



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη συστήματος MPPT για
φωτοβολταϊκούς μετατροπείς DC/DC
ανύψωσης τάσης**

Γεωργιάδης Βασίλειος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)
Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος
Καθηγητής Δόλλας Απόστολος

Χανιά, Αύγουστος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας από μία φωτοβολταϊκή διάταξη. Το σύστημα αποτελείται από έναν μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης, έναν μικροελεγκτή και τους απαραίτητους αισθητήρες. Σκοπός του συστήματος αυτού είναι μέσω κατάλληλου ελέγχου του μετατροπέα το σύστημα να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) αλλά και να μετατρέπει την ισχύ στην είσοδό του με βέλτιστο τρόπο ώστε να παράγεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Επιπλέον, το σύστημα που υλοποιήθηκε αντιμετωπίζει το πρόβλημα της μερικής σκίασης και μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά τόσο σε ομοιόμορφη όσο και σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στην φωτοβολταϊκή συστοιχία. Για τον κατάλληλο έλεγχο του μετατροπέα DC/DC υλοποιήθηκαν έξι διαφορετικοί αλγόριθμοι. Οι αλγόριθμοι αυτοί ελέγχουν τη λειτουργία του μετατροπέα DC/DC και έχουν ως στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Οι τέσσερις από τους έξι αλγόριθμους λειτουργούν αυτόνομα και οι άλλοι δύο λειτουργούν σε συνδυασμό με κάθε έναν από τους τέσσερις. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα της εργασίας αυτής βελτιώνει σημαντικά την ισχύ που μεταφέρεται από τη φωτοβολταϊκή διάταξη στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC σε σχέση άλλα συστήματα που δεν λειτουργούν βέλτιστα.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	8
2.1 Δομικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.....	8
2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	10
2.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	12
2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	13
2.5 Αλγόριθμοι MPPT (Maximum Power Point Tracking.....	19
3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC/DC.....	25
3.1 Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC και η χρησιμότητά τους.....	25
3.2 Μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter).....	26
3.3 Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter).....	29
3.4 Έλεγχος και αποδοτικότητα των διακοπτικών μετατροπέων DC/DC.....	31
4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	34
4.1 Επιμέρους στοιχεία του συστήματος.....	34
4.2 Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που υλοποιήθηκαν.....	41
4.2.1 Grey Wolf Optimizer.....	41
4.2.2 Flower Pollination Algorithm.....	45
4.2.3 Jaya Algorithm.....	49
4.2.4 Differential Evolution Algorithm.....	52
4.3 Ο αλγόριθμος Maximum Power Point Tracking.....	55
4.4 Ο αλγόριθμος Maximum Efficiency Point Tracking.....	57
4.5 Σειρά εκτέλεσης αλγορίθμων.....	58
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	62
5.1 Πειραματικά αποτελέσματα Grey Wolf Optimizer, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	62
5.2 Πειραματικά αποτελέσματα Flower Pollination, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	71
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα Jaya Algorithm, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	80
5.4 Πειραματικά αποτελέσματα Differential Evolution Algorithm, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	88

5.5 Πειραματικά αποτελέσματα Grey Wolf Optimizer, MPPT και MEPT σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	96
5.6 Πειραματικά αποτελέσματα Flower Pollination Algorithm, MPPT και MEPT σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	106
5.7 Πειραματικά αποτελέσματα Jaya Algorithm, MPPT και MEPT σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	116
5.8 Πειραματικά αποτελέσματα Differential Evolution Algorithm, MPPT και MEPT σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	126
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	142

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανάγκες του σύγχρονου κόσμου σε ενέργεια αυξάνονται συνεχώς, κάνοντας την παραγωγή ενέργειας ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για όλους. Ταυτόχρονα, σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα οι ενεργειακοί πόροι εξαντλούνται και ακόμα προκαλούν μια μόλυνση του περιβάλλοντος, καθώς όλη η διαδικασία παραγωγής ενέργειας από ορυκτούς πόρους είναι πολύ ρυπογόνα. Συνεπώς, είναι αναγκαία η στροφή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οι οποίες είναι ανεξάντλητες αλλά και μη-επιβλαβείς για το περιβάλλον. Μια από τις βασικότερες τέτοιες πηγές είναι ο Ήλιος. Η ακτινοβολία του Ήλιου είναι ανεξάντλητη και συνεχής καθώς ο Ήλιος ακτινοβολεί ανεξάρτητα αν ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται με κάποιο τρόπο την ακτινοβολία αυτή ή όχι. Επίσης, η διαδικασία μετατροπής της ακτινοβολίας αυτής σε ηλεκτρική ενέργεια είναι φιλική προς το περιβάλλον αφού δεν αφήνει απόβλητα, είναι αθόρυβη και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά το οποίο η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων των φωτοβολταϊκών στοιχείων όταν αυτά εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί σε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και όσο περνάνε τα χρόνια γίνονται ακόμα σημαντικότερα κερδίζοντας ολοένα και περισσότερο χώρο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που διαθέτουν είναι το μεγάλο εύρος των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Από μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα που τροφοδοτούν το ηλεκτρικό δίκτυο, οικιακές εγκαταστάσεις που ανεξαρτητοποιούν τον καταναλωτή από το ηλεκτρικό δίκτυο της ΔΕΗ, μέχρι και ηλιακά “power banks” τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ο καθένας για τη φόρτιση του κινητού ή του tablet του.

Όλα τα παραπάνω οδήγησαν σε μια γρήγορη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία όμως δεν έχουν ακόμα τελειοποιηθεί δημιουργώντας έτσι το ενδιαφέρον για μεγαλύτερη έρευνα με στόχο την όσο το δυνατόν αποδοτικότερη εκμετάλλευσή τους. Η αποδοτικότητά τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος του φωτοβολταϊκού στοιχείου (μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, άμορφου πυριτίου, ο προσανατολισμός και η κλίση του, καθώς και οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η σκίαση. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο έχουν τα συστήματα που διαχειρίζονται την ενέργεια αυτή που θα παραχθεί από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, τα λεγόμενα συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Η αξία των συστημάτων αυτών είναι μεγάλη, καθώς εγγυώνται την αποθήκευση ή την μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας με τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και έτσι να επιτυγχάνεται η μέγιστη εκμετάλλευσή της.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα σύστημα Maximum Power Point Tracking (MPPT) για φωτοβολταϊκούς μετατροπείς DC/DC ανύψωσης τάσης που έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας στην έξοδο του μετατροπέα. Το σύστημα αποτελείται από τη φωτοβολταϊκή διάταξη, έναν μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης, μία συστοιχία συσσωρευτών, έναν μικροελεγκτή, καθώς επίσης και ορισμένα κυκλώματα και αισθητήρες που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Επιπροσθέτως, υλοποιήθηκαν 6 εναλλακτικοί αλγόριθμοι ελέγχου του μετατροπέα DC/DC εκ των οποίων οι τέσσερις εκτελούνται ξεχωριστά και οι άλλοι δύο συμπληρωματικά σε κάθε έναν από τους τέσσερις. Οι αλγόριθμοι αυτοί εκτελούνται στο μικροελεγκτή και συλλέγοντας πληροφορίες από τους αισθητήρες ελέγχουν τη λειτουργία του μετατροπέα DC/DC με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενέργειας τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του, μεγιστοποιώντας έτσι τελικά την παραγόμενη ενέργεια που θα φτάσει στη συστοιχία των μπαταριών.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής :

- Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες βασικές πληροφορίες για τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τη λειτουργία τους, καθώς και οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-τάσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών τόσο σε συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, όσο και σε συνθήκες μερικής σκίασης.

- Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετατροπείς ισχύος DC/DC, η αρχή λειτουργίας τους, το κυκλωματικό τους διάγραμμα καθώς και οι λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη η χρήση τους.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα που υλοποιήθηκε στην εργασία, τα κυκλώματα που δημιουργήθηκαν και η χρησιμότητα τους και τέλος αναλύονται οι αλγόριθμοι ελέγχου που αναπτύχθηκαν με τις εξισώσεις και τα διαγράμματα ροής τους.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Παραθέτονται διαγράμματα που δείχνουν τη λειτουργία του συστήματος για κάθε αλγόριθμο και κάθε περίπτωση αλλά και την τελική επιρροή του κάθε αλγορίθμου στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και της παραγωγής ενέργειας που είναι και το τελικό ζητούμενο.
- Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διπλωματική εργασία.

2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

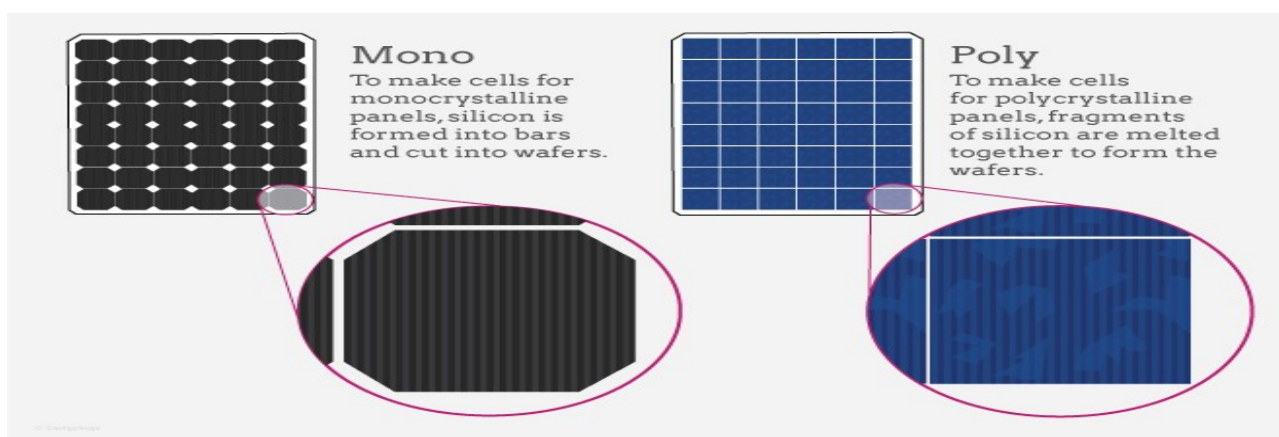
2.1 Δομικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια (modules), καθώς και τις απαραίτητες διατάξεις για την κατάλληλη μετατροπή και τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Δομικό συστατικό των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή “κυψέλες”, τα οποία είναι αυτά που μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά και παράλληλα και έτσι συνθέτουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Συνδέοντας στη συνέχεια φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά και παράλληλα, σχηματίζονται οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από πυρίτιο και διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία Κρυσταλλικού Πυριτίου
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία Λεπτών Μεμβρανών

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου χωρίζονται ακόμα σε δύο κατηγορίες. Ανάλογα με την επεξεργασία του πυριτίου, μπορούν να παραχθούν φωτοβολταϊκά στοιχεία είτε μονοκρυσταλλικού είτε πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η απόδοση των δύο αυτών υποκατηγοριών δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή καθώς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου εμφανίζουν βαθμό απόδοσης 14,5% έως 21%, ενώ τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν χαμηλότερη απόδοση της τάξης του 13% έως 14,5%. Η δεύτερη κατηγορία, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών μεμβρανών, είναι ακόμα λιγότερο αποδοτική αφού η μέγιστη

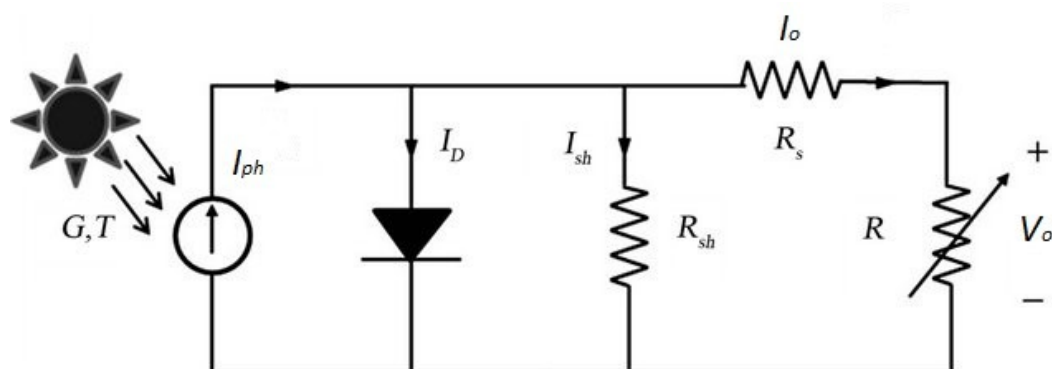
απόδοση της φτάνει το 14% και η ελάχιστη το 7%. Η τεχνολογία των λεπτών μεμβρανών αποτελεί σήμερα την πιο φθηνή επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων όμως είναι σε φάση ανάπτυξης αφού γίνεται προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσής τους και αύξηση της διείσδυσής τους στην αγορά. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία που σχεδιάστηκαν τον 19^ο αιώνα είχαν απόδοση 1-2%, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση της απόδοσης δεν είναι εύκολη υπόθεση και παρά τη μεγάλη βελτίωση που έχει υπάρξει μέχρι σήμερα ο βαθμός απόδοσης παραμένει μικρός σε σχέση με άλλα συστήματα (πχ. τα αιολικά). Είναι προφανές λοιπόν η αναγκαιότητα ύπαρξης συστημάτων όπως αυτό που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή αφού είναι κρίσιμο οι μετατροπείς ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος να έχουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση ώστε να μην προκύπτουν επιπλέον απώλειες από τη μετατροπή ισχύος.



Σχήμα 2-1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου [1].

2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως έχει αναφερθεί, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν τη δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ενέργειας. Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτορεύμα I_{ph} το οποίο είναι ανάλογο ως προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο, δηλαδή ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι λοιπόν χρήσιμο να γίνει εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και γι' αυτό θεωρούμε ότι αποτελείται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα συνδεδεμένη με μία δίοδο. Στο Σχήμα 2-2 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 2-2. Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2 το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος και την παράλληλη δίοδο. Όταν τα άκρα της κυψέλης είναι βραχυκυκλωμένα, τότε η τάση στα άκρα της αντίστασης R είναι μηδενική ενώ το ρεύμα που τη διαρρέει είναι περίπου ίσο με το μέγιστο δυνατό ρεύμα I_{ph} . Αντίθετα, όταν οι ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ανοιχτοκυκλωμένοι το ρεύμα που φτάνει στην αντίσταση R είναι μηδενικό ενώ η τάση στα άκρα

της είναι η μέγιστη δυνατή, η οποία είναι ίση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης, $V_o = V_{oc}$. Όταν το φορτίο R συνδεθεί στα άκρα του φωτοβολταϊκού κυττάρου, το φωτορεύμα I_{ph} κατανέμεται μεταξύ της διόδου D , της αντίστασης R_{sh} και του φορτίου R . Η εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα εξόδου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_o = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{V_D}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

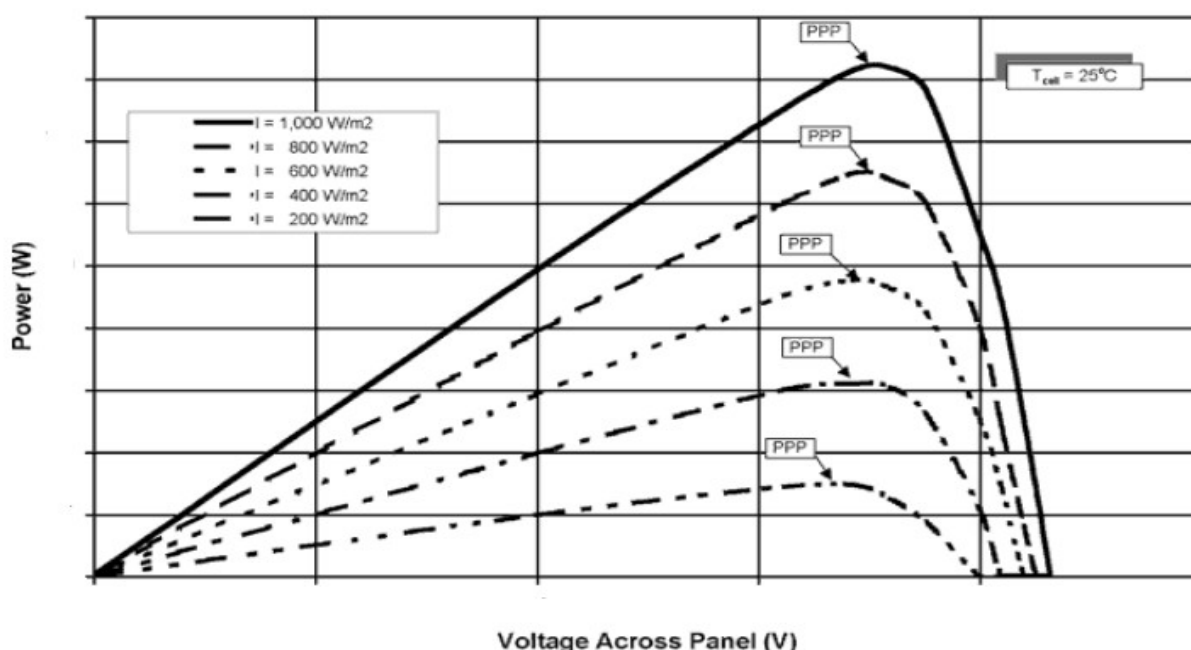
όπου I_{ph} είναι το φωτορεύμα, I_d είναι το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο D , I_{sh} το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} και I_s είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου D το οποίο τυπικά λαμβάνει πολύ μικρές τιμές (μερικά μA). Επίσης, V_D είναι η πτώση τάση στα άκρα της διόδου D και V_t είναι η θερμική τάση με τιμή 25.7 mV σε θερμοκρασία $25^\circ C$ (περίπου $300^\circ K$) η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$V_t = \frac{k * T}{q} \quad (2.2)$$

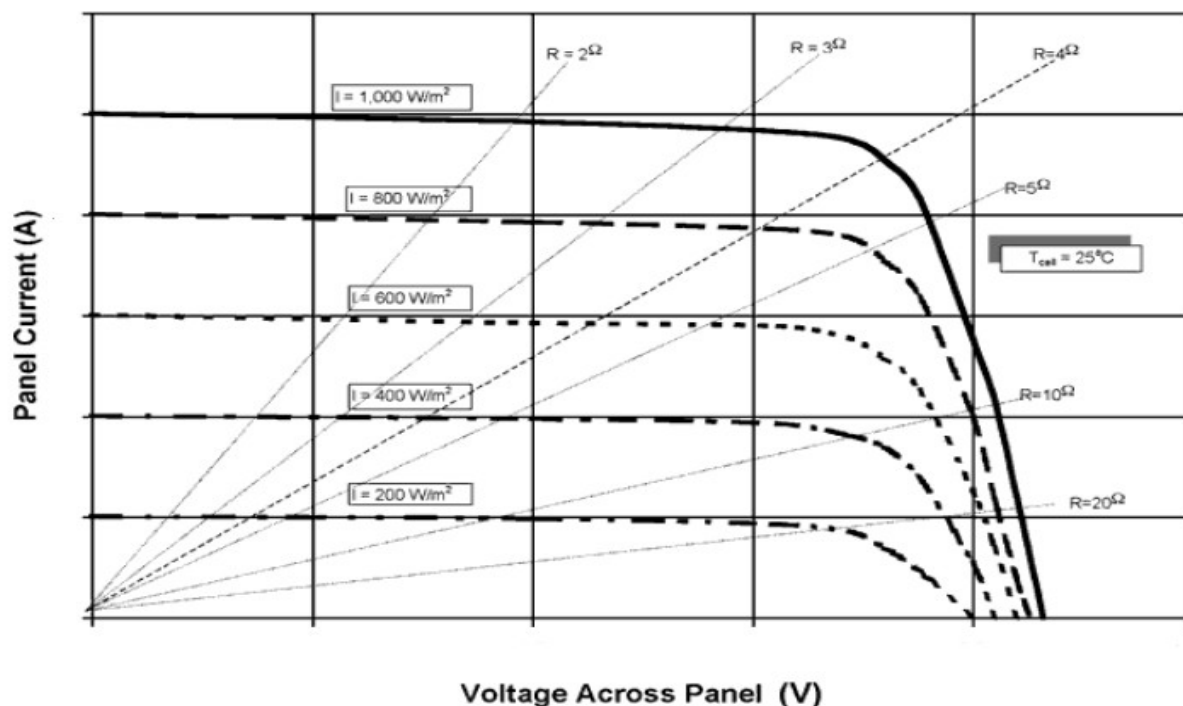
όπου k είναι η σταθερά Boltzmann ($1.38 * 10^{-23} \text{ Joule/Kelvin}$), T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1.6022 * 10^{-19} \text{ Coulomb}$).

2.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ενέργεια που παράγεται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι ανάλογη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτή. Αν η ακτινοβολία αυτή είναι ομοιόμορφη (δηλαδή ίσης έντασης σε όλα τα στοιχεία/πλαίσια της συστοιχίας), η φωτοβολταϊκή συστοιχία θα παράξει μια επίσης ομοιόμορφη καμπύλη ισχύος-τάσης αλλά και ρεύματος-τάσης. Η καμπύλη ισχύος-τάσης θα έχει ένα ολικό μέγιστο, το οποίο θα είναι και το βέλτιστο σημείο λειτουργίας, το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point). Η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετριέται σε W/m^2 και όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2-3 και 2-4 όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη είναι και η ισχύς που παράγεται. Στο Σχήμα 2-3 φαίνεται η καμπύλη ισχύος-τάσης για διάφορες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και στο σχήμα 2-4 φαίνεται η καμπύλη ρεύματος-τάσης επίσης για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2-3. Διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 200W/m^2 , 400W/m^2 , 600W/m^2 , 800W/m^2 και 1000W/m^2 [2].



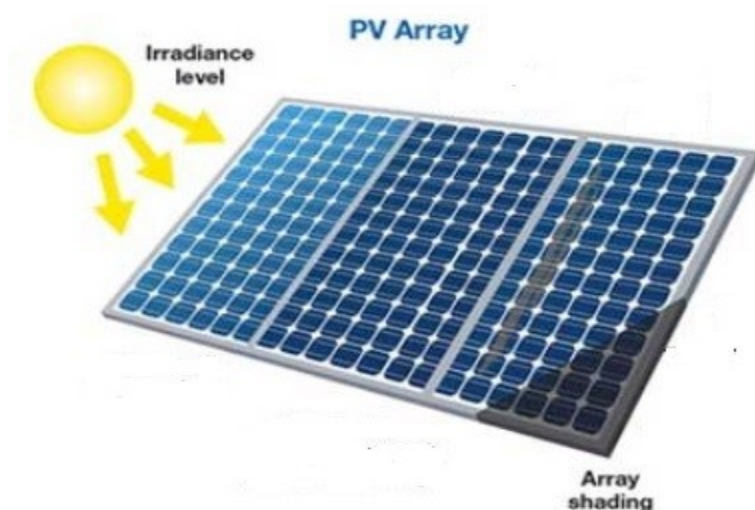
Σχήμα 2-4. Διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 200 W/m^2 , 400 W/m^2 , 600 W/m^2 , 800 W/m^2 και 1000 W/m^2 [2].

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα η ομοιόμορφη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας δίνει καμπύλες ισχύος-τάσης με ένα σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος κάτι το οποίο όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια απλοποιεί τον έλεγχο του συστήματος και την προσπάθεια μεγιστοποίησης της παραγωγής ενέργειας.

2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής διάταξης σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

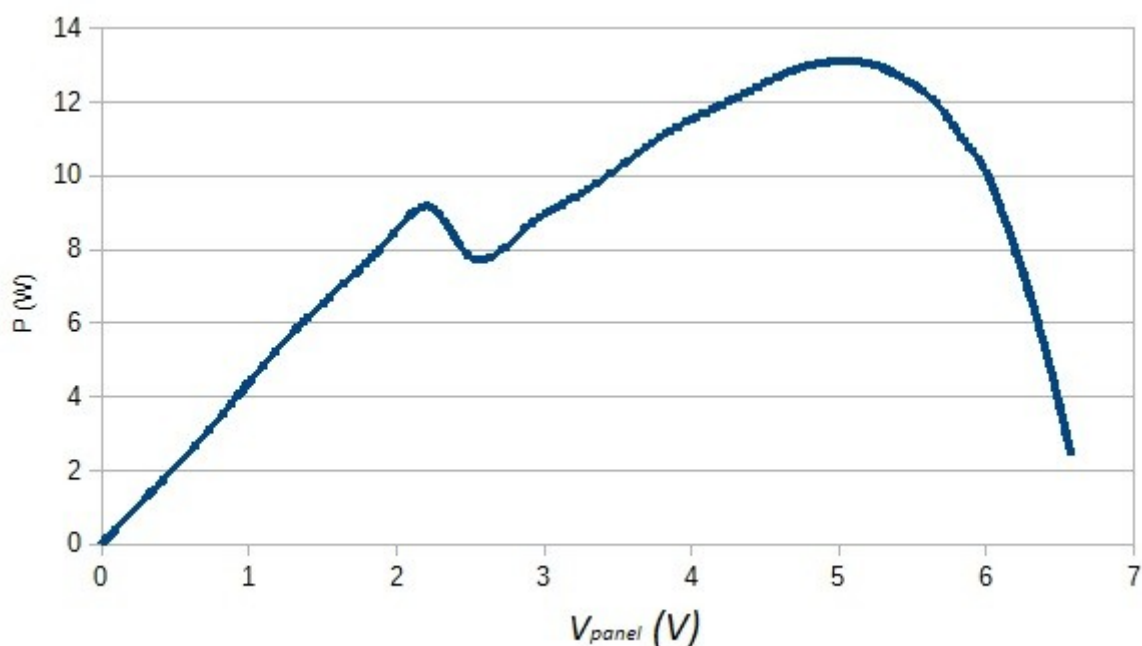
Στην περίπτωση που η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι ανομοιόμορφη (δηλαδή προσπίπτει διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία στα επιμέρους φωτοβολταϊκά πλαίσια/στοιχεία της

συστοιχίας) τα πράγματα γίνονται πιο πολύπλοκα. Η ανομοιομορφή αυτή ακτινοβολία οφείλεται σε φαινόμενα μερικής σκίασης της φωτοβολταϊκής διάταξης. Η μερική σκίαση, είναι ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η σκίαση μπορεί να προέρχεται είτε από ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως η νέφωση είτε από άλλα εμπόδια όπως κτήρια, δέντρα κτλ. Σε κανονικές συνθήκες μη-σκίασης κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο/στοιχείο έχει ένα δικό του μοναδικό σημείο λειτουργίας στο οποίο μπορεί να παράγει τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ. Το σημείο αυτό είναι το ολικό μέγιστο της καμπύλης ισχύος-τάσης και ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point – MPP) και κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Σε συνθήκες μερικής σκίασης ορισμένα πλαίσια/στοιχεία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας δέχονται διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής παραγωγής ισχύος της συστοιχίας και την ύπαρξη περισσότερων του ενός τοπικών μεγίστων στη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης. Από τα τοπικά μέγιστα που παρουσιάζονται, ένα είναι το ολικό μέγιστο και αυτό είναι το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP).



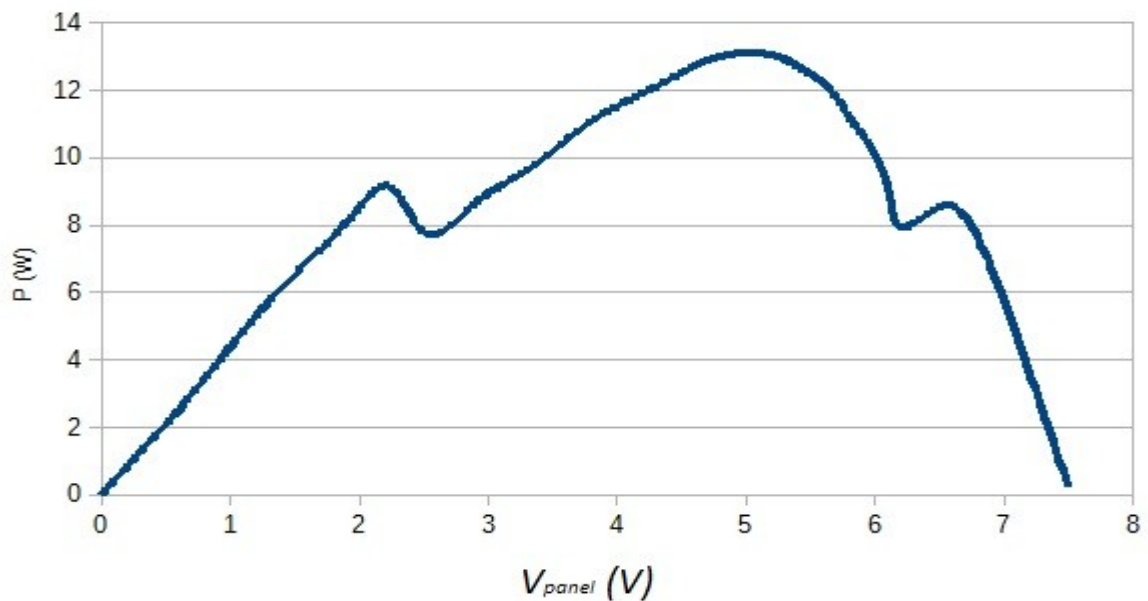
Σχήμα 2-5. Παράδειγμα φωτοβολταϊκής συστοιχίας που δέχεται ανομοιομορφή ηλιακή ακτινοβολία λόγω μερικής σκίασης.

Η μείωση της παραγόμενης ενέργειας όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία σκιάζεται μερικώς μπορεί να είναι πολύ μεγάλη ακόμα και αν η επιφάνεια που σκιάζεται είναι οπτικά μικρή. Το φαινόμενο αυτό είναι αδύνατο να το αποφύγουμε εγγυημένα καθώς επηρεάζεται από παράγοντες που δεν μπορούμε πάντα να αποφύγουμε (π.χ. συννεφιά). Συνεπώς, πρέπει να μελετηθεί και να βρεθούν τρόποι μείωσης της επίδρασης του στην παραγωγή ενέργειας.

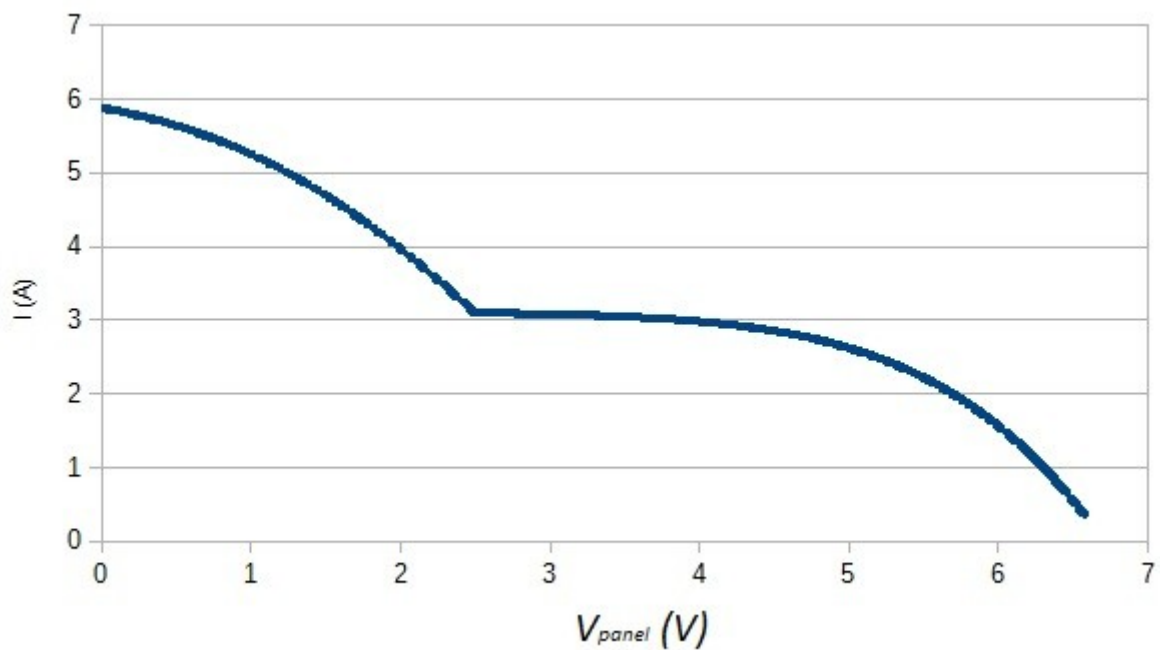


Σχήμα 2-6. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης (P - V) για ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με δύο τοπικά μέγιστα.

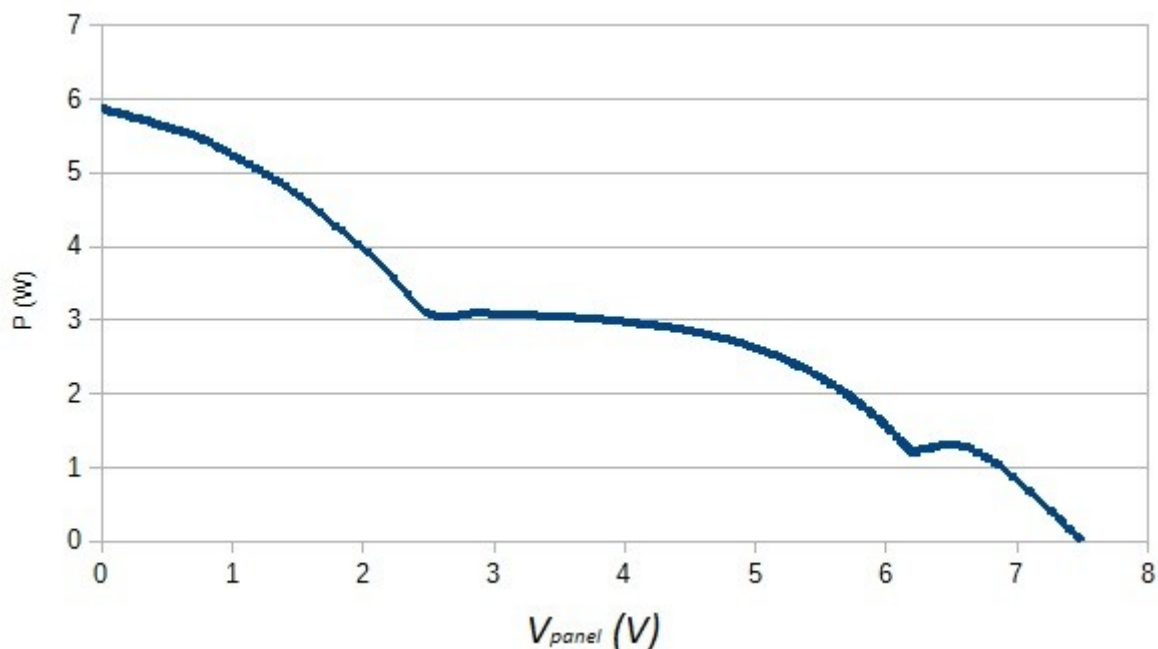
Πρώτο βήμα για τη μελέτη του είναι η καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας όταν αυτή σκιάζεται μερικώς. Στα σχήματα 2-6, 2-7, 2-8 και 2-9 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-τάσης και ρεύματος τάσης στην περίπτωση που έχουμε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε μία φωτοβολταϊκή συστοιχία.



Σχήμα 2-7. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης ($P-V$) για ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με τρία τοπικά μέγιστα.



Σχήμα 2-8. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος ($I-V$) για ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με δύο τοπικά μέγιστα.



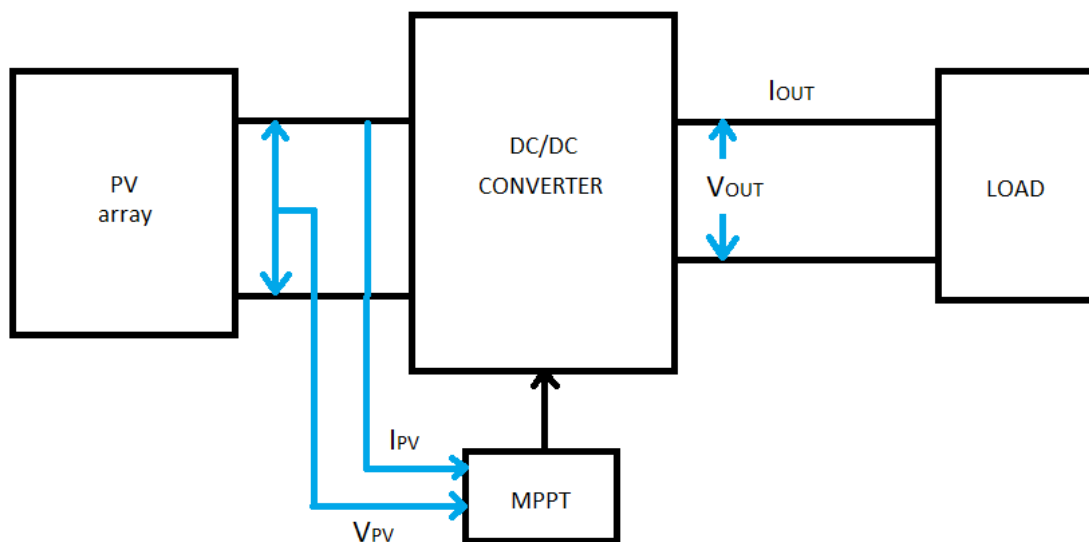
Σχήμα 2-9. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος (I - V) για ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με τρία τοπικά μέγιστα.

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τις χαρακτηριστικές καμπύλες, η ύπαρξη περισσότερων από ένα τοπικών μεγίστων κάνει τη διαδικασία εύρεσης του ολικού μεγίστου δυσκολότερη, αφού σκοπός είναι το σύστημα να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) το οποίο είναι το ολικό μέγιστο της χαρακτηριστικής P - V και όχι σε κάποιο από τα τοπικά μέγιστα. Ακόμα, παρατηρούμε ότι ο αριθμός των τοπικών μεγίστων δεν είναι απαραίτητα δύο αλλά μπορεί να είναι και τρία και τέσσερα και ούτω καθεξής, ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων/στοιχείων που χρησιμοποιούνται και τις διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται. Επίσης, δεν γνωρίζουμε εξ αρχής σε ποιο σημείο θα βρίσκεται το ολικό μέγιστο σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα, καθώς μπορεί να βρίσκεται είτε δεξιά του, είτε αριστερά ανάλογα με τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων/στοιχείων και με την ακτινοβολία που δέχεται το καθένα. Η εμφάνιση περισσότερων του ενός τοπικών μεγίστων στην περίπτωση της μερικής σκίασης οφείλεται στις διόδους παράκαμψης που συνδέονται παράλληλα με κάθε πλαίσιο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Οι διόδους παράκαμψης χρησιμοποιούνται για την προστασία των πλαισίων από καταστροφή λόγω υπερθέρμανσης σε περιπτώσεις ανάστροφης πόλωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων που οφείλεται σε μερική σκίαση της συστοιχίας.

Για να έχει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα τη μέγιστη απόδοση πρέπει να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία εξαρτάται τόσο από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας όσο και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φορτίου. Καθώς η ποσότητα της ακτινοβολίας αλλάζει, τα χαρακτηριστικά του φορτίου για τα οποία επιτυγχάνεται η βέλτιστη παραγωγή ενέργειας αλλάζουν επίσης. Επομένως, το σύστημα είναι βέλτιστο όταν τα χαρακτηριστικά του φορτίου αλλάζουν με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγεται πάντα η μέγιστη δυνατή ισχύς, όταν δηλαδή το σύστημα λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνικής ελέγχου Maximum Power Point Tracking, ενός αλγορίθμου δηλαδή που κάθε στιγμή λαμβάνει υπόψη ορισμένες πληροφορίες και είναι υπεύθυνος ώστε το σύστημα να λειτουργεί συνεχώς στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος. Οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία αντιμετωπίζουν το πρόβλημα αυτό ανεξάρτητα από τον αν έχουμε ή δεν έχουμε μερική σκίαση και ανεξάρτητα από τον αριθμό των τοπικών μεγίστων. Οι αλγόριθμοι αυτοί θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.5 Αλγόριθμοι MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Maximum Power Point Tracking είναι η τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά συστήματα με σκοπό να μεγιστοποιήσει την παραγωγή ενέργειας ανεξάρτητα από τις μετεωρολογικές συνθήκες και τη μεταβολή τους. Για να το πετύχει αυτό, χρησιμοποιεί κατάλληλους αλγορίθμους και μεθόδους ελέγχου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιεί μια μονάδα ελέγχου μέσω της οποίας ελέγχει έναν μετατροπέα τάσης DC/DC με τη χρήση ενός PWM (Pulse-Width Modulation) σήματος. Χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αισθητήρες ρεύματος και τάσης οι οποίοι δίνουν την πληροφορία τους σε έναν μικροελεγκτή και αυτός με τη σειρά του τους χρησιμοποιεί στους αλγορίθμους που εκτελεί και έχουν ως στόχο την εύρεση του βέλτιστου duty cycle, εκείνου δηλαδή που φέρνει το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας όσο το δυνατόν πιο κοντά στο Maximum Power Point. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2-10.



Σχήμα 2-10. Βασικό διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο του μετατροπέα DC/DC έτσι ώστε η φωτοβολταϊκή συστοιχία να λειτουργεί στο Maximum Power Point.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP). Οι τεχνικές αυτές διαφέρουν μεταξύ τους σε διάφορα ζητήματα όπως οι αισθητήρες που

χρειάζονται, η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων τους, η αποτελεσματικότητά τους, η ταχύτητα σύγκλισής τους, η ευαισθησία τους στις αλλαγές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρειάζονται για να υλοποιηθούν. Οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι οι Perturb&Observe και Incremental Conductance, οι οποίες και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Perturb & Observe (Διαταραχή & Παρατήρηση)

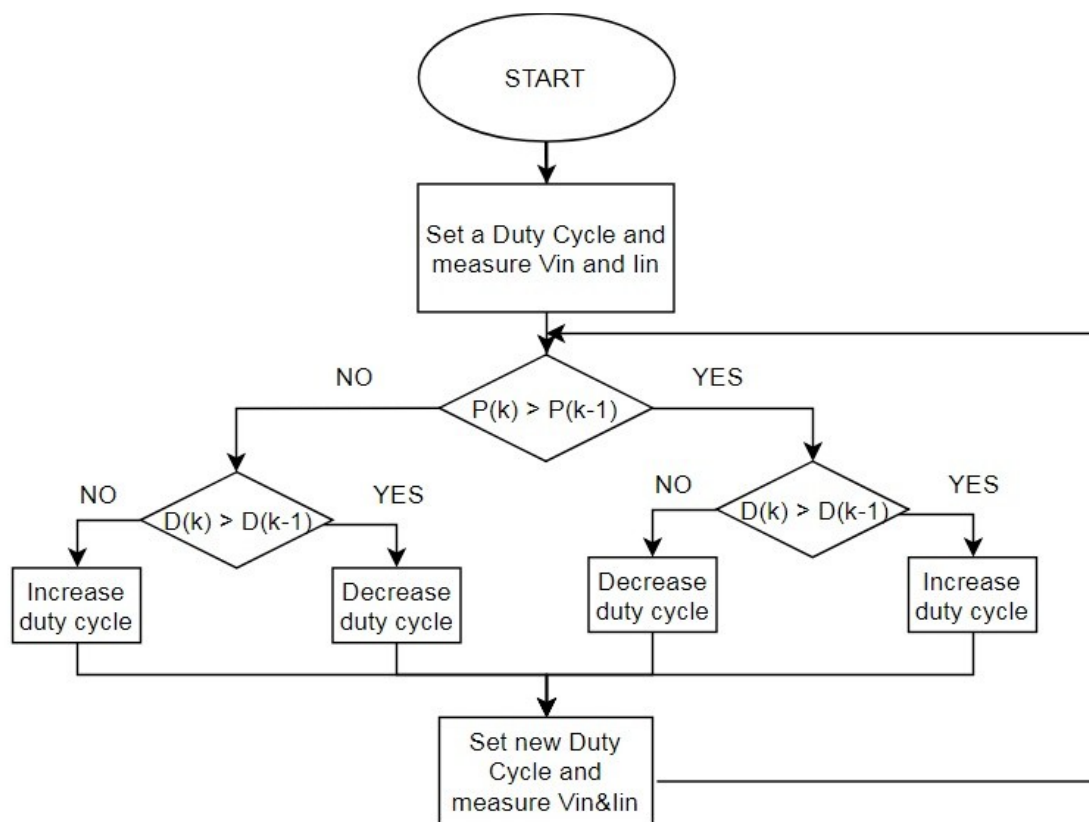
Η μέθοδος “Perturb & Observe” ή πιο απλά P&O, περιλαμβάνει μία διαταραχή στη σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) του PWM σήματος το οποίο οδηγεί το διακόπτη του μετατροπέα DC/DC ο οποίος είναι συνδεδεμένος στη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η αλλαγή αυτή της σχετικής διάρκειας αγωγής επιφέρει μια αλλαγή στο ρεύμα και την τάση εισόδου και κατ’ επέκταση και στην ισχύ εισόδου του μετατροπέα. Την αλλαγή αυτή στο ρεύμα και την τάση μετράνε κατάλληλοι αισθητήρες και προχωράνε ανάλογα την εκτέλεση του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, αν η ισχύς εισόδου (ρεύμα εισόδου επί την τάση εισόδου) είναι μεγαλύτερη από αυτήν που είχε μετρηθεί στον προηγούμενο κύκλο λειτουργίας η διαταραχή διατηρείται προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή στον επόμενο κύκλο λειτουργίας θα αυξήσουμε και πάλι ή θα μειώσουμε και πάλι το duty cycle αντίστοιχα. Αν η ισχύς εισόδου είναι μικρότερη από αυτήν που είχε μετρηθεί στον προηγούμενο κύκλο λειτουργίας η διαταραχή πρέπει να οδηγηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή στον επόμενο κύκλο λειτουργίας σε αντίθεση με τον προηγούμενο θα αυξήσουμε ή θα μειώσουμε το duty cycle, αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται ότι συνέκλινε όταν αρχίσει να ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συγκεντρωτικά η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικός πίνακας που παρουσιάζει τη φορά της επόμενης διαταραχής του αλγορίθμου P&O ανάλογα με την προηγούμενη διαταραχή και τη μεταβολή της ισχύος για κάθε πιθανή περίπτωση.

Διαταραχή	Μεταβολή Ισχύος	Επόμενη Διαταραχή
Θετική	Θετική	Θετική
Θετική	Αρνητική	Αρνητική
Αρνητική	Θετική	Αρνητική
Αρνητική	Αρνητική	Θετική

Μόλις γίνει αυτό, το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Η ταλάντωση αυτή αλλά και η ακρίβεια με την οποία θα εντοπιστεί το MPP μπορεί να βελτιωθούν μειώνοντας το βήμα με το οποίο αλλάζει κάθε φορά το duty cycle. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικότητας του Maximum Power Point Tracking και την ελαχιστοποίηση της ταλάντωσης γύρω από το MPP. Από την άλλη πλευρά όμως, το μικρότερο βήμα αλλαγής της σχετικής διάρκειας αγωγής συνεπάγεται και μια χρονική καθυστέρηση μέχρι ο αλγόριθμος να βρει το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος και να συγκλίνει σε αυτό. Συνεπώς, εδώ υπάρχει ένα trade-off ανάμεσα στην ταχύτητα σύγκλισης και την ακρίβεια της μεθόδου τα οποία πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 2-11 φαίνεται το flowchart του αλγορίθμου Perturb&Observe.



Σχήμα 2-11. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Perturb&Observe (Διαταραχής & Παρατήρηση).

Incremental Conductance

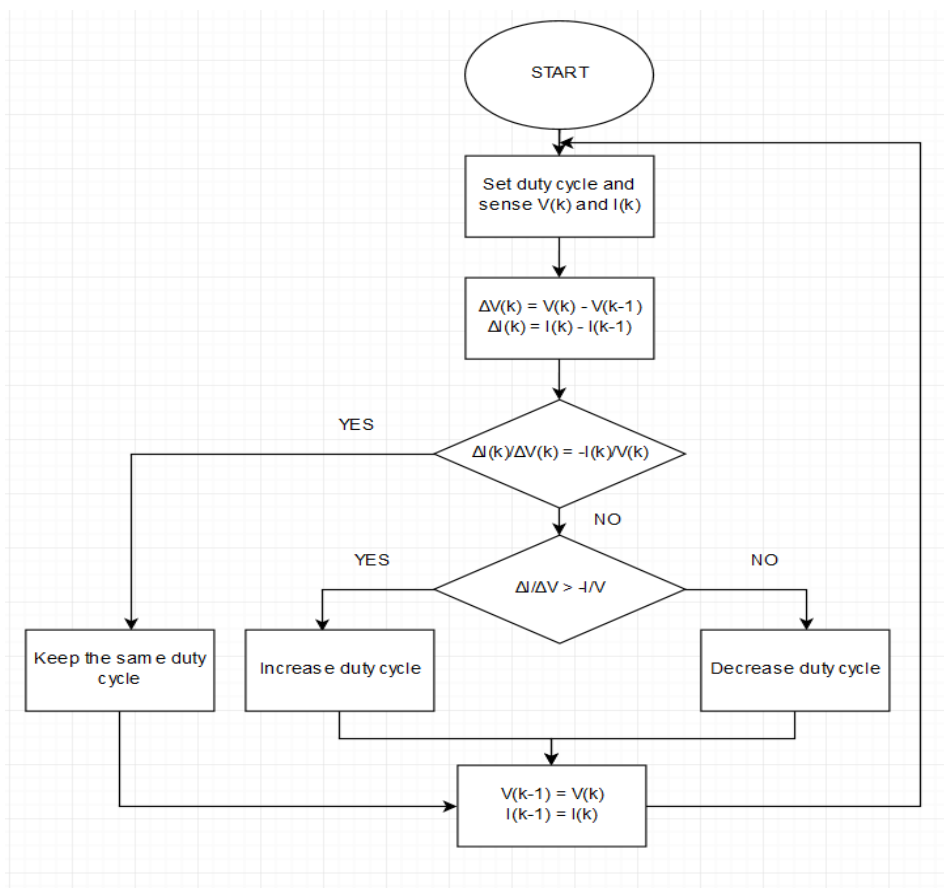
Η μέθοδος Επαυξημένης Αγωγιμότητας βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) είναι μηδενική, ενώ αντίθετα είναι θετική στα αριστερά του MPP και αρνητική στα δεξιά του MPP. Αυτό μαθηματικά μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(I * V)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} * V = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.3)$$

Δηλαδή :

- $dI/dV = -I/V$ στο MPP
- $dI/dV > -I/V$ στα αριστερά του MPP
- $dI/dV < -I/V$ στα δεξιά του MPP

Κάνοντας χρήση των παραπάνω εξισώσεων όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που φαίνεται στο Σχήμα 2-12, μπορεί να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP). Η V_{ref} είναι η τάσης αναφοράς στην οποία πρέπει κάθε φορά να λειτουργήσει η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος η V_{ref} θα ισούται με τη V_{MPP} .



Σχήμα 2-12. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου *Incremental Conductance* (Επανζημένης Αγωγιμότητας).

Όπως και για τον αλγόριθμο P&O υπάρχει και εδώ ένα trade-off ανάμεσα στην ακρίβεια και το χρόνο σύγκλισης του αλγορίθμου. Είναι προφανές πως θέλουμε η ακρίβεια της σύγκλισης να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώστε να έχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος, αλλά επίσης και ο χρόνος σύγκλισης είναι ένας σημαντικός παράγοντας καθώς αν ο χρόνος σύγκλισης της μεθόδου είναι μεγάλος οι καιρικές συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν και έτσι η μέθοδος να μην συγκλίνει στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Αυτό είναι και ένα μειονέκτημα των αλγορίθμων αυτών καθώς είναι πολύ πιθανό σε απότομες αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας να μην συγκλίνουν στο MPP. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι δεν αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Αν η φωτοβολταϊκή συστοιχία σκιάζεται μερικά, τότε θα έχει περισσότερα από ένα μέγιστα και οι αλγόριθμοι αυτοί είναι πολύ πιθανό να εγκλωβιστούν σε ένα τοπικό μέγιστο νομίζοντας πως έχουν φτάσει στο ολικό. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι διαφορετικής φιλοσοφίας και αντιμετωπίζουν τα προβλήματα αυτά αποτελεσματικά.

3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC/DC

3.1 Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC και η χρησιμότητά τους

Οι διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές DC κινητήριων συστημάτων, σε σταθεροποιημένα DC τροφοδοτικά διακοπτικού τύπου αλλά και σε φωτοβολταϊκά συστήματα ή συστήματα ανεμογεννητριών. Βασική τους λειτουργία είναι η μετατροπή μιας DC τάσης η οποία εφαρμόζεται στην είσοδό τους σε μία άλλη DC τάση στην έξοδο. Η DC τάση στην έξοδο μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερου είτε μικρότερου πλάτους από την DC τάση στην είσοδο. Ονομάζονται διακοπτικοί μετατροπείς διότι η λειτουργία τους βασίζεται σε διακοπτικές τεχνικές. Μετατρέπουν μία DC τάση που δέχονται ως είσοδο σε μία DC τάση άλλου επιπέδου (μεγαλύτερου ή μικρότερου), αποθηκεύοντας προσωρινά την ενέργεια εισόδου και απελευθερώνοντας την μετά στην έξοδο σε ένα διαφορετικό επίπεδο τάσης. Η προσωρινή αποθήκευση γίνεται είτε σε στοιχεία αποθήκευσης μαγνητικού πεδίου όπως τα πηνία, είτε σε στοιχεία αποθήκευσης ηλεκτρικού πεδίου όπως οι πυκνωτές.

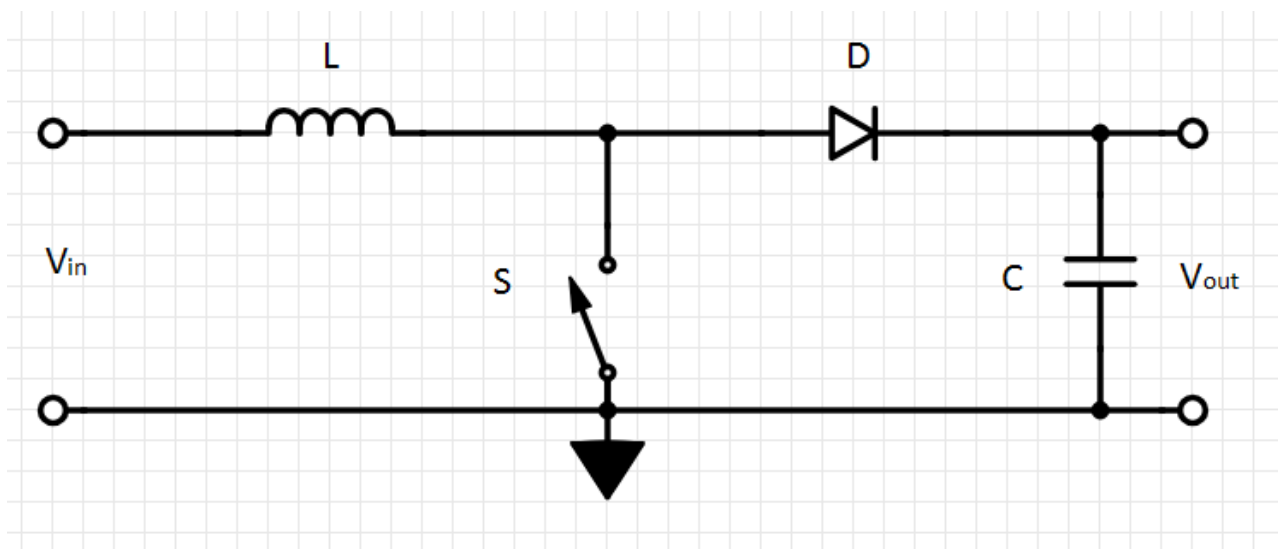
Η χρησιμότητα των διακοπτικών μετατροπέων DC/DC είναι πολύ μεγάλη. Αρχικά, εξασφαλίζουν μία σταθερή DC τάση στην έξοδο τους, η οποία είναι πολύ χρήσιμη τόσο για τη λειτουργία διαφόρων ηλεκτρονικών συσκευών (π.χ. τροφοδοτικά) αλλά και για εφαρμογές όπως αυτή της διπλωματικής αυτής εργασίας όπου η χρήση του μετατροπέα DC/DC μας δίνει τη δυνατότητα του ταιριάσματος μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας (φωτοβολταϊκή συστοιχία) και του φορτίου (π.χ. μπαταρία). Μας δίνει δηλαδή τη δυνατότητα με τον κατάλληλο έλεγχο να λειτουργεί το σύστημα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας, κάτι το οποίο δεν θα γινόταν αν δεν χρησιμοποιούνταν ο μετατροπέας DC/DC. Τέλος, η διακοπτική τεχνική για τη ρύθμιση της τάσης είναι πολύ πιο

αποτελεσματική ως προς τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα ισχύος (τυπικά από 75% μέχρι 98%) σε σύγκριση με τη γραμμική ρύθμιση της.

Οι βασικές τοπολογίες των μετατροπέων DC/DC είναι δύο: οι μετατροπείς ανύψωσης συνεχούς τάσης (Step up Converter ή Boost Converter) και οι μετατροπείς υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Step Down Converter ή Buck Converter). Η λειτουργία τους καθορίζεται από την τοπολογία των ηλεκτρονικών διακοπών που τους απαρτίζουν. Αναλυτικότερα θα παρουσιασθούν στη συνέχεια.

3.2 Μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter)

Ο μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter) μετασχηματίζει μία συνεχή τάση εισόδου σε μια άλλη τάση εξόδου που έχει μεγαλύτερο πλάτος. Στο Σχήμα 3-1 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης.



Σχήμα 3-1. Κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter).

