

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Διπλωματική Εργασία

Μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά
στοιχεία που λειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης

Λούκας Νικόλαος

Εξεταστική επιτροπή:

Κ. ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

Γ. ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

Ε. ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ (ΔΙΔΑΣΚΩΝ Π407/80)

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2006

Πρόλογος

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα σύστημα που έχει σκοπό την εύρεση του σημείου παραγωγής μέγιστης ισχύος από φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία λειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο που μου ανέθεσε αυτή την εργασία αλλά και για την βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή κύριο Σταυρακάκη Γεώργιο για τον χρόνο που διέθεσε να μελετήσει την εργασία αυτή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ. Κουτρούλη Ευτύχη που παρακολούθησε όλη την πορεία της εργασίας και προσέφερε συνεχώς τις γνώσεις του και την εμπειρία του πάνω στο θέμα.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός συστήματος που έχει ως σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενέργειας, που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία, όταν αυτά λειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, το σύστημα που αναπτύχθηκε παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση στο θεωρητικό σημείο μέγιστης ισχύος. Συγκεκριμένα η μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών που μετρήθηκε βρέθηκε ίση με 3.47 % που επιβεβαιώνει ότι το σύστημα προσφέρει μια ικανοποιητική σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου που αναπτύχθηκε είναι ότι παρέχει μια ταχύτατη σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος, όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης, σε σχέση με τη μέθοδο που δειγματοληπτεί όλη τη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης μέχρι να ανιχνεύσει το σημείο μέγιστης ισχύος. Επιπλέον δεν απαιτείται ξεχωριστός μετατροπέας για κάθε στοιχείο μιας συστοιχίας και τέλος δεν βασίζεται σε γνωστά μοντέλα φωτοβολταϊκών πλαισίων και επομένως δεν απαιτεί γνώση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης, η ονομαστική ισχύς και ο αριθμός των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Επομένως η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων με άγνωστα χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από έναν μετατροπέα ισχύος DC/DC που ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ανιχνεύει το σημείο στο οποίο παράγεται η μέγιστη ισχύς από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν αυτή σκιάζεται μερικώς. Ο έλεγχος του μετατροπέα ισχύος πραγματοποιείται από κατάλληλη ηλεκτρονική διάταξη βασισμένη σε μικροελεγκτή.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	7
2. Ανασκόπηση μεθόδων MPPT που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν.....	12
2.1 Μέθοδος MPPT που βασίζεται στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος...	12
2.2 Μέθοδος MPPT που βασίζεται σε ένα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ο οποίος ελέγχεται από ένα μικροελεγκτή.....	32
3. Ηλιακή ακτινοβολία	46
3.1 Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας.....	46
3.2 Υπολογισμός ακτινοβολίας σε σκιασμένες επιφάνειες	46
3.2.1 Ακτινοβολία σε μη σκιασμένες επιφάνειες.....	47
3.2.2 Μελέτη αντικειμένων του περιβάλλοντος	49
3.2.3 Απευθείας ακτινοβολία.....	52
3.2.4 Διάχυτη ακτινοβολία.....	54
3.2.5 Ανασκόπηση της μεθόδου και τεκμηρίωση της με ένα παράδειγμα	57
4. Λειτουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων	59
4.1 Αρχή λειτουργίας.....	59
4.2 Αριθμητική προσομοίωση των χαρακτηριστικών ρεύματος και τάσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων που περιέχουν σκιασμένα στοιχεία	60
4.3 Περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην παρούσα εργασία	72
4.4 Μελέτη αποτελεσμάτων σκίασης σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών που συνδέονται σε διάφορα συστήματα.....	79
5. Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC	85
5.1 Εισαγωγή	85
5.2 Έλεγχος των μετατροπέων DC/DC	86
5.3 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.....	89
5.3.1 Γενικά.....	89

5.3.2	Λειτουργία με συνεχή αγωγή ρεύματος.....	93
5.3.3	Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής.....	95
5.3.4	Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος.....	96
5.3.4.1.	Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος με σταθερή V_d	96
5.3.4.2.	Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος με σταθερή V_o	99
5.3.5	Κυμάτωση της τάσης εξόδου	101
5.3.6	Έλεγχος ρεύματος του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης	102
6.	Ανάλυση του συστήματος που αναπτύχθηκε	108
6.1	Αρχή λειτουργίας της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε	108
6.2	Συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων	114
6.3	Αισθητήριο ρεύματος – Αισθητήριο Hall.....	117
6.4	Η μπαταρία που χρησιμοποιείται σαν φορτίο του μετατροπέα.....	118
6.5	Ο μικροελεγκτής και το αναπτυξιακό του	118
6.6	Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.....	122
6.7	Κύκλωμα παραγωγής της τάσης ελέγχου V_c	124
6.7.1	Θεωρητική απόδειξη της μεθόδου που αναπτύχθηκε	125
6.7.2	Περιγραφή κυκλώματος παραγωγής τάσης ελέγχου V_c	127
6.8	Ανάλυση του κώδικα υλοποίησης του αλγορίθμου.....	134
6.8.1	Περιγραφή ελέγχου με το PWM σήμα	135
6.8.2	Περιγραφή ελέγχου με σταθερή ισχύ εισόδου.....	138
6.8.3	Περιγραφή εύρεσης της τάσης που έδινε τη μέγιστη ισχύ	139
7.	Πειραματικά αποτελέσματα	141
8.	Συμπεράσματα	152
9.	Βιβλιογραφία.....	154
9.1	Δημοσιευμένα Papers	154
9.2	Βιβλία	154

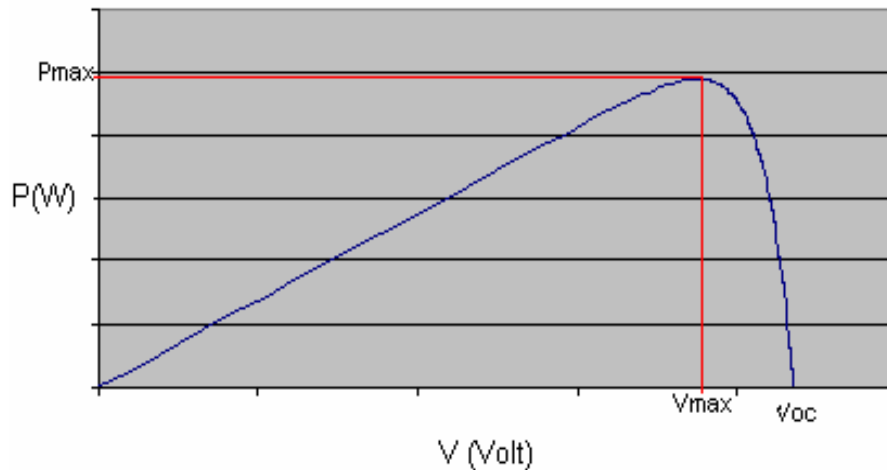
9.3	Τεχνικά κείμενα	155
-----	-----------------------	-----

1. Εισαγωγή

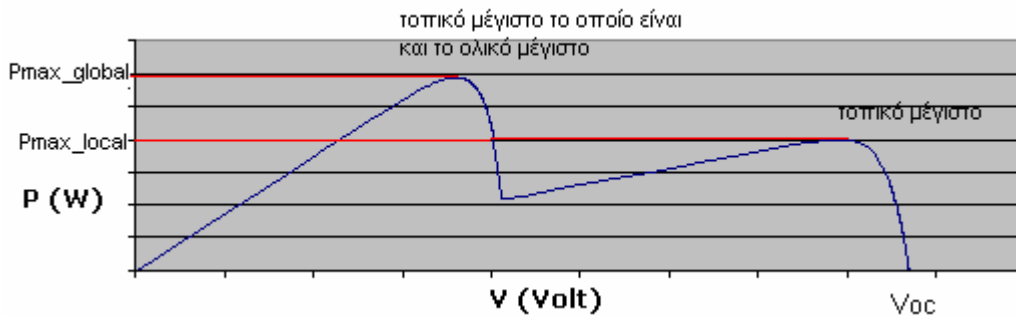
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση στη χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων για παραγωγή ενέργειας, που οφείλεται από τη μια πλευρά στη φιλικότητα που παρουσιάζουν τα ηλιακά συστήματα προς το περιβάλλον και από την άλλη στην ολοένα και καλύτερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους, η οποία καθιστά ευκολότερη και αποδοτικότερη τη χρήση τους για την παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο υπάρχουν παράγοντες που μειώνουν την απόδοση των συστημάτων αυτών, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι από τον τρόπο κατασκευής τους, αλλά οφείλονται στις συνθήκες λειτουργίας των στοιχείων. Ένας σημαντικός παράγοντας που προκαλεί δραματική μείωση της απόδοσης τους είναι η μερική σκίαση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η οποία οφείλεται είτε σε αντικείμενα του περιβάλλοντος είτε σε μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως είναι η νέφωση. Όταν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί υπό συνθήκες μερικής σκίασης μπορεί να παράγει ενέργεια, η οποία όμως είναι μειωμένη σε σχέση με την ονομαστική ισχύ της συστοιχίας. Σε συνθήκες μερικής σκίασης δηλαδή υπάρχουν κάποια φωτοβολταϊκά στοιχεία της συστοιχίας, τα οποία δέχονται λιγότερη ακτινοβολία από τα υπόλοιπα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού ρεύματος και επομένως και της συνολικής ισχύος που μπορεί να παράγει η συστοιχία.

Συγκεκριμένα από μελέτες που έχουν γίνει σε εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα προέκυψε ότι οι απώλειες ενέργειας λόγω μερικής σκίασης ξεκινούν από 10% και φθάνουν μέχρι και το 25% της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας.

Για να γίνει πιο κατανοητή η επίδραση της μερικής σκίασης στη συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, στο σχήμα 1 φαίνεται η τυπική χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που δέχεται ακτινοβολία εντάσεως 1000 W/m^2 , ενώ στο σχήμα 2 φαίνεται η χαρακτηριστική, όταν το στοιχείο λειτουργεί κάτω από συνθήκες μερικής σκίασης.



Σχήμα 1. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που λειτουργεί χωρίς σκίαση



Σχήμα 2. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που λειτουργεί υπό συνθήκες μερικής σκίασης

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω σχήματα στην περίπτωση ομοιόμορφης ακτινοβολίας η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει ένα μόνο μέγιστο, ενώ στην περίπτωση μερικής σκίασης παρατηρούνται δύο τοπικά μέγιστα, εκ των οποίων το ένα είναι και ολικό.

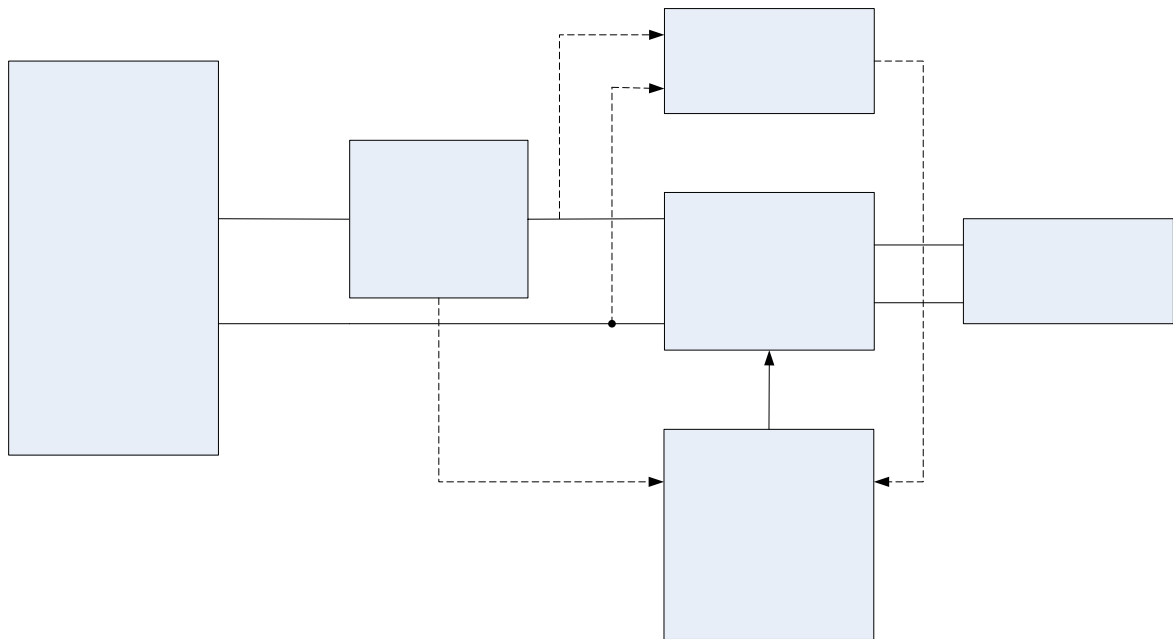
Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι που αποσκοπούν στην εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking – MPPT). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι η χρήση ενός DC/DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, στον οποίο ελέγχεται η σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος που εφαρμόζεται στο διακόπτη του μετατροπέα, με τέτοιο τρόπο

ώστε αυτός να λειτουργεί με τάση εισόδου ίση με την τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού που δίνει τη μέγιστη ισχύ. Ωστόσο οι περισσότερες από αυτές είναι ικανοποιητικές μόνο για περιπτώσεις, όπου υπάρχει ίδια ακτινοβολία σε όλα τα στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, αφού η ιδιομορφία που παρουσιάζει η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης στην περίπτωση μερικής σκίασης καθιστά δύσκολη την εύρεση του ολικού μέγιστου.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος ικανού να ανιχνεύσει το σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος, ακόμα και όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης. Το σύστημα που αναπτύχθηκε βασίζεται σε ένα DC/DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων με μια μπαταρία που αποτελεί το φορτίο του. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να ελέγχεται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Συγκεκριμένα στο διακόπτη του εφαρμόζεται είτε ένα PWM σήμα μεταβλητής σχετικής διάρκειας, είτε ένα σήμα τέτοιο ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου ανεξάρτητα από την τάση εισόδου του. Τα δυο αυτά σήματα εναλλάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος στην περίπτωση που η συστοιχία σκιάζεται μερικώς.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι μετά από δοκιμή του προτεινόμενου συστήματος μετρήθηκε η μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών, η οποία βρέθηκε ίση με 3.47 % που σημαίνει ότι το σύστημα προσφέρει μια ικανοποιητική σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η αρνητική τιμή της μέσης τιμής της απόκλισης οφείλεται στο γεγονός ότι τα σημεία στα οποία συνέκλινε ο αλγόριθμος δεν βρίσκονται ακριβώς πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης, αλλά είτε πάνω είτε κάτω από αυτή.

Το γενικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε

Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου που αναπτύχθηκε είναι ότι παρέχει μια ταχύτατη σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος, όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης σε σχέση με τη μέθοδο που δειγματοληπτεί όλη τη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης μέχρι να ανιχνεύσει το σημείο μέγιστης ισχύος. Επιπλέον δεν απαιτείται ξεχωριστός μετατροπέας για κάθε στοιχείο μιας συστοιχίας και τέλος δεν βασίζεται σε γνωστά μοντέλα φωτοβολταϊκών και επομένως δεν απαιτεί γνώση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος, η ονομαστική ισχύς και ο αριθμός των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Επομένως η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων με άγνωστα χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Σαν μειονέκτημα μπορεί να αναφερθεί η σχετική αύξηση της πολυπλοκότητας του κυκλώματος που ελέγχει το μετατροπέα όταν αυτός λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου. Ωστόσο η σημαντική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας που επιτυγχάνεται αντισταθμίζει πλήρως την πολυπλοκότητα του κυκλώματος.

Τέλος το MPPT σύστημα που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία μπορεί να εφαρμοστεί σε σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (sun-tracking) όπου εκτός από το να βρίσκει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας πάνω στη

χαρακτηριστική ισχύος-τάσης ανιχνεύει και τη βέλτιστη χαρακτηριστική αφού παρακολουθεί συνεχώς τη πορεία του ήλιου.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή των μεθόδων MPPT που έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια μικρή αναφορά στον τρόπο μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε σκιασμένες επιφάνειες. Στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται οι αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και περιγράφεται η συμπεριφορά τους σε συνθήκες μερικής σκίασης. Επίσης περιγράφεται ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για τη μελέτη αυτής της συμπεριφοράς και στη συνέχεια αναλύεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες προσομοίωσης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τέλος αναφέρονται κάποια πειραματικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από παλαιότερες μελέτες για τη συμπεριφορά φωτοβολταϊκών στοιχείων που λειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των διακοπτικών τροφοδοτικών και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στους μετατροπείς υποβιβασμού τάσης, αφού ένας τέτοιου τύπου μετατροπέας χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αναλυτική περιγραφή του συστήματος και του αλγορίθμου που αναπτύχθηκαν. Στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση και δοκιμή του προτεινόμενου συστήματος και τέλος στο κεφάλαιο 8 αναφέρονται τα συμπεράσματα που αφορούν στην απόδοση του συστήματος και σε πιθανές βελτιώσεις ή επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν.

2. Ανασκόπηση μεθόδων MPPT που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν

Στη συνέχεια θα περιγραφούν δυο κλασσικοί τρόποι που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Ο πρώτος τρόπος [1] βασίζεται στην εφαρμογή κάποιων κυκλωμάτων που ελέγχουν το ρεύμα εξόδου κάθε στοιχείου της συστοιχίας έτσι ώστε να παράγεται μέγιστη ισχύς, ενώ ο δεύτερος [2] βασίζεται στον έλεγχο της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος ελέγχου που εφαρμόζεται στο διακόπτη ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης έτσι ώστε να υπολογίζεται η κατάλληλη τάση εξόδου του στοιχείου όπου παράγεται η μέγιστη ισχύς. Θα δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην περιγραφή της δεύτερης μεθόδου, αφού πάνω σε αυτή στηρίχθηκε η υλοποίηση του συστήματος που έγινε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

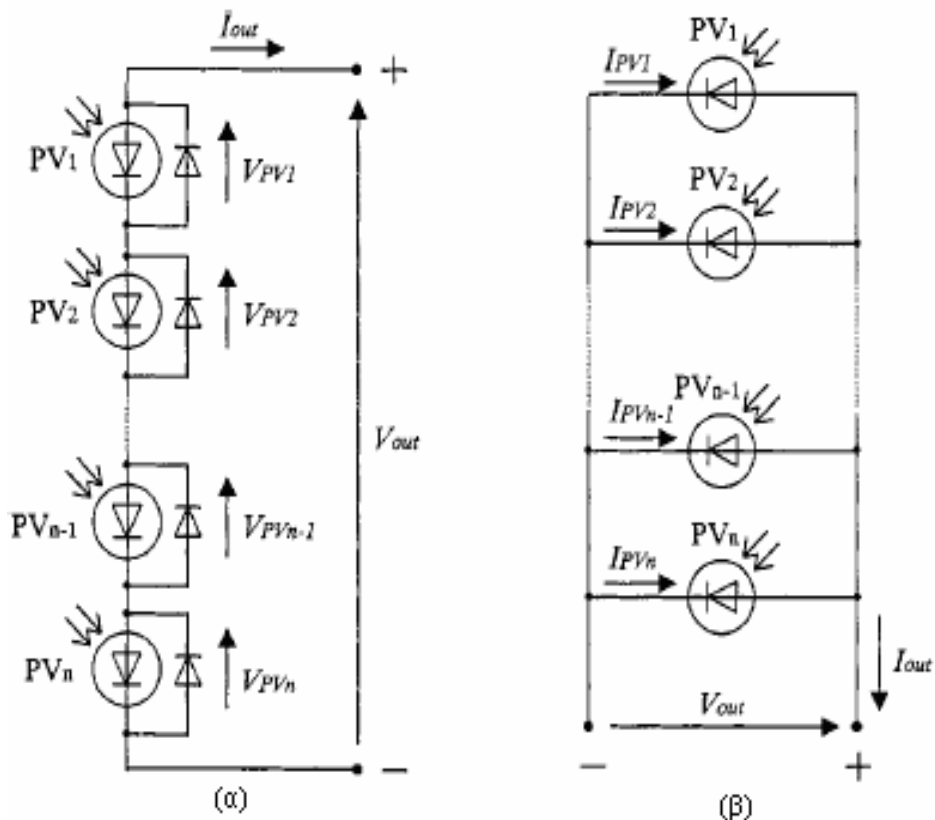
2.1 Μέθοδος MPPT που βασίζεται στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων οδήγησε στην ολοένα και περισσότερη χρήση τους στην παραγωγή ενέργειας για την τροφοδότηση κατοικιών. Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία τοποθετούνται συνήθως στην στέγη των σπιτιών. Επομένως σε συνδυασμό με την σκίαση που προκαλούν τα σύννεφα υπάρχει και επιπλέον σκίαση από τα γειτονικά σπίτια, τα δέντρα, τις τηλεφωνικές γραμμές ή τις γραμμές μεταφοράς ρεύματος καθώς και από ότι άλλο μπορεί να υπάρχει στο περιβάλλον. Λόγω της σκίασης αυτής παρατηρείται μείωση της παραγόμενης ενέργειας από αυτή που είχε υπολογιστεί θεωρητικά. Αυτό σημαίνει ότι το κόστος εγκατάστασης αυξάνεται αφού απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων που πρέπει να τοποθετηθούν στη στέγη έτσι ώστε να υπάρχει ικανοποιητική παραγωγή ενέργειας. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε το σύστημα που θα περιγραφεί στη συνέχεια, το οποίο μπορεί να παράγει ικανοποιητική ενέργεια ακόμα και αν κάποια από τα στοιχεία σκιάζονται. Στη μέθοδο αυτή το κύκλωμα που χρησιμοποιείται ελέγχει το σημείο λειτουργίας για κάθε ξεχωριστό στοιχείο, συμπεριλαμβανομένων και των σκιασμένων, έτσι ώστε να παράγεται η μέγιστη ισχύς από το κάθε στοιχείο. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα χαρακτηριστικά και τα προβλήματα που σχετίζονται με στοιχεία που είναι

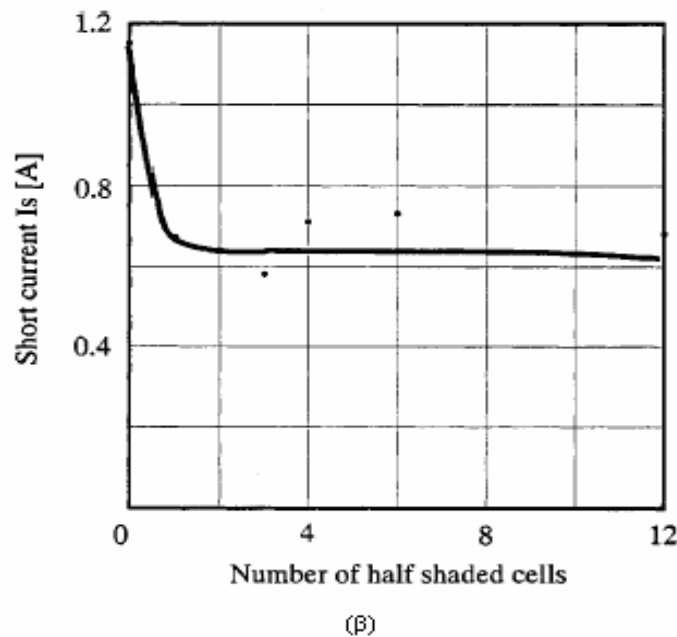
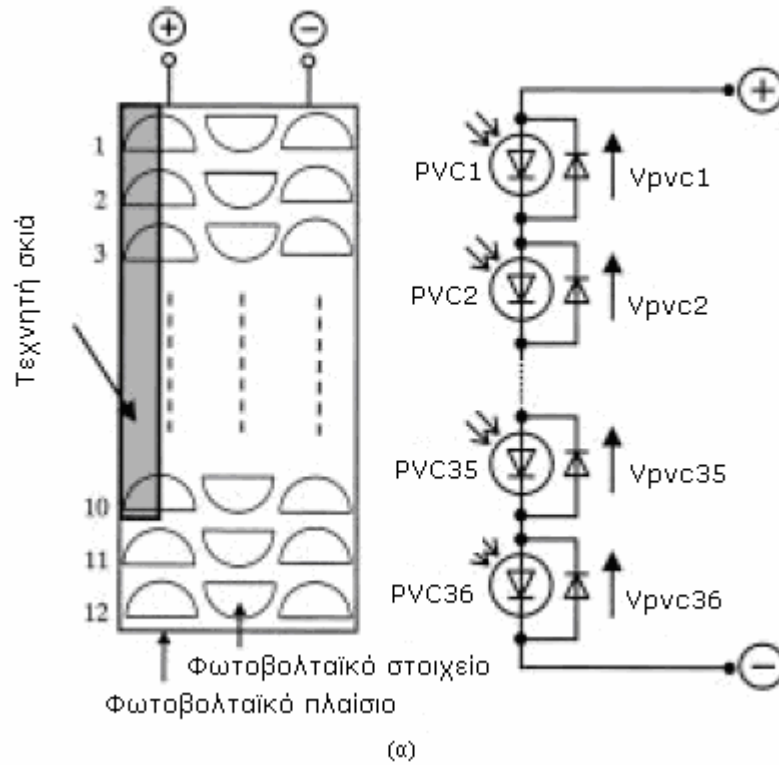
συνδεδεμένα παράλληλα ή σε σειρά και θα μελετηθούν δυο παραλλαγές του κυκλώματος που χρησιμοποιείται για να λύσει τα προαναφερθέντα προβλήματα.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας τα στοιχεία συνδέονται συνήθως σε σειρά όπως φαίνεται στο σχήμα 4(α).

Στα σχήματα 4(α) και (β) φαίνονται επίσης και οι διόδοι παράκαμψης που συνδέονται παράλληλα με κάθε στοιχείο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και χρησιμοποιούνται για την προστασία των στοιχείων από καταστροφή λόγω υπερθέρμανσης σε περιπτώσεις ανάστροφης πόλωσης των κελιών που οφείλεται σε μερική σκίαση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



**Σχήμα 4. Η συνδεσμολογία των στοιχείων μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας:
(α) σε σειρά και (β) παράλληλα**



Σχήμα 5. (α) Ο τρόπος συνδεσμολογίας των κελιών ενός στοιχείου σε σειρά και η τεχνητή σκίαση τους και (β) Το ρεύμα βραχυκύκλωσης που παράγεται ανάλογα με τον αριθμό των σκιασμένων κελιών

Αυτό γίνεται έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής DC τάση ώστε να οδηγηθούν οι μετατροπείς που θα χρησιμοποιηθούν. Εξάλλου τα περισσότερα συμβατικά

φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά όπως φαίνεται και στο σχήμα 5(α).

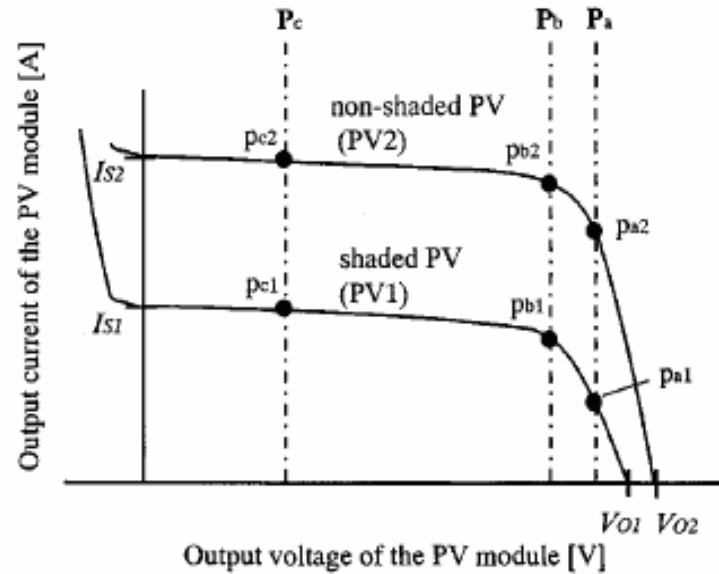
Στο σχήμα 5(β) φαίνεται το παραγόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης όταν κάποια από τα κελιά του στοιχείου είναι μερικώς σκιασμένα. Γίνεται φανερό ότι ακόμα και η παραμικρή σκιά που πέφτει πάνω στο στοιχείο προκαλεί σημαντική μείωση του παραγόμενου ρεύματος.

Όταν τα σκιασμένα και μη σκιασμένα κελιά συνδέονται παράλληλα τότε η παραγόμενη τάση είναι κοινή για όλα τα στοιχεία και το ρεύμα που παράγεται από κάθε στοιχείο ρέει χωρίς περιορισμούς όπως φαίνεται στο σχήμα 4(β). Με άλλα λόγια η τάση εξόδου της συστοιχίας είναι ίση με την τάση ενός μόνο στοιχείου και το ρεύμα εξόδου είναι το άθροισμα των ρευμάτων που παράγει το κάθε στοιχείο.

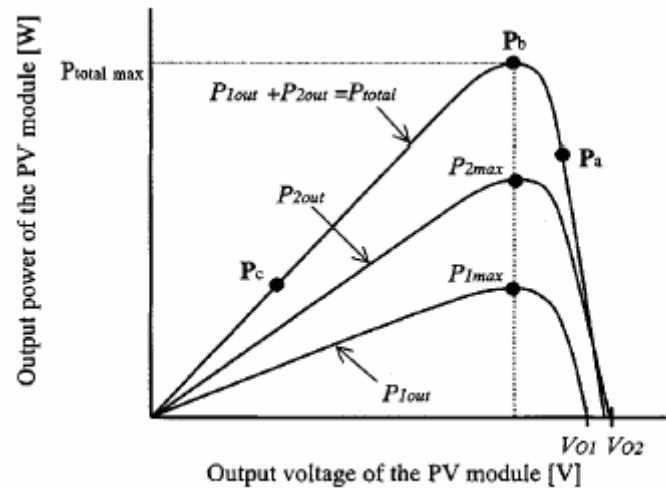
Αντίθετα στα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά το ρεύμα είναι κοινό για όλα τα στοιχεία ενώ η τάση εξόδου είναι το άθροισμα της τάσης του καθενός ξεχωριστά. Ωστόσο, η τάση του κάθε στοιχείου εξαρτάται από το παραγόμενο ρεύμα, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες παράγεται. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί το ακριβές βέλτιστο σημείο λειτουργίας για κάθε στοιχείο. Συγκεκριμένα όταν κάποια από τα στοιχεία δεν παράγουν μεγάλο ρεύμα όπως φαίνεται στα σχήματα 5(α) και (β), τότε η τάση των στοιχείων μειώνεται δραματικά και επομένως μειώνεται και η παραγόμενη ενέργεια.

Οι διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας για στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα μελετώνται στην επόμενη παράγραφο λαμβάνοντας υπόψιν το σημείο λειτουργίας για κάθε διάταξη.

Στο σχήμα 6(α) φαίνεται η τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για δυο στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα τα οποία λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας.



(α)



(β)

Σχήμα 6. Οι χαρακτηριστικές για δυο στοιχεία παράλληλα συνδεδεμένα που λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας (α) ρεύματος-τάσης και (β) ισχύος-τάσης

Στο σχήμα αυτό το PV1 αντιστοιχεί στο σκιασμένο στοιχείο ενώ το PV2 αντιστοιχεί στο μη σκιασμένο. Στην παράλληλη σύνδεση η παραγόμενη τάση είναι ίδια για όλα τα στοιχεία. Επομένως το σημείο λειτουργίας για κάθε ένα δίνεται από το σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας, η οποία είναι παράλληλη στον y-άξονα (για παράδειγμα P_a , P_b και P_c), και της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης του κάθε στοιχείου. Όταν το ρεύμα εξόδου του συστήματος αυξάνεται από μηδέν μέχρι το

μέγιστο ρεύμα, το σημείο λειτουργίας για κάθε στοιχείο κινείται όπως φαίνεται στο σχήμα 6(β) , $p_{a1} \rightarrow p_{b1} \rightarrow p_{c1}$ για το PV1 και $p_{a2} \rightarrow p_{b2} \rightarrow p_{c2}$ για το PV2. Αυτό δείχνει ότι όχι μόνο τα μη σκιασμένα στοιχεία αλλά και τα σκιασμένα μπορούν να λειτουργούν σε περιοχές όπου και τα δυο παράγουν ενέργεια. Επομένως η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για τα στοιχεία αυτά είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 6(β). Αυτό σημαίνει ότι η ολική ισχύς εξόδου δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$P_{total} = P_{1out} + P_{2out} \quad (1)$$

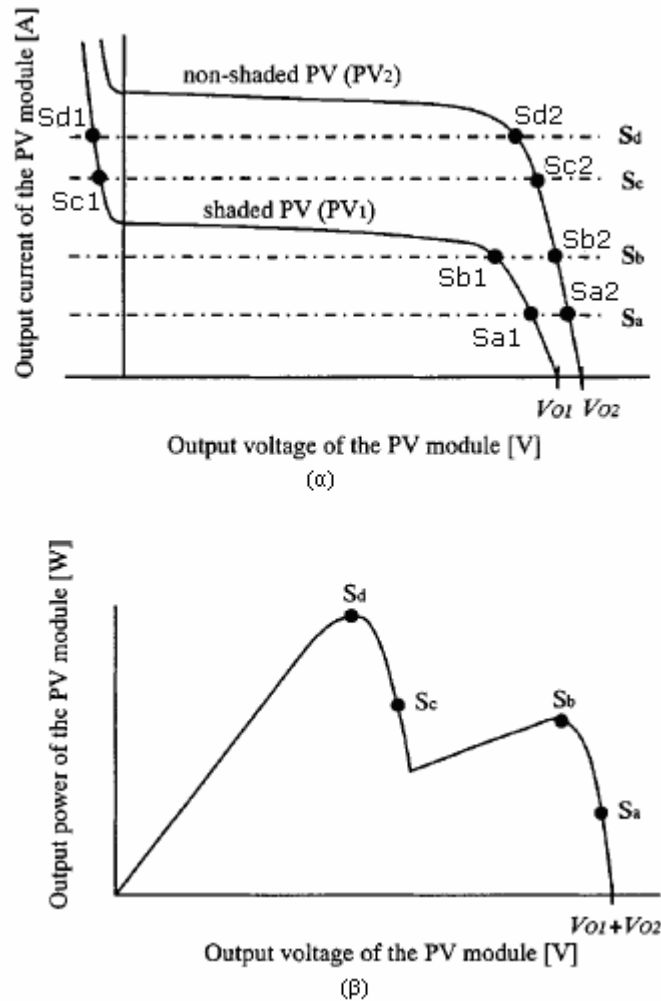
όπου :

- P_{1out} : η παραγόμενη ισχύς από το PV1
- P_{2out} : η παραγόμενη ισχύς από το PV2

Εάν οι τάσεις για τα σημεία μέγιστης ισχύος συμπίπτουν τότε η ολική μέγιστη ισχύς δίνεται από την εξίσωση (2):

$$P_{totalmax} = P_{1max} + P_{2max} \quad (2)$$

Στο σχήμα 7(α) φαίνεται η τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά για τις ίδιες συνθήκες που ίσχυαν και προηγουμένως.



