ακτινοβολία, που είναι ίδια και στα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια, μεταβάλλεται ξαφνικά με διαφορετικό τρόπο στο καθένα, με αποτέλεσμα το σύστημα να αρχίζει να λειτουργεί σε συνθήκες μερικής σκίασης. Τα πέντε λεπτά έχουν παρέλθει, με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο αλγόριθμος PSO. Αρχικά, παρατηρείται μία απότομη πτώση στην ισχύ εξόδου (Σχ. 5-55 η πρώτη κόκκινη στήλη) και αυτό συμβαίνει διότι την πρώτη φορά που εκτελείται ο αλγόριθμος, οι τιμές των διανυσμάτων των σωματιδίων που διασκορπίζονται στο πεδίο της ισχύος, δηλαδή ο κύκλος λειτουργίας και η διακοπτική συχνότητα, έχουν εντελώς τυχαίες τιμές και απέχουν πολύ από τις βέλτιστες. Καθώς όμως ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται, σταδιακά η ισχύς εξόδου αυξάνεται, φτάνοντας τελικά στο καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου. Στο Σχήμα 5-55 φαίνονται τα καθολικά καλύτερα σωματίδια κάθε γενεάς.

Από το Σχήμα 5-55 είναι φανερός ο λόγος για τον οποίο ο αλγόριθμος PSO θα πρέπει να εκτελείται σε αραιά χρονικά διαστήματα. Η αρχική τοποθέτηση των σωματιδίων στο πεδίο της ισχύος είναι εντελώς τυχαία, με αποτέλεσμα την αρχική μείωση της ισχύος εξόδου σε μεγάλο βαθμό. Αν και φαίνεται ιδανικό το γεγονός ότι εντοπίζει το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος εξόδου σε οποιαδήποτε ακτινοβολία, όμως στη διάρκεια της διαδικασίας ανεύρεσής του, μπορεί να αξιοποιείται μικρότερη ισχύς από τη φωτοβολταϊκή διάταξη ανάλογα με τη θέση των επιμέρους σωματιδίων, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης του συστήματος να μειώνεται αρκετά.

# 6.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας που αυξάνει την ισχύ εξόδου σε ένα διακοπτικό μετατροπέα ανύψωσης τάσης ο οποίος τροφοδοτείται με ενέργεια από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό, υλοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι (MPPT, MEPT και PSO), οι οποίοι εκτελούνται διαδοχικά σε ένα μικροελεγκτή (Arduino Uno R3) που ελέγχει τη λειτουργία του διακοπτικού μετατροπέα DC/DC. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε οποιεσδήποτε συνθήκες πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη.

Το προτεινόμενο σύστημα δοκιμάστηκε σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις και μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να ελεγχθεί αν λειτουργούν ικανοποιητικά όλοι οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν, καθένας από τους οποίους συνέβαλλε με διαφορετικό τρόπο στη βελτίωση του βαθμού απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επίσης, μέσα από την πειραματική διαδικασία, φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, απ' όπου τελικά διαπιστώνεται η αναγκαιότητα συνύπαρξης και εκτέλεσης και των τριών, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Κάνοντας λοιπόν μία συνοπτική ανασκόπηση των αποτελεσμάτων που επετεύχθησαν στην παρούσα εργασία, αρχικά στο μικροελεγκτή λειτούργησε μόνο ο αλγόριθμος Perturb & Observe, ο οποίος μεγιστοποιούσε μόνο την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα ρυθμίζοντας κατάλληλα τον κύκλο λειτουργίας του, με απόρροια ο βαθμός απόδοσης του συστήματος να είναι στο 74.5 έως 75.5%. Στη συνέχεια, οι αλγόριθμοι MEPT και PSO, εκ των οποίων ο πρώτος ρύθμιζε



κατάλληλως την διακοπτική συχνότητα σε συνεργασία με τον Perturb & Observe, ενώ ο δεύτερος ρύθμιζε κατάλληλα και τα δύο μεγέθη, ανέβασαν το βαθμό απόδοσης του συστήματος στο 93%, δίνοντας μία αύξηση του 17.5 έως 18.5% όσον αφορά το βαθμό απόδοσης, και μία αύξηση του 21.5 έως 23.5% για την ισχύ εξόδου.

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρονικά συστήματα διαχείρισης ισχύος φωτοβολταϊκών διατάξεων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, το σύστημα που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία δεν επικεντρώνεται μόνο στη μεγιστοποίηση της ισχύος που παράγεται από την φωτοβολταϊκή συστοιχία, αλλά και στη μεγιστοποίηση της ισχύος, άρα και της ενέργειας, στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος, συμβάλλοντας έτσι στην αποθήκευση περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας από μία φωτοβολταϊκή διάταξη. Μελλοντικά, το παρόν σύστημα μπορεί να διασυνδεθεί με ένα σύστημα ηλιακής παρακολούθησης (*solar tracking system*) έτσι ώστε ο βαθμός απόδοσης του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος να αυξηθεί ακόμα περισσότερο.

Επίσης, οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν για τον έλεγχο ενός μετατροπέα DC/AC (αντιστροφέας, *inverter*), ο οποίος διασυνδέει την φωτοβολταϊκή συστοιχία με το ηλεκτρικό δίκτυο, με σκοπό την αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος που διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

---

# 7.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Φραγκιαδάκης, Ι.Ε. (2006) *Φωτοβολταϊκά συστήματα* (2<sup>η</sup> έκδ.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- [2] Μπιτζιώνης, Β., & Μπιτζιώνης, Δ. (2011). *Εναλλακτικές μορφές ενέργειας*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλας.
- [3] Σταυρακάκης, Γ., Νικολάου, Τ. Γ., Κολοκοτσά, Δ. Σ., & Κατσίγιαννης, Ι. Α. (2013). *Κεφ 3.1.7: Ηλιακή γεωμετρία*. Διδακτικές σημειώσεις για το μάθημα «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» (σελ. 11). Ανακτήθηκε από <http://courses.ece.tuc.gr/>.
- [4] Κιοσκερίδης, Ι. (2008) *Ηλεκτρονικά ισχύος*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλας.
- [5] Καπλάνης, Σ. Ν. (2004) *Ήπιες μορφές ενέργειας III: Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.
- [6] Koutroulis, E., & Blaabjerg, F. (2015, July). Overview of maximum power point tracking techniques for photovoltaic energy production systems. *Electric Power Components and Systems* 43(12), 1329-1351.
- [7] Mahtab, K., Mohammad, H. J., Darudi A. (2016, March) A combinational maximum power point tracking algorithm in photovoltaic systems under partial shading conditions. *The 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, 103-107.
-

- [8] Humphries, J.T., & Sheets, L.P. (2003) *Βιομηχανικά ηλεκτρονικά ισχύος* (4η έκδ.). (επιμ. Α.Σ. Πακτίτης, μτφρ. Β. Αγγελόπουλος). Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.
- [9] Mandourarakis, I. (2015) *Design optimization of an electric energy production system for power-supplying the nodes of wireless sensor networks (Master thesis)*. Ανακτήθηκε από το Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης: <http://dias.library.tuc.gr/view/24442>.
- [10] Yi-Hwa, L., Shyh-Ching, H., Jia-Wei, H., & Wen-Cheng, L. (2012, December) A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(4), 1027-1035. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6317161>.