Όπως προείπαμε, οι μετατροπείς DC/DC ανύψωσης τάσης χρησιμοποιούν διακοπτικές τεχνικές για τη ρύθμιση της τάσης. Ο διακόπτης του μετατροπέα ελέγχεται από ένα τετραγωνικό σήμα PWM του οποίου η σχετική διάρκεια αγωγής, D_c ισούται με :

$$D_c = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3.1)$$

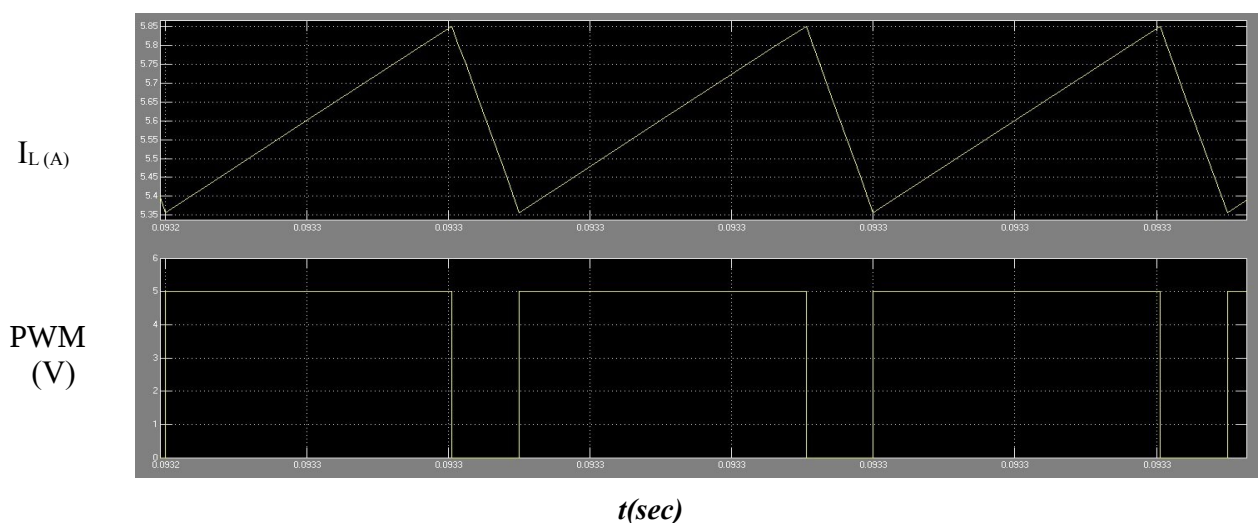
όπου t_{on} είναι ο χρόνος για τον οποίο το PWM σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη και συνεπώς ο διακόπτης του μετατροπέα άγει και T_s είναι η περίοδος του σήματος PWM. Η σχέση που συνδέει την είσοδο, την έξοδο και τη σχετική διάρκεια αγωγής του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης είναι η εξής :

$$V_{out} = \frac{V_{input}}{1 - D_c} \quad (3.2)$$

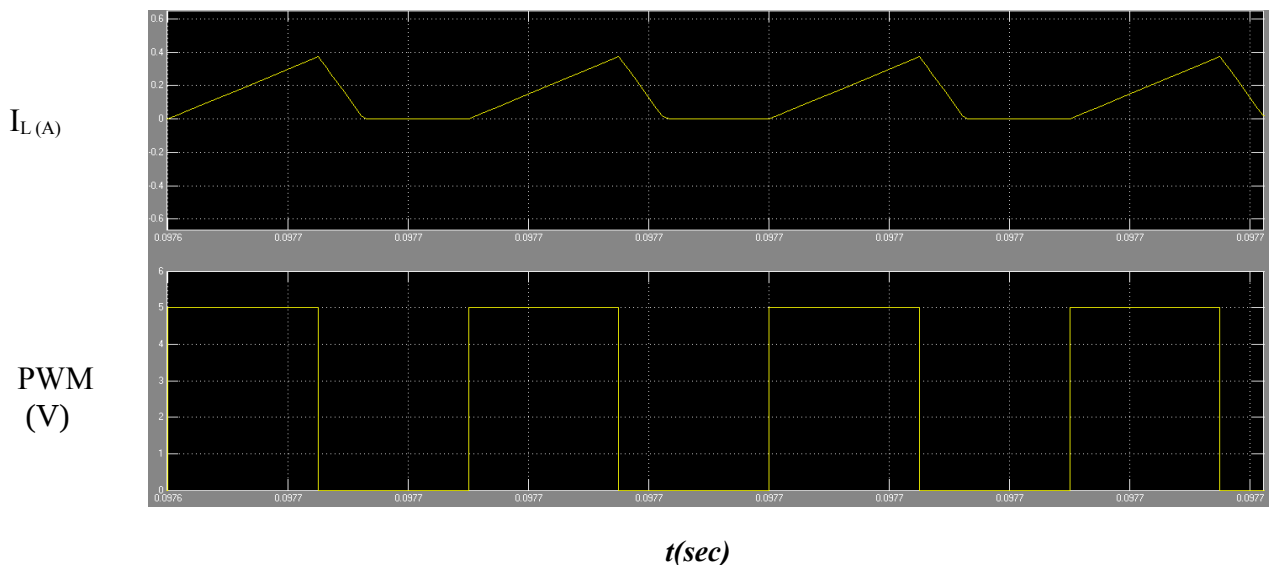
Η βασική αρχή λειτουργίας ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης προέρχεται από την ιδιότητα του πηνίου να αντιστέκεται στη μεταβολή του ρεύματος που το διαπερνά. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα και αποθηκεύει ενέργεια στο μαγνητικό του πεδίο. Η διόδος D είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν διαρρέεται από ρεύμα. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, η διόδος D πολώνεται ορθά και ο μόνος δρόμος για το ρεύμα είναι μέσω της διόδου D και του φορτίου. Έτσι η ενέργεια που είχε αποθηκευτεί προηγουμένως στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου καθώς και η ενέργεια της πηγής θα μεταφερθούν στο φορτίο. Εφόσον ο διακόπτης ανοιγοκλείνει γρήγορα το πηνίο δεν θα προλαβαίνει να εκφορτιστεί τελείως σε κάθε κύκλο λειτουργίας και έτσι στο φορτίο θα αναπτύσσεται πάντα μια τάση μεγαλύτερη της τάσης εισόδου του μετατροπέα DC/DC.

Ένας μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης μπορεί να λειτουργεί είτε με συνεχή αγωγή ρεύματος (continuous conduction mode), είτε με ασυνεχή αγωγή ρεύματος (discontinuous conduction mode). Όταν ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα I_L που διαρρέει το πηνίο δεν γίνεται ποτέ ίσο με το μηδέν κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή ισχύει και ο τύπος που αναφέρθηκε παραπάνω και συνδέει την

τάση εξόδου V_{out} , την τάση εισόδου V_{in} και τη σχετική διάρκεια αγωγής D_c . Αντίστοιχα, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή ρεύματος, τότε το πηνίο θα έχει εκφορτιστεί τελείως πριν από το τέλος ενός κύκλου λειτουργίας και συνεπώς το ρεύμα I_L θα είναι ίσο με μηδέν στο τέλος του κύκλου λειτουργίας. Στα σχήματα 3-2 και 3-3 φαίνονται οι κυματομορφές του ρεύματος του πηνίου και το PWM σήμα για ένα μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης που λειτουργεί με συνεχή και ασυνεχή, αντίστοιχα, αγωγή ρεύματος.



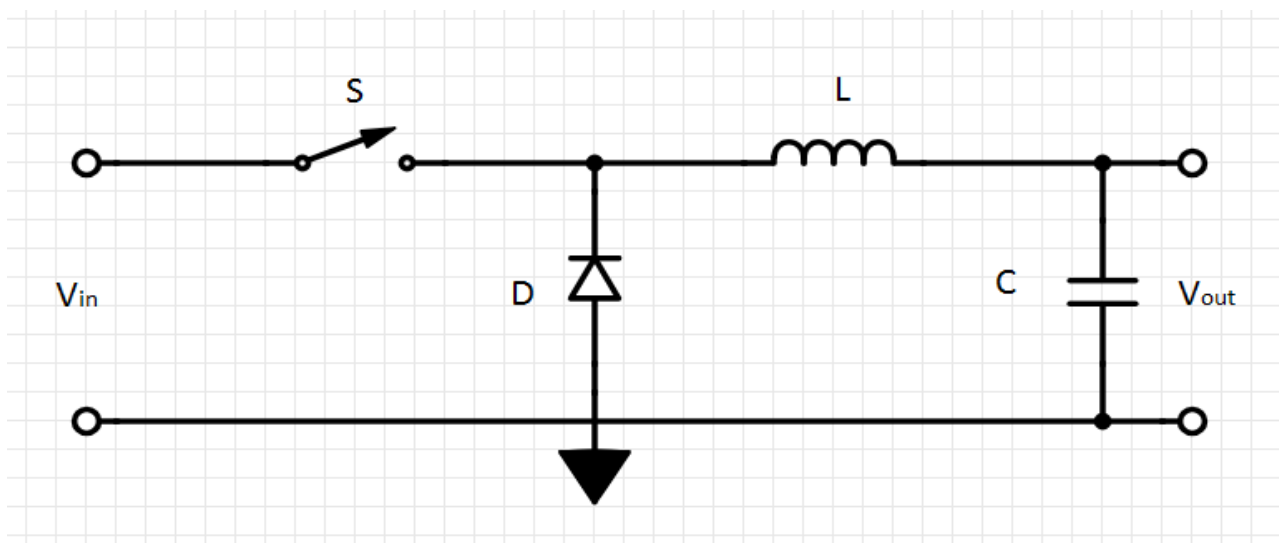
Σχήμα 3-2. Κυματομορφές PWM σήματος ελέγχου και ρεύματος πηνίου για έναν μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης που λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος.



Σχήμα 3-3. Κυματομορφές PWM σήματος ελέγχου και ρεύματος πηνίου για έναν μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης που λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή ρεύματος.

3.3 Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter)

Ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter) μετασχηματίζει μία συνεχή τάση εισόδου σε μια άλλη τάση εξόδου που έχει μικρότερο πλάτος. Στο Σχήμα 3-4 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα 3-4. Κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter).

Όπως και στην περίπτωση του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης, έτσι και στον μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης ο διακόπτης του μετατροπέα ελέγχεται από ένα σήμα PWM του οποίου η σχετική διάρκεια αγωγής D_c ισούται με :

$$D_c = \frac{t_{on}}{T_s}$$

Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης είναι παρόμοια με αυτή του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Όταν ο διακόπτης του μετατροπέα είναι κλειστός η

δίοδος D_c είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν διαρρέεται από ρεύμα και έτσι η ενέργεια που παρέχει η πηγή εισόδου πηγαίνει στο πηνίο L και στο φορτίο. Όταν το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται, τότε το πηνίο προσπαθώντας να αντισταθεί στη μεταβολή αυτή του ρεύματός του θα παραγάγει μια τάση αντίθετη στα άκρα του με αποτέλεσμα να μειώνεται η τάση του φορτίου. Έτσι η τάση του φορτίου θα είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η πηγή στην είσοδο αποκόπτεται από το κύκλωμα και έτσι το ρεύμα του πηνίου αρχίζει να μειώνεται. Το ρεύμα που μειώνεται δημιουργεί μία πτώση τάσης στα άκρα του πηνίου αντίθετη από την πτώση τάσης που είχαμε όταν ο διακόπτης ήταν κλειστός. Έτσι, το πηνίο λειτουργεί ως μια πηγή ρεύματος προς το φορτίο απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη του ενέργεια στο φορτίο.

Όπως και ο μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter) έτσι και ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter) μπορεί να λειτουργεί είτε σε continuous είτε σε discontinuous mode. Όταν ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα I_L που διαρρέει το πηνίο δεν γίνεται ποτέ ίσο με το μηδέν κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας. Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος ισχύει η παρακάτω σχέση που συνδέει την τάση εισόδου V_{in} , την τάση εξόδου V_{out} και τη σχετική διάρκεια αγωγής D_c :

$$V_{out} = D_c * V_{input} \quad (3.3)$$

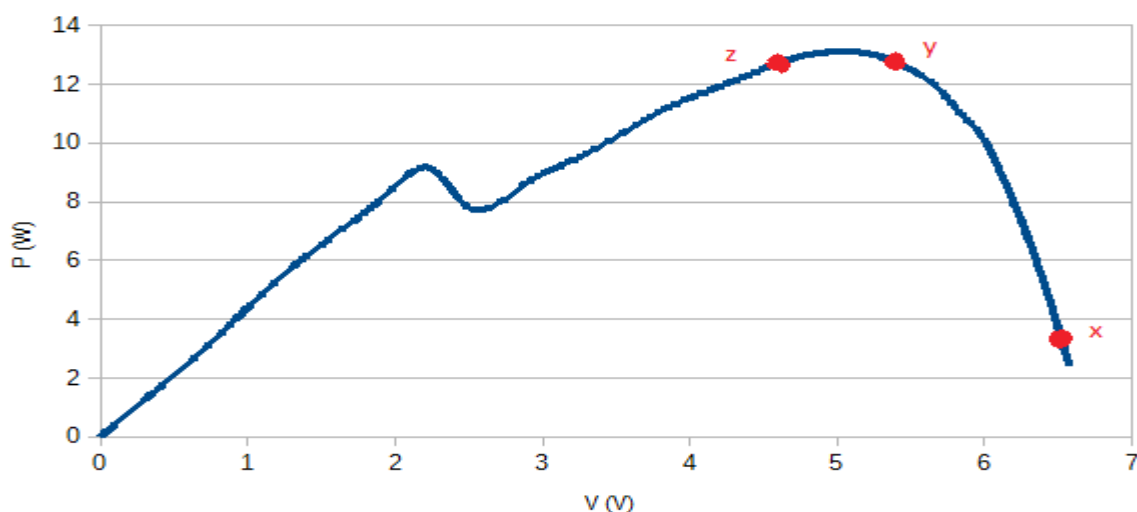
που σημαίνει πως η τάση εξόδου θα είναι πάντα μικρότερη ή ίση της τάσης εισόδου καθώς η σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) D_c παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή ρεύματος, τότε το πηνίο θα έχει εκφορτιστεί τελείως πριν από το τέλος ενός κύκλου λειτουργίας και συνεπώς το ρεύμα I_L θα είναι ίσο με μηδέν στο τέλος του κύκλου λειτουργίας.

3.4 Έλεγχος και αποδοτικότητα των διακοπτικών μετατροπέων DC/DC

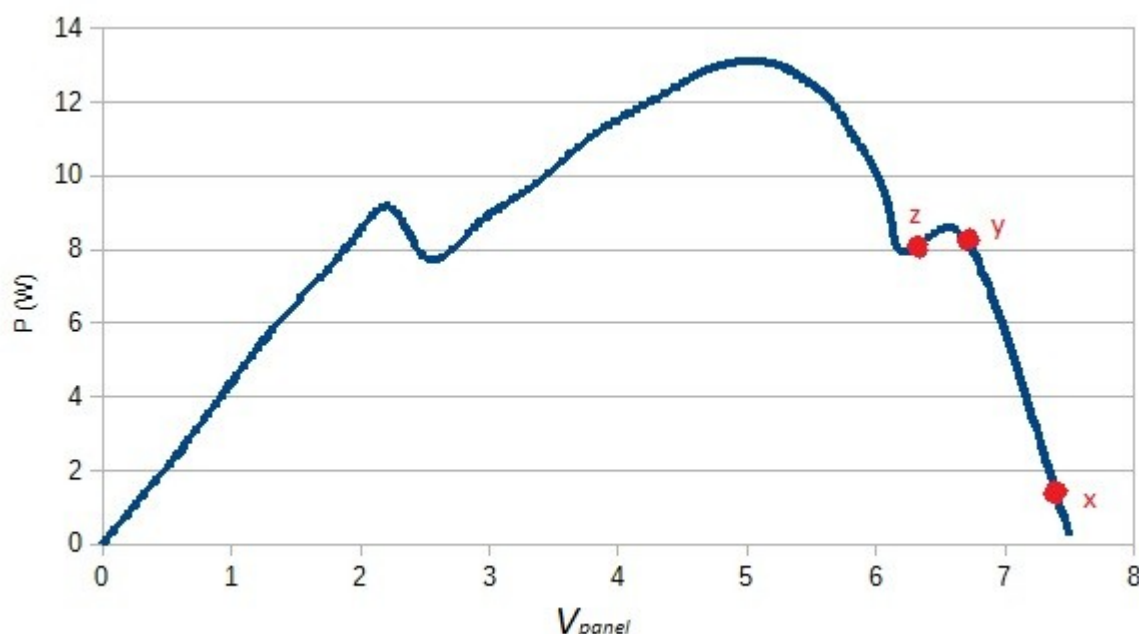
Ο έλεγχος ενός μετατροπέα DC/DC γίνεται με τη χρήση ενός σήματος PWM. Η τιμή του duty cycle του σήματος αυτού είναι ο κρίσιμος παράγοντας για την αποδοτική του λειτουργία. Διάφοροι αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί με στόχο την κατάλληλη επιλογή του duty cycle του σήματος ελέγχου ενός μετατροπέα DC/DC στα φωτοβολταϊκά συστήματα για την υλοποίηση της λειτουργίας MPPT. Οι βασικότεροι αυτών αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτοί οι αλγόριθμοι MPPT που περιγράψαμε σε συνθήκες ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε προκύπτει μια χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με ένα ολικό μέγιστο, θα λειτουργούσαν ιδανικά. Αν οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές και έχουμε μερική σκίαση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, τότε είναι πολύ πιθανό οι αλγόριθμοι αυτοί να αποτύχουν να συγκλίνουν στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP). Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση της μερικής σκίασης έχουμε περισσότερα από ένα τοπικά μέγιστα και οι αλγόριθμοι αυτοί όπως θα δούμε και στα παραδείγματα παρακάτω είναι πιθανόν να εγκλωβιστούν σε κάποιο τοπικό μέγιστο χάνοντας έτσι το MPP.

Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι έχουμε μερική σκίαση και η καμπύλη ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5. Καμπύλη ισχύος-τάσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε συνθήκες μερικής σκίασης με το ολικό μέγιστο (MPP) στα δεξιά της καμπύλης.

Η σχετική διάρκεια αγωγής στους αλγορίθμους αυτούς πάντα αρχικοποιείται σε μία τιμή από την οποία ξεκινά να αναζητά το MPP. Ας θεωρήσουμε ότι ξεκινά με μια μικρή τιμή duty cycle. Ο αλγόριθμος θα αρχίσει να εκτελείται από το σημείο x όπως φαίνεται και στο σχήμα και αυξάνοντας κάθε φορά το duty cycle θα βρίσκεται σε σημείο μεγαλύτερης ισχύος. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρις ότου φτάσει στο σημείο y. Όταν φτάσει στο σημείο y και αυξήσει το duty cycle η επόμενη θέση του θα είναι στο σημείο z όπου η ισχύς θα είναι μικρότερη από αυτήν που είχε στο σημείο y. Συνεπώς, στην επόμενη επανάληψη θα μειώσει το duty cycle για να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση και έτσι θα αρχίσει να ταλαντώνεται μεταξύ των σημείων z και y έχοντας εντοπίσει σωστά το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP). Η λειτουργία των βασικών αλγορίθμων MPPT στο σενάριο που περιγράφηκε θα ήταν αποτελεσματική. Αν όμως η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3-6 όπου το ολικό μέγιστο εμφανίζεται σε μικρότερη τάση από έστω και ένα τοπικό μέγιστο, τότε ο αλγόριθμος MPPT θα αποτύχει καθώς θα εγκλωβιστεί στο τοπικό μέγιστο θεωρώντας το λανθασμένα ως ολικό μέγιστο.



Σχήμα 3-6. Καμπύλη ισχύος-τάσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε συνθήκες μερικής σκίασης με το ολικό μέγιστο (MPP) να εμφανίζεται σε τάση μικρότερη από ότι ένα τοπικό μέγιστο.

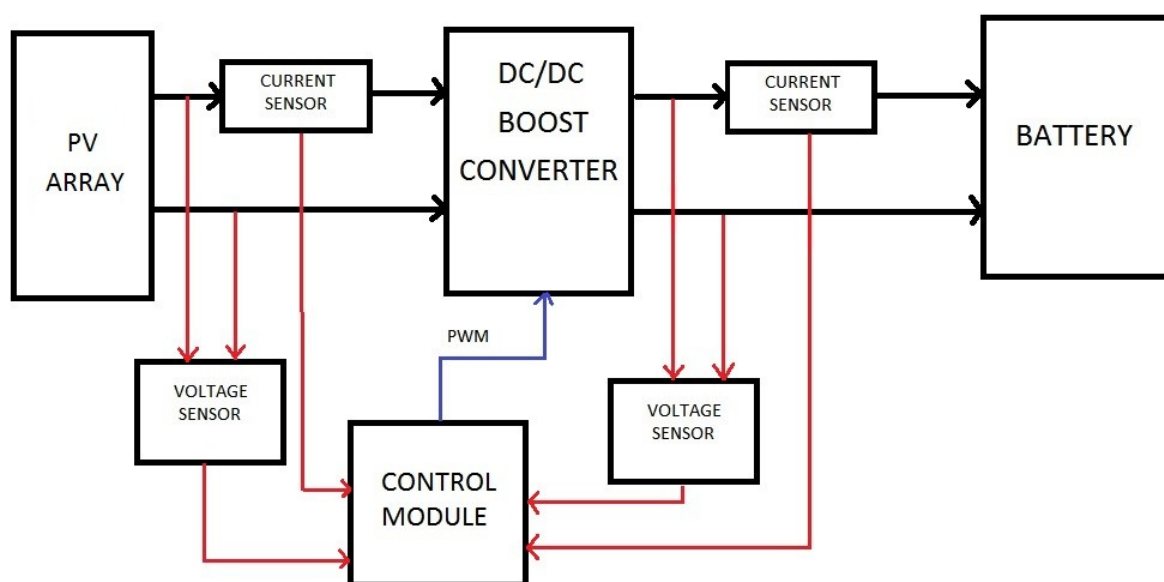
Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι οι κλασσικοί αλγόριθμοι MPPT δεν επαρκούν για να καλύψουν όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και να λειτουργούν αποτελεσματικά ανεξαρτήτως της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης. Για το λόγο αυτόν, σε αυτή τη διπλωματική εργασία υλοποιήθηκαν 4 διαφορετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι παίρνουν τη βασική τους ιδέα από φυσικά φαινόμενα και μοντελοποιούνται με μαθηματικές εξισώσεις. Οι αλγόριθμοι αυτοί επιτυγχάνουν τη σύγκλιση στο MPP ανεξάρτητα από την τάση στην οποία αυτό βρίσκεται ή τον αριθμό των τοπικών μεγίστων της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Ένα ακόμα στοιχείο που παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της DC/DC μετατροπής είναι η συχνότητα διακοπτισμού του μετατροπέα DC/DC. Ανάλογα με την τιμή της συχνότητας του PWM σήματος που ελέγχει τον μετατροπέα DC/DC μεταβάλλονται οι απώλειες ισχύος του, ο βαθμός απόδοσης του και επομένως και η ισχύς που παράγεται στην έξοδό του. Δηλαδή, για την ίδια τιμή duty cycle (δηλαδή ίδια ισχύ εισόδου από την φωτοβολταϊκή συστοιχία) και διαφορετικές συχνότητες διακοπτισμού θα προκύπτει διαφορετική τιμή ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα. Τη βέλτιστη συχνότητα διακοπτισμού δεν μπορούμε να την γνωρίζουμε εκ των προτέρων διότι δεν είναι η ίδια για όλες τις τιμές ισχύος και τάσης, συνεπώς οι αλγόριθμοι ελέγχου του μετατροπέα που αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία λαμβάνουν υπόψη τους εκτός από τη σχετική διάρκεια αγωγής και τη συχνότητα διακοπτισμού με στόχο τελικά να βελτιστοποιηθούν αυτοί οι δύο όροι και το σύστημα να συγκλίνει στο σημείο όπου παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς από την φωτοβολταϊκή συστοιχία και η μετατροπή αυτής της ισχύος από τον μετατροπέα DC/DC να γίνεται με τον μέγιστο δυνατό βαθμό απόδοσης.

4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

4.1 Επιμέρους στοιχεία του συστήματος

Το γενικό διάγραμμα του συστήματος που υλοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία φαίνεται στο Σχήμα 4-1.

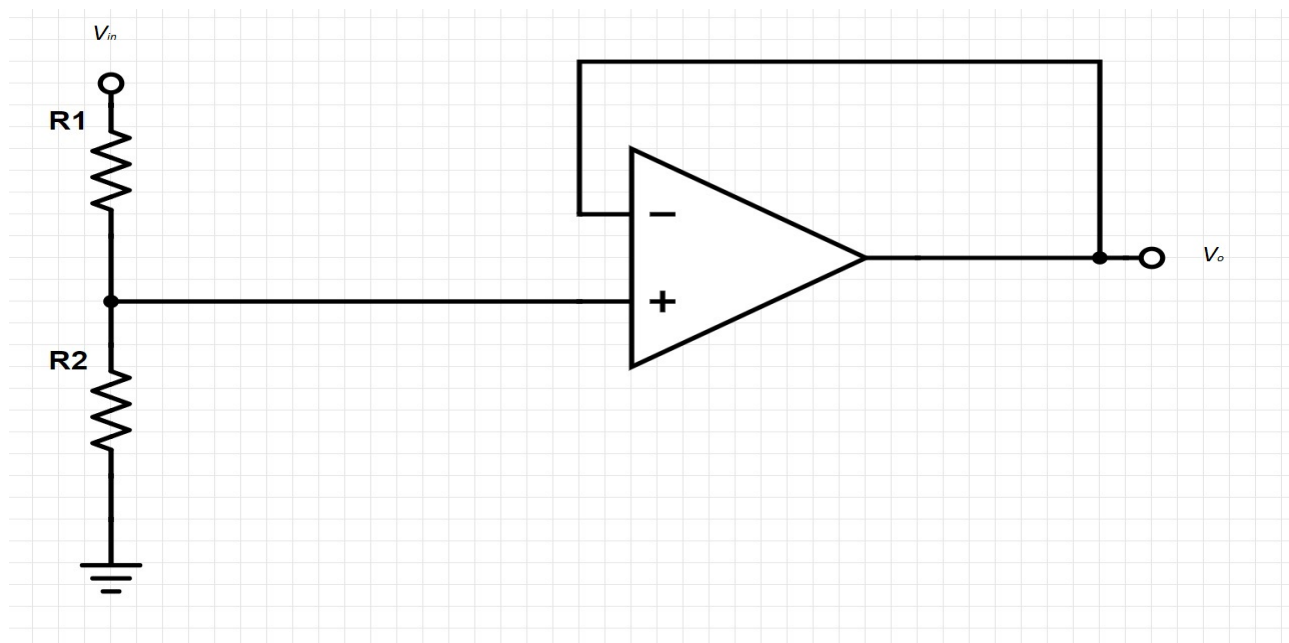


Σχήμα 4-1. Γενικό διάγραμμα του συστήματος που υλοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1, το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Τη φωτοβολταϊκή συστοιχία
- Έναν μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης
- Τη συστοιχία των συσσωρευτών όπου αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια
- Τέσσερις αισθητήρες για τη μέτρηση των ρευμάτων εισόδου και εξόδου και τη μέτρηση των τάσεων εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα
- Τη μονάδα ελέγχου που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του μετατροπέα DC/DC εκτελώντας τον αλγόριθμο MPPT.

Πιο συγκεκριμένα, η φωτοβολταϊκή διάταξη αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια ονομαστικής ισχύος 20 Watt το καθένα (σε Standard Test Conditions, STC), τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα. Ο μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter) κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής ΗΜΜΥ του Πολυτεχνείου Κρήτης στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διατριβής [3]. Η συστοιχία των συσσωρευτών αποτελείται από δύο μπαταρίες ονομαστικής τάσης 12V και χωρητικότητας 7Ah η καθεμία. Για τη μέτρηση της τάσης στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC χρησιμοποιήθηκαν δύο κυκλώματα αποτελούμενα από διαιρέτες τάσης και τελεστικούς ενισχυτές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2. Αισθητήρας για τη μέτρηση της τάσης με τη χρήση διαιρέτη τάσης.

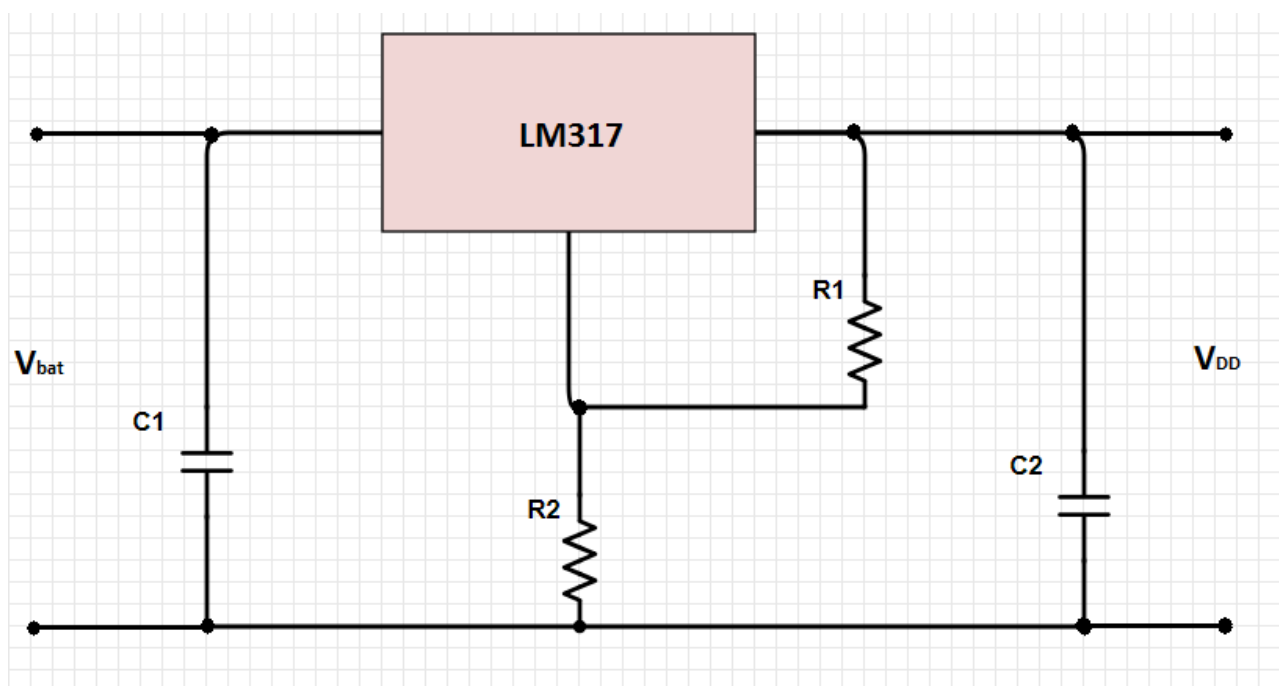
Επιλέγοντας τις τιμές των αντιστάσεων $R1$ και $R2$ κατάλληλα μπορούμε πρακτικά να ορίσουμε τα όρια των τάσεων που θα εφαρμοστούν ως είσοδοι στο μικροελεγκτή αλλά και να γνωρίζουμε τη σχέση που συνδέει την πραγματική τάση με την τάση που διαβάσει ο μικροελεγκτής. Η σχέση αυτή είναι :

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (4.1)$$

όπου V_{in} είναι η μετρούμενη τάση (εισόδου ή εξόδου), V_o είναι η αναλογική τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του μικροελεγκτή και $R1$, $R2$ είναι οι κατάλληλες αντιστάσεις του διαιρέτη τάσης ώστε να εξασφαλίζεται ότι η τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του μικροελεγκτή είναι εντός των απαιτούμενων ορίων.

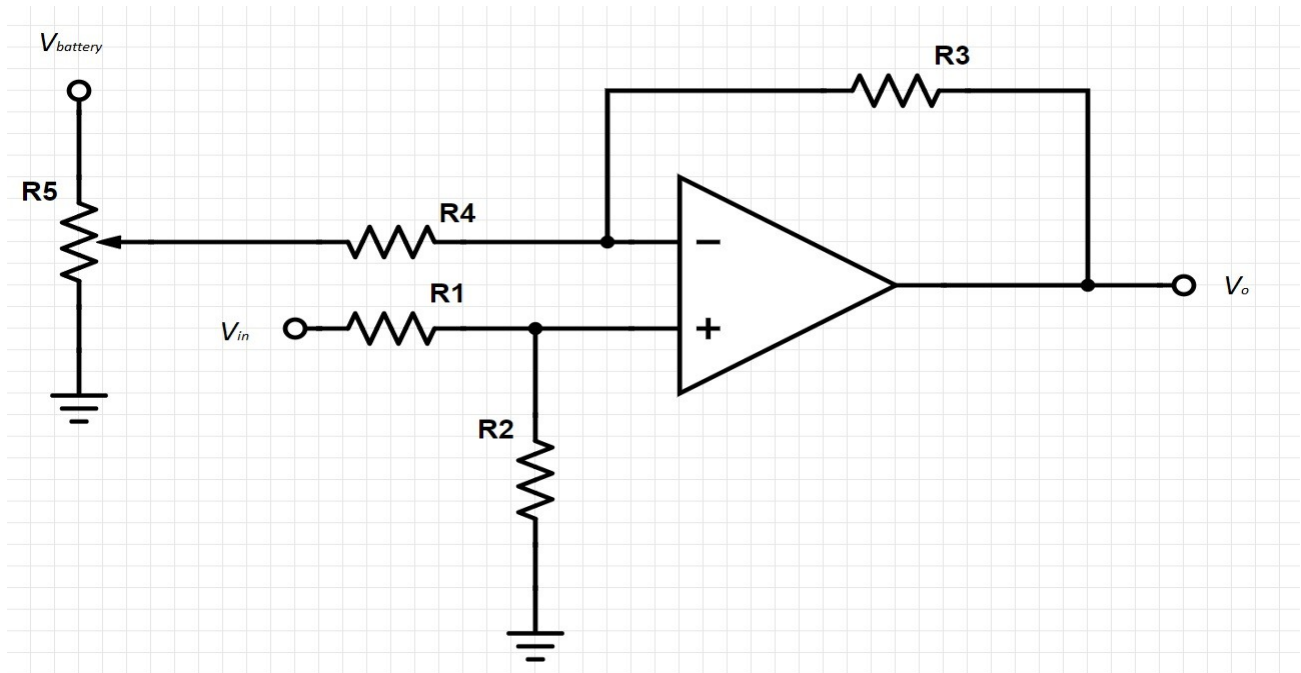
Για τη μέτρηση του ρεύματος εισόδου και εξόδου χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες ACS712 της Allegro Microsystems οι οποίοι βασίζονται στο φαινόμενο Hall. Οι αισθητήρες αυτοί τροφοδοτούνται με τάση $V_{DD} = 5V$ και ανάλογα με την τιμή του ρεύματος που τους διαρρέει

παράγουν στην έξοδο τους μία τάση. Αν το ρεύμα που διαπερνά τον αισθητήρα είναι μηδενικό η έξοδος του θα είναι 2.5V. Αυτό συμβαίνει διότι οι αισθητήρες αυτοί έχουν τη δυνατότητα να μετράνε τόσο θετικά όσο και αρνητικά ρεύματα. Για να το κάνουν αυτό ορίζουν το μηδέν τους σε τάση $V_{DD}/2$. Έτσι, όταν τους διαπερνά θετικό ρεύμα η τάση εξόδου τους είναι μεγαλύτερη από 2.5V ενώ όταν το ρεύμα είναι αρνητικό η τάση εξόδου τους είναι μικρότερη από 2.5V. Η μέτρηση του ρεύματος είναι πολύ σημαντική για τη σωστή λειτουργία του συστήματος και γι' αυτό πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη. Η ακρίβεια στη μέτρηση εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας, αφού όπως είπαμε η τροφοδοσία καθορίζει και την τάση εξόδου κατά τη μηδενική ροή ρεύματος (έξοδος $V_{DD}/2$). Για να εξασφαλιστεί αξιόπιστη παροχή τάσης τροφοδοσίας, σχεδιάστηκε ένα κύκλωμα σταθεροποιητή τάσης. Το κύκλωμα αυτό παίρνει τροφοδοσία από την μπαταρία και παράγει σταθερή τάση 5V για την τροφοδοσία των αισθητήρων ανεξάρτητα από τις πιθανές μικρές αυξομειώσεις στην τάση της μπαταρίας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σταθερή τάση τροφοδοσίας στους αισθητήρες ρεύματος που είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία τους. Για το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ο σταθεροποιητής τάσης LM317 όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3. Κυκλωματικό διάγραμμα σταθεροποιητή τάσης με τη χρήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος LM317.

Η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να επηρεαστεί επίσης από τον θόρυβο των κυκλωμάτων. Η τιμή του ρεύματος που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι αυτή του ρεύματος εξόδου, το οποίο παίρνει τιμές από 0 έως 3,3A περίπου. Η έξοδος του αισθητήρα είναι ένα αναλογικό σήμα το οποίο για να επεξεργαστεί και να χρησιμοποιηθεί από το μικροελεγκτή χρειάζεται να μετατραπεί σε ψηφιακό. Αυτό γίνεται από τον Analog-to-Digital Converter (ADC) που υπάρχει ενσωματωμένος στο μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής χρησιμοποιεί 10 bits για να αναπαραστήσει την αναλογική αυτή τάση, δηλαδή παράγει στην έξοδο του ADC μια τιμή από 0 έως 1023. Λόγω του θορύβου που προστίθεται, η ψηφιακή τιμή που παράγει ο ADC για μία δεδομένη τιμή ρεύματος δεν είναι 100% σταθερή αλλά έχει κάποιες αυξομειώσεις (πχ. για μία δεδομένη τιμή ρεύματος μπορεί να διαβάσει είτε 500 είτε 495 είτε 505). Επίσης, οι τιμές που διαβάζει ο μικροελεγκτής δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους, καθώς ούτε τα ρεύματα έχουν, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω (εύρος τιμών ρεύματος: 0 έως 3.3A). Αν συνυπολογιστεί λοιπόν ο θόρυβος και οι μικρές αποκλίσεις μεταξύ των τιμών που διαβάζει ο μικροελεγκτής για το ρεύμα γίνεται αντιληπτό ότι είναι εύκολο να γίνει λάθος στη μέτρηση. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα δημιουργήθηκε ένα κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή το οποίο έχει ως στόχο να εκμεταλλευτεί όλο το εύρος των τάσεων που μπορεί να δεχθεί ο ADC στην είσοδο του. Δεδομένου ότι δεν απαιτείται η μέτρηση αρνητικών ρευμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα ποτενσιόμετρο ώστε να αφαιρεθεί το offset και έτσι να αυξηθεί το εύρος των διαθέσιμων τάσεων εξόδου από 2.5 έως 5V σε 0 έως 5V. Ακόμα, το εύρος των ρευμάτων που απαιτείται να μετρηθούν είναι μικρότερο από το εύρος το οποίο είναι ικανός να μετρήσει ο αισθητήρας. Έτσι, χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ενίσχυση στο κύκλωμα του διαφορικού ενισχυτή το σύστημα εκμεταλλεύεται σχεδόν όλο το εύρος των τάσεων που μπορεί να δεχθεί ο ADC στην είσοδο του, κάνοντας έτσι τη μέτρηση να επηρεάζεται λιγότερο από το θόρυβο και να είναι περισσότερο ακριβής. Στο Σχήμα 4-4 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του διαφορικού ενισχυτή που χρησιμοποιήθηκε και για τους δύο αισθητήρες ρεύματος (εισόδου και εξόδου του μετατροπέα DC/DC, αντίστοιχα). Ο τελεστικός ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο LM358.



Σχήμα 4-4. Κυκλωματικό διάγραμμα διαφορικού ενισχυτή με τη χρήση του τελεστικού ενισχυτή LM358.

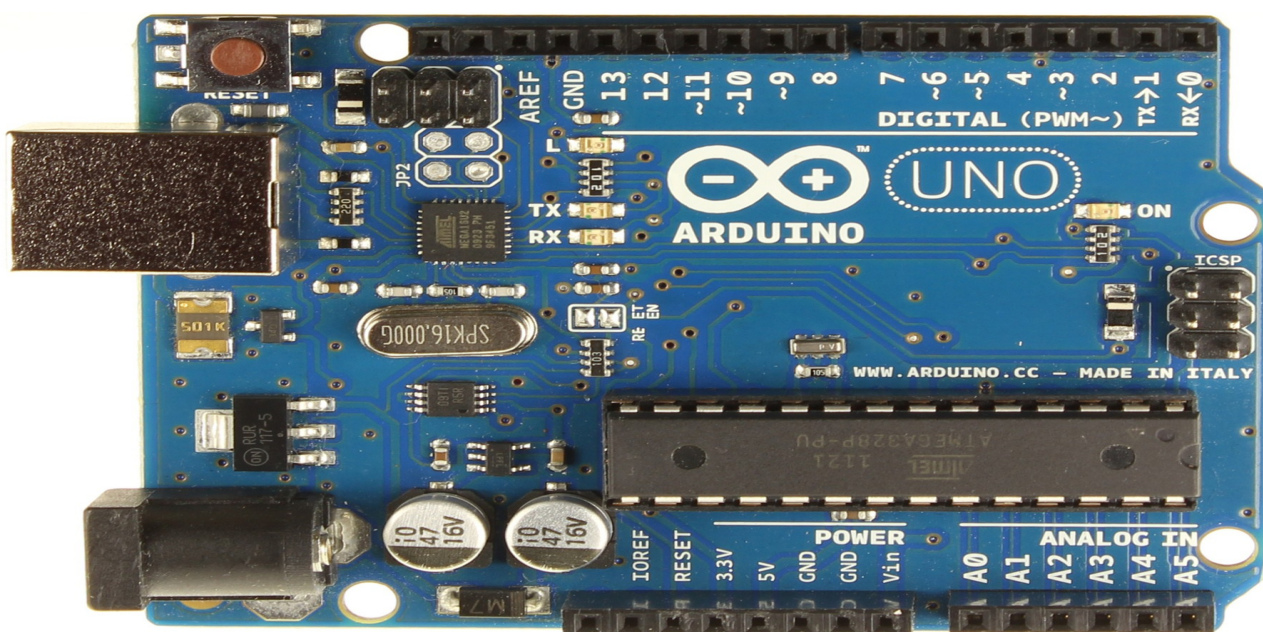
Επόμενο βήμα για την ορθή λειτουργία των αισθητήρων ήταν η βαθμονόμησή τους. Η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε για όλους τους αισθητήρες τάσης και ρεύματος. Στο χώρο του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε το τροφοδοτικό το οποίο τροφοδοτεί με ισχύ τον Boost converter και αυτός με τη σειρά του συνδέεται με τις μπαταρίες. Δίνοντας τάση και ρεύμα από το τροφοδοτικό ο μικροελεγκτής διάβαζε κάποια τιμή για την τάση ή το ρεύμα, αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, με τη χρήση του πολυμέτρου μετρήθηκαν οι πραγματικές τιμές των τάσεων και των ρευμάτων εισόδου και εξόδου. Τόσο οι πραγματικές τιμές όσο και οι τιμές που διάβαζε ο μικροελεγκτής καταγράφονταν με σκοπό να γίνει η αντιστοίχισή τους. Η αντιστοίχιση έγινε με τη βοήθεια της MATLAB. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση polyfit της MATLAB η οποία δέχεται ως ορίσματα την πραγματική τιμή (δηλαδή την τιμή που διάβαζε ο μικροελεγκτής) και το βαθμό της εξίσωσης (στην περίπτωσή μας δηλαδή 1) και παράγει δύο όρους a και b οι οποίοι είναι οι βέλτιστοι συντελεστές της εξίσωσης :

$$y = a * x + b \quad (4.2)$$

όπου y η πραγματική τιμή του φυσικού μεγέθους που μετρήθηκε με το πολύμετρο και x η τιμή που διαβάζει ο μικροελεγκτής. Έτσι, έγινε η κατάλληλη βαθμονόμηση και τώρα γνωρίζοντας ο μικροελεγκτής τις πραγματικές τιμές ρεύματος και τάσης μπορεί να υπολογίσει την ισχύ εισόδου και εξόδου από τον τύπο :

$$P = V * I \quad (4.3)$$

Για την υλοποίηση της μονάδας ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το αναπτυξιακό σύστημα Arduino Uno όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5. Το αναπτυξιακό σύστημα Arduino Uno που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της μονάδας ελέγχου του συστήματος.

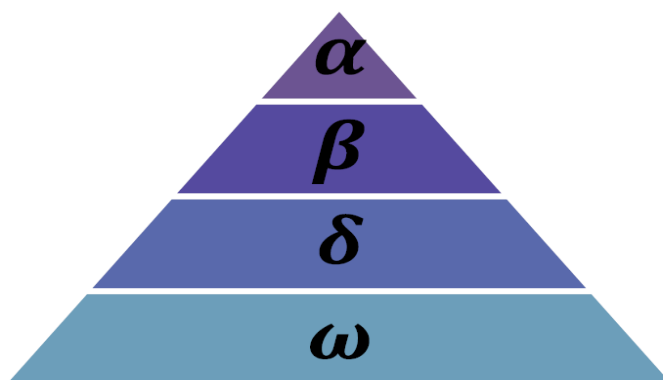
Ο μικροελεγκτής ATmega328P που περιλαμβάνεται στο Arduino Uno, μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω, διαβάζει τις τιμές του ρεύματος και της τάσης εισόδου-εξόδου του μετατροπέα DC/DC και τις οποίες χρησιμοποιεί για να τρέξει τους αλγορίθμους MPPT που υλοποιήθηκαν έτσι ώστε να παράγει την κατάλληλη σχετική διάρκεια αγωγής D και την κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού f_s του σήματος PWM που ελέγχει το μετατροπέα. Επιλέγοντας κατάλληλα τη σχετική διάρκεια αγωγής επιτυγχάνεται η λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) και επιλέγοντας την κατάλληλη συχνότητα f_s μεγιστοποιείται ο

βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/DC και η ισχύς που παράγεται στην έξοδο του. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη “PWM.h” η οποία μας επιτρέπει με δύο εντολές να έχουμε ένα σήμα PWM με τη συχνότητα και το duty cycle που επιθυμούμε. Με την εντολή `SetPinFrequencySafe` ορίζουμε τη συχνότητα που θέλουμε και με την εντολή `pwmWriteHR` ορίζουμε την τιμή του duty cycle που θέλουμε. Τελικά, το σήμα PWM παράγεται από το pin 9 του Arduino Uno. Το σήμα αυτό συνδέεται σε έναν MOSFET driver ο οποίος οδηγεί το διακόπτη τύπου MOSFET του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter). Ο MOSFET driver που χρησιμοποιείται είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα ICL7667, το οποίο λαμβάνει τροφοδοσία από την μπαταρία.

4.2 Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που υλοποιήθηκαν

4.2.1 Grey Wolf Optimizer

Ο πρώτος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε είναι ο Grey Wolf Optimizer (GWO) [4]. Ο αλγόριθμος αυτός είναι εμπνευσμένος από τη συμπεριφορά των γκρίζων λύκων. Τα ζώα αυτά βρίσκονται ψηλά στην τροφική αλυσίδα, κινούνται και ζουν σε αγέλες. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-6 οι αγέλες έχουν αυστηρή ιεραρχία και ο ανώτερος στην ιεραρχία κυριαρχεί στους κατώτερους του.



Σχήμα 4-6. *Ιεραρχία γκρίζων λύκων. Κάθε επίπεδο κυριαρχεί στα επίπεδα από κάτω από αυτό.*

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-6 οι λύκοι που ανήκουν στο πρώτο επίπεδο κυριαρχίας ονομάζονται alpha, στο δεύτερο beta, στο τρίτο delta και στο τέταρτο omega. Οι λύκοι alpha κυριαρχούν σε όλους του υπόλοιπους και είναι υπεύθυνοι να παίρνουν αποφάσεις όπως για το

κυνήγι, την ώρα και το μέρος του ύπνου. Οι λύκοι beta είναι υφιστάμενοι των alpha τους οποίους βοηθούν στη λήψη των αποφάσεων. Είναι υποψήφιοι να γίνουν λύκοι alpha σε περίπτωση που κάποιος λύκος alpha πεθάνει ή γεράσει πολύ. Υπακούουν στους λύκους alpha και διατάζουν όλους τους υπόλοιπους. Οι λύκοι delta υποτάσσονται στους λύκους alpha και beta κυριαρχούν όμως στους omega. Οι λύκοι delta είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο του χώρου στον οποίο βρίσκεται η αγέλη, για την έγκαιρη ενημέρωση των υπόλοιπων λύκων σε περίπτωση κινδύνου, για την περίθαλψη τυχόν τραυματισμένων λύκων αλλά και για το κυνήγι της τροφής μαζί με τους alpha και beta. Τέλος, οι λύκοι delta βρίσκονται στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας και είναι υποχρεωμένοι να υπακούουν σε όλους τους άλλους. Μερικές φορές κάνουν το baby-sitting των μικρών λύκων και είναι οι τελευταίοι που έχουν δικαίωμα να φάνε. Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των γκρίζων λύκων είναι ο τρόπος με τον οποίον επιτίθενται στο θύμα τους. Αρχικά το κυνηγούν μέχρι να το προσεγγίσουν, στη συνέχεια το περικυκλώνουν μέχρι να μην μπορεί να κινηθεί και τέλος του επιτίθενται[4].

Αυτά που περιγράψαμε παραπάνω μοντελοποιούνται μαθηματικά ώστε να συνθέσουν έναν αλγόριθμο ο οποίος λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης. Η ιεραρχία μπορεί να μοντελοποιηθεί αν θεωρήσουμε την καλύτερη λύση ως alpha, τη δεύτερη καλύτερη λύση ως beta την τρίτη καλύτερη λύση ως delta και όλες τις υπόλοιπες ως omega. Η περικύκλωση και η επίθεση στο θήραμα εκφράζεται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$\vec{D}=|\vec{C}*\vec{X}_p(t)-\vec{X}(t)| \quad (4.4)$$

$$\vec{X}(t+1)=\vec{X}_p(t)-\vec{A}*\vec{D} \quad (4.5)$$

όπου t είναι η τρέχουσα επανάληψη στην οποία βρίσκεται ο αλγόριθμος, A και C είναι οι συντελεστές των διανυσμάτων, X_p είναι η θέση του θηράματος και X είναι η θέση του λύκου. Οι συντελεστές A και C προκύπτουν από τους παρακάτω τύπους :

$$\vec{A}=2*\vec{a}*\vec{r}_1-\vec{a} \quad (4.6)$$

$$\vec{C}=2*\vec{r}_2 \quad (4.7)$$

όπου τα στοιχεία του διανύσματος α μειώνονται γραμμικά από το 2 στο 0 κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων και r_1, r_2 είναι τυχαία διανύσματα στο διάστημα $[0,1]$ [4].

Στην εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ισχύος στην έξοδο ενός μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter). Οι δύο όροι που πρέπει να βελτιστοποιήσουμε ώστε να έχουμε τη μέγιστη ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα είναι η σχετική διάρκεια αγωγής D και η συχνότητα διακοπισμού f_s . Συνεπώς, εφόσον έχουμε δύο όρους να βελτιστοποιήσουμε, όλα τα διανύσματα που περιγράψαμε στις παραπάνω εξισώσεις θα είναι δισδιάστατα, η μία διάσταση θα αναφέρεται στο duty cycle και η άλλη στη συχνότητα f_s . Έτσι, η εξίσωση (4.5) μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$D_i(k+1) = D_i(k) - A_D * D_F \quad (4.8)$$

$$F_i(k+1) = F_i(k) - A_F * D_F \quad (4.9)$$

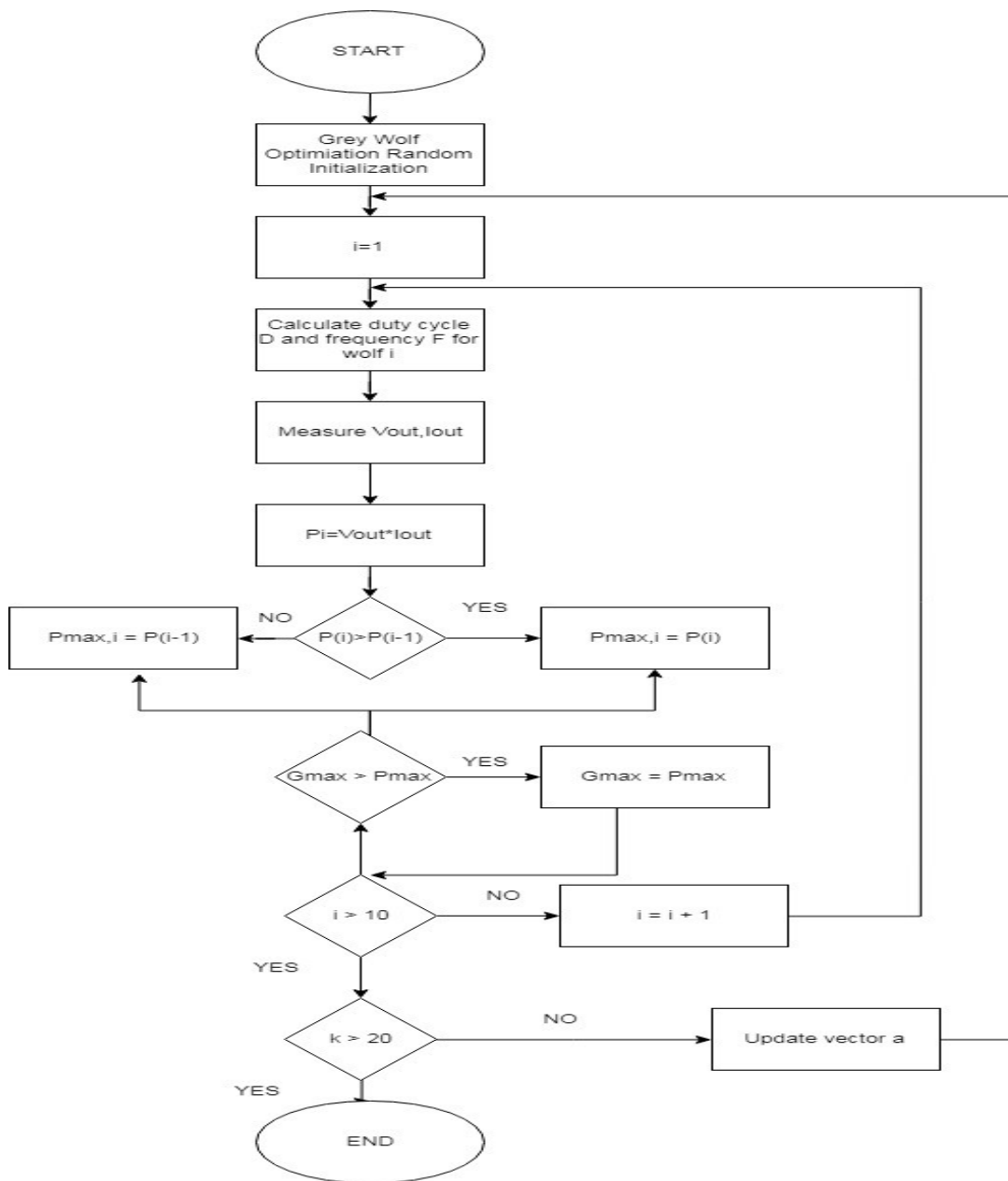
όπου k είναι η τρέχουσα επανάληψη του αλγορίθμου για τον i -οστό λύκο της αγέλης.

Αν η ισχύς εξόδου της τρέχουσας επανάληψης είναι μεγαλύτερη από αυτή της προηγούμενης επανάληψης τότε ανανεώνουμε τις τιμές των duty cycle και f_s και κρατάμε τις καινούριες, διαφορετικά κρατάμε αυτές που είχαμε:

$$P(D_i^k, F_i^k) > P(D_i^{k-1}, F_i^{k-1}) \quad (4.10)$$

Ένας κρίσιμος παράγοντας για την εφαρμογή μας είναι ο αριθμός των επαναλήψεων αλλά και των λύκων που θα συμμετέχουν στη διαδικασία. Μετά από πειραματικές δοκιμές διαπιστώθηκε πως αν ο αλγόριθμος χρησιμοποιήσει 10 λύκους και 20 επαναλήψεις λειτουργεί αποτελεσματικά και όταν συγκλίνει θα βρίσκεται στο βέλτιστο σημείο. Θα έχει δηλαδή τέτοιο duty cycle ώστε η ισχύς εισόδου να είναι η μέγιστη (Maximum Power Point Tracking) και τέτοια συχνότητα f_s ώστε η μετατροπή της ισχύος εισόδου να γίνεται με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο και έτσι να έχουμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος.

Στο Σχήμα 4-7 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Grey Wolf Optimizer.



Σχήμα 4-7. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Grey Wolf Optimizer (GWO).

4.2.2 Flower Pollination Algorithm

Ο Flower Pollination Algorithm (FPA) δημιουργήθηκε από τον Xin-She Yang στο πανεπιστήμιο του Cambridge [5]. Είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης του οποίου η βασική ιδέα προήλθε από

τη φυσική διαδικασία της επικονίασης των φυτών. Επικονίαση είναι η διαδικασία μέσω της οποίας γίνεται η γονιμοποίηση των φυτών. Κατά τη διαδικασία αυτή μεταφέρονται οι γυρεόκοκκοι από τους ανθήρες στο στίγμα του ύπερου είτε μέσω εντόμων είτε μέσω του αέρα. Η αποτελεσματικότητα και η ευελιξία του αλγορίθμου αυτού τον κάνει ιδιαίτερα χρήσιμο σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης στην πραγματική ζωή όπως και το πρόβλημα του MPPT με το οποίο ασχολούμαστε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Όπως είπαμε ο τρόπος με τον οποίον τα φυτά αναπαράγονται ονομάζεται επικονίαση. Η επικονίαση μπορεί να γίνει είτε βιοτικά είτε αβιοτικά. Η μεταφορά της γύρης με βιοτικό τρόπο κυριαρχεί στο μεγαλύτερο ποσοστό των λουλουδιών-φυτών και γίνεται από ζώα και έντομα. Αντίθετα, η μεταφορά της γύρης με αβιοτικό δεν απαιτεί την ύπαρξη κάποιου ζωντανού οργανισμού για τη μεταφορά της γύρης αλλά γίνεται μέσω του αέρα και του νερού. Ακόμα, η διαδικασία της επικονίασης μπορεί να γίνει μέσω φυτών είτε του ίδιου είδους, είτε διαφορετικού είδους. Η επικονίαση μεταξύ φυτών του ίδιου είδους ονομάζεται self-pollination, ενώ η επικονίαση μεταξύ φυτών διαφορετικού είδους ονομάζεται cross-pollination.