Σχήμα 7. Χαρακτηριστικές για δυο στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά που λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας: (α) ρεύματος-τάσης και (β) ισχύος-τάσης

Στη συνδεσμολογία αυτή το ρεύμα είναι κοινό για όλα τα στοιχεία. Επομένως το σημείο λειτουργίας προκύπτει από το σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας, η οποία είναι παράλληλη στον x-άξονα (για παράδειγμα S_a , S_b , S_c και S_d) και της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης για κάθε στοιχείο. Όταν το παραγόμενο ρεύμα αυξάνεται από μηδέν στο μέγιστο ρεύμα, το σημείο λειτουργίας για κάθε στοιχείο κινείται όπως φαίνεται στο σχήμα 7(α). Στα σημεία λειτουργίας $s_{a1} \rightarrow s_{b1} \rightarrow s_{c1} \rightarrow s_{d1}$ για το PV1 και στα σημεία λειτουργίας $s_{a2} \rightarrow s_{b2} \rightarrow s_{c2} \rightarrow s_{d2}$ για το PV2.

Για τη γραμμή λειτουργίας S_b το σκιασμένο στοιχείο PV1 παράγει τη μέγιστη ενέργεια, αλλά το μη σκιασμένο PV2 δεν παράγει ακόμα τη μέγιστη ισχύ του. Όταν η γραμμή λειτουργίας μετακινηθεί στο σημείο S_c τότε τα σημεία λειτουργίας των PV1, PV2 μετακινούνται στα σημεία s_{c1} και s_{c2} αντίστοιχα και η παραγόμενη ισχύς του PV2 αυξάνεται. Ωστόσο το σημείο λειτουργίας του PV1, s_{c1} , μετακινείται στην αρνητική περιοχή τάσεων και το ρεύμα που παράγεται από το PV2 ρέει μέσω της διόδου παράκαμψης που συνδέεται παράλληλα με το PV1 και η παραγόμενη ενέργεια στο PV1 γίνεται αρνητική. Αυτό σημαίνει ότι το σκιασμένο στοιχείο δεν μπορεί να παράγει πλέον ενέργεια και προκαλεί απώλειες ενέργειας. Στη γραμμή λειτουργίας S_d το μη σκιασμένο στοιχείο PV2 παράγει τη μέγιστη ισχύ του, P_{2max} , αλλά το σκιασμένο στοιχείο, PV1, προκαλεί απώλειες ισχύος, P_{loss1} . Επομένως η ισχύς εξόδου, P_{total} , στο σύστημα αυτό περιορίζεται στην τιμή:

$$P_{total} = P_{out2max} - P_{loss1} \quad (3)$$

Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσεως για το σύστημα αυτό φαίνεται στο σχήμα 7(β). Όπως φαίνεται υπάρχουν δυο μέγιστα στην καμπύλη αυτή, αλλά οι ισχύεις στα σημεία αυτά είναι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν για παράλληλη σύνδεση των στοιχείων.

Στα σχήματα 8(α) και (β) φαίνονται οι αρχές λειτουργίας του συστήματος που περιγράφεται, όπου m φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά.

Το κύκλωμα ελέγχου παραγόμενης ισχύος (*generation control circuit GCC*), όπως ονομάζεται, έχει πολλές πηγές τάσης X_1 έως X_m και το άθροισμα αυτών των τάσεων, V_1 έως V_m , είναι ίσο με την τάση εξόδου V_{out} του συστήματος. Επίσης, οι πηγές τάσης X_1 έως X_m συνδέονται παράλληλα στα στοιχεία PV₁ έως PV_m αντίστοιχα. Για το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 8 (α) τόσο η παραγόμενη ισχύς του συστήματος όσο και η ισχύς για την τροφοδοσία του GCC δίνονται από την έξοδο της συστοιχίας που αποτελείται από τα συνδεδεμένα σε σειρά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ωστόσο για το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 8 (β), οι πηγές τάσης, V_1 έως V_m , του GCC παράγουν την θετική ή αρνητική ισχύ εξόδου με δυο τρόπους επειδή τα τερματικά εισόδου, όπως τα N_c και P_c , δεν υπάρχουν στο σχήμα 8(β). Για το λόγο αυτό όταν κάποιες από αυτές τις πηγές τάσης

παράγουν θετική ισχύ εξόδου, οι υπόλοιπες παράγουν αρνητική ισχύ και επομένως το άθροισμα όλων αυτών των ισχύων πρέπει να ισούται με μηδέν.

Στο σύστημα του σχήματος 8(α) το ρεύμα I_m θεωρείται ως το μεγαλύτερο:

$$I_m > I_{m-1} > \dots > I_i > \dots > I_2 > I_1 \quad (4)$$

Η διαφορά μεταξύ I_m και I_i τροφοδοτείται από την πηγή τάσης X_i , επιτρέποντας στο στοιχείο PV_i να διατηρήσει την παραγόμενη τάση V_i . Επομένως η ολική ισχύς εξόδου P_{out} και η ισχύς εισόδου P_{in} στο GCC υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^m V_i (I_m - I_i) \quad (5)$$

και

$$P_{in} = V_{out} I_c \quad (6)$$

όπου I_c το ρεύμα εισόδου του GCC.

Υποθέτοντας ότι οι απώλειες στο GCC είναι αμελητέες, τότε η ισχύς εισόδου στο GCC είναι ίση με το άθροισμα της ισχύος εξόδου:

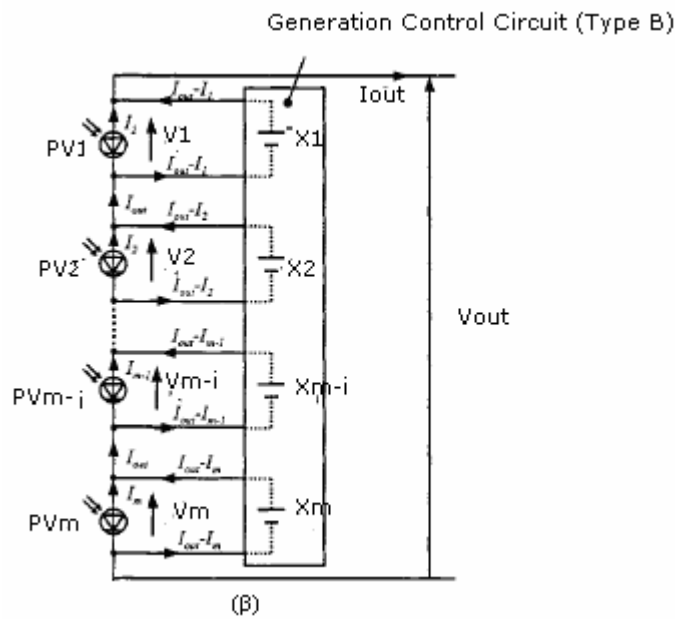
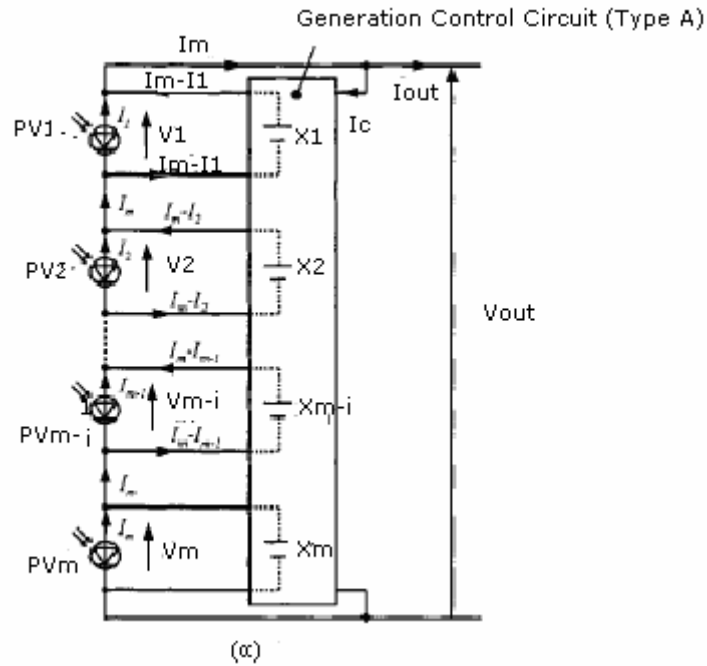
$$\sum_{i=1}^m V_i (I_m - I_i) = V_{out} I_c \quad (7)$$

Επομένως το ρεύμα εξόδου, I_{out} και η ισχύς εξόδου, P_{out} , του συστήματος υπολογίζονται από τις εξισώσεις (8) και (9) αντίστοιχα:

$$I_{out} = I_m - I_c = \frac{1}{V_{out}} \sum_{i=1}^m V_i I_i \quad (8)$$

$$P_{out} = V_{out} I_{out} = \sum_{i=1}^m V_i I_i \quad (9)$$

Η εξίσωση (9) δείχνει ότι κάθε στοιχείο παράγει τη δική του ισχύ στην επιθυμητή τάση, ακόμα και αν τα αντίστοιχα ρεύματα δεν συμπίπτουν μεταξύ τους. Επιπλέον η ισχύς που παράγεται στα τερματικά εξόδου είναι το άθροισμα των επιμέρους ισχύων που παράγονται από τα στοιχεία αυτά.



Σχήμα 8. Αρχές λειτουργίας του συστήματος GCC: (α) τύπος A και (β) τύπος B

Στο σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 8(β), η ισχύς εισόδου, P_{in} , της εξίσωσης (6) πρέπει να είναι μηδέν επειδή δεν υπάρχει κάποιο τερματικό εισόδου για το ρεύμα I_c όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 8(α). Έτσι το ρεύμα εξόδου I_{out} ισούται με το ρεύμα I_m . Ωστόσο δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για τη φορά του ρεύματος

για τα I_1 έως I_m . Έτσι η ισχύς ρέει από το X_i στο PV_i όταν η διαφορά μεταξύ I_{out} και I_i ($I_{out} - I_i$) είναι θετική και από το PV_i στο X_i όταν η διαφορά $I_{out} - I_i$ είναι αρνητική και επιπλέον πρέπει το άθροισμα όλων αυτών των ισχύων να είναι μηδέν. Έτσι η (5) γίνεται:

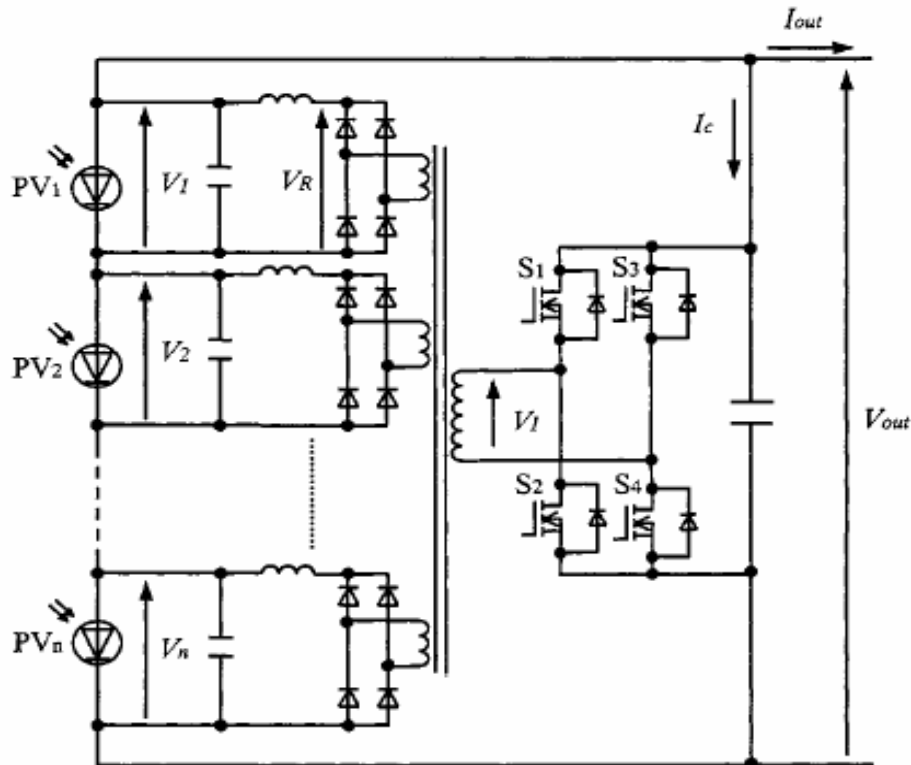
$$\sum_{i=1}^m V_i (I_{out} - I_i) = 0 \quad (10)$$

και το ρεύμα εξόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{out} = \frac{1}{V_{out}} \sum_{i=1}^m V_i I_i \quad (11)$$

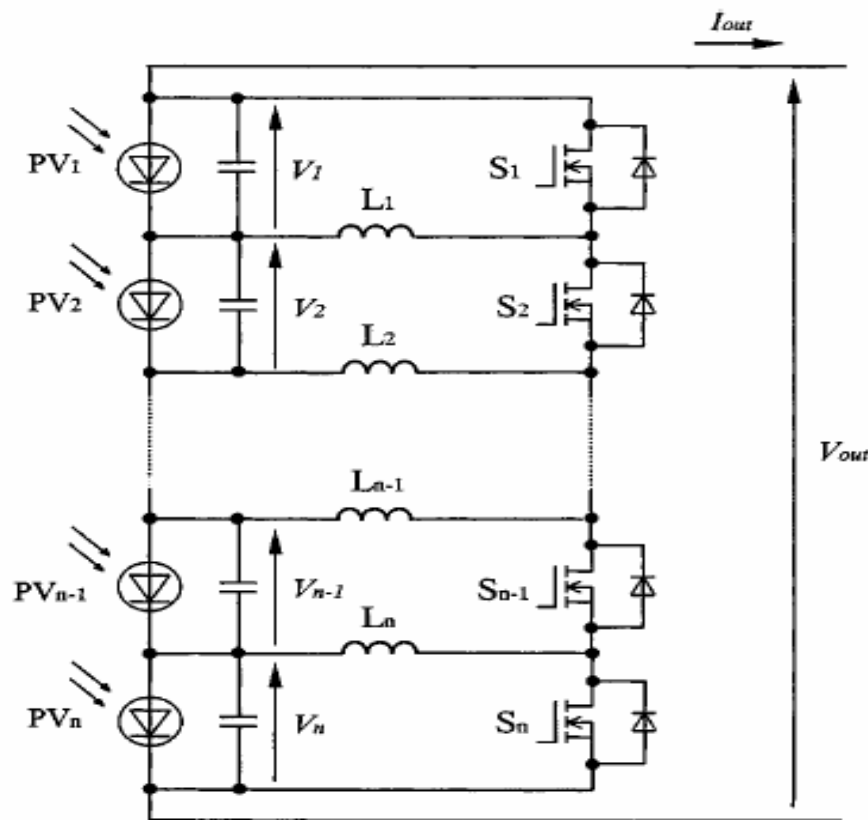
Επομένως η παραγόμενη ισχύς εξόδου του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (9).

Στα σχήματα 9 και 10 φαίνονται τα σχηματικά διαγράμματα του συστήματος GCC, τα οποία υλοποιούν όσα περιγράφηκαν στα σχήματα 7 και 8.

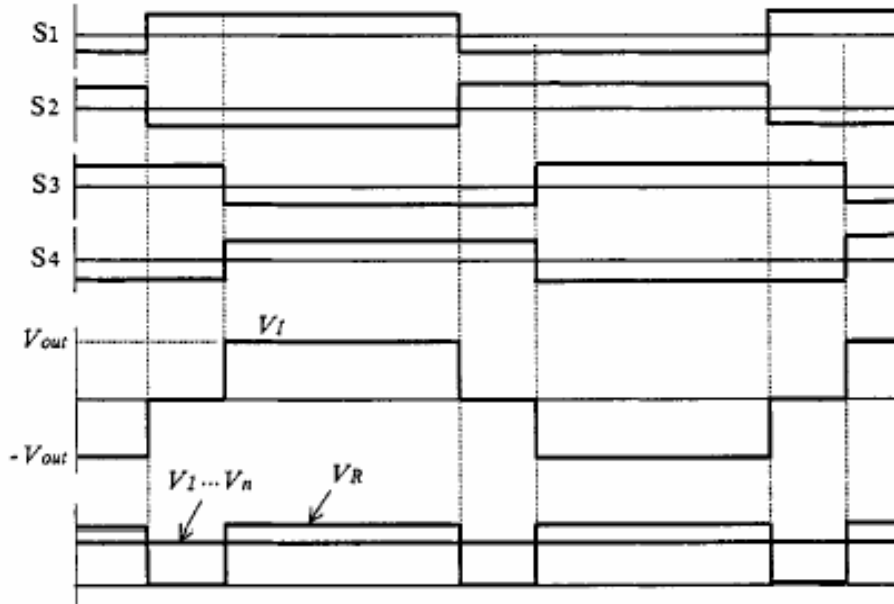


Σχήμα 9. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος GCC τύπου A

Στο σχήμα 9 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός DC/DC μετατροπέα, ο οποίος έχει τη δυνατότητα πολλαπλών τάσεων εξόδου. Κάθε τάση εξόδου του μετατροπέα παίρνει την τιμή V_o/m όταν ο αριθμός των πηγών τάσης είναι m . Επειδή οι τάσεις εξόδου δεν μπορούν να ελεγχθούν ξεχωριστά, δεν μπορεί να υλοποιηθεί ακριβής έλεγχος της παραγόμενης τάσης σε κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο. Ωστόσο αποτρέπεται η σημαντική μείωση της ενέργειας στα σκιασμένα στοιχεία. Το χαρακτηριστικό με το μεγαλύτερο πλεονέκτημα στην τοπολογία αυτή είναι ότι είναι ο απλός και εύκολος τρόπος ελέγχου του μετατροπέα όπως φαίνεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 10. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος GCC τύπου B



Σχήμα 11. Τα σήματα ελέγχου του μετατροπέα του συστήματος GCC

Στο σχήμα 10 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα ισχύος που χρησιμοποιείται (multistage chopper) και στο σχήμα 12 φαίνονται τα σήματα που πρέπει να εφαρμοστούν στις πύλες των διακοπών $S_1 - S_n$. Η μέση τάση V_i του σχήματος 10 σε κατάσταση ισορροπίας μπορεί να υπολογιστεί από τη μέθοδο *state space averaging*. Ο λόγος της χρονικής διάρκειας που ο διακόπτης παραμένει κλειστός προς την περίοδο λειτουργίας του μετατροπέα, \overline{D}_i , για κάθε διακόπτη S_i ορίζεται από τις εξισώσεις (12) και (13).

$$\overline{D}_i = \frac{T_{i(OFF)}}{T_{sw}} \quad (12)$$

με

$$\sum_{i=1}^m \overline{D}_i = 1 \quad (13)$$

όπου $T_{i(OFF)}$ ο χρόνος που ο διακόπτης παραμένει κλειστός και T_{sw} η περίοδος λειτουργίας του μετατροπέα.

Η παραγόμενη τάση V_i για κάθε στοιχείο PV_i αποφασίζεται σε αναλογία με το $\overline{D_i}$ όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$V_1 : V_2 : \dots : V_i : \dots : V_{m-1} : V_m = \overline{D_1} : \overline{D_2} : \dots : \overline{D_i} : \dots : \overline{D_{m-1}} : \overline{D_m} \quad (14)$$

Επιπλέον ισχύει ότι:

$$V_i / V_{out} = \overline{D_i} \quad (15)$$

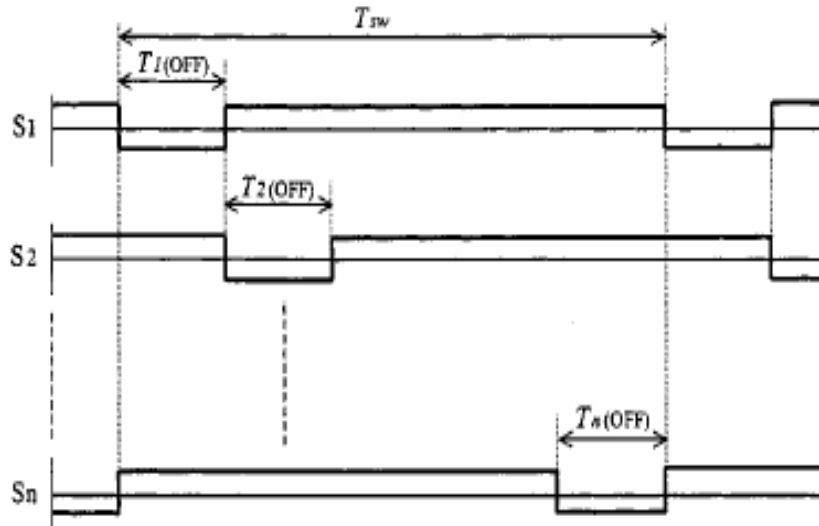
Αντικαθιστώντας την (15) στην (11) προκύπτει ότι το ρεύμα εξόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{out} = \sum_{i=1}^m \overline{D_i} I_i \quad (16)$$

Και επομένως η ισχύς εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

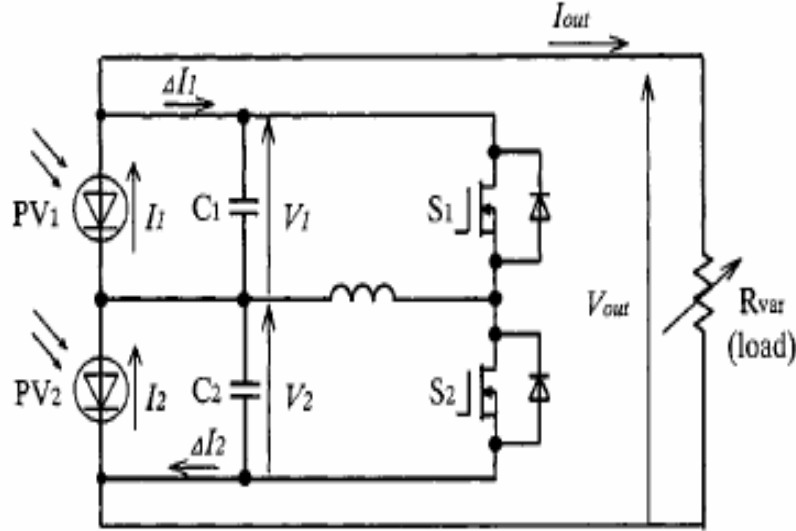
$$P_{out} = V_{out} \sum_{i=1}^m \overline{D_i} I_i = \sum_{i=1}^m V_i I_i \quad (17)$$

Αυτό σημαίνει ότι με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί ξεχωριστός και ακριβής έλεγχος για κάθε μια από τις τάσεις V_i .



Σχήμα 12. Τα σήματα που πρέπει να εφαρμοστούν στους διακόπτες των μετατροπέων

Στη συνέχεια θα αναφερθούν κάποια πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το μελετούμενο σύστημα. Ο μετατροπέας ισχύος δυο επιπέδων που φαίνεται στο σχήμα 13 χρησιμοποιείται για να απλοποιήσει την επεξήγηση.



Σχήμα 13. Ο μετατροπέας ισχύος δυο επιπέδων (chopper circuit)

Η συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος έχει επιλεγεί να είναι ίση με 20 kHz.

Όπως αναφέρθηκε στην εξίσωση (16) το ρεύμα εξόδου I_{out} εκφράζεται ως εξής:

$$I_{out} = \overline{D_1} I_1 + \overline{D_2} I_2 \quad (18)$$

Αν θεωρηθούν οι μεταβολές ρεύματος ΔI_1 και ΔI_2 τότε:

$$\Delta I_1 = I_1 - I_{out} \quad (19)$$

και

$$\Delta I_2 = I_2 - I_{out} \quad (20)$$

Επομένως οι μεταβολές ισχύος ΔP_1 και ΔP_2 που θα παρατηρηθούν να ρέουν στους πυκνωτές C_1 και C_2 θα είναι:

$$\Delta P_1 = V_1 \Delta I_1 = \overline{D_2} V_1 (I_1 - I_2) \quad (21)$$

και

$$\Delta P_2 = V_2 \Delta I_2 = \bar{D}_1 V_2 (I_2 - I_1) \quad (22)$$

Από τις εξισώσεις (14), (21), (22) προκύπτει ότι:

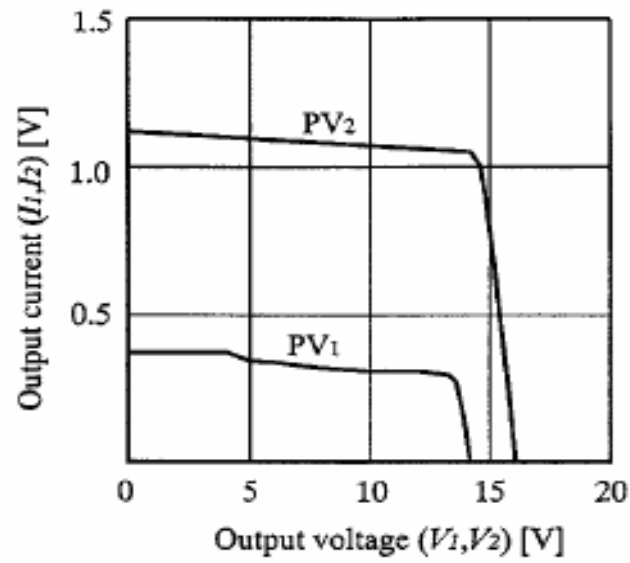
$$\Delta P_1 = -\Delta P_2 \quad (23)$$

Αυτό σημαίνει ότι το chopper circuit επιτρέπει αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου και ότι η κατεύθυνση της ροής ισχύος εξαρτάται από το ρεύμα που παράγεται από τα στοιχεία.

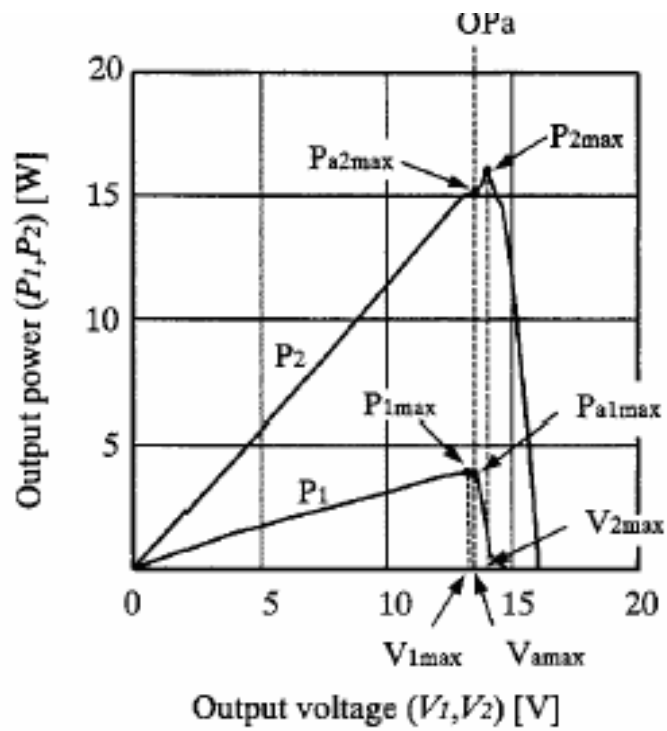
Στα σχήματα 14(α) και (β) φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα (χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης) των σκιασμένων και μη σκιασμένων κελιών. Η προσομοίωση της σκίασης των στοιχείων έγινε με τεχνητά μέσα. Η τάση εξόδου, το ρεύμα εξόδου και η ισχύς εξόδου ορίζονται σαν V_1 , I_1 και P_1 για το σκιασμένο στοιχείο PV_1 και V_2 , I_2 και P_2 για το μη σκιασμένο στοιχείο PV_2 .

Στο σχήμα 14(β), η μέγιστη ισχύς, P_{1max} , του στοιχείου PV_1 επιτυγχάνεται στο σημείο με τάση V_{1max} και η μέγιστη ισχύς, P_{2max} , του στοιχείου PV_2 επιτυγχάνεται στο σημείο με τάση V_{2max} . Στην περίπτωση αυτή η τάση V_{1max} είναι λίγο μικρότερη από την V_{2max} και η ισχύς P_{1max} είναι μικρότερη από την ισχύ P_{2max} . Στο σχήμα 15 φαίνεται η χαρακτηριστική τάσης-ισχύος όταν τα δυο στοιχεία συνδεθούν σε σειρά.

Η καμπύλη (α) του σχήματος 15 δείχνει την παραγόμενη ισχύ όταν το κύκλωμα GCC είναι απενεργοποιημένο και η καμπύλη (β) όταν είναι ενεργοποιημένο. Φαίνεται ότι όταν το κύκλωμα είναι ενεργοποιημένο, τα δυο στοιχεία μπορούν να λειτουργούν κατά μήκος της κατακόρυφης γραμμής OP_a που φαίνεται στο σχήμα 14 και επομένως η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται. Ωστόσο η ισχύς αυτή, $P_{max(active)}$, είναι μικρότερη από το άθροισμα $P_{1max} + P_{2max}$ επειδή η τάση λειτουργίας του κάθε στοιχείου δεν συμπίπτει με τις βέλτιστες τιμές V_{1max} και V_{2max} για κάθε στοιχείο.