Πρακτικά, η διαδικασία της επικονίασης των λουλουδιών μπορεί να περιγραφεί με τους εξής τέσσερις κανόνες :

- Η βιοτική και η cross-pollination μπορούν να θεωρηθούν ως η καθολική διαδικασία επικονίασης όπου η μεταφορά της γύρης από τους επικονιαστές μπορεί να περιγραφεί με μια κατανομή Levy.
- Η αβιοτική και η self-pollination διαδικασία θεωρούνται ως τοπικές επικονιάσεις.
- Η πιθανότητα αναπαραγωγής δύο φυτών είναι ανάλογη της μεταξύ τους ομοιότητας.
- Η τοπική και η καθολική επικονίαση καθορίζονται από μια πιθανότητα p . Λόγω διάφορων παραγόντων όπως ο αέρας, η τοπική επικονίαση μπορεί να έχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα p σε σχέση με το σύνολο της διαδικασίας της επικονίασης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορούμε να έχουμε είτε καθολική (global) είτε τοπική (local) επικονίαση. Στην καθολική επικονίαση (global pollination) που είναι βιοτική ή cross-pollination, η μετακίνηση των επικονιαστών ακολουθεί μία κατανομή Levy. Ο i -οστός επικονιαστής της k -οστής επανάληψης προκύπτει από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + L * (x_i^k - g_{best}) \quad (4.11)$$

όπου x_i^{k+1} η νέα θέση του επικονιαστή i στην επανάληψη $k+1$, x_i^k η θέση του επικονιαστή i στην επανάληψη k και g_{best} η καλύτερη θέση-λύση που έχει βρεθεί μέχρι τώρα για την τρέχουσα γενιά και επανάληψη. Ο όρος L είναι ο παράγοντας κλειδί που ενισχύει τη διαδικασία της επικονίασης.

Οι επικονιαστές ακολουθούν την κατανομή Levy, συνεπώς ο όρος L είναι υπεύθυνος για τη μετακίνησή τους στο χώρο. Ο όρος L προκύπτει από την ακόλουθη σχέση :

$$L = \frac{\lambda * \Gamma(\lambda) * \sin(\frac{\pi * \lambda}{2})}{\pi * S^{1+\lambda}} \quad (4.12)$$

όπου $S > 0$, Γ είναι η gamma function [6] και λ είναι μια παράμετρος της οποίας η τιμή είναι ίση με 1,5. Η τιμή αυτή εξασφαλίζει τη γρηγορότερη σύγκλιση του αλγορίθμου.

Στην τοπική επικονίαση (local pollination) που είναι αβιοτική ή self-pollination, η μετακίνηση των επικονιαστών στο χώρο προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση :

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \varepsilon * (x_m^k - x_j^k) \quad (4.13)$$

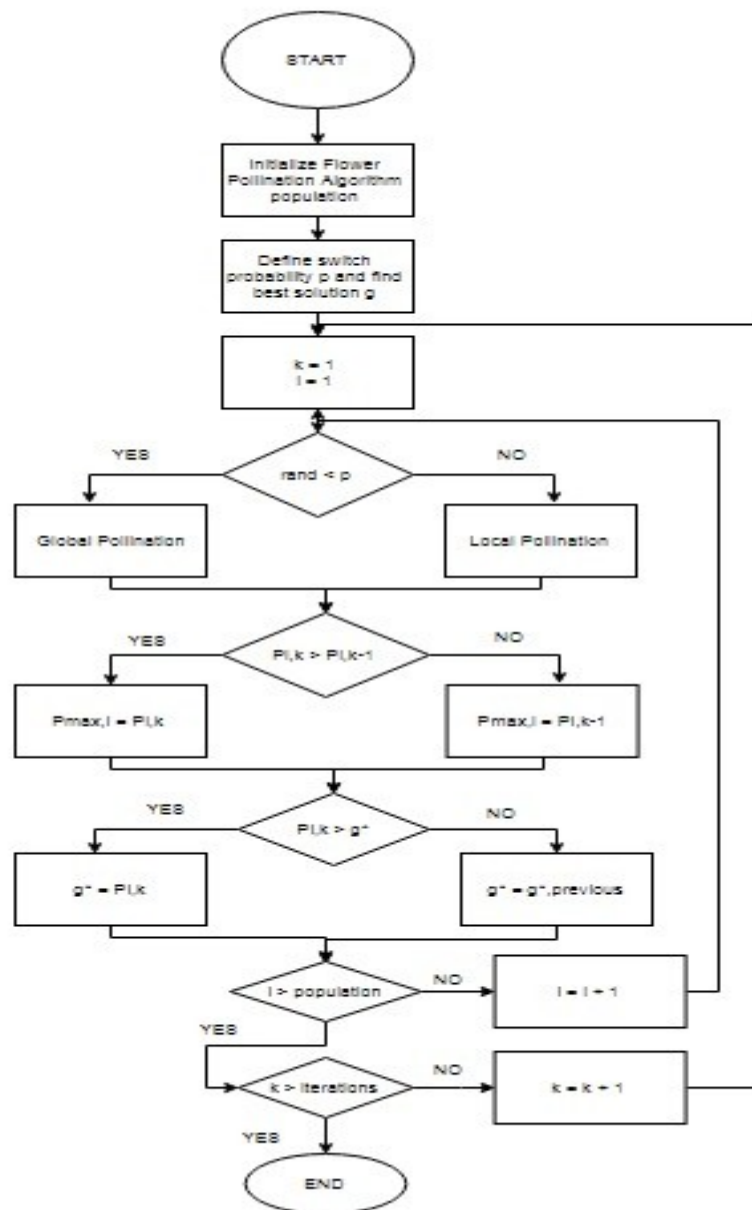
όπου x_m και x_j είναι διαφορετικοί επικονιαστές για την ίδια γενιά και ο όρος ε αναπαριστά μια τυχαία τοπική αναζήτηση στο διάστημα $[0,1]$.

Όπως αναφέρθηκε, μπορούμε να έχουμε είτε τοπική (local) είτε ολική (global) επικονίαση και αυτό εξαρτάται από την πιθανότητα p που ελέγχει τη διαδικασία της επικονίασης. Η τιμή της πιθανότητας p στο διάστημα $[0,1]$ ορίζει κάθε φορά αν θα έχουμε τοπική ή ολική επικονίαση. Ως όριο ορίστηκε η τιμή 0,8 για την οποία όπως διαπιστώθηκε πειραματικά ο αλγόριθμος λειτουργούσε καλύτερα.

Στην περίπτωση μας ο Flower Pollination αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την εύρεση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (maximum power point) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καθώς και της συχνότητας με την οποία ο μετατροπέας DC/DC λειτουργεί αποτελεσματικότερα (maximum efficiency). Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου εξετάζεται εάν το νέο duty cycle και η νέα συχνότητα που προέκυψαν οδηγούν στην παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC απ' ότι το ζεύγος duty cycle-συχνότητας της προηγούμενης επανάληψης:

$$P(D_i^k, F_i^k) > P(D_i^{k-1}, F_i^{k-1}) \quad (4.14)$$

Αν αυτό ισχύει, τότε αντικαθιστούμε το τις παλιές τιμές του duty cycle και της συχνότητας για το συγκεκριμένο επικοινωνιστή με τις καινούριες, ενώ αν δεν ισχύει διατηρούμε τις παλιές. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Flower Pollination που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία :



Σχήμα 4-8. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Flower Pollination (FPA).

4.2.3 Jaya Algorithm

Ο αλγόριθμος Jaya προτάθηκε από τον Ravipudi Venkata Rao το 2015 [7]. Το όνομά του προέρχεται από μια γλώσσα της αρχαίας Ινδίας, η οποία ονομάζεται Sanskrit. Στη γλώσσα αυτή, η λέξη Jaya σημαίνει επιτυχία. Η βασική αρχή του αλγορίθμου είναι σε κάθε επανάληψη η εύρεση της καλύτερης και της χειρότερης λύσης και ύστερα η μετακίνηση όλων των υποψήφιων λύσεων προς την καλύτερη αλλά και η απομάκρυνση από τη χειρότερη λύση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βελτίωση όλων των υποψήφιων λύσεων κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων αφού κάθε νέα υποψήφια λύση έρχεται πιο κοντά στη βέλτιστη λύση και απομακρύνεται από την χειρότερη λύση. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά του χώρου στον οποίο αναζητεί τη βέλτιστη λύση, καθώς ο αλγόριθμος δεν χρησιμοποιεί προκαθορισμένες παραμέτρους παρά μόνο τις βέλτιστες και τις χειρίστες λύσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων.

Πρακτικά λοιπόν, ο αλγόριθμος αποτελείται από μια αντικειμενική συνάρτηση f την οποία θέλουμε είτε να μεγιστοποιήσουμε, είτε να ελαχιστοποιήσουμε. Οι μεταβλητές που καθορίζουν την f μπορούν να είναι m στον αριθμό, ο πληθυσμός των υποψήφιων λύσεων n και ο αριθμός των επαναλήψεων z . Αν λοιπόν X είναι μια μεταβλητή της αντικειμενικής συνάρτησης f , τότε X_{best} είναι η βέλτιστη υποψήφια λύση και X_{worst} είναι η χειρότερη υποψήφια λύση. Μαθηματικά, η εξέλιξη της καθεμίας υποψήφιας λύσης και η μετακίνησή της στη νέα θέση δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i} * (X_{j,best,i} - X_{j,k,i}) - r_{2,j,i} * (X_{j,worst,i} - X_{j,k,i}) \quad (4.15)$$

όπου $X_{j,k,i}$ είναι η i -οστή υποψήφια λύση, στην k -οστή επανάληψη, για την j -οστή μεταβλητή της αντικειμενικής συνάρτησης f , $X_{j,best,i}$ και $X_{j,worst,i}$ είναι η καλύτερη και η χειρότερη λύση αντίστοιχα και $r_{1,j,i}$ και $r_{2,j,i}$ είναι δύο τυχαίες μεταβλητές στο διάστημα $[0,1]$. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο αλγόριθμος οδηγεί τις υποψήφιες λύσεις προς τη βέλτιστη λύση και αυτό μαθηματικά προκύπτει από τον όρο $(X_{j,best,i} - X_{j,k,i})$. Επιπροσθέτως, ο αλγόριθμος απομακρύνει τις υποψήφιες λύσεις από τη χειρότερη λύση και αυτό μαθηματικά προκύπτει από τον όρο $(X_{j,worst,i} - X_{j,k,i})$. Η νέα λύση που προκύπτει μετά από κάθε επανάληψη γίνεται αποδεκτή μόνο αν είναι καλύτερη από τη λύση που ήδη έχουμε. Αν δεν είναι, τότε διατηρείται η λύση που ήδη έχουμε βρει.

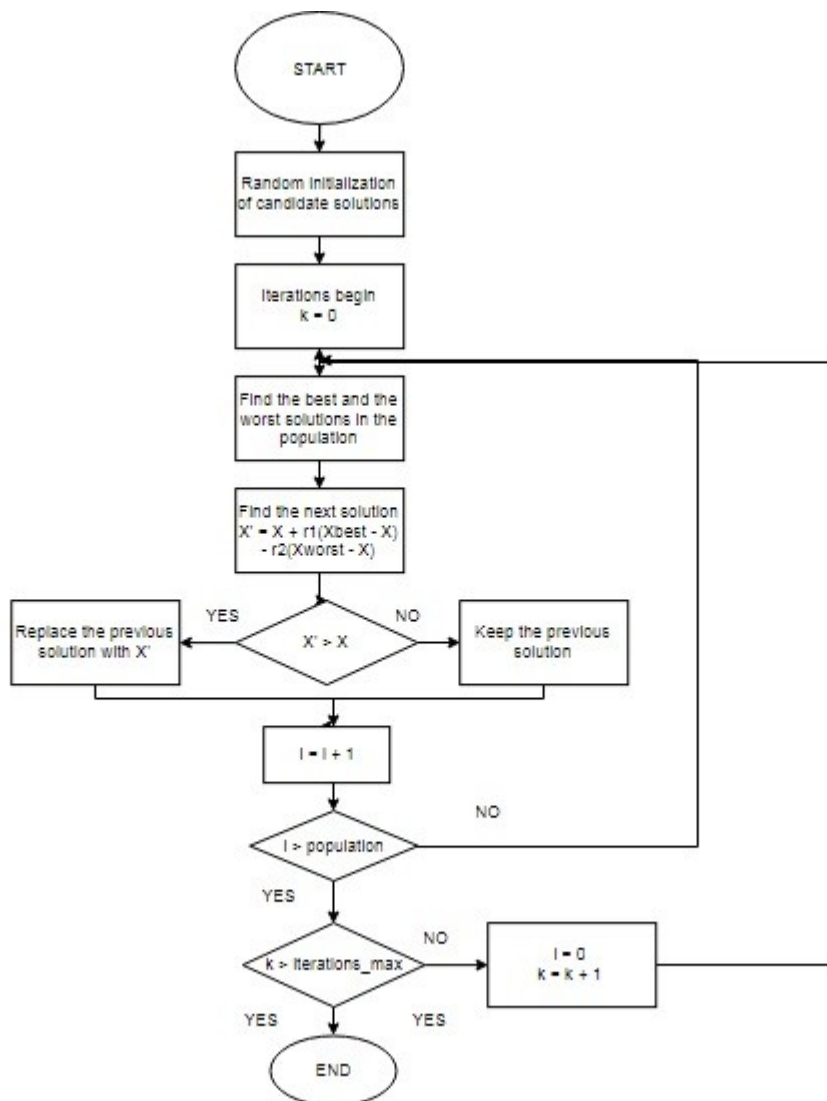
Στην εφαρμογή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο στόχος είναι η εύρεση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καθώς και η μεγιστοποίηση της ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Συνεπώς, αντικειμενική συνάρτηση στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η ισχύς P στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC και οι μεταβλητές που την καθορίζουν είναι η σχετική διάρκεια αγωγής D_c και η συχνότητα διακοπτισμού f_s .

Σε κάθε επανάληψη προκύπτει μία νέα σχετική διάρκεια αγωγής D_c και μία νέα τιμή συχνότητας διακοπτισμού f_s και επομένως μια νέα ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Η ισχύς αυτή συγκρίνεται με την ισχύ της προηγούμενης επανάληψης και μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης της σχέσης (4.16) αποφασίζεται αν οι νέες τιμές της σχετικής διάρκειας αγωγής D_c και της συχνότητας f_s θα αντικαταστήσουν τις παλιές:

$$P(D_i^k, F_i^k) > P(D_i^{k-1}, F_i^{k-1}) \quad (4.16)$$

Με τον τρόπο αυτό μετά από κάθε επανάληψη οι τιμές ισχύος που προκύπτουν από τα ζεύγη duty cycle-συχνότητας είναι μεγαλύτερες ή ίσες από αυτές της προηγούμενης επανάληψης και έτσι ο αλγόριθμος καταλήγει στην εύρεση της μέγιστης ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC. Με τη χρήση του αλγορίθμου Jaya με τον τρόπο αυτό, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη ως μεταβλητές της αντικειμενικής συνάρτησης τόσο τη σχετική διάρκεια αγωγής D_c όσο και τη συχνότητα διακοπτισμού f_s επιτυγχάνεται ταυτοχρόνως η εύρεση του MPP της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καθώς και της συχνότητας διακοπτισμού που έχει ως αποτέλεσμα το μέγιστο βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (maximum efficiency).

Στη συνέχεια φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Jaya.



Σχήμα 4-9. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Jaya.

4.2.4 Differential Evolution Algorithm

Ο αλγόριθμος Differential Evolution (DE) δημιουργήθηκε το 1996 από τους Rainer Storn και Kenneth Price [8]. Ο στόχος του αλγορίθμου είναι η βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων της συνάρτησης αυτής. Χρησιμοποιείται σε διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης τα οποία είναι δύσκολο ή και αδύνατο να λυθούν αναλυτικά. Ο αλγόριθμος ξεκινά αρχικοποιώντας έναν τυχαίο πληθυσμό από υποψήφιες λύσεις ο οποίος οδηγείται σε κάθε επανάληψη όλο και πιο κοντά στη βέλτιστη λύση. Οι υποψήφιες λύσεις αποτελούν ουσιαστικά ένα διάνυσμα το οποίο έχει τόσες διαστάσεις όσες και οι μεταβλητές που απαιτούνται για τη βελτιστοποίηση της εκάστοτε συνάρτησης. Ο αλγόριθμος Differential Evolution εκτελείται στις εξής τέσσερις φάσεις :

- Initialization
- Mutation
- Crossover
- Selection

Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος ξεκινώντας αρχικοποιεί (Initialization) τυχαία τον πληθυσμό των υποψήφιων λύσεων $X_{i,k,j}$, όπου το j συμβολίζει την j -οστή μεταβλητή της συνάρτησης, k είναι ο αριθμός της επανάληψης/γενιάς και i είναι η i -οστή μεταβλητή του πληθυσμού.

Στη συνέχεια, περνάει στη φάση του Mutation. Στη φάση αυτή ο αλγόριθμος δημιουργεί τους mutant vectors, έναν για κάθε μεταβλητή της αντικειμενικής συνάρτησης, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$V_{i,g,j} = X_{r1,g,j} + \text{mutationfactor} * (X_{r2,g,j} - X_{r3,g,j}) \quad (4.17)$$

όπου V είναι το νέο mutation vector που προκύπτει, X είναι η υποψήφια λύση για την τρέχουσα επανάληψη και $r1, r2, r3$ είναι τυχαίες μεταβλητές στο διάστημα $[1, \text{population}]$. Ο όρος

“mutationfactor” είναι μια παράμετρος ελέγχου του αλγορίθμου η οποία υπολογίζεται πειραματικά έτσι ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει όσο το δυνατόν γρηγορότερα και ακριβέστερα.

Αμέσως μετά ξεκινά η λειτουργία του Crossover. Ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα δοκιμαστικό διάνυσμα U το οποίο προκύπτει από την παρακάτω σχέση :

$$U_{i,gj} = \begin{cases} V_{i,gj}, & rand < CR \\ X_{i,gj}, & rand \geq CR \end{cases} \quad (4.18)$$

Κάθε φορά υπολογίζεται μια τυχαία μεταβλητή “rand” στο διάστημα $[0,1]$. Η τυχαία αυτή μεταβλητή συγκρίνεται με τη σταθερά του Crossover CR . Η σταθερά αυτή ανήκει στο διάστημα $[0,1]$ και η τιμή της υπολογίζεται πειραματικά με σκοπό την γρηγορότερη και ακριβέστερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λ . Όπως φαίνεται και στις εξισώσεις 4.18 και 4.19 το δοκιμαστικό αυτό διάνυσμα παίρνει την τιμή του mutant vector V αν η τυχαία μεταβλητή $rand$ είναι μικρότερη ή ίση από τη σταθερά CR , ενώ παίρνει την τιμή της αντίστοιχης υποψήφιας λύσης X αν η τυχαία μεταβλητή “rand” είναι μεγαλύτερη από τη σταθερά CR .

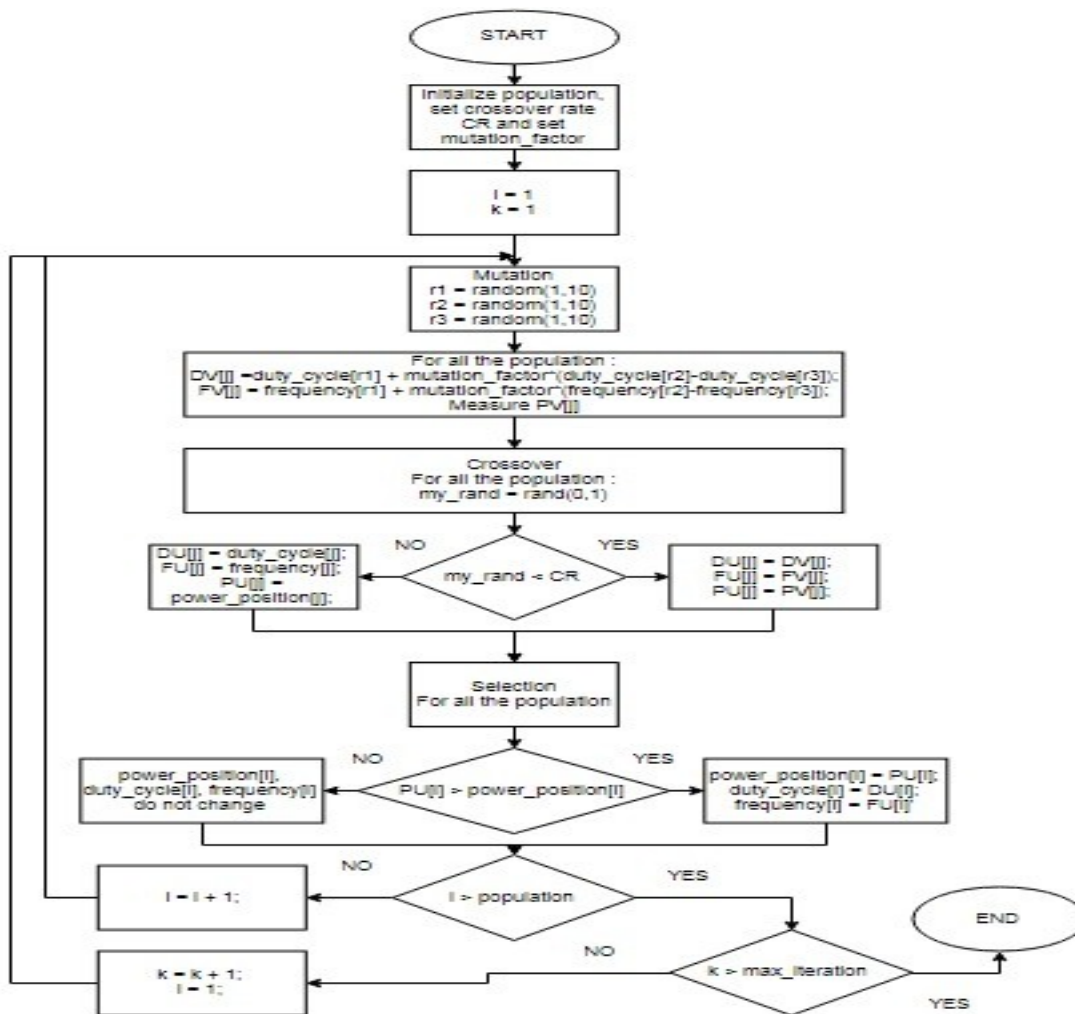
Τέλος, ο αλγόριθμος εκτελεί τη λειτουργία του Selection. Πρακτικά αυτό που κάνει είναι να συγκρίνει τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τις νέες μεταβλητές που προέκυψαν στο δοκιμαστικό διάνυσμα με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τις ήδη υπάρχουσες υποψήφιες λύσεις. Αν οι νέες τιμές των μεταβλητών που υπάρχουν στο δοκιμαστικό διάνυσμα δίνουν καλύτερα αποτελέσματα για την αντικειμενική συνάρτηση, τότε η υποψήφια λύση X αντικαθίσταται από την αντίστοιχη τιμή του δοκιμαστικού διανύσματος V . Αν δεν δίνουν καλύτερο αποτέλεσμα διατηρείται η τιμή της υποψήφιας λύσης που ήδη έχει ο αλγόριθμος.

Στην εφαρμογή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο στόχος είναι η εύρεση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καθώς και η μεγιστοποίηση της ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Συνεπώς, αντικειμενική συνάρτηση στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η ισχύς P στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC και οι μεταβλητές που την καθορίζουν είναι η σχετική διάρκεια αγωγής D_c και η συχνότητα διακοπτισμού f_s . Επομένως, ο αλγόριθμος Differential Evolution εκτελεί τη διαδικασία

που περιγράψαμε παραπάνω χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές τη σχετική διάρκεια αγωγής D_c και τη συχνότητα διακοπισμού f_s και ως αντικειμενική συνάρτηση την ισχύ P στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Όπως φαίνεται και στη σχέση 4.20 αν η ισχύς που προκύπτει για τις νέες μεταβλητές D_c και f_s είναι μεγαλύτερη από την ισχύ που προκύπτει για τις ήδη υπάρχουσες τιμές των D_c και f_s , τότε ο αλγόριθμος τις αντικαθιστά με τις νέες τιμές, διαφορετικά διατηρεί τις προηγούμενες:

$$P(D_i^k, F_i^k) > P(D_i^{k-1}, F_i^{k-1}) \quad (4.19)$$

Στο Σχήμα 4-10 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Differential Evolution.

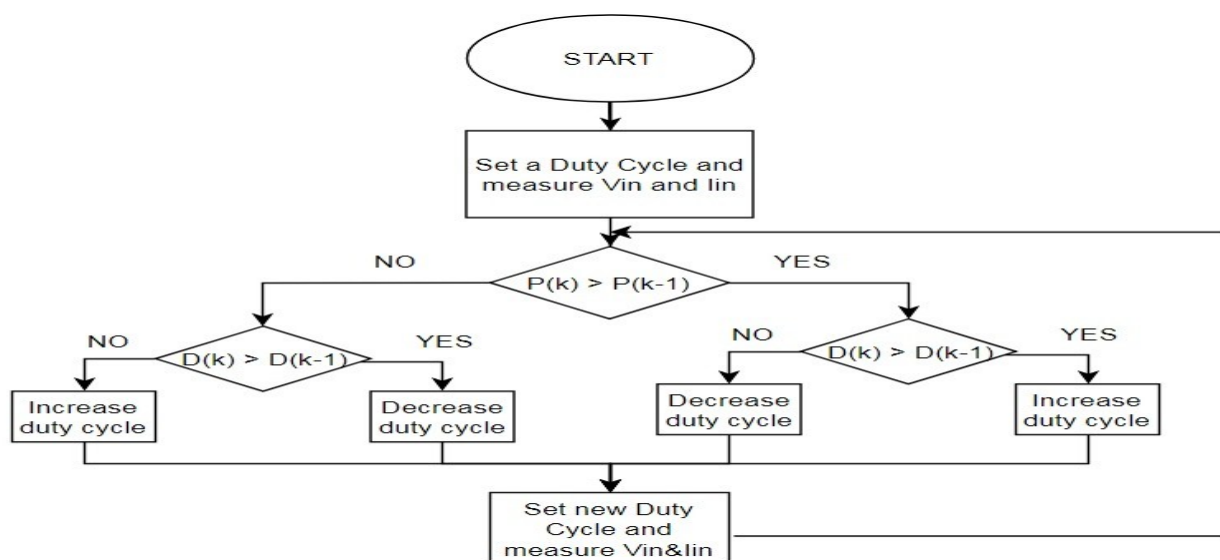


Σχήμα 4-10. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου *Differential Evolution*.

4.3 Ο αλγόριθμος Maximum Power Point Tracking

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την διατήρηση της λειτουργίας στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος στην είσοδο του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι ο αλγόριθμος Διαταραχής & Παρατήρησης (Perturb & Observe). Η λογική του αλγορίθμου βασίζεται στη διαταραχή της σχετικής διάρκειας αγωγής (duty cycle) που ελέγχει το μετατροπέα DC/DC. Ο μικροελεγκτής προκαλεί τη διαταραχή στο σήμα PWM και με τον τρόπο αυτό το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετακινείται επάνω στη χαρακτηριστική καμπύλης

ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC. Οι αισθητήρες του συστήματος μετράνε με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω την τιμή της ισχύος που προκύπτει μετά την εκάστοτε διαταραχή και ανάλογα με τη μέτρηση αυτή καθορίζεται η φορά της επόμενης διαταραχής. Πιο συγκεκριμένα, εάν μετά από μια αύξηση της σχετικής διάρκειας αγωγής D_c η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία προκύπτει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που είχε μετρηθεί για την προηγούμενη τιμή του duty cycle τότε στην επόμενη επανάληψη το duty cycle θα αυξηθεί ξανά. Αντίστοιχα, αν μετά από μια μείωση του duty cycle η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία προκύπτει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που είχε μετρηθεί για την προηγούμενη τιμή του duty cycle τότε στην επόμενη επανάληψη το duty cycle θα μειωθεί ξανά. Στην αντίθετη περίπτωση, αν το duty cycle αυξηθεί και η ισχύς που προκύπτει είναι μικρότερη από αυτή που είχε μετρηθεί με την προηγούμενη τιμή του duty cycle, τότε στην επόμενη επανάληψη η τιμή του duty cycle θα μειωθεί. Με την ίδια λογική, αν το duty cycle μειωθεί και η ισχύς που προκύπτει είναι μικρότερη από αυτή που είχε μετρηθεί με την προηγούμενη τιμή του duty cycle, τότε στην επόμενη επανάληψη η τιμή του duty cycle θα αυξηθεί. Συμπερασματικά, το σύστημα θα καταλήξει να ταλαντώνεται γύρω από το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



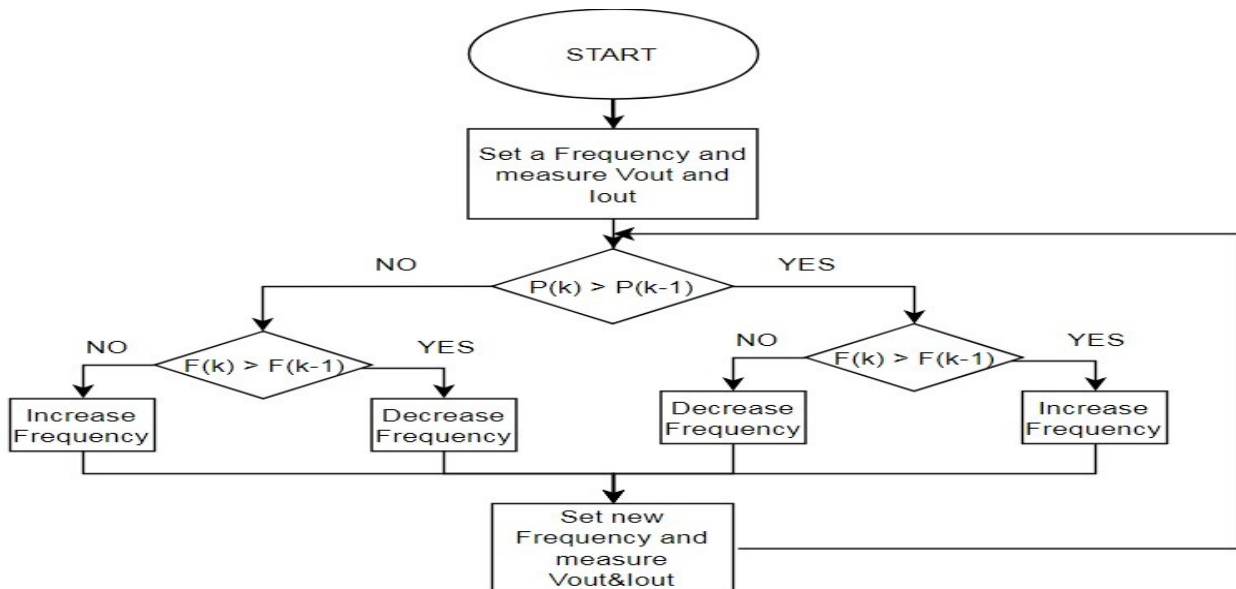
Σχήμα 4-11. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Maximum Power Point Tracking.

4.4 Ο αλγόριθμος Maximum Efficiency Point Tracking

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο στόχος του συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η παραγωγή της μέγιστης δυνατής ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Για το λόγο αυτόν, δεν αρκεί η εύρεση μόνο της βέλτιστης σχετικής διάρκειας αγωγής (duty cycle) που μεγιστοποιεί την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα αλλά πρέπει να υπολογιστεί και η κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού που μεγιστοποιεί την ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Η συχνότητα διακοπτισμού είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης και επομένως βρίσκοντας την κατάλληλη τιμή συχνότητας μπορεί να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος του. Δεδομένου ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί στο MPP, βρίσκοντας την κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC.

Η λογική του αλγορίθμου Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT) είναι η ίδια με αυτή του αλγορίθμου MPPT. Έχοντας μια αρχική συχνότητα διακοπτισμού f_s ο μικροελεγκτής τη διαταράσσει είτε αυξάνοντας την, είτε μειώνοντάς την. Μετά από κάθε διαταραχή μετريέται μέσω των αισθητήρων η τάση και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα DC/DC. Μέσω αυτών υπολογίζεται η ισχύς εξόδου του μετατροπέα ισχύος, η οποία συγκρίνεται με την ισχύ που είχε μετρηθεί με την προηγούμενη συχνότητα. Αν η διαταραχή της συχνότητας ήταν θετική και η νέα ισχύς είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τότε στην επόμενη επανάληψη η συχνότητα θα αυξηθεί ξανά. Αντίστοιχα, αν η διαταραχή της συχνότητας ήταν αρνητική και η νέα ισχύς είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τότε στην επόμενη επανάληψη η συχνότητα θα μειωθεί ξανά. Αν η διαταραχή της συχνότητας ήταν θετική και η νέα ισχύς είναι μικρότερη από την προηγούμενη τότε στην επόμενη επανάληψη η συχνότητα θα μειωθεί. Τέλος, αν η διαταραχή της συχνότητας ήταν αρνητική και η νέα ισχύς είναι μικρότερη από την προηγούμενη, τότε στην επόμενη επανάληψη η συχνότητα θα αυξηθεί. Η διαδικασία αυτή εκτελείται επαναληπτικά και μόλις ο αλγόριθμος συγκλίνει θα ταλαντώνεται γύρω από τη συχνότητα που κάνει τη λειτουργία του μετατροπέα DC/DC αποτελεσματικότερη και προκαλεί την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ισχύος στην έξοδό του.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT).



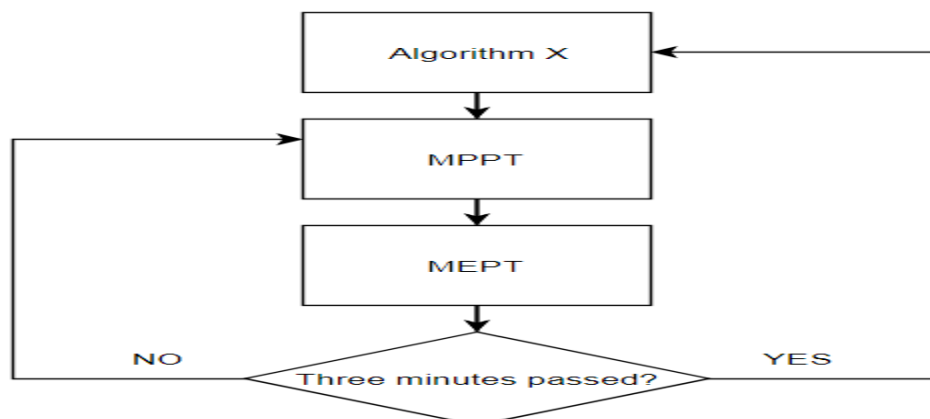
Σχήμα 4-12. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Maximum Efficiency Point Tracking.

4.5 Σειρά εκτέλεσης αλγορίθμων

Στόχος τους συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η επίτευξη παραγωγής της μέγιστης δυνατής ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης ανεξάρτητα από τις συνθήκες ακτινοβολίας (ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη) κάτω από τις οποίες λειτουργεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η αποτελεσματική λειτουργία του συστήματός απαιτεί το συνδυασμό των παραπάνω αλγορίθμων έτσι ώστε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματά τους αλλά και να περιορίσουμε τα μειονεκτήματά τους. Όπως έχει αναφερθεί, οι κλασσικοί αλγόριθμοι για MPPT όπως ο P&O (και κατ' επέκταση ο MEPT) είναι αναποτελεσματικοί σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς μπορεί να εγκλωβιστούν σε κάποιο τοπικό μέγιστο και να μην συγκλίνουν στο ολικό μέγιστο. Παρ' όλα αυτά, έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν

πολλά βήματα για την εκτέλεσή τους. Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι Grey Wolf Optimizer, Flower Pollination Algorithm και Jaya Algorithm μπορούν να βρουν αποτελεσματικά το MPP ανεξαρτήτως των συνθηκών της ακτινοβολίας όμως υστερούν στο χρόνο εκτέλεσης. Η εκτέλεσή τους απαιτεί τη διέλευση από πολλά εναλλακτικά σημεία λειτουργίας επάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης κάτι που συνεπάγεται μεγάλο χρόνο αλλά και χαμένη ισχύ. Το trade-off αυτό αντιμετωπίζει ο συνδυασμός τους, ο οποίος πραγματοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Καθένας από τους αλγορίθμους Grey Wolf Optimizer, Flower Pollination Algorithm, Jaya Algorithm και Differential Evolution Algorithm εκτελείται ξεχωριστά και σε συνδυασμό με τους αλγορίθμους MPPT και MEPT. Πιο συγκεκριμένα, εκτελείται πρώτα ο ένα από τους τρεις, π.χ. ο Grey Wolf Optimizer, και στη συνέχεια ακολουθεί ο MPPT και ο MEPT. Η ιδέα αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι θα εκτελεστεί αρχικά ο ένας από τους τρεις αλγορίθμους (GWO, FPA, Jaya, DE) ώστε να βρει το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) ανεξάρτητα από τις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή ακόμα και αν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης) και στη συνέχεια οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT οι οποίοι θα ξεκινήσουν τη λειτουργία τους από το σημείο στο οποίο σταμάτησε ο πρώτος αλγόριθμος, το σημείο δηλαδή που αντιστοιχεί στο καθολικό μέγιστο της ισχύος εισόδου και ταυτόχρονα προκαλεί την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT θα διατηρήσουν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο που εντόπισε ο πρώτος αλγόριθμος ή ενδεχομένως θα το βελτιώσουν λίγο ακόμα. Με τον τρόπο αυτό οι αλγόριθμοι GWO, FPA, Jaya και DE δεν είναι απαραίτητο να εκτελούνται συνεχώς, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες ισχύος, αλλά μετά από κάποια λεπτά που οι συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας θα έχουν αλλάξει και πιθανόν το MPP της φωτοβολταϊκής συστοιχίας θα έχει μετακινηθεί. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η σειρά εκτέλεσης των αλγορίθμων, όπου “Algorithm X” είναι ένας από τους τρεις αλγορίθμους Grey Wolf Optimizer, Flower Pollination Algorithm, Jaya Algorithm και Differential Evolution Algorithm, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-13. Σειρά εκτέλεσης των αλγορίθμων στο μικροελεγκτή.

Πρακτικά, ο μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης απαιτεί ένα μικρό χρονικό διάστημα από τη στιγμή που θα δεχθεί το PWM σήμα ελέγχου μέχρι να σταθεροποιηθεί το ρεύμα στην έξοδό του στη νέα του τιμή. Ο χρόνος αυτός είναι της τάξης των μερικών δεκάδων msec (η τιμή του εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος) και για να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος εξόδου με ακρίβεια χρειάζεται να περιμένουμε μέχρι να ολοκληρωθεί αυτό το χρονικό διάστημα. Για να επιτευχθεί αυτή η απαραίτητη καθυστέρηση κατά την εκτέλεση του λογισμικού ελέγχου του μετατροπέα DC/DC, χρησιμοποιείται η συνάρτηση delay του Arduino με την οποία εισάγεται η επιθυμητή καθυστέρηση. Η καθυστέρηση αυτή είναι μικρή σε σχέση με τη συνολική διάρκεια των 3-5 λεπτών με την οποία επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τους αλγορίθμους MPPT και MEPT και δεν δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η συνάρτηση delay είναι μια blocking function, μια συνάρτηση δηλαδή που σταματά την εκτέλεση του κώδικα μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτέλεση της. Αυτό δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία του συστήματος MPPT, καθώς δεν χρησιμοποιείται κάποια άλλη παράλληλη λειτουργία του μικροελεγκτή που να διακόπτεται κατά την εκτέλεση της συνάρτησης delay. Το σύστημα περιμένει τον απαραίτητο χρόνο μέχρι να διαβάσει τις τιμές των αισθητήρων και συνεχίζεται η εκτέλεση του αλγορίθμου MPPT. Σε ότι αφορά την κατανάλωση ισχύος από το μικροελεγκτή αυτή είναι της τάξης των μερικών δεκάδων mWatt και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σύγκριση με την ισχύ του

φωτοβολταϊκού συστήματος που αναπτύχθηκε, η οποία, αναλόγως των μετεωρολογικών συνθηκών, μπορεί να φτάσει μέχρι και 40 W. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ελέγχου είναι πολύ μικρότερη από την παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Σημειώνεται επίσης ότι η ίδια ακριβώς μονάδα ελέγχου με τους αλγορίθμους MPPT που έχουν περιγραφεί παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της λειτουργίας και φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος (από δεκάδες Watt έως εκατοντάδες kWatt).

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

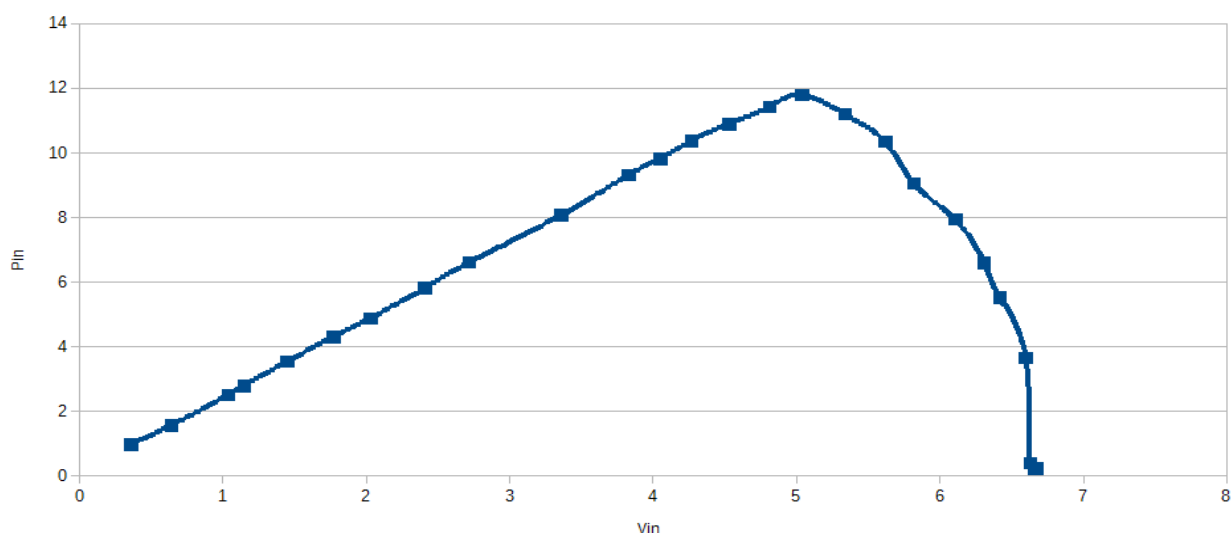
5.1 Πειραματικά αποτελέσματα Grey Wolf Optimizer, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Αρχικά το σύστημα δοκιμάστηκε σε ομοιόμορφη ακτινοβολία. Η σειρά εκτέλεσης των αλγορίθμων έχει ως εξής : πρώτα εκτελείται ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer (GWO), στη συνέχεια ο αλγόριθμος Maximum Power Point Tracking (MPPT) και τέλος ο αλγόριθμος Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT). Ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimization εκτελείται για έναν πληθυσμό 10 λύκων οι οποίοι αλλάζουν θέσεις (duty cycle, frequency) για 20 επαναλήψεις. Μετά το πέρας των 20 επαναλήψεων ακολουθούν οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT οι οποίοι διατηρούν το σύστημα στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) αλλά και στη συχνότητα που μεγιστοποιεί το βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι εξής πληροφορίες :

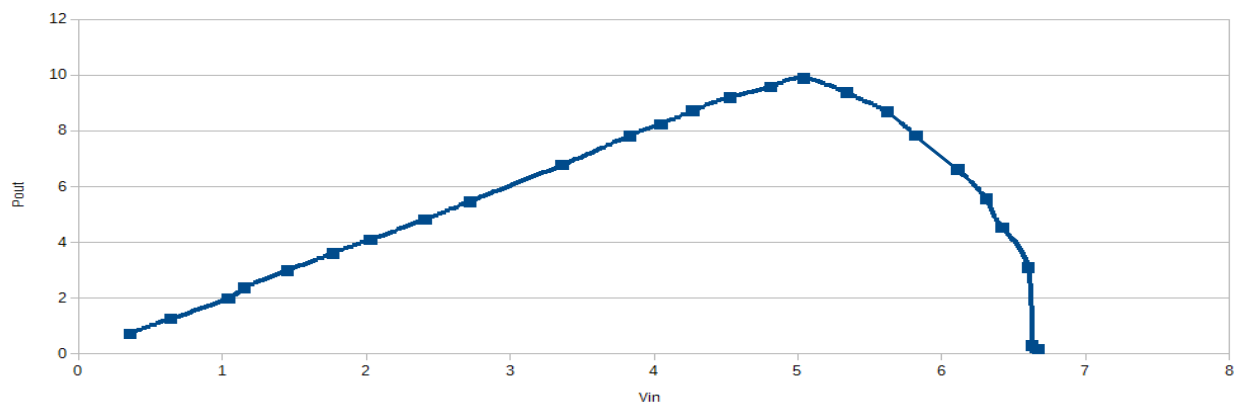
- Χαρακτηριστική κυματομορφή ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για $f_s = 100\text{kHz}$
- Χαρακτηριστική κυματομορφή ισχύος-τάσης στην έξοδο του boost converter για $f_s = 100\text{kHz}$

- Οι θέσεις των υποψήφιων λύσεων στην αρχή, τη μέση, και το τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου
- Κυματομορφή της ισχύος εισόδου του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.
- Κυματομορφή της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.
- Κυματομορφή της συχνότητας switching του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.
- Κυματομορφή του duty cycle του σήματος PWM που ελέγχει τον μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.
- Κυματομορφή του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

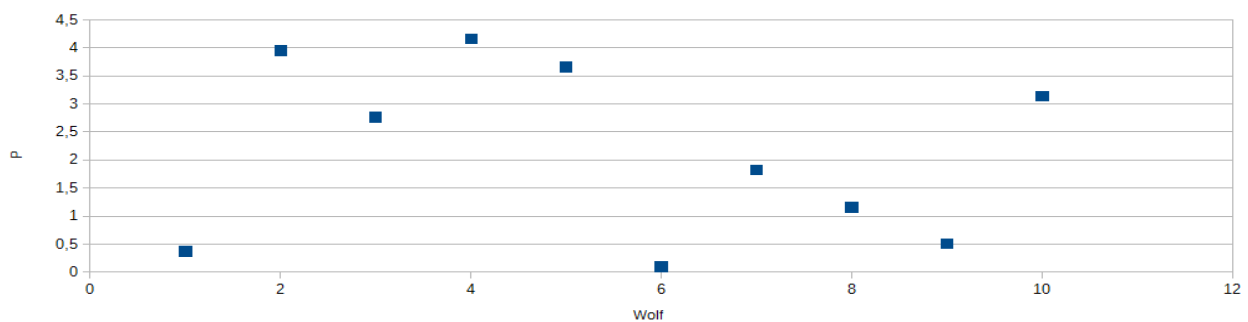
Τα σχήματα 5-1 έως 5-10 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας με ένταση ίση με 400W/m^2 .



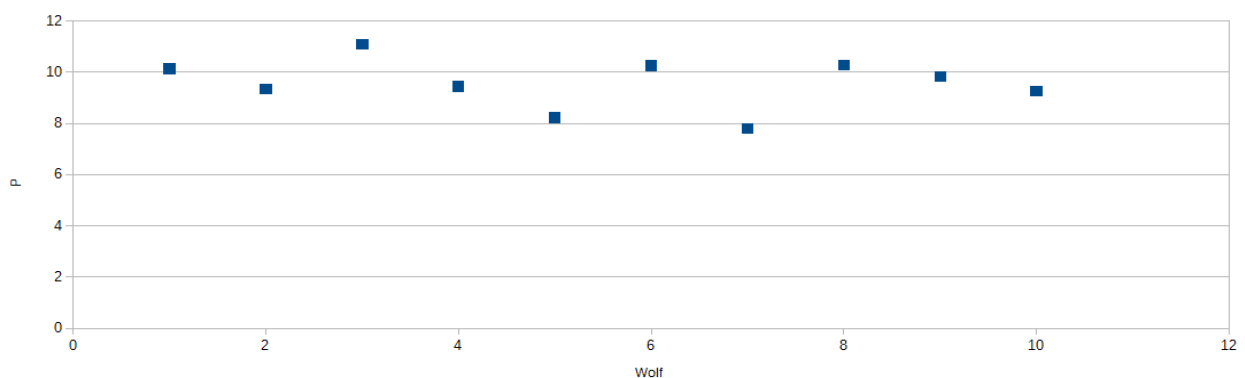
Σχήμα 5-1. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 400W/m^2 .



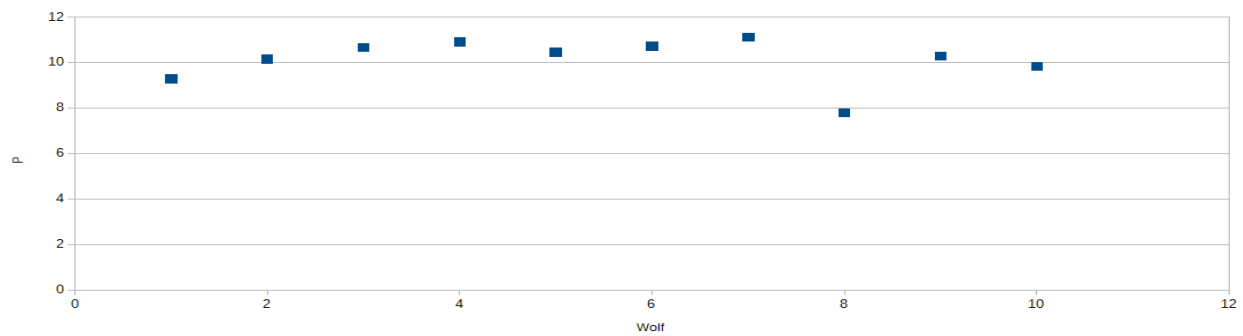
Σχήμα 5-2. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $400W/m^2$.



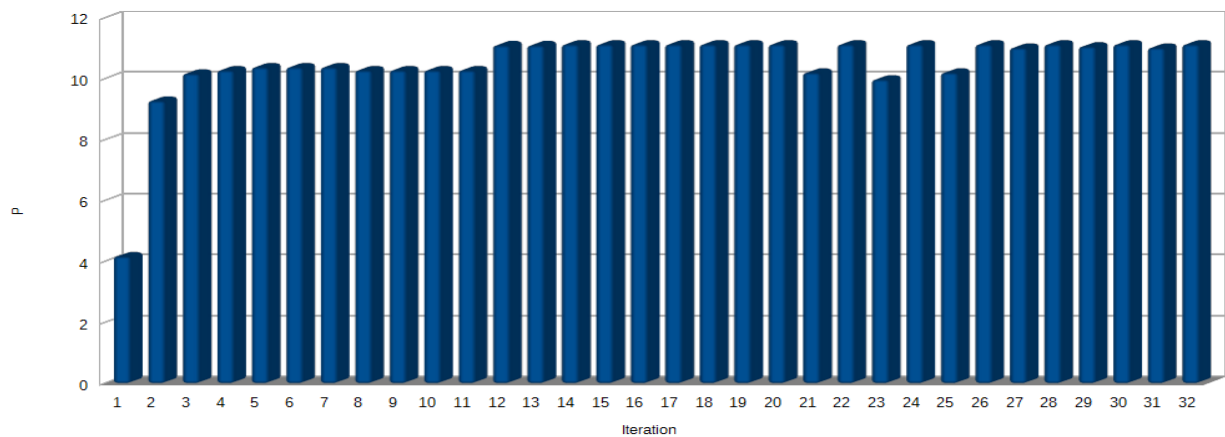
Σχήμα 5-3. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



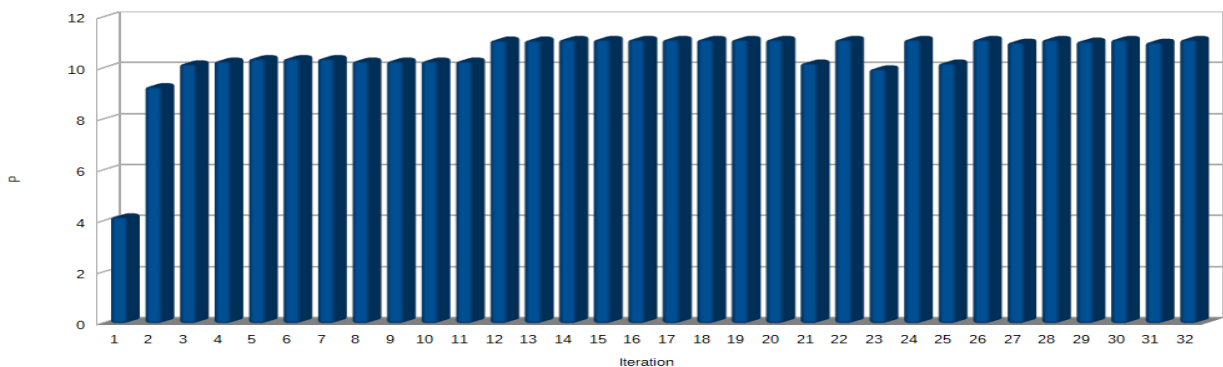
Σχήμα 5-4. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



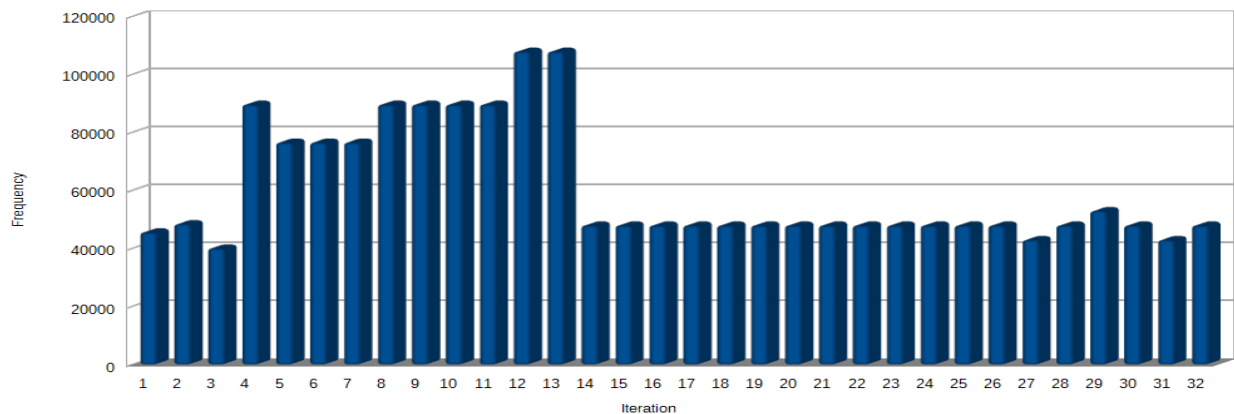
Σχήμα 5-5. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



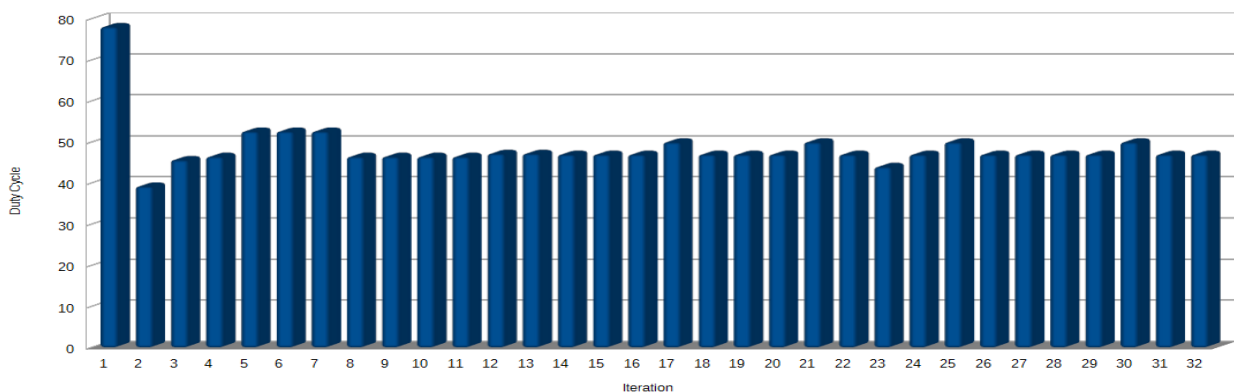
Σχήμα 5-6. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



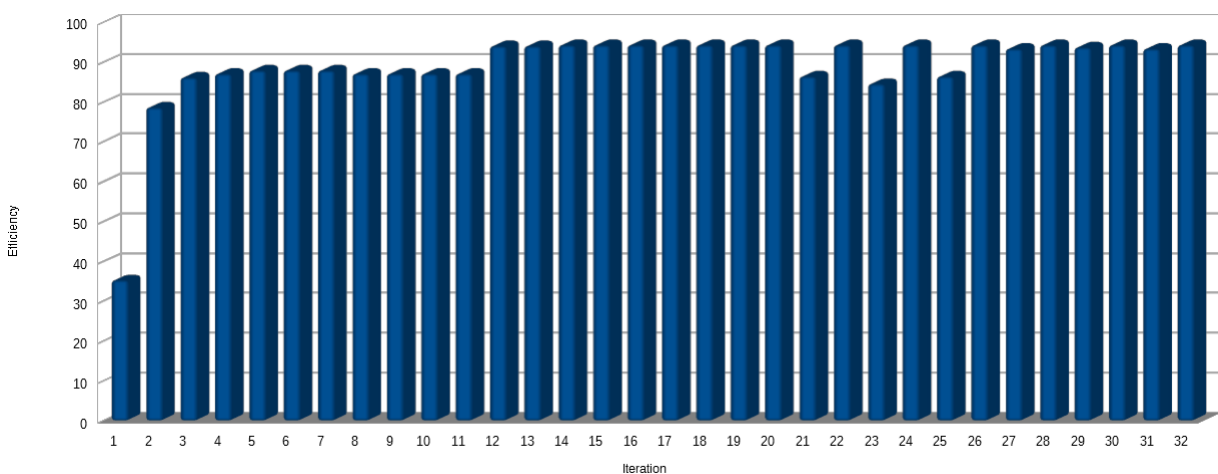
Σχήμα 5-7. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-8. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



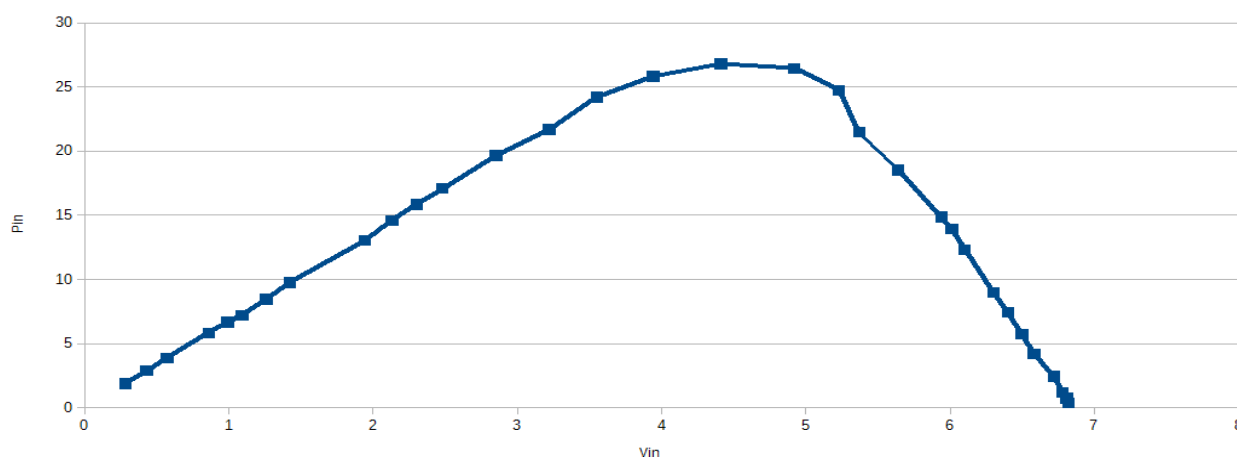
Σχήμα 5-9. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



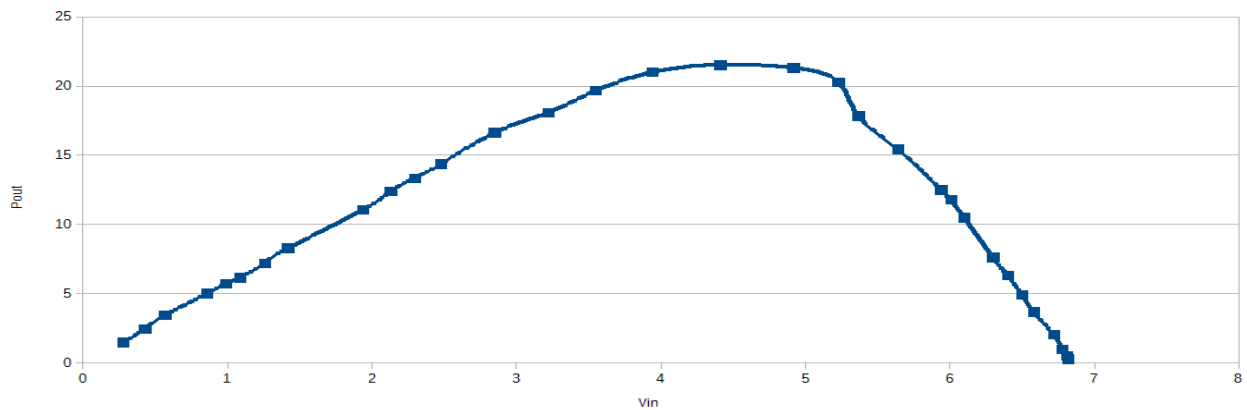
Σχήμα 5-10. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer εντοπίζει το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος στη είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (MPP) και τη συχνότητα διακοπτισμού η οποία μεγιστοποιεί τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Η εύρεση της κατάλληλης συχνότητας βελτιώνει το βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC κατά 11.5% περίπου, καθώς όπως μπορούμε να δούμε από τα σχήματα 5-1, 5-2 και 5-10 η απόδοση του μετατροπέα λειτουργώντας στο MPP για συχνότητα 100kHz είναι περίπου ίση με 82.5% ενώ βρίσκοντας την κατάλληλη συχνότητα και λειτουργώντας επίσης στο MPP η απόδοση αυξάνεται σε 94%. Η εκτέλεση του αλγορίθμου Grey Wolf Optimizer ολοκληρώνεται μετά από 20 επαναλήψεις. Επομένως, στα ραβδοδιαγράμματα παραπάνω μετά την εικοστή επανάληψη εκτελούνται οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT με συνέπεια το σημείο να ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Σε μερικές περιπτώσεις η ταλάντωση αυτή δεν είναι ευδιάκριτη στο σχήμα λόγω της μικρής μεταβολής.