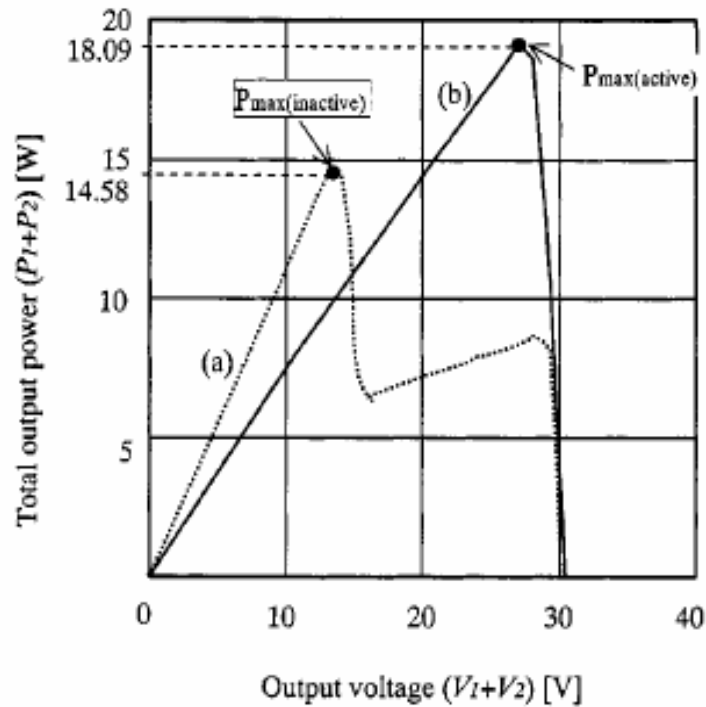


(α)



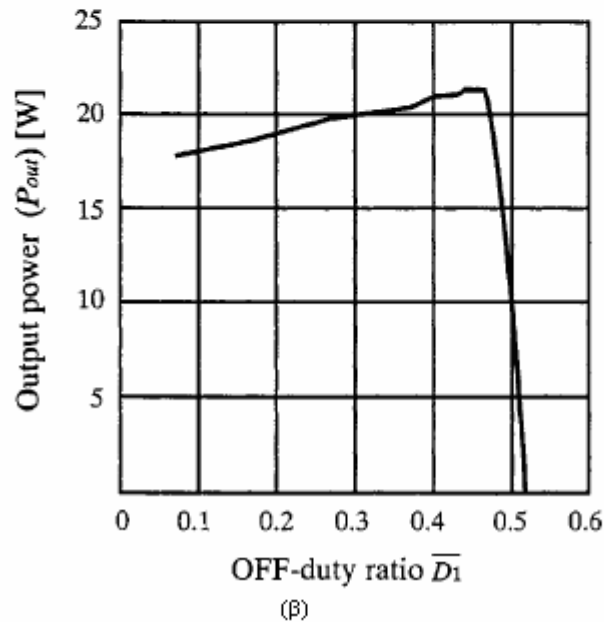
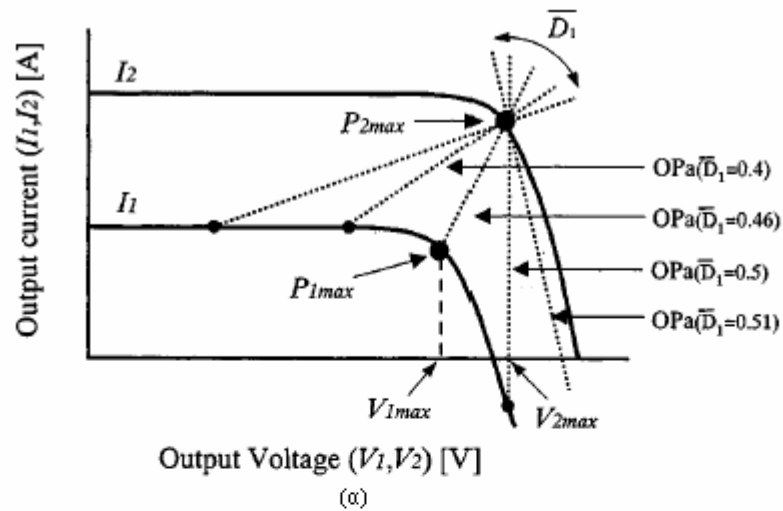
(β)

Σχήμα 14. (α) Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για το σύστημα GCC και (β) Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για το σύστημα GCC



Σχήμα 15. Η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης όταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεθούν σε σειρά για ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο GCC

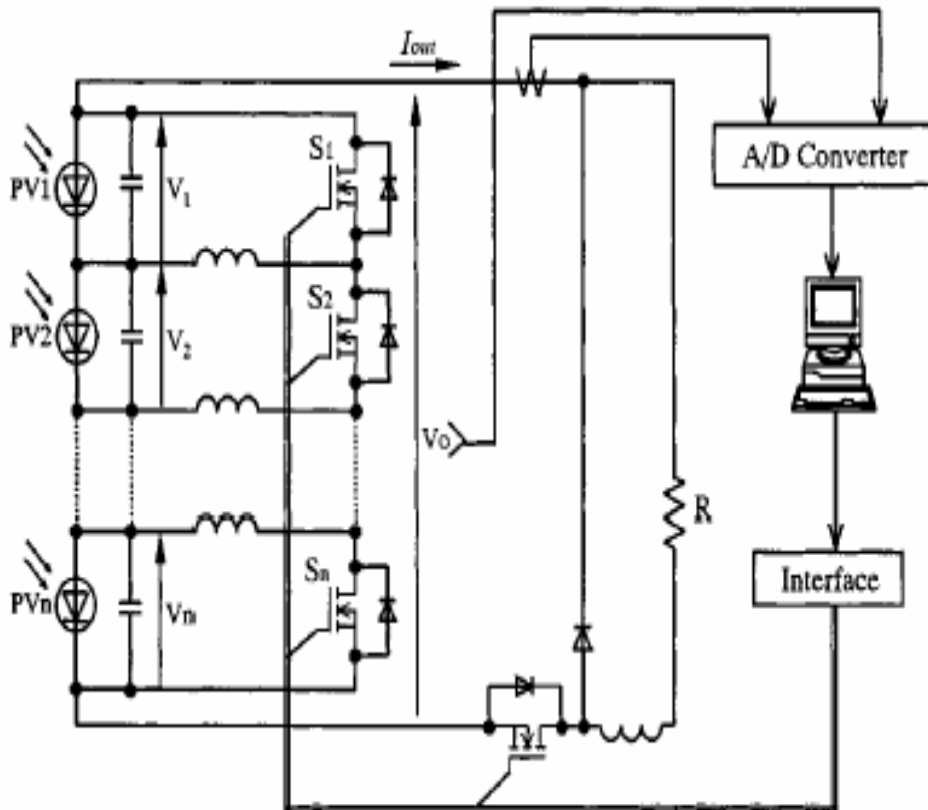
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παραγόμενη τάση για κάθε στοιχείο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (14). Επομένως ο λόγος τάσεων μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το χρόνο που ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός. Στο σχήμα 16(α) φαίνεται η γραμμή λειτουργίας όταν μεταβάλλεται το \overline{D}_1 , ενώ διατηρείται σταθερή η τάση V_{2max} στο στοιχείο PV_2 .



Σχήμα 16. (α) Η μεταβολή της γραμμής λειτουργίας όταν μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής και (β) Η παραγόμενη ισχύς για διάφορες τιμές της σχετικής διάρκειας αγωγής

Στο σχήμα 16(β) φαίνεται η παραγόμενη ισχύς για κάθε μια από τις προηγούμενες γραμμές λειτουργίας. Η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται για $\overline{D}_1 = 0.46$ όπου η γραμμή λειτουργίας τέμνει τις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης στα σημεία V_{1max} και V_{2max} , έτσι ώστε η παραγόμενη ισχύς να είναι σχεδόν ίση με την αναμενόμενη θεωρητική για κάθε στοιχείο.

Στο σχήμα 17 φαίνεται το σύστημα που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του κυκλώματος που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 17. Σύστημα ελέγχου του GCC

Το ρεύμα εξόδου, I_{out} , ελέγχεται από το chopper circuit έτσι ώστε να δίνει τη μέγιστη ισχύ σε μια δεδομένη σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle). Κατά τη διάρκεια αυτού του ελέγχου μετρούνται μόνο η τάση και το ρεύμα εξόδου και κάθε σχετική διάρκεια αγωγής ελέγχεται από έναν μικροελεγκτή. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

Βήμα 1. Αρχικοποίηση κάθε σχετικής διάρκειας αγωγής ως εξής:
 $\overline{D_1} = \overline{D_2} = \overline{D_3} = \dots = \overline{D_n}$

Βήμα 2. Ανάθεση $i=1$.

Βήμα 3. Διατήρηση του λόγου $\overline{D_1} : \overline{D_2} : \overline{D_3} : \dots : \overline{D_n}$ σταθερού εκτός του $\overline{D_i}$ και ρύθμιση του $\overline{D_i}$.

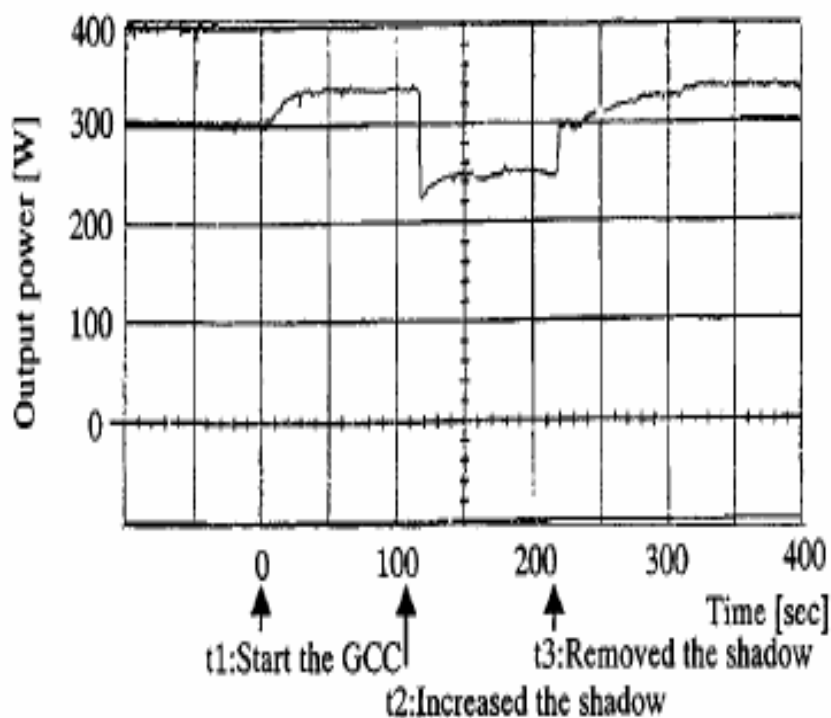
Βήμα 4. Έλεγχος του I_{out} ώστε να παραχθεί η μέγιστη ισχύς

Βήμα 5. Αύξηση του i (στην ουσία αλλάζει το \bar{D}_i που ελέγχεται)

Βήμα 6. Εάν $i=n$ τότε $i=1$.

Βήμα 7. Επανάληψη βημάτων 3-6.

Το σχήμα 18 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου ελέγχου που αναπτύχθηκε καθώς και τους χρόνους που ξεκινά το σύστημα να λειτουργεί, το χρόνο που αυξάνεται η σκιά και το χρόνο που αφαιρείται η τεχνητή σκιά.

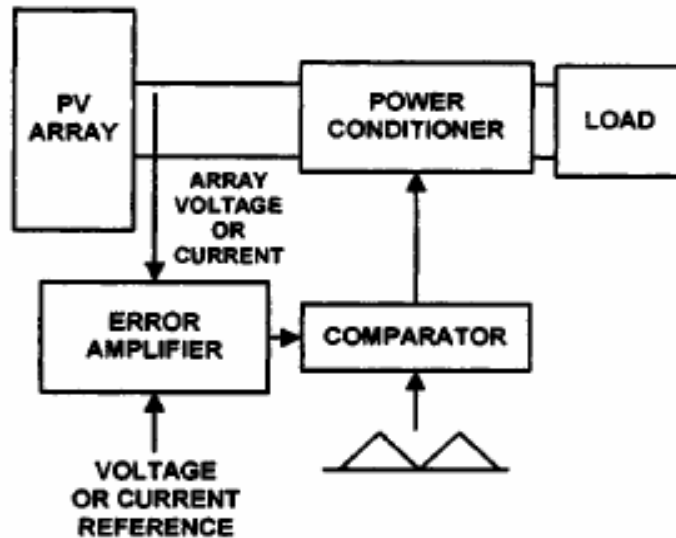


Σχήμα 18. Πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος GCC

2.2 Μέθοδος MPPT που βασίζεται σε ένα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ο οποίος ελέγχεται από ένα μικροελεγκτή

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Μια συνηθισμένη μέθοδος βασίζεται στην σύγκριση της τάσης εξόδου (ή ρεύματος εξόδου) του στοιχείου με μια σταθερή τάση (ή ρεύμα) αναφοράς, η οποία

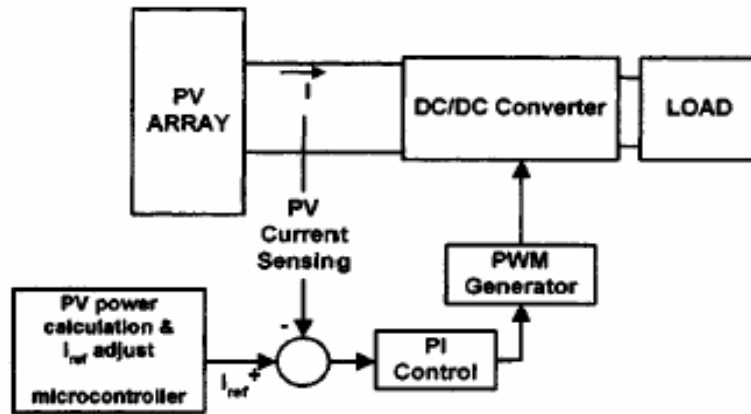
αντιστοιχεί στη θεωρητική τιμή της τάσεως (ή του ρεύματος) που παράγεται η μέγιστη ισχύς και κάτω από συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η μέθοδος αυτή φαίνεται στο σχήμα 19.



Σχήμα 19. Μέθοδος MPPT που βασίζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου που χρησιμοποιείται

Το παραγόμενο διαφορικό σήμα (σήμα σφάλματος) χρησιμοποιείται για να οδηγήσει έναν ρυθμιστή ισχύος (Power conditioner), ο οποίος διασυνδέει το φωτοβολταϊκό στοιχείο με το φορτίο. Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι εύκολη στην υλοποίηση της, δεν είναι τόσο ακριβής, επειδή δεν λαμβάνει υπόψιν της παράγοντες όπως η θερμοκρασία και οι μεταβολές της ακτινοβολίας.

Μια άλλη μέθοδος, που φαίνεται στο σχήμα 20, συγκρίνει το ρεύμα εξόδου του στοιχείου με ένα ρεύμα αναφοράς που υπολογίζεται σε έναν μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής αυτός ελέγχει την ισχύ εξόδου του στοιχείου πριν και μετά την αλλαγή της σχετικής διάρκειας αγωγής του μετατροπέα και ο ελεγκτής PI που χρησιμοποιείται ρυθμίζει το ρεύμα εξόδου του στοιχείου έτσι ώστε να είναι ίσο με το ρεύμα αναφοράς.

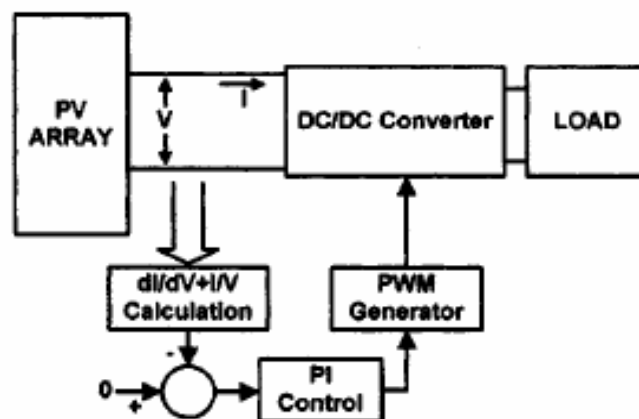


Σχήμα 20. Μέθοδος MPPT που βασίζεται στη σύγκριση του ρεύματος εξόδου με ένα ρεύμα αναφοράς που υπολογίζεται από έναν μικροελεγκτή

Μια εξίσου διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή που βασίζεται στο γεγονός ότι στο σημείο της μέγιστης ισχύος ισχύει ότι $dP/dV = 0$ και επειδή $P = VI$ συνεπάγεται ότι:

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{I}{V} \quad (24)$$

όπου P , V και I είναι η ισχύς, η τάση και το ρεύμα εξόδου, αντίστοιχα, του στοιχείου. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται όπως φαίνεται στο σχήμα 21.



Σχήμα 21. Μέθοδος MPPT που βασίζεται στον υπολογισμό της παραγώγου της παραγόμενης ισχύος ως προς την τάση εξόδου του στοιχείου

Ένα ελεγκτής PI χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει το σήμα ελέγχου PWM μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη $dI/dV + I/V = 0$. Η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα ότι η πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους του συστήματος.

Μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής βασίζεται στο γεγονός ότι η παράγωγος dP/dV μπορεί να υπολογιστεί ψηφιακά δειγματοληπτώντας την τάση και το ρεύμα εξόδου του στοιχείου σε διαδοχικά διαστήματα $(n-1)$ και (n) ως εξής:

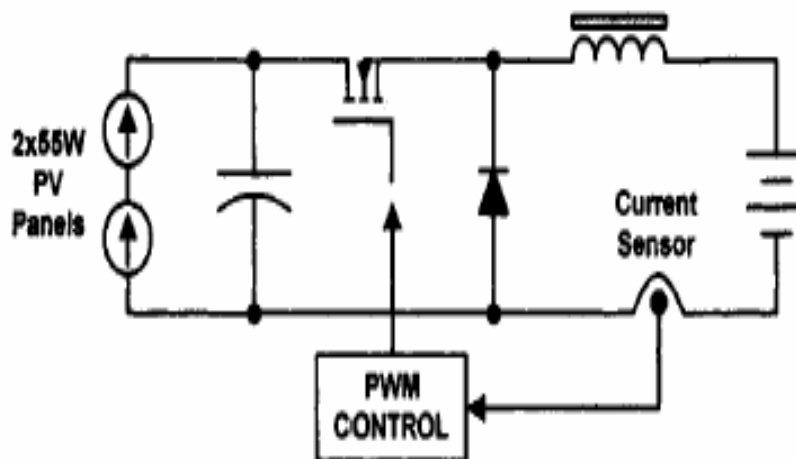
$$\frac{dP}{dV}(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (25)$$

όπου

$$P(n) = V(n)I(n)$$

Η παράγωγος που δίνεται από την εξίσωση (25) μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν ελεγκτή PI που οδηγεί έναν DC/DC μετατροπέα, μέχρι να γίνει $dP/dV = 0$. Από τη στιγμή που η μέθοδος αυτή προϋποθέτει γρήγορο υπολογισμό της παραγώγου συνεπάγεται ότι το κόστος της είναι εξίσου υψηλό.

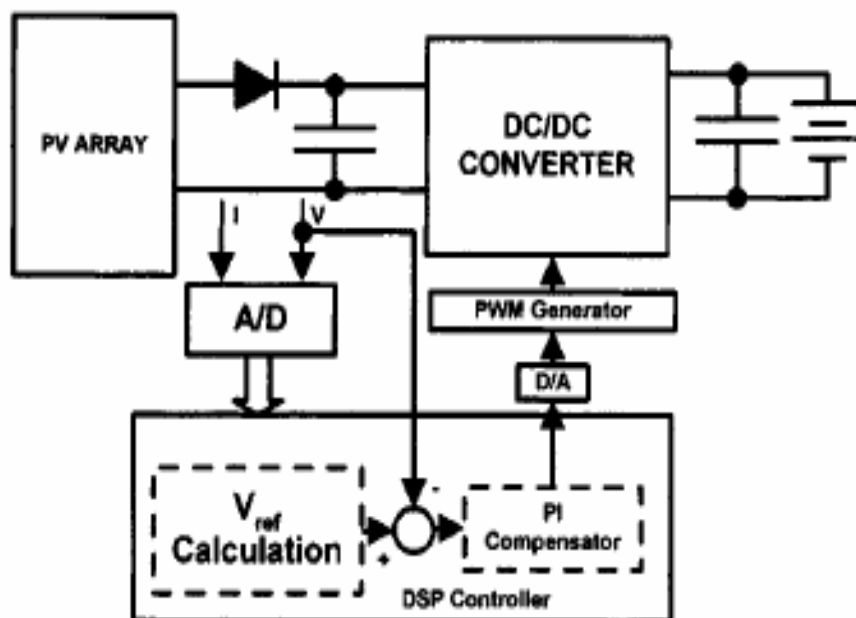
Για εφαρμογές φόρτισης συσσωρευτών, όπου η τάση εξόδου του DC/DC μετατροπέα μπορεί να θεωρηθεί σχετικά σταθερή, εφαρμόζεται η μέθοδος που περιγράφεται στο σχήμα 22.



Σχήμα 22. Μέθοδος MPPT για εφαρμογή φόρτισης συσσωρευτών

Η τιμή του ρεύματος που φορτίζει το συσσωρευτή χρησιμοποιείται για να ελέγξει απευθείας τη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος PWM που εφαρμόζεται στο διακόπτη του μετατροπέα. Μια αύξηση της ισχύος εξόδου έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερο ρεύμα και μεγαλύτερη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος PWM, μέχρι να υπάρχει μεταφορά της μέγιστης ισχύος στο φορτίο. Αυτή η μέθοδος έχει το μειονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εφαρμογές όπου η τάση εξόδου του μετατροπέα παραμένει σχετικά σταθερή.

Στη μέθοδο που φαίνεται στο σχήμα 23 ο μετατροπέας ελέγχεται χρησιμοποιώντας την ισχύ εξόδου της συστοιχίας.



Σχήμα 23. Μέθοδος MPPT όπου ο μετατροπέας ισχύος ελέγχεται με βάση την ισχύ εξόδου της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Ο αλγόριθμος ελέγχου που φαίνεται στο σχήμα 24 βασίζεται στον υπολογισμό της ισχύος εξόδου της συστοιχίας και της μεταβολής της, δειγματοληπτώντας τις τιμές του ρεύματος και της τάσης.

Η μεταβολή της ισχύος ανιχνεύεται, συγκρίνοντας την παρούσα με την προηγούμενη τιμή τάσης, έτσι ώστε να υπολογιστεί μια τάση αναφοράς, V_{ref} , η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή του σήματος PWM που ελέγχει το μετατροπέα. Αυτός οδηγείται από έναν DSP ελεγκτή, που χρησιμοποιείται επειδή

παρέχει γρήγορη απόκριση. Επιπλέον η σταθερότητα του συστήματος εξασφαλίζεται με την ενσωμάτωση ενός ελεγκτή PI, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της τάσης εξόδου του στοιχείου και της τάσης αναφοράς. Ωστόσο ο DSP ελεγκτής αυξάνει το κόστος υλοποίησης της μεθόδου. Εξάλλου όπως αναφέρεται στη συνέχεια, η μέτρηση της τάσης εξόδου του στοιχείου δεν είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της μεταβολής της ισχύος, αρκεί να χρησιμοποιηθεί το απαραίτητο πρόγραμμα για τον έλεγχο του συστήματος. Μια παρόμοια μέθοδος υπολογίζει την τάση αναφοράς ως εξής:

$$V_{ref,k+1} = V_{ref,k} + M \frac{\Delta P_k}{\Delta V_k} \quad (26)$$

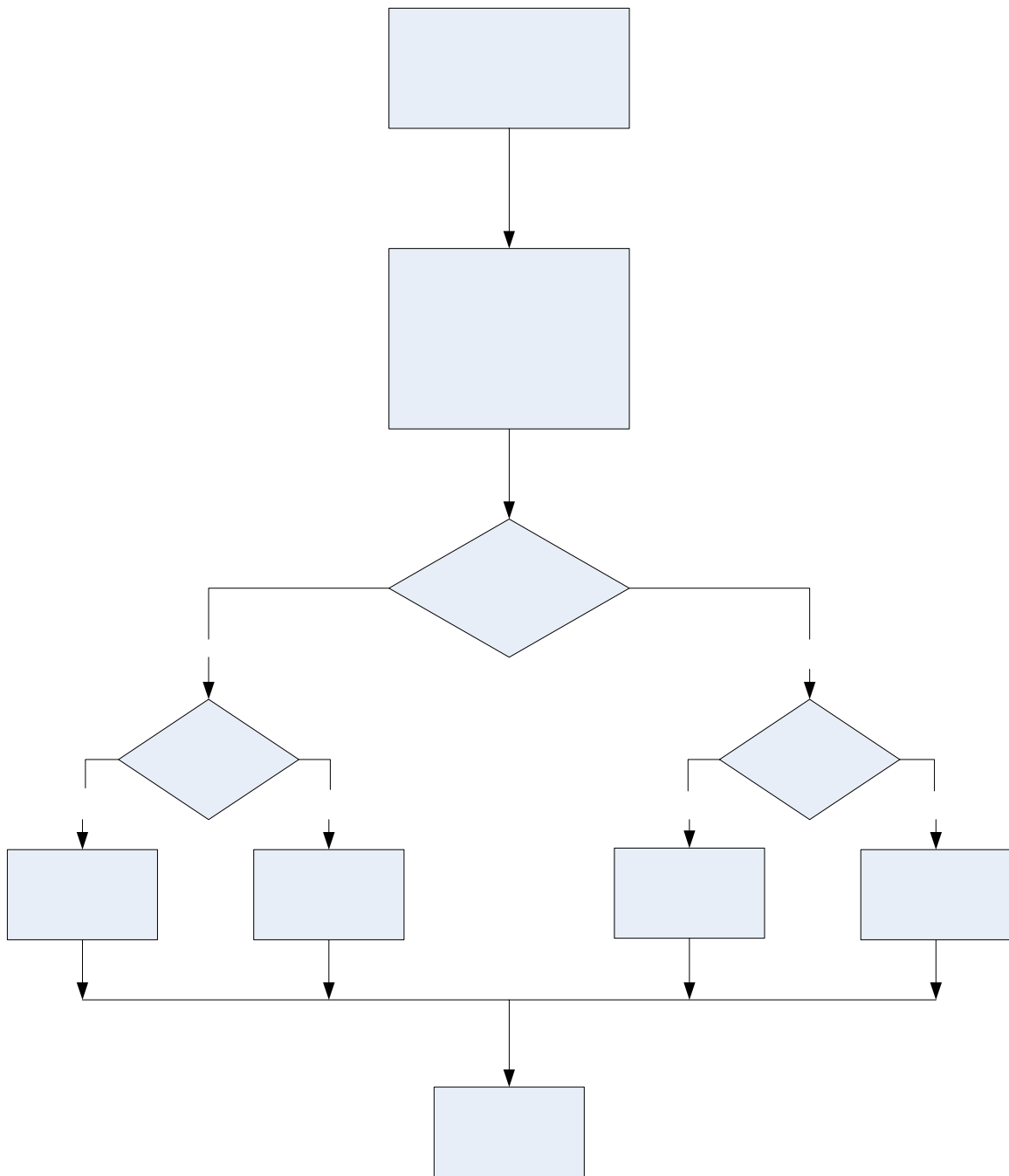
Όπου:

$k, k+1$ τα δυο διαδοχικά δείγματα,

M η τιμή του βήματος μεταβολής και

$\frac{\Delta P_k}{\Delta V_k}$ η στιγμιαία κλίση της καμπύλης ισχύος στην έξοδο του στοιχείου

Το βήμα μεταβολής M επιλέγεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος για ευστάθεια. Οι δυο προηγούμενες μέθοδοι έχουν το μειονέκτημα ότι χρειάζονται δυο βρόγχοι ελέγχου. Ο πρώτος για να ελέγχει την τάση αναφοράς, V_{ref} , και ο δεύτερος για να ελέγχει την τάση εξόδου του στοιχείου ανάλογα με την τάση αναφοράς που προκύπτει από τον πρώτο βρόγχο, κάτι που κάνει το σύστημα εξαιρετικά πολύπλοκο λόγω της αλληλεπίδρασης των δυο βρόγχων.

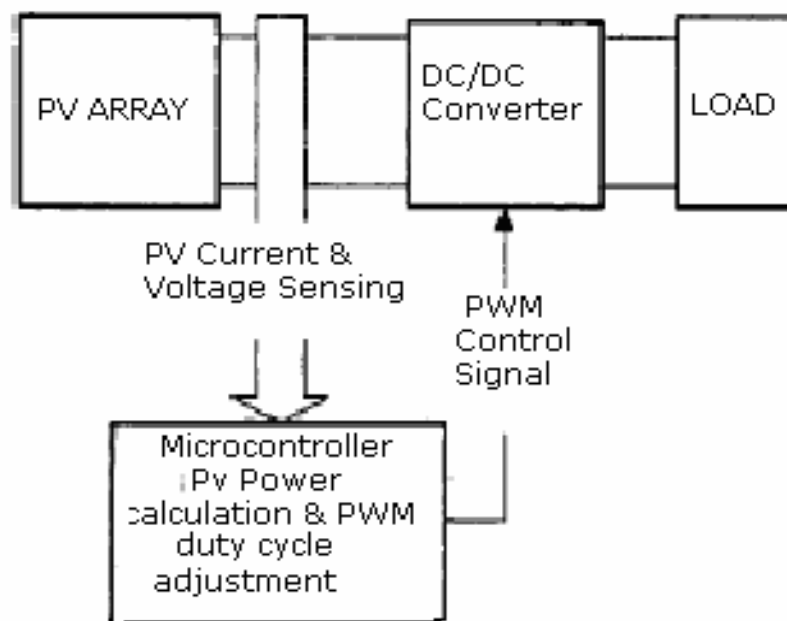


Σχήμα 24. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου για τη μέθοδο MPPT

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες μεθόδους για τον υπολογισμό του σημείου μέγιστης ισχύος βασίζονται στη ρύθμιση της τάσης ή του ρεύματος εξόδου του στοιχείου ανάλογα με μια τάση ή ένα ρεύμα αναφοράς, το οποίο είναι είτε σταθερό είτε προκύπτει από τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως είναι η ισχύς ή η μεταβολή της. Μια παραλλαγή των μεθόδων αυτών είναι να χρησιμοποιηθεί η σχετική διάρκεια αγωγής του μετατροπέα σαν παράμετρος

ελέγχου, μέχρι να επιτευχθεί η συνθήκη $dP/dD = 0$ όπου P η ισχύς εξόδου του στοιχείου και D η σχετική διάρκεια αγωγής, που σημαίνει ότι χρειάζεται μόνο ένας βρόγχος για τον απαραίτητο έλεγχο.

Στη μέθοδο που περιγράφεται στη συνέχεια και φαίνεται στο σχήμα 25, χρησιμοποιείται ένας μικροελεγκτής για να ελέγχει την ισχύ εξόδου του στοιχείου και για να αλλάζει τη σχετική διάρκεια αγωγής του PWM σήματος που εφαρμόζεται στο διακόπτη του μετατροπέα.



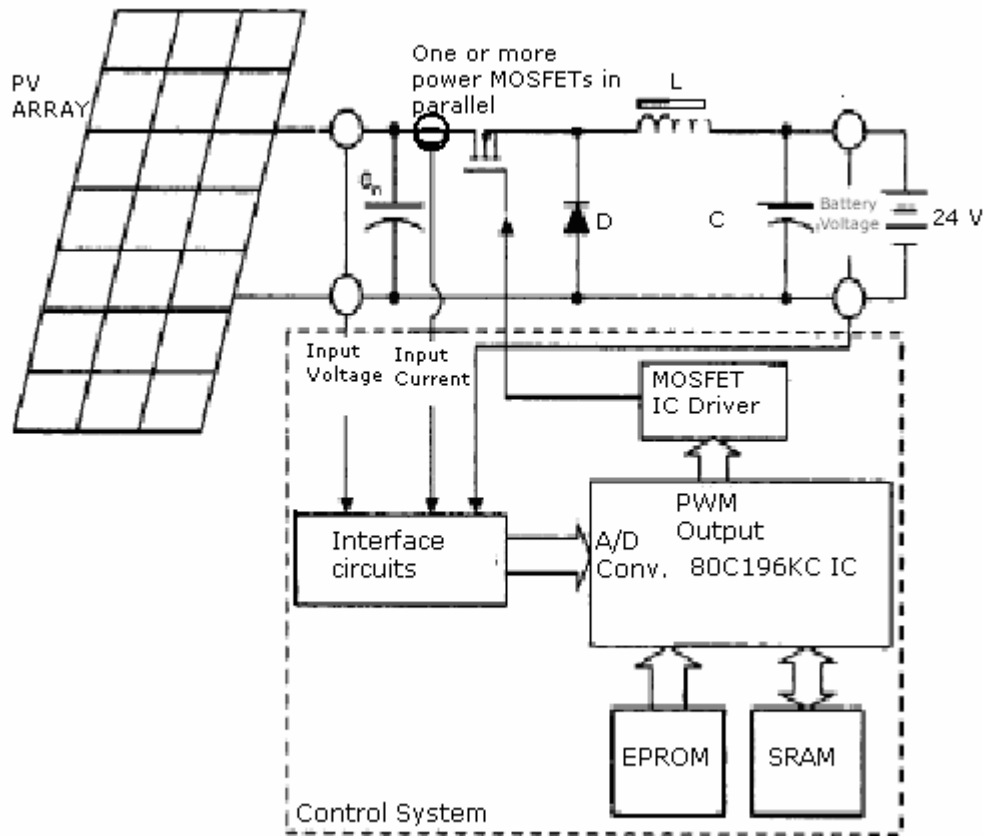
Σχήμα 25. Μέθοδος MPPT που βασίζεται στον έλεγχο της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος που εφαρμόζεται στο μετατροπέα

Ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης, η σχετική διάρκεια αγωγής μεταβάλλεται αναλόγως και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Το προτεινόμενο σύστημα θα μπορούσε εύκολα να υλοποιηθεί με αναλογικά κυκλώματα αντί της χρήσης του μικροελεγκτή, αλλά επιλέχθηκε αυτή η σχεδίαση γιατί έχει το πλεονέκτημα της επεκτασιμότητας σε περίπτωση που προστεθούν περισσότερα στοιχεία ή ανεμογεννήτριες στο δίκτυο. Επιπλέον είναι εφικτή η χρήση του παραπάνω συστήματος σε περίπτωση που υπάρχουν πολλά

τοπικά μέγιστα στην καμπύλη ισχύος-τάσης του στοιχείου λόγω μερικής σκίασης ή δυσλειτουργίας των στοιχείων.

Η υλοποίηση του συστήματος βασίστηκε σε έναν χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης μικροελεγκτή, ο οποίος ελέγχει έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης μεγάλης απόδοσης και εκτελεί όλες τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν για τη διαδικασία της εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος και για τη φόρτιση της μπαταρίας.

Ένα αναλυτικότερο διάγραμμα του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης που χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση της εξόδου του στοιχείου με τη μπαταρία καθώς επίσης και για να βρίσκει το σημείο μέγιστης ισχύος φαίνεται στο σχήμα 26.



Σχήμα 26. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος MPPT

Σαν φορτίο για το φωτοβολταϊκό στοιχείο χρησιμοποιείται μια συστοιχία μπαταριών. Για δεδομένες ατμοσφαιρικές συνθήκες το ρεύμα φόρτισης της

μπαταρίας εξαρτάται από την ισχύ εξόδου του στοιχείου και την τάση της μπαταρίας. Η τάση αυτή αυξάνεται ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και παρακολουθείται συνεχώς ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτιση.