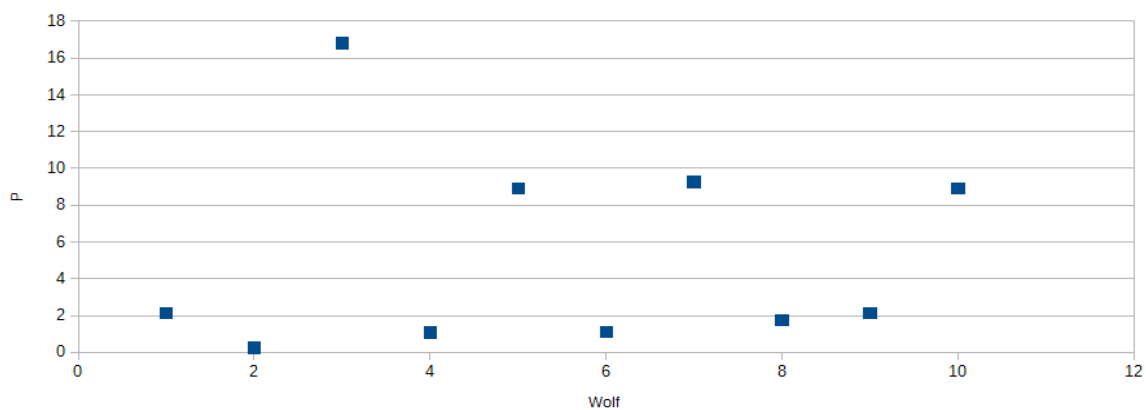
Τα σχήματα 5-11 έως 5-20 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας έντασης ίσης με 800W/m^2 .



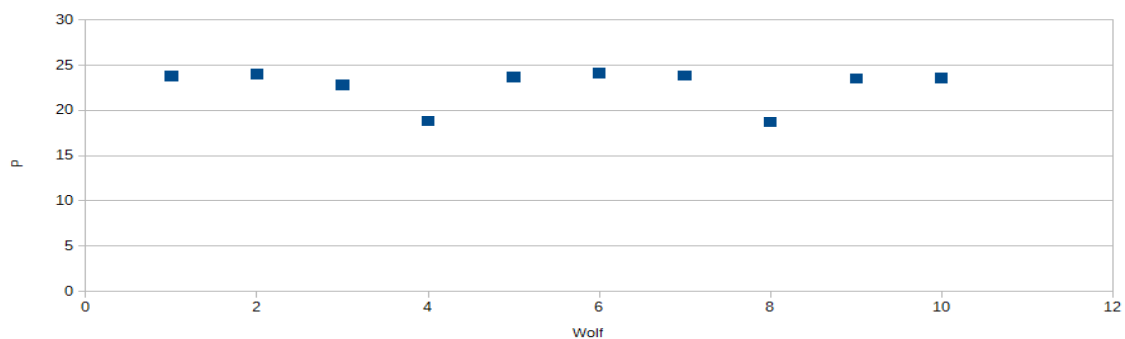
Σχήμα 5-11. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800W/m^2 .



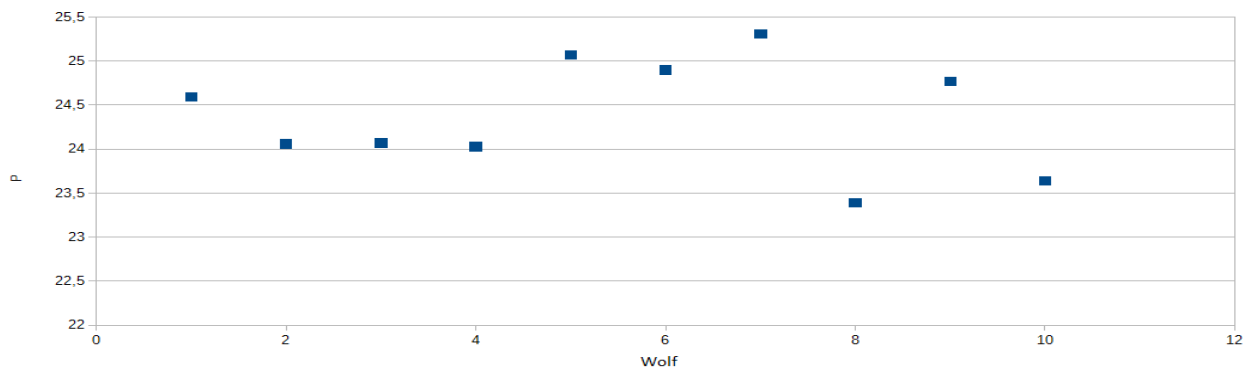
Σχήμα 5-12. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $800W/m^2$.



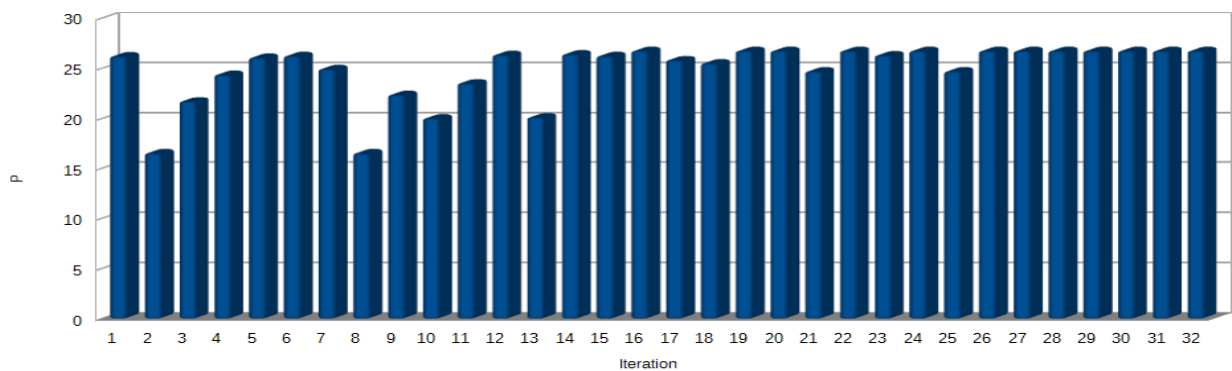
Σχήμα 5-13. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



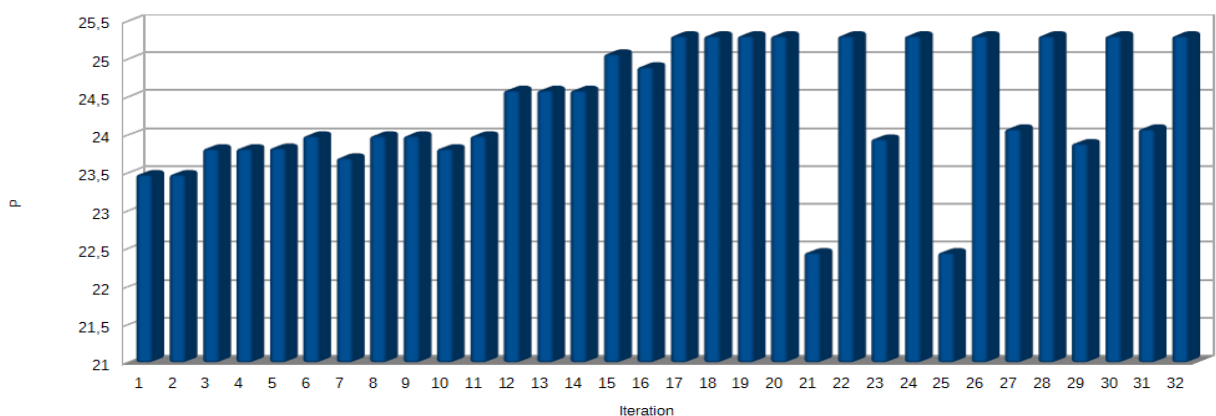
Σχήμα 5-14. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στην μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



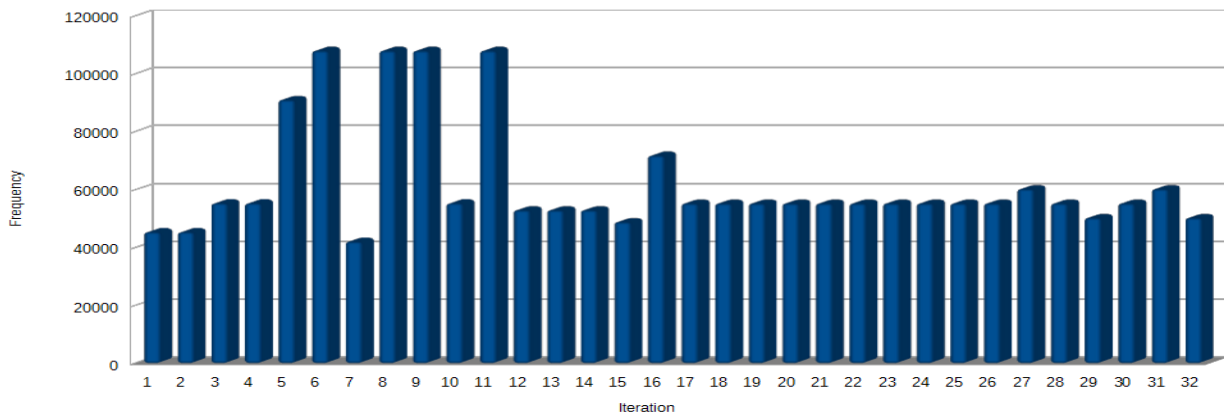
Σχήμα 5-15. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



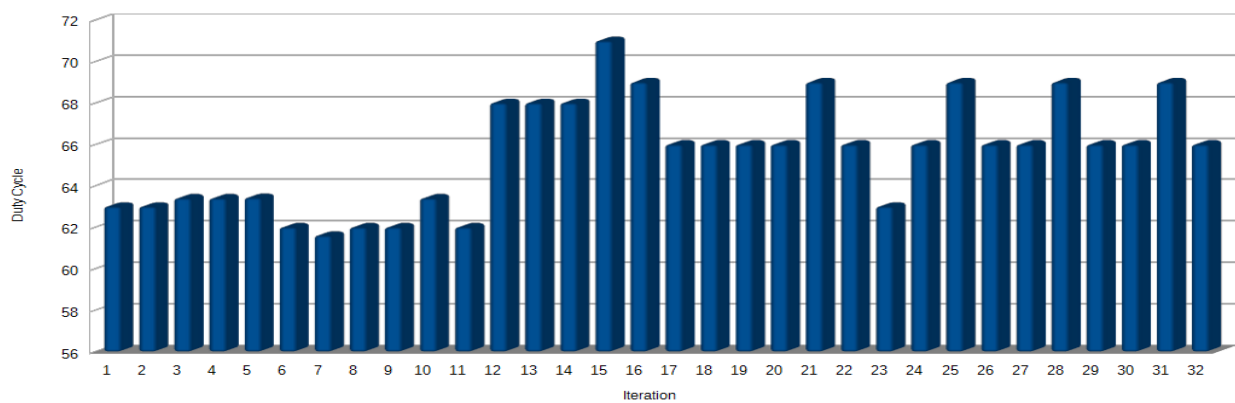
Σχήμα 5-16. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



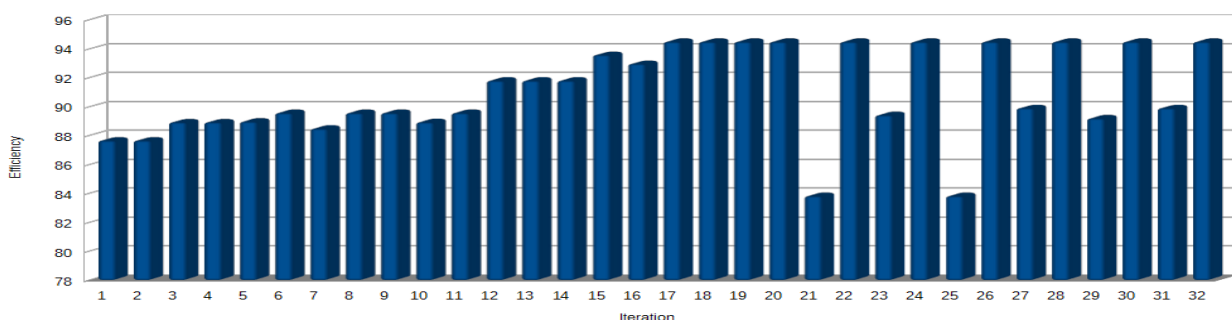
Σχήμα 5-17. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-18. Διάγραμμα της συχνότητας *switching* για την καλύτερη υποψήφια λύση (*wolf*) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-19. Διάγραμμα του *duty cycle* (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (*wolf*) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



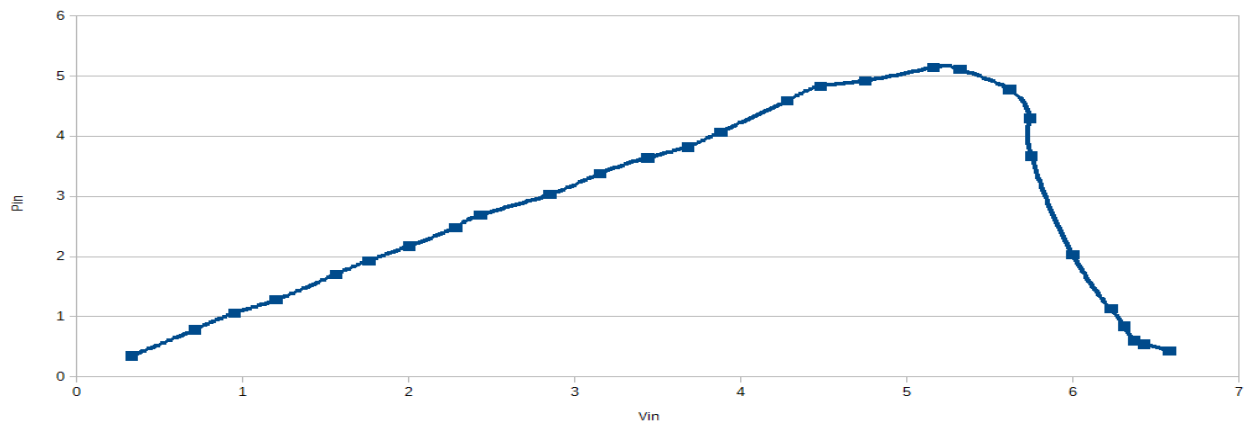
Σχήμα 5-20. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (*wolf*) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer εντοπίζει το MPP και την καλύτερη συχνότητα λειτουργίας και στη συνέχεια οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν τη λειτουργία στο σημείο αυτό μέχρι την πάροδο του απαραίτητου χρόνου ώστε να εκτελεσθεί ξανά ο Grey Wolf Optimizer. Επιπλέον, παρατηρείται και πάλι μια αύξηση της τάξης του 14% στον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC, ο οποίος με την κατάλληλη συχνότητα που βρέθηκε λειτουργεί με απόδοση περίπου 94.4% ενώ για συχνότητα 100kHz λειτουργεί με απόδοση 80.3%. Όπως και πριν, η εκτέλεση του αλγορίθμου Grey Wolf Optimizer ολοκληρώνεται μετά από 20 επαναλήψεις. Επομένως, στα ραβδοδιαγράμματα παραπάνω μετά την εικοστή επανάληψη εκτελούνται οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT με συνέπεια το σημείο να ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Σε μερικές περιπτώσεις η ταλάντωση αυτή δεν είναι ευδιάκριτη στο σχήμα λόγω της μικρής μεταβολής.

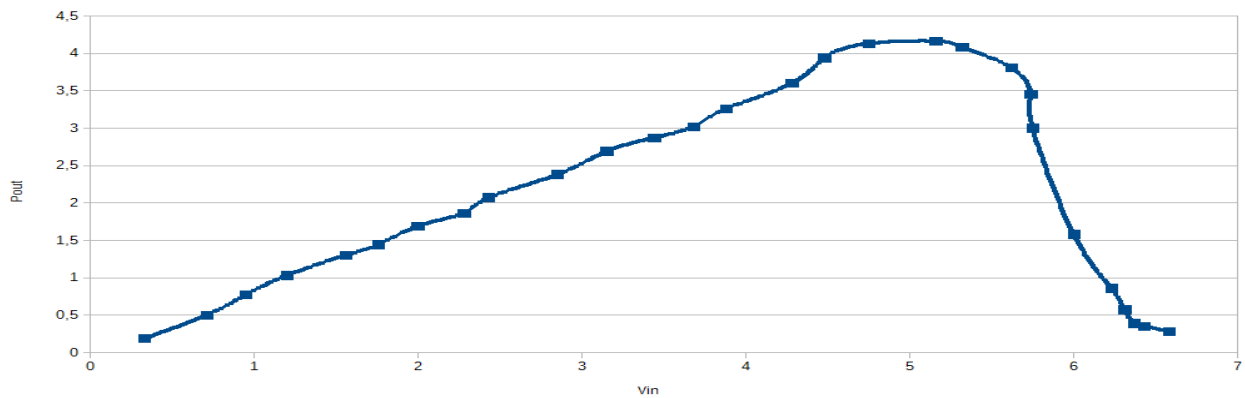
5.2 Πειραματικά αποτελέσματα Flower Pollination, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων το σύστημα δοκιμάστηκε σε ομοιόμορφη ακτινοβολία με πρώτη την εκτέλεση του Flower Pollination αλγορίθμου και στη συνέχεια των αλγορίθμων MPPT και MEPT. Ο αλγόριθμος Flower Pollination έτρεξε για 20 επαναλήψεις και πληθυσμό 10 επικονιαστών. Τα πειραματικά αποτελέσματα που φαίνονται στη συνέχεια περιέχουν πληροφορία όπως και αυτά των προηγούμενων πειραμάτων στην παράγραφο 5.1.

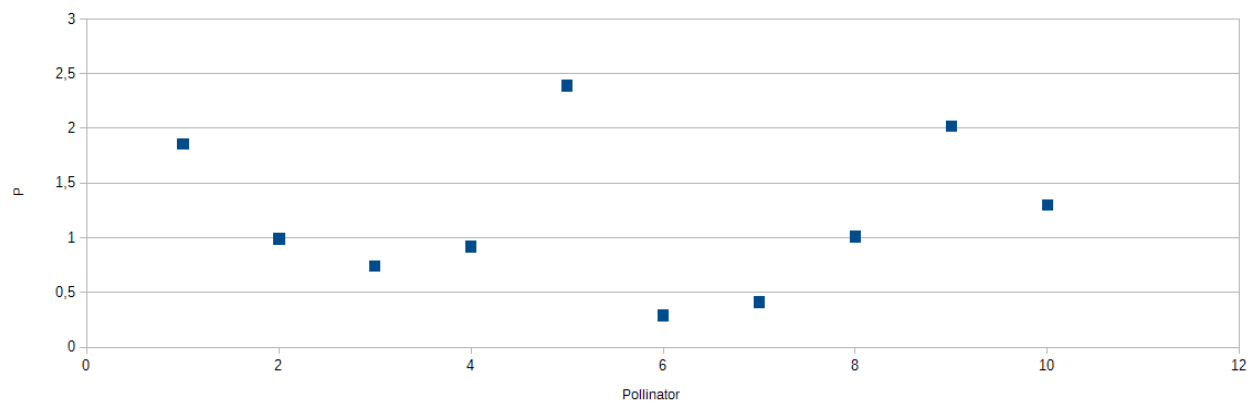
Τα σχήματα 5-21 έως 5-30 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας έντασης ίσης με 200W/m^2 .



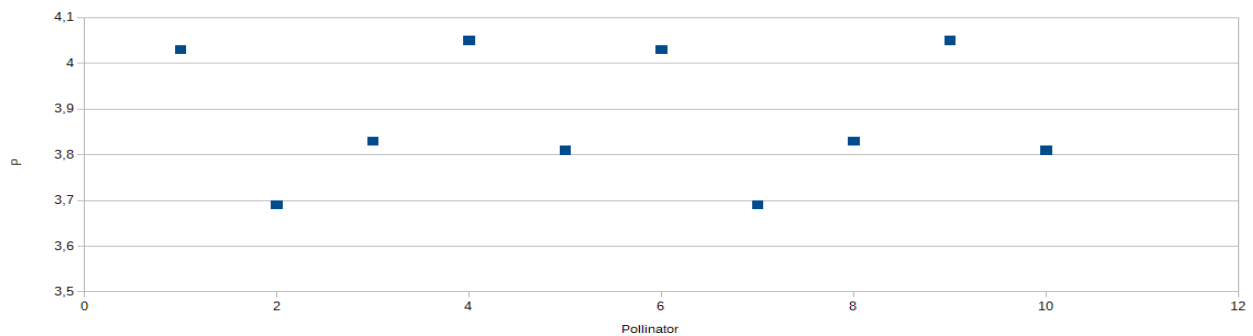
Σχήμα 5-21. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $200W/m^2$.



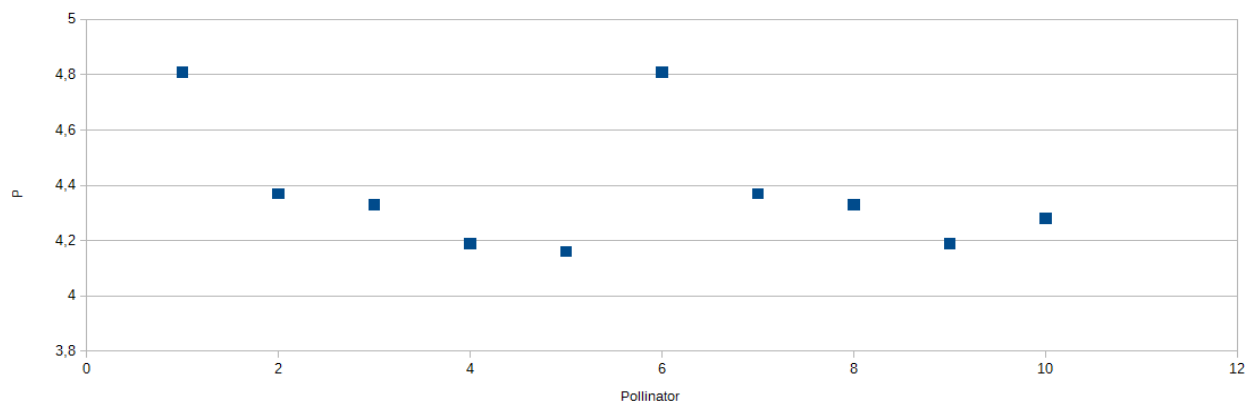
Σχήμα 5-22. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $200W/m^2$.



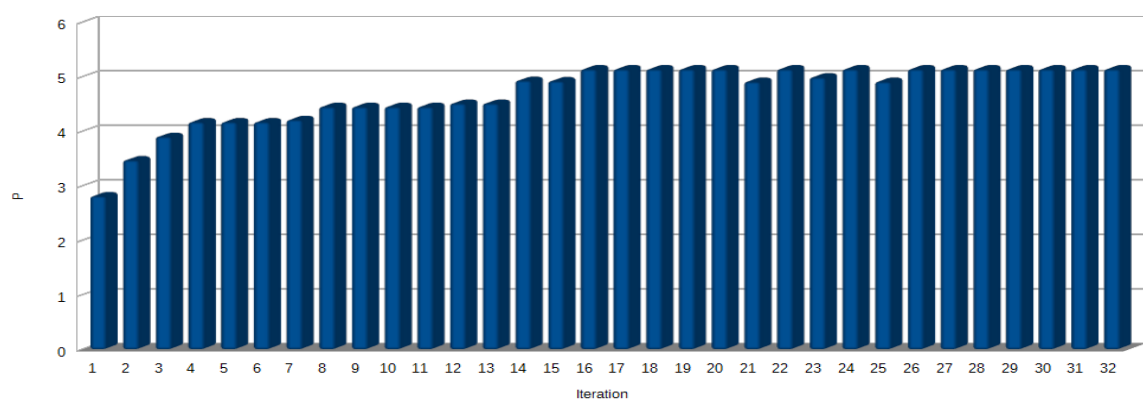
Σχήμα 5-23. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



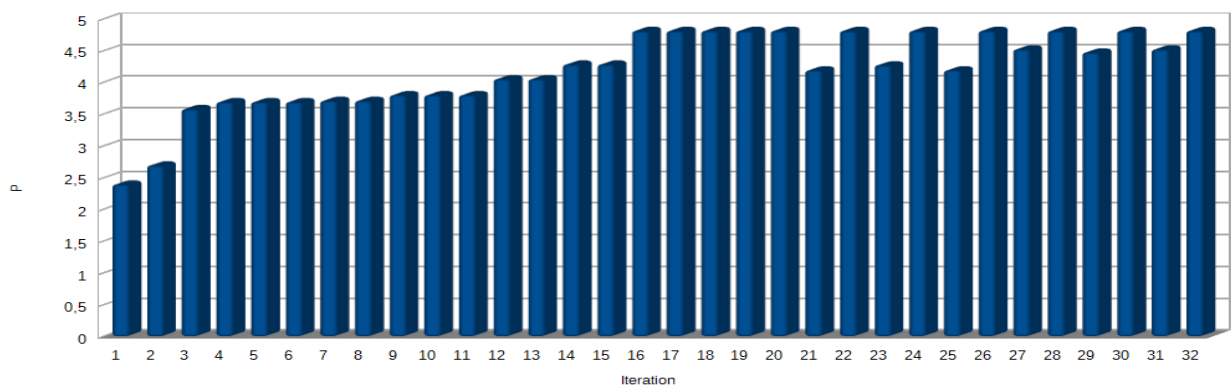
Σχήμα 5-24. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



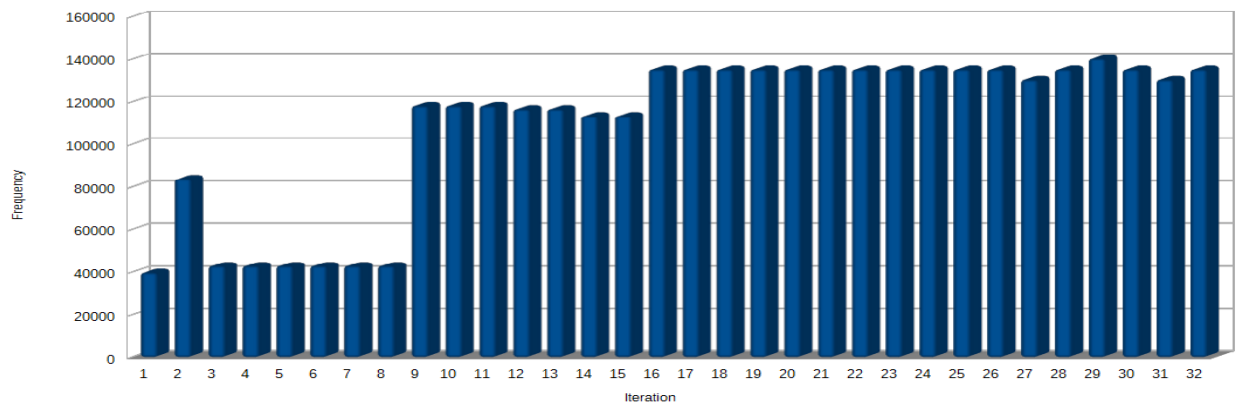
Σχήμα 5-25. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



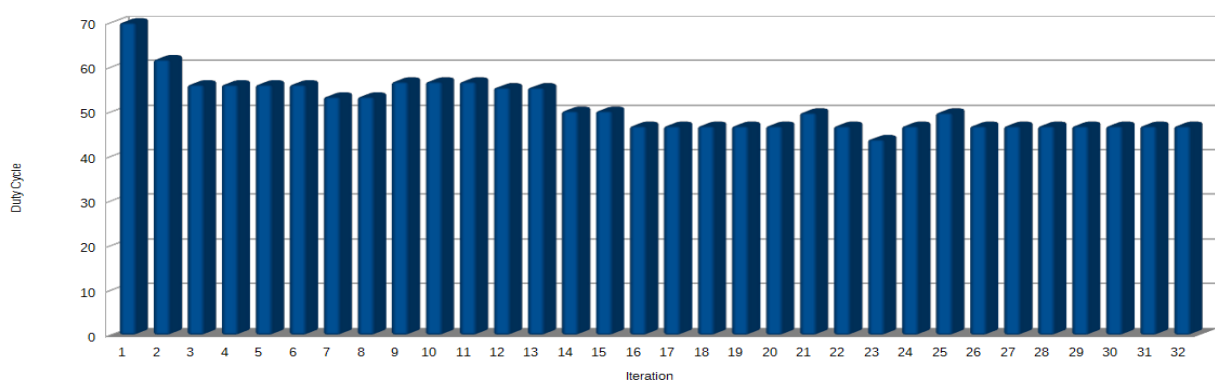
Σχήμα 5-26. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



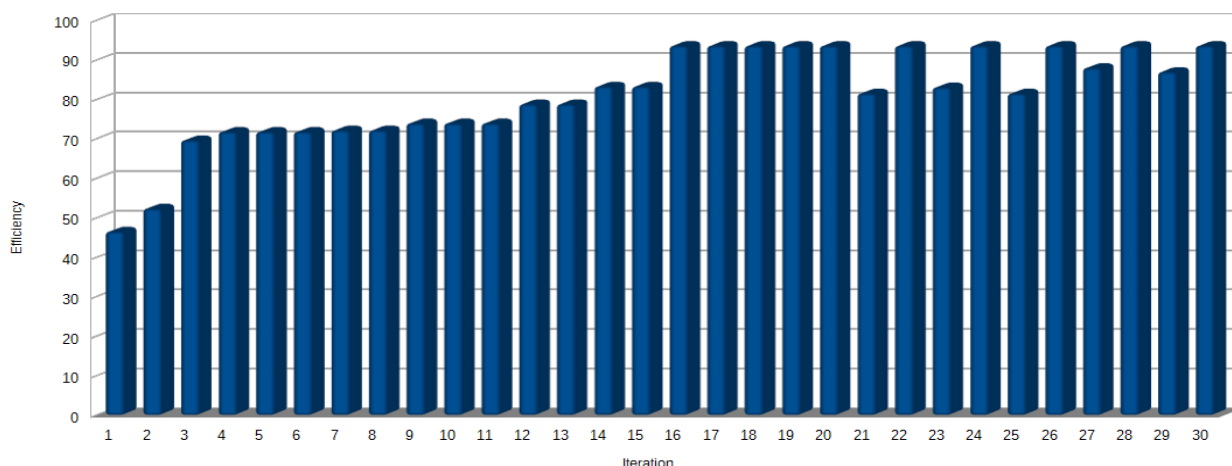
Σχήμα 5-27. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-28. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



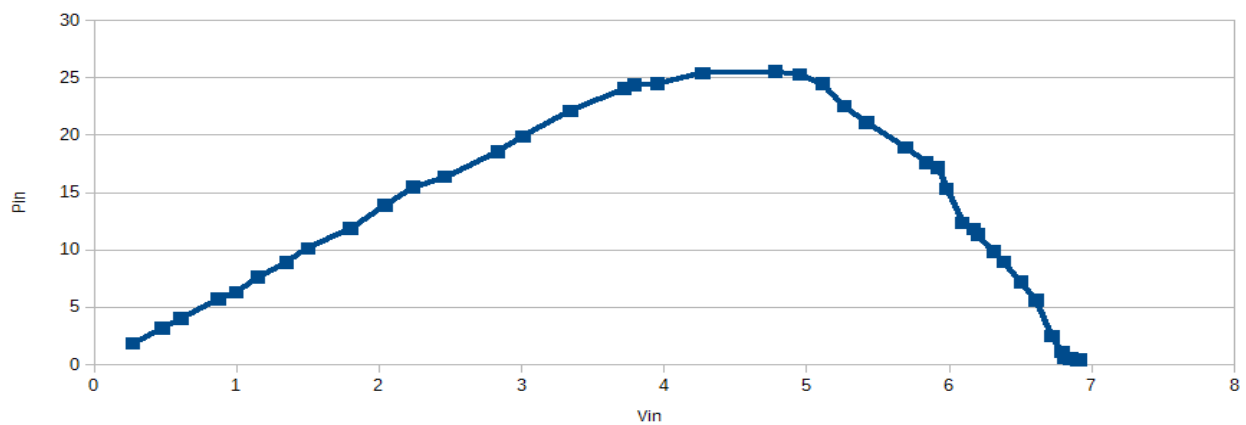
Σχήμα 5-29. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



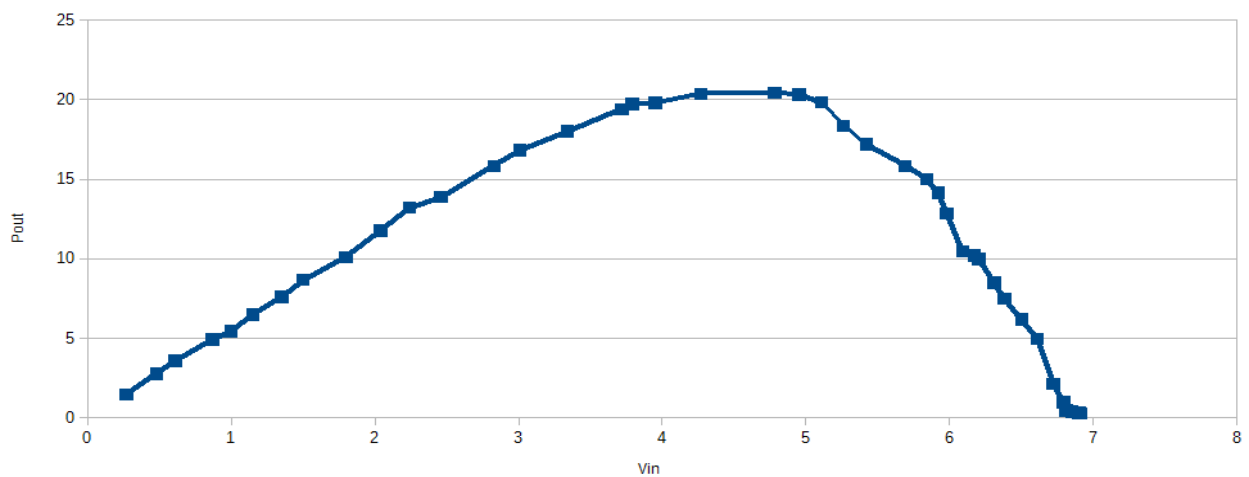
Σχήμα 5-30. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (*pollinator*) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως φαίνεται και στα γραφήματα ο αλγόριθμος Flower Pollination βρίσκει το βέλτιστο ζεύγος συχνότητας-σχετικής διάρκειας αγωγής και στη συνέχεια οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν το σύστημα στο σημείο λειτουργίας αυτό. Η εκτέλεση του Flower Pollination Algorithm τελειώνει μετά από την εικοστή επανάληψη. Μετά από αυτή εκτελούνται διαδοχικά οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT και το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-30 μετά την εικοστή επανάληψη. Η εύρεση του maximum power point είναι πάρα πολύ αποτελεσματική καθώς ο αλγόριθμος το βρίσκει με ακρίβεια 99%. Ακόμα, ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα είναι πολύ καλός και αυξημένος σε σχέση με το να λειτουργούσε με μια προκαθορισμένη συχνότητα διακοπισμού κατά περίπου 12%.

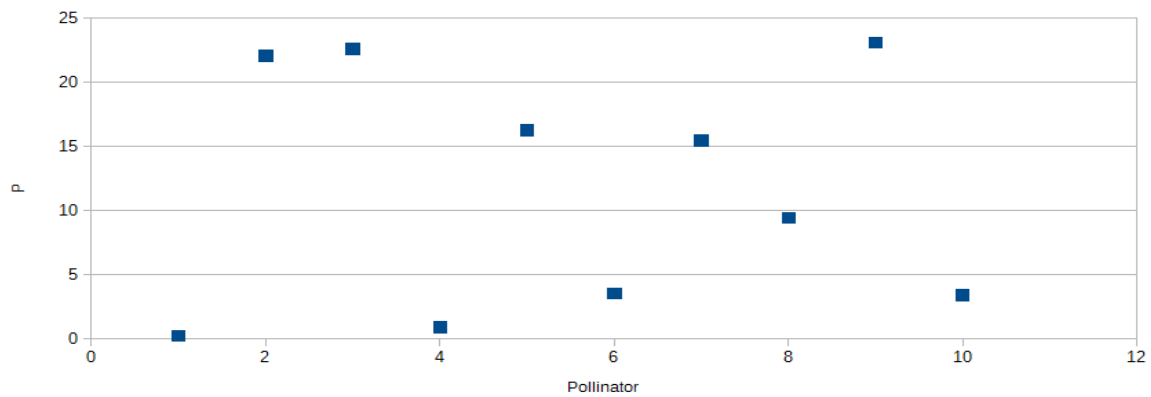
Τα σχήματα 5-31 έως 5-40 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας έντασης ίσης με 700W/m^2 .



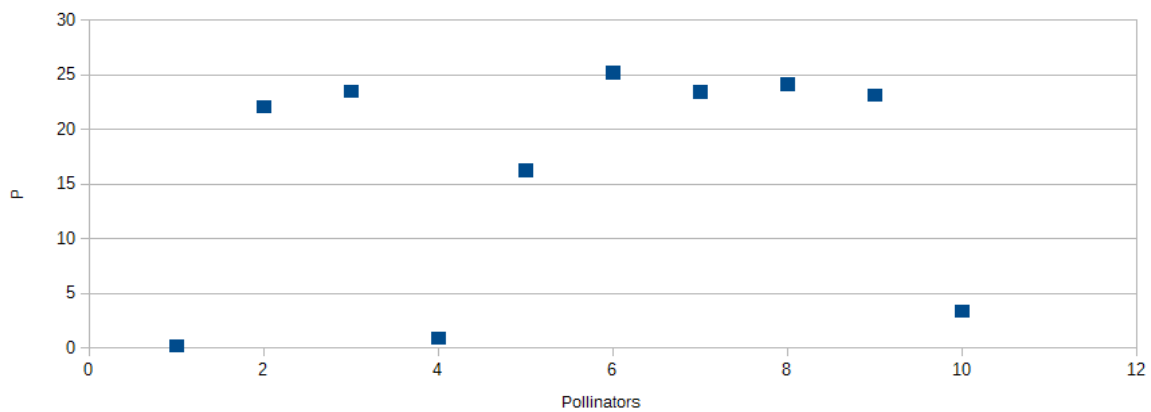
Σχήμα 5-31. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 700W/m^2 .



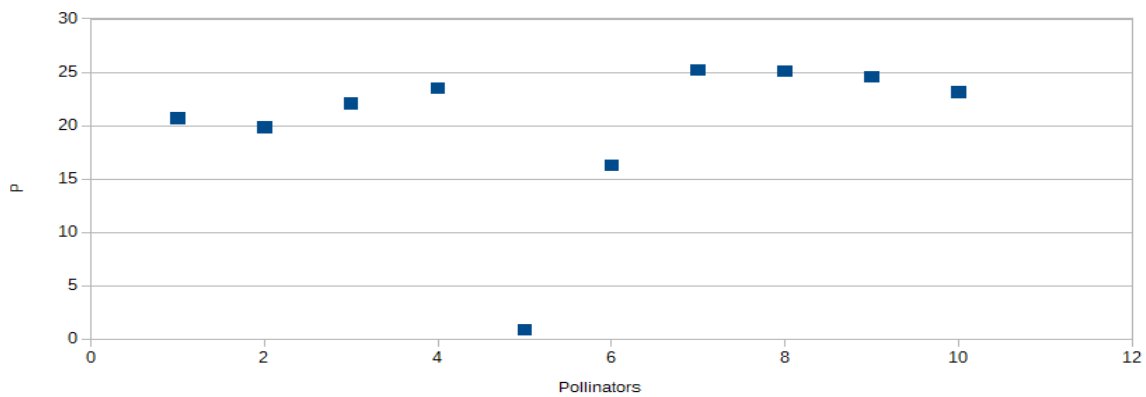
Σχήμα 5-32. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 700W/m^2 .



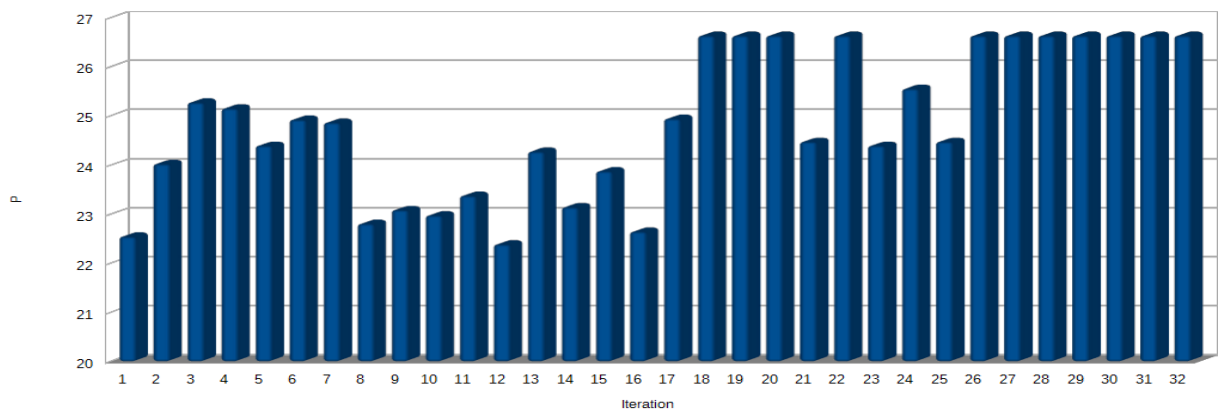
Σχήμα 5-33. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



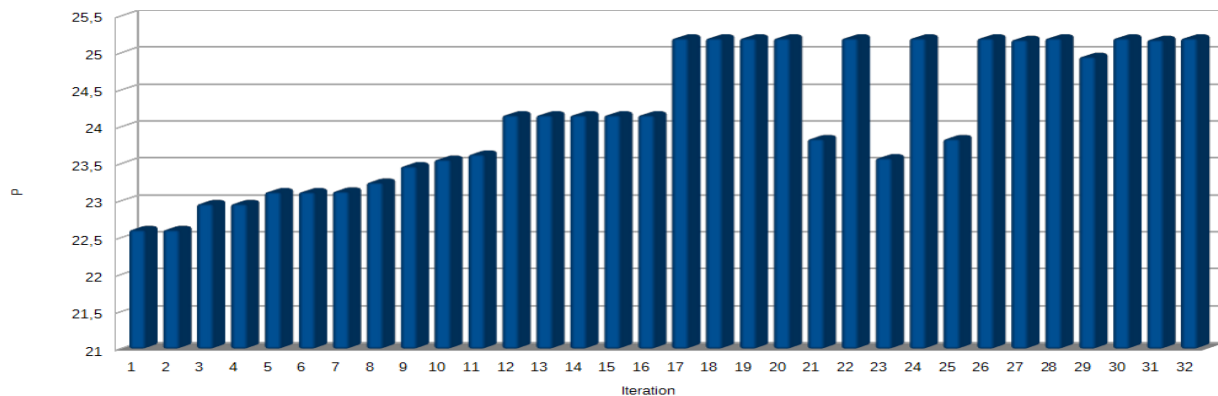
Σχήμα 5-34. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



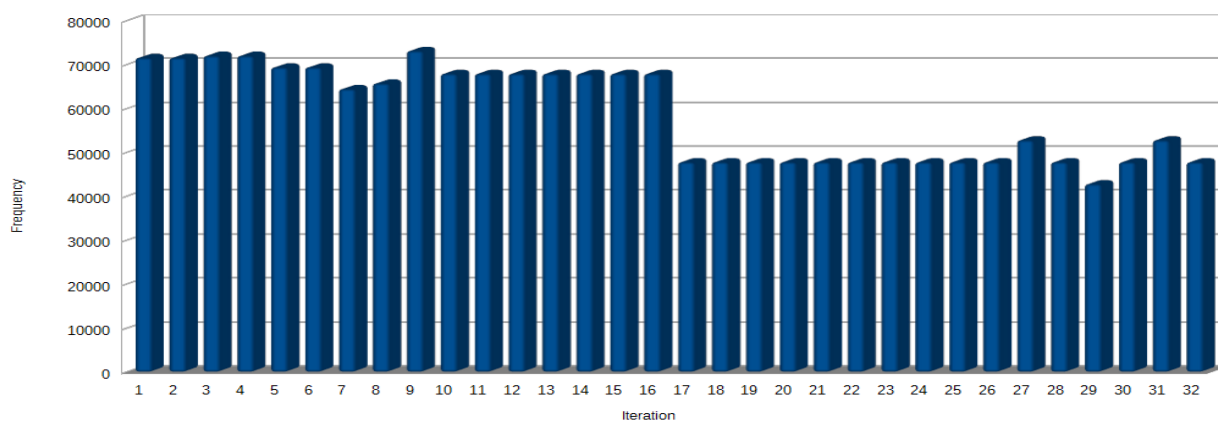
Σχήμα 5-35. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



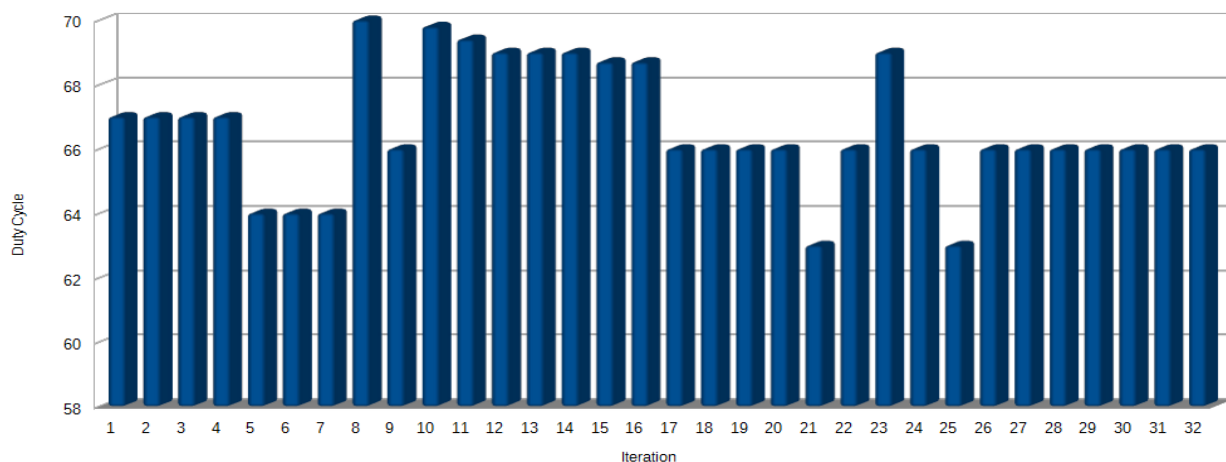
Σχήμα 5-36. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



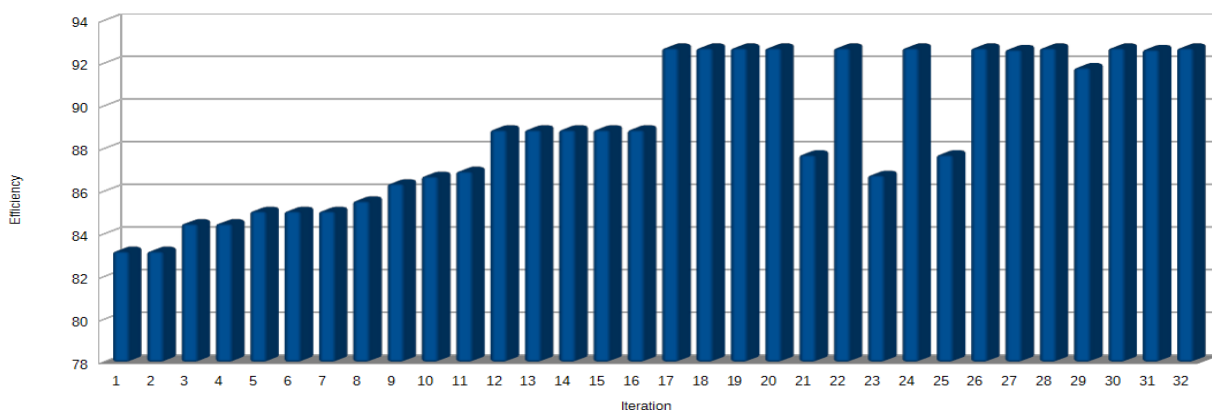
Σχήμα 5-37. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-38. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-39. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-40. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

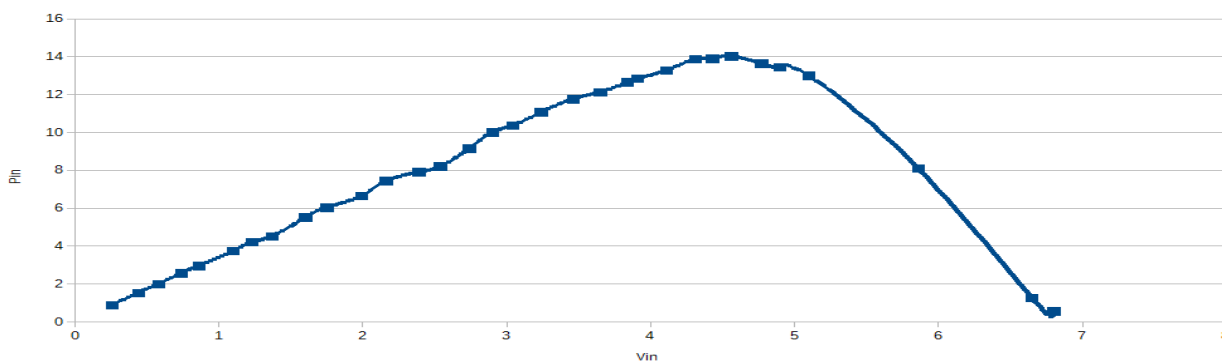
Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα ο αλγόριθμος Flower Pollination συγκλίνει σχετικά γρήγορα κοντά στο MPP το οποίο εντοπίζει αρκετά αποτελεσματικά σε ποσοστό 97.9%. Επιπλέον, η συχνότητα διακοπτισμού που επιλέγει ο αλγόριθμος ως βέλτιστη επιτυγχάνει και αυτή πολύ καλό αποτέλεσμα ως προς τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC (της τάξης του 93%), το οποίο είναι κατά 14.2% μεγαλύτερο σε σχέση με την ισχύ εξόδου για προκαθορισμένη συχνότητα διακοπτισμού στα 100kHz. Όπως και στα προηγούμενα πειράματα οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT

διατηρούν το σύστημα στο σημείο λειτουργίας που βρέθηκε από τον αλγόριθμο Flower Pollination μέχρι την πάροδο του απαραίτητου χρόνου. Ο Flower Pollination Algorithm εκτελείται για 20 επαναλήψεις. Αμέσως μετά εκτελούνται διαδοχικά οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT και η έξοδος του μετατροπέα DC/DC ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Αν η ταλάντωση σε ορισμένα σχήματα δεν είναι ευδιάκριτη, αυτό οφείλεται στο γεγονός της μικρής μεταβολής του μεγέθους.

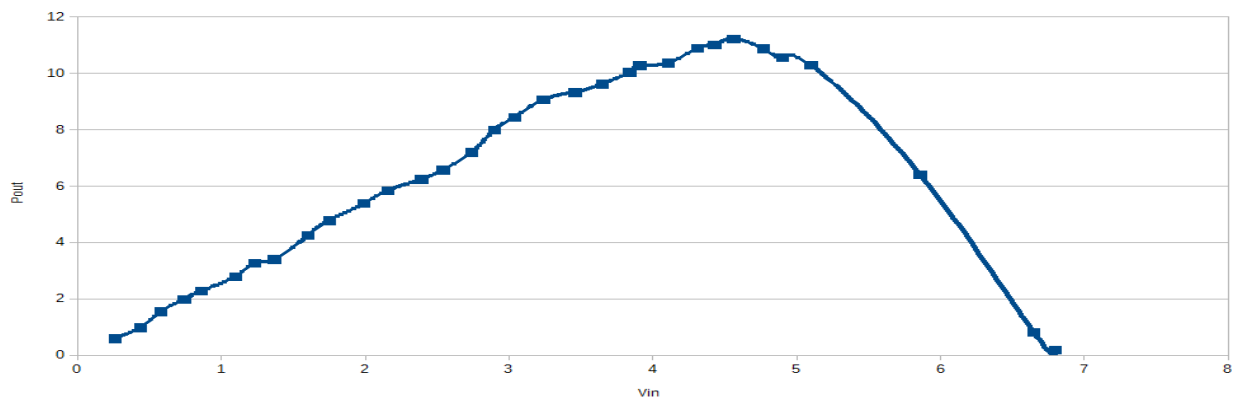
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα Jaya Algorithm, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Η σειρά αυτή πειραμάτων πραγματοποιήθηκε για ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Αρχικά εκτελέστηκε ο αλγόριθμος Jaya για 20 επαναλήψεις με 10 υποψήφιες λύσεις. Συνεπώς, μέχρι την ολοκλήρωσή του ο αλγόριθμος έχει περάσει από 200 σημεία λειτουργίας. Μετά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου Jaya έχει βρεθεί το ζεύγος τιμών συχνότητας και σχετικής διάρκειας αγωγής το οποίο χρησιμοποιείται και από τους αλγορίθμους MPPT και MEPT. Με αφετηρία αυτό το σημείο λειτουργίας, οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο μέχρι να παρέλθει ο χρόνος που έχουμε ορίσει (χρόνος μετά τον οποίο οι συνθήκες ακτινοβολίας μπορεί να αλλάξουν και να μετακινηθεί το MPP) και να εκτελεσθεί ξανά ο Jaya. Τα σχήματα 5-41 έως 5-50 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 500W/m^2 .

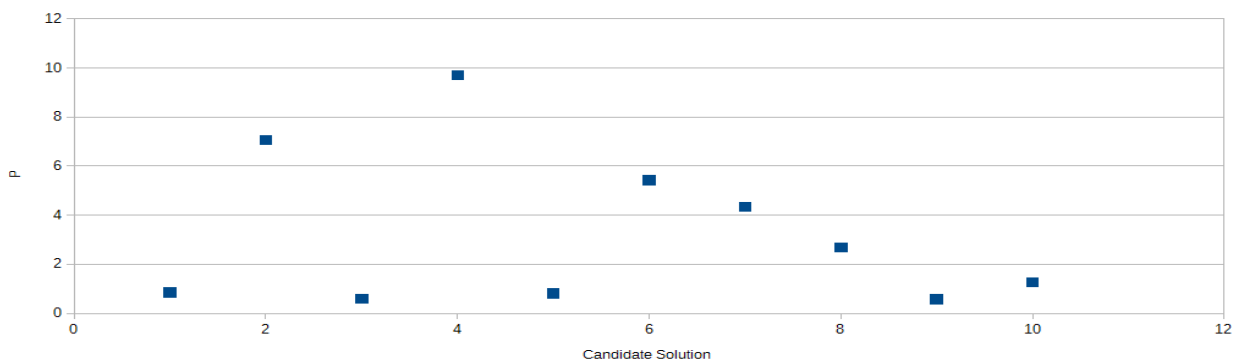
500W/m^2 .