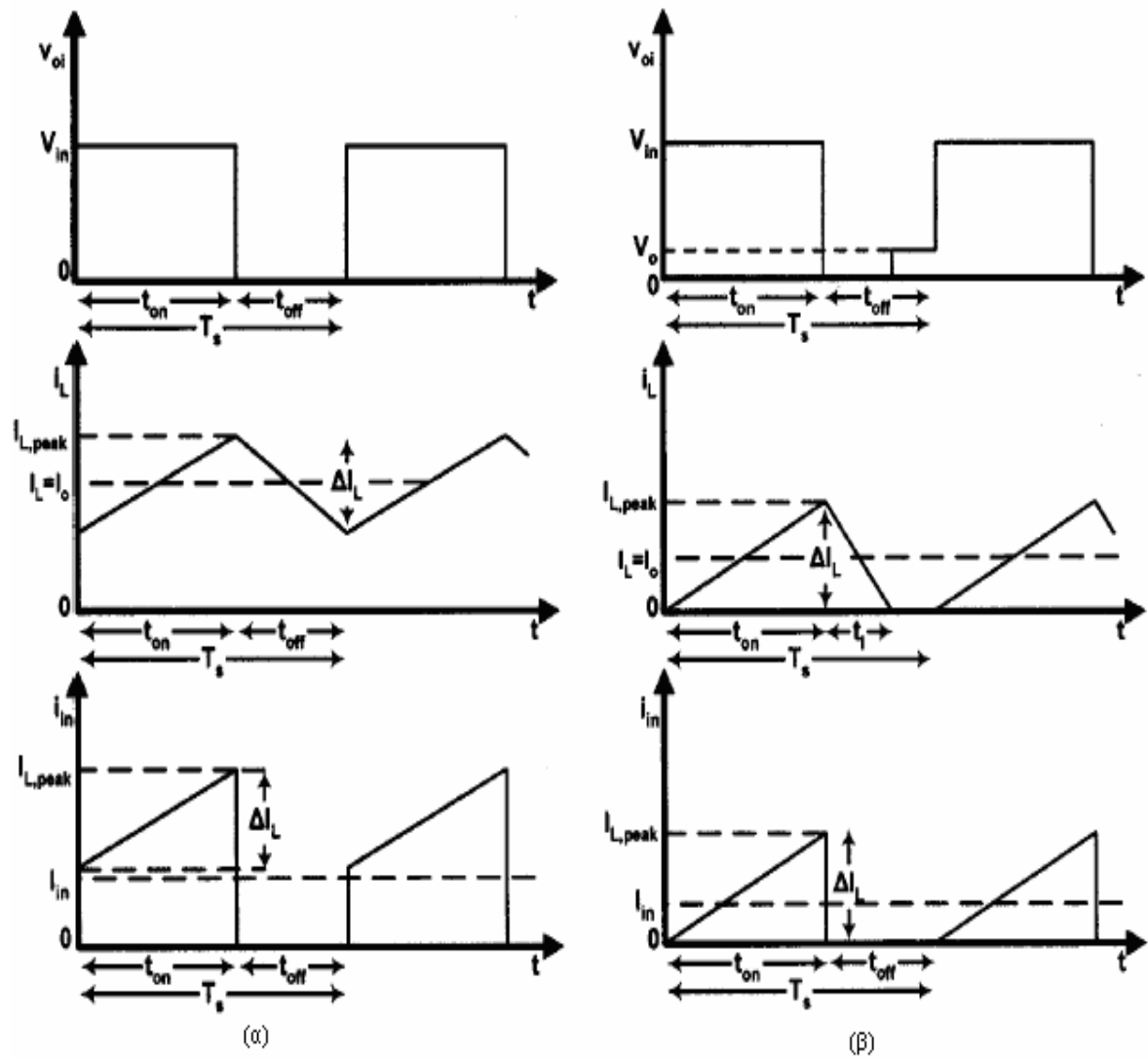
Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τα εξής:

1. Τον χαμηλής κατανάλωσης μικροελεγκτή 80C196KC της Intel με εξωτερική EPROM και SRAM.
2. Διάφορα κυκλώματα που αποτελούνται από αισθητήρες και ενισχυτές που συνδέονται στον μετατροπέα A/D του μικροελεγκτή.
3. Έναν Driver για το MOSFET ισχύος.

Η ισχύς που καταναλώνεται από τη μονάδα ελέγχου είναι περίπου 1 W και τροφοδοτείται από τη μπαταρία που φορτίζεται από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

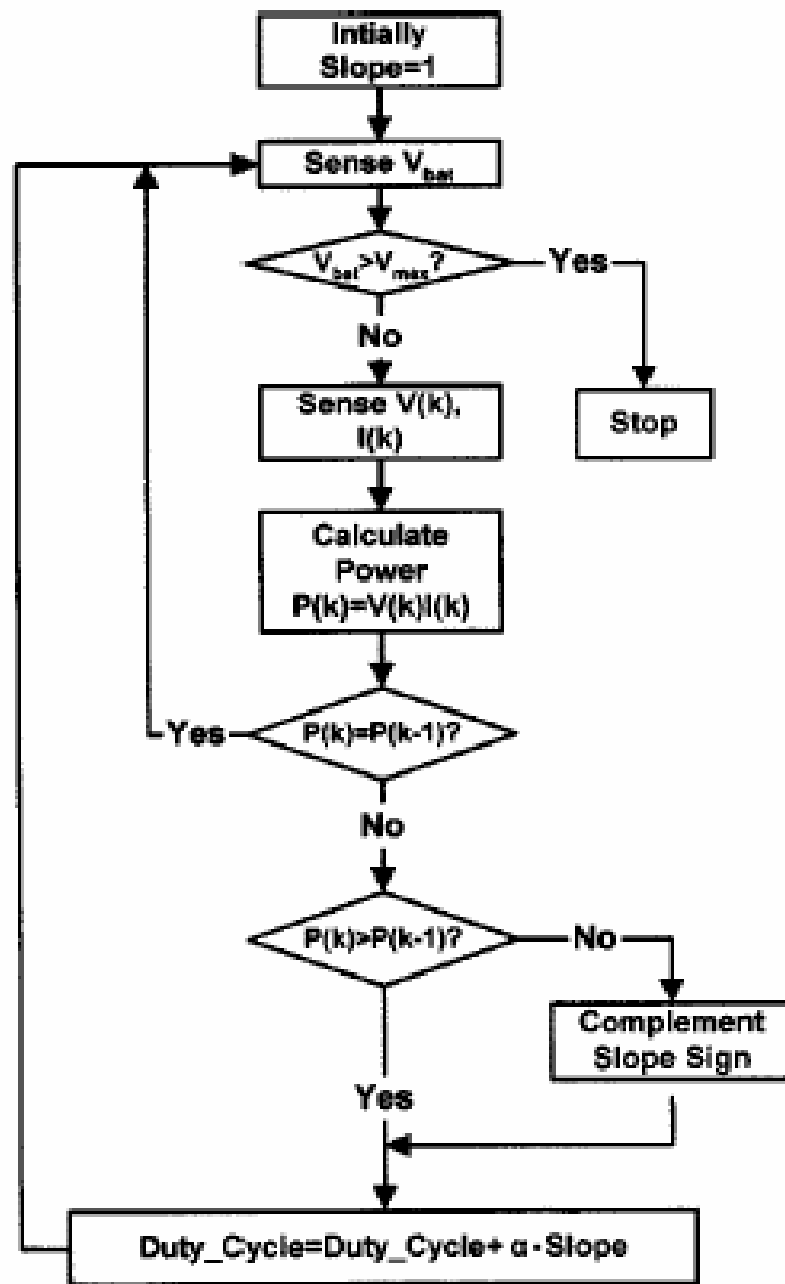
Ο μικροελεγκτής περιέχει έναν A/D μετατροπέα 8 καναλιών που μπορεί να εκτελεί μετατροπές με ανάλυση 10-bit, οι οποίες χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα ελέγχου ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι. Η ανάλυση που προαναφέρθηκε είναι ικανοποιητική για την παρούσα εφαρμογή. Επιπλέον ο μικροελεγκτής μπορεί να παρέχει τρεις εξόδους PWM με προγραμματιζόμενη σχετική διάρκεια αγωγής συχνότητας 39.2 KHz. Καθεμία από τις εξόδους αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ξεχωριστών συστημάτων εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος.

Το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα, i_{in} , έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 27. Στο σχήμα φαίνονται οι κυματομορφές τόσο για συνεχή όσο και ασυνεχή αγωγή ρεύματος.



Σχήμα 27. Οι κυματομορφές του ρεύματος εισόδου και του ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα: (α) για συνεχή και (β) για ασυνεχή αγωγή ρεύματος

Το διάγραμμα ροής του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα 28.

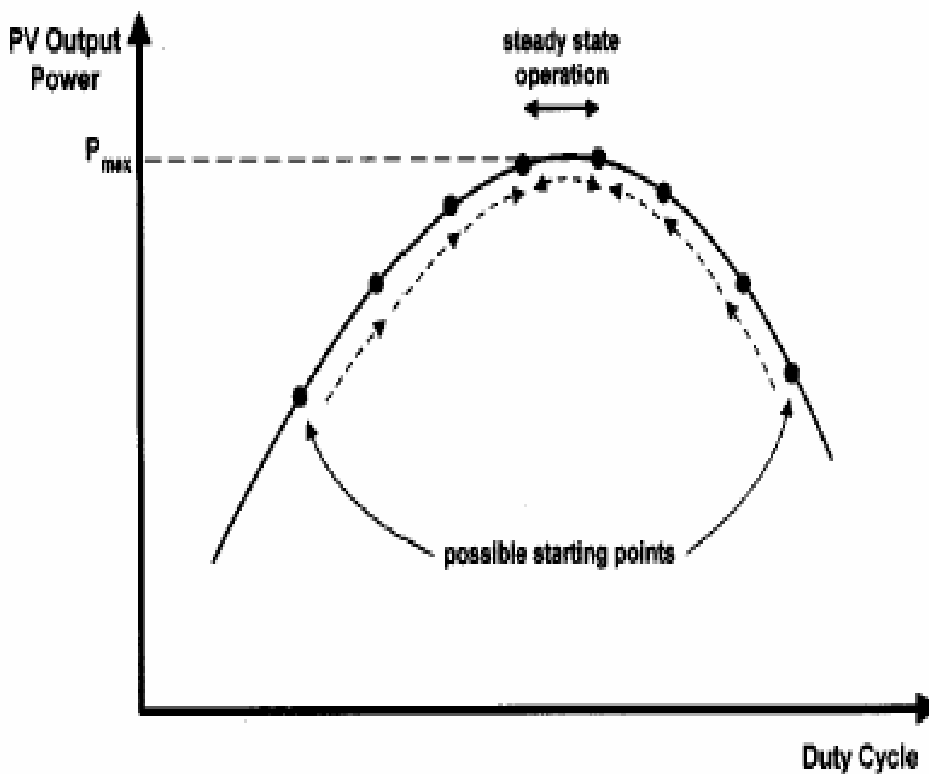


Σχήμα 28. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου

Η μεταβλητή “Slope” που φαίνεται στο σχήμα 28 παίρνει τιμές 1 ή -1 και καθορίζει προς ποία κατεύθυνση θα κινηθεί ο αλγόριθμος πάνω στην καμπύλη τάσης-ισχύος. Σε κάθε επανάληψη μετρούνται η τάση και το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα και υπολογίζεται η ισχύς εισόδου του. Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την τιμή της προηγούμενης επανάληψης και ανάλογα με το αποτέλεσμα η μεταβλητή

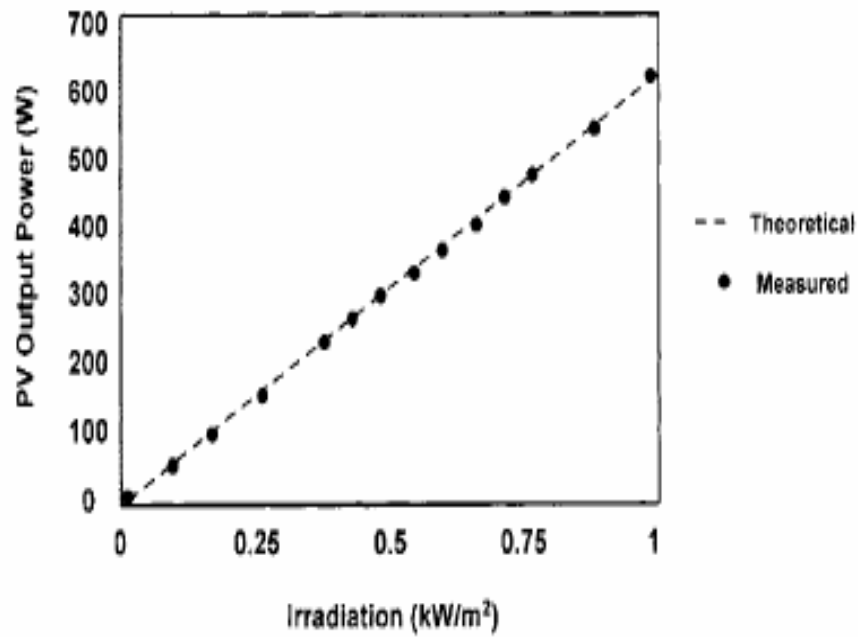
αλλάζει τιμή ή όχι. Τότε η σχετική διάρκεια αγωγής του PWM σήματος μεταβάλλεται αναλόγως. Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο σχήμα 29.

Το σημείο εκκίνησης μπορεί να διαφέρει κάθε φορά αφού εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ ταυτόχρονα η συνεχώς μεταβαλλόμενη σχετική διάρκεια αγωγής, έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση του συστήματος γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος.

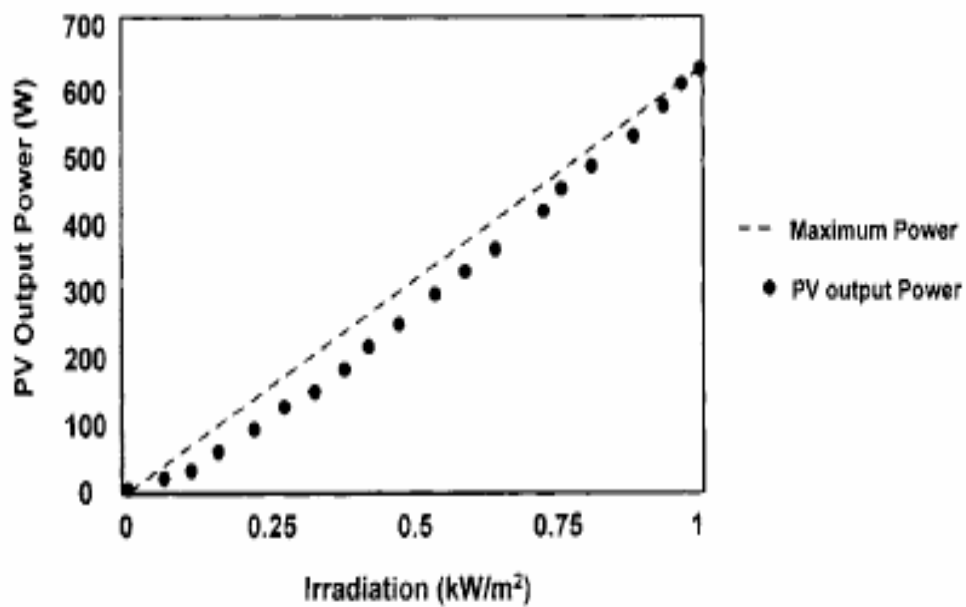


Σχήμα 29. Διαδικασία που ακολουθείται για τη σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος

Στα σχήματα 30 και 31 φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της.



Σχήμα 30. Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής ισχύος εξόδου σε σχέση με την ακτινοβολία



Σχήμα 31. Σύγκριση μέγιστης ισχύος και της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού όταν δε γίνεται MPPT, σε σχέση με την ακτινοβολία

3. Ηλιακή ακτινοβολία

3.1 Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει τόσο αυξήσεις όσο και μειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους. Μελέτες που αναφέρονται στο [3] και έγιναν πάνω στις μεταβολές αυτές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για μια ηλιόλουστη μέρα μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει ομαλή μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εάν οι αυξομειώσεις στην τιμή της ακτινοβολίας δεν ξεπερνούν τα $50 \text{ Wm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, ενώ για μια συννεφιασμένη μέρα η μεταβολή αυτή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $150 \text{ Wm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί εξισώσεις που περιγράφουν τις μεταβολές αυτές, σαν μια συνάρτηση κατανομής που ορίζεται ως η υπέρθεση δυο εκθετικών συναρτήσεων με διαφορετικούς εκθέτες. Η απόδοση των ηλιακών συστημάτων εξαρτάται από την μεταβολή της ακτινοβολίας και από το ποσοστό σκίασης τους και έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι όπως αυτή που περιγράφεται στις επόμενες σελίδες, για τον υπολογισμό του ποσοστού της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα ηλιακά συστήματα όταν επικρατούν συνθήκες σκίασης λόγω του περιβάλλοντος χώρου.

3.2 Υπολογισμός ακτινοβολίας σε σκιασμένες επιφάνειες

Από πειράματα που έγιναν σε πρόσφατα κατασκευασμένα ηλιακά συστήματα έδειξαν ότι η σκίαση μπορεί να προκαλέσει μεγάλες απώλειες στην απόδοση τους. Επομένως απαιτούνται μέθοδοι ικανές να υπολογίσουν την μειωμένη ακτινοβολία έτσι ώστε να μπορούν να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Υπάρχουν πολλά μοντέλα για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές δεν περιλαμβάνουν στους υπολογισμούς τους τα φαινόμενα που προκαλούνται από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Έτσι έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που περιλαμβάνουν το φαινόμενο της σκίασης στον υπολογισμό της απευθείας και της διάχυτης ακτινοβολίας. Πριν χρησιμοποιηθούν αυτές οι μέθοδοι θα πρέπει να μελετηθούν τα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Μια επαρκής μέθοδος είναι αυτή που περιγράφεται στη συνέχεια, η ακρίβεια της οποίας τεκμηριώνεται με ένα παράδειγμα.

Η σκίαση στα ηλιακά συστήματα μπορεί να μειώσει δραματικά την παραγόμενη ενέργεια τους. Απώλειες στην απόδοση λόγω σκίασης έχει αναφερθεί σε πολλά καινούργια φωτοβολταϊκά συστήματα. Πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει σε συγκεκριμένα συστήματα έχουν δείξει πως τα μισά από τα φωτοβολταϊκά συστήματα που μελετήθηκαν σκιάζονται μερικώς κατά τη διάρκεια ενός έτους και αυτό οδηγεί σε ετήσιες απώλειες γύρω στο 10%. Σαν παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί το φωτοβολταϊκό πάρκο του Πανεπιστημίου της Northumbria ισχύος 40 KW, όπου τουλάχιστον το 10% των μονάδων σκιάζεται ενώ μέχρι και 30% αυτών επηρεάζεται από τη μειωμένη ακτινοβολία. Αυτό είναι ένα απλό παράδειγμα που δείχνει πως η μείωση της ακτινοβολίας εξαιτίας της σκίασης έχει σημαντική επίδραση στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ηλιακών συστημάτων. Η σκίαση είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν σχεδιάζονται ή εξομοιώνονται ηλιακά συστήματα. Ειδικά τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι περισσότερο ευαίσθητα στη σκίαση από τα θερμικά ηλιακά συστήματα.

Υπάρχουν αρκετά ικανοποιητικά υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία μπορούν να αναλύσουν τις συνθήκες σκίασης σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία ακόμα και όταν η τοπογραφία του περιβάλλοντος είναι πολύπλοκη (ύπαρξη κτιρίων ή δέντρων). Υπάρχουν κάποιες μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν εξαιρετικά χρονοβόρες διαδικασίες για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας και εξάλλου ο τρόπος περιγραφής των αντικειμένων του περιβάλλοντος δεν είναι επαρκής. Άλλες μέθοδοι που υπάρχουν υπολογίζουν την σκίαση κάνοντας απεικόνιση πολυγώνων, όπου είναι εξίσου δύσκολο να περιγραφεί ακριβώς το περιβάλλον. Σε γενικές γραμμές μια ακριβής περιγραφή των ακανόνιστων αντικειμένων, όπως δέντρα ή κτίρια, είναι δύσκολη και ίσως και αδύνατη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν απεικόνιση πολυγώνων είναι λιγότερο χρονοβόροι από άλλους γνωστούς αλγορίθμους, δεν παύουν όμως να απαιτούν ισχυρά υπολογιστικά συστήματα. Ωστόσο η μέθοδος που ακολουθεί αποτελεί έναν εύκολο τρόπο περιγραφής του περιβάλλοντος χώρου καθώς προσφέρει το πλεονέκτημα των γρήγορων υπολογισμών.

3.2.1 Ακτινοβολία σε μη σκιασμένες επιφάνειες

Υπάρχουν πολλές γνωστές μέθοδοι για να υπολογιστεί η ακτινοβολία σε μια σκιασμένη επιφάνεια. Ο καλύτερος τρόπος ωστόσο είναι να μετρηθεί η ολική ακτινοβολία σε μια επίπεδη ή κεκλιμένη επιφάνεια χωρίς σκίαση. Για τους

επιπλέον υπολογισμούς είναι απαραίτητο να συνυπολογιστεί όχι μόνο η ολική ακτινοβολία αλλά τόσο η απευθείας όσο και η ακτινοβολία από ανάκλαση. Εάν είναι εφικτές μόνο οι μετρήσεις της απευθείας ακτινοβολίας, τότε η ολική ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της απευθείας και της ανακλώμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας στατιστικούς υπολογισμούς [4].

Η θέση του ήλιου μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας κάποιους ευρέως γνωστούς αλγορίθμους οι οποίοι επιτρέπουν ένα είδος πρόβλεψης [4].

Εάν είναι γνωστές η απευθείας ακτινοβολία, $G_{b,h}$ και η ανακλώμενη ακτινοβολία, $G_{d,h}$, πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία, G_t , πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια, η οποία αποτελείται από την απευθείας ακτινοβολία, $G_{b,t}$, την ανακλώμενη ακτινοβολία, $G_{d,t}$ και τον όρο $G_{r,t}$ που εκφράζει την ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος.

$$G_t = G_{b,t} + G_{d,t} + G_{r,t} \quad (27)$$

Η απευθείας ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια μπορεί εύκολα να παραχθεί από την απευθείας ακτινοβολία, $G_{b,h}$, σε μια οριζόντια επιφάνεια χρησιμοποιώντας την γωνία ύψους του ήλιου, α_s και τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός, θ_t , πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια ως εξής :

$$G_{b,t} = G_{b,h} \max\left(\frac{\cos\theta_t}{\sin\alpha_s}\right) \quad (28)$$

Η γωνία πρόσπτωσης του φωτός πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από τη γωνία ύψους του ήλιου, α_s , το αζιμούθιο του ήλιου, γ_s , την γωνία κλίσης της επιφάνειας, β και το αζιμούθιο της επιφάνειας, γ_A , ως εξής :

$$\theta_t = \arccos[\sin\alpha_s * \cos\beta + \cos\alpha_s * \sin\beta \cos(\gamma_s + \gamma_A)] \quad (29)$$

Θεωρώντας μια ιστροπική κατανομή της ακτινοβολίας του ουρανού, υπάρχουν οι ακόλουθες εκφράσεις για την διαχέουσα ακτινοβολία, $G_{d,t}$, πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια και την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία, $G_{r,t}$, οι οποίες χρησιμοποιούν την ολική ακτινοβολία, G_h , σε οριζόντιο επίπεδο, την διαχέουσα

ακτινοβολία, $G_{d,h}$, σε οριζόντιο επίπεδο και το λόγο του ανακλώμενου φωτός από το περιβάλλον έδαφος, A :

$$G_{d,t} = 0.5G_{d,h}(1 + \cos\beta) \quad (30)$$

$$G_{r,t} = 0.5G_h A(1 - \cos\beta) \quad (31)$$

Πιο ακριβή μοντέλα για τον υπολογισμό της διαχέουσας ακτινοβολίας χρησιμοποιούν ανισοτροπικά μοντέλα διάχυτης ακτινοβολίας έτσι ώστε να υπολογίσουν την ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο βασιζόμενα σε δεδομένα για την ακτινοβολία που προσπίπτει σε επίπεδη επιφάνεια [4]. Αυτά τα μοντέλα, ωστόσο δεν λαμβάνουν υπόψιν τους φαινόμενα σκίασης. Επομένως αν χρησιμοποιηθούν αυτές οι μέθοδοι σε προσομοιώσεις συστημάτων, η θεωρητικά παραγόμενη ισχύς που υπολογίζεται θα είναι συνήθως πολύ υψηλή, λόγω της αδυναμίας των συγκεκριμένων μοντέλων να συμπεριλάβουν τα φαινόμενα σκίασης.

Ο υπολογισμός της μειωμένης λόγω σκίασης ακτινοβολίας περιγράφεται στη συνέχεια. Ωστόσο πριν γίνει αυτό θεωρείται απαραίτητο να γίνει μια αναφορά στον τρόπο που μπορούν να περιγραφούν τα αντικείμενα που περιβάλλουν την μελετούμενη επιφάνεια.

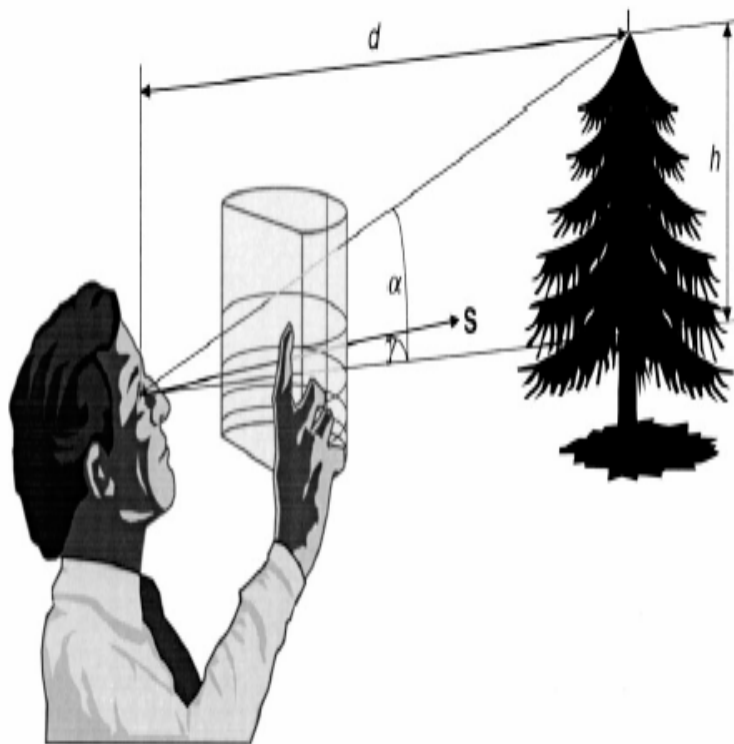
3.2.2 Μελέτη αντικειμένων του περιβάλλοντος

Μια επιφάνεια θεωρείται ότι δεν σκιάζεται αν το έδαφος είναι τελείως επίπεδο και δεν βρίσκονται εμπόδια στην ευρύτερη περιοχή. Εάν τα εμπόδια όπως δέντρα, άλλες συστοιχίες φωτοβολταϊκών, κτίρια ή τεχνικές εγκαταστάσεις βρίσκονται πολύ μακριά από την εξεταζόμενη περιοχή, μπορεί να θεωρηθεί για λόγους απλότητας ότι η περιοχή δεν σκιάζεται. Στις πραγματικές όμως επιφάνειες όπου τοποθετούνται τα ηλιακά συστήματα υπάρχουν συνήθως εμπόδια στο περιβάλλον που δεν μπορούν να θεωρηθούν απομακρυσμένα και ούτε μπορούν να μετακινηθούν.

Μια πλήρης περιγραφή της τοπογραφίας του περιβάλλοντος είναι απαραίτητη για τους επιπλέον υπολογισμούς. Από τη στιγμή που οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως εφαρμόσιμοι σε ένα μόνο σημείο της επιφάνειας θα πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή του σημείου αναφοράς της επιφάνειας ως προς το οποίο υπολογίζονται οι συντεταγμένες. Έπειτα τα αντικείμενα του

περιβάλλοντος θα πρέπει να μελετηθούν χρησιμοποιώντας κυλινδρικές συντεταγμένες (όπως είναι η γωνία αζιμουθίου γ και η γωνία ύψους α).

Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας απλά οπτικά όργανα όπως μια πυξίδα, ένα αλφάδι και μια διαφάνεια για αποτύπωση φωτογραφιών με ένα κυλινδρικό πλέγμα έτσι ώστε να σχηματίζεται ένα ημικύκλιο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 32.

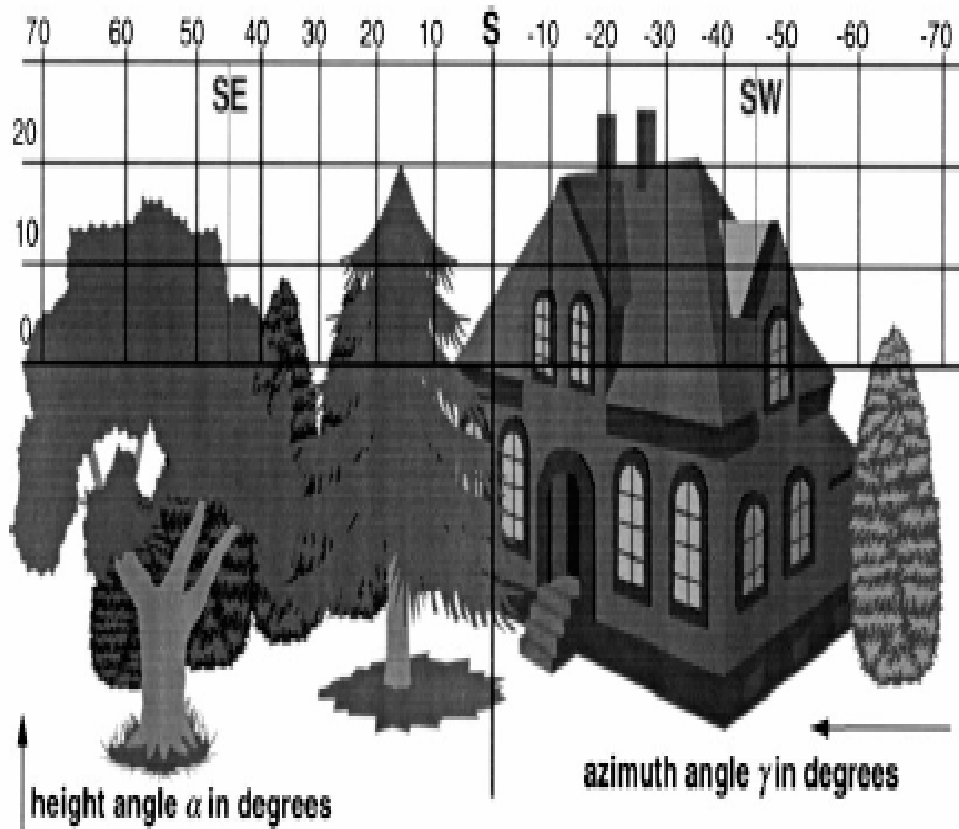


Σχήμα 32. Μέθοδος για τη μέτρηση των κυλινδρικών συντεταγμένων

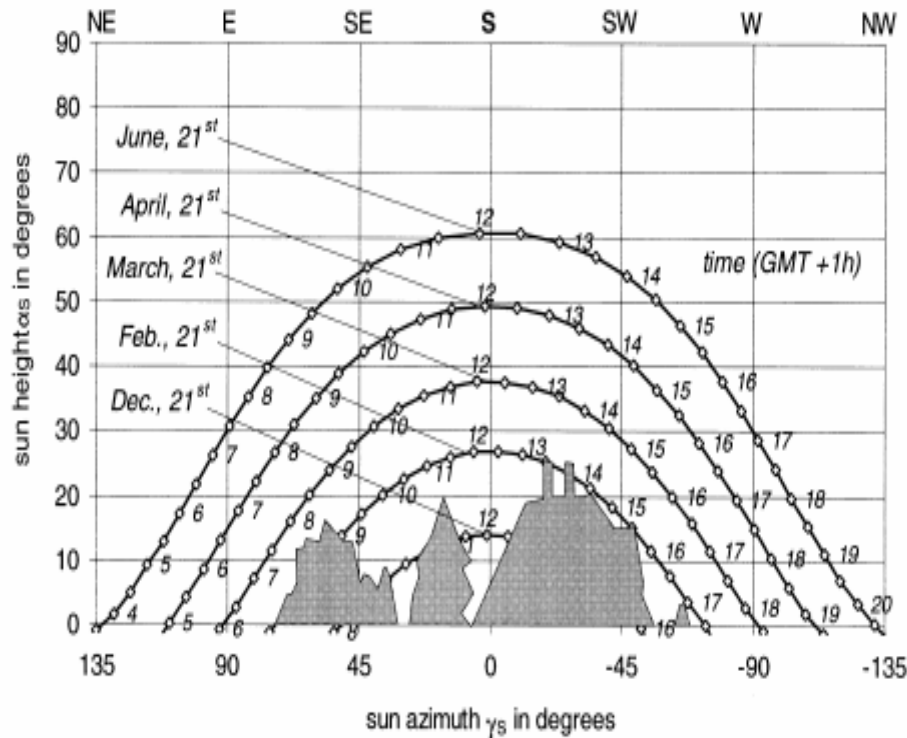
Μια ακριβέστερη περιγραφή των αντικειμένων του περιβάλλοντος μπορεί να γίνει αν χρησιμοποιηθούν καλύτερα οπτικά όργανα, όπως είναι οι CCD κάμερες [4].

Στο σχήμα 33 φαίνονται κάποια αντικείμενα του περιβάλλοντος σε ένα πλέγμα κυλινδρικών συντεταγμένων. Το περίγραμμα των αντικειμένων μπορεί να περιγραφεί με ένα πολύγωνο, το οποίο προκύπτει με τη βοήθεια των συντεταγμένων αυτών. Εάν χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες για την περιγραφή των αντικειμένων, αυτά μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα διάγραμμα της τροχιάς του ήλιου όπως φαίνεται στο σχήμα 34. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται απευθείας πότε υπάρχει κατάσταση σκίασης. Για παράδειγμα

στις 21 Φεβρουαρίου το σημείο παρατηρητή σκιάζεται από την ανατολή του ήλιου έως τις 9:00 π.μ. καθώς επίσης και από τις 1:50 μ.μ. έως τις 2:10 μ.μ. Αυτό δε σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια αυτών των χρονικών διαστημάτων το σημείο του παρατηρητή δε δέχεται καθόλου ακτινοβολία αλλά ότι αυτή μειώνεται δραματικά. Εάν τα αντικείμενα είναι αδιαφανή, τότε το σκιασμένο σημείο παρατηρητή δέχεται μηδενική απευθείας ακτινοβολία και περιορισμένη διαχέουσα ακτινοβολία.