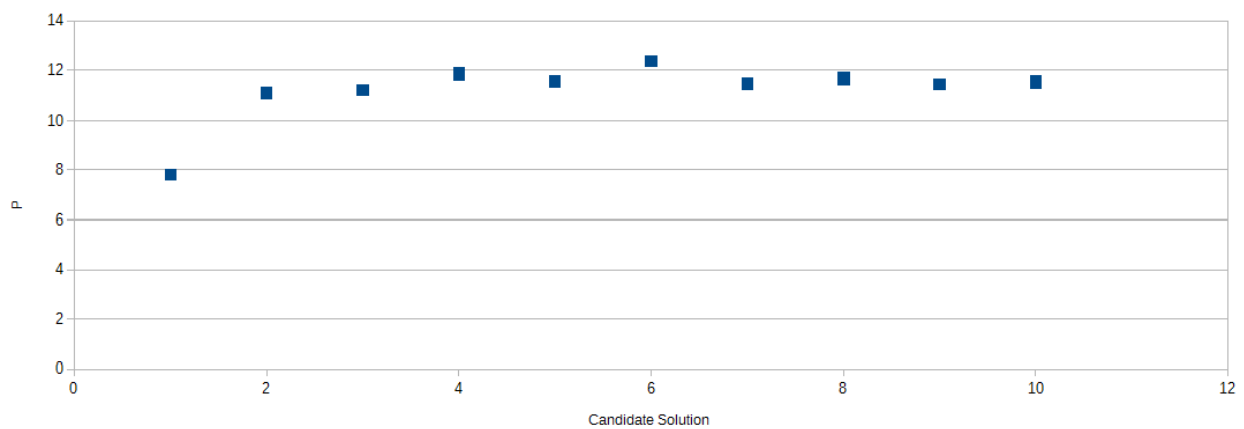
Σχήμα 5-41. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 500W/m^2 .



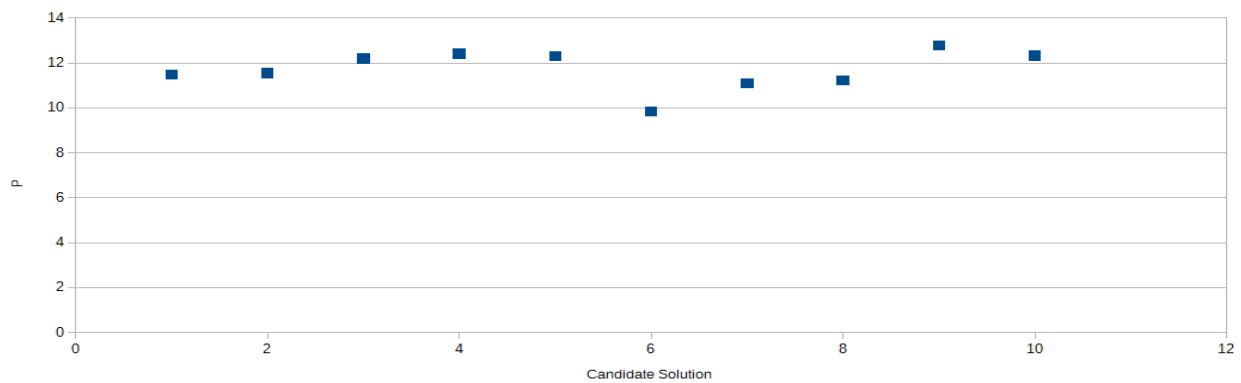
Σχήμα 5-42. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 500W/m^2 .



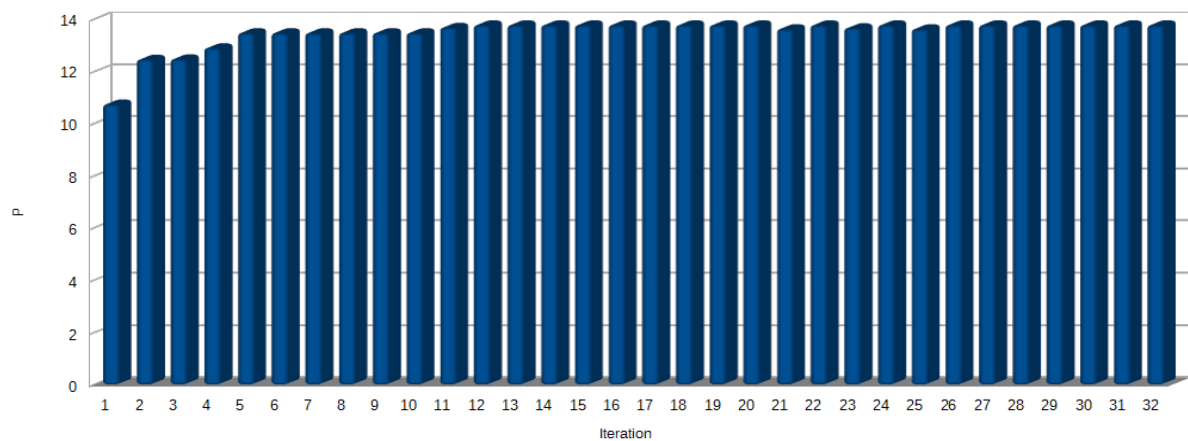
Σχήμα 5-43. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



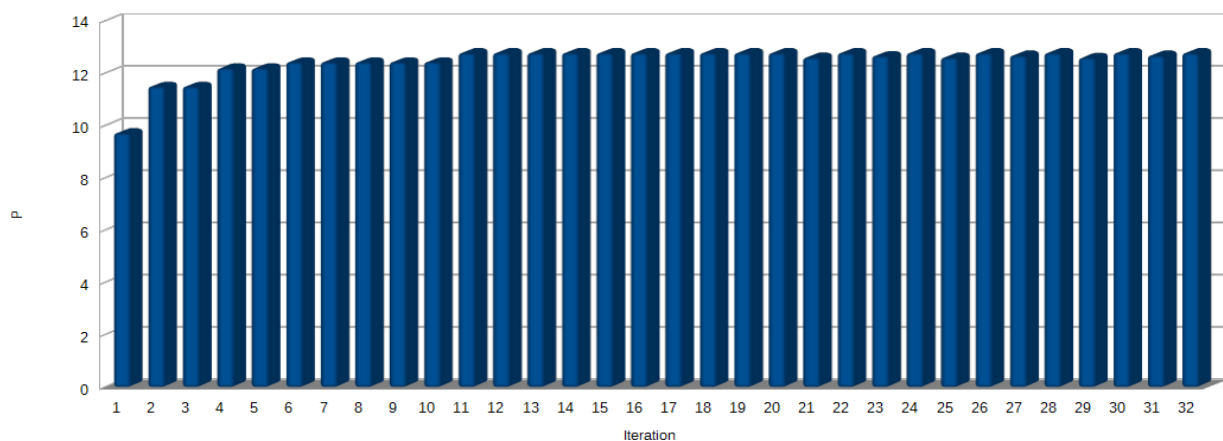
Σχήμα 5-44. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



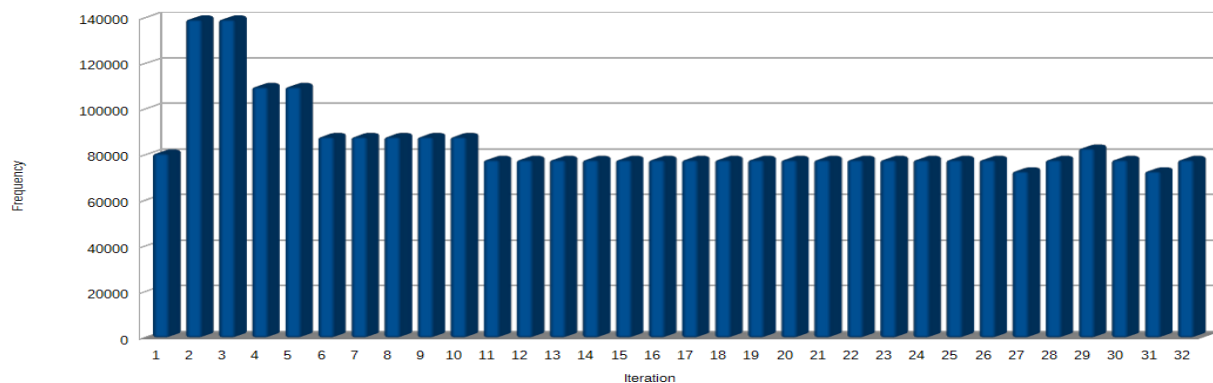
Σχήμα 5-45. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



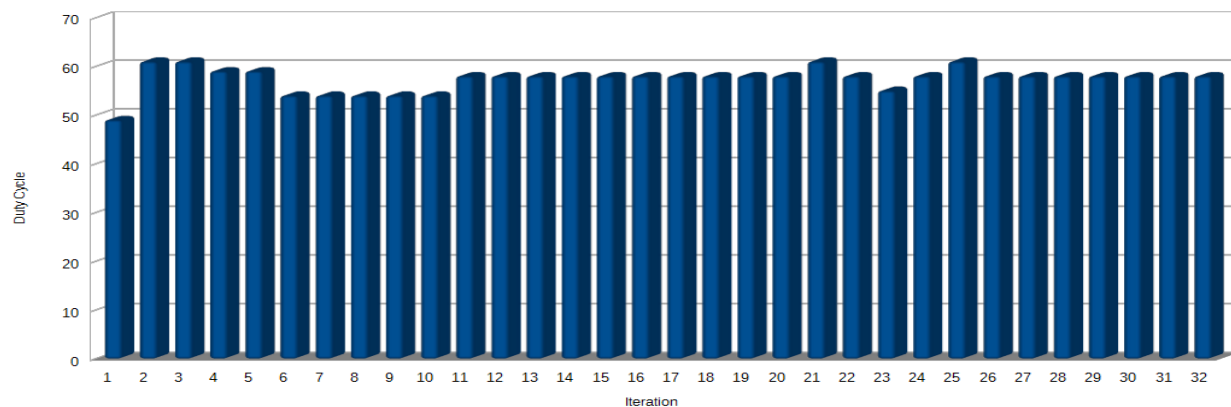
Σχήμα 5-46. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



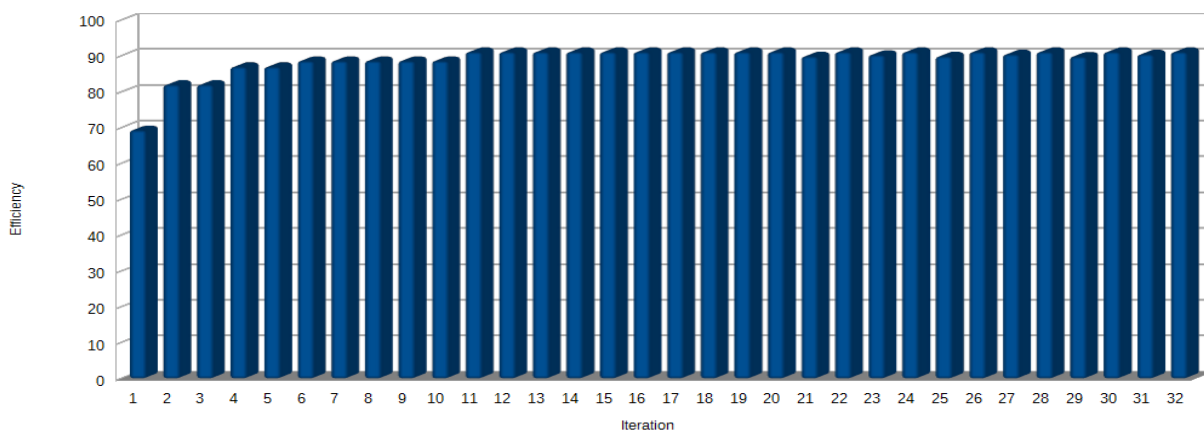
Σχήμα 5-47. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-48. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



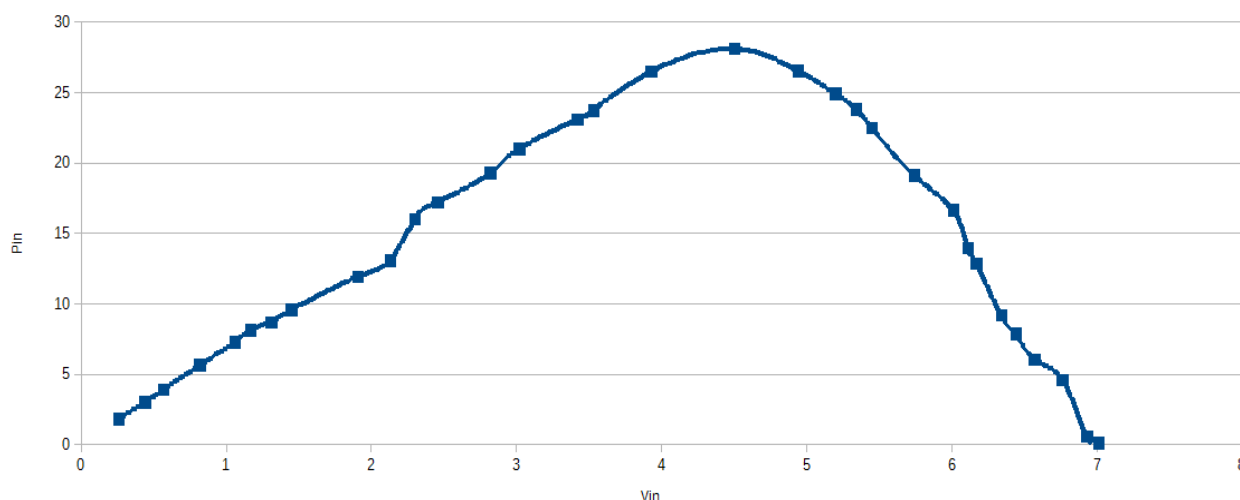
Σχήμα 5-49. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



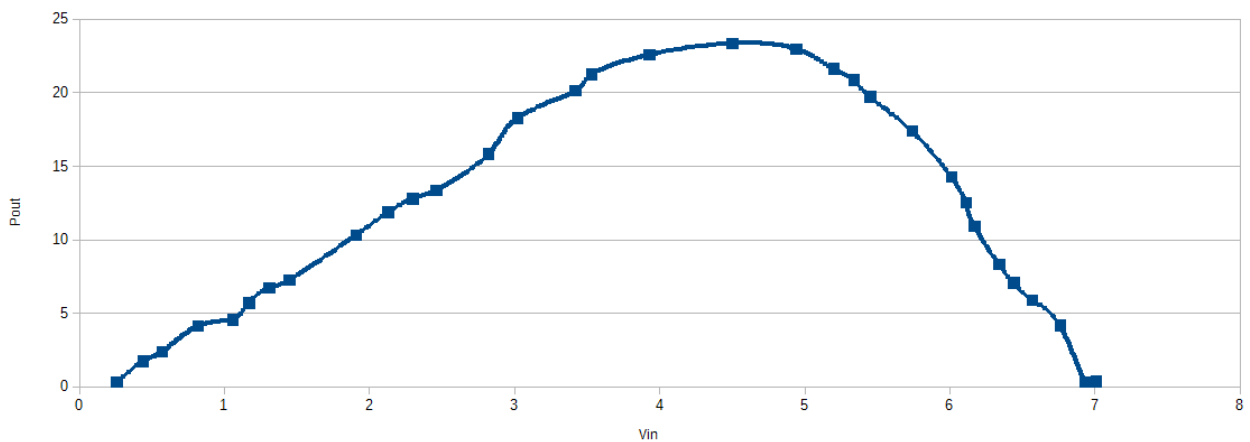
Σχήμα 5-50. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Ο αλγόριθμος Jaya εντοπίζει με αποτελεσματικό τρόπο το MPP και συγκεκριμένα με ακρίβεια 98,2%. Επιπλέον, επιτυγχάνει την αύξηση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης διότι για τη συχνότητα διακοπισμού των 100kHz ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/DC είναι 78.9%, ενώ με την εύρεση της κατάλληλης συχνότητας, που στην προκειμένη περίπτωση είναι 77kHz, η απόδοση του μετατροπέα γίνεται περίπου 92.8%. Έχουμε δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 14% που είναι σημαντική.

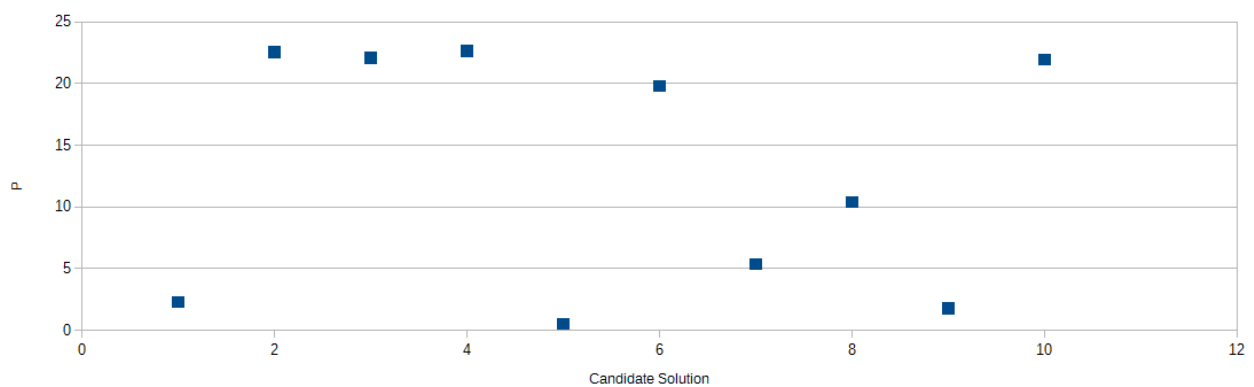
Τα σχήματα 5-51 έως 5-60 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας με ένταση ίση με 800W/m^2 .



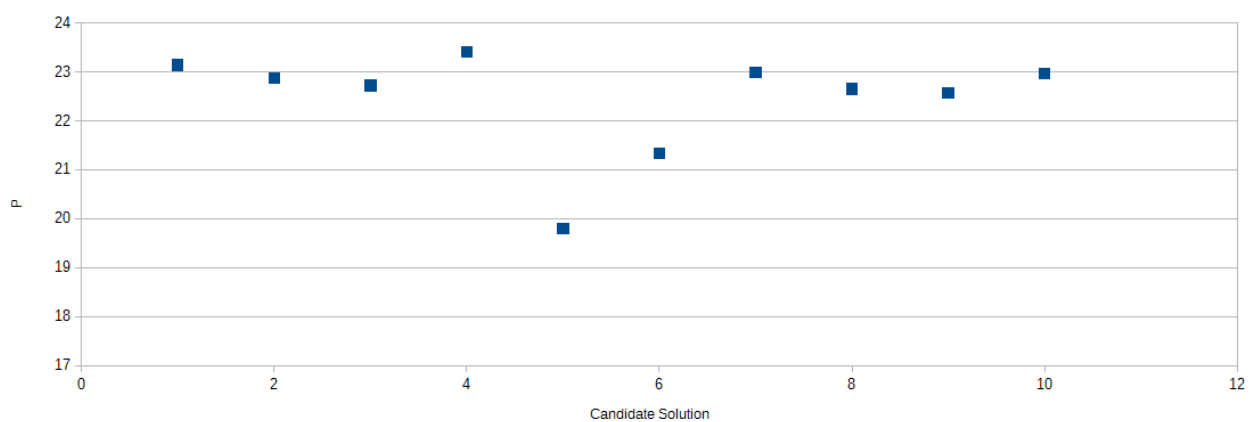
Σχήμα 5-51. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800W/m^2 .



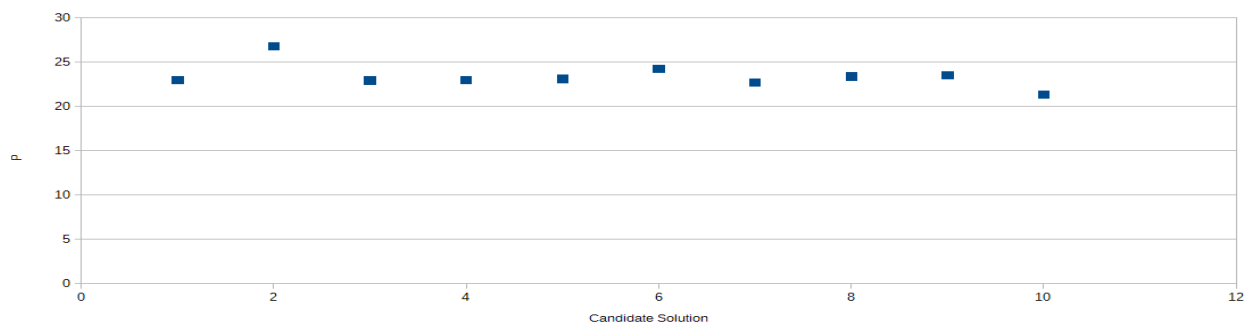
Σχήμα 5-52. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800W/m^2 .



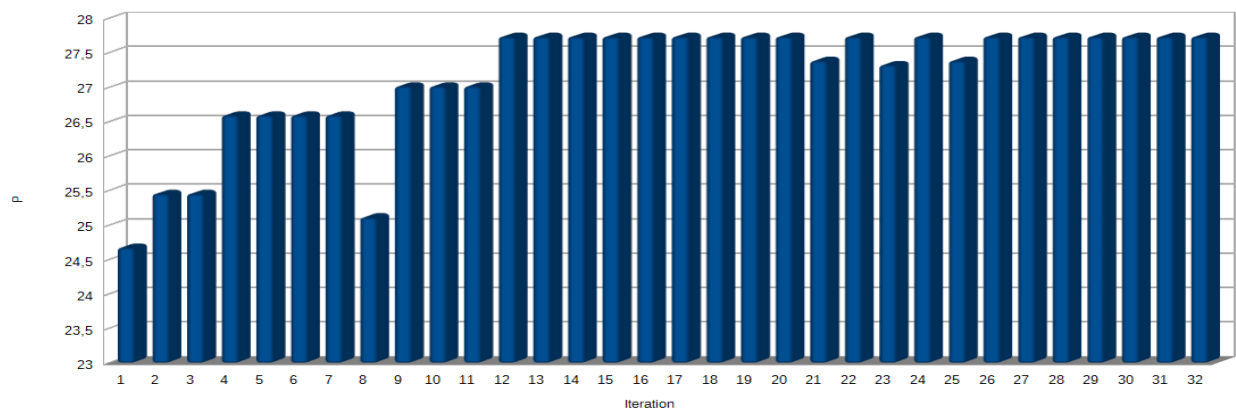
Σχήμα 5-53. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



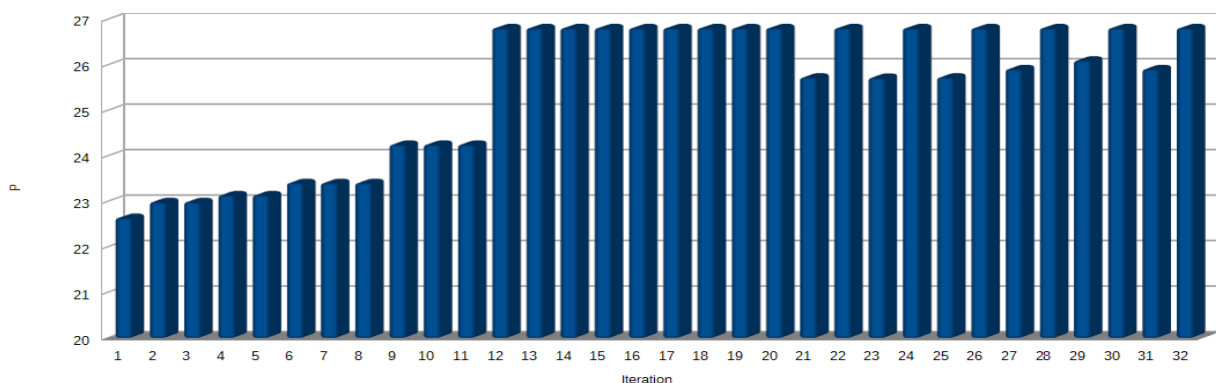
Σχήμα 5-54. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



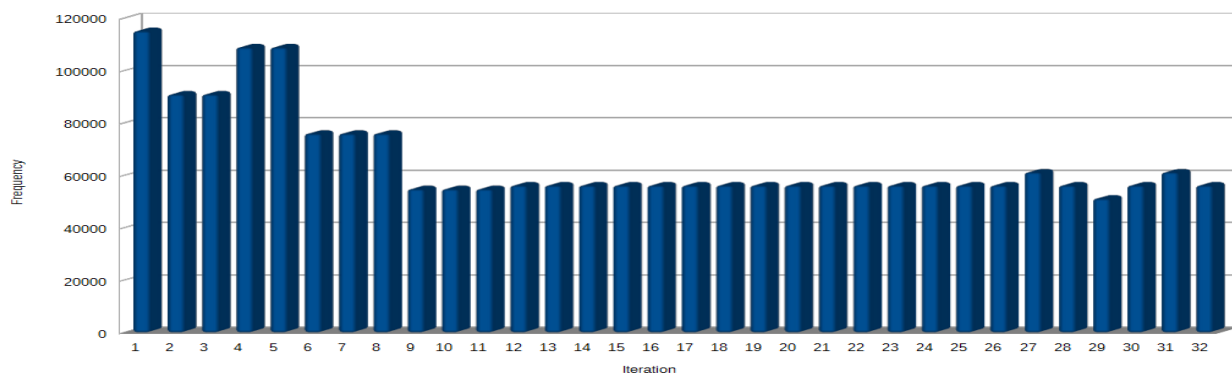
Σχήμα 5-55. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



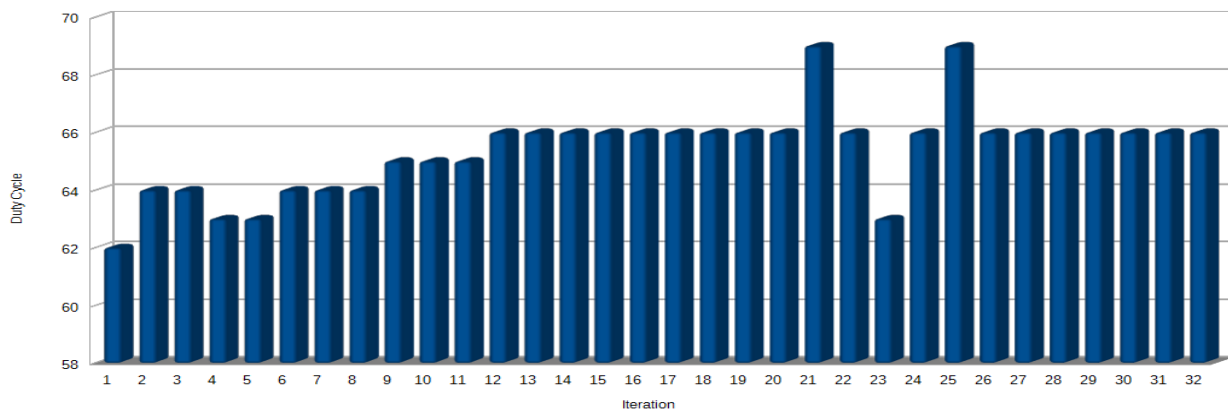
Σχήμα 5-56. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



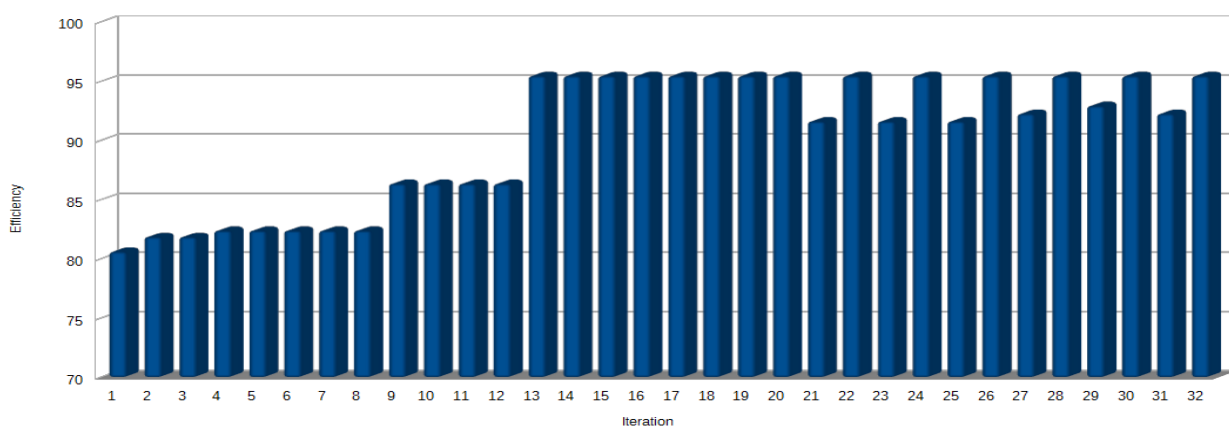
Σχήμα 5-57. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-58. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-59. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

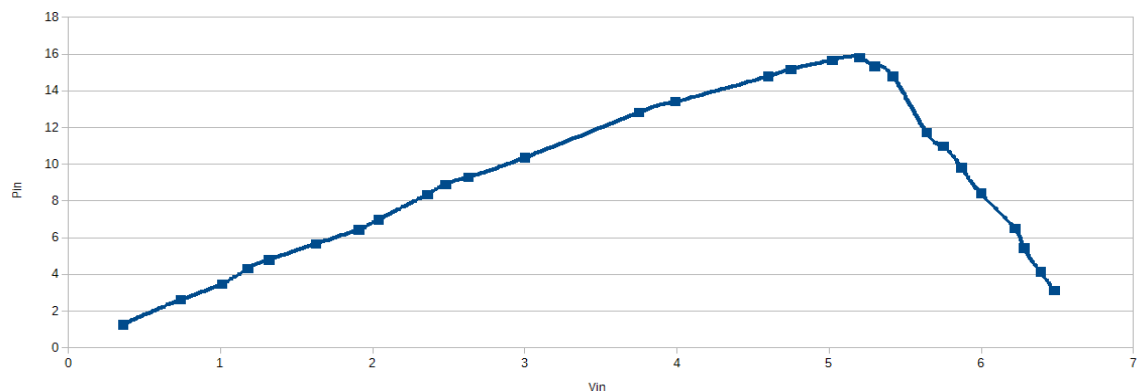


Σχήμα 5-60. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

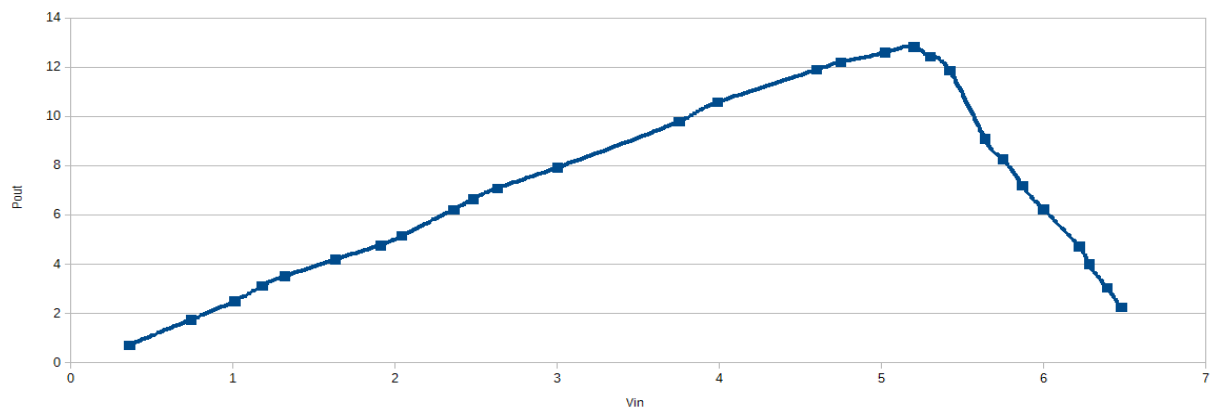
Ο αλγόριθμος Jaya καταφέρνει να εντοπίσει το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος με ακρίβεια 99% αλλά και να βρει τη συχνότητα η οποία θα κάνει τη λειτουργία του μετατροπέα αποτελεσματικότερη. Συγκεκριμένα, για συχνότητα διακοπισμού ίση με 100kHz ο μετατροπέας DC/DC έχει βαθμό απόδοσης 83.1%, ενώ μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Jaya και την εύρεση της συχνότητας των 56kHz ως βέλτιστη, η απόδοση του μετατροπέα αυξάνεται σε 95,44%, δηλαδή κατά περίπου 12%. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν όπως και πριν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο. Η εκτέλεσή τους ξεκινά μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου Jaya, δηλαδή μετά την εικοστή επανάληψη. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-60 μετά την εικοστή επανάληψη το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP.

5.4 Πειραματικά αποτελέσματα Differential Evolution Algorithm, MPPT και MEPT σε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

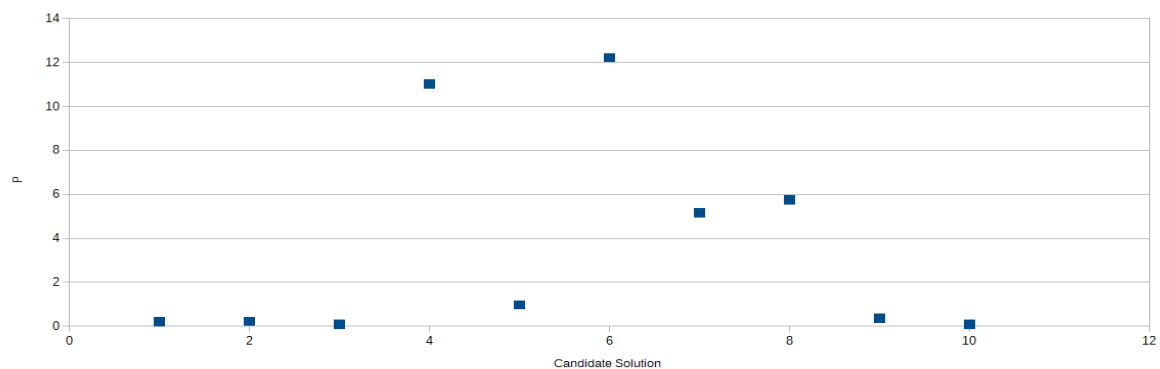
Η σειρά αυτή πειραμάτων πραγματοποιήθηκε για ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Αρχικά εκτελέστηκε ο αλγόριθμος Differential Evolution για 20 επαναλήψεις με 10 υποψήφιες λύσεις. Μετά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου Differential Evolution έχει βρεθεί το ζεύγος τιμών συχνότητας και σχετικής διάρκειας αγωγής το οποίο χρησιμοποιείται και από τους αλγορίθμους MPPT και MEPT. Με αφετηρία αυτό το σημείο λειτουργίας, οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο μέχρι να παρέλθει ο χρόνος που έχουμε ορίσει (χρόνος μετά τον οποίο οι συνθήκες ακτινοβολίας μπορεί να αλλάξουν και να μετακινηθεί το MPP) και να εκτελεσθεί ξανά ο Differential Evolution. Τα σχήματα 5-61 έως 5-70 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 500W/m².



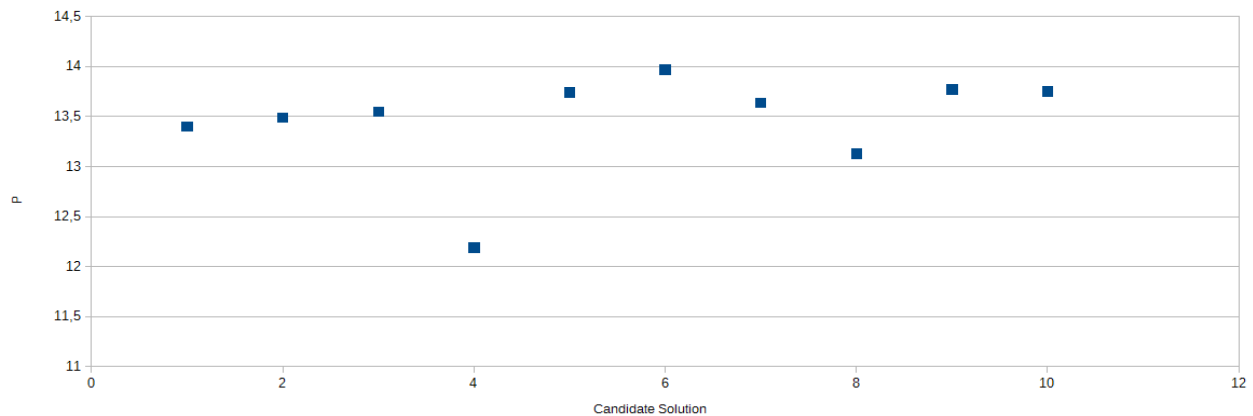
Σχήμα 5-61. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $500W/m^2$.



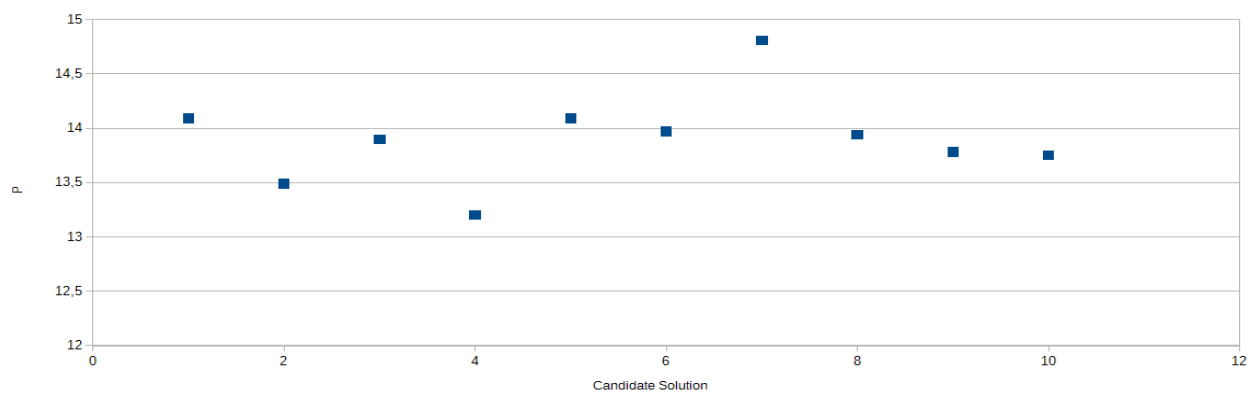
Σχήμα 5-62. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $500W/m^2$.



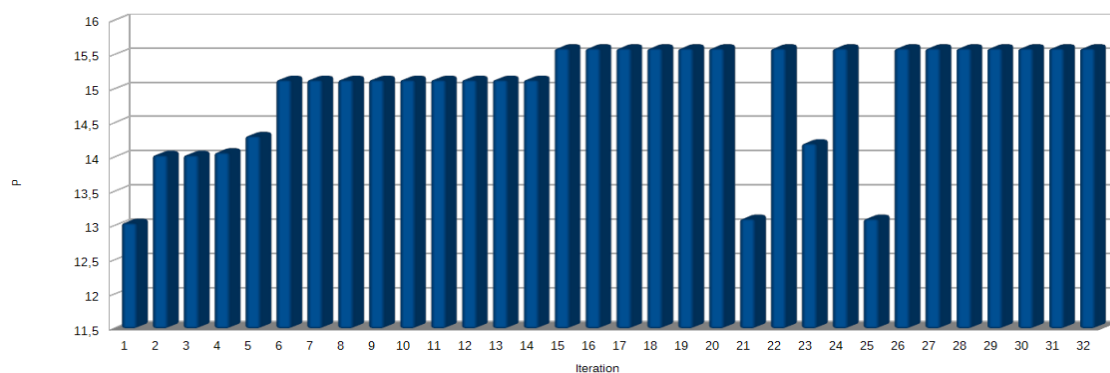
Σχήμα 5-63. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου Differential Evolution.



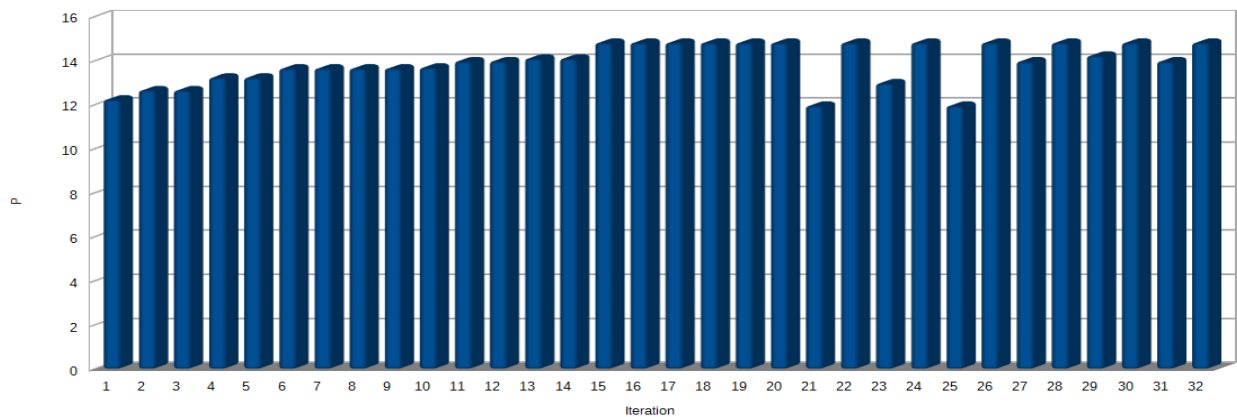
Σχήμα 5-64. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



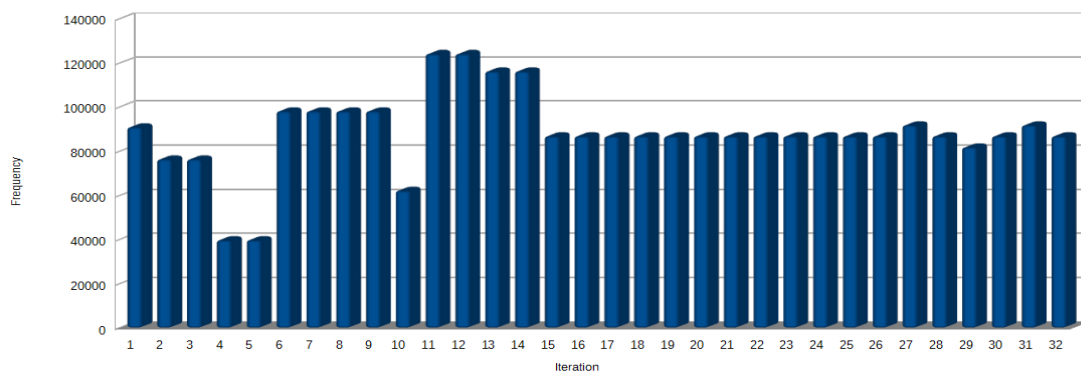
Σχήμα 5-65. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



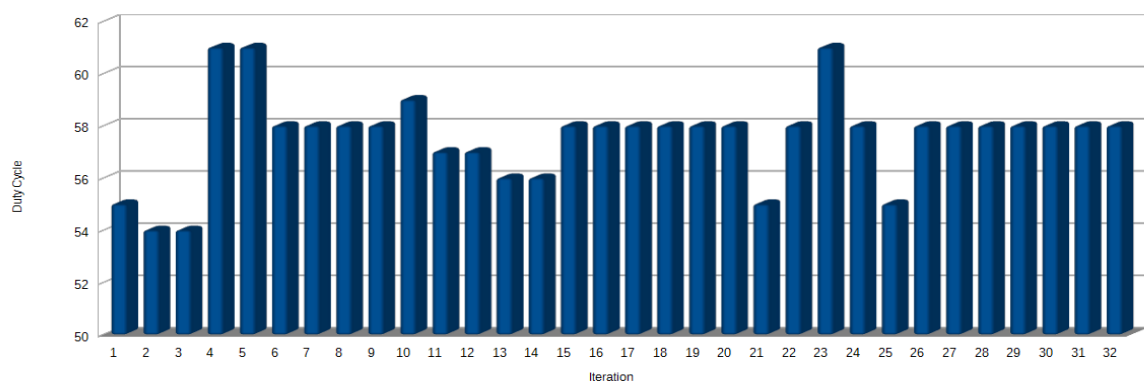
Σχήμα 5-66. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



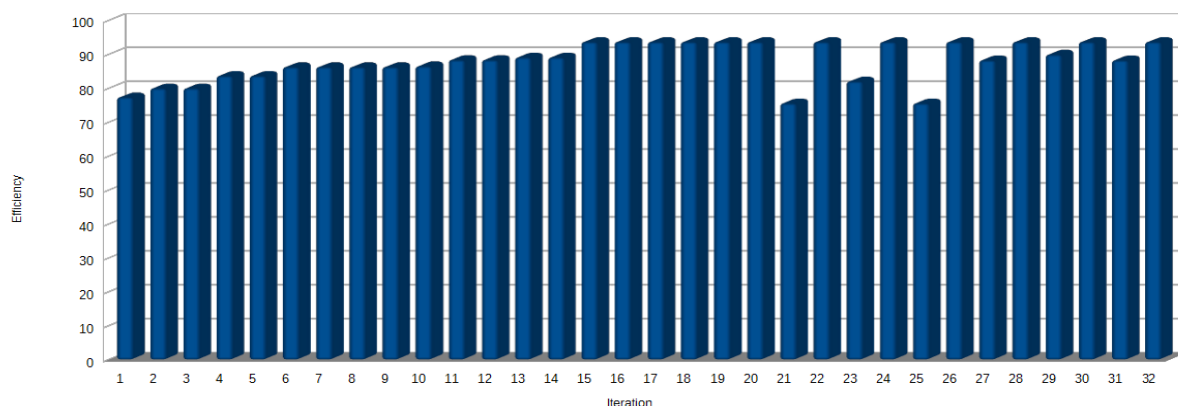
Σχήμα 5-67. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-68. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



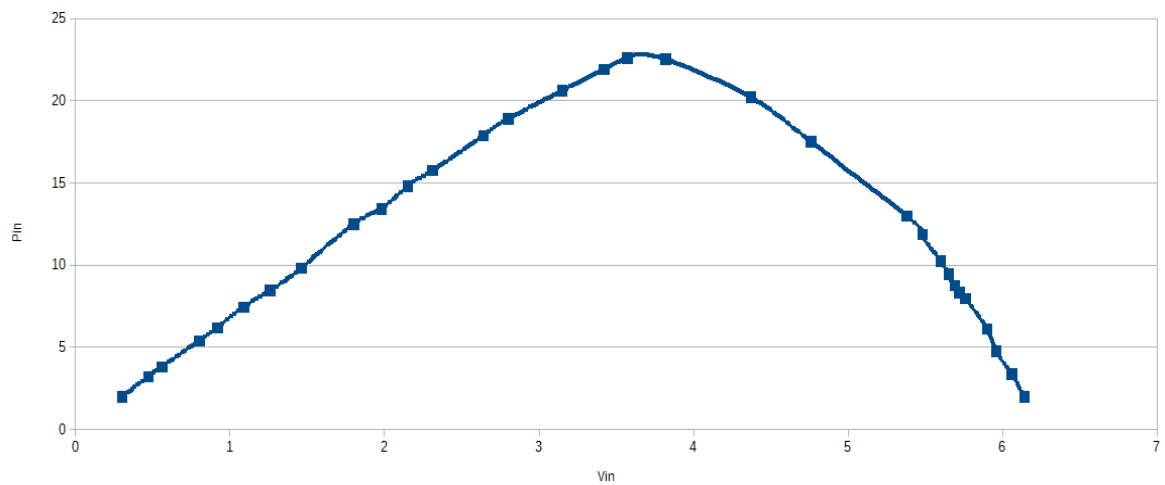
Σχήμα 5-69. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



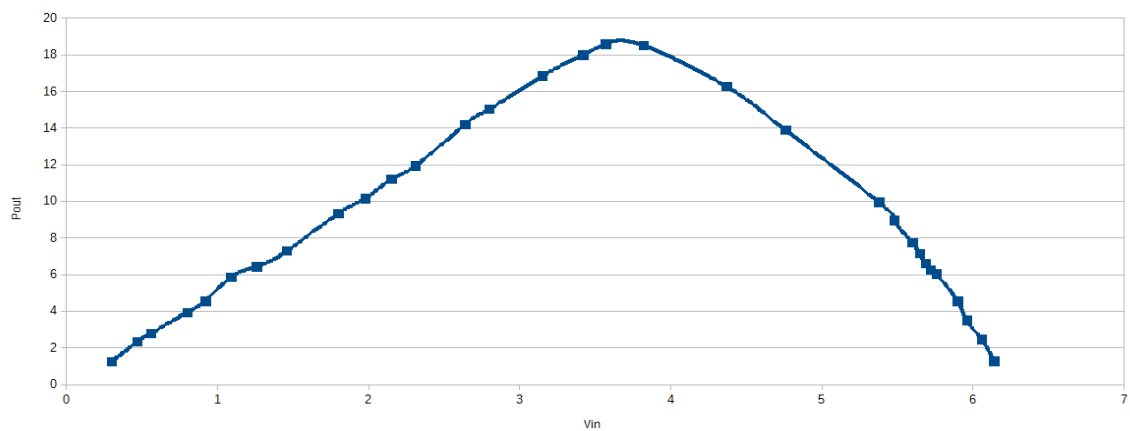
Σχήμα 5-70. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψηφία λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Ο αλγόριθμος Differential Evolution καταφέρνει να εντοπίσει το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος με ακρίβεια 98.6% αλλά και να βρει τη συχνότητα η οποία θα κάνει τη λειτουργία του μετατροπέα αποτελεσματικότερη. Συγκεκριμένα, για συχνότητα διακοπισμού ίση με 100kHz ο μετατροπέας DC/DC έχει βαθμό απόδοσης 81%, ενώ μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Differential Evolution και την εύρεση της συχνότητας των 86kHz ως βέλτιστη, η απόδοση του μετατροπέα αυξάνεται σε 93.7%, δηλαδή κατά περίπου 13%. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν όπως και πριν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο. Η εκτέλεσή τους ξεκινά μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου Differential Evolution, δηλαδή μετά την εικοστή επανάληψη. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-70 μετά την εικοστή επανάληψη το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP.

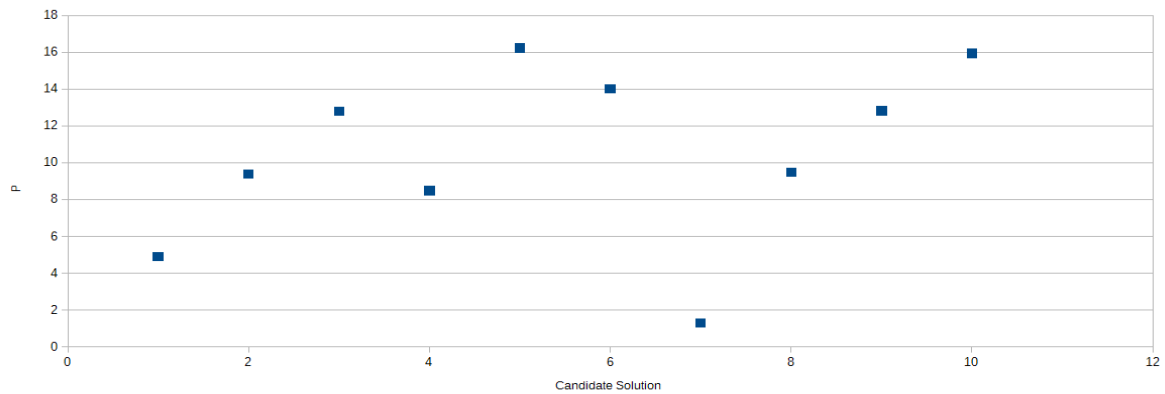
Τα σχήματα 5-71 έως 5-80 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ομοιόμορφη πρόσπτωση ακτινοβολίας με ένταση ίση με 700W/m^2 .



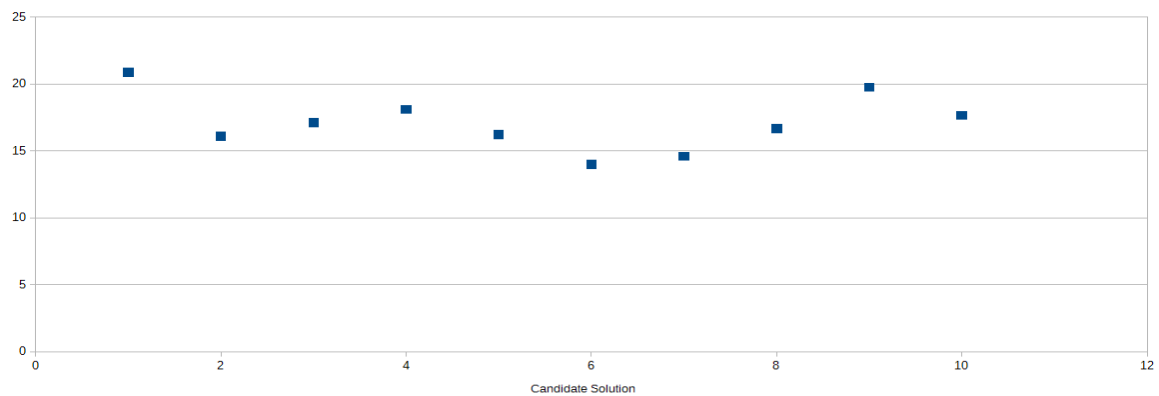
Σχήμα 5-71. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 700W/m^2 .



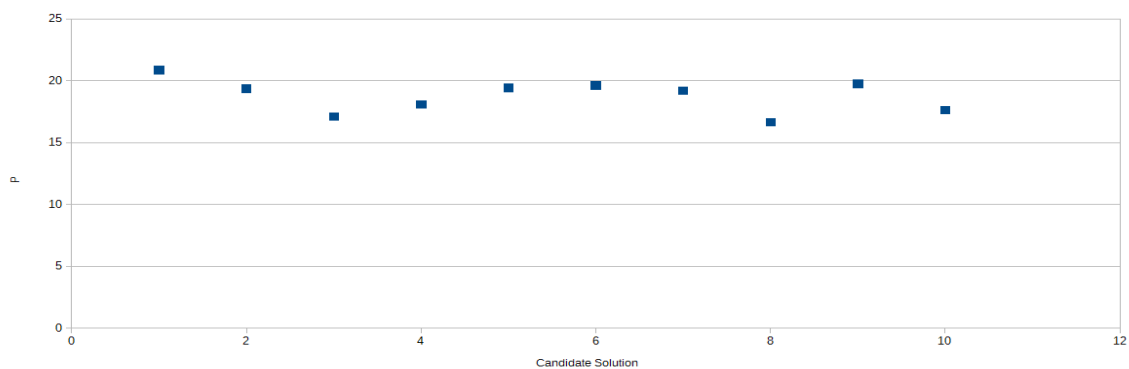
Σχήμα 5-72. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 700W/m^2 .