Σχήμα 33. Απεικόνιση αντικειμένων σε πλέγμα κυλινδρικών αντικειμένων

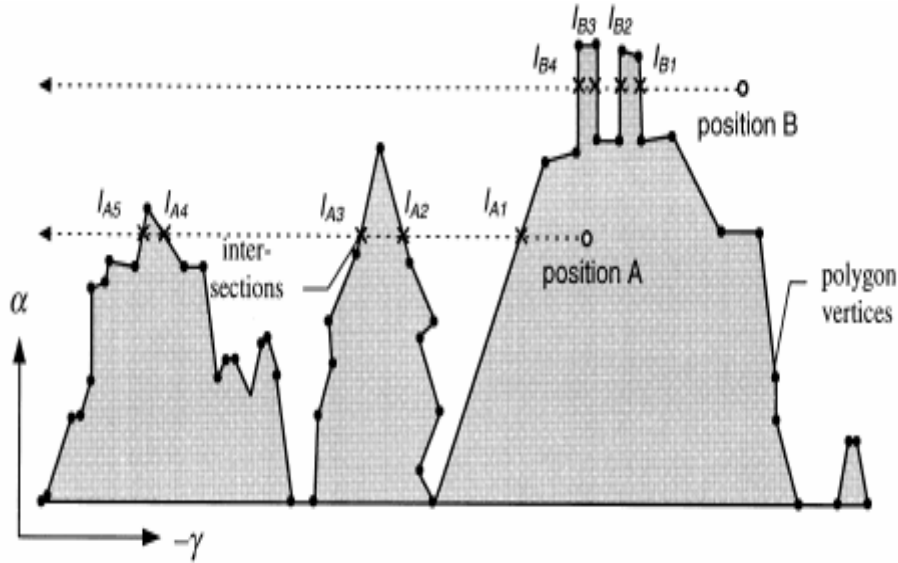


Σχήμα 34. Απεικόνιση των αντικειμένων σε διάγραμμα της τροχιάς του ήλιου

Για τους απαραίτητους υπολογισμούς για την εφαρμογή της μεθόδου που μόλις περιγράφηκε θεωρείται ότι τα αντικείμενα του περιβάλλοντος αναπαριστώνται με τη μορφή πολυγώνων.

3.2.3 Απευθείας ακτινοβολία

Με τη χρήση των πολυγώνων για την περιγραφή των αντικειμένων, είναι πλέον ευκολότερος ο υπολογισμός της απευθείας ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια που περιβάλλεται από διάφορα αντικείμενα. Θα πρέπει πολύ απλά να ελεγχθεί εάν η θέση του ήλιου είναι μέσα στο πολύγωνο του αντικειμένου. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση κάποιων δοκιμών όπου υπολογίζονται ο αριθμός των τομών μεταξύ ενός πολυγώνου και μιας ακτίνας του ήλιου για μια τυχαία θέση του. Εάν ο αριθμός των τομών I που φαίνονται στο σχήμα 35 είναι άρτιος τότε η θέση του ήλιου είναι μέσα στο πολύγωνο, αλλιώς είναι έξω από αυτό. Στο σχήμα 35 φαίνεται επίσης ο τρόπος που γίνονται αυτές οι δοκιμές για δυο διαφορετικές θέσεις του ήλιου.



Σχήμα 35. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να εξακριβωθεί η θέση του πολυγώνου σε σχέση με τη θέση του ήλιου

Εάν η θέση του ήλιου είναι μέσα στο πολύγωνο και υποτεθεί ότι δεν υπάρχει μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των αντικειμένων, τότε η απευθείας ακτινοβολία μειώνεται στο μηδέν. Εάν η θέση του ήλιου είναι έξω από το πολύγωνο, τότε η απευθείας ακτινοβολία είναι ίση με την απευθείας ακτινοβολία στη μη σκιασμένη επιφάνεια. Ωστόσο, η σκέψη αυτή δεν ισχύει για όλων των ειδών τα αντικείμενα. Για παράδειγμα τα φυτά και τα δέντρα θα πρέπει να αντιμετωπιστούν σαν ημιδιαφανή αντικείμενα με *βαθμό μετάδοσης* τ μεταξύ 0.23 και 0.64, το οποίο διαφέρει ανάλογα με την εποχή [4]. Στην περίπτωση αυτή η ακτινοβολία που προσπίπτει στη μελετούμενη επιφάνεια οφείλεται μόνο στο ποσοστό της ακτινοβολίας που μεταδίδεται μέσω του ημιδιαφανούς αντικειμένου.

Για τους επιπλέον υπολογισμούς θα πρέπει να οριστεί ένας επιπλέον όρος που ονομάζεται *παράγοντας απευθείας σκίασης* S_b και δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$S_b = \begin{cases} 0 & \text{εάν } (\gamma_s, \alpha_s) \text{ είναι} \\ & \text{εκτός του πολυγώνου} \\ 1 & \text{εάν } (\gamma_s, \alpha_s) \text{ είναι} \\ & \text{εντός ενός αδιαφανούς αντικειμένου} \\ 1 - \tau & \text{εάν } (\gamma_s, \alpha_s) \text{ είναι} \\ & \text{εντός ενός διαφανούς αντικειμένου} \end{cases} \quad (32)$$

3.2.4 Διάχυτη ακτινοβολία

Ο υπολογισμός της διάχυτης ακτινοβολίας σε μια σκιασμένη επιφάνεια είναι δυσκολότερος από αυτόν της απευθείας. Η διάχυτη ακτινοβολία δεν περιορίζεται μόνο κατά τη διάρκεια που η θέση του ήλιου είναι μέσα σε ένα πολύγωνο αλλά και καθόλη τη διάρκεια της παρατήρησης. Το πολύγωνο μπορεί να θεωρηθεί σαν η προβολή των αντικειμένων σε ένα ημισφαίριο. Η διάχυτη ακτινοβολία μειώνεται από το κομμάτι εκείνο, το οποίο τέμνει εγκάρσια το κομμάτι του ημισφαιρίου που καλύπτεται από το πολύγωνο.

Έστω ότι υπάρχει ισοτροπική κατανομή της ολικής ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$L_{\text{iso}} = \text{σταθερό για όλα τα } \gamma \text{ και } \alpha$$

για τους επόμενους υπολογισμούς. Η διάχυτη ακτινοβολία $G_{\text{red,d}}$ που τέμνει εγκάρσια το πολύγωνο ο του σχήματος 36 και το οποίο ορίζεται από τα σημεία $\alpha_1, \alpha_2, \gamma_1$ και γ_2 , δίνεται από το διπλό ολοκλήρωμα του πολυγώνου ως εξής:

$$G_{\text{red,d}} = \iint_0 L(\gamma, \alpha) \cos \theta \cos \alpha d\alpha d\gamma \quad (33)$$

Σε μια οριζόντια επιφάνεια η γωνία πρόσπτωσης θ_h είναι ίση με $\pi/2 - \alpha$. Εάν χρησιμοποιηθεί το ισοτροπικό μοντέλο ακτινοβολίας τότε προκύπτει:

$$G_{\text{red,d}} = L_{\text{iso}} \iint_0 \sin \alpha \cos \alpha d\alpha d\gamma \quad (34)$$

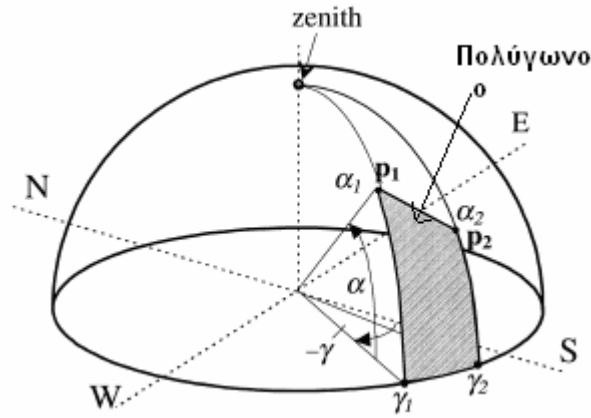
Η διάχυτη ακτινοβολία μέσα από ένα πολύγωνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 36, με δυο διανύσματα εδάφους $(\gamma_1, 0)$ και $(\gamma_2, 0)$ και δυο διανύσματα p_1 και p_2 πάνω

στο ημισφαίριο, τα οποία συνδέονται με μια γραμμή $\alpha(\gamma) = m\gamma + n$ με $m = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_2 - \gamma_1}$

και $n = \frac{\alpha_1\gamma_2 - \alpha_2\gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1}$ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$G_{\text{red,d}_2}(p_1, p_2) = L_{\text{iso}} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_0^{m\gamma+n} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha d\gamma$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2} L_{\text{iso}} (\gamma_2 - \gamma_1) \sin^2 \alpha_1 & \text{για } m=0 \\ \frac{1}{2} L_{\text{iso}} (\gamma_2 - \gamma_1) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \frac{\sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) & \text{για } m \neq 0 \end{cases} \quad (35)$$



Σχήμα 36. Η διάχυτη ακτινοβολία μέσα από ένα πολύγωνο

Η ακτινοβολία $G_{red,d}$ διαμέσου ενός αντικειμένου με n διανύσματα p_i , τα οποία ορίζουν το περίγραμμα του πολυγώνου, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$G_{red,d} = \left| \sum_{i=1}^{n-1} G_{red,d_2}(p_i, p_{i+1}) \right| \quad (36)$$

Για τους επιπλέον υπολογισμούς θα οριστεί ο *παράγοντας διάχυτης σκίασης*, $S_{d,h}$, των οριζοντίων επιφανειών, ο οποίος ορίζεται με τη βοήθεια του *βαθμού μετάδοσης* τ ενός πολυγώνου, ως εξής:

$$S_{d,h} = \frac{G_{red,d}}{G_{d,h}}(1 - \tau) = \frac{G_{red,d}}{\pi L_{iso}}(1 - \tau) \quad (37)$$

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας μέσω ενός αντικειμένου πολυγώνου πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια με γωνία κλίσης β και αζιμούθιο επιφάνειας γ_A , θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η γωνία πρόσπτωσης θ_i όπως γίνεται στην εξίσωση (39). Εάν αντικατασταθεί το γ_s με γ και το α_s με α τότε η εξίσωση (35) θα γίνει:

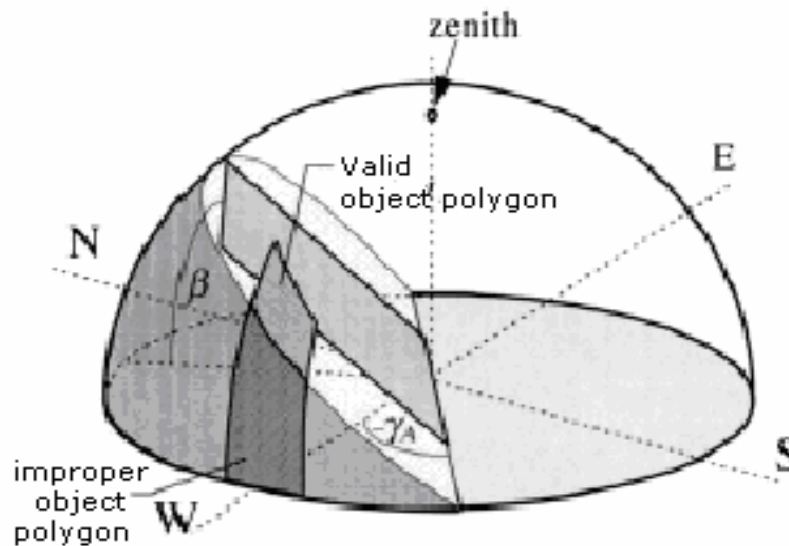
$$G_{red,d_2}(p_1, p_2) = L_{iso} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_0^{(m\gamma+n)} [\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma + \gamma_A)] \cos \alpha d\alpha d\gamma \quad (38)$$

Υπάρχει μια μιγαδική αναλυτική λύση για το ολοκλήρωμα αυτό [4]. Η ακτινοβολία $G_{red,d}$ διαμέσου ενός αντικειμένου με n διανύσματα μπορεί να υπολογιστεί

χρησιμοποιώντας την εξίσωση (36). Ο παράγοντας διάχυτης σκίασης $S_{d,t}$ σε μια κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται από την εξίσωση:

$$S_{d,t} = \frac{G_{red,d}}{L_{iso} \frac{1}{2} \pi (1 + \cos \beta)} (1 - \tau) \quad (39)$$

Στον υπολογισμό αυτό θα πρέπει να είναι σίγουρο ότι το πολύγωνο αντικείμενου περιέχει αντικείμενα τα οποία είναι ορατά μόνο από την κεκλιμένη επιφάνεια. Αντικείμενα πίσω από την κεκλιμένη επιφάνεια όπως φαίνεται και στο σχήμα 37 δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς.



Σχήμα 37. Απεικόνιση αντικειμένων που βρίσκονται πίσω από τη μελετούμενη επιφάνεια

Οι ίδιοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν για μια ανισοτροπική κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να αντικατασταθεί η ισοτροπική ακτινοβολία L_{iso} από μια ανισοτροπική συνάρτηση της ακτινοβολίας $L(\gamma, \alpha)$. Οι συναρτήσεις για τον υπολογισμό της ανισοτροπικής κατανομής της ακτινοβολίας αναφέρονται στο [4]. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να αυξήσουν την ακρίβεια των υπολογισμών, αλλά μπορούν επίσης να γίνουν πολυπλοκότερες και πιο χρονοβόρες λόγω των αριθμητικών λύσεων που απαιτούνται για τα διπλά ολοκληρώματα. Η χρήση του ισοτροπικού μοντέλου της διάχυτης ακτινοβολίας για

τον υπολογισμό της μείωσης που προκαλείται λόγω σκίασης είναι επαρκής για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, επειδή οι διαφορές μεταξύ του ισοτροπικού και του ανισοτροπικού μοντέλου μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες εάν υπάρχει μείωση της απευθείας ακτινοβολίας λόγω σκίασης.

3.2.5 Ανασκόπηση της μεθόδου και τεκμηρίωση της με ένα παράδειγμα

Με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία τόσο σε μια οριζόντια επιφάνεια όσο και σε μια κεκλιμένη λαμβάνοντας υπόψιν τη μείωση της ακτινοβολίας λόγω σκίασης από τα περιβάλλοντα αντικείμενα. Για την απευθείας και τη διαχέουσα ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια χρησιμοποιούνται οι παράγοντες σκίασης που ορίστηκαν στις εξισώσεις (32) και (37):

$$G_{h,red} = (1 - S_b)G_{b,h} + (1 - S_{d,h})G_{d,h} \quad (40)$$

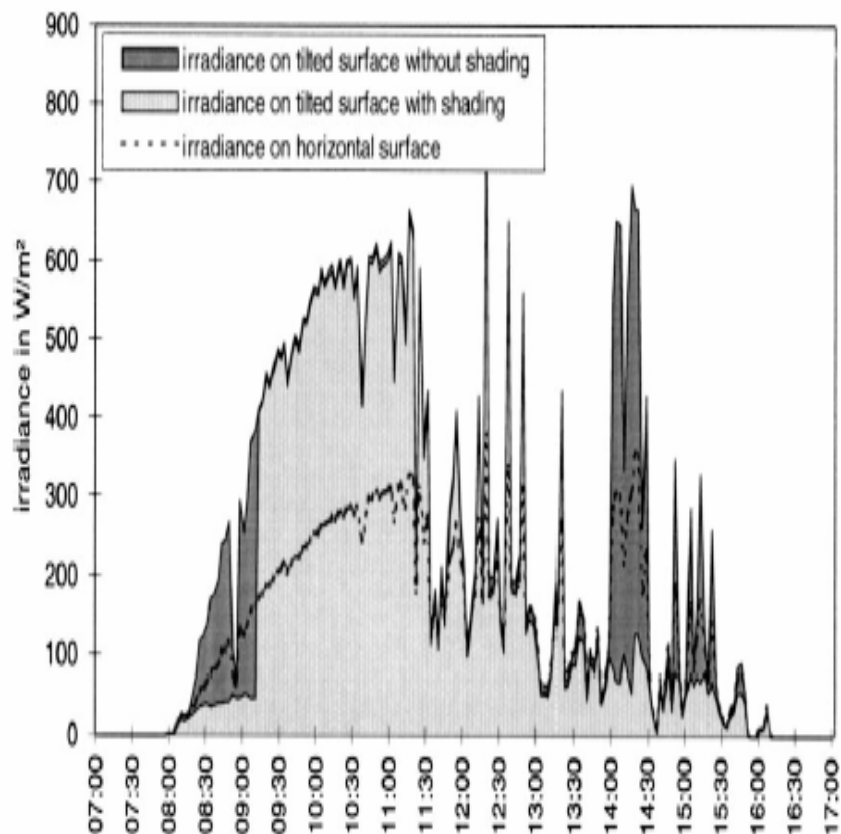
Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια χρησιμοποιείται η εξίσωση (39) αντί της εξίσωσης (37). Μια μείωση της ανάκλασης του εδάφους λόγω των περιβαλλόντων αντικειμένων μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (41), όπου λόγω των αντικειμένων αυτών μεταβάλλεται ο παράγοντας A , ο οποίος χρησιμοποιείται στις εκφράσεις των επιμέρους ακτινοβολιών $G_{d,t}$ και $G_{r,t}$:

$$G_{t,red} = (1 - S_b)G_{b,t} + (1 - S_{d,t})G_{d,t} + G_{r,t} \quad (41)$$

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα SUNDI όπως αναφέρεται στο [4]. Χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι ότι μπορούν να γίνουν ταχύτατοι υπολογισμοί της σκίασης με πολύ εύκολο τρόπο. Συγκεκριμένα μια προσομοίωση με βήματα 30 λεπτών για διάστημα ενός χρόνου απαιτεί λιγότερο από 2 λεπτά για να ολοκληρωθεί εάν χρησιμοποιηθεί ένας απλός προσωπικός υπολογιστής.

Μια χρονική προσομοίωση για το Βερολίνο στις 9 Φεβρουαρίου του 1995 δίνεται στο σχήμα 38. Η ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο μετρήθηκε με ένα πυρανόμετρο. Η ακτινοβολία στη μη σκιασμένη κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta = 45^\circ$), καθώς και στην κεκλιμένη επιφάνεια που είναι σκιασμένη από τα περιβάλλοντα αντικείμενα όπως φαίνεται στο σχήμα 33 υπολογίστηκε με βάση τις προτεινόμενες

εξισώσεις. Εάν δεν ληφθούν υπόψιν οι παράγοντες που προκαλούν τη σκίαση αλλά στους υπολογισμούς συμπεριληφθεί μόνο η απευθείας ακτινοβολία, τότε η υπολογισμένη ακτινοβολία είναι 21.3% υψηλότερη για τη συγκεκριμένη ημέρα. Η μείωση της ολικής ακτινοβολίας που προκαλείται από τα αντικείμενα στο σχήμα 33 κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι 9.2%. Αυτό το παράδειγμα δείχνει πόσο σημαντικό είναι να συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς που γίνονται ο παράγοντας της σκίασης όταν προσομοιώνονται ηλιακά συστήματα γιατί διαφορετικά το θεωρητικά υπολογισμένο ενεργειακό κέρδος θα είναι υψηλότερο από το πραγματικό.



Σχήμα 38. Προσομοίωση για το Βερολίνο στις 9 Φεβρουαρίου του 1995

4. Λειτουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων

4.1 Αρχή λειτουργίας

Η μετατροπή της ενέργειας που μεταφέρεται από την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα φαινόμενο γνωστό σαν *φωτοβολταϊκό φαινόμενο*. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η σημαντικότερη κατασκευή που μπορεί να κάνει αυτή τη μετατροπή ενέργειας και χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του σχεδόν μηδενικού κόστους λειτουργίας που έχουν.

Η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ότι όταν προσπίπτει φως σε συγκεκριμένα υλικά, όπως είναι οι ημιαγωγοί, από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα στοιχεία, τότε η ενέργεια που μεταφέρουν τα φωτόνια μεταδίδεται στα ηλεκτρόνια των ημιαγωγών και προκαλείται η δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας αποτελούνται από κάποιον αριθμό στοιχείων που συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα. Ο αριθμός των στοιχείων που περιέχει κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο καθορίζει και την ισχύ που αυτό μπορεί να παράγει. Επιπλέον ο αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων στοιχείων καθορίζουν το ρεύμα που μπορεί να παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ενώ ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων στοιχείων καθορίζει την τάση στην οποία παράγεται το μέγιστο ρεύμα.

Η εξίσωση που συνδέει το ρεύμα με την τάση εξόδου ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η εξής:

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t} \right) \right] \quad (42)$$

όπου:

I το ρεύμα που παράγεται απο το στοιχείο,

V η τάση εξόδου του στοιχείου,

I_{sc} το ρεύμα βραχυκύκλωσης,

V_{oc} η τάση ανοιχτοκύκλωσης,

R_s η αντίσταση σε σειρά του στοιχείου και

$$V_t = mkT/e \text{ με}$$

m μια σταθερά για φωτοβολταϊκά στοιχεία η οποία θεωρείται ίση με 1,

k η σταθερά Boltzmann,

T η θερμοκρασία του στοιχείου σε $^{\circ}\text{K}$ και

e το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Σε πρακτικές εφαρμογές η τάση V_t θεωρείται ίση με 25 mV στους 300 $^{\circ}\text{K}$. Μια αναλυτικότερη μελέτη για την εξαγωγή των εξισώσεων αυτών μπορεί να βρεθεί στο [9].

4.2 Αριθμητική προσομοίωση των χαρακτηριστικών ρεύματος και τάσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων που περιέχουν σκιασμένα στοιχεία

Έχοντας ήδη μελετήσει την επίδραση της σκίασης πάνω στην απόδοση των ηλιακών συστημάτων και το πως μπορεί να υπολογιστεί η μειωμένη, λόγω σκίασης, ακτινοβολία στη συνέχεια αναφέρεται μια μελέτη των εξισώσεων που περιγράφουν το ρεύμα και την τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης χρειάζεται συνήθως για τον υπολογισμό του σημείου μέγιστης ισχύος. Είναι πολύ βολικό να χρησιμοποιηθούν μοντέλα για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ τάσης και ρεύματος, τα οποία είναι ικανά να περιγράψουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο, τόσο στην κανονική λειτουργία, όσο και σε κατάσταση αποκοπής σε θετικές και αρνητικές τάσεις. Επειδή το αποτέλεσμα δεν μπορεί να δοθεί σε αναλυτική μορφή, απαιτείται ένα σύνολο από αριθμητικούς αλγορίθμους για τον υπολογισμό των ρευμάτων σε μια δεδομένη τάση ή το αντίστροφο. Επιπλέον για πολυπλοκότερα ηλιακά συστήματα δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι τα στοιχεία έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ούτε ότι δέχονται την ίδια ακτινοβολία. Επομένως απαιτούνται μέθοδοι όπως αυτή που περιγράφεται στις επόμενες σελίδες, η οποία είναι ικανή να υπολογίσει το ρεύμα και την τάση μέσα από ένα σύνολο αλγορίθμων.

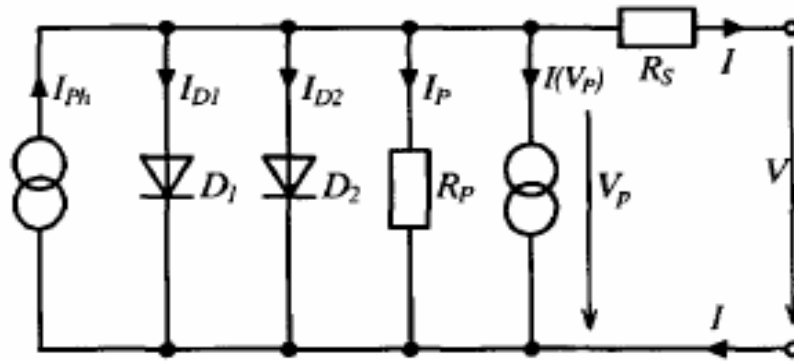
Για την περιγραφή της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιείται ευρέως το μοντέλο των δυο διόδων που αναφέρεται στο [5].

Για στοιχεία, τα οποία οδηγούνται στην αρνητική περιοχή απαιτείται ένα άλλο μοντέλο, το οποίο περιγράφει την περιοχή αποκοπής για υψηλές αρνητικές τάσεις. Αρνητικές τάσεις σε στοιχεία μπορούν να προκύψουν σε ανομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, ειδικά σε περιπτώσεις μερικής σκίασης του συστήματος. Ένα ακριβές μοντέλο που βασίζεται στο μοντέλο μιας διόδου και μπορεί να προσαρμοστεί σε εκείνο των δυο διόδων προσφέρει μια ικανοποιητική περιγραφή των χαρακτηριστικών του στοιχείου.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχουν αναπτυχθεί πολλά προγράμματα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρότερων υπολογιστών τα προγράμματα αυτά έγιναν πολυπλοκότερα αλλά ταυτόχρονα και πιο αποδοτικά. Τα προγράμματα αυτά ωστόσο, έχουν περιορισμένες δυνατότητες στο να προσομοιώσουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των στοιχείων όταν αυτά λειτουργούν κάτω από ειδικές συνθήκες, όπως είναι η μερική σκίαση. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί ένα γενικότερο ηλεκτρικό μοντέλο, το οποίο επιτρέπει προσομοίωση λειτουργίας κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Το μοντέλο δυο διόδων χρησιμοποιείται ευρέως σαν ισοδύναμο κύκλωμα. Τα σκιασμένα στοιχεία ενός ηλιακού συστήματος μπορούν να οδηγηθούν σε περιοχές αρνητικής τάσης και εάν δεν υπάρχουν δίοδοι παράκαμψης (bypass diodes) για την προστασία του στοιχείου τότε μπορεί να προκληθεί βλάβη κατά τη διάρκεια λειτουργίας στην περιοχή αρνητικών τάσεων. Επειδή αυτή η περίπτωση δεν προβλέπεται από το μοντέλο των δυο διόδων έχει αναπτυχθεί το μοντέλο που περιγράφεται στη συνέχεια.

Το μοντέλο αυτό περιέχει έναν επιπλέον όρο που περιγράφει την κατάσταση αποκοπής της διόδου σε περιοχές αρνητικής τάσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτού του μοντέλου φαίνεται στο σχήμα 39.



Σχήμα 39. Το ισοδύναμο μοντέλο δυο διόδων

Από τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff προκύπτει η εξής σχέση μεταξύ της τάσης και του ρεύματος του κελιού:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{m_1 V_T} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{m_2 V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} - \underbrace{I - \alpha(V + IR_s) \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{Br}} \right)^{-n}}_{\text{Επιπλέον όρος για την περιγραφή της αποκοπής της διόδου}} \quad (43)$$

όπου:

I_{ph} το φωτορεύμα,

I_{s1} το ρεύμα κορεσμού πρώτης διόδου,

I_{s2} το ρεύμα κορεσμού δεύτερης διόδου,

R_s η αντίσταση σε σειρά του στοιχείου,

R_p η παράλληλη αντίσταση του στοιχείου,

m_1, m_2 οι βαθμοί ιδανικότητας διόδων,

α ο βαθμός διόρθωσης ($\alpha < 1 \Omega^{-1}$) και

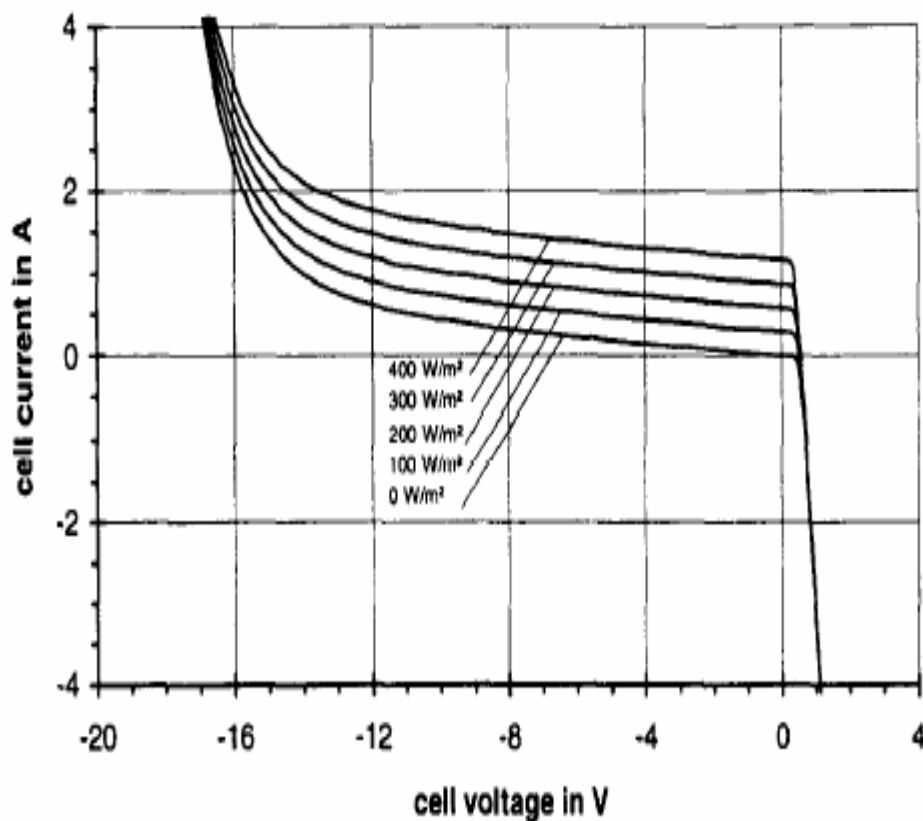
V_{Br} η τάση αποκοπής.

Η εξίσωση (43) διαφέρει από την αντίστοιχη του μοντέλου των δυο διόδων στον επιπλέον όρο που φαίνεται παραπάνω. Αυτή η προσθήκη μπορεί να επιτρέψει

ρεύματα στο στοιχείο μεγαλύτερα από το όριο του φωτορεύματος. Τέτοια ρεύματα παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου χιονοστιβάδας σε υψηλές αρνητικές τάσεις.

Το φωτορεύμα, και το ρεύμα κορεσμού της διόδου εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και επομένως οι παράμετροι αυτές θα πρέπει να αλλαχθούν αν η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Επιπλέον το φωτορεύμα είναι ανάλογο της ακτινοβολίας.

Με το μοντέλο αυτό η ηλεκτρική συμπεριφορά του στοιχείου μπορεί να περιγραφεί σε όλο το εύρος τάσεων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 40 για ένα πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.



Σχήμα 40. Ηλεκτρική συμπεριφορά του στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες

Για να μπορεί να μοντελοποιηθεί η καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός στοιχείου, θα πρέπει οι τιμές του ρεύματος I και της τάσης V να υπολογιστούν ξεχωριστά για κάθε τιμή. Επειδή η εξίσωση που περιγράφει το ηλιακό στοιχείο δεν δίνεται σε

αναλυτική μορφή, έχουν αναπτυχθεί διάφορες αριθμητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης του στοιχείου.

Μια εξίσωση που συνδέει την τάση με το ρεύμα του στοιχείου δίνεται από την εξίσωση (43). Για μια δεδομένη τιμή της τάσης V , η τιμή του ρεύματος I υπολογίζεται σαν η λύση της εξίσωσης (43), η οποία αναμένεται να είναι και η μοναδική. Για τον υπολογισμό της μοναδικής αυτής λύσης προτείνεται η μέθοδος των Newton-Raphson όπως περιγράφεται στο [5], αφού προσφέρει εμφανή πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων. Οι βασικές ιδέες αυτής της μεθόδου είναι αυτές που περιγράφονται αμέσως παρακάτω. Ξεκινώντας με μια αρχική τιμή I_0 εκτελείται η εξής επαναληπτική εξίσωση:

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(V, I_i)}{\frac{\partial f(V, I_i)}{\partial I}} \quad (44)$$

Η επανάληψη σταματά εάν ικανοποιηθεί μια αναγκαία συνθήκη. Στην παραπάνω περίπτωση σαν αναγκαία συνθήκη χρησιμοποιείται η απόλυτη διαφορά μεταξύ δυο διαδοχικών τιμών. Θα πρέπει να ισχύει δηλαδή $|I_{i+1} - I_i| < \varepsilon$ όπου ε το όριο που θεωρείται ικανοποιητικό για τους υπολογισμούς. Η παράγωγος της εξίσωσης για το κελί δίνεται ως εξής:

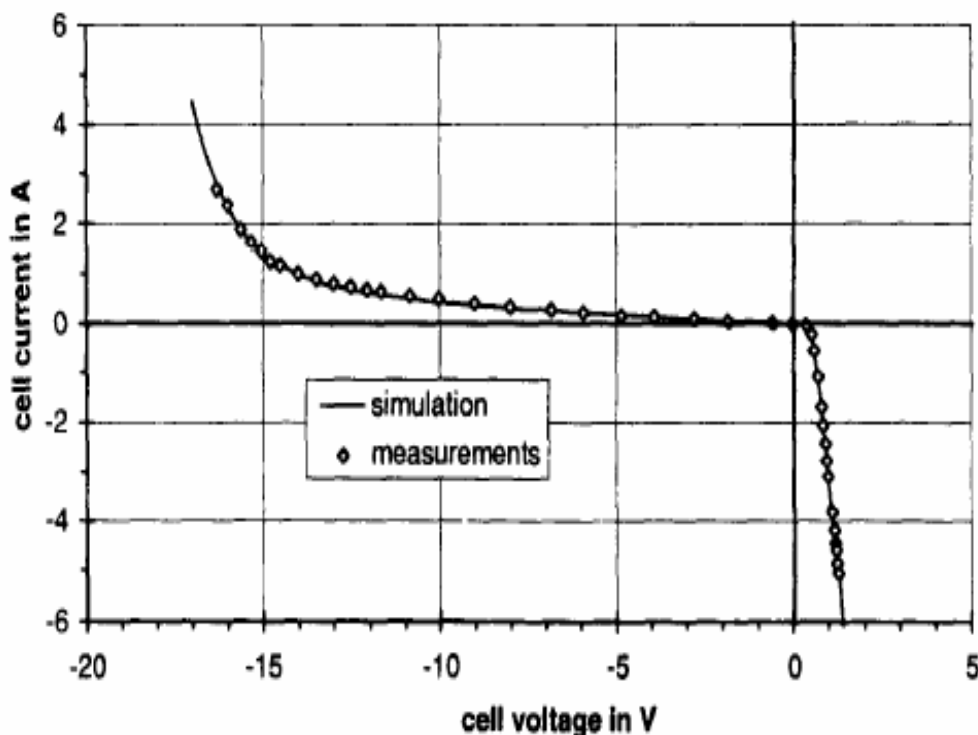
$$\begin{aligned} \frac{\partial f(V, I_i)}{\partial I} = & -\frac{I_{s1}R_s}{m_1V_t} \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_1V_t}\right) - \frac{I_{s2}R_s}{m_2V_t} \\ & \times \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_2V_t}\right) - \frac{R_s}{R_p} - 1 \\ & - \alpha R_s \left(1 - \frac{n(V + IR_s)}{V + IR_s - V_{Br}}\right) \\ & \times \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{Br}}\right)^{-n} \end{aligned} \quad (45)$$

Ο αλγόριθμος Newton-Raphson μπορεί να υλοποιηθεί πολύ εύκολα σε ένα πρόγραμμα υπολογιστή. Ο αλγόριθμος έχει το πλεονέκτημα μιας πολύ γρήγορης δευτεροβάθμιας σύγκλισης των αρχικών τιμών πολύ κοντά στη ρίζα, έτσι ώστε μια καλή λύση να μπορεί να υπολογιστεί με λίγες μόνο επαναλήψεις. Οι δυσκολίες

προκύπτουν στην περιοχή κοντά στην αποκοπή της διόδου, όπου ο αλγόριθμος συγκλίνει πολύ αργά, ενώ υπάρχει η περίπτωση της απόκλισης όταν δεν γίνει καλή επιλογή των αρχικών τιμών.

Στην περίπτωση αυτή για να επιταχυνθεί η σύγκλιση, χρησιμοποιείται η μέθοδος της διχοτόμησης για τον υπολογισμό των αρχικών τιμών. Τότε μια πιο ακριβής λύση μπορεί να υπολογιστεί από τον αλγόριθμο. Η μέθοδος της διχοτόμησης βασίζεται στο γεγονός ότι το διάστημα που ελέγχεται διχοτομείται συνεχώς. Συγκεκριμένα το αρχικό διάστημα χωρίζεται στα δυο και ελέγχεται το ένα από τα δυο διαστήματα για την ύπαρξη της ρίζας. Εάν η ρίζα βρεθεί σε ένα από τα δυο διαστήματα τότε αυτό διχοτομείται για άλλη μια φορά ενώ το άλλο απορρίπτεται. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

Στο σχήμα 41 φαίνεται μια τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για ένα στοιχείο που δεν δέχεται ακτινοβολία. Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε παραπάνω συμπίπτει με τα σημεία που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις, αποδεικνύοντας έτσι την ακρίβεια της μεθόδου.



Σχήμα 41. Τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για μηδενική ακτινοβολία

Παραπάνω αναφέρθηκε ο τρόπος υπολογισμού των χαρακτηριστικών ενός στοιχείου. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε πιθανή διασύνδεση μεταξύ στοιχείων, διόδων, καλωδίων καθώς και άλλων εξαρτημάτων που περιέχονται σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

Παρακάτω περιγράφεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό μεγάλων δικτύων. Επιπλέον ορίζεται η χαρακτηριστική του κάθε επιμέρους εξαρτήματος για κάθε σημείο της χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να υπολογιστούν οι απώλειες σε ένα μερικώς ή ολικώς σκιασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Οι νόμοι του Kirchhoff εφαρμόζονται για την ανάπτυξη ενός συστήματος εξισώσεων που συσχετίζει όλα τα ρεύματα και τις τάσεις στο δίκτυο. Ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο δίκτυο αποτελούμενο από κόμβους και βρόγχους είναι δύσκολο να περιγραφεί σε έναν υπολογιστή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα γενικότερο μοντέλο όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 42 για την διασύνδεση των εξαρτημάτων μεταξύ τους.

Τα εξαρτήματα μπορούν να τοποθετηθούν κατακόρυφα ($A_{i,j}$) ή οριζόντια ($B_{i,j}$) σε ένα κανονικό πλέγμα. Όλα μαζί είναι z στοιχεία.

Τα ακόλουθα εξαρτήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν στοιχεία:

- Φωτοβολταϊκό στοιχείο (το ισοδύναμο μοντέλο δυο διόδων το οποίο περιλαμβάνει τον όρο που περιγράφει την αποκοπή της διόδου),
- Δίοδος,
- Αντίσταση,
- Ιδανικός αγωγός (με αντίσταση $R_{\text{cond}} = 10^{-20} \Omega$) και
- Μόνωση (με αντίσταση $R_{\text{insul}} = 10^{20} \Omega$).

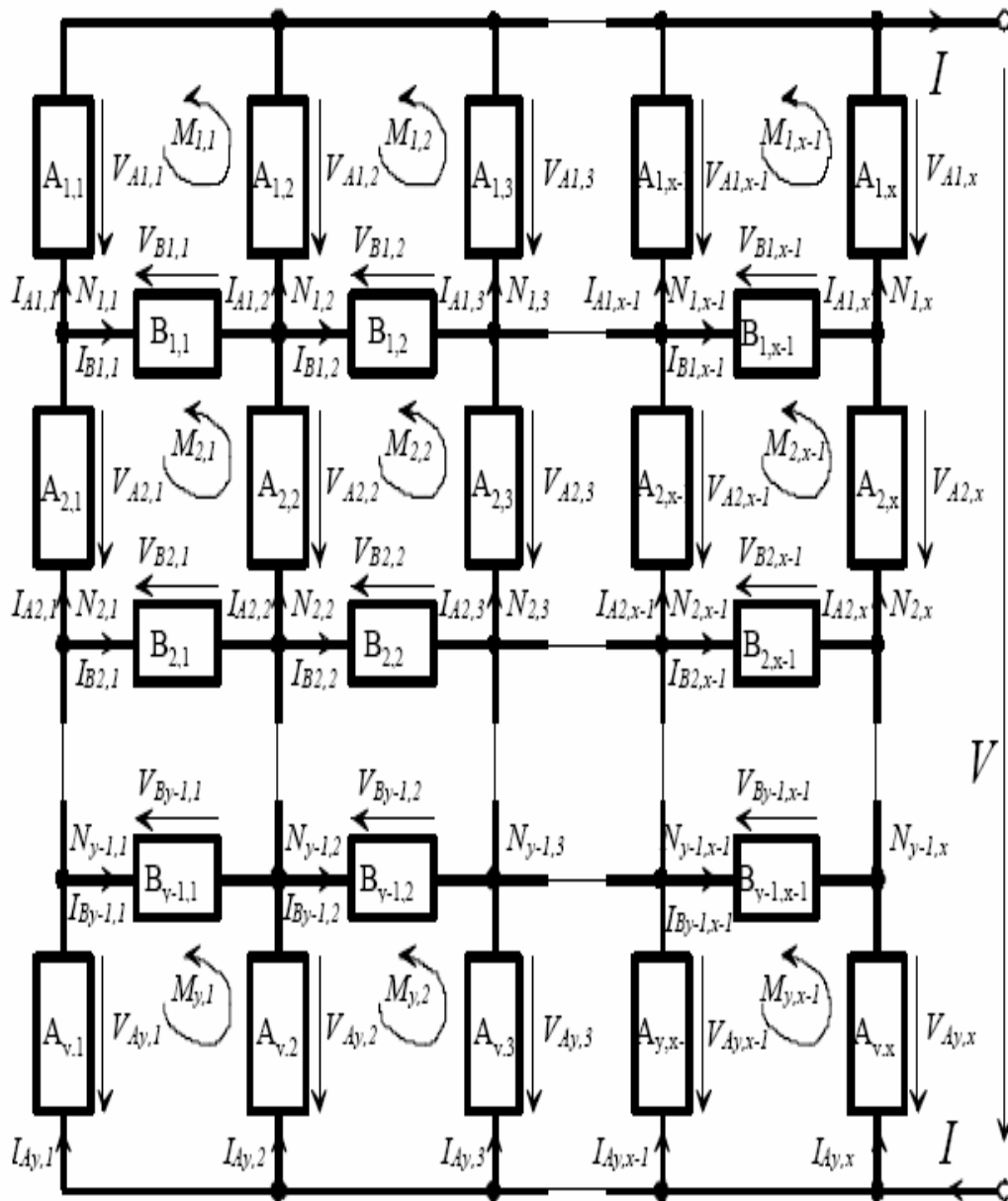
Είναι επίσης πιθανό να χρησιμοποιηθεί μια συστοιχία στοιχείων αντί ενός απλού εξαρτήματος. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να είναι γνωστή η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης καθώς επίσης και η παράγωγος της για το συγκεκριμένο εξάρτημα που χρησιμοποιείται.

Κάθε στοιχείο περιγράφεται από μια μαθηματική εξίσωση που συνδέει το ρεύμα με την τάση και έχει την εξής μορφή:

$$f(V_{A_{i,j}}, I_{A_{i,j}}) = 0 \text{ και } f(V_{B_{i,j}}, I_{B_{i,j}}) = 0$$

Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα για μια δεδομένη τάση θα πρέπει να υπολογιστεί με μια αριθμητική μέθοδο. Για πολλά στοιχεία, όπως οι αντιστάσεις, υπάρχει μια αναλυτική εξίσωση για το ρεύμα της μορφής:

$$I_{A_{i,j}} = g(V_{A_{i,j}}) \text{ και } I_{B_{i,j}} = g(V_{B_{i,j}})$$



Σχήμα 42. Το γενικότερο μοντέλο για την απεικόνιση των τάσεων και των ρευμάτων σε ένα πολύπλοκο δίκτυο

Η ολική τάση V θα πρέπει να είναι γνωστή για τον καθορισμό των επιμέρους χαρακτηριστικών. Το αντίστοιχο ολικό ρεύμα I , όλες οι επιμέρους τάσεις και τα επιμέρους ρεύματα μπορούν να υπολογιστούν για την τάση αυτή. Αυτό σημαίνει ότι η ολική τάση V μπορεί να θεωρηθεί σαν γνωστό μέγεθος και διατηρείται σταθερή για όλους τους υπολογισμούς. Για κάθε επιμέρους τάση το αντίστοιχο ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και επομένως είναι αρκετός ο υπολογισμός μόνο των επιμέρους τάσεων. Έτσι υπάρχουν $z+1$ άγνωστα μεγέθη, που αντιστοιχούν στις z επιμέρους τάσεις καθώς επίσης και στο ολικό ρεύμα I .

Το διάνυσμα u είναι το διάνυσμα των άγνωστων επιμέρους τάσεων και του άγνωστου ολικού ρεύματος:

$$u^T = (V_{A_{1,1}}, \dots, V_{A_{y,x}}, V_{B_{1,1}}, \dots, V_{B_{y-1,x-1}}, I)$$

Η ολική τάση δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$r_t(u) = \sum_{i=1}^y V_{A_{i,1}} - V = 0 \quad (46)$$

Σύμφωνα με το δεύτερο κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα υπάρχουν συνολικά m βρόγχοι $M_{i,j}$. Το άθροισμα των τάσεων σε κάθε βρόγχο είναι ίσο με το μηδέν.

$$r_{2\dots m+1}(u) = V_{A_{i,j}} - V_{B_{i,j}} - V_{A_{i,j+1}} + V_{B_{i-1,j}} = 0 \quad (47)$$

για $i = 1 \dots y, j = 1 \dots x-1$ και $V_{B_{i,j}} = 0$ εάν $i = 0$ ή $i = y$. Για το ολικό ρεύμα I προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$r_{m+2}(u) = \sum_{j=1}^x I_{A_{1,j}} - I = 0 \quad (48)$$

Συνολικά υπάρχουν n κόμβοι στο κύκλωμα. Σύμφωνα με τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff το άθροισμα των ρευμάτων θα ισούται με το μηδέν:

$$r_{m+3\dots m+n+2}(u) = I_{A_{i,j}} - I_{B_{i,j}} - I_{A_{i+1,j}} + I_{B_{i,j-1}} = 0 \quad (49)$$

για $i = 1 \dots y-1, j = 1 \dots x$ με $I_{B_{i,j}} = 0$ εάν $j = 0$ ή $j = x$.

Για τους $z+1$ άγνωστους όρους, που αναπαριστώνται από το διάνυσμα u , υπάρχουν $z+1$ ανεξάρτητες εξισώσεις $r_1(u) \dots r_{m+n+2}(u)$. Οι εξισώσεις αυτές σχηματίζουν το γραμμικό σύστημα εξισώσεων $r(u)$.

$$r(u) = \begin{bmatrix} r_1(u) \\ r_2(u) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{m+1}(u) \\ r_{m+2}(u) \\ r_{m+3}(u) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{m+n+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^y V_{Ai,1} - V \\ V_{A1,1} - V_{B1,1} - V_{A1,2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{Ay,x-1} - V_{Ay,x} + V_{By-1,x-1} \\ \sum_{j=1}^x I_{A1,j} - I \\ I_{A1,1} + I_{B1,1} - I_{A2,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{Ay-1,x} - I_{Ay,x} - I_{By-1,x-1} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Όταν χρησιμοποιείται το διάνυσμα u για μια δεδομένη ολική τάση V , όλα τα αποτελέσματα του παραπάνω συστήματος εξισώσεων θα πρέπει να είναι μηδέν ($r_1(u) = r_2(u) = \dots r_{m+n+2}(u) = 0$). Αναζητείται η ρίζα του συστήματος εξισώσεων, αναπαριστάμενη από το διάνυσμα u και η οποία ικανοποιεί την εξίσωση $r(u) = 0$.

Το παραπάνω σύστημα μπορεί επίσης να λυθεί εάν εφαρμοστούν αριθμητικές μέθοδοι. Η απαίτηση του αλγορίθμου Newton-Raphson για μια μόνο εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί και εδώ, αρκεί να θεωρηθεί η εξής επανάληψη:

$$u_{i+1} = u_i - (J(u_i))^{-1} r(u_i) \quad (51)$$

Ξεκινώντας με ένα αρχικό διάνυσμα u_0 οι επαναλήψεις θα γίνουν μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού $\|u_{i+1} - u_i\| < \varepsilon$, όπου το όριο ε έχει καθοριστεί πριν την έναρξη των επαναλήψεων. Το διάνυσμα u_{i+1} το οποίο ικανοποιεί την συνθήκη τερματισμού είναι επίσης και αυτό που περιέχει τις επιμέρους τάσεις και το ολικό ρεύμα I , τα οποία αποτελούν τη λύση του συστήματος.

Ο πίνακας $J(u_i)$ ονομάζεται Ιακωβιανός πίνακας. Ο αντίστροφος του $(J(u_i))^{-1}$ που θα πρέπει να υπολογίζεται για κάθε επανάληψη, ορίζεται ως εξής:

$$J(u_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(u_i)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial r_1(u_i)}{\partial u_{z+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_{z+1}(u_i)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial r_{z+1}(u_i)}{\partial u_{z+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(u_i)}{\partial V_{A1,1}} & \dots & \frac{\partial r_1(u_i)}{\partial I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_{z+1}(u_i)}{\partial V_{A1,1}} & \dots & \frac{\partial r_{z+1}(u_i)}{\partial I} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων των βρόγχων ισούνται πάντα με ± 1 ή 0 . Οι παράγωγοι των εξισώσεων των κόμβων είναι πιο δύσκολο να οριστούν, ειδικά εάν οι εξισώσεις που συνδέουν το ρεύμα με την τάση δεν δίνονται σε αναλυτική μορφή. Οι παράγωγοι που απαιτούνται για τον Ιακωβιανό πίνακα μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση:

$$\frac{dI(U)}{dU} = - \frac{\frac{\partial f(U,I)}{\partial U}}{\frac{\partial f(U,I)}{\partial I}} \quad (53)$$

Η μέθοδος Newton-Raphson για το σύστημα εξισώσεων έχει πολλές ομοιότητες με αυτήν για τις απλές εξισώσεις. Μπορεί και σε αυτή την περίπτωση να αποκλίνει εάν τα αρχικά διανύσματα δεν είναι σωστά επιλεγμένα. Για να αποφευχθούν τα προβλήματα της απόκλισης ο αλγόριθμος μπορεί να τροποποιηθεί με την παρακάτω εξίσωση:

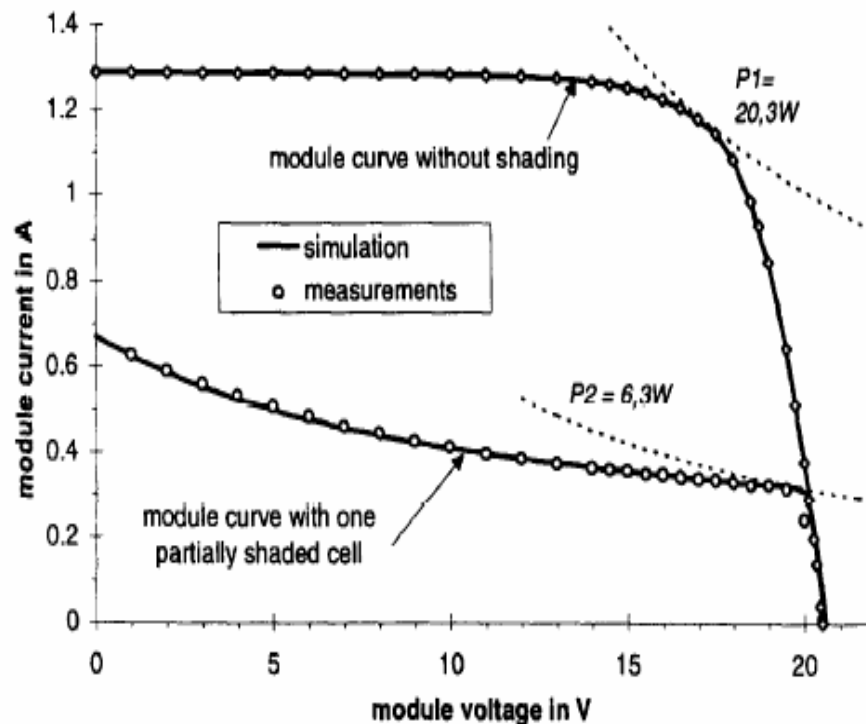
$$u_{i+1} = u_i - \lambda (J(u_i))^{-1} r(u_i) \text{ με } 0 < \lambda \leq 1 \quad (54)$$

Ωστόσο με την αλλαγή αυτή ο αλγόριθμος θα συγκλίνει πολύ πιο αργά από τον κανονικό. Η ολική χαρακτηριστική καμπύλη μπορεί να καθοριστεί θεωρώντας δεδομένη την ολική τάση V και υπολογίζοντας με βάση την τιμή αυτή το ολικό ρεύμα I , ξεχωριστά για κάθε περίπτωση χρησιμοποιώντας την επανάληψη που αναφέρθηκε παραπάνω. Έκτός της χαρακτηριστικής καμπύλης με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί και το εύρος τάσεων για κάθε στοιχείο. Επιπλέον μπορεί να υπολογιστεί η ολική τάση V για μια δεδομένη τιμή του ρεύματος I αρκεί να

αντικατασταθεί το ρεύμα με την τάση στο διάνυσμα u και να αλλαχθούν πολλές από τις μερικές παραγώγους που χρησιμοποιούνται στον Ιακωβιανό πίνακα.

Στο σχήμα 43 φαίνεται μια τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου που αποτελείται από 36 μονοκρυσταλλικά στοιχεία χωρίς διόδους παράκαμψης σε δυο διαφορετικές περιπτώσεις ακτινοβολίας.

Η μια χαρακτηριστική αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας ενώ η δεύτερη αντιστοιχεί στο ίδιο στοιχείο, για την ίδια θερμοκρασία και ακτινοβολία, μόνο που το στοιχείο στην περίπτωση αυτή είναι 75% σκιασμένο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 43 τα πραγματικά σημεία λειτουργίας ταυτίζονται απόλυτα με τα πειραματικά, κάτι που επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα του αλγορίθμου για περιπτώσεις προσομοίωσης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων.



Σχήμα 43. Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης για δυο διαφορετικές περιπτώσεις ακτινοβολίας

4.3 Περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην παρούσα εργασία

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4.2 προσφέρει έναν ικανοποιητικό τρόπο υπολογισμού της τάσης ή του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όταν αυτό σκιάζεται μερικώς. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών που απαιτούνται για να γίνει αυτό, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ένα απλούστερο μοντέλο για την εύρεση των τάσεων και του ρεύματος εξόδου, το οποίο χρησιμοποιεί κάποιες παραδοχές που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (42), η οποία συνδέει το ρεύμα με την τάση εξόδου και θεωρώντας την αντίσταση σε σειρά του στοιχείου ίση με το μηδέν, η εξίσωση αυτή απλοποιείται ως εξής:

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc}}{V_t} \right) \right] \quad (55)$$

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν οι επόμενες εξισώσεις που ισχύουν για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψιν οι επιδράσεις της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη λειτουργία του στοιχείου.

Συγκεκριμένα το ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc}(G)$ ενός στοιχείου εξαρτάται γραμμικά από την ακτινοβολία G ως εξής:

$$I_{sc}(G) = C_1 G \quad (56)$$

$$\text{όπου } C_1 = \frac{I_{sc(1000W/m^2)}}{1000W/m^2}$$

με $I_{sc(1000W/m^2)}$ το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε ακτινοβολία $G = 1000 W/m^2$.

Επιπλέον συμπεριλήφθηκε και η επόμενη εξίσωση για τη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου T_c , η οποία εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και την ακτινοβολία G ως εξής:

$$T_c - T_a = C_2 G \quad (57)$$

$$\text{όπου } C_2 = \frac{NCOT(^{\circ}C) - 20}{800 \text{ W/m}^2}$$

Η σταθερά NCOT είναι χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο και για την παρούσα προσομοίωση θεωρήθηκε ίση με 45 °C.

Τελικά το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου λαμβάνοντας υπόψιν τις προηγούμενες εξισώσεις και με αμελητέα αντίσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου δίνεται από την εξίσωση:

$$I = \frac{I_{SC(1000 \text{ W/m}^2)}}{1000 \text{ W/m}^2} G \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC}}{V_t}\right) \right] \quad (58)$$

Χρησιμοποιώντας την τελευταία εξίσωση γράφτηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα C, το οποίο ήταν ικανό να υπολογίσει το ρεύμα που παράγει η συστοιχία των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιήθηκε, για βήματα τάσης της τάξεως των 0.01 V.

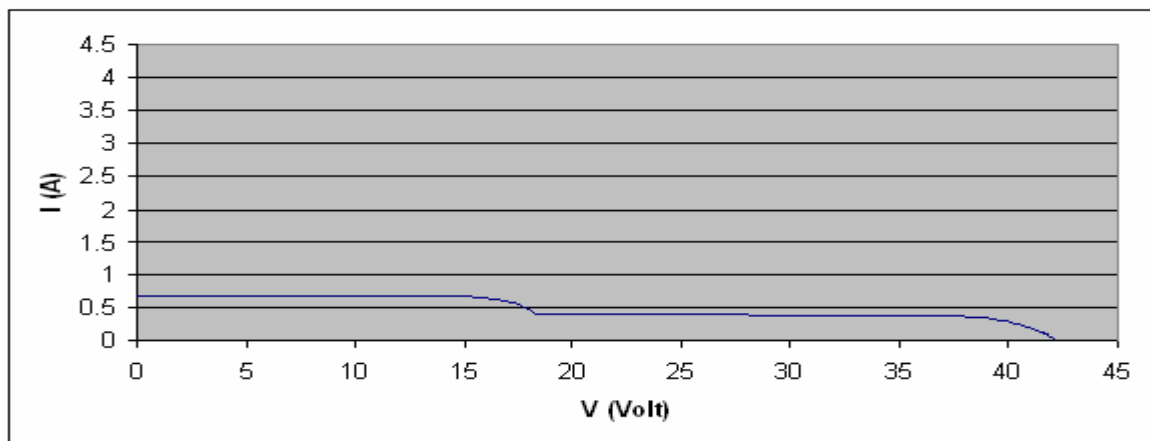
Για τους απαραίτητους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων της συστοιχίας, τα οποία αναφέρονται στο κεφάλαιο 6 όπου περιγράφεται η μέθοδος που υλοποιήθηκε. Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια που αποτελούσαν τη συστοιχία συνδέονται σε σειρά και παράλληλα με το κάθε ένα συνδέεται μια δίοδος παράκαμψης, η οποία συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο που αναπτύχθηκε. Η είσοδος που δίνεται στο πρόγραμμα είναι μόνο η ακτινοβολία που δέχεται το καθένα στοιχείο και όλοι οι υπόλοιποι υπολογισμοί γίνονται αυτόματα. Τελικά αποθηκεύονται σε αρχεία EXCEL οι τιμές τάσης καθώς και οι αντίστοιχες τιμές ρεύματος. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου της συστοιχίας, οι τιμές της οποίας επίσης αποθηκεύονται

Το τελικό βήμα της προσομοίωσης είναι να σχεδιαστούν οι θεωρητικές χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης για διάφορες τιμές ακτινοβολίας, οι οποίες φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.

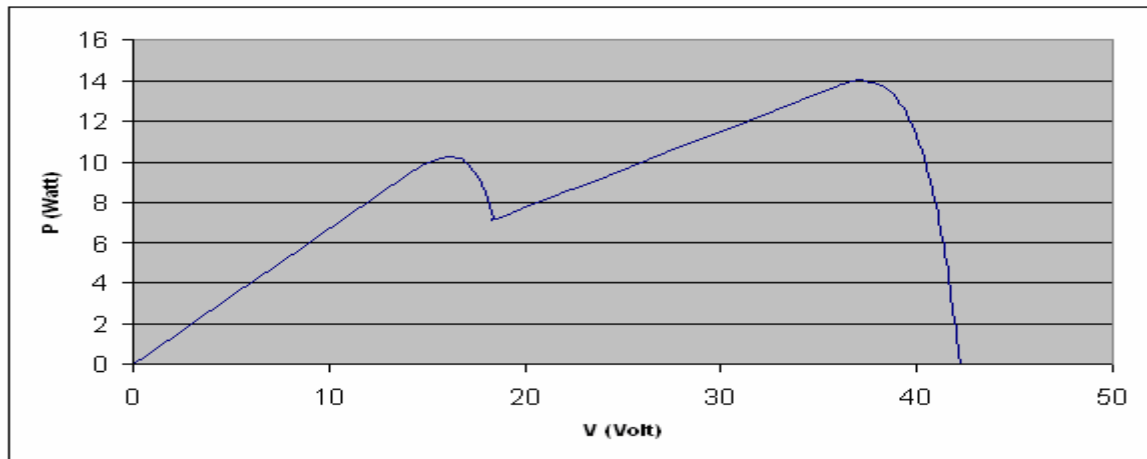
Με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, προσομοιώθηκε η συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε διάφορες περιπτώσεις ακτινοβολίας. Επιπλέον δείχθηκε ότι δυο ανόμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και τα οποία δέχονται ίδια ακτινοβολία συμπεριφέρονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που

θα συμπεριφέρονταν δύο όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια εάν αυτά σκιάζονταν μερικώς. Δηλαδή αποδείχθηκε ότι με δυο ανόμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να γίνει προσομοίωση σκίασης.

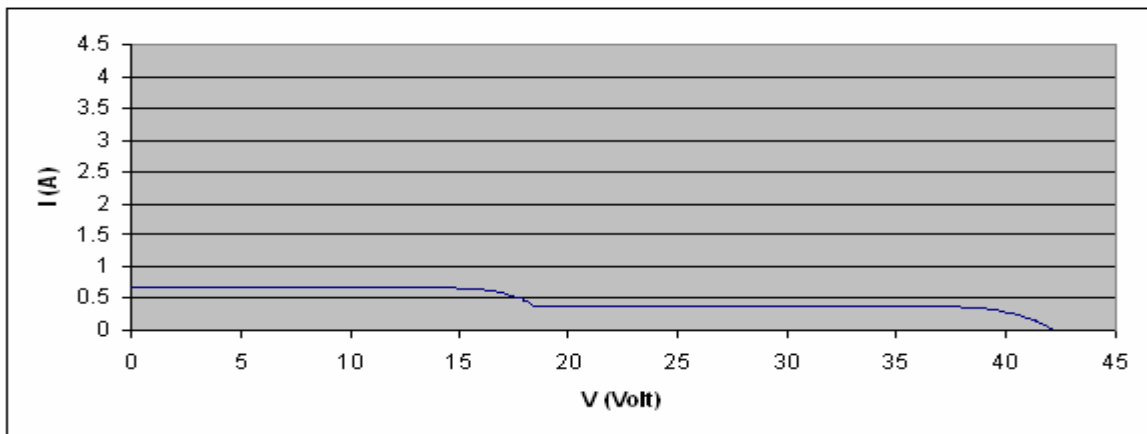
Στα σχήματα 44 και 45 φαίνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης για μια συστοιχία που αποτελείται από δυο όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, τύπου PHAESUN USP10 και ισχύος 10 W το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά στα οποία προσπίπτει διαφορετική ακτινοβολία, όπου φαίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις των χαρακτηριστικών. Στα σχήματα 46 και 47 φαίνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης για μια συστοιχία που αποτελείται από δυο ανόμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, τύπου SIEMENS ST5 και ισχύος 5 W το πρώτο και ένα τύπου PHAESUN USP10 και ισχύος 10 W το δεύτερο, συνδεδεμένα σε σειρά στα οποία προσπίπτει ίδια ακτινοβολία. Όπως φαίνεται και από τα σχήματα 45 και 47 οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-τάσης είναι ίδιες που σημαίνει πως πράγματι ισχύει ότι με χρήση δυο ανόμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να γίνει προσομοίωση σκίασης.



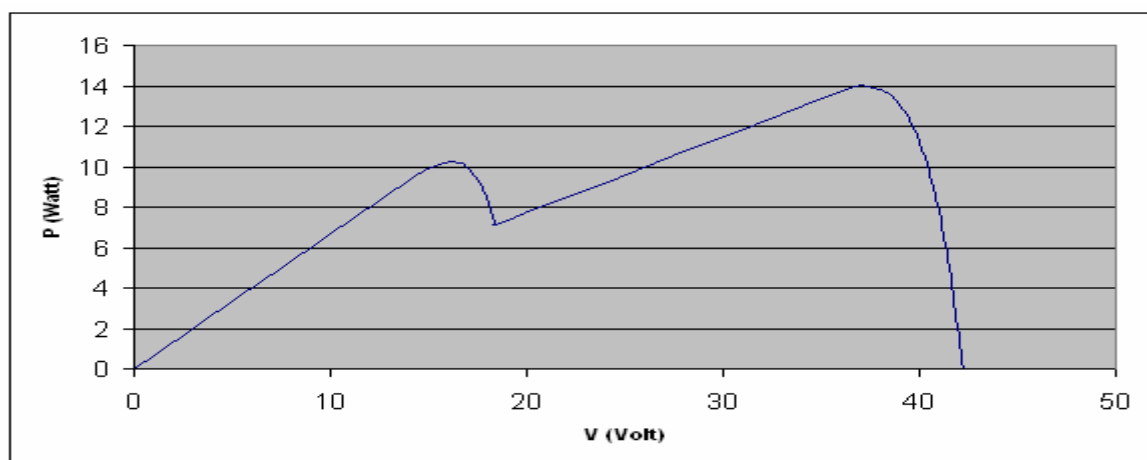
Σχήμα 44. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για $G_1=500 \text{ W/m}^2$ και $G_2=1000 \text{ W/m}^2$



Σχήμα 45. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1=500 \text{ W/m}^2$ και $G_2=1000 \text{ W/m}^2$



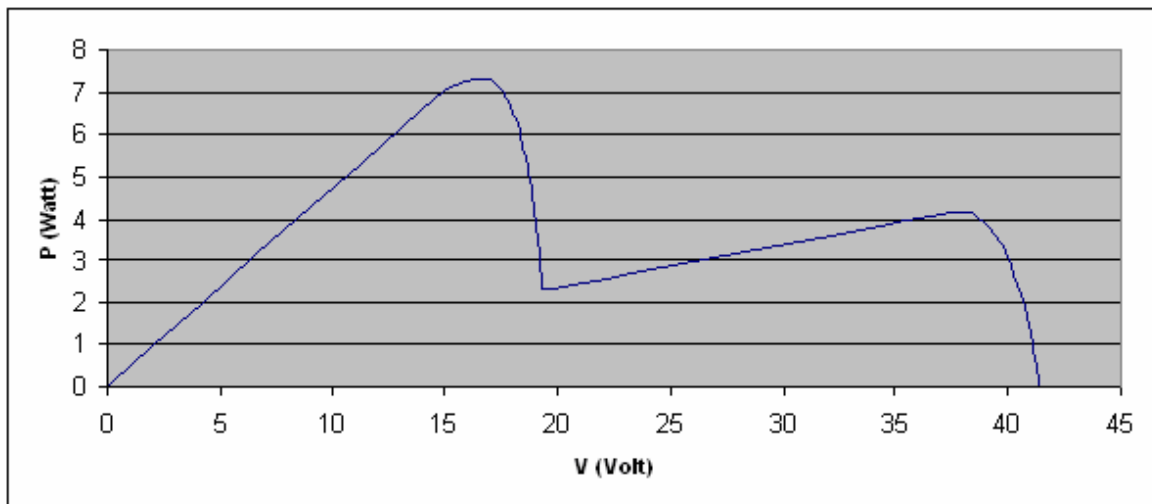
Σχήμα 46. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για $G=1000 \text{ W/m}^2$



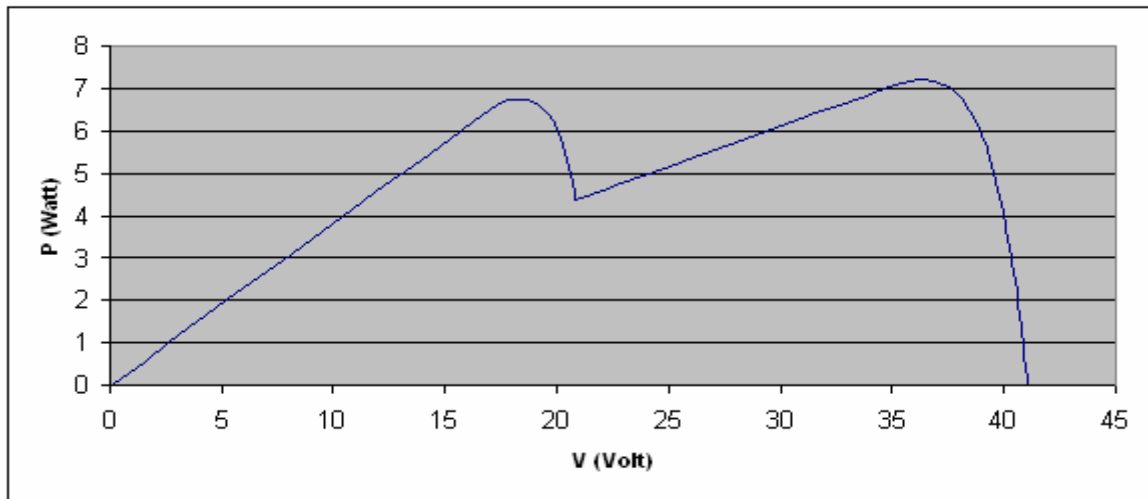
Σχήμα 47. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G=1000 \text{ W/m}^2$

Συγκρίνοντας τις χαρακτηριστικές που προέκυψαν παρατηρείται ότι είναι ίδιες που σημαίνει ότι όντως μπορεί να γίνει προσομοίωση μερικής σκίασης με χρήση δύο ανόμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων, στα οποία προσπίπτει ίδια ακτινοβολία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 6.