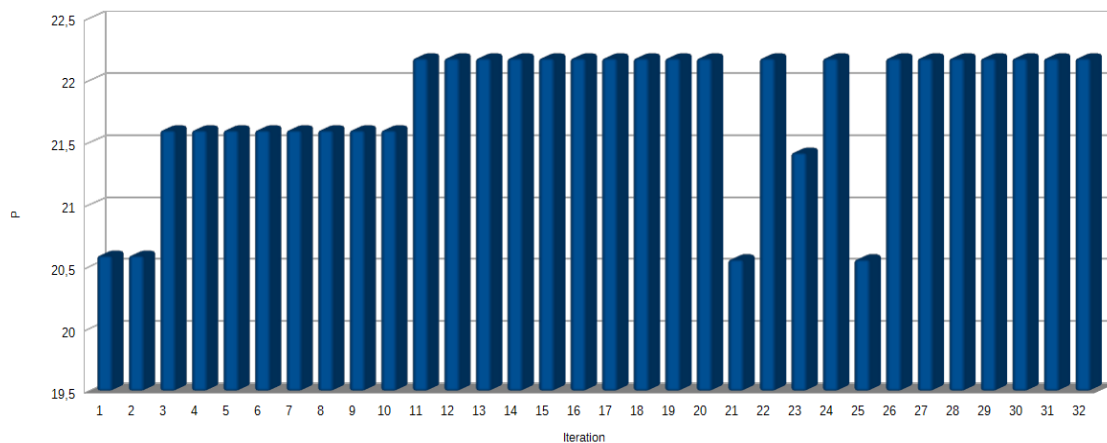
Σχήμα 5-73. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



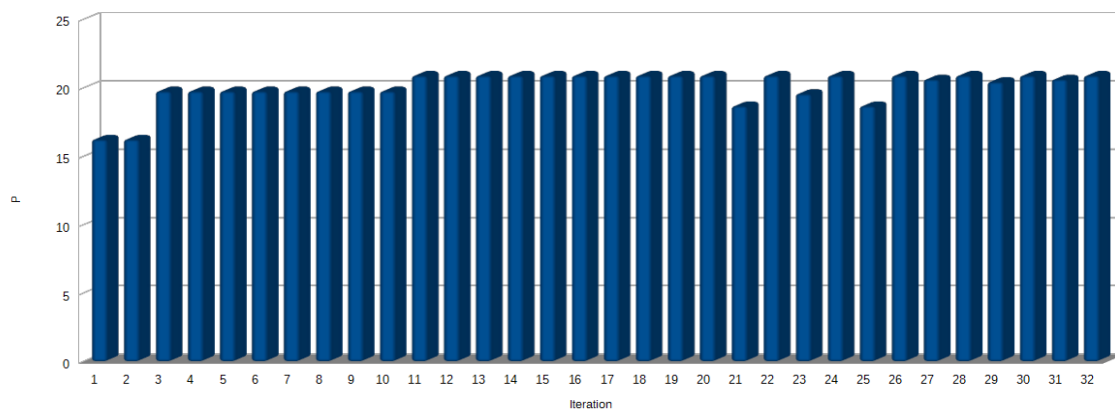
Σχήμα 5-74. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



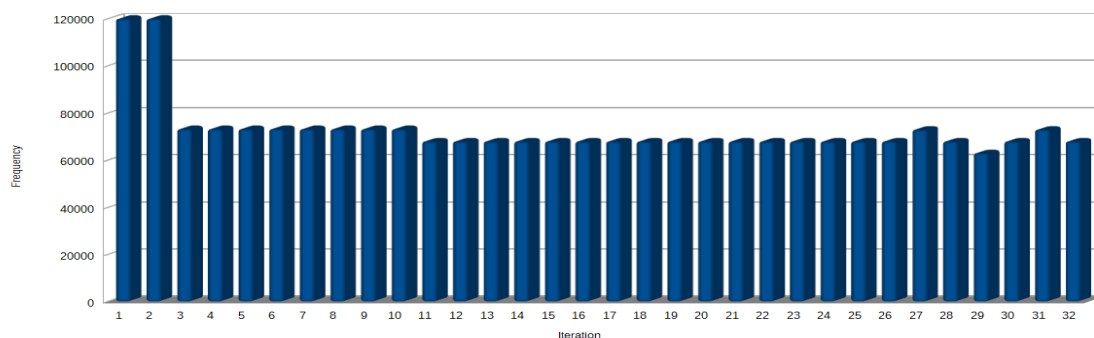
Σχήμα 5-75. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



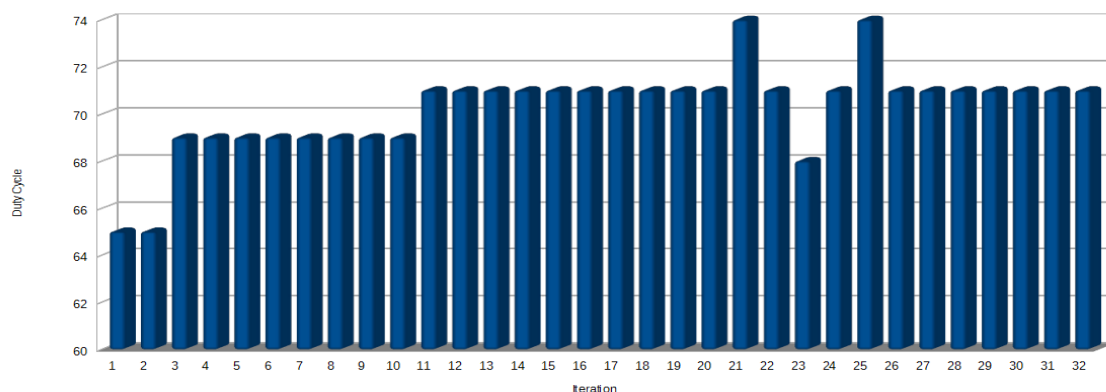
Σχήμα 5-76. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



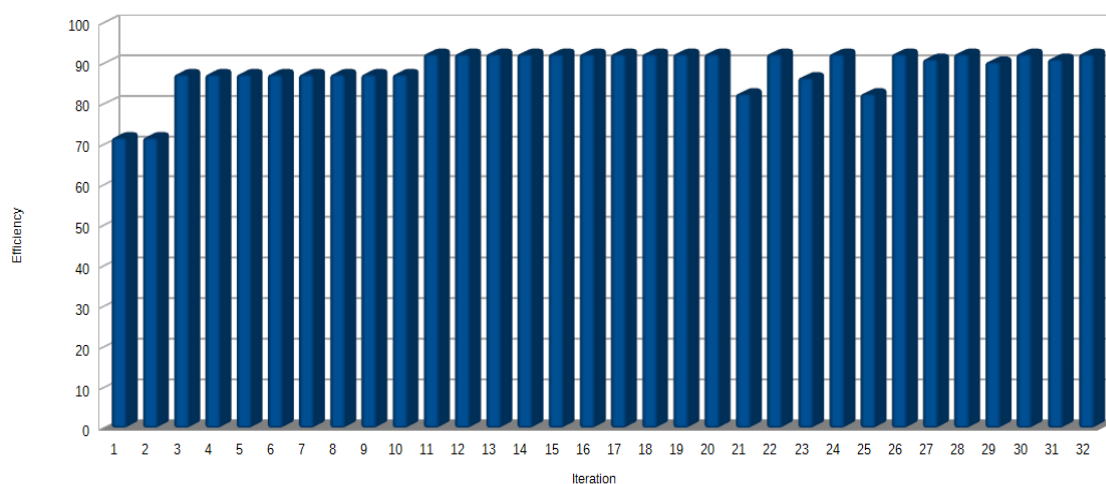
Σχήμα 5-77. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-78. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-79. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



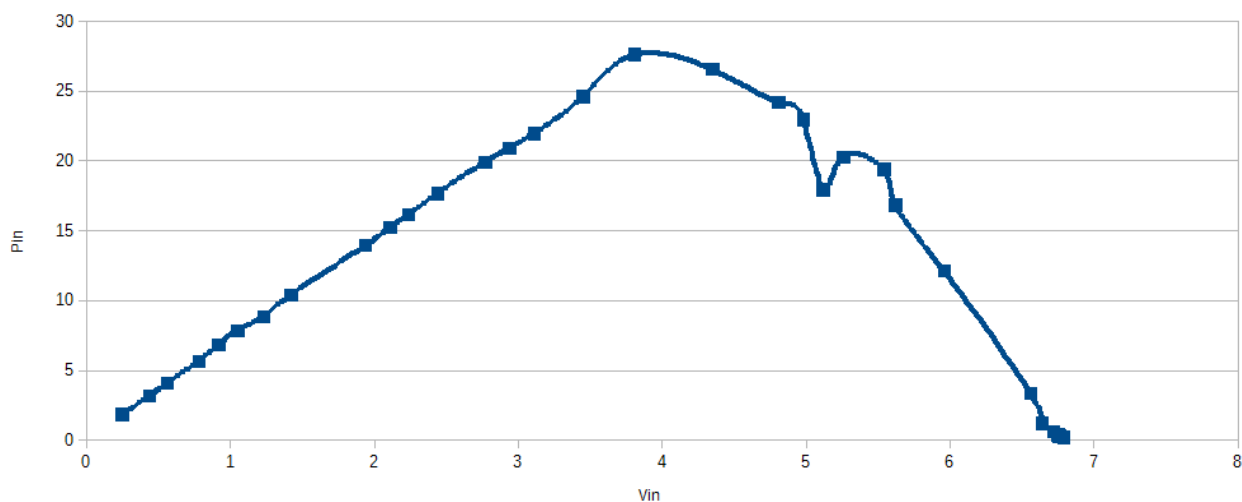
Σχήμα 5-80. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

5.5 Πειραματικά αποτελέσματα Grey Wolf Optimizer, MPPT και MEPT σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

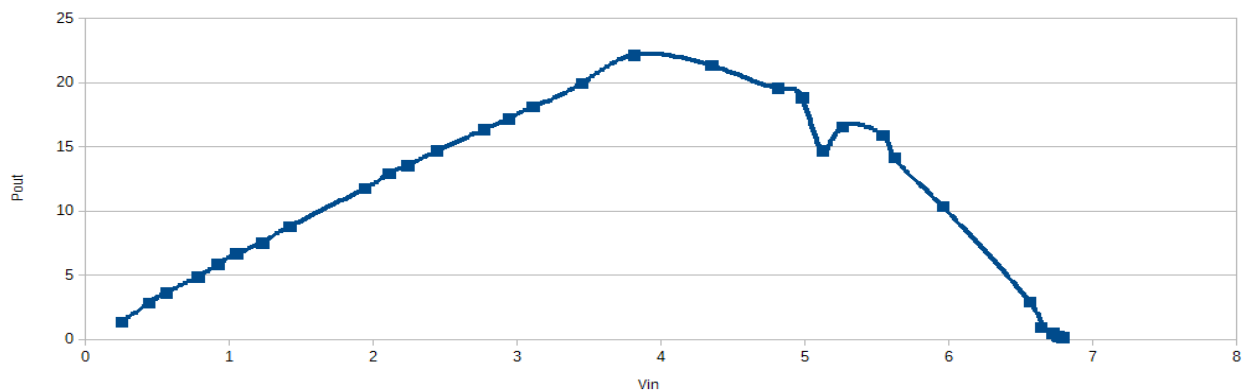
Στη σειρά αυτή πειραμάτων δεν έχουμε πλέον ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά ανομοιόμορφη. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας δεν θα έχει ένα μόνο μέγιστο, το οποίο θα είναι το ολικό, αλλά θα έχει περισσότερα από ένα μέγιστα εκ των οποίων ένα θα είναι το ολικό μέγιστο (Global Maximum

Power Point, GMPPT) στο οποίο θέλουμε να λειτουργεί το σύστημα. Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, στην περίπτωση αυτή ένα κλασσικός αλγόριθμος MPPT (πχ. ο P&O) είναι πολύ πιθανό να αποτύχει να εντοπίσει το GMPPT και να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό μέγιστο. Στα πειράματα αυτά, το πρόβλημα λύνεται με τον αλγόριθμο Grey Wolf Optimizer ο οποίος βρίσκει την κατάλληλη σχετική διάρκεια αγωγής έτσι ώστε η φωτοβολταϊκή συστοιχία να λειτουργεί στο MPP, αλλά και την κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού έτσι ώστε ο μετατροπέας DC/DC να λειτουργεί με τον αποδοτικότερο δυνατό τρόπο.

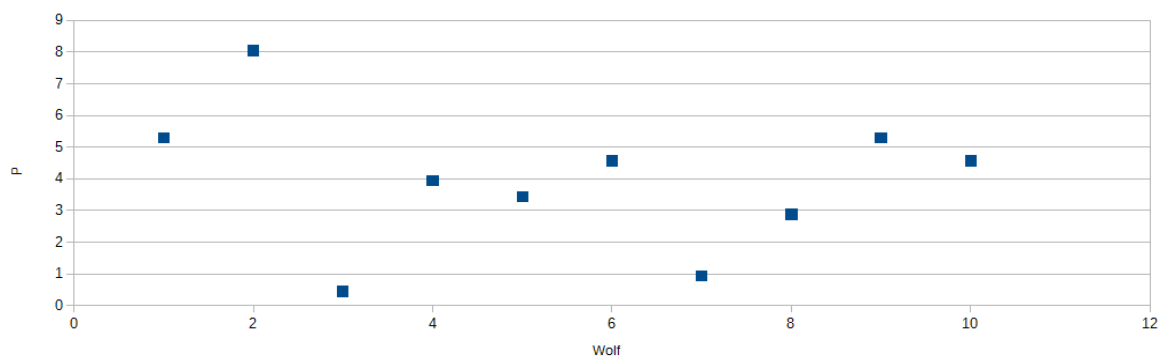
Τα σχήματα 5-81 έως 5-90 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 1000W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 500W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην περίπτωση αυτή το ολικό μέγιστο βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα δεξιά.



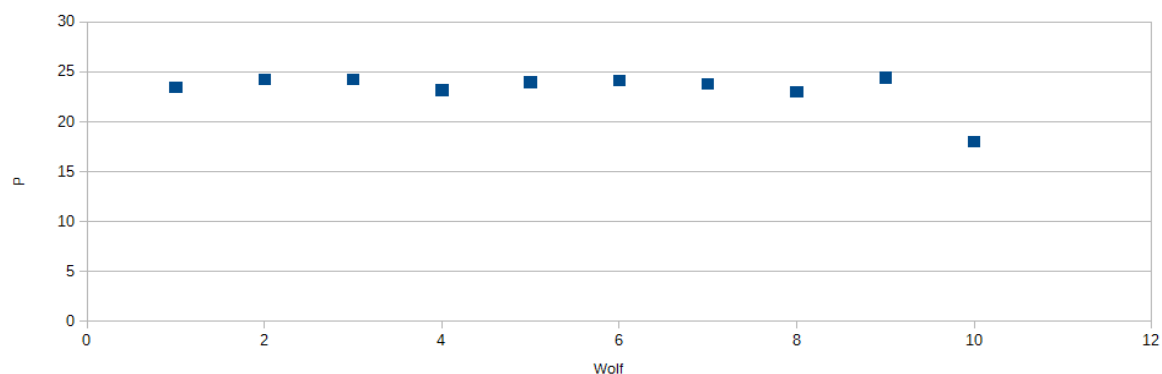
Σχήμα 5-81. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες έντασης 1000W/m^2 και 500W/m^2 , αντίστοιχα.



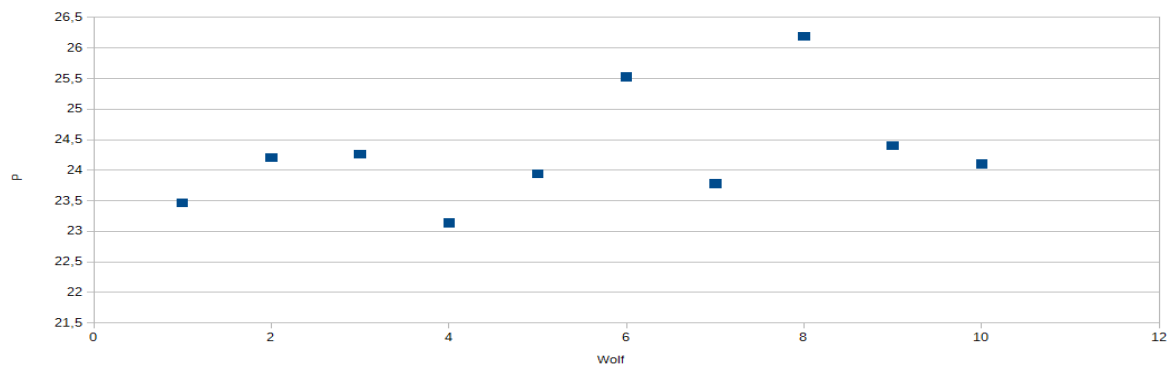
Σχήμα 5-82. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες έντασης 1000W/m^2 & 500W/m^2 , αντίστοιχα.



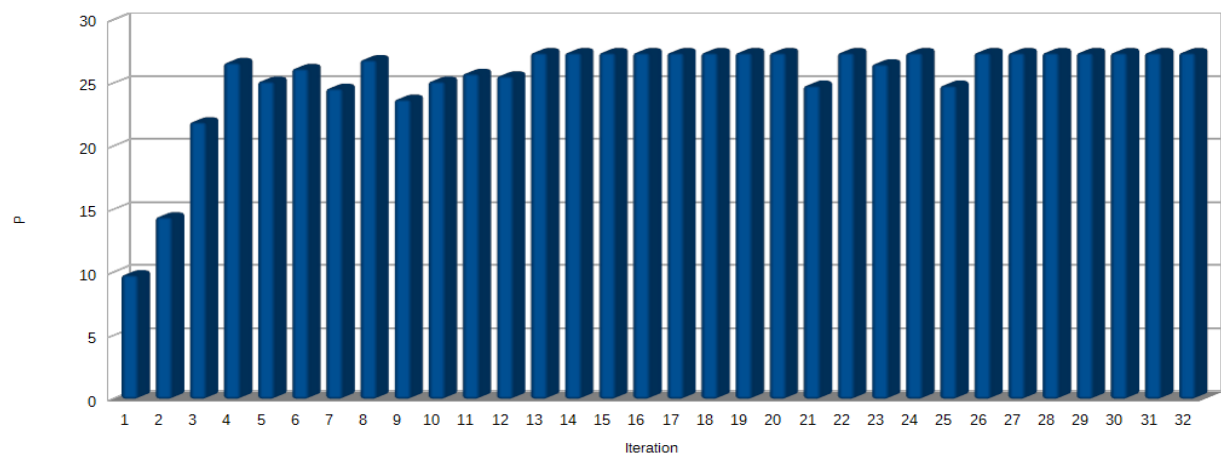
Σχήμα 5-83. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



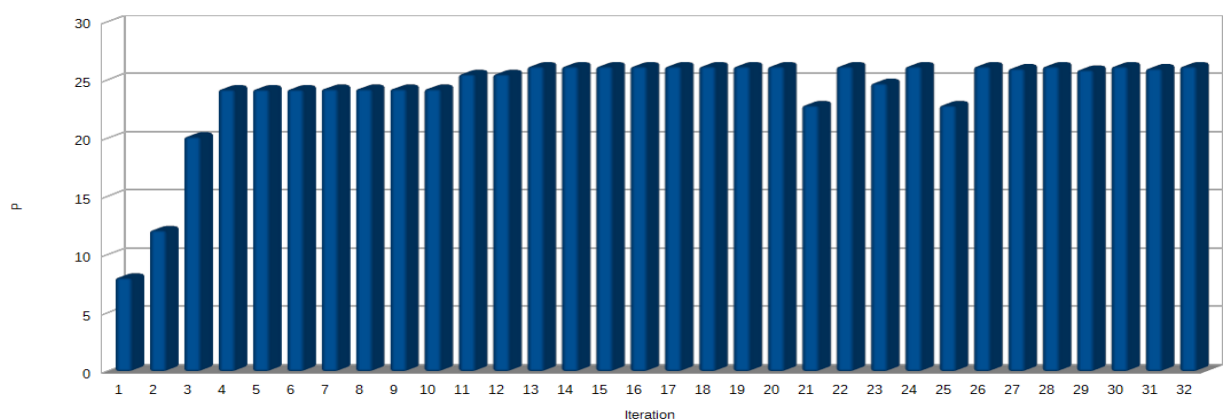
Σχήμα 5-84. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



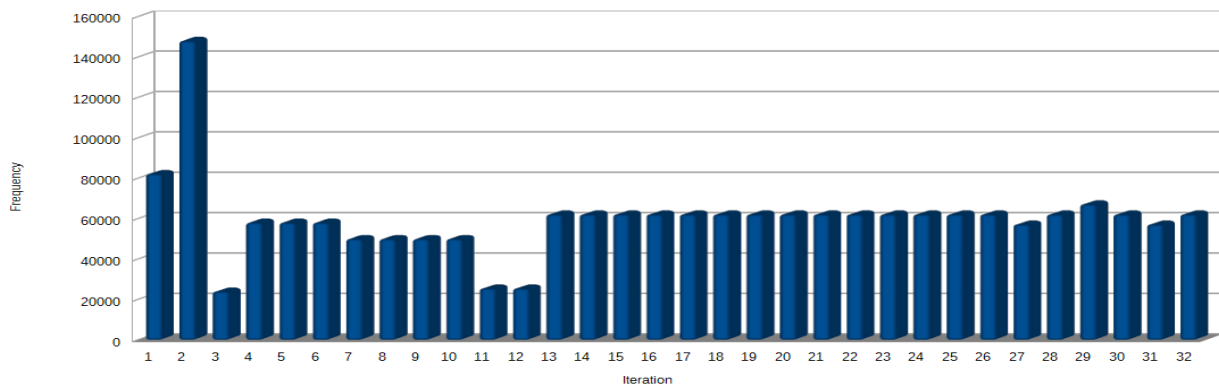
Σχήμα 5-85. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



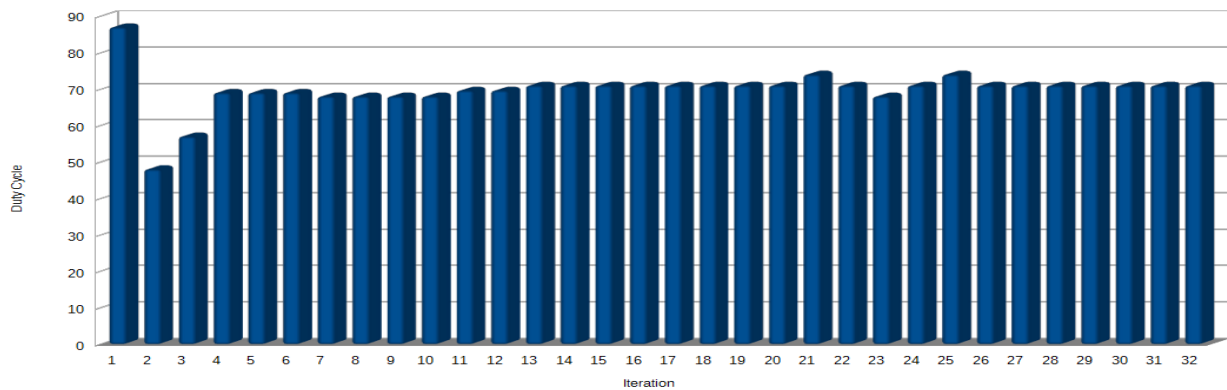
Σχήμα 5-86. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



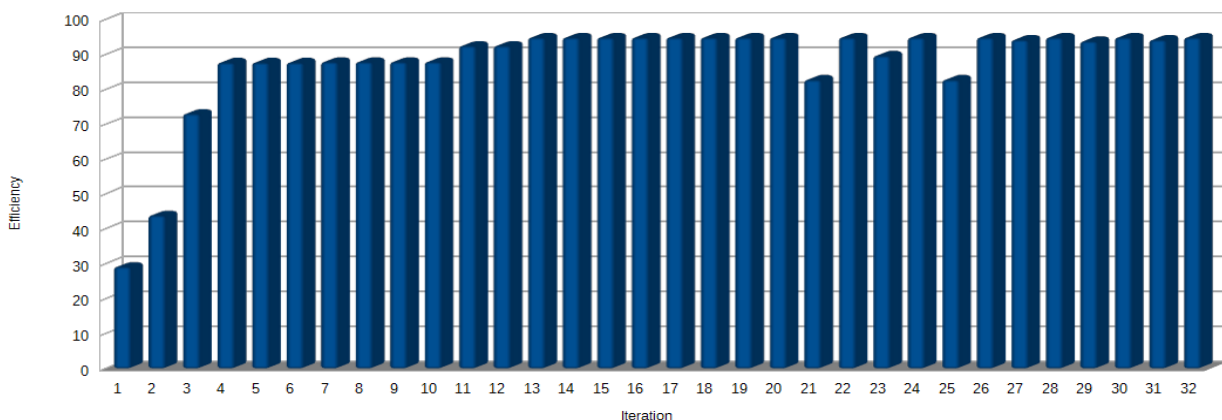
Σχήμα 5-87. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-88. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



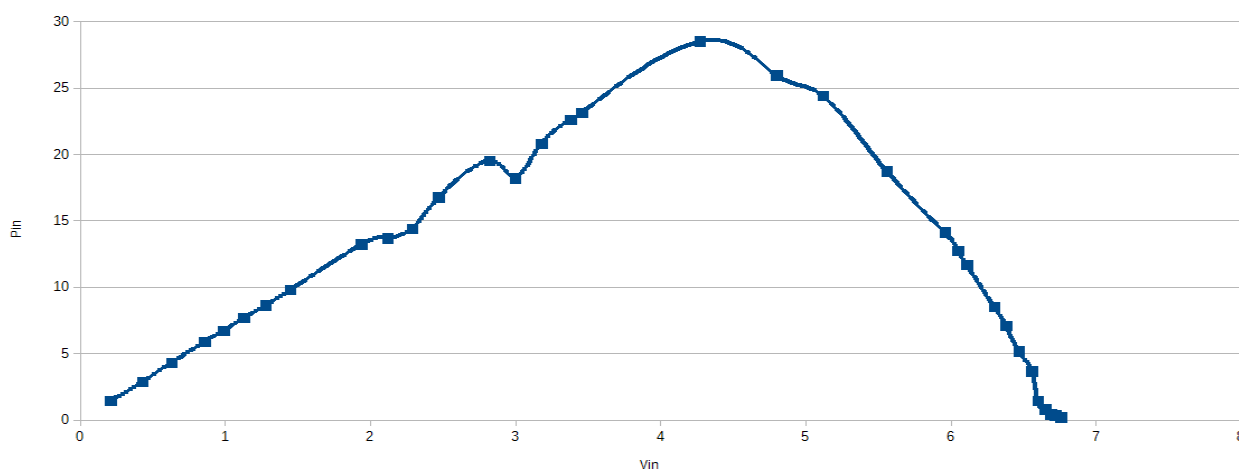
Σχήμα 5-89. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



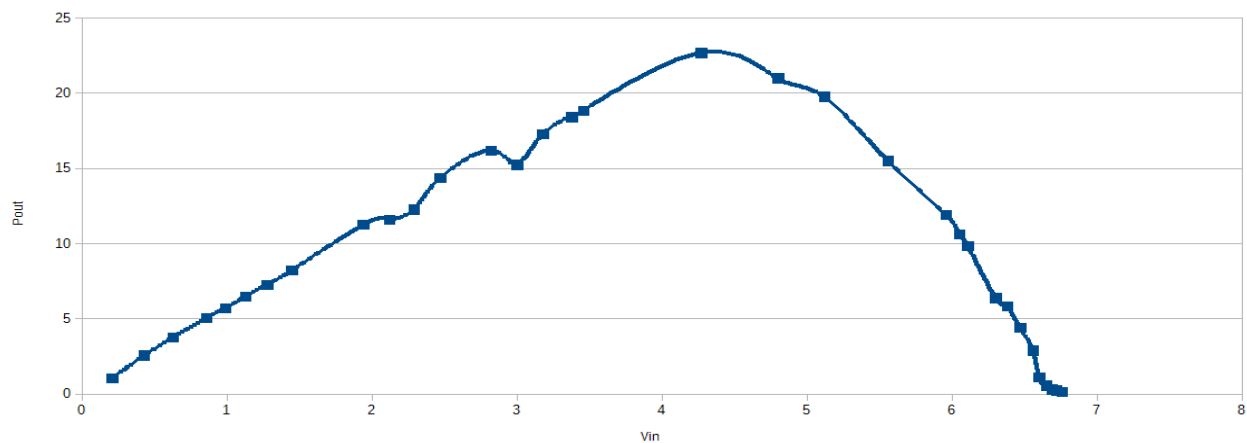
Σχήμα 5-90. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως βλέπουμε και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimization είναι αρκετά αποτελεσματικός. Παρά την ανομοιόμορφη ακτινοβολία εντοπίζει το MPP με ακρίβεια 99.27% και επίσης βρίσκει την κατάλληλη συχνότητα με την οποία ο μετατροπέας DC/DC έχει απόδοση 94.8% στα 62kHz, κατά 14.6% δηλαδή μεγαλύτερη από τον αν λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα διακοπτισμού και ίση με 100kHz. Ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer εκτελείται για 20 επαναλήψεις και ακολουθεί η εκτέλεση των αλγορίθμων MPPT και MEPT. Κατά την εκτέλεση των MPPT και MEPT το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Συνεπώς από την εικοστή-πρώτη επανάληψη και μετά έχουμε ταλάντωση γύρω από το MPP η οποία μερικές φορές δεν είναι ευδιάκριτη στα σχήματα λόγω των μικρών αλλαγών.

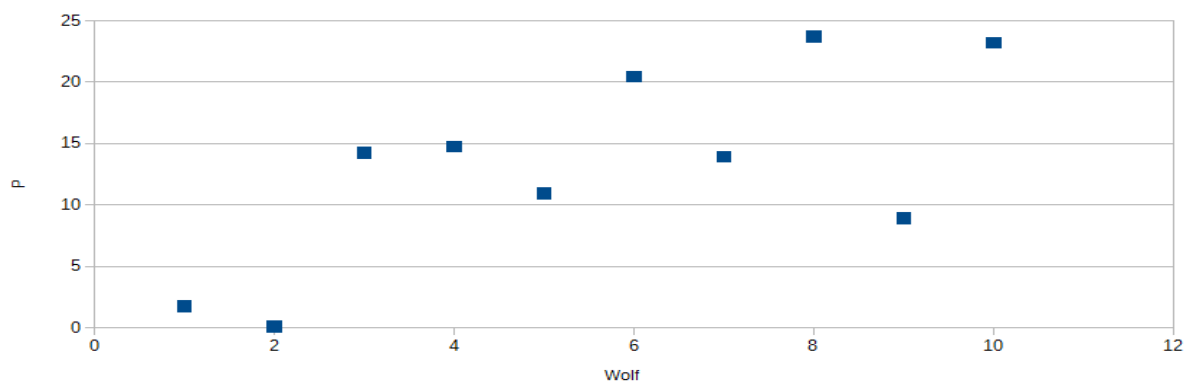
Τα σχήματα 5-91 έως 5-100 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας έντασης ίσης με 1000W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 500W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην περίπτωση αυτή το ολικό μέγιστο βρίσκεται στα δεξιά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα αριστερά.



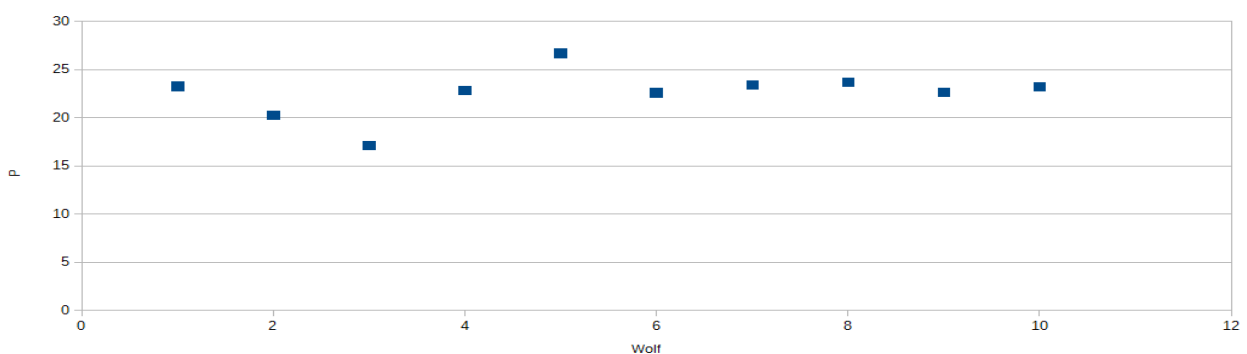
Σχήμα 5-91. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες έντασης 1000W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



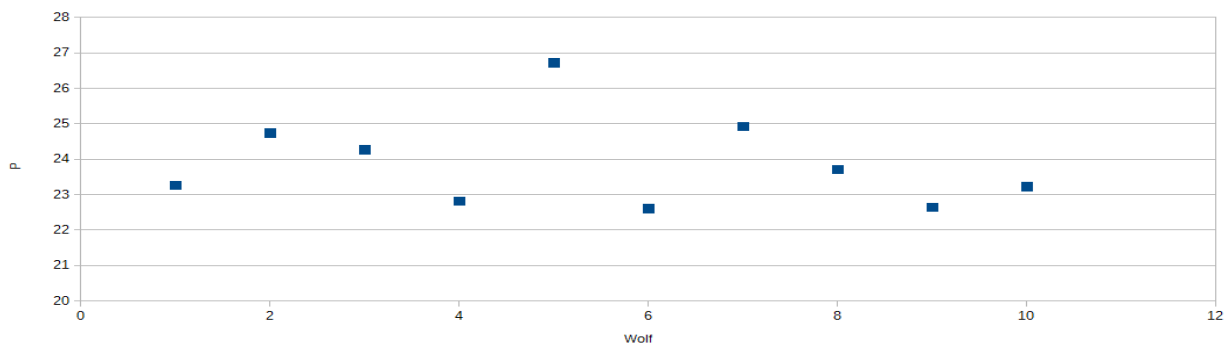
Σχήμα 5-92. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες έντασης 1000W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



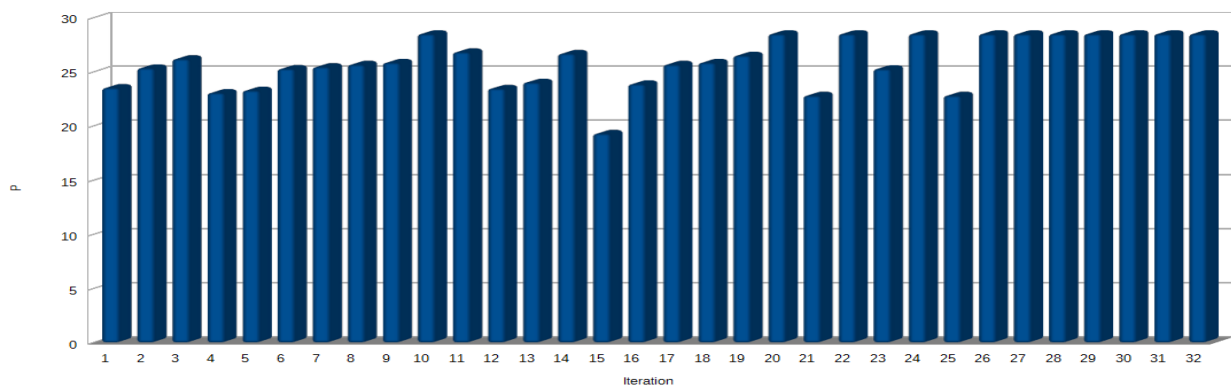
Σχήμα 5-93. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



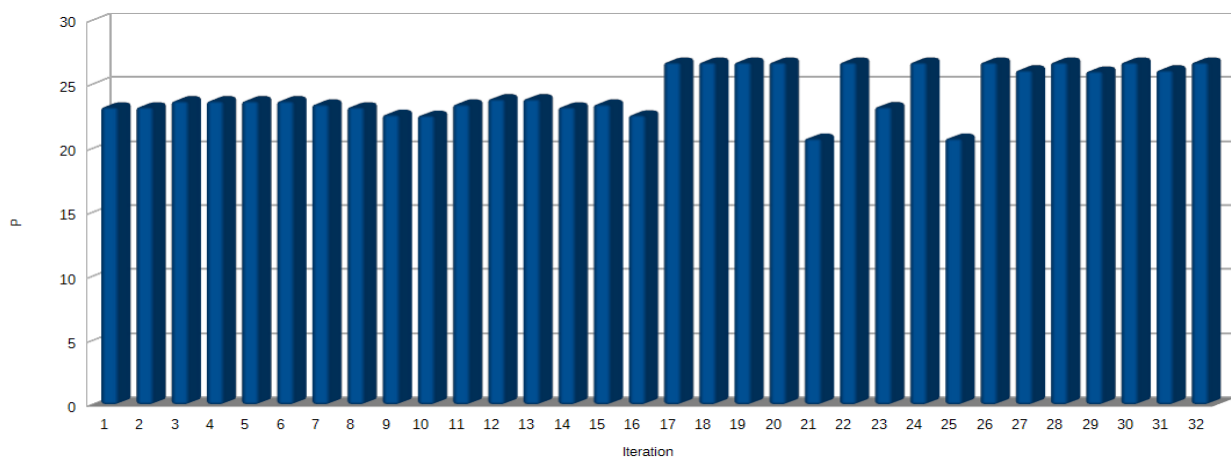
Σχήμα 5-94. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



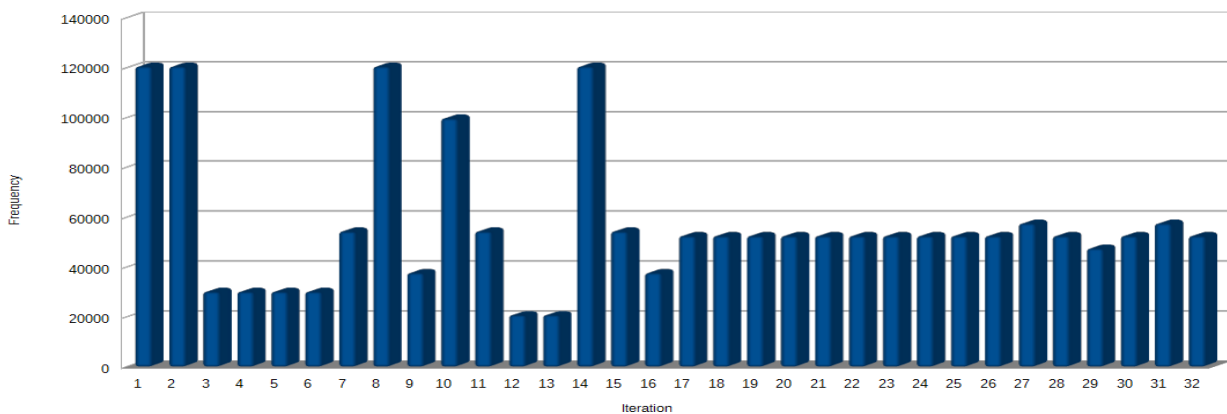
Σχήμα 5-95. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (wolves) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου GWO.



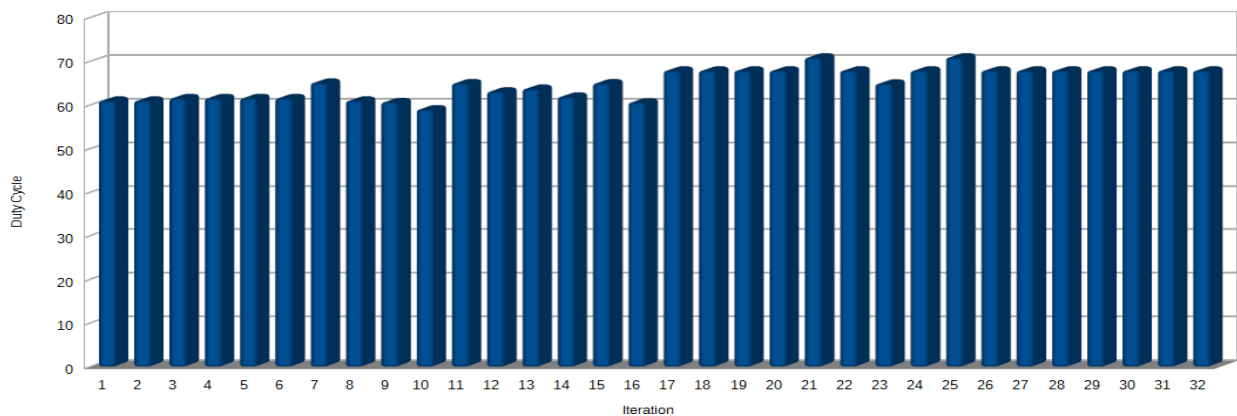
Σχήμα 5-96. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



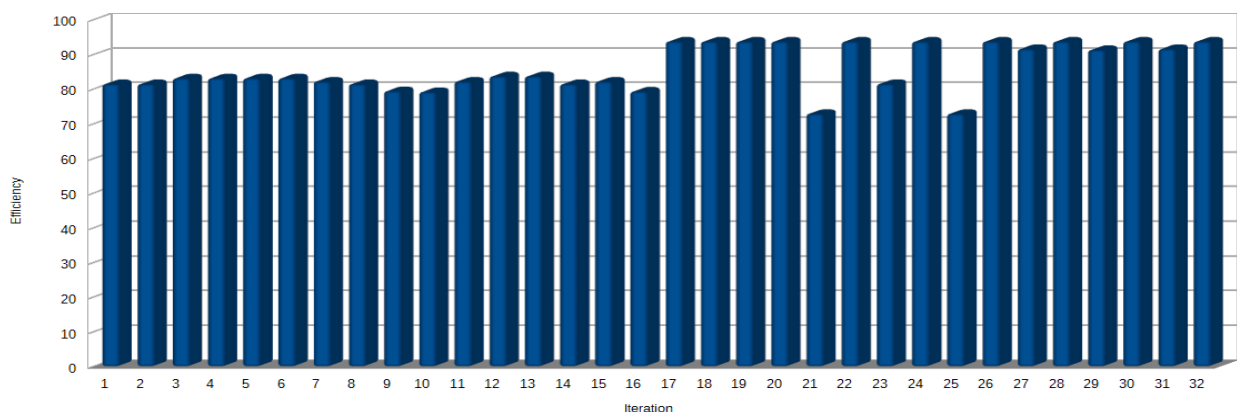
Σχήμα 5-97. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-98. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



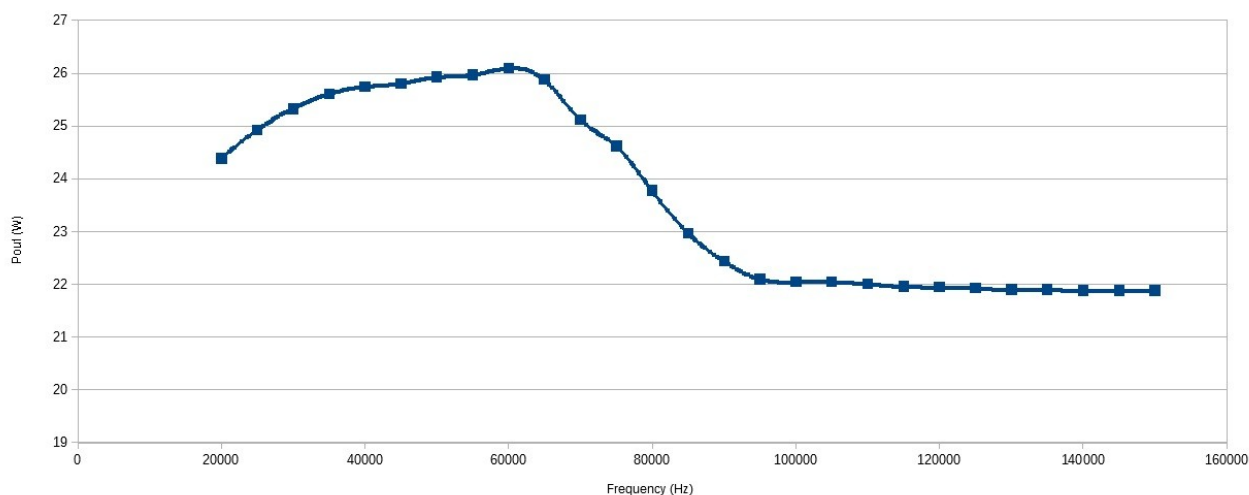
Σχήμα 5-99. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-100. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (wolf) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως είναι φανερό σε αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα, το σύστημα που αναπτύχθηκε λειτουργεί αποτελεσματικά εντοπίζοντας το MPP με ακρίβεια 98-99% αλλά και την κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού έτσι ώστε ο μετατροπέας DC/DC να λειτουργεί με βαθμό απόδοσης 93,5% περίπου. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT ξεκινούν τη λειτουργία τους από το ζεύγος duty cycle-frequency που εντόπισε ο GWO και ταλαντώνονται γύρω από το ολικό MPP μέχρι να εκτελεσθεί ξανά ο Grey Wolf Optimizer. Όπως και πριν ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer εκτελείται για 20 επαναλήψεις και ακολουθεί η εκτέλεση των αλγορίθμων MPPT και MEPT. Κατά την εκτέλεση των MPPT και MEPT το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Συνεπώς από την εικοστή-πρώτη επανάληψη και μετά έχουμε ταλάντωση γύρω από το MPP η οποία μερικές φορές δεν είναι ευδιάκριτη στα σχήματα λόγω των μικρών αλλαγών.

Γενικά τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer βρίσκει αποτελεσματικά το βέλτιστο duty cycle το οποίο μεγιστοποιεί την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης και μία συχνότητα η οποία βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή του σε σχέση με το να λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα 100kHz. Αυτό που δεν είναι σαφές είναι αν η συχνότητα αυτή είναι όντως η βέλτιστη ή θα μπορούσε να υπάρξει και κάποια καλύτερη. Για το λόγο αυτό γίνεται μία σάρωση μεταβάλλοντας τη συχνότητα λειτουργίας και διατηρώντας σταθερό το duty cycle στην τιμή εκείνη που μεγιστοποιείται η ισχύς εισόδου. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν συνθήκες ακτινοβολίας 500 και 1000 W/m², αντίστοιχα, στα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια, όπως στο Σχήμα 5-81 και duty cycle 71% (το βέλτιστο δηλαδή που εντοπίστηκε) και έγινε σάρωση των τιμών ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για συχνότητες 20-150kHz.



Σχήμα 5-101. Κυματομορφή της ισχύος εξόδου του boost converter για συχνότητες από 20-150kHz και μέγιστη ισχύ στην είσοδο.

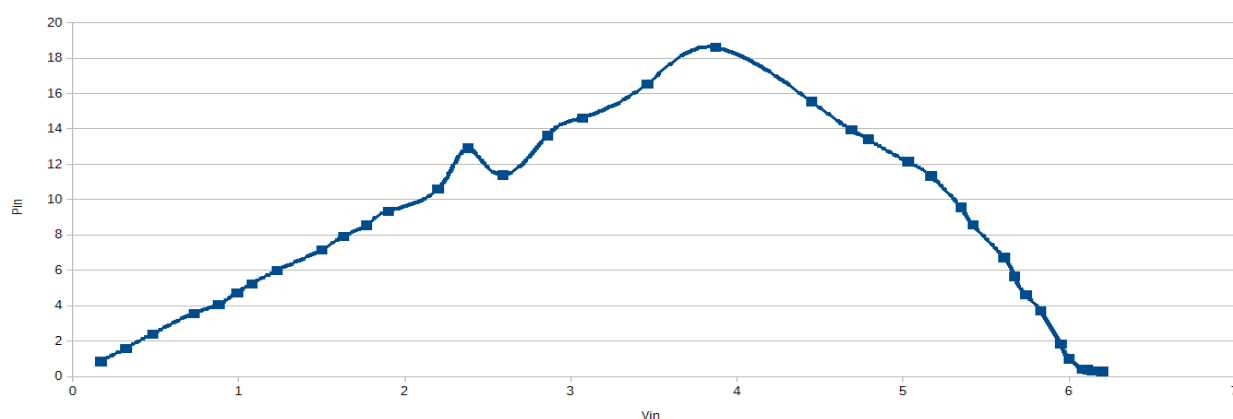
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-101 η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται στα 60kHz και ο Grey Wolf Optimizer εντόπισε τη βέλτιστη συχνότητα στα 62kHz. Επομένως, ο εντοπισμός της βέλτιστης συχνότητας λειτουργίας γίνεται αποτελεσματικά. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και 100% ακριβής να μην είναι ο εντοπισμός της συχνότητας δεν προκαλείται πρόβλημα, καθώς ο αλγόριθμος MEPT που θα ακολουθήσει θα εκμηδενίσει αυτή την απόκλιση. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να είναι η συχνότητα μετά τη σύγκλιση του αλγορίθμου κοντά στη βέλτιστη και να μην έχει εγκλωβιστεί σε κάποια τοπικά βέλτιστη συχνότητα.

5.6 Πειραματικά αποτελέσματα Flower Pollination Algorithm, MPPT και MEPT σε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

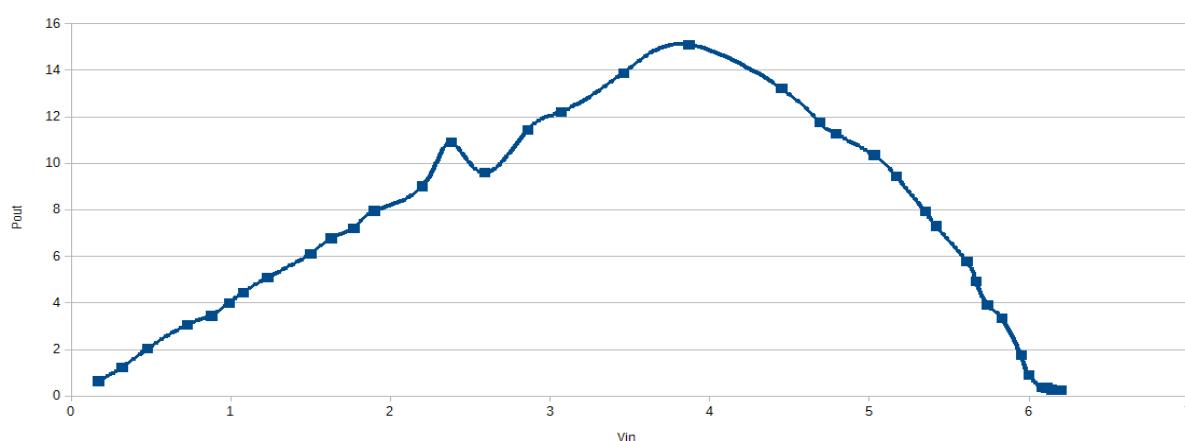
Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων εκτελέστηκε πρώτος στο μικροελεγκτή ο αλγόριθμος Flower Pollination, και στη συνέχεια οι MPPT και MEPT. Λόγω ανομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχουν περισσότερα από ένα μέγιστα στη χαρακτηριστική καμπύλη P-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Συνεπώς είναι απαραίτητο να εκτελεσθεί αρχικά ένας αλγόριθμος ικανός να εντοπίσει το ολικό μέγιστο με σιγουριά και όχι να υπάρχει ο κίνδυνος να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό μέγιστο. Ο αλγόριθμος Flower Pollination εντοπίζει το MPP της φωτοβολταϊκής

συστοιχίας (κατάλληλο duty cycle) και την κατάλληλη συχνότητα διακοπισμού του μετατροπέα DC/DC έτσι ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Μετά από αυτό οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατηρούν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

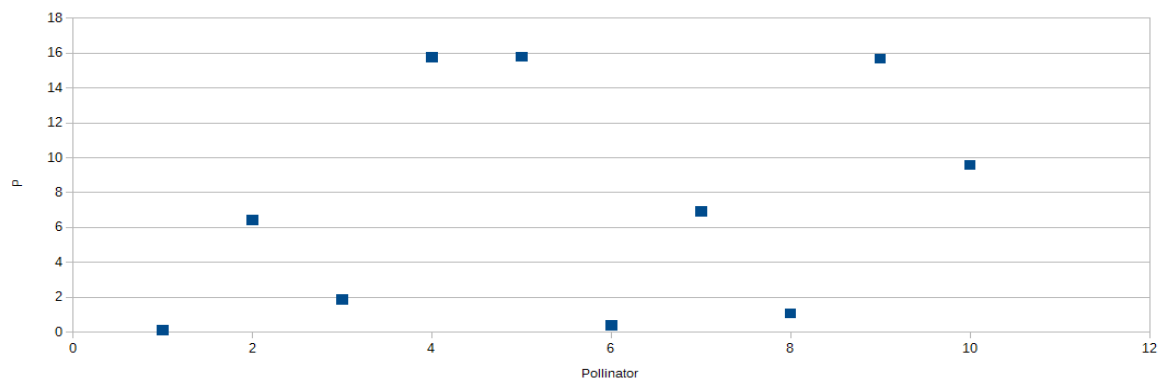
Τα σχήματα 5-102 έως 5-111 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 900W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 400W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην περίπτωση αυτή το ολικό μέγιστο βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα δεξιά.



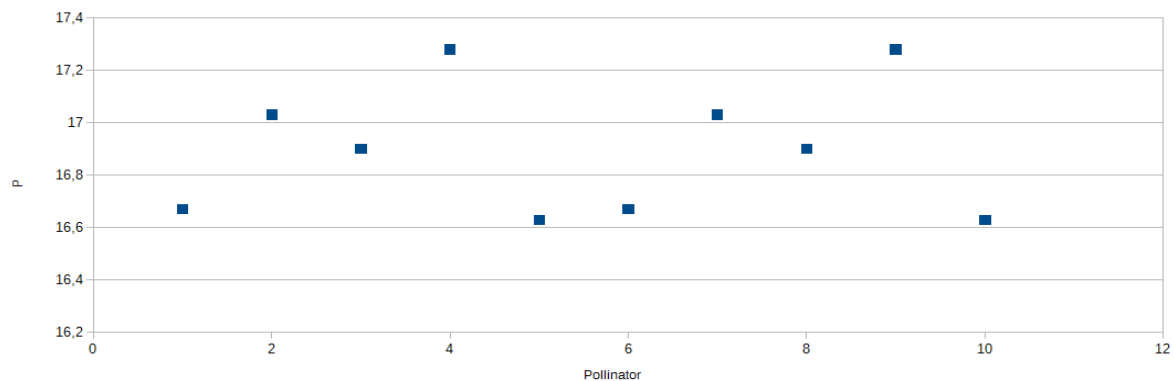
Σχήμα 5-102. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 900W/m^2 & 400W/m^2 αντίστοιχα.



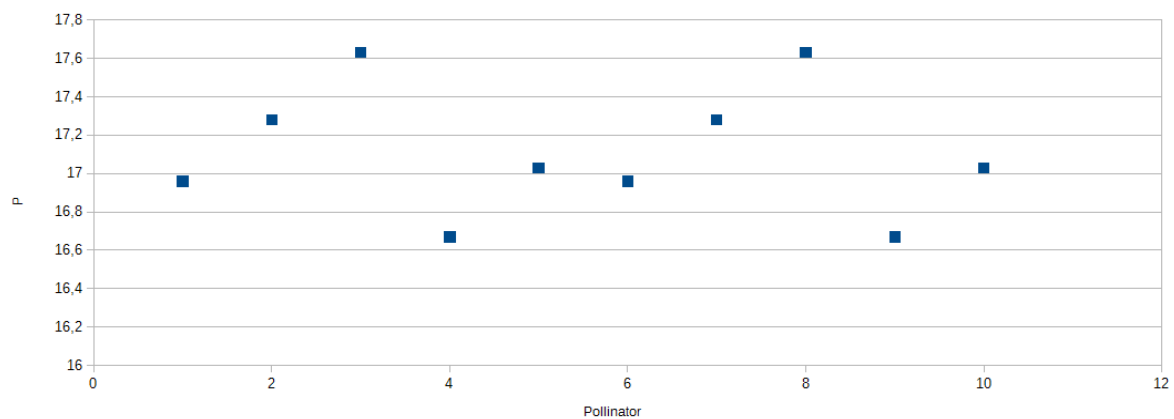
Σχήμα 5-103. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 900W/m^2 & 400W/m^2 αντίστοιχα.



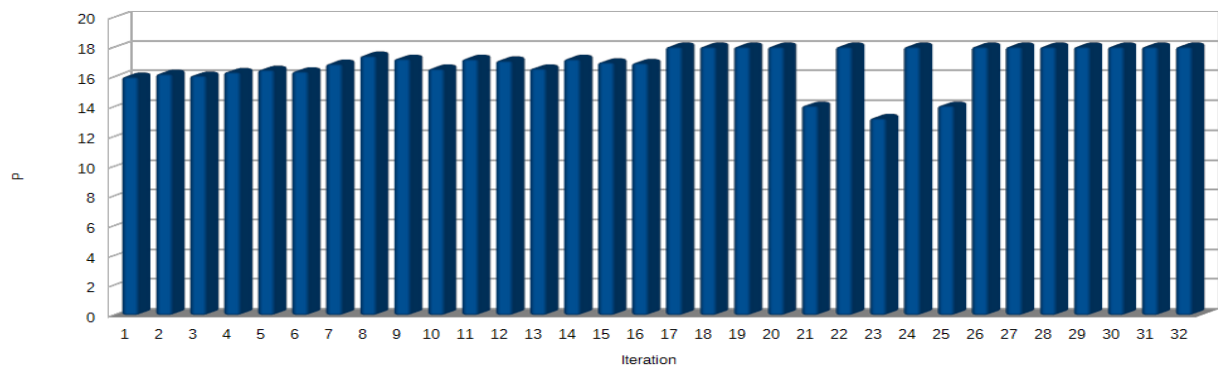
Σχήμα 5-104. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



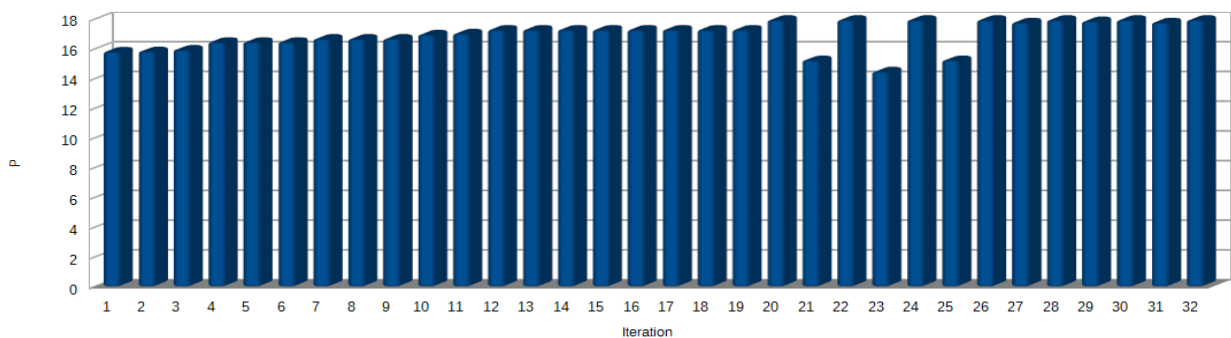
Σχήμα 5-105. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



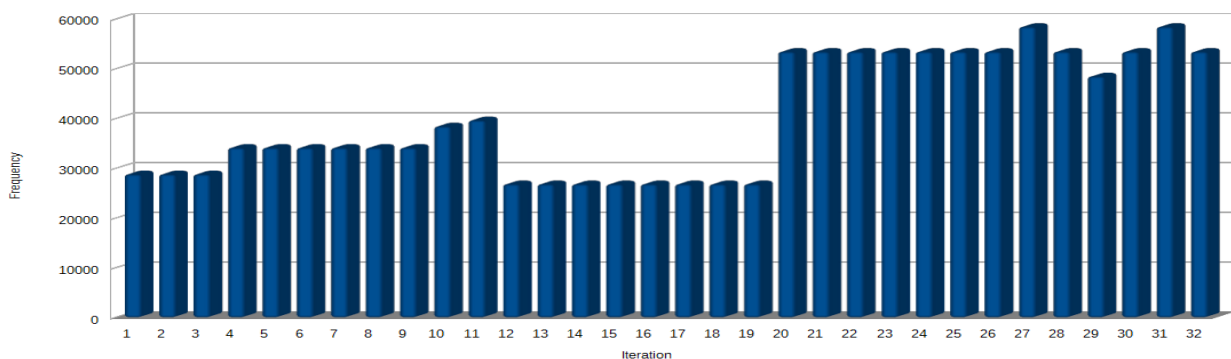
Σχήμα 5-106. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



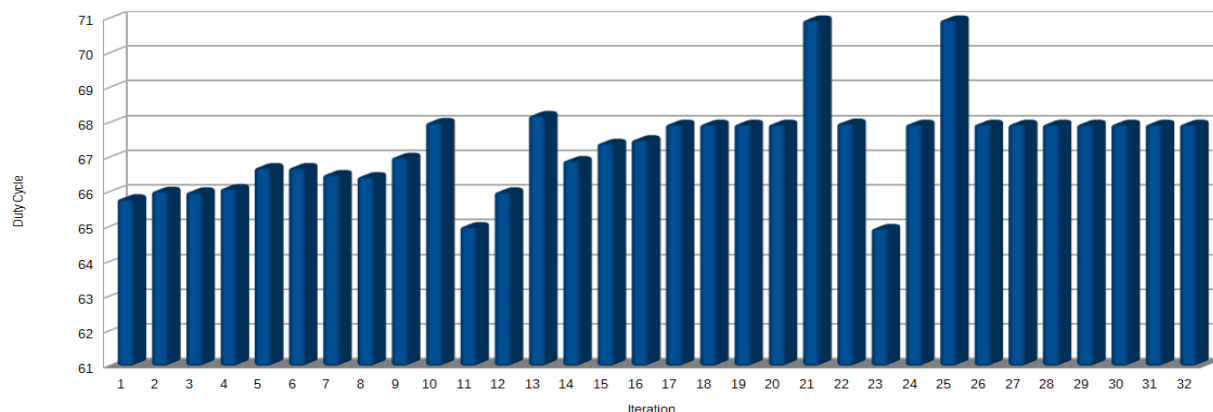
Σχήμα 5-107. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



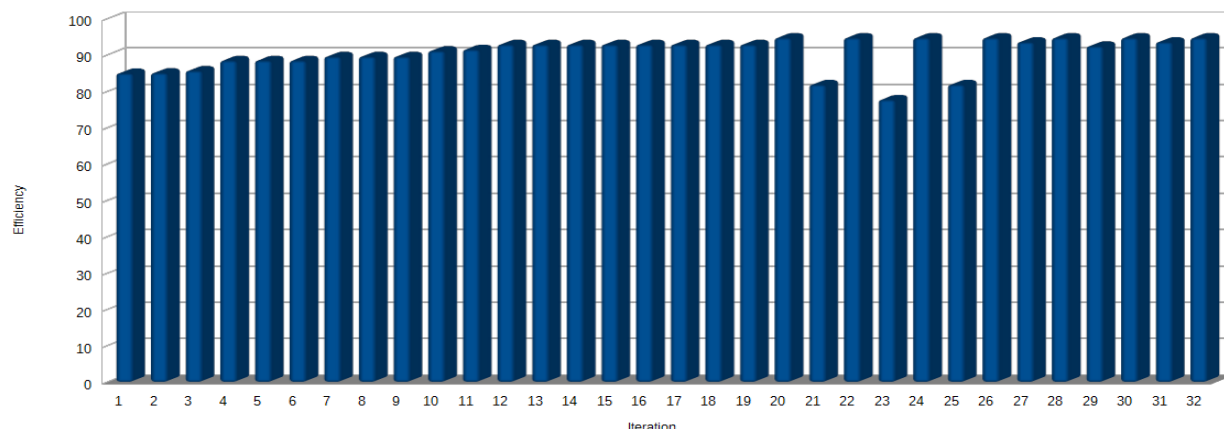
Σχήμα 5-108. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-109. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-110. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

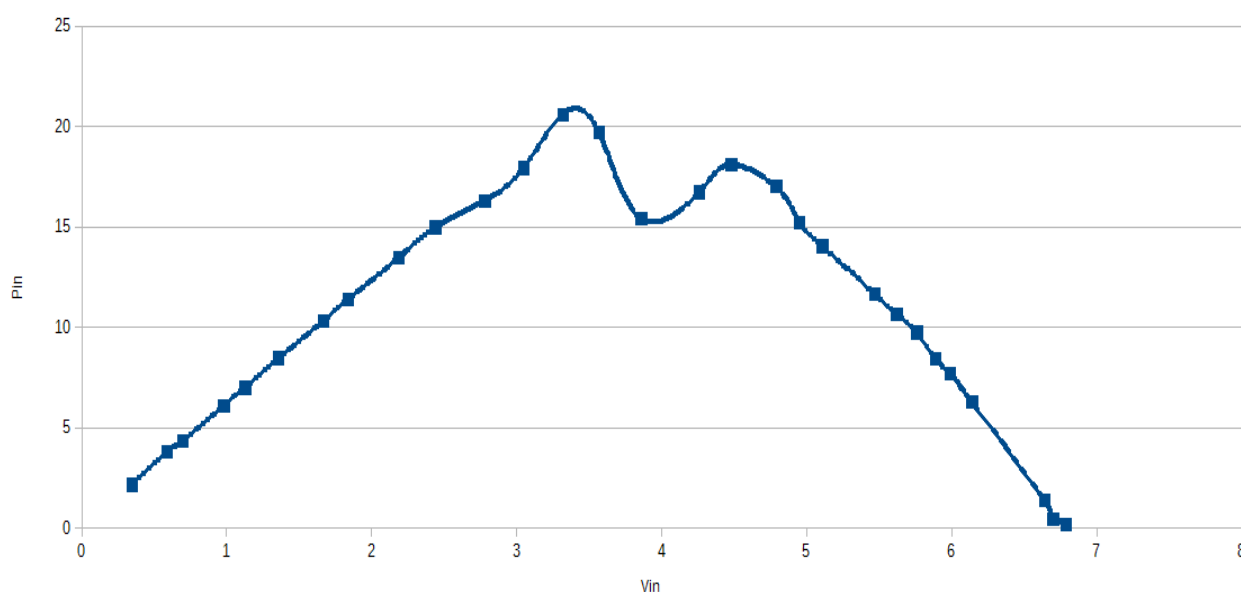


Σχήμα 5-111. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

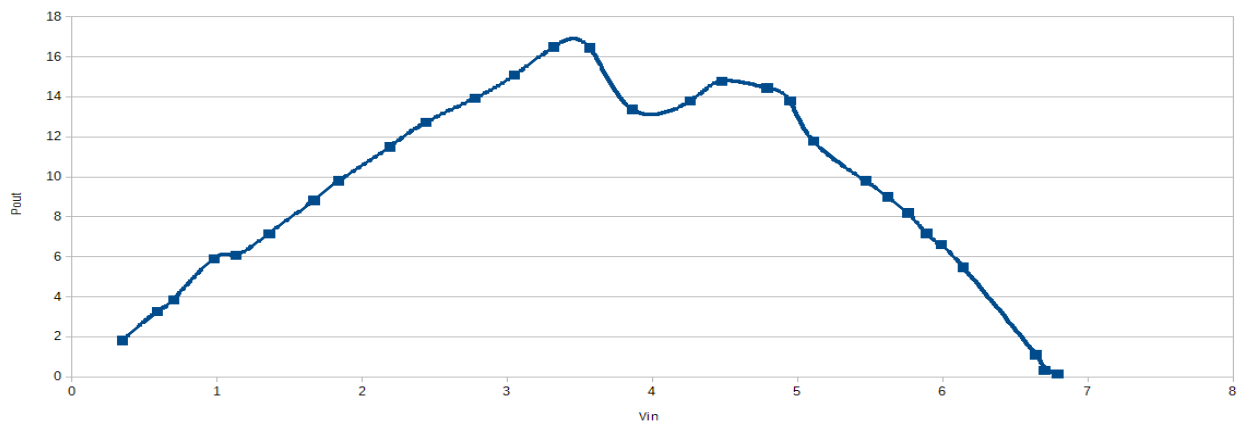
Ο Flower Pollination Algorithm εκτελείται πρώτος και εντοπίζει το ζεύγος συχνότητας-duty cycle που αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος εντοπίζει το βέλτιστο ζεύγος αρκετά νωρίτερα όμως παρ' όλα αυτά περνάει από 200 σημεία μέχρι να τερματίσει αφού η συνθήκη τερματισμού είναι οι 20 επαναλήψεις. Ο εντοπισμός του MPP προσεγγίζει το 98% σε ακρίβεια αφού ο αλγόριθμος συγκλίνει στο σημείο όπου η ισχύς εισόδου είναι περίπου 18,3W με την πραγματική μέγιστη να είναι στα 18,6W. Ακόμα, επιτυγχάνεται αύξηση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης σε 94,78% για συχνότητα 53,5kHz, ενώ για σταθερή συχνότητα 100kHz ο βαθμός απόδοσης ήταν 81.18%,

δηλαδή κατά περίπου 14% μικρότερος. Ο Flower Pollination Algorithm εκτελείται για 20 επαναλήψεις και αμέσως μετά εκτελούνται διαδοχικά οι MPPT και MEPT με τους οποίους το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Η ταλάντωση αυτή φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 5-90 για τις επαναλήψεις 21-26 και συνεχίζεται για τις επαναλήψεις 27-32 χωρίς όμως να είναι ευδιάκριτη λόγω των μικρών μεταβολών.