Στα σχήματα 48 και 49 φαίνονται οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις χαρακτηριστικών ισχύος-τάσης, όπου φαίνεται και η σχετική θέση των μεγίστων που αυτές παρουσιάζουν.

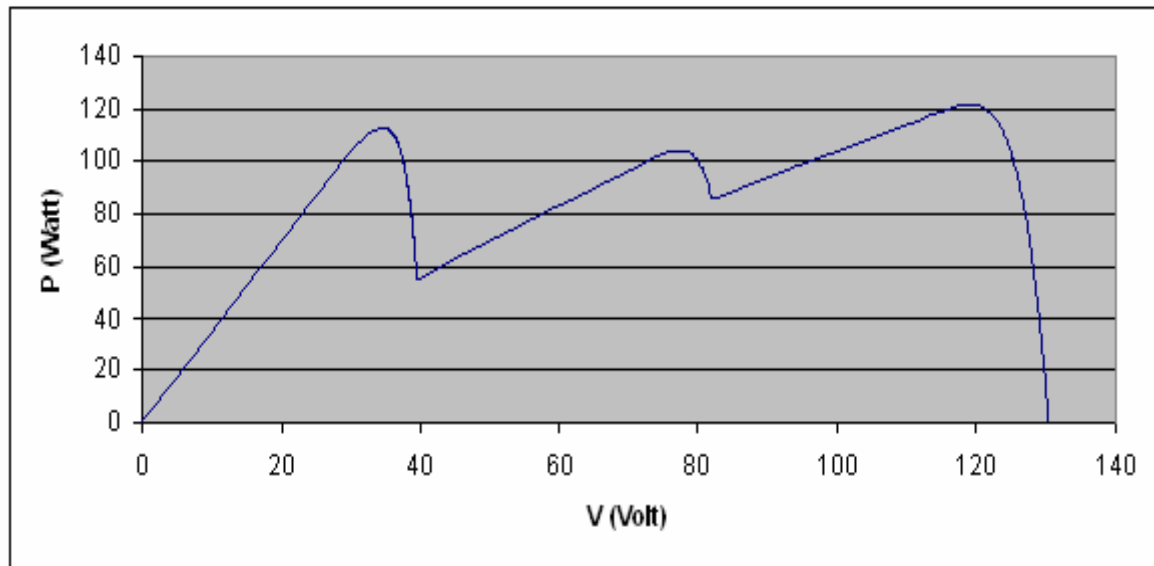


Σχήμα 48. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1 = 300 \text{ W/m}^2$ και $G_2 = 700 \text{ W/m}^2$, όπου το ολικό μέγιστο παρουσιάζεται σε χαμηλότερη τάση από την τάση στην οποία παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο

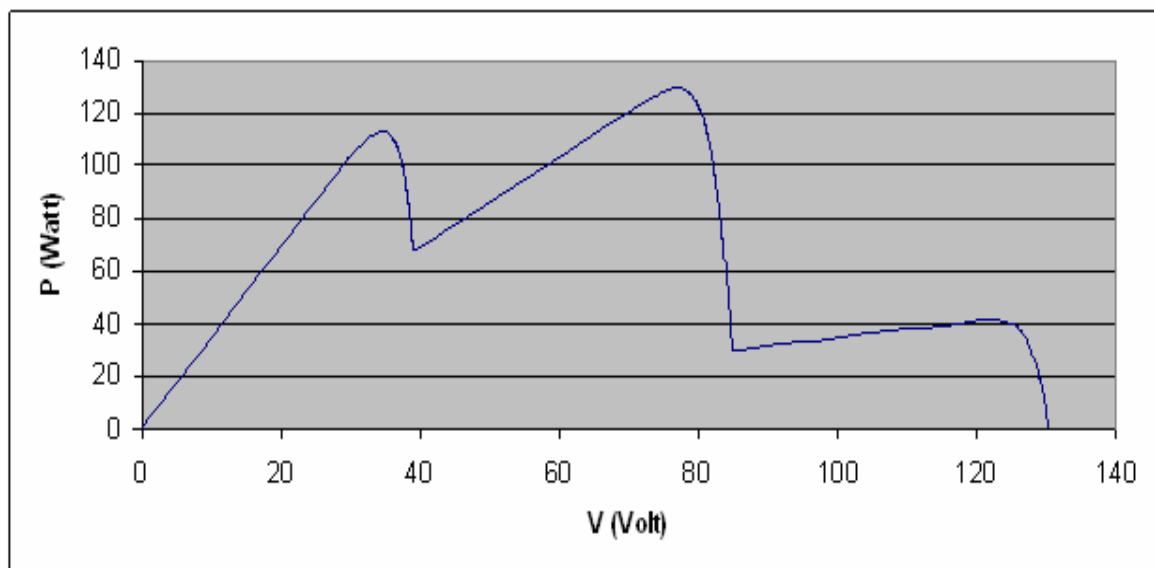


Σχήμα 49. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$ και $G_2 = 300 \text{ W/m}^2$, όπου το ολικό μέγιστο παρουσιάζεται σε υψηλότερη τάση από την τάση στην οποία παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο

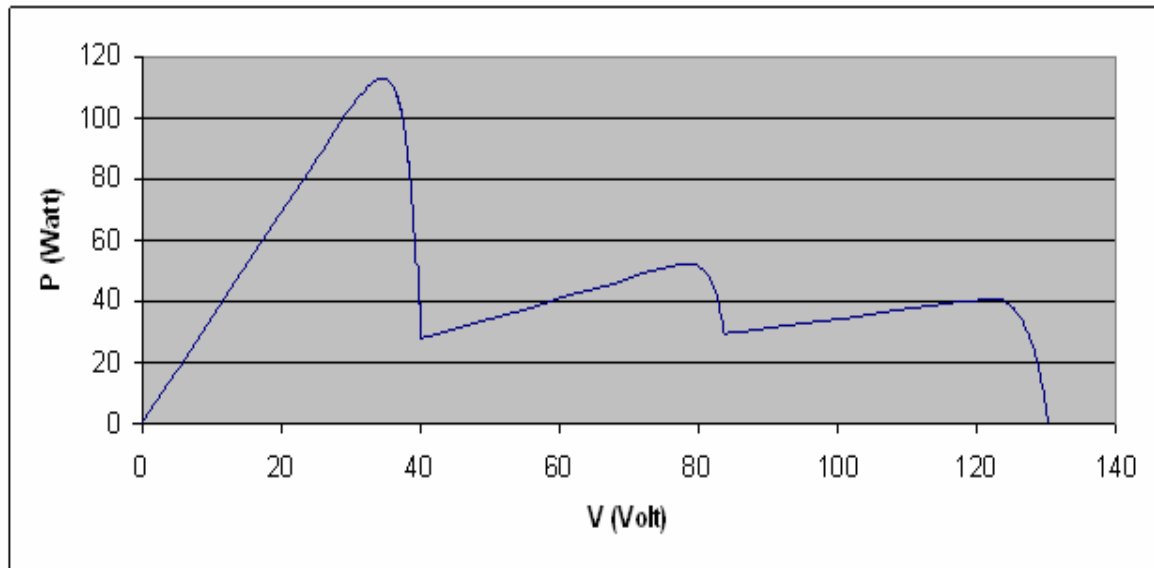
Στα σχήματα 50 έως 53 φαίνονται διάφορες χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης όπου παρουσιάζονται τρία μέγιστα στην καμπύλη. Η προσομοίωση έγινε για τρία όμοια φωτοβολταϊκά ονομαστικής ισχύος 110 Watt και παράλληλα με το καθένα έχει συνδεθεί μια bypass δίοδος, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε ένα από αυτά είναι διαφορετική. Στα σχήματα 50-52 φαίνεται ο τρόπος που αλλάζει η σχετική θέση των μεγίστων ανάλογα με την τιμή της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε πλαίσιο ενώ στο σχήμα 53 φαίνεται η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για τη συστοιχία όταν σε κάθε πλαίσιο προσπίπτει η ίδια ακτινοβολία. Θα πρέπει αν σημειωθεί ότι G_1 , G_2 και G_3 είναι οι αντίστοιχες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε πλαίσιο.



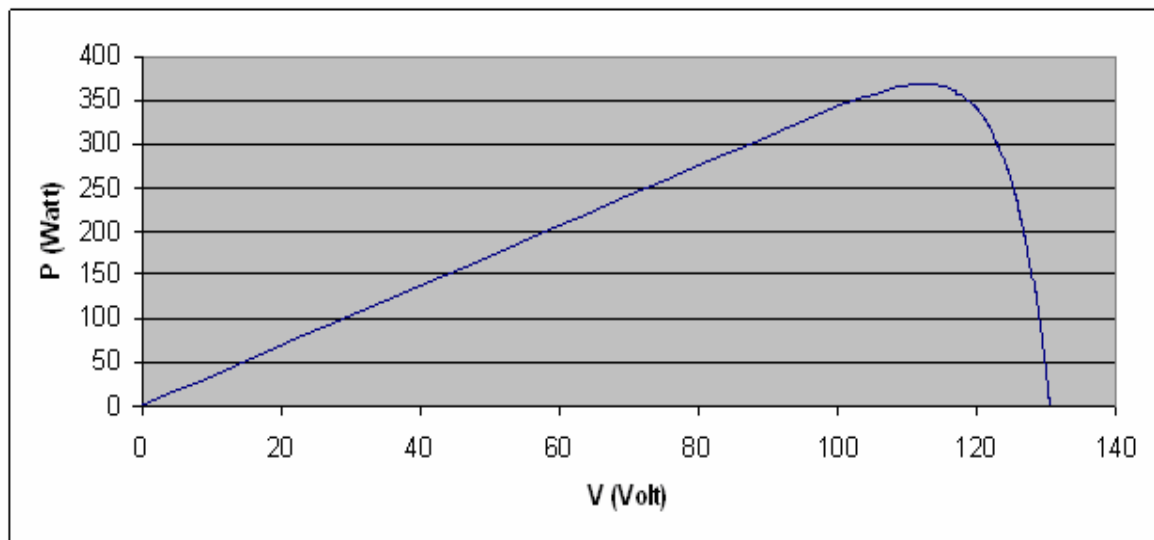
Σχήμα 50. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$,
 $G_2 = 300 \text{ W/m}^2$ και $G_3 = 400 \text{ W/m}^2$



Σχήμα 51. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1 = 100 \text{ W/m}^2$, $G_2 = 500 \text{ W/m}^2$
και $G_3 = 1000 \text{ W/m}^2$



Σχήμα 52. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1 = 100 \text{ W/m}^2$,
 $G_2 = 1000 \text{ W/m}^2$ και $G_3 = 200 \text{ W/m}^2$



Σχήμα 53. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για $G_1 = G_2 = G_3 = 1000 \text{ W/m}^2$

4.4 Μελέτη αποτελεσμάτων σκίασης σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών που συνδέονται σε διάφορα συστήματα

Τα περισσότερα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκονται στις στέγες κτιρίων. Η ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων σε κατοικημένες περιοχές προσφέρει προοπτικές για τη μείωση του κόστους παραγωγής της ενέργειας και

της μεταφοράς της στους καταναλωτές. Ένα καλά σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα εκφράζει το συμβιβασμό μεταξύ υψηλής τεχνολογίας και προστασίας περιβάλλοντος, κάτι που κάνει τέτοια συστήματα ιδανικά για την τοποθέτηση τους στις σύγχρονες κατοικημένες περιοχές. Η τοποθέτηση τέτοιων συστημάτων σε κτίρια ξεκίνησε το 1990 και αμέσως έγιναν γνωστά τα προβλήματα που προκαλεί η μερική σκίαση στην απόδοση τους. Στην αρχή η μερική σκίαση αποτελούσε πρόβλημα λόγω καταστροφής κάποιων κελιών από υψηλή θερμοκρασία. Αργότερα το κύριο πρόβλημα ήταν η υπερβολική απώλεια ενέργειας λόγω του φαινομένου αυτού.

Επομένως γινόταν συνεχώς προσπάθεια να μελετηθεί το φαινόμενο αυτό και ο τρόπος που επηρεάζει την παραγόμενη ενέργεια δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στην δομή με την οποία πρέπει να διασυνδεθεί το σύστημα.

Η σκίαση σε ένα μόνο στοιχείο μιας συστοιχίας στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά προκαλεί ανάστροφη πόλωση στο σκιασμένο στοιχείο. Η ανάστροφη αυτή πόλωση έχει μελετηθεί ικανοποιητικά όπως αναφέρεται στο [6]. Μελέτες που έγιναν ειδικά για αυτό το φαινόμενο έδειξαν ότι στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης παρουσιάζεται μείωση της παραγόμενης ενέργειας και επίσης υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των στοιχείων λόγω υπερθέρμανσης. Επιπλέον οι μελέτες έδειξαν ότι σε ένα κακώς σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα ακόμα και μικρό ποσοστό σκίασης μπορεί να προκαλέσει μεγάλες μειώσεις στην παραγόμενη ενέργεια.

Για να προστατευθούν τα συστήματα αυτά από την καταστροφή λόγω ανάστροφης πόλωσης, προτάθηκε η χρήση των διόδων παράκαμψης και άρχισαν μια σειρά από πειράματα έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η σχεδίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και να εξακριβωθεί ο μέγιστος αριθμός στοιχείων που θα πρέπει να προστατεύονται από μία δίοδο. Έτσι τα πειράματα για την εύρεση των επικίνδυνων για καταστροφή σημείων έγιναν αναπόσπαστο κομμάτι των δοκιμών για την πιστοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ένας εμπειρικός κανόνας που προέκυψε από τα πειράματα αυτά είναι, ότι για μια συστοιχία από n στοιχεία, τα οποία είναι εφοδιασμένα με μια δίοδο παράκαμψης, η απόλυτη τιμή της τάσης που προκαλεί καταστροφή σε ένα ανάστροφα πολωμένο κελί είναι η με $n+1$ φορές τα 0.5 V. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί περίπου στην τάση μέγιστης ισχύος (MPP voltage) των $n-1$ μη σκιασμένων στοιχείων που συνδέονται σε σειρά

προσθέτοντας και την τάση της διόδου παράκαμψης που κυμαίνεται από 0.5 έως 1 V. Για τα σημερινά εμπορικά φωτοβολταϊκά συστήματα η τάση αυτή υπολογίζεται σε λιγότερο από -10 V. Επομένως μια συνηθισμένη τακτική είναι να συνδέεται μια δίοδος ανά 18 στοιχεία σε σειρά.

Ωστόσο σε στοιχεία μεγαλύτερης ισχύος μελέτες έδειξαν ότι ίσως είναι απαραίτητο να εφαρμόζεται μια δίοδος σε λιγότερα στοιχεία. Το ίδιο ισχύει και για κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αφού οι κατασκευαστές τους δεν μπορούν να εγγυηθούν μια συνεχή υψηλή ποιότητα όσων αφορά τις τάσεις αποκοπής και τα ρεύματα διαρροής.

Ενώ από δομικής απόψεως είναι επιθυμητό να παραλείπονται οι δίοδοι παράκαμψης στο κουτί συνδέσεων του στοιχείου, όσο περισσότερες υπάρχουν τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα σε περιπτώσεις σκίασης του στοιχείου. Μια προτεινόμενη λύση είναι η ενσωμάτωση της διόδου απευθείας στη δομή του ημιαγωγού κάθε ξεχωριστού στοιχείου. Μια άλλη επιλογή είναι στοιχεία που περιέχουν ενσωματωμένους μετατροπείς, λύση όμως που δεν είναι εμπορικά εφικτή στο άμεσο μέλλον.

Εν τω μεταξύ, γίνονται αξιόλογες προσπάθειες για την προσομοίωση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των σκιασμένων στοιχείων. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλά υπολογιστικά προγράμματα χωρίς ωστόσο να είναι όλα αυτά κατάλληλα για μελέτες σε επίπεδο στοιχείου, όταν αυτό λειτουργεί κάτω από συνθήκες ανάστροφης πόλωσης.

Υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις στον υπολογισμό της μείωσης της παραγόμενης ισχύος λόγω μερικής σκίασης. Η πρώτη μέθοδος είναι να γίνει μια προσομοίωση της προβολής των σκιών των αντικειμένων του περιβάλλοντος πάνω στο φωτοβολταϊκό στοιχείο κατά την πάροδο του χρόνου. Για τη μέθοδο αυτή είναι απαραίτητα κάποια όργανα που χρησιμοποιούν οι αρχιτέκτονες, τα οποία χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογίζεται η προβολή των αντικειμένων του περιβάλλοντος κατά την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον με υπολογισμούς της απευθείας και της διάχυτης ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του στοιχείου έγιναν εφικτές αναλύσεις για την παραγόμενη από το στοιχείο ενέργεια. Σε γενικές γραμμές μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να γίνει και σε έναν υπολογιστή. Εάν οι διαστάσεις και η διάταξη των αντικειμένων που προκαλούν τη σκίαση είναι γνωστές, τότε μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της προβολής τους για

κάθε στιγμή μέσα σε ένα χρόνο. Επιπλέον χρησιμοποιώντας εμπειρικές ή σύνθετες μετεωρολογικές μεθόδους μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο για κάθε χρονική στιγμή, επιτρέποντας έτσι καλύτερη προσομοίωση της συμπεριφοράς του στοιχείου. Μια ακριβής περιγραφή της μεθόδου υπολογισμού της ακτινοβολίας είναι αυτή που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3. Ένα προφανές μειονέκτημα τέτοιων μοντέλων με μεγάλη χωρική και χρονική ανάλυση είναι ο μεγάλος χρόνος υπολογισμού των δεδομένων. Επιπλέον είναι αναγκαία η ακριβής γνώση των διαστάσεων και της διάταξης των αντικειμένων.

Ύστερα από προσομοιώσεις καθώς και πειραματικά αποτελέσματα στο εργαστήριο και στο περιβάλλον εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών, προέκυψε μια σειρά από εμπειρικούς κανόνες για την βέλτιστη τοποθέτηση και διάταξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για τη βέλτιστη απόσταση μεταξύ δυο σειρών από φωτοβολταϊκά έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω σκίασης της μια σειράς από την προηγούμενη ή την επόμενη της.

Όταν σκιάζεται ένα μόνο μέρος του στοιχείου ο τρόπος τοποθέτησης του στοιχείου έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση του. Θεωρώντας μια συστοιχία που αποτελείται από 18 στοιχεία και σκιάζεται μερικώς τότε επειδή η συστοιχία αυτή βραχυκυκλώνεται από την δίοδο παράκαμψης είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί η διάταξη του στοιχείου με τέτοιο τρόπο ώστε να σκιάζονται όσα λιγότερα στοιχεία γίνεται από τα συνολικά 18 για κάθε χρονική στιγμή.

Παραλλαγές του παραπάνω εφαρμόστηκαν σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προτάθηκε τα σκιασμένα και μη σκιασμένα στοιχεία να μην συνδέονται σε σειρά αλλά παράλληλα εάν αυτό είναι εφικτό. Αυτή η παραδοχή θεωρείται σαν ένας εμπειρικός κανόνας στη σχεδίαση συστοιχιών από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Ο λόγος είναι ότι μια συστοιχία από 18 στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, στην οποία συνδέεται παράλληλα μια δίοδος παράκαμψης αποτελούν το μεγαλύτερο δυνατό τμήμα του πλαισίου που μπορεί να προκαλέσει μείωση του συνολικού ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση του ρεύματος που προκαλείται είναι ανάλογη με τον αριθμό των στοιχείων παράλληλα με τα οποία συνδέουμε τη δίοδο παράκαμψης. Αυτό συμβαίνει επειδή εάν σκιαστεί ένα από τα στοιχεία της συστοιχίας τότε η δίοδος πολώνεται ορθά και η συστοιχία που περιλαμβάνει το σκιασμένο κελί δεν συνεισφέρει στην παραγωγή ρεύματος.

Επομένως αν σκιαστεί ένα μόνο στοιχείο μειώνεται η ολική τάση της συστοιχίας και επομένως και το ολικό ρεύμα χωρίς όμως να εμποδίζεται η ροή του ρεύματος που παράγουν τα υπόλοιπα στοιχεία αφού το ρεύμα ρέει μέσω της διόδου παράκαμψης.

Οι επιπτώσεις που έχει η διάταξη των στοιχείων στην παραγωγή ενέργειας δεν είναι τελείως ξεκάθαρες. Συγκεκριμένα σε πρακτικές εφαρμογές πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράγοντες όπως το εύρος τάσης κατά τη διάρκεια εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος, ο μετατροπέας που θα χρησιμοποιηθεί καθώς επίσης και η ακριβής κατάσταση σκίασης.

Ένα άλλο σημαντικό και πολυσυζητημένο ερώτημα είναι ο τρόπος διασύνδεσης του συστήματος. Για μια συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων υπάρχουν διαθέσιμες τρεις διαφορετικές μέθοδοι για την διαμόρφωση τους. Συγκεκριμένα μπορούν να εφαρμοστούν τα εξής:

- ένας AC μετατροπέας σε κάθε στοιχείο,
- ένας μετατροπέας για μια συστοιχία από φωτοβολταϊκά πλαίσια και
- ένας κεντρικός μετατροπέας για όλο το πλέγμα.

Η απόφαση για το ποια διάταξη θα χρησιμοποιηθεί έχει αντίκτυπο στο κόστος της εγκατάστασης, στο κόστος συντήρησης και στην απόδοση του συστήματος. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν την περιοχή της εγκατάστασης καθώς και τις μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής όπως φαίνεται και από τον πίνακα της επόμενης σελίδας.

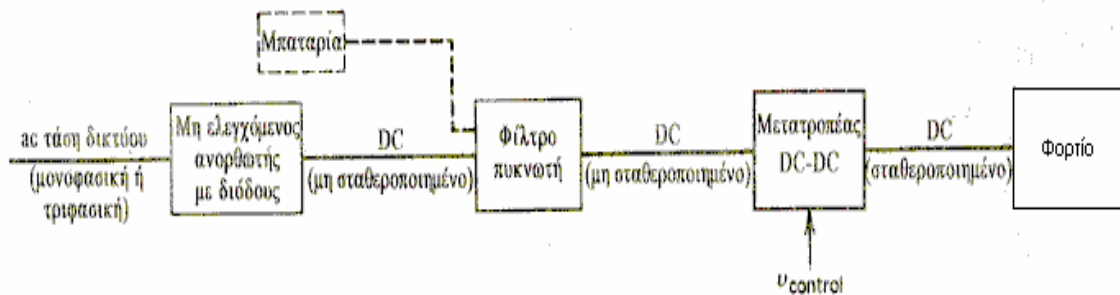
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των διαφορετικών τοπολογιών που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων

	AC Μετατροπέας για κάθε στοιχείο	Μετατροπέας για μια συστοιχία	Κεντρικός μετατροπέας
Κόστος DC εγκατάστασης	-	Περιορισμένο κόστος λόγω απουσίας του κουτιού συνδέσεων (junction box)	Πολύπλοκη DC εγκατάσταση και προστασία του κυκλώματος
Τάση λειτουργίας	17-90 V	150-800 V Η μέγιστη τάση περιορίζεται από τους κατά τόπους νόμους	34-800 V
Ωμικές απώλειες (%ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας)	Αμελητέες	□ 1% λόγω μικρών γραμμών και μεγάλων DC τάσεων	□ 1–5% που εξαρτάται από την DC τάση και την απόσταση
Απόδοση συστήματος	87-93%	90-96%	88-96%
Παρακολούθηση λειτουργίας	Δύσκολη για μεγάλα συστήματα	Δύσκολη για μεγάλα συστήματα	Κεντρική και επομένως εύκολη
Συντήρηση συστήματος	Οι εγκατεστημένοι μετατροπείς κάποιες φορές δεν είναι εύκολα προσβάσιμοι	Οι εγκατεστημένοι μετατροπείς κάποιες φορές δεν είναι εύκολα προσβάσιμοι	Κεντρική και επομένως εύκολη

5. Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC

5.1 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς DC/DC [8] χρησιμοποιούνται ευρέως σε σταθεροποιημένα DC τροφοδοτικά διακοπτικού τύπου και σε εφαρμογές DC κινητήριων συστημάτων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 54 η είσοδος αυτών των μετατροπών είναι συχνά μια μη σταθεροποιημένη DC τάση η οποία λαμβάνεται με ανόρθωση της τάσης του δικτύου. Εξαιτίας των μεταβολών του πλάτους της τάσης του δικτύου, η DC τάση αυξομειώνεται. Οι DC/DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μη σταθεροποιημένης DC εισόδου σε μια ελεγχόμενη DC έξοδο.



Σχήμα 54. Σύστημα μετατροπέα DC/DC

Οι βασικοί τύποι των DC/DC μετατροπών είναι οι εξής:

1. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης
2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης
3. Μικτός(υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης)
4. Μετατροπέας του Cuk
5. Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα

Από τους παραπάνω τύπους οι βασικές τοπολογίες είναι οι δυο πρώτες ενώ οι μετατροπείς του Cuk και ο μικτός προκύπτουν από συνδυασμό των δυο πρώτων. Ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα προκύπτει από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

Παρακάτω θα εξεταστεί ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης που είναι και ο τύπος του μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της

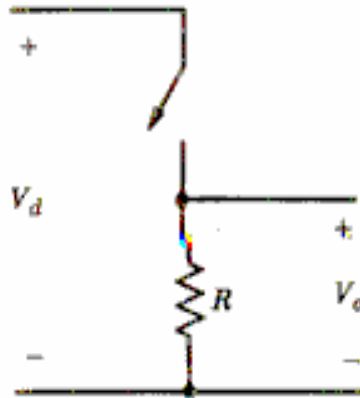
εργασίας. Ο μετατροπέας αυτός θα εξεταστεί στην κατάσταση μόνιμης ισορροπίας. Ο διακόπτης θεωρείται ιδανικός και οι απώλειες στα χωρητικά και επαγωγικά στοιχεία αγνοούνται.

Η DC πηγή τάσης στην είσοδο των μετατροπέων θεωρείται ότι έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι ένας συσσωρευτής. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις, η είσοδος είναι μια AC τάση δικτύου ανορθωμένη με διόδους και με ένα μεγάλο πυκνωτή εξομάλυνσης όπως φαίνεται στο σχήμα 54, ώστε να έχει χαμηλή εσωτερική σύνθετη αντίσταση και να λειτουργεί ως πηγή DC τάσης με μικρή κυμάτωση.

Ένα μικρό φίλτρο στη βαθμίδα εξόδου θεωρείται αναπόσπαστο κομμάτι του μετατροπέα. Η έξοδος θεωρείται ότι τροφοδοτεί ένα φορτίο που μπορεί να παρασταθεί με μια ισοδύναμη αντίσταση, όπως συμβαίνει στα DC διακοπτικά τροφοδοτικά. Ένα φορτίο DC κινητήρα (η άλλη εφαρμογή αυτών των μετατροπέων) μπορεί να παρασταθεί με μια DC τάση σε σειρά με την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του τυλίγματος του κινητήρα.

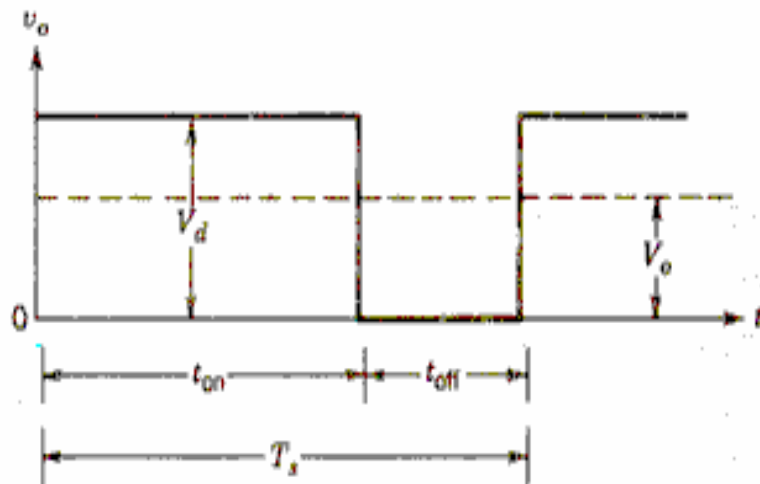
5.2 Έλεγχος των μετατροπέων DC/DC

Στους μετατροπείς αυτούς η DC τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται. Οι DC/DC μετατροπείς διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της DC τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Σ' ένα DC/DC μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των διακοπών. Για να καταστεί φανερό η αρχή της μετατροπής διακοπτικού τύπου ας θεωρηθεί ένας βασικός DC/DC μετατροπέας, όπως αυτός του σχήματος 55.



Σχήμα 55. Βασικός DC/DC μετατροπέας

Η μέση τιμή, V_o , της τάσης εξόδου v_o στο σχήμα 56 εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} .



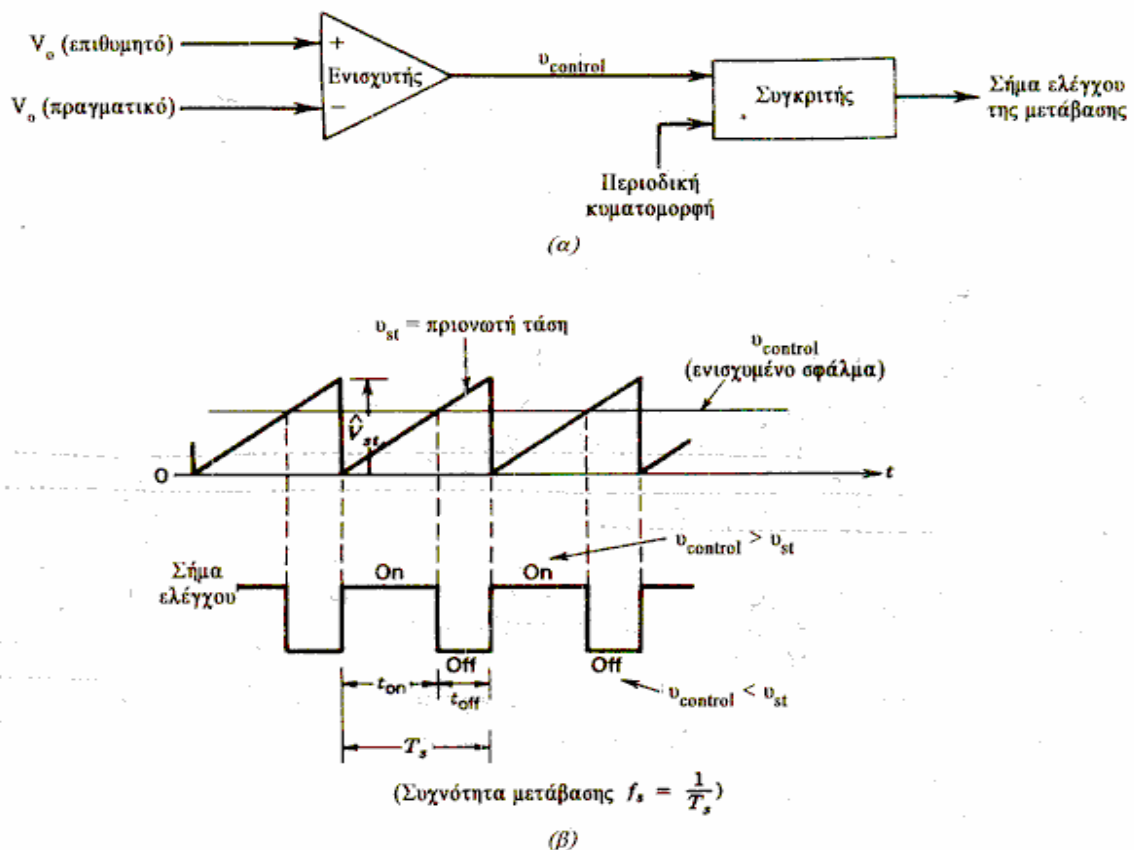
Σχήμα 56. Χρόνοι σβέσης και έναυσης του μετατροπέα

Μια από τις μεθόδους ελέγχου της μέσης τιμής της τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s = t_{on} + t_{off}$) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Σ' αυτήν τη μέθοδο που ονομάζεται *μετάβαση με διαμόρφωση εύρους παλμών* (Pulse-Width Modulation, PWM) μεταβάλλεται η *σχετική διάρκεια αγωγής* (duty cycle) D που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (59)$$

Η άλλη μέθοδος ελέγχου είναι γενικότερη. Σύμφωνα με αυτήν μεταβάλλονται, τόσο η συχνότητα μετάβασης, όσο και η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μετατροπείς που χρησιμοποιούν θυρίστορ με εξαναγκασμένη μετάβαση. Οι μεταβολές της συχνότητας μετάβασης καθιστούν δύσκολο το φιλτράρισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών εισόδου και εξόδου.