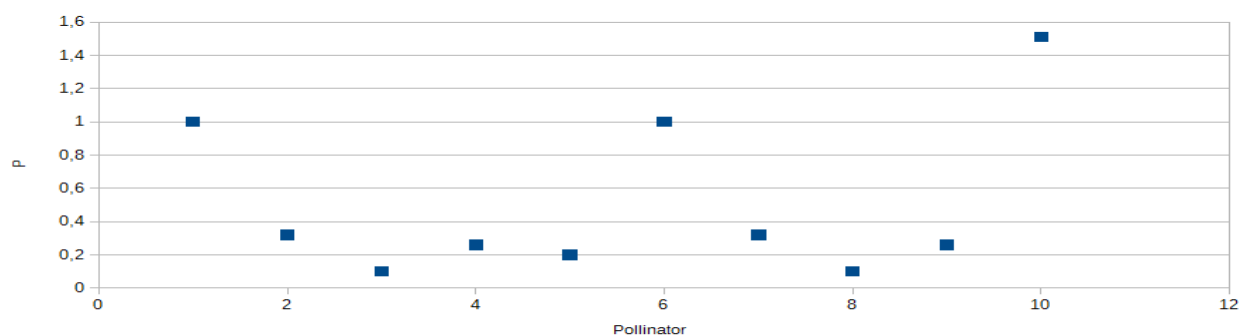
Τα σχήματα 5-112 έως 5-121 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 920W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 600W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Σε αυτή την περίπτωση το ολικό μέγιστο βρίσκεται στα δεξιά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα αριστερά.



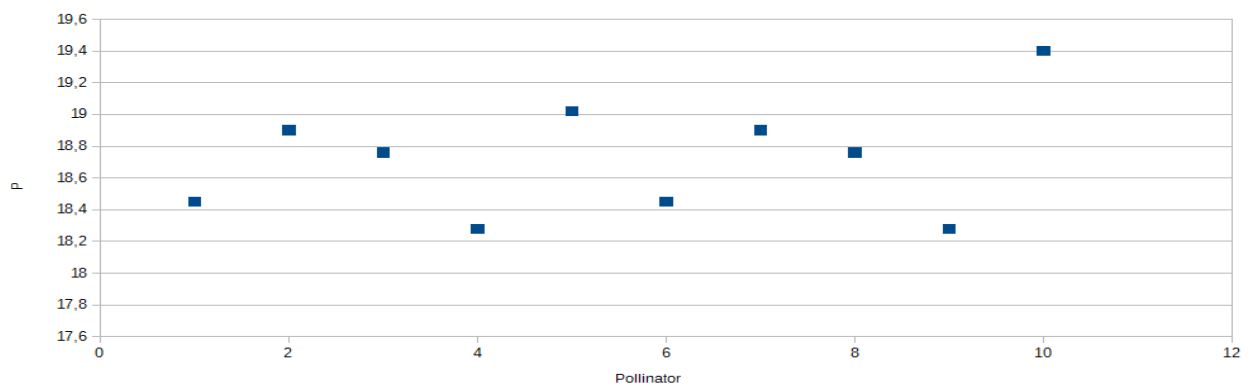
Σχήμα 5-112. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 920W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



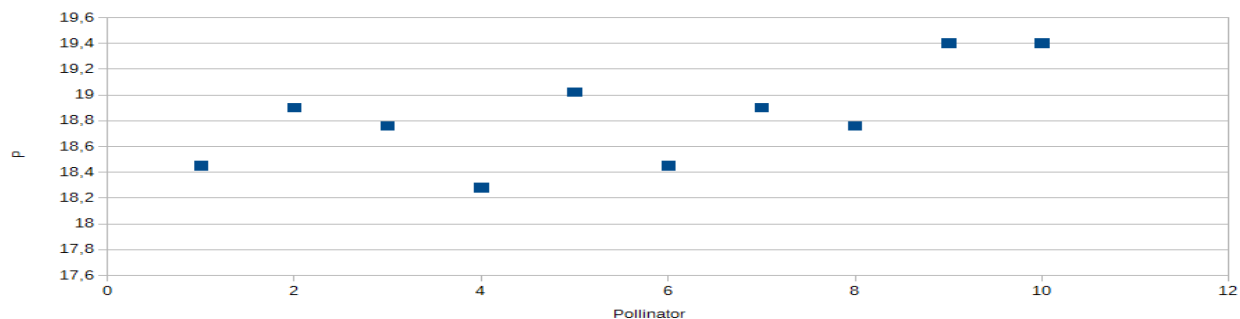
Σχήμα 5-113. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 920W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



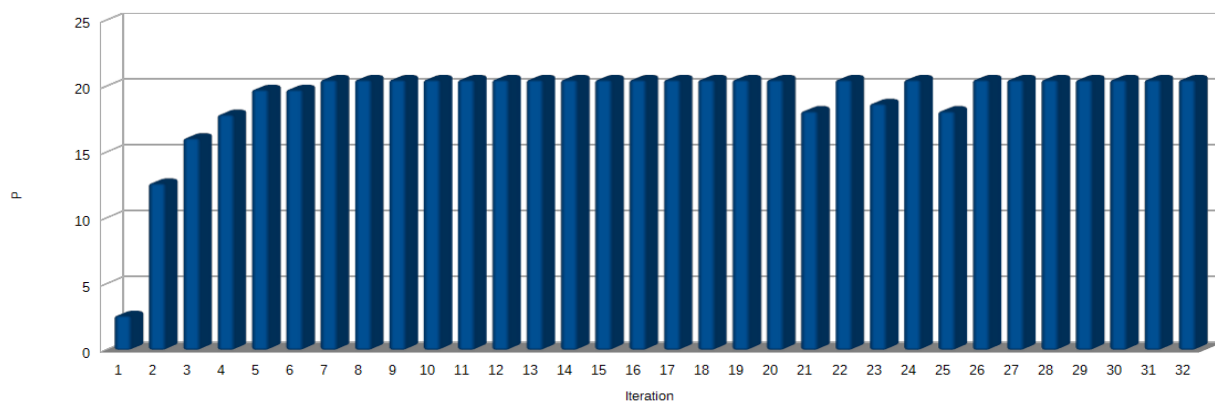
Σχήμα 5-114. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



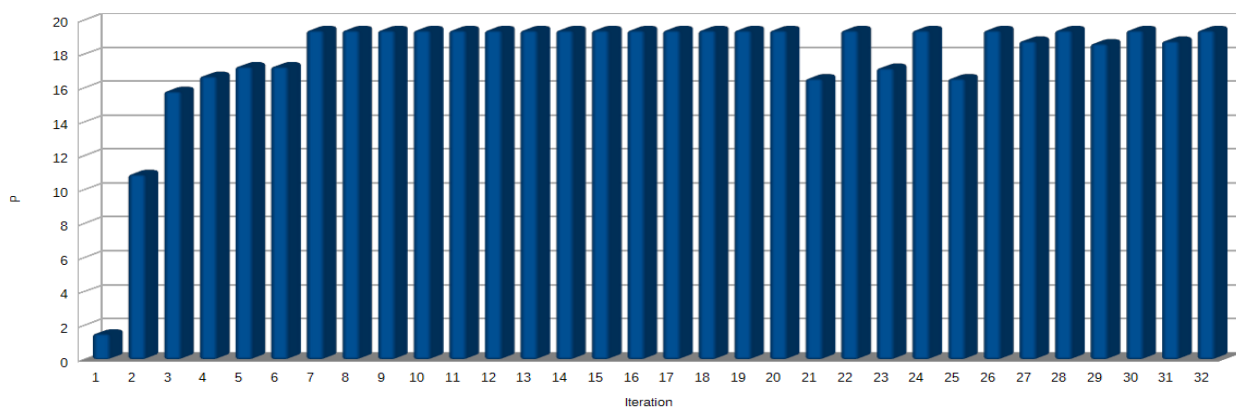
Σχήμα 5-115. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



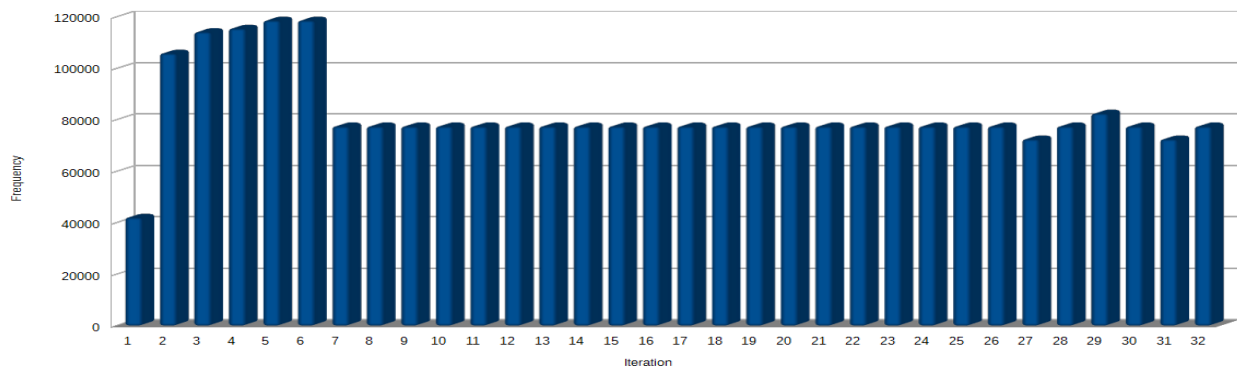
Σχήμα 5-116. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (pollinators) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου FPA.



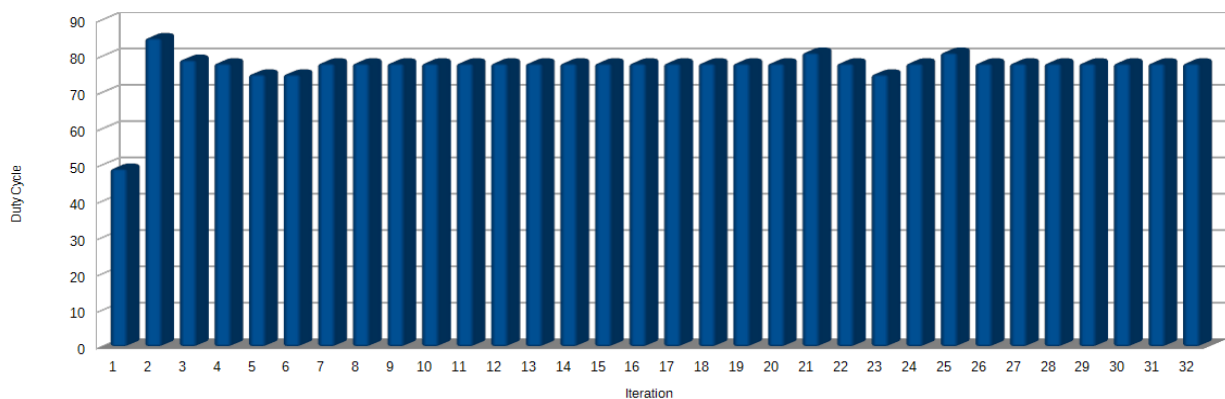
Σχήμα 5-117. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



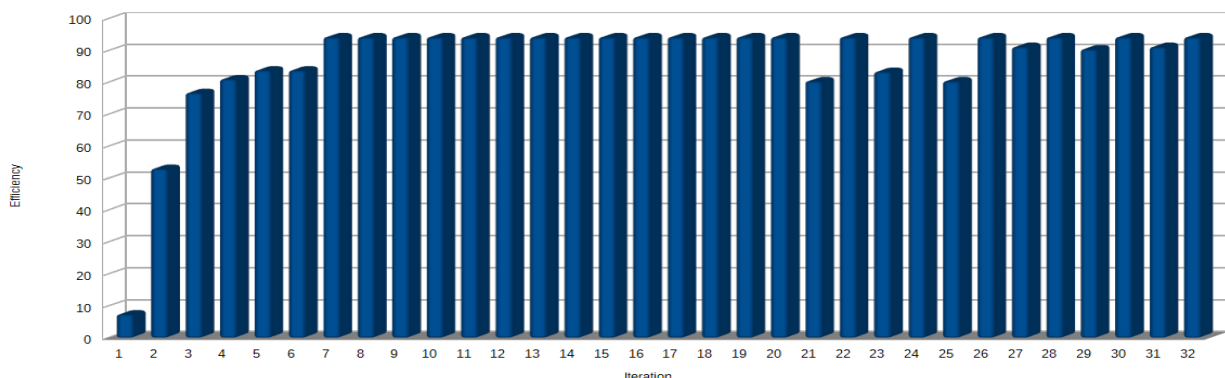
Σχήμα 5-118. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-119. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



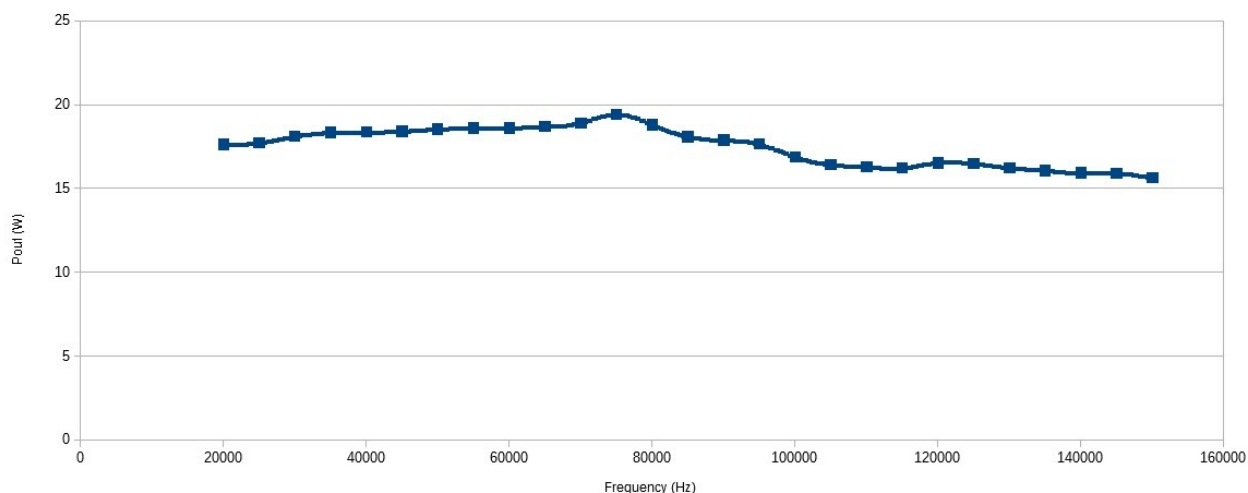
Σχήμα 5-120. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-121. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (pollinator) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Σε αντίθεση με άλλα πειράματα, όπου η τυχαία αρχικοποίηση των υποψήφιων λύσεων δίνει έστω κάποιες από αυτές πιο κοντά στο MPP (και στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα), σε αυτό το πείραμα η τυχαία αρχικοποίηση των pollinators δεν ήταν και τόσο ευνοϊκή καθώς όπως φαίνεται στη διασπορά των τιμών ισχύος αρχικά οι τιμές ισχύος ήταν αρκετά μακριά από τις βέλτιστες. Παρ' όλα αυτά, ο αλγόριθμος Flower Pollination σε σύντομο αριθμό επαναλήψεων κατάφερε να συγκλίνει κοντά στη βέλτιστη λύση. Εντόπισε το MPP με ακρίβεια 99% και αύξησε τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC. Συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/DC για σταθερή συχνότητα διακοπτισμού ίση με 100kHz είναι 80%, ενώ με την εύρεση της βέλτιστης συχνότητας στα 77,4kHz από τον αλγόριθμο Flower Pollination ο βαθμός απόδοσης αυξήθηκε στο 94,2%, έχοντας έτσι αύξηση της τάξης του 14%. Οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT παίρνοντας ως αφετηρία το αποτέλεσμα του Flower Pollination Algorithm προσπαθούν να διατηρήσουν τη λειτουργία στο MPP και να διορθώσουν κάποια μικρή μετακίνηση αν υπάρξει. Ο αλγόριθμος FPA εκτελείται για 20 επαναλήψεις και μετά εκτελούνται οι MPPT και MEPT κατά την εκτέλεση των οποίων το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Η ταλάντωση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5-100 μετά την εικοστή επανάληψη.

Όπως και πριν, τα πειραματικά αποτελέσματα μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος Flower Pollination βρίσκει αποτελεσματικά το βέλτιστο duty cycle το οποίο μεγιστοποιεί την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης και μία συχνότητα η οποία βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή του σε σχέση με το να λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα 100kHz. Αυτό που δεν είναι σαφές είναι αν η συχνότητα αυτή είναι όντως η βέλτιστη ή θα μπορούσε να υπάρξει και κάποια καλύτερη. Για το λόγο αυτό γίνεται ένα σάρωση μεταβάλλοντας τη συχνότητα λειτουργίας και διατηρώντας σταθερό το duty cycle στην τιμή εκείνη που μεγιστοποιείται η ισχύς εισόδου. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν συνθήκες ακτινοβολίας 500 και 920 W/m², όπως στο Σχήμα 5-112 και duty cycle 78% (το βέλτιστο δηλαδή που εντοπίστηκε) και έγινε σκανάρισμα των τιμών ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για συχνότητες 20-150kHz.



Σχήμα 5-122. Κυματομορφή της ισχύος εξόδου του boost converter για συχνότητες από 20-150kHz και μέγιστη ισχύ στην είσοδο.

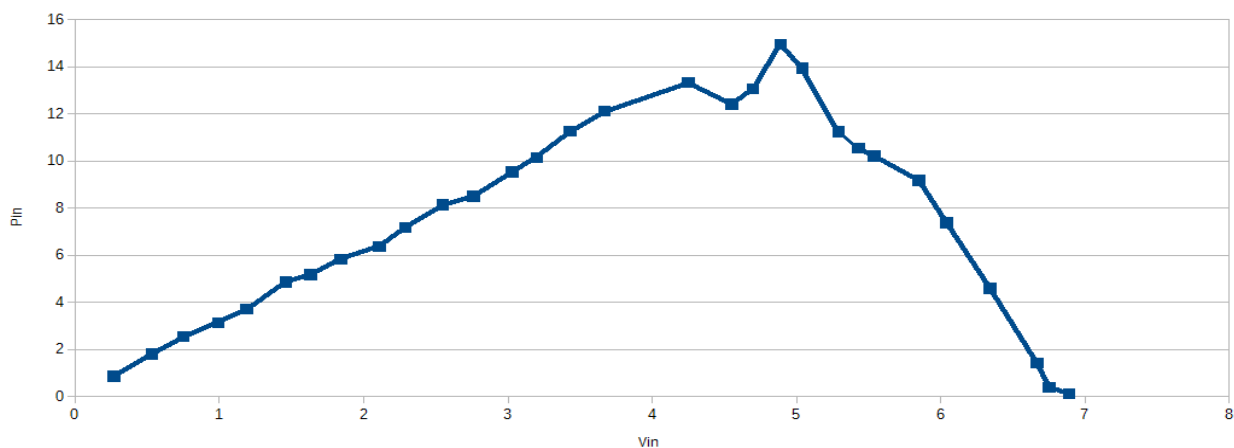
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-122 η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται πριν τα 80kHz και ο Flower Pollination Algorithm εντόπισε τη βέλτιστη συχνότητα στα 77kHz. Επομένως, ο εντοπισμός της βέλτιστης συχνότητας λειτουργίας γίνεται αποτελεσματικά. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και 100% ακριβής να μην είναι ο εντοπισμός της συχνότητας δεν μας πειράζει καθώς ο αλγόριθμος MEPT που θα ακολουθήσει θα βελτιώσει αυτή την απόκλιση. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να είναι η συχνότητα κοντά στη βέλτιστη και να μην έχει εγκλωβιστεί σε κάποια τοπικά βέλτιστη συχνότητα.

5.7 Πειραματικά αποτελέσματα Jaya Algorithm, MPPT και MEPT σε ανομοιομόρφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

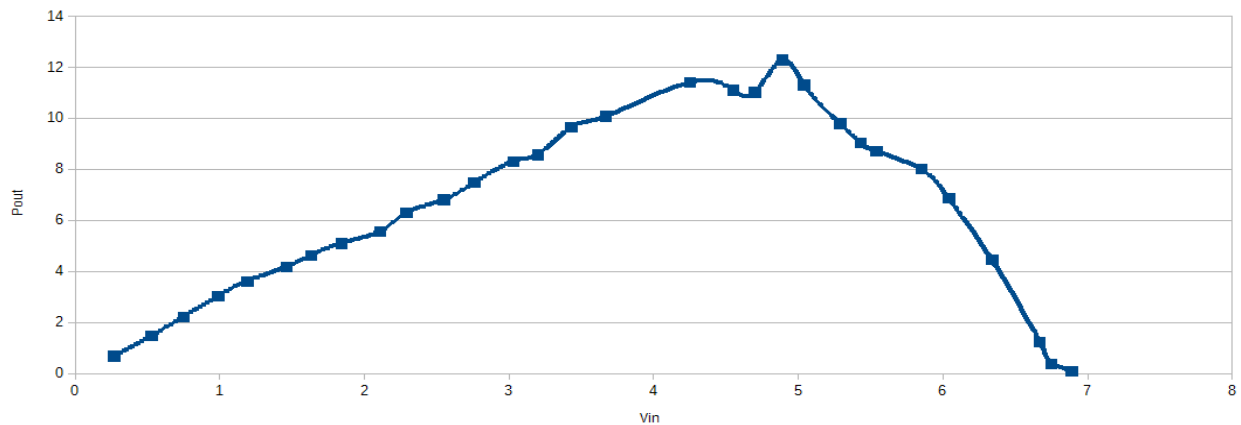
Σε αυτό το σετ πειραμάτων ο αλγόριθμος Jaya είναι υπεύθυνος για την αντιμετώπιση της ανομοιομόρφης ακτινοβολίας και την εύρεση του ζεύγους duty cycle-frequency που θα μεγιστοποιήσει την ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Αν εκτελούταν μόνο αλγόριθμοι MPPT και MEPT χωρίς τον Jaya το αποτέλεσμα είναι πολύ πιθανό να μην ήταν το

βέλτιστο δυνατό, καθώς λόγω της ανομοιομορφής πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας θα προκύψουν περισσότερα από ένα τοπικά μέγιστα ισχύος. Έτσι, εκτελείται πρώτα ο αλγόριθμος Jaya, ο οποίος εντοπίζει το κατάλληλο duty cycle και την κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού για μέγιστη παραγωγή ισχύος και ύστερα οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT λειτουργούν συμπληρωματικά ώστε να διατηρήσουν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας ή να το διορθώσουν αν τυχόν υπάρξουν μικροαποκλίσεις.

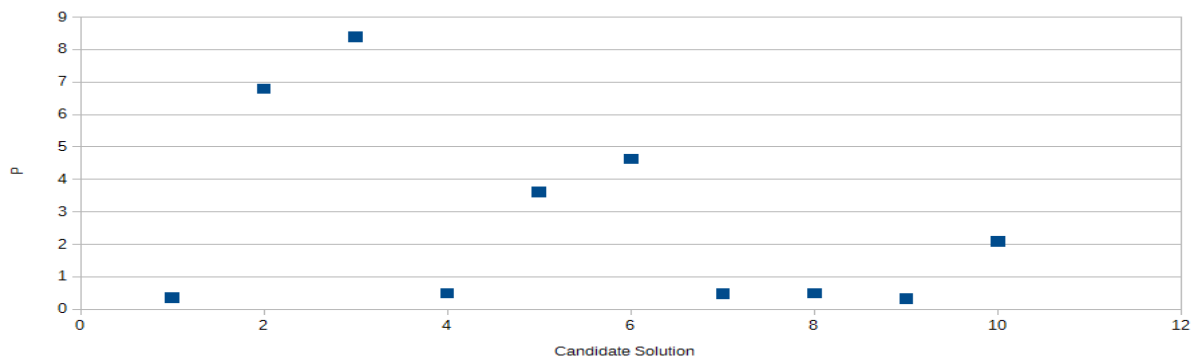
Τα σχήματα 5-123 έως 5-132 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιομορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 700W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 500W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στα δεξιά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα αριστερά.



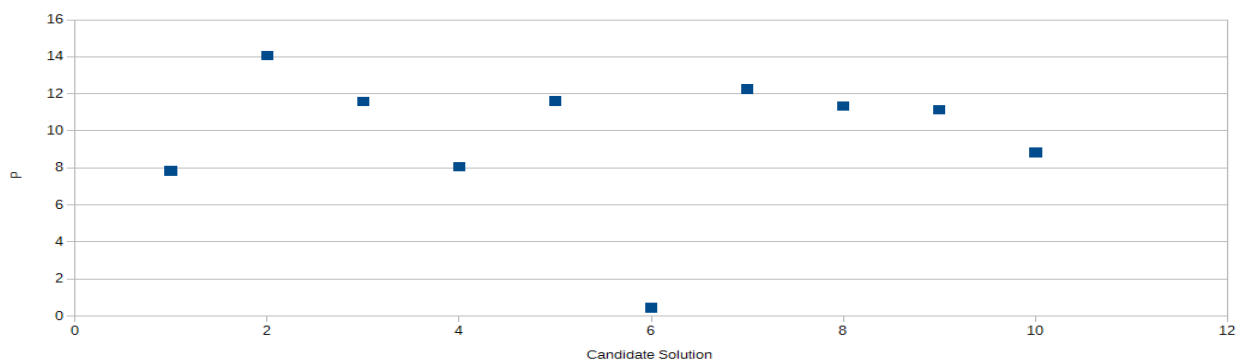
Σχήμα 5-123. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 700W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



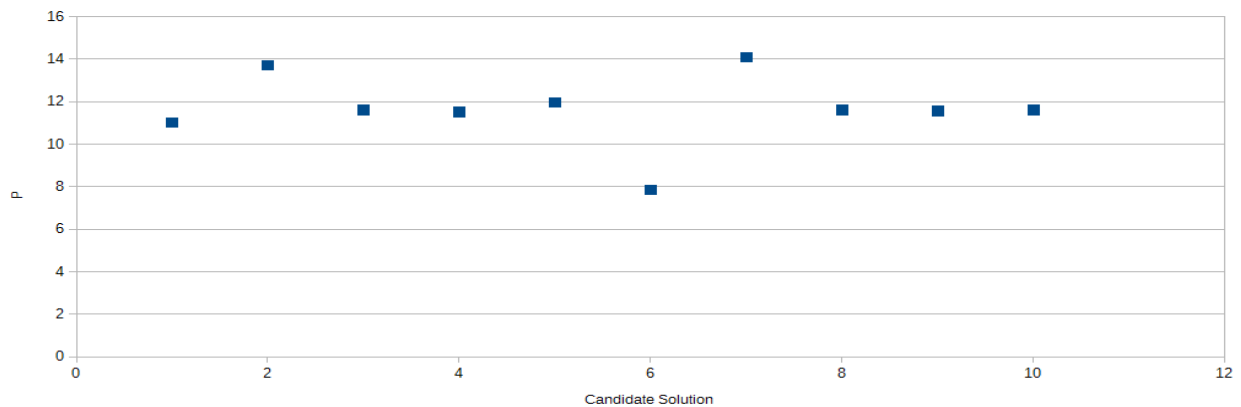
Σχήμα 5-124. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην εξόδου του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 700W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



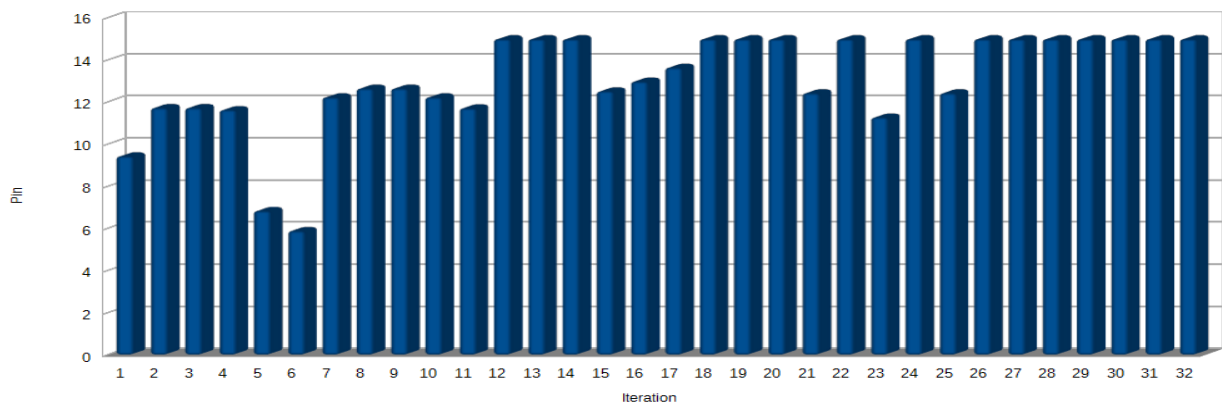
Σχήμα 5-125. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



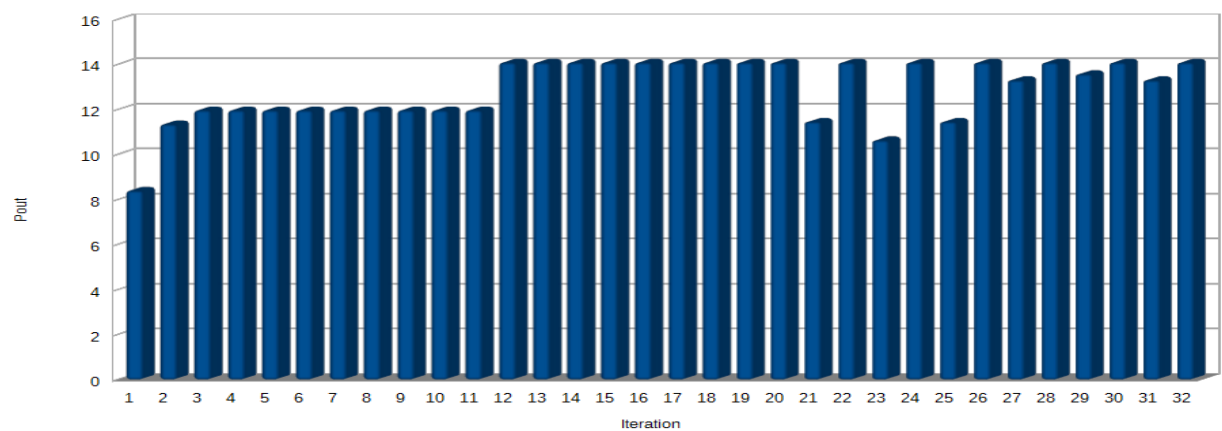
Σχήμα 5-126 Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



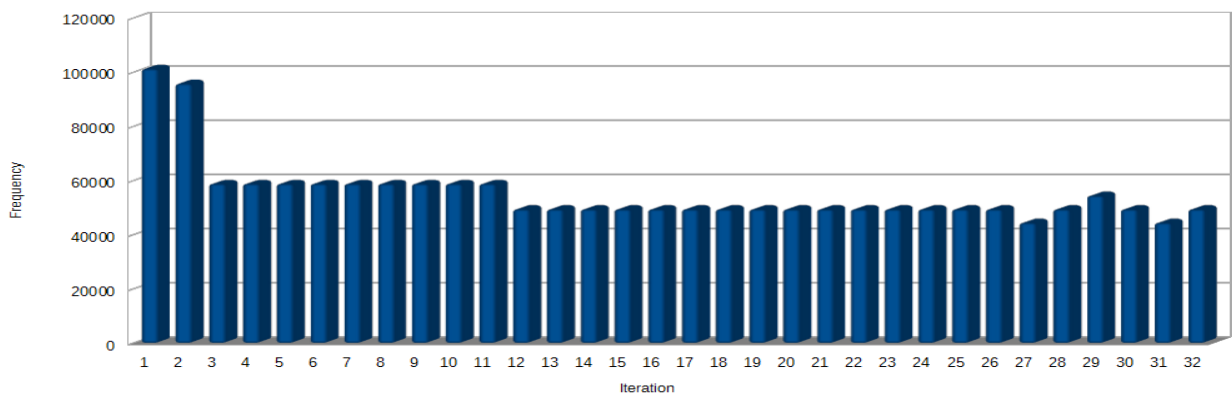
Σχήμα 5-127. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



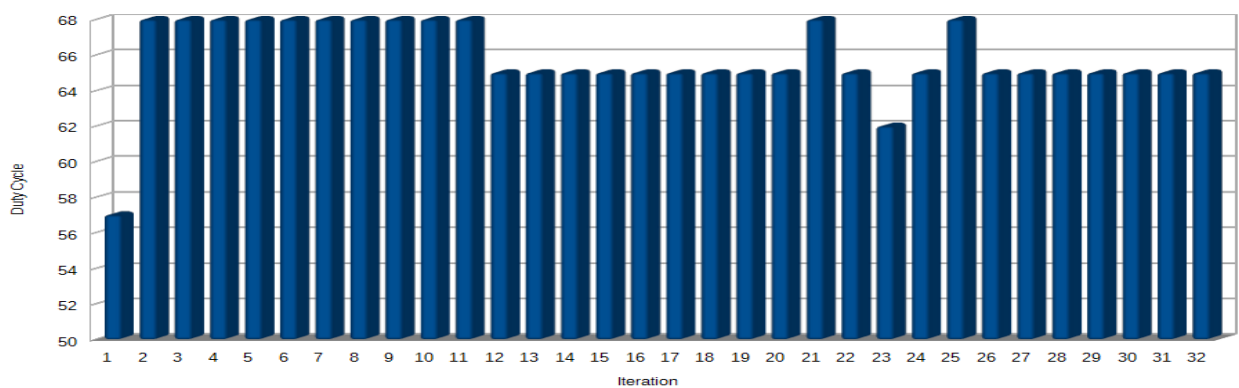
Σχήμα 5-128. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



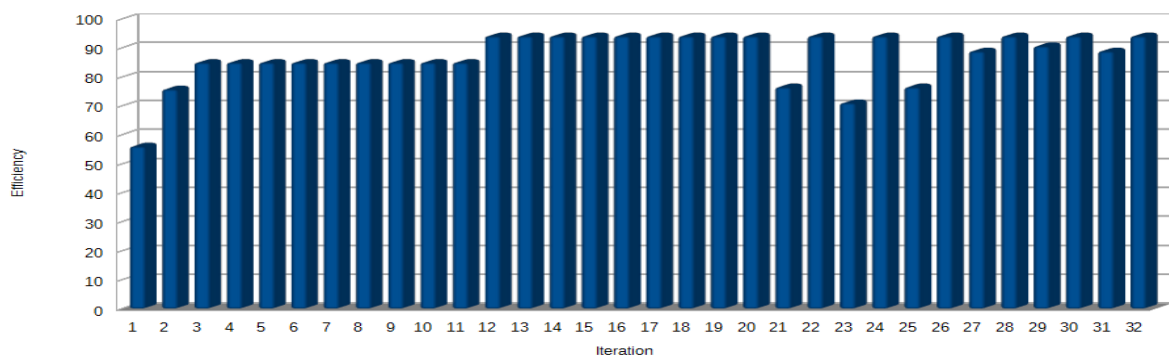
Σχήμα 5-129. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-130. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



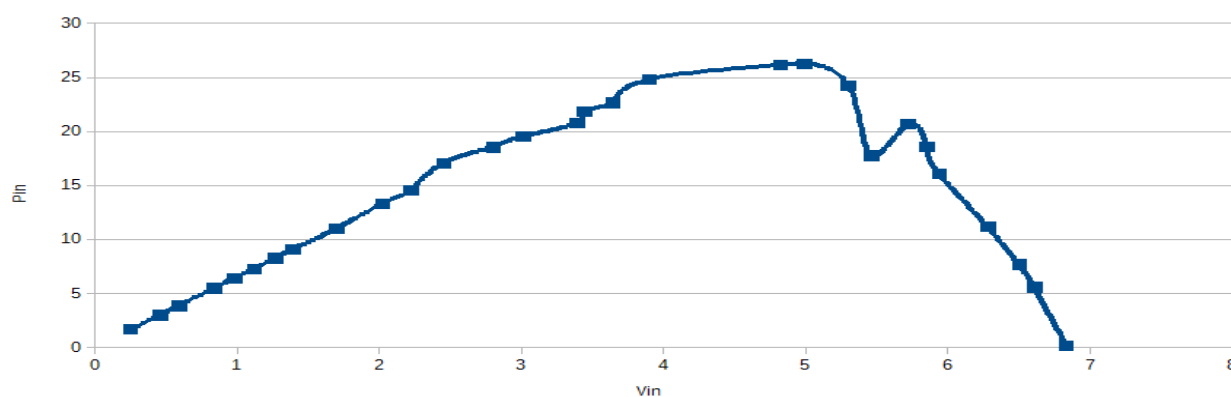
Σχήμα 5-131. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



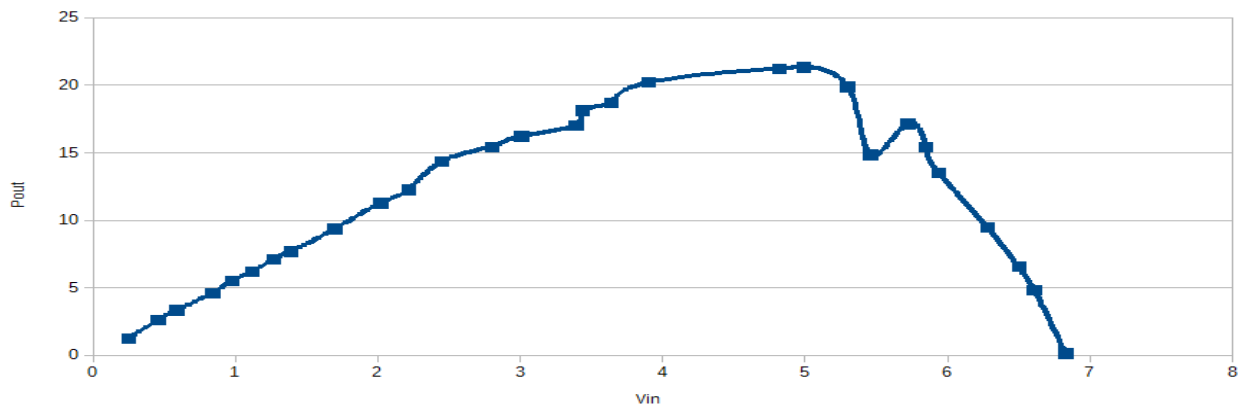
Σχήμα 5-132. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω σχήματα, ο αλγόριθμος Jaya εντόπισε σωστά το MPP χωρίς να επηρεαστεί από την ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Πέτυχε ακρίβεια περίπου 99% και βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ίση με 94% για συχνότητα διακοπτισμού 49kHz. Αυτό σημαίνει πως επιτεύχθηκε αύξηση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τη σταθερή συχνότητα των 100kHz όπου ο βαθμός απόδοσης ήταν 82,1%. Έτσι προέκυψε μια αύξηση της τάξης του 12%. Ακολουθώντας οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT διατήρησαν το σύστημα στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας μέχρι να έρθει η ώρα ο Jaya Algorithm να εκτελεστεί ξανά. Ο αλγόριθμος Jaya εκτελείται για 20 επαναλήψεις. Η ταλάντωση γύρω από το MPP που προκαλείται κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων MPPT και MEPT φαίνεται στο Σχήμα 5-110 μετά την εικοστή επανάληψη.

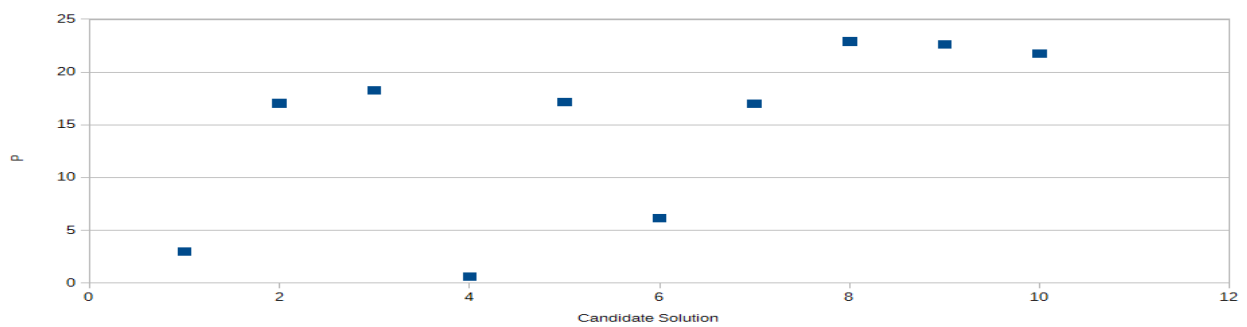
Τα σχήματα 5-133 έως 5-142 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 1000W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 500W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην περίπτωση αυτή ολικό μέγιστο βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα δεξιά.



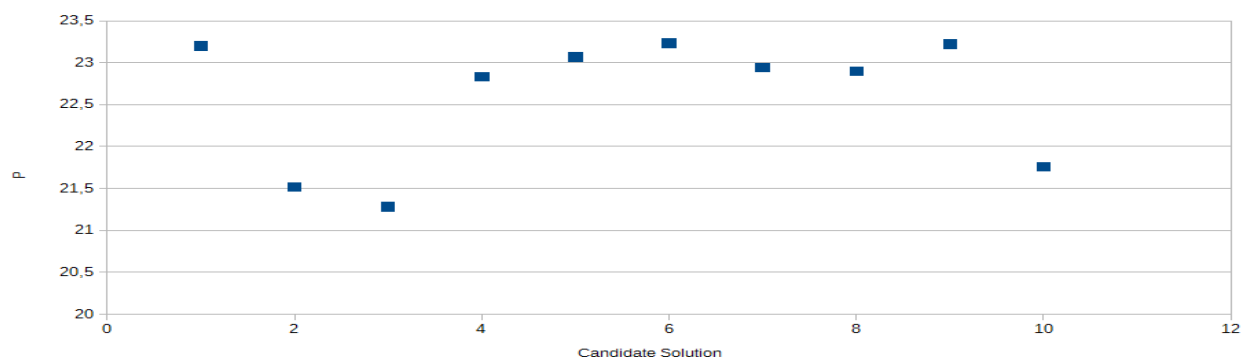
Σχήμα 5-133. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 1000W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



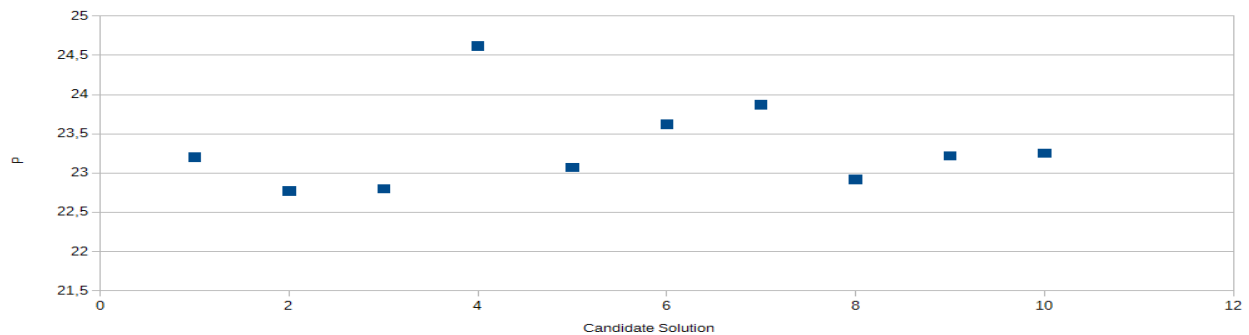
Σχήμα 5-134. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες $1000W/m^2$ & $500W/m^2$.



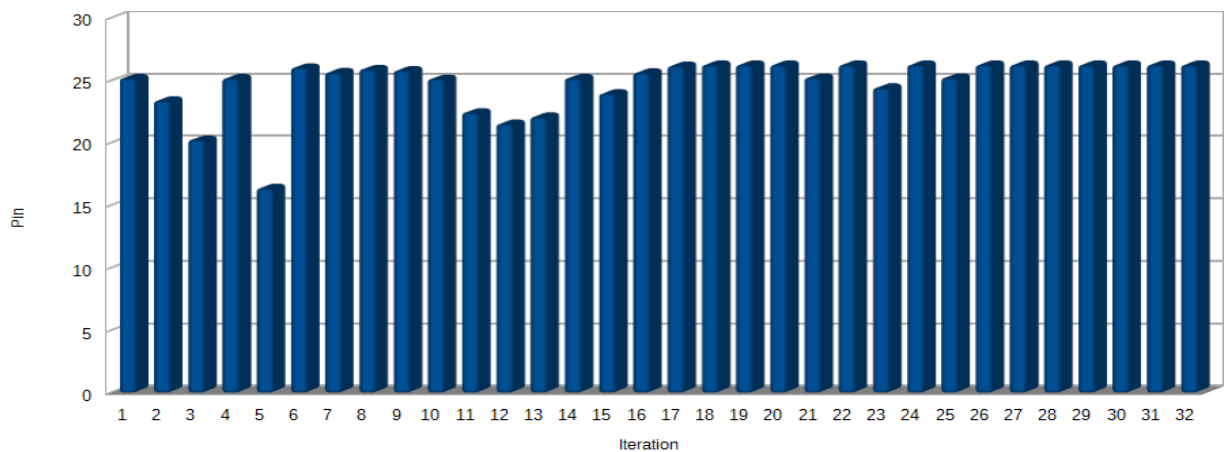
Σχήμα 5-135. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



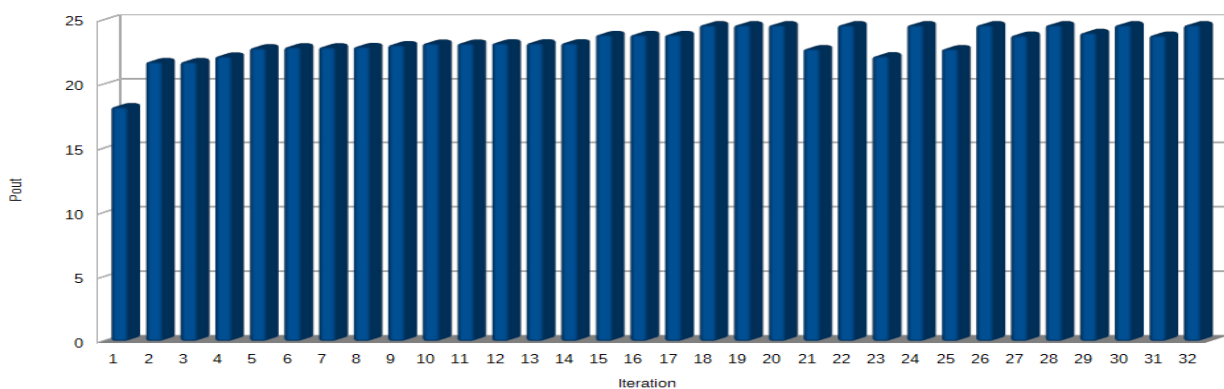
Σχήμα 5-136. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



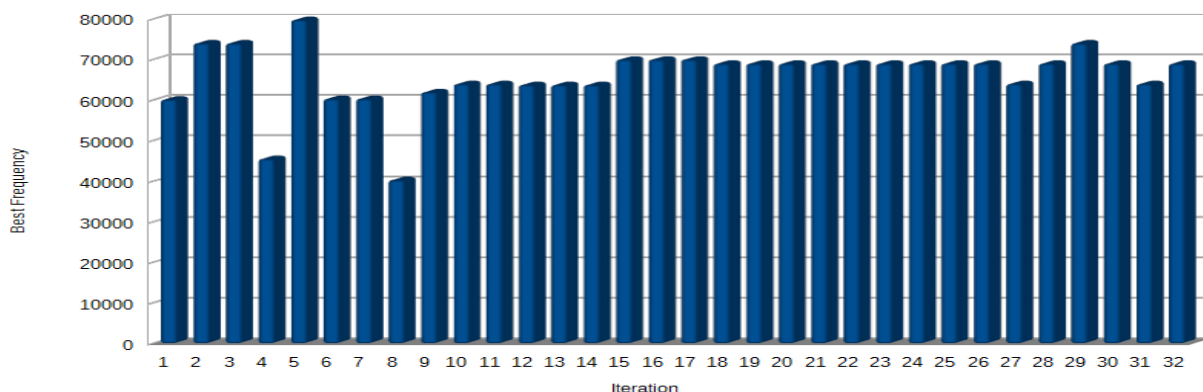
Σχήμα 5-137. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου Jaya.



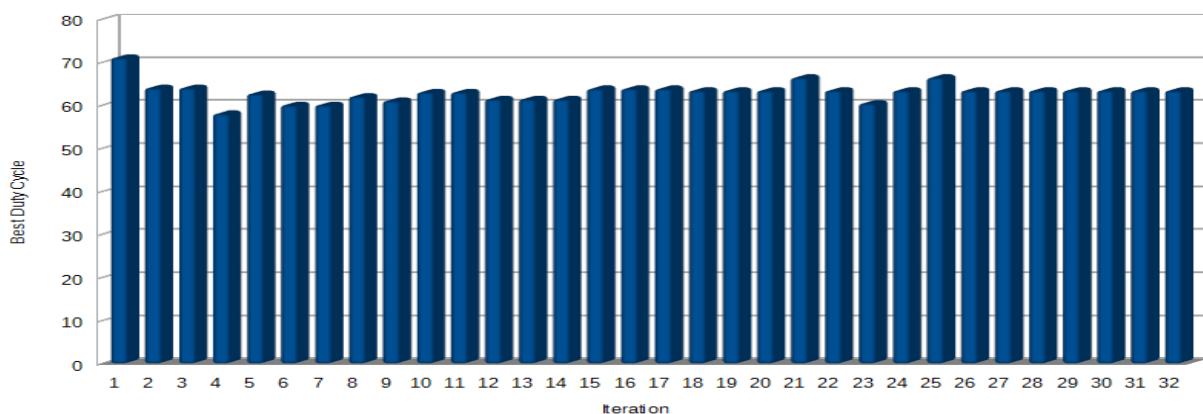
Σχήμα 5-138. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



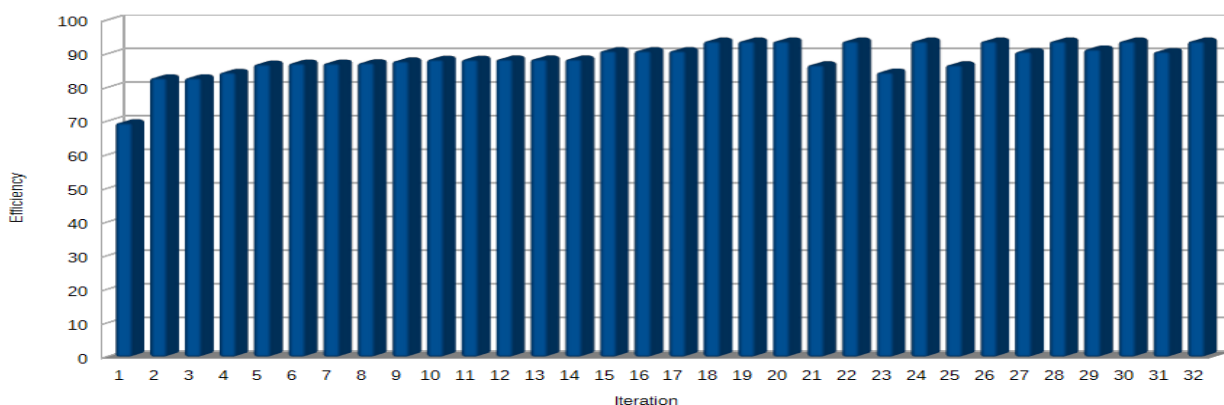
Σχήμα 5-139. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-140. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



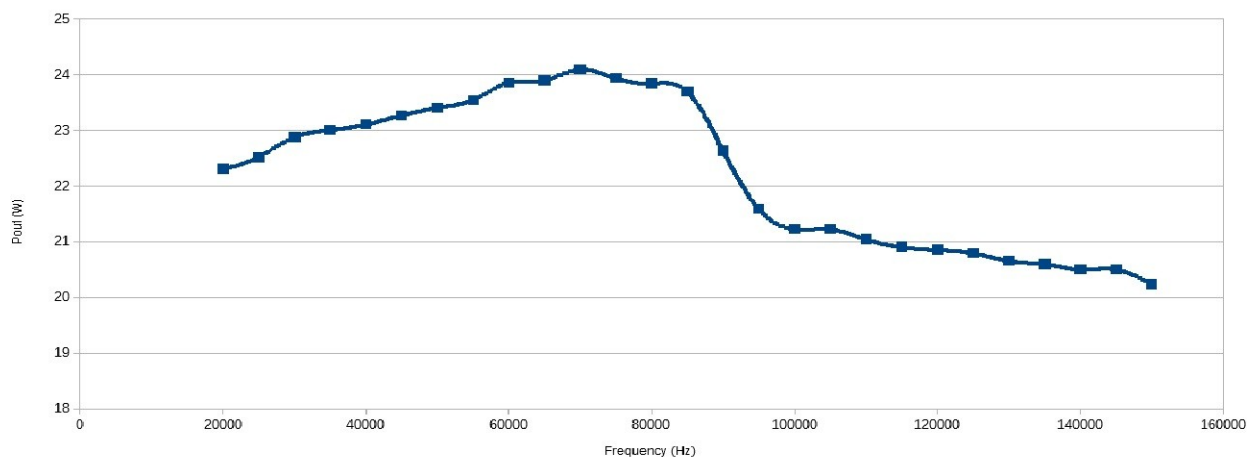
Σχήμα 5-141. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-142. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, ο αλγόριθμος Jaya δεν επηρεάστηκε από τα τοπικά μέγιστα και εντόπισε σωστά το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος με ακρίβεια 99%. Επιπροσθέτως, βελτίωσε τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης σε 94% από 81,2% που είχε όταν λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα διακοπτισμού ίση με 100kHz. Προέκυψε δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 13%. Ο αλγόριθμος Jaya, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, πέρασε από 200 σημεία αφού είχαμε 10 υποψήφιες λύσεις τυχαία αρχικοποιημένες, οι οποίες μετακινούνταν για 20 επαναλήψεις. Αμέσως μετά τον Jaya, εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT. Η ταλάντωση γύρω από το MPP που προκαλείται κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων MPPT και MEPT φαίνεται στο Σχήμα 5-120 μετά την εικοστή επανάληψη. Σε κάποια σημεία δεν είναι πολύ ευδιάκριτη λόγω της μικρής αλλαγής των τιμών. Οι αλγόριθμοι αυτοί διατήρησαν τη λειτουργία του συστήματος στο σημείο που είχε εντοπίσει ο Jaya και εκτελέστηκαν για ένα προκαθορισμένο διάστημα, όσο χρειάζεται για να αλλάξουν σημαντικά οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και το ολικό μέγιστο ισχύος να μετακινηθεί. Τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται και ο Jaya εκτελείται ξανά.

Ο αλγόριθμος Jaya βρίσκει αποτελεσματικά το βέλτιστο duty cycle το οποίο μεγιστοποιεί την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης και μία συχνότητα η οποία βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή του σε σχέση με το να λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα 100kHz. Αυτό φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα παραπάνω όμως δεν είναι σαφές είναι αν η συχνότητα αυτή είναι όντως η βέλτιστη ή θα μπορούσε να υπάρξει και κάποια καλύτερη. Για το λόγο αυτό γίνεται μια σάρωση μεταβάλλοντας τη συχνότητα λειτουργίας και διατηρώντας σταθερό το duty cycle στην τιμή εκείνη που μεγιστοποιείται η ισχύς εισόδου. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν συνθήκες ακτινοβολίας 500&1000W/m², όπως στο Σχήμα 5-133 και duty cycle 63.4% (το βέλτιστο δηλαδή που εντοπίστηκε) και έγινε σκανάρισμα των τιμών ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για συχνότητες 20-150kHz.



Σχήμα 5-143. Κυματομορφή της ισχύος εξόδου του boost converter για συχνότητες από 20-150kHz και μέγιστη ισχύ στην είσοδο.

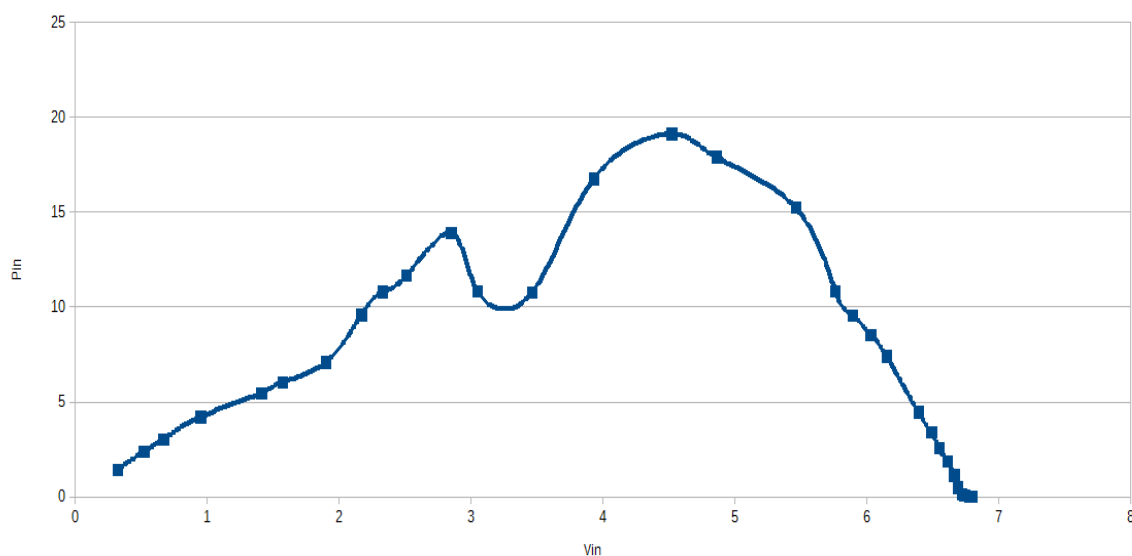
Η βέλτιστη συχνότητα που εντόπισε ο αλγόριθμος Jaya είναι στα 69kHz. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 μετά τη σάρωση των συχνοτήτων ο εντοπισμός της συχνότητας είναι αποτελεσματικός. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και 100% ακριβής να μην είναι ο εντοπισμός της συχνότητας δεν μας πειράζει καθώς ο αλγόριθμος MEPT που θα ακολουθήσει θα βελτιώσει αυτή την απόκλιση. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να είναι η συχνότητα κοντά στη βέλτιστη και να μην έχει εγκλωβιστεί σε κάποια τοπικά βέλτιστη συχνότητα.

5.8 Πειραματικά αποτελέσματα Differential Evolution Algorithm, MPPT και MEPT σε ανομοιομόρφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

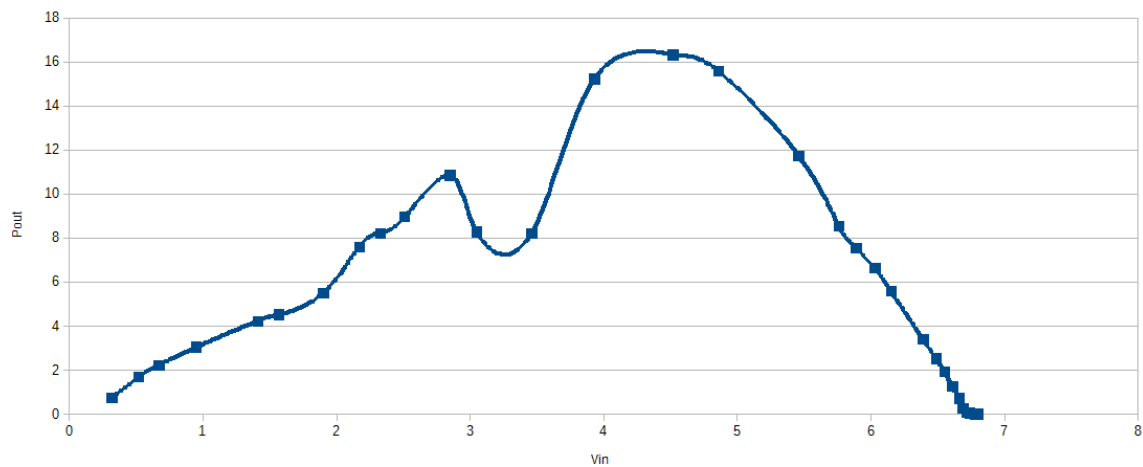
Σε αυτό το σετ πειραμάτων ο αλγόριθμος Differential Evolution είναι υπεύθυνος για την αντιμετώπιση της ανομοιομόρφης ακτινοβολίας και την εύρεση του ζεύγους duty cycle-switching frequency που θα μεγιστοποιήσει την ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης. Αν εκτελούσαν μόνο αλγόριθμοι MPPT και MEPT χωρίς τον Differential Evolution το αποτέλεσμα είναι πολύ πιθανό να μην ήταν το βέλτιστο δυνατό, καθώς λόγω της ανομοιομόρφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας θα προκύψουν περισσότερα από ένα τοπικά

μέγιστα ισχύος. Έτσι, εκτελείται πρώτα ο αλγόριθμος Differential Evolution, ο οποίος εντοπίζει το κατάλληλο duty cycle και την κατάλληλη συχνότητα διακοπισμού για μέγιστη παραγωγή ισχύος και ύστερα οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT λειτουργούν συμπληρωματικά ώστε να διατηρήσουν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας ή να το διορθώσουν αν τυχόν υπάρξουν μικροαποκλίσεις.

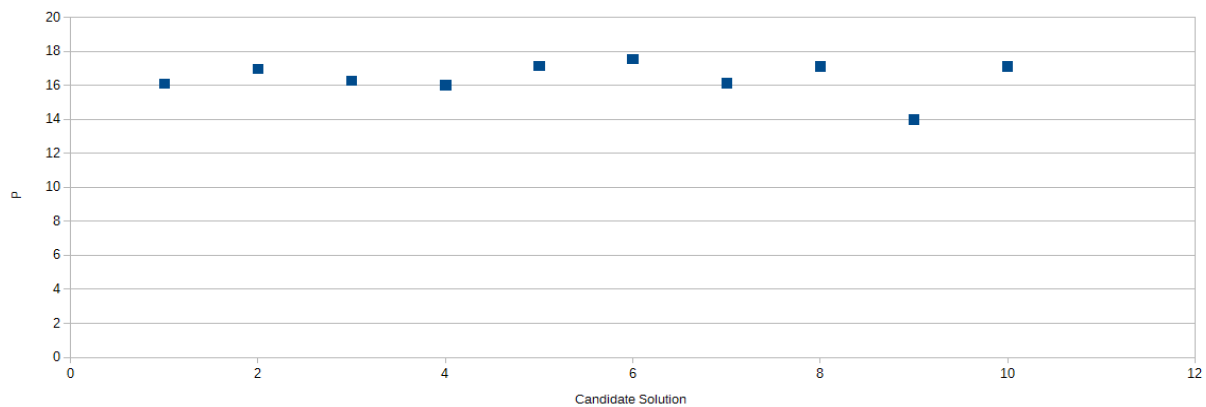
Τα σχήματα 5-144 έως 5-153 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με 800W/m^2 στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και 500W/m^2 στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στα δεξιά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα αριστερά.



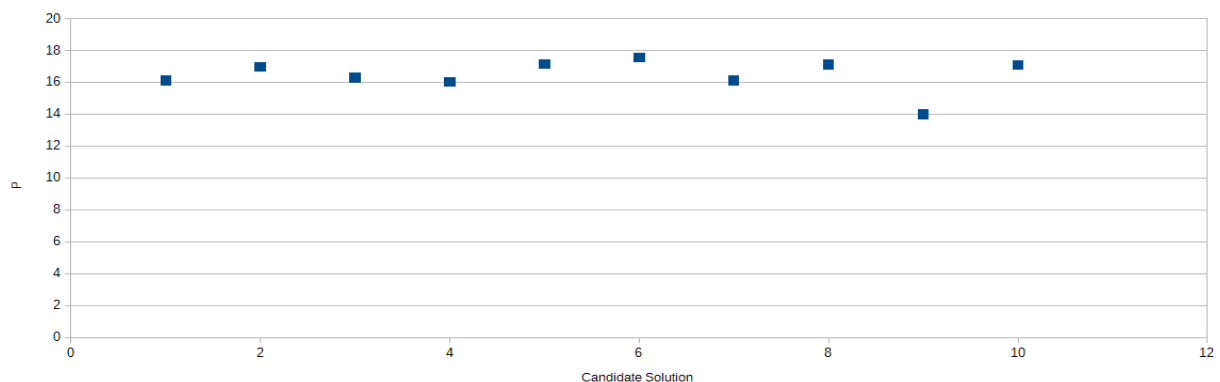
Σχήμα 5-144. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 800W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



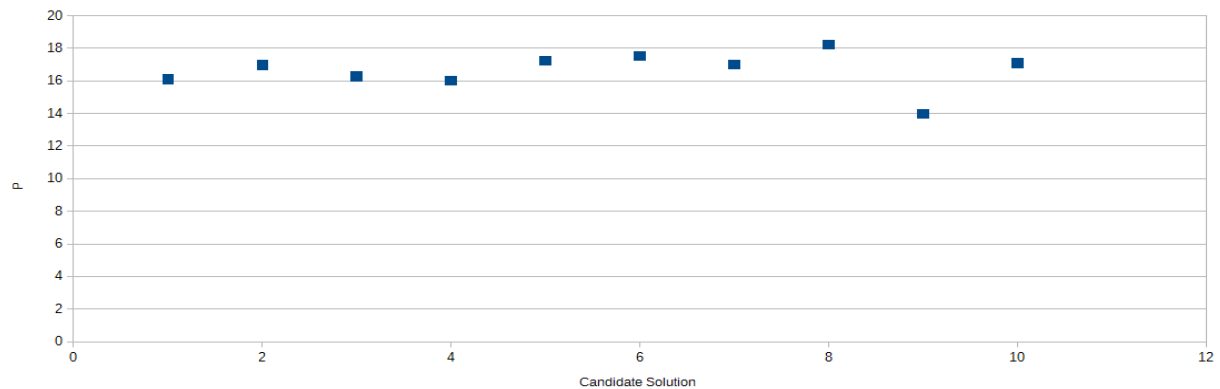
Σχήμα 5-145. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες 800W/m^2 & 500W/m^2 αντίστοιχα.



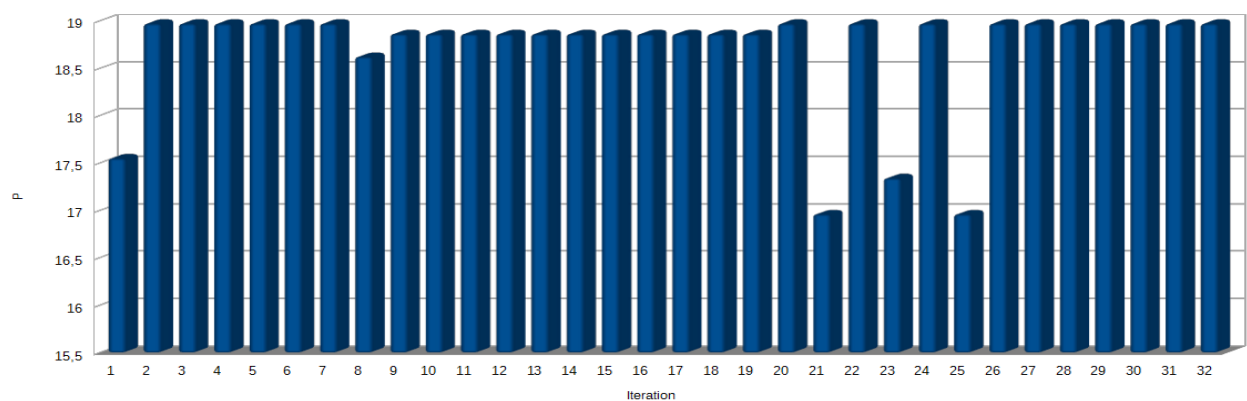
Σχήμα 5-146. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου Differential Evolution.



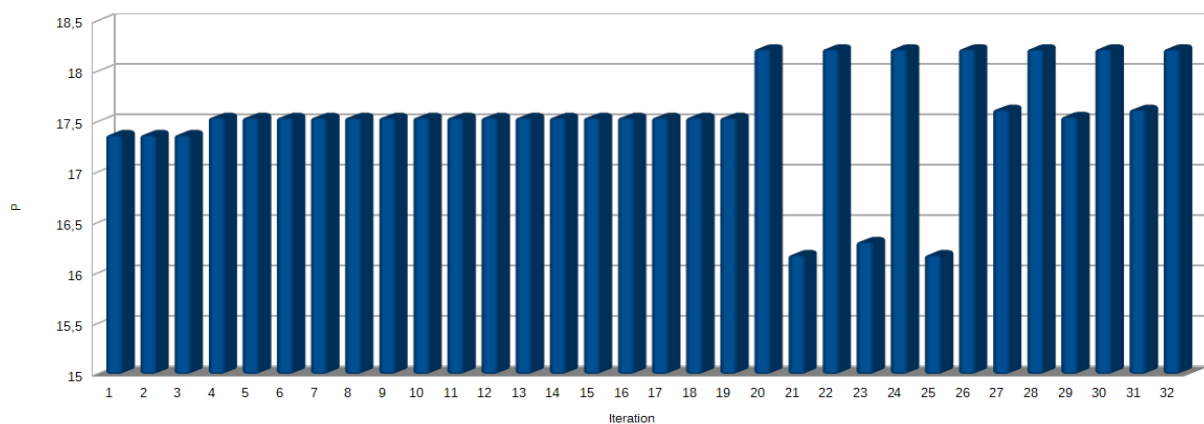
Σχήμα 5-147. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου Differential Evolution.



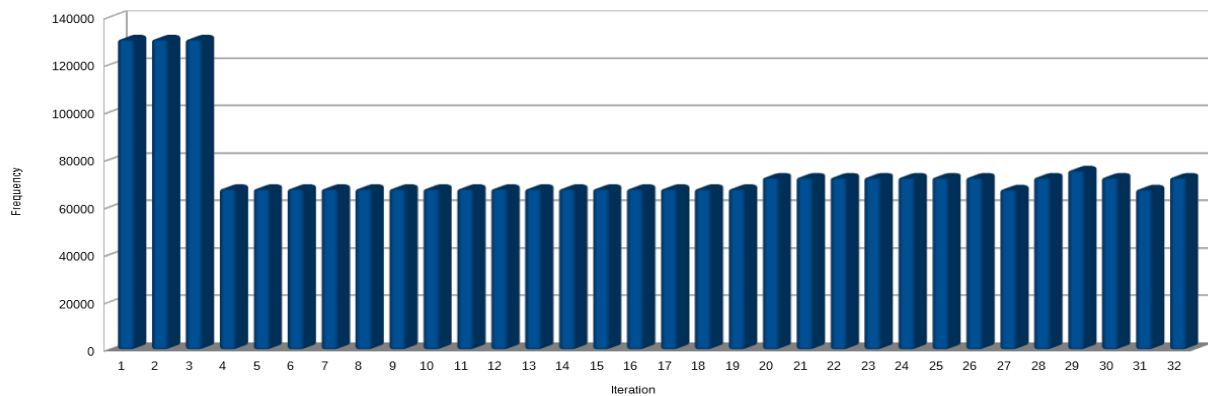
Σχήμα 5-148. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (*candidate solutions*) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



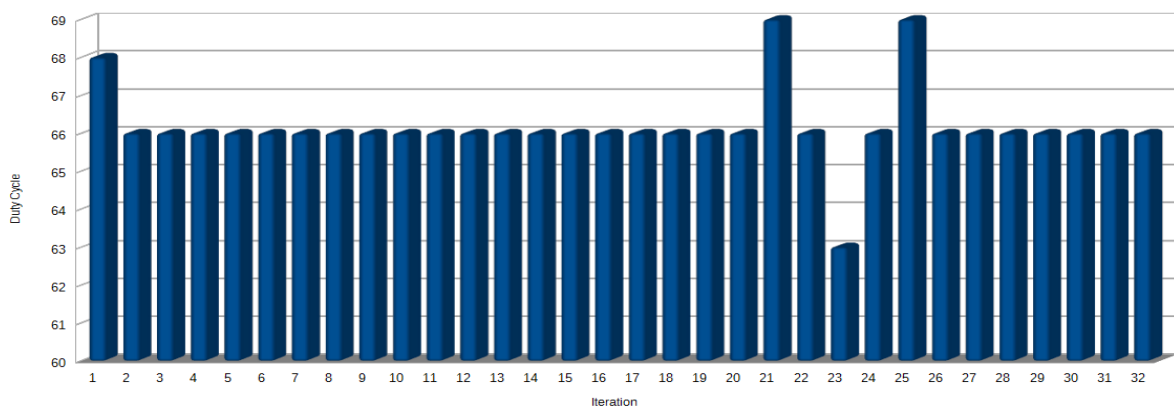
Σχήμα 5-149. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (*candidate solution*) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



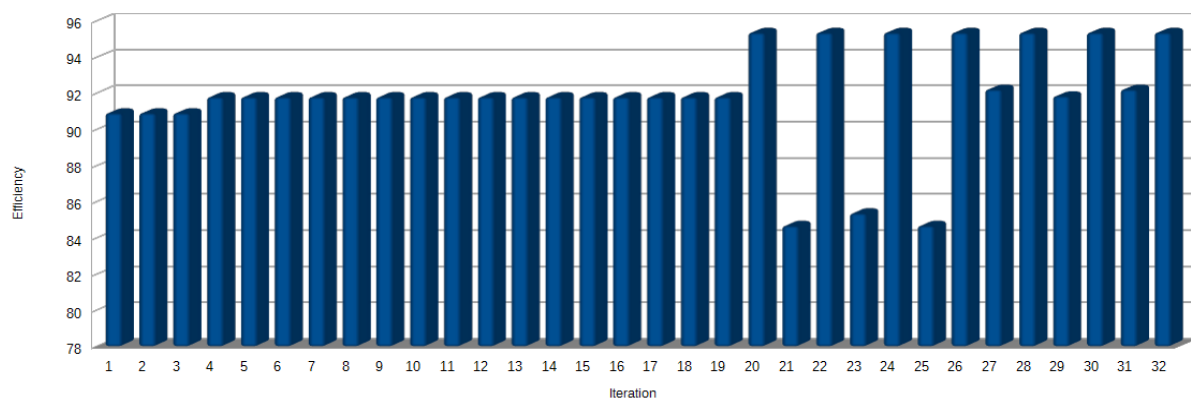
Σχήμα 5-150. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (*candidate solution*) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-151. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



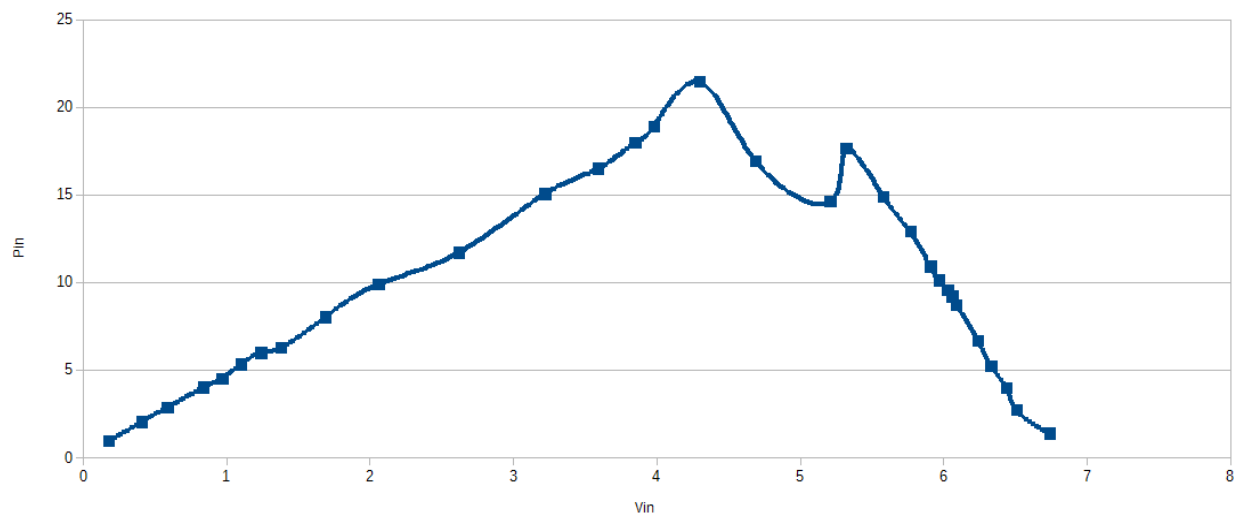
Σχήμα 5-152. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



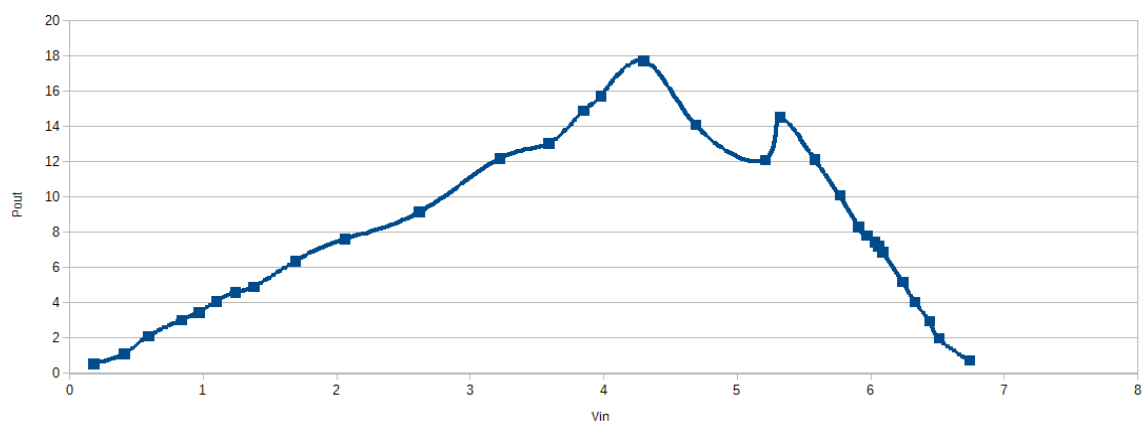
Σχήμα 5-153. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Ο αλγόριθμος Differential Evolution δεν επηρεάστηκε από τα τοπικά μέγιστα και εντόπισε σωστά το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος με ακρίβεια 99%. Επιπροσθέτως, βελτίωσε τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης σε 95.4% για συχνότητα 72kHz από 85% που είχε όταν λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα διακοπτισμού ίση με 100kHz. Προέκυψε δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 10%. Ο αλγόριθμος Differential Evolution, αν και εκτελείται όπως και οι άλλοι αλγόριθμοι για 20 επαναλήψεις με 10 υποψήφιες λύσεις περνάει από περισσότερα σημεία από ότι οι άλλοι αλγόριθμοι. Αυτό συμβαίνει διότι στην εκτέλεση του περιλαμβάνεται η διαδικασία του mutation και του crossover. Οι λειτουργίες αυτές του αλγορίθμου Differential Evolution δημιουργούν βοηθητικούς πίνακες οι οποίοι βοηθούν στον καλύτερο εντοπισμό του βέλτιστου duty cycle και της βέλτιστης συχνότητας όμως αναπόφευκτα ο αλγόριθμος αναγκάζεται να περάσει από περισσότερα σημεία. Παρ' όλα αυτά όπως είναι φανερό τόσο από τα διαγράμματα διασποράς των τιμών ισχύος όσο και από τα ραβδοδιαγράμματα, ο αλγόριθμος φτάνει πολύ κοντά στη βέλτιστη ισχύ εισόδου και εξόδου του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης αρκετά πριν ολοκληρωθούν οι 20 επαναλήψεις για τις οποίες εκτελείται. Αμέσως μετά τον Differential Evolution αλγόριθμο, εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT. Η ταλάντωση γύρω από το MPP που προκαλείται κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων MPPT και MEPT φαίνεται στο Σχήμα 5-150 μετά την εικοστή επανάληψη. Οι αλγόριθμοι αυτοί διατήρησαν τη λειτουργία του συστήματος στο σημείο που είχε εντοπίσει ο Differential Evolution και εκτελέστηκαν για ένα προκαθορισμένο διάστημα, όσο χρειάζεται για να αλλάξουν σημαντικά οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και το ολικό μέγιστο ισχύος να μετακινηθεί. Τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται και ο Differential Evolution εκτελείται ξανά.

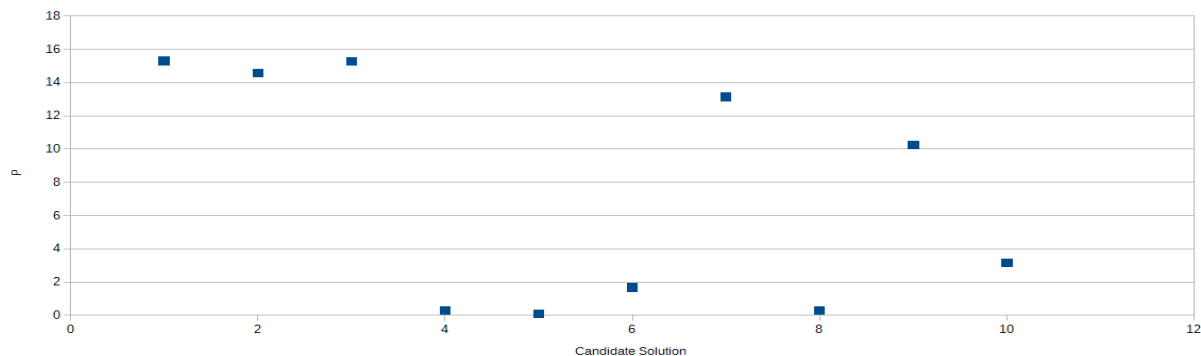
Τα σχήματα 5-154 έως 5-163 που ακολουθούν αντιστοιχούν σε πείραμα με ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας με ένταση ίση με $9000/\text{m}^2$ στο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και $600/\text{m}^2$ στο άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην περίπτωση αυτή ολικό μέγιστο βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V και το τοπικό στα δεξιά.



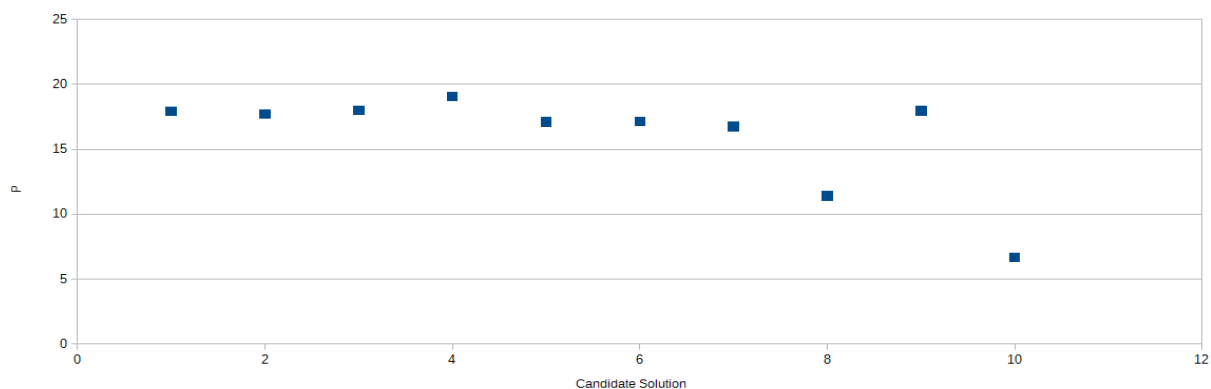
Σχήμα 5-154. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες $900W/m^2$ & $600W/m^2$ αντίστοιχα.



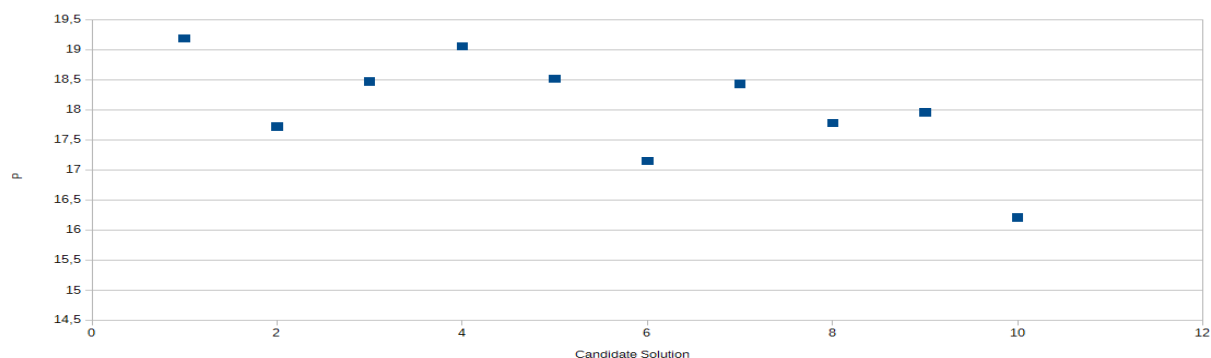
Σχήμα 5-155. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για ακτινοβολίες $900W/m^2$ & $600W/m^2$ αντίστοιχα.



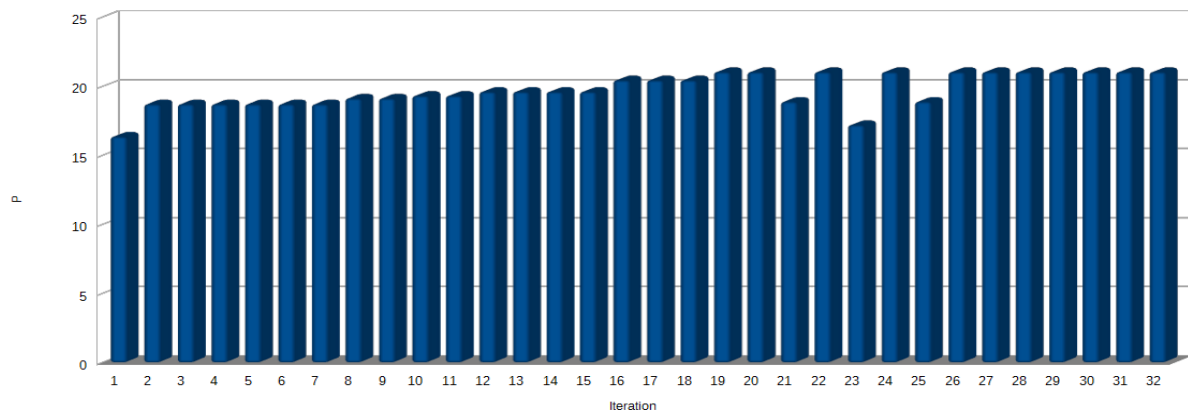
Σχήμα 5-156. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στην αρχή εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



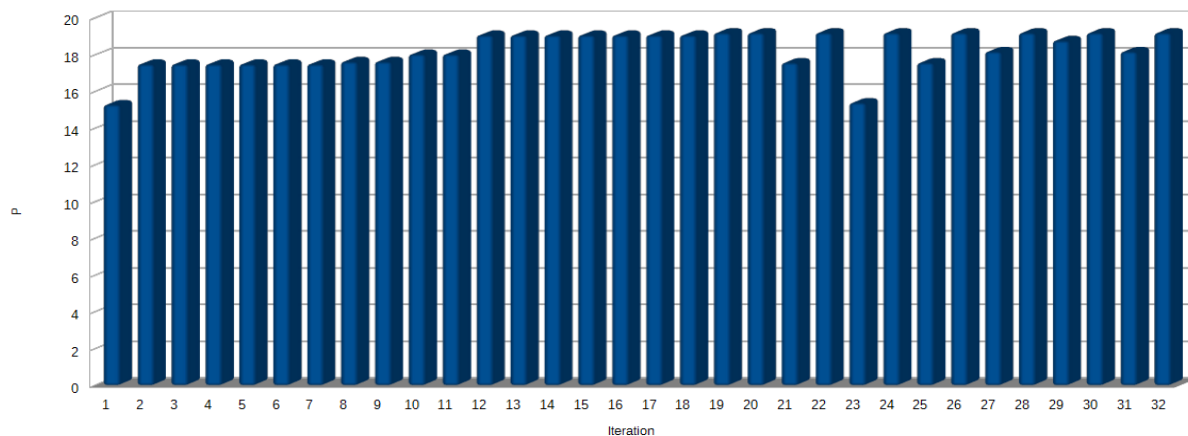
Σχήμα 5-157. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στη μέση εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



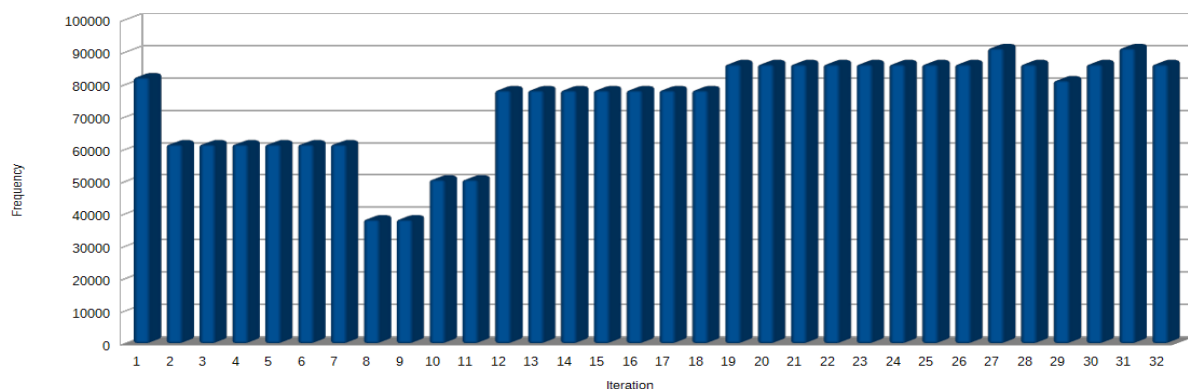
Σχήμα 5-158. Διασπορά υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) στο τέλος εκτέλεσης του αλγορίθμου *Differential Evolution*.



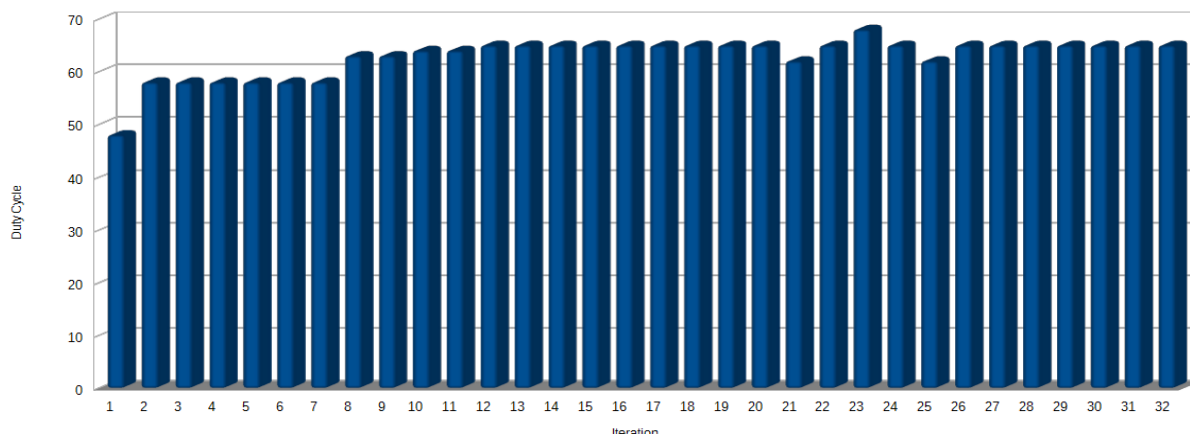
Σχήμα 5-159. Διάγραμμα της ισχύος εισόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



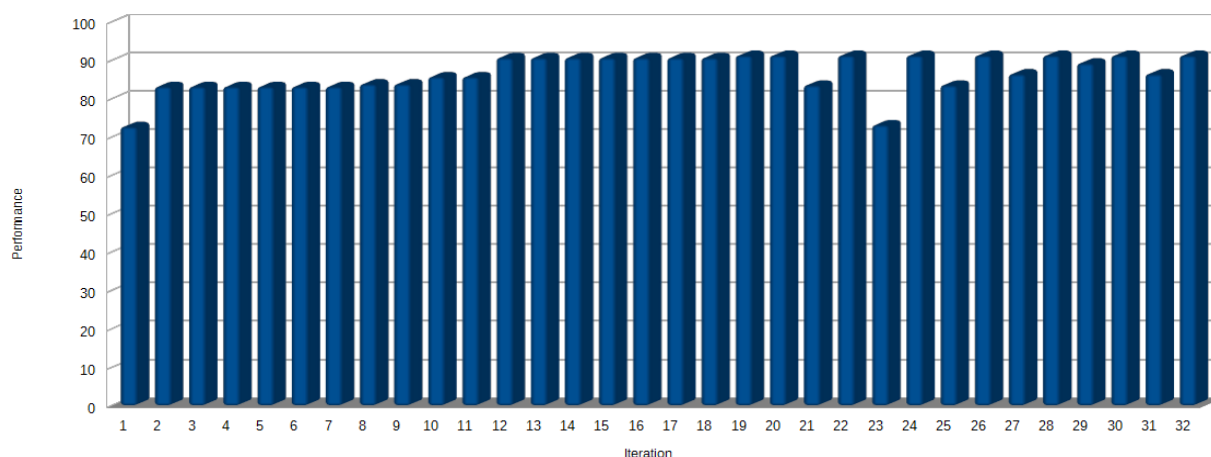
Σχήμα 5-160. Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-161. Διάγραμμα της συχνότητας switching για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.



Σχήμα 5-162. Διάγραμμα του duty cycle (%) για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

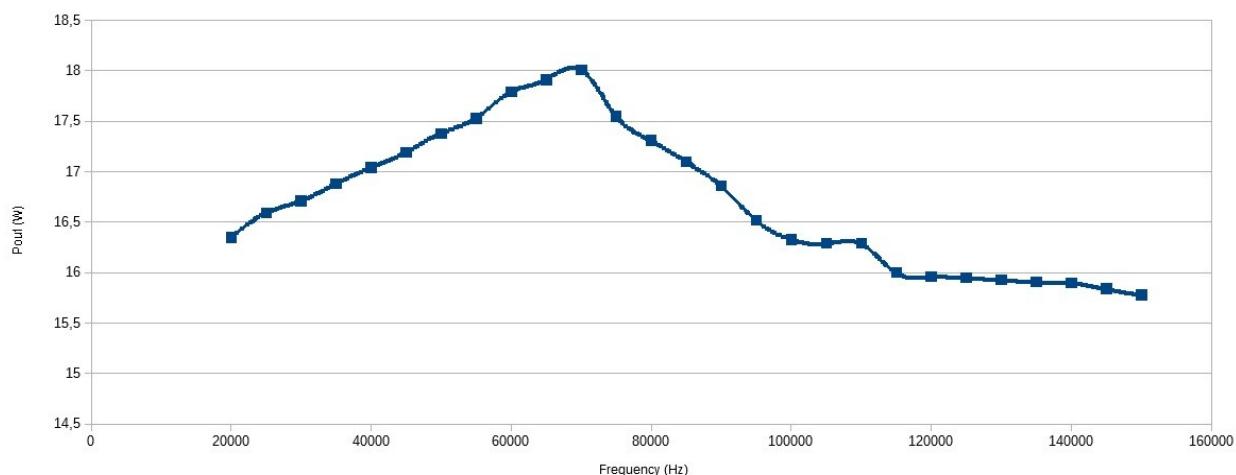


Σχήμα 5-163. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης (%) του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για την καλύτερη υποψήφια λύση (candidate solution) για κάθε γενιά ως προς τον αριθμό της γενιάς/επανάληψης.

Ο αλγόριθμος Differential Evolution δεν επηρεάστηκε από τα τοπικά μέγιστα και εντόπισε σωστά το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος με ακρίβεια 98%. Επιπροσθέτως, βελτίωσε τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης σε 91% για συχνότητα 86kHz από 82% που είχε όταν λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα διακοπτισμού ίση με 100kHz. Προέκυψε δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 9%. Όπως είπαμε και πριν κατά την εκτέλεση του Differential Evolution αλγορίθμου περιλαμβάνεται η διαδικασία του mutation και του crossover. Λόγω αυτών των διαδικασιών ο αλγόριθμος αναγκάζεται να περάσει από περισσότερα σημεία. Παρ' όλα αυτά όπως όπως και πριν ο αλγόριθμος φτάνει πολύ κοντά στη βέλτιστη ισχύ εισόδου και εξόδου του ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ, ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης αρκετά πριν ολοκληρωθούν οι 20 επαναλήψεις για τις οποίες εκτελείται. Αμέσως μετά τον Differential Evolution αλγόριθμο, εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT. Η ταλάντωση γύρω από το MPP που προκαλείται κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων MPPT και MEPT φαίνεται στο Σχήμα 5-150 μετά την εικοστή επανάληψη. Οι αλγόριθμοι αυτοί διατήρησαν τη λειτουργία του συστήματος στο σημείο που είχε εντοπίσει ο Differential Evolution και εκτελέστηκαν για ένα προκαθορισμένο διάστημα, όσο χρειάζεται για να αλλάξουν σημαντικά οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και το ολικό μέγιστο ισχύος να μετακινηθεί. Τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται και ο Differential Evolution εκτελείται ξανά.

Η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για τους άλλους αλγορίθμους θα ακολουθηθεί και για τον Differential Evolution. Ο αλγόριθμος Differential Evolution βρίσκει αποτελεσματικά το βέλτιστο duty cycle το οποίο μεγιστοποιεί την ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης και μία συχνότητα η οποία βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή του σε σχέση με το να λειτουργούσε με σταθερή συχνότητα 100kHz. Αυτό φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα παραπάνω όμως δεν είναι σαφές είναι αν η συχνότητα αυτή είναι όντως η βέλτιστη ή θα μπορούσε να υπάρξει και κάποια καλύτερη. Για το λόγο αυτό γίνεται μια σάρωση μεταβάλλοντας τη συχνότητα λειτουργίας και διατηρώντας σταθερό το duty cycle στην τιμή εκείνη που μεγιστοποιείται η ισχύς εισόδου. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν συνθήκες ακτινοβολίας 500 και 800 W/m², όπως στο Σχήμα 5-144 και duty cycle 66% (το βέλτιστο δηλαδή που εντοπίστηκε) και έγινε σκανάρισμα των τιμών ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης για συχνότητες 20-150kHz.



Σχήμα 5-164. Κυματομορφή της ισχύος εξόδου του boost converter για συχνότητες από 20-150kHz και μέγιστη ισχύ στην είσοδο.

Η βέλτιστη συχνότητα στην οποία συνέκλινε ο αλγόριθμος Differential Evolution είναι στα 72.5kHz. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-164 μετά τη σάρωση των συχνοτήτων η συχνότητα που μεγιστοποιεί την ισχύ στην έξοδο εμφανίζεται στα 70kHz περίπου και συνεπώς ο εντοπισμός της συχνότητας είναι αποτελεσματικός. Παρ' όλα αυτά, όπως είπαμε και πριν ακόμα και 100% ακριβής να μην είναι ο εντοπισμός της συχνότητας δεν μας πειράζει καθώς ο αλγόριθμος MEPT που θα ακολουθήσει θα βελτιώσει αυτή την απόκλιση. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να είναι η συχνότητα κοντά στη βέλτιστη και να μην έχει εγκλωβιστεί σε κάποια τοπικά βέλτιστη συχνότητα όπως για παράδειγμα στα 110kHz περίπου του Σχήματος 8 όπου φαίνεται να υπάρχει μια τοπικά βέλτιστη συχνότητα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ισχύος στην έξοδο ενός μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter) ο οποίος τροφοδοτείται με ενέργεια από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Για να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος υπάρχουν δύο αναγκαίες προϋποθέσεις: (α) η λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο MPP και (β) η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα ισχύος. Για να λειτουργήσει η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο MPP πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο duty cycle του σήματος ελέγχου του μετατροπέα ισχύος, το οποίο θα μεγιστοποιήσει την ισχύ στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Έχοντας τη μέγιστη ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα ισχύος, πρέπει στη συνέχεια να βρεθεί η κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού του σήματος PWM που ελέγχει το μετατροπέα DC/DC με σκοπό να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα και να παράγεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή ισχύς. Το σύστημα που αναπτύχθηκε έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να καλύπτει όλες τις πιθανές συνθήκες πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή είτε ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας οπότε εμφανίζεται ένα μόνο μέγιστο στην καμπύλη ισχύος, είτε ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας οπότε εμφανίζονται περισσότερα από ένα μέγιστα ισχύος. Για να γίνει αυτό, υλοποιήθηκαν 4 εναλλακτικοί αλγόριθμοι, ο Grey Wolf Optimizer (GWO), ο Flower Pollination Algorithm (FPA), Jaya Algorithm και ο Differential Evolution Algorithm (DE) που είναι υπεύθυνοι για την εύρεση του ολικού βέλτιστου σημείου λειτουργίας ανεξαρτήτως των συνθηκών προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και οι αλγόριθμοι Maximum Power Point Tracking (MPPT) και Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT) που είναι υπεύθυνοι για τη διατήρηση του συστήματος στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος και τη διόρθωση τυχόν μικροαποκλίσεων. Οι αλγόριθμοι αυτοί εκτελούνται σε έναν μικροελεγκτή του αναπτυξιακού συστήματος Arduino Uno.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε, δοκιμάστηκε πειραματικά και λειτούργησε αποτελεσματικά σε όλες τις πιθανές συνθήκες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη πρόσπτωση) και σε διαφορετικές τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι δοκιμές έδειξαν την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων Grey Wolf Optimizer, Flower Pollination, Jaya και

Differential Evolution να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα εύρεσης του ολικού μεγίστου παραγωγής ισχύος σε συνθήκες ανομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι το οποίο οι κλασσικοί αλγόριθμοι MPPT δεν μπορούν να επιτύχουν. Ακόμα, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεγιστοποίηση της ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC, βρίσκοντας την κατάλληλη συχνότητα διακοπτισμού, αύξησε κατά 10-14% την ισχύ εξόδου του μετατροπέα ισχύος σε σχέση με άλλους αλγορίθμους που στοχεύουν μόνο στη μεγιστοποίηση της ισχύος εισόδου του μετατροπέα (δηλαδή της ισχύος που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία) μέσω εύρεσης της κατάλληλης τιμής duty cycle του σήματος ελέγχου του μετατροπέα DC/DC. Πιο συγκεκριμένα, με το σύστημα που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης αυξάνεται σε τιμές 91-95%, ενώ με σταθερή συχνότητα στα 100kHz είναι 79-84%.

Επιπλέον, ένα ακόμα συμπέρασμα που εξάγεται είναι η ανάγκη συνδυασμού των αλγορίθμων GWO, FPA, Jaya και Differential Evolution με τους MPPT και MEPT για την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι οι αλγόριθμοι GWO, FPA, Jaya και Differential Evolution περνούν κατά την εκτέλεση τους από πάρα πολλά διαφορετικά σημεία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος μέχρι το τέλος της εκτέλεσής τους και την εύρεση του καλύτερου, με αποτέλεσμα να προκύπτει απώλεια ισχύος. Επομένως, δεν πρέπει να εκτελούνται διαρκώς, αλλά θα πρέπει να έχουν ένα χρονικό κενό μεταξύ διαδοχικών εκτελέσεων τους. Στο χρονικό αυτό κενό, εκτελούνται οι αλγόριθμοι MPPT και MEPT οι οποίοι διατηρούν το σύστημα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας και το βελτιώνουν αν τυχόν διπιστώσουν κάποια μικρή αλλαγή. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, η ηλιακή ακτινοβολία πιθανόν να έχει αλλάξει αξιόλογα και το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος να έχει μετακινηθεί, οπότε είναι απαραίτητο να εκτελεσθεί και πάλι ένας από τους αλγορίθμους GWO, FPA, Jaya και Differential Evolution.

Οι αλγόριθμοι Grey Wolf Optimizer, Flower Pollination, Jaya και Differential Evolution έτρεξαν όλοι για τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων (20) και τον ίδιο αριθμό υποψήφιων λύσεων (10). Συνεπώς οι τρεις (με εξαίρεση τον Differential Evolution αλγόριθμο) πέρασαν από 200 διαφορετικά σημεία μέχρι την ολοκλήρωση της εκτέλεσής τους. Ο αλγόριθμος Jaya είναι ο απλούστερος κατά την υλοποίησή του αφού η εξέλιξη των υποψήφιων λύσεων κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων εξαρτάται από μία και μόνο εξίσωση η οποία χρησιμοποιεί την υποψήφια λύση της τρέχουσας επανάληψης και την καλύτερη και χειρότερη λύση μέχρι την τρέχουσα επανάληψη. Επιπλέον, ο

αλγόριθμος Jaya δεν απαιτεί τη χρήση παραμέτρων των οποίων οι τιμές πρέπει να υπολογιστούν, καθώς η λογική του αλγορίθμου βασίζεται στην καθοδήγηση όλων των υποψήφιων λύσεων προς την καλύτερη λύση και την απομάκρυνσή τους από την χειρότερη. Αυτά κάνουν τον αλγόριθμο Jaya απλούστερο στην υλοποίησή του σε σχέση με τους αλγόριθμους Flower Pollination, Grey Wolf Optimizer και Differential Evolution οι οποίοι είναι πολυπλοκότεροι. Λίγο πολυπλοκότερος είναι ο αλγόριθμος Grey Wolf Optimizer ο οποίος επίσης δεν απαιτεί τη χρήση προκαθορισμένων παραμέτρων όμως χρησιμοποιεί συντελεστές διανυσμάτων οι οποίοι πρέπει να υπολογιστούν και να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της νέας λύσης. Ο Flower Pollination αλγόριθμος είναι ακόμα πολυπλοκότερος καθώς απαιτεί τον προκαθορισμό παραμέτρων ο οποίος έγινε πειραματικά. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν την ταχύτητα αλλά και την ακρίβεια της σύγκλισης του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση. Επίσης, κάθε φορά χρησιμοποιεί διαφορετικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της νέας υποψήφιας λύσης ανάλογα με το είδος της επικοινωνίας αλλά και επιπλέον συντελεστές που πρέπει να υπολογιστούν ώστε να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της νέας υποψήφιας λύσης. Σε ότι αφορά τον αλγόριθμο Differential Evolution φαίνεται να είναι ο πολυπλοκότερος από τους τέσσερις καθώς εκτελεί περισσότερες λειτουργίες για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης σε σχέση με τους άλλους αλγόριθμους (mutation, crossover, selection). Επιπλέον, χρησιμοποιεί σταθερές οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν πειραματικά και να προκαθοριστούν σε τιμές τέτοιες με τις οποίες η εκτέλεση του αλγορίθμου θα είναι όσο το δυνατόν καλύτερη και θα συγκλίνει γρηγορότερα και ακριβέστερα στη βέλτιστη λύση. Ένα ακόμα μειονέκτημά του σε σχέση με τους άλλους τρεις αλγόριθμους είναι το γεγονός ότι περνάει από περισσότερα σημεία από ότι οι άλλοι αλγόριθμοι μέχρι να ολοκληρωθούν οι 20 επαναλήψεις αφού σε κάθε επανάληψη η κάθε υποψήφια λύση δεν περνά μονάχα από ένα σημείο αλλά από 10 λόγω των λειτουργιών του mutation και του crossover. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται η απώλεια ενέργειας μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Παρ' όλα αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο Differential Evolution αλγόριθμος έχει πολύ καλά αποτελέσματα και προσεγγίζει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας πολύ νωρίτερα από τις 20 επαναλήψεις. Συνεπώς, θα μπορούσε η υλοποίησή του να γίνει για λιγότερες επαναλήψεις ή λιγότερες υποψήφιες λύσεις και να λειτουργεί το ίδιο καλά περιορίζοντας όμως σημαντικά τα σημεία από τα οποία περνά.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε είναι απαραίτητο σε οποιοδήποτε φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς παρέχει τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής ισχύος του. Μπορεί να ενταχθεί είτε σε αυτόνομο ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ, ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

φωτοβολταϊκά σύστημα, είτε σε μετατροπείς DC/AC (inverters) οι οποίοι διασυνδέουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία με το ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε με το σύστημα που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία θα μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/monocrystalline-cells-vs-polycrystalline-cells-whats-difference>.
- [2] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter05/chapter05.html>
- [3] Mandourarakis Ioannis, “Design Optimization of an Electric Production System for Power-Supplying the Nodes of Wireless Sensor Networks”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015. Ανακτήθηκε από το Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης: <http://dias.library.tuc.gr>.
- [4] Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili and Andrew Lewis, “Grey Wolf Optimizer”, Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46-61, March 2014.
- [5] Xin-She Yang, “Flower Pollination Algorithm for Global Optimization”, International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation, vol. 7445, pp. 240-249, 2012.
- [6] Pascal Sebah and Xavier Gourdon, “Introduction to the Gamma Function”, <http://numbers.computation.free.fr/Constants/constants.html>, 2002.
- [7] Ravipudi Venkata Rao, “Jaya : A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems”, International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 7, no.1, pp. 19-34, 2016.
- [8] Rainer Storn, Kenneth Price, “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces”, Journal of Global Optimization, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, December 1997.
- [9] Koutroulis E., Blaabjerg F., “Overview of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Production Systems”, Electric Power Components and Systems, vol. 43, no. 12, 2015.

- [10] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robins, Second edition. Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, 2007.
- [11] Satyajit Mohanty, Bidyadhar Subudhi and Pravat Kumar Ray, “A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 1, pp. 181-188, October 2015.
- [12] J. Prasanth Ram and N. Rajasekar, “A novel flower pollination based global maximum power point method for solar maximum power point tracking”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 11, November 2017.
- [13] Nishant Kumar, Ikhlaz Hussain, Bhim Singh and Bijaya Ketan Panigrahi, “Rapid MPPT for uniformly and partial shaded PV system by using JayaDE algorithm in highly fluctuating atmospheric conditions”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2406-2416, October 2017.
- [14] Mohamed Abdel-Basset, Laila A. Shawky, “Flower pollination algorithm: a comprehensive review”, Artificial Intelligence Review, pp. 1-25, March 2018.
- [15] Xin-She Yang, “Nature Inspired Metaheuristic Algorithms”, Second Edition, Luniver Press, 2010.
- [16] A. K. Qin, V. L. Huang and P. N. Suganthan, “Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 13, no. 2, pp. 398-417, April 2009.
- [17] Chuan Lin, Anyong Qing and Quanyuan Feng, “A comparative study of crossover in differential evolution”, Journal of Heuristics, vol. 17, no. 6, pp. 675-703, December 2011.