Στη διαμόρφωση PWM με σταθερή συχνότητα μετάβασης, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάσταση του (ανοιχτός ή κλειστός), παράγεται με τη σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου $v_{control}$ με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους, όπως φαίνεται στο σχήμα 57.



Σχήμα 57. PWM διαμόρφωση: (α) λειτουργικό διάγραμμα και (β) σήματα συγκριτή

Γενικά το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται ενισχύοντας το σφάλμα ή τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της επιθυμητής της τιμής. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής (συνήθως είναι πριονωτή), καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης. Στον έλεγχο με PWM η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, που μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης, είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του διακόπτη τίθεται σε υψηλή στάθμη, προκαλώντας το κλείσιμο του διακόπτη. Διαφορετικά, ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Σύμφωνα με το σχήμα 57, η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί, ως συνάρτηση της v_{control} και του πλάτους της πριονωτής κυματομορφής \bar{V}_{st} , με τη σχέση:

$$D = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} = \frac{v_{\text{control}}}{\bar{V}_{\text{st}}} \quad (60)$$

Οι DC/DC μετατροπείς μπορούν να λειτουργούν με δυο διαφορετικούς τρόπους:

1. Με συνεχή αγωγή ρεύματος
2. Με ασυνεχή αγωγή ρεύματος

Στην πράξη ένας μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί και με τους δυο τρόπους, οι οποίοι έχουν έντονα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, ένας μετατροπέας και ο έλεγχος του, πρέπει να σχεδιάζονται με βάση και τους δυο τρόπους λειτουργίας.

5.3 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

5.3.1 Γενικά

Όπως υποδηλώνει το όνομα του, ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step down ή buck converter) παράγει μια τάση εξόδου χαμηλότερη από τη DC τάση εισόδου, V_d . Η κύρια εφαρμογή του είναι τα σταθεροποιημένα DC διακοπτικά τροφοδοτικά και ο έλεγχος της ταχύτητας των DC κινητήρων.

Το βασικό κύκλωμα του σχήματος 55 αποτελεί έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης για ένα καθαρά ωμικό φορτίο. Θεωρώντας έναν ιδανικό διακόπτη και ένα

καθαρά ωμικό φορτίο, η στιγμιαία τάση εξόδου εξαρτάται από την κατάσταση του διακόπτη. Από το σχήμα 56 μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή της τάσης εξόδου ως συνάρτηση της σχετικής διάρκειας αγωγής D :

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d \quad (61)$$

Αντικαθιστώντας στην (61) το D από την (60) προκύπτει:

$$V_o = \frac{V_d}{V_{st}} u_{control} = k u_{control} \quad (62)$$

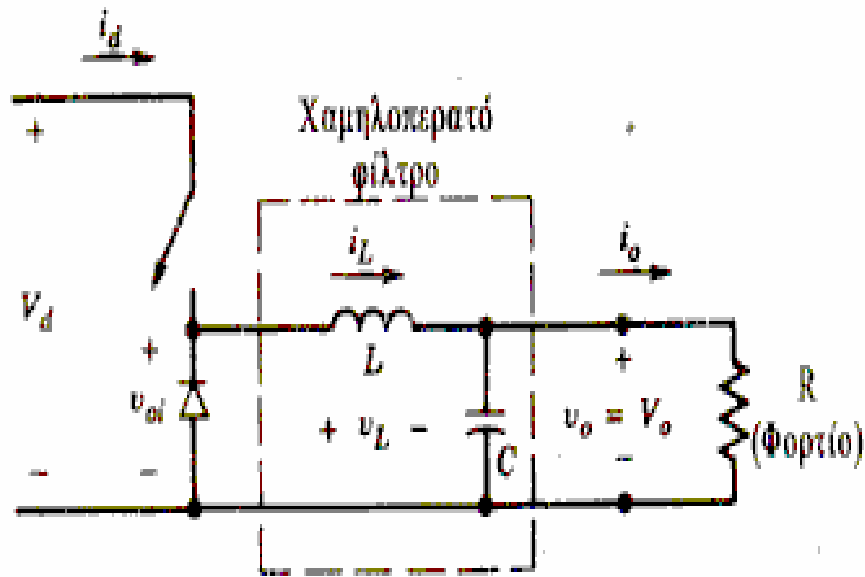
όπου:

$$k = \frac{V_d}{V_{st}} = \text{σταθερά} \quad (63)$$

Η V_o μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το λόγο t_{on}/T_s . Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_o μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση ελέγχου, όπως στην περίπτωση των γραμμικών ενισχυτών. Σε μια πρακτική εφαρμογή το προηγούμενο κύκλωμα έχει δυο μειονεκτήματα:

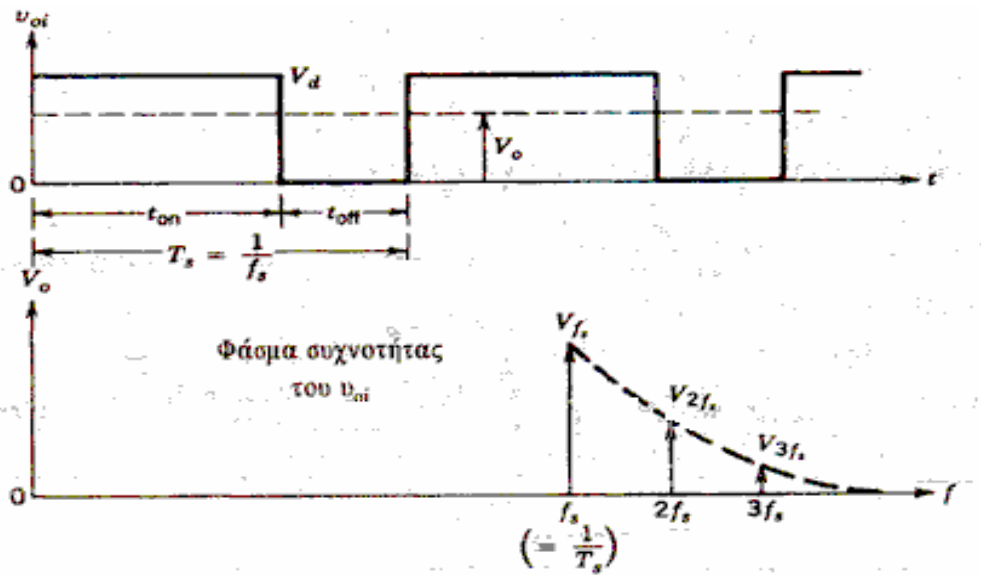
1. Στην πράξη το φορτίο θα είναι επαγωγικό. Ακόμη και με ένα ωμικό φορτίο, θα υπάρχει πάντα κάποια παρασιτική αυτεπαγωγή. Αυτό σημαίνει ότι ο διακόπτης θα πρέπει να απορροφά (ή να καταναλώνει) την ενέργεια που αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή και για το λόγο αυτό μπορεί να καταστραφεί.
2. Η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ 0 και V_d , γεγονός μη αποδεκτό στις περισσότερες εφαρμογές.

Το πρόβλημα της αποθηκευμένης ενέργειας λύνεται με τη χρήση μιας διόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 58.

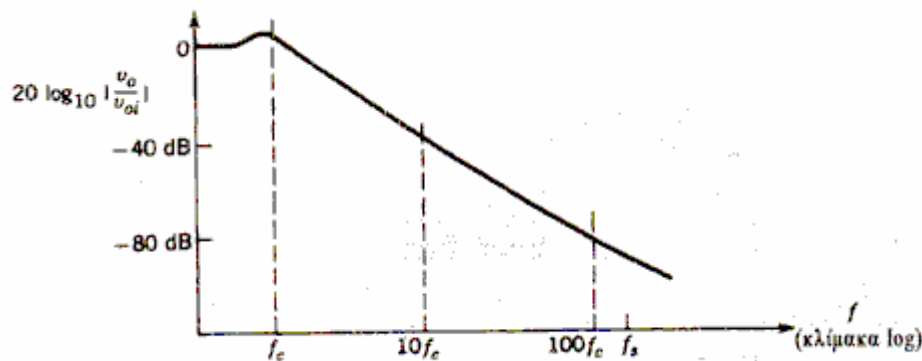


Σχήμα 58. Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Οι διακυμάνσεις της τάσης εξόδου ελαττώνονται κατά πολύ με τη χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου, το οποίο αποτελείται από ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Στο σχήμα 59 φαίνεται η κυματομορφή της εισόδου v_{oi} του φίλτρου (που είναι ίδια με την τάση εξόδου του σχήματος 56 χωρίς το φίλτρο). Αυτή αποτελείται από ένα DC όρο V_o , τις αρμονικές στη συχνότητα μετάβασης f_s και στις πολλαπλάσιες τις όπως φαίνεται στο σχήμα 59. Η απόκριση συχνότητας του φίλτρου, με την απόσβεση που προκαλείται από το ωμικό φορτίο R , φαίνεται στο σχήμα 60. Η συχνότητα αποκοπής f_c αυτού του φίλτρου επιλέγεται πολύ μικρότερη από τη συχνότητα μετάβασης, εξαλείφοντας ουσιαστικά την κυμάτωση στη συχνότητα μετάβασης από την τάση εξόδου.



Σχήμα 59. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου του φίλτρου



Σχήμα 60. Η απόκριση συχνότητας του φίλτρου

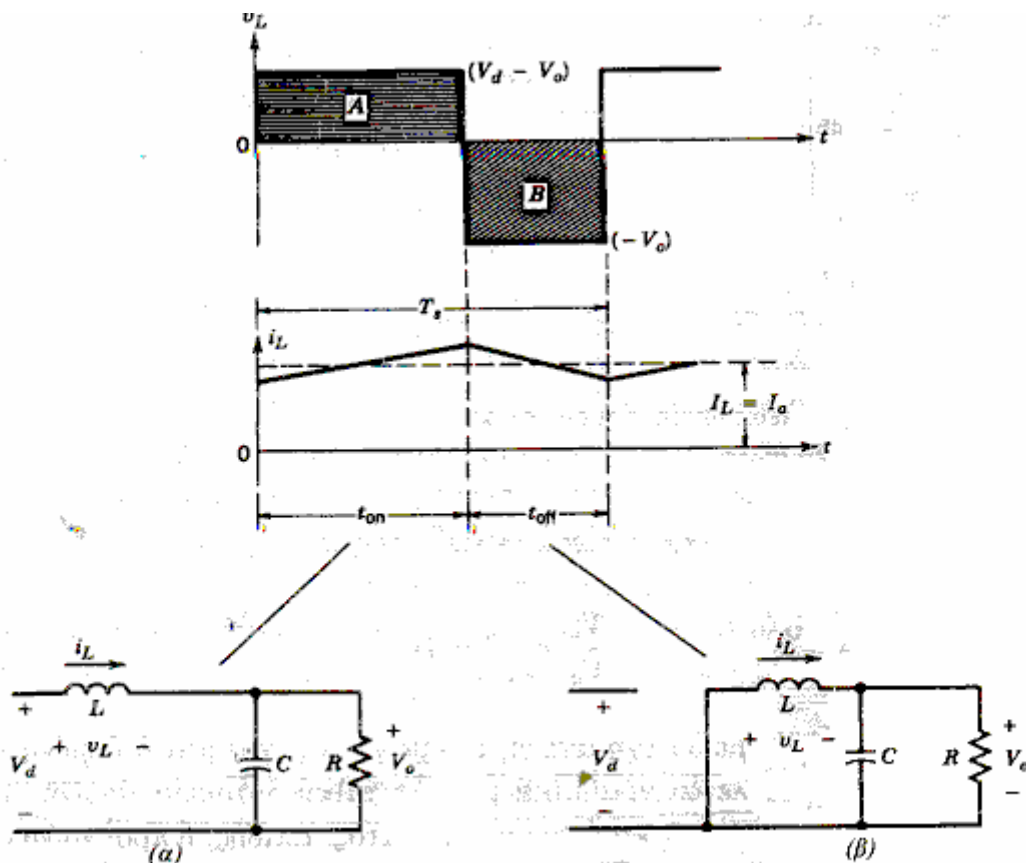
Όσο ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος του σχήματος 58 πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια, τόσο στο φορτίο, όσο και στο πηνίο. Όσο ο διακόπτης είναι ανοιχτός, το ρεύμα του πηνίου ρέει δια μέσου της διόδου, μεταφέροντας μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας στο φορτίο.

Στην ανάλυση κατά τη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, που παρουσιάστηκε εδώ, ο πυκνωτής εξομάλυνσης θεωρείται πολύ μεγάλος, όπως συμβαίνει συνήθως σε εφαρμογές που απαιτούν μια σχεδόν σταθερή στιγμιαία τάση εξόδου $v_o(t) \approx V_o$. Η κυμάτωση στην τάση του πυκνωτή (τάση εξόδου) θα υπολογιστεί στη συνέχεια.

Από το σχήμα 58 παρατηρείται ότι σε ένα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, το μέσο ρεύμα του πηνίου ισούται με το μέσο ρεύμα εξόδου I_o , εφόσον το ρεύμα του πυκνωτή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας είναι μηδέν.

5.3.2 Λειτουργία με συνεχή αγωγή ρεύματος

Στο σχήμα 61 φαίνονται οι κυματομορφές της λειτουργίας με συνεχή αγωγή ρεύματος, όπου το ρεύμα του πηνίου ρέει συνεχώς ($i_L(t) > 0$).



Σχήμα 61. Οι καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα: (α) διακόπτης κλειστός, (β) διακόπτης ανοικτός

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, για ένα χρονικό διάστημα t_{on} , αυτός άγει το ρεύμα του πηνίου και η διόδος πολώνεται ανάστροφα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας θετικής τάσης $v_L = V_d - V_o$ στα άκρα του πηνίου του σχήματος 61(α). Η τάση αυτή προκαλεί μια γραμμική αύξηση στο ρεύμα του πηνίου i_L . Όταν ο διακόπτης ανοίξει, εξαιτίας της αποθηκευμένης ενέργειας στο πηνίο, το i_L

συνεχίζει να ρέει. Το ρεύμα αυτό ρέει τώρα δια μέσου της διόδου και $v_L = -V_o$ όπως φαίνεται στο σχήμα 61(β).

Εφόσον στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας η κυματομορφή πρέπει να επαναλαμβάνεται σε κάθε περίοδο, το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου v_L στο διάστημα μιας περιόδου πρέπει να είναι μηδέν, όπου $T_s = t_{on} + t_{off}$:

$$\int_0^{T_s} u_L dt = \int_0^{t_{on}} u_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} u_L dt = 0 \quad (64)$$

Στο σχήμα 61 η προηγούμενη εξίσωση σημαίνει ότι τα εμβαδά A και B πρέπει να είναι ίσα.

Επομένως

$$(V_d - V_o)t_{on} = V_o(T_s - t_{on}) \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (65)$$

Άρα κατά τη λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος, για μια δεδομένη τάση εισόδου, η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τη σχετική διάρκεια αγωγής D και δεν εξαρτάται από καμιά άλλη παράμετρο του κυκλώματος. Επίσης, η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να προκύψει, παίρνοντας απλά τη μέση τιμή της v_{oi} στο σχήμα 59 και επειδή η μέση τάση στα άκρα του πηνίου στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας είναι μηδέν:

$$\frac{V_d \cdot t_{on} + 0 \cdot t_{off}}{T_s} = V_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (66)$$

Αγνοώντας τις απώλειες ισχύος που σχετίζονται με όλα τα στοιχεία του κυκλώματος, η ισχύς εισόδου P_d ισούται με την ισχύ εξόδου P_o :

$$P_d = P_o \Rightarrow V_d I_d = V_o I_o \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} = \frac{1}{D} \quad (67)$$

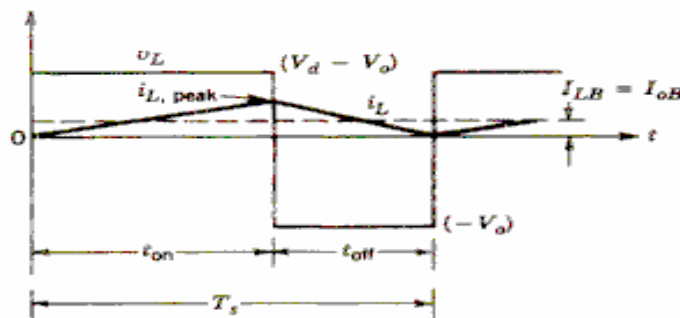
Άρα στη λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος, ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης ισοδυναμεί με ένα DC μετασχηματιστή, όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ισοδύναμου αυτού μετασχηματιστή μπορεί να ρυθμίζεται συνεχώς, με ηλεκτρονικό τρόπο, σε μια περιοχή από 0 μέχρι 1 ελέγχοντας τη σχετική διάρκεια του παλμού.

Παρατηρείται ότι παρά το ότι το μέσο ρεύμα εισόδου, I_d , ακολουθεί τη σχέση του μετασχηματιστή, η κυματομορφή του στιγμιαίου ρεύματος εισόδου μεταπηδά από

μια μέγιστη τιμή στο μηδέν κάθε φορά που ο διακόπτης ανοίγει. Άρα, ενδέχεται να απαιτηθεί ένα κατάλληλο φίλτρο στην είσοδο για να εξαλείψει τις ανεπιθύμητες επιδράσεις των αρμονικών του ρεύματος.

5.3.3 Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής

Παρακάτω διαμορφώνονται οι εξισώσεις που δείχνουν την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του κυκλώματος στον τρόπο αγωγής του ρεύματος του πηνίου (συνεχή ή ασυνεχή). Οι κυματομορφές των v_L και i_L στο όριο λειτουργίας συνεχούς αγωγής δίνονται στο σχήμα 62.



Σχήμα 62. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του πηνίου στο όριο λειτουργίας συνεχούς αγωγής

Στο όριο μεταξύ των δυο λειτουργιών συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος, το ρεύμα του πηνίου i_L μηδενίζεται στο τέλος της περιόδου κατά την οποία ο διακόπτης είναι ανοιχτός.

Στο όριο αυτό, το μέσο ρεύμα του πηνίου, όπου ο δείκτης B αναφέρεται στο όριο (boundary), είναι:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L, \text{peak}} = \frac{t_{\text{on}}}{2L} (V_d - V_o) = \frac{DT_s}{2L} (V_d - V_o) = I_{oB} \quad (68)$$

Επομένως, σε κάποια κατάσταση λειτουργίας (με ένα δεδομένο σύνολο τιμών για τα T_s, V_d, V_o, L και D), αν το μέσο ρεύμα εξόδου (και έτσι το μέσο ρεύμα του πηνίου) γίνει μικρότερο από το I_{LB} , που δίνεται από την εξίσωση (68), τότε το i_L θα γίνει ασυνεχές.

5.3.4 Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος

Ανάλογα με την εφαρμογή, κατά τη λειτουργία του μετατροπέα παραμένει σταθερή είτε η τάση εισόδου V_d είτε η τάση εξόδου V_o . Στα επόμενα εξετάζονται οι δυο αυτές περιπτώσεις.

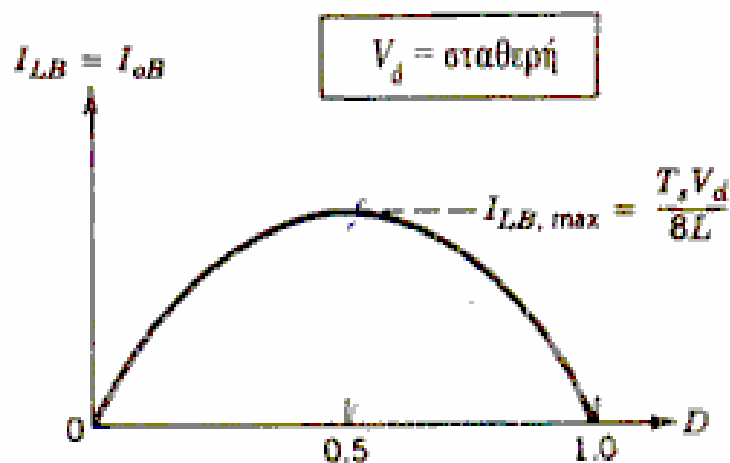
5.3.4.1. Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος με σταθερή V_d

Σε μια εφαρμογή, όπως ο έλεγχος της ταχύτητας ενός DC κινητήρα, η V_d παραμένει ουσιαστικά σταθερή και η V_o ρυθμίζεται ελέγχοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής D .

Εφόσον $V_o = DV_d$, το μέσο ρεύμα του πηνίου στο όριο λειτουργίας με συνεχές ρεύμα δίνεται από την εξίσωση (69) και είναι:

$$I_{LB} = \frac{T_s V_d}{2L} D(1-D) \quad (69)$$

Η εξίσωση αυτή είναι η σχέση που συνδέει το ρεύμα I_{LB} με τη σχετική διάρκεια αγωγής D , όταν η V_d και όλες οι άλλες παράμετροι είναι σταθερές. Η γραφική παράσταση αυτής της σχέσης δίνεται στο σχήμα 63.



Σχήμα 63. Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής του ρεύματος του πηνίου σε σχέση με τη σχετική διάρκεια αγωγής

Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι το ρεύμα εξόδου, που απαιτείται για τη λειτουργία με συνεχές ρεύμα είναι μέγιστο, όταν $D = 0.5$:

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_d}{8L} \quad (70)$$

Από τις εξισώσεις (69) και (70) προκύπτει ότι:

$$I_{LB} = 4I_{LB,max} D(1-D) \quad (71)$$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί ο λόγος τάσεων V_o/V_d στη λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος. Ας θεωρηθεί ότι αρχικά ο μετατροπέας λειτουργεί στο όριο της συνεχούς αγωγής ρεύματος, όπως στο σχήμα 62, για δεδομένες τιμές των T_s , L , V_d και D . Αν αυτές οι παράμετροι διατηρηθούν σταθερές και η ισχύς εξόδου μειωθεί (δηλαδή η αντίσταση φορτίου αυξηθεί), τότε το μέσο ρεύμα του πηνίου θα μειωθεί. Όπως φαίνεται στο σχήμα 63 αυτό προκαλεί μια αύξηση της V_o και έχει ως αποτέλεσμα το πηνίο να διαρρέεται από ένα ασυνεχές ρεύμα.

Κατά το χρονικό διάστημα $\Delta_2 T_s$, όπου το ρεύμα του πηνίου είναι μηδέν, η ισχύς στο ωμικό φορτίο παρέχεται μόνο από τον πυκνωτή εξομάλυνσης. Κατ' αυτό το χρονικό διάστημα η τάση του πηνίου v_L είναι μηδέν. Εξισώνοντας και πάλι το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου με το μηδέν προκύπτει:

$$(V_d - V_o)DT_s + (-V_o)\Delta_1 T_s = 0 \quad (72)$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta_1} \quad (73)$$

όπου $D + \Delta_1 < 1$.

Από το σχήμα 64 προκύπτει:

$$i_{L,peak} = \frac{V_o}{L} \Delta_1 T_s \quad (74)$$

Επομένως:

$$I_o = i_{L,peak} \frac{D + \Delta_1}{2} \quad (75)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (74) προκύπτει ότι:

$$I_o = \frac{V_o T_s}{2L} (D + \Delta_1) \Delta_1 \quad (76)$$

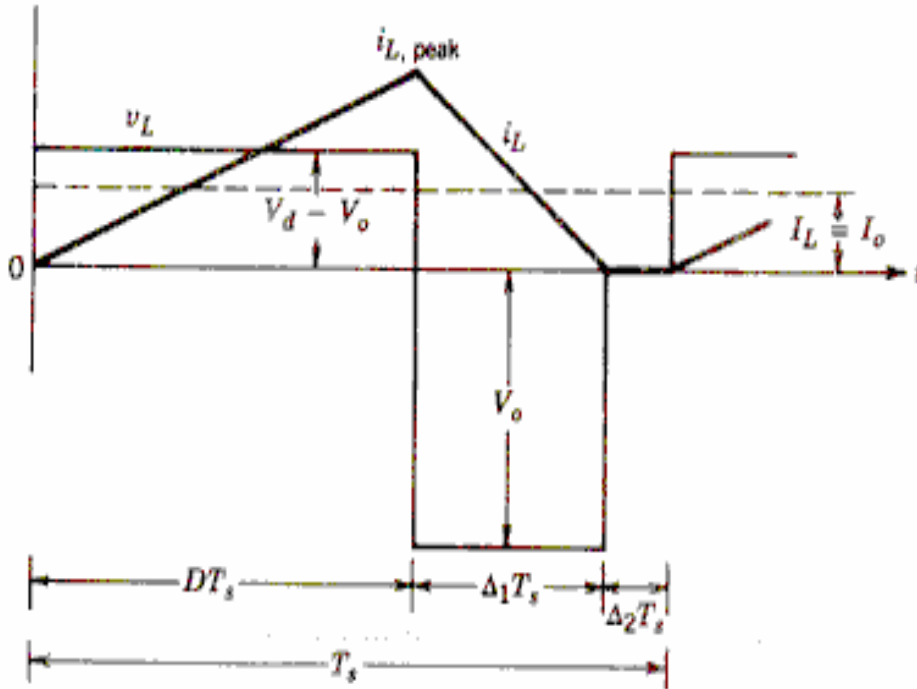
η οποία με χρήση της (73) και της (70) γίνεται:

$$I_o = \frac{V_d T_s}{2L} D \Delta_1 = 4I_{LB,max} D \Delta_1 \quad (77)$$

$$\therefore \Delta_1 = \frac{I_o}{4I_{LB,max} D} \quad (78)$$

Από τις εξισώσεις (73) και (78) προκύπτει ότι:

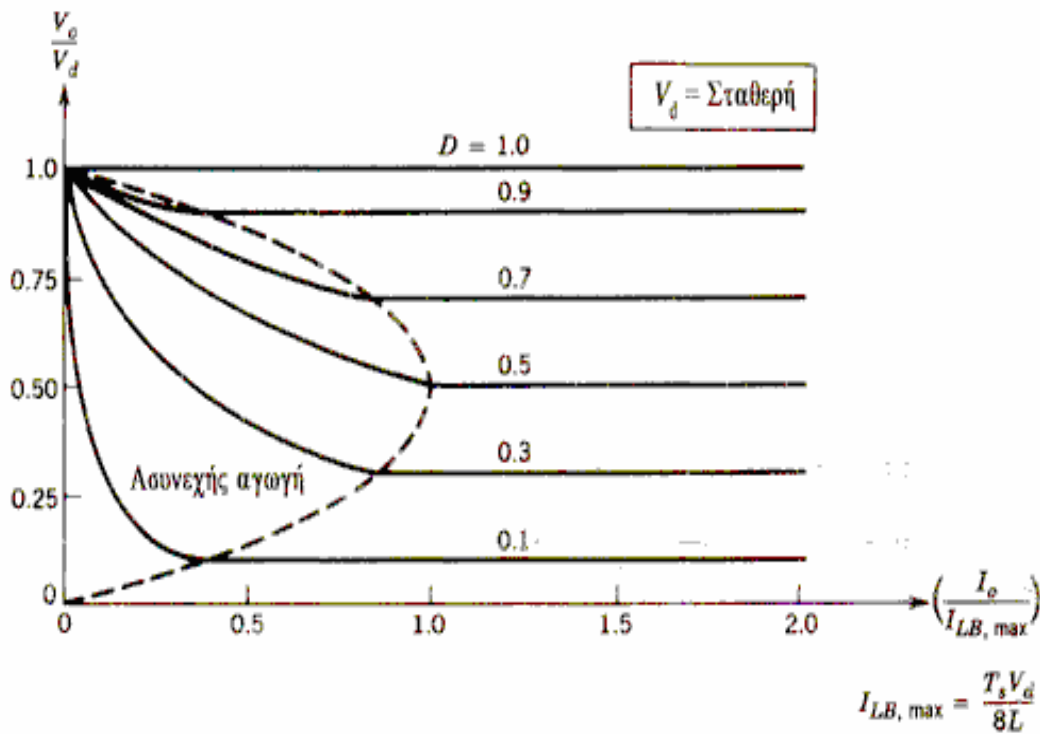
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} (I_o / I_{LB,max})} \quad (79)$$



Σχήμα 64. Ασυνεχή αγωγή ρεύματος σε DC/DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στο σχήμα 65 φαίνεται η χαρακτηριστική εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και για τους δυο τρόπους λειτουργίας, όταν η τάση V_d είναι σταθερή. Ο λόγος V_o/V_d σχεδιάζεται ως συνάρτηση του $I_o/I_{LB,max}$, για διάφορες τιμές της

σχετικής διάρκειας αγωγής D , χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (68) και (79). Το όριο μεταξύ των λειτουργιών συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος που είναι η διακεκομμένη καμπύλη, καθορίζεται από τις εξισώσεις (66) και (71).



Σχήμα 65. Χαρακτηριστικές του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με σταθερή τάση εισόδου

5.3.4.2. Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος με σταθερή V_o

Σε εφαρμογές όπως τα DC διακοπτικά τροφοδοτικά, η V_d μπορεί να αυξομειώνεται, αλλά η V_o διατηρείται σταθερή με τη ρύθμιση της σχετικής διάρκειας αγωγής D .

Εφόσον $V_d = V_o/D$, το μέσο ρεύμα του πηνίου στο όριο της λειτουργίας συνεχούς ρεύματος, όπως προκύπτει από την εξίσωση (68), είναι:

$$I_{LB} = \frac{T_s V_o}{2L} (1-D) \quad (80)$$

Από την εξίσωση (80) φαίνεται ότι, αν η V_o διατηρείται σταθερή, η μέγιστη τιμή του I_{LB} προκύπτει για $D = 0$:

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \quad (81)$$

Πρέπει να αναφερθεί ότι, η λειτουργία που αντιστοιχεί σε $D = 0$ και πεπερασμένη V_o είναι φυσικά υποθετική, επειδή θα απαιτούσε άπειρη V_d .

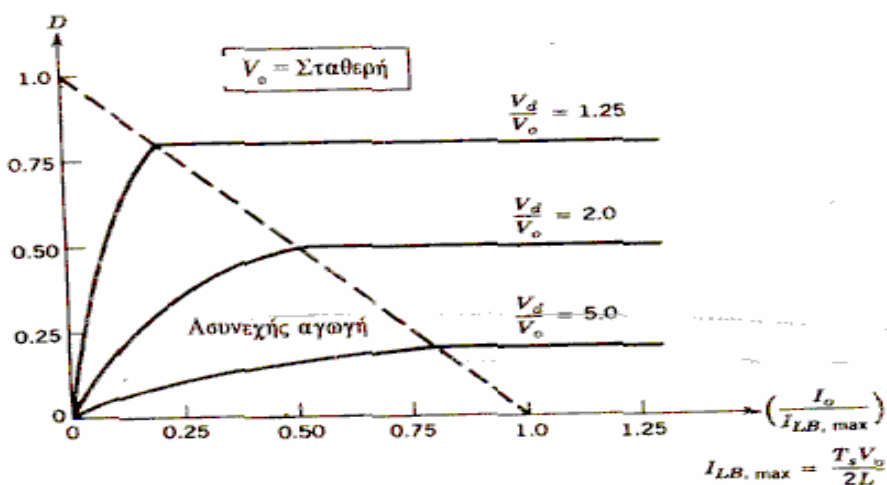
Από τις εξισώσεις (80) και (81) προκύπτει ότι:

$$I_{LB} = I_{LB,max} (1-D) \quad (82)$$

Για τη λειτουργία του μετατροπέα, όπου η V_o διατηρείται σταθερή, θα είναι χρήσιμη η εύρεση της σχέσης ανάμεσα στην απαιτούμενη σχετική διάρκεια του παλμού D και του $I_o/I_{LB,max}$. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (73) και (76) (οι οποίες ισχύουν για τη λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος, ανεξάρτητα από το ποια τάση V_o ή V_d είναι σταθερή), μαζί με την εξίσωση (81), για την περίπτωση που διατηρείται σταθερή η V_o , προκύπτει:

$$D = \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{I_o/I_{LB,max}}{1 - V_o/V_d} \right)^{1/2} \quad (83)$$

Το D ως συνάρτηση του $I_o/I_{LB,max}$ σχεδιάζεται στο σχήμα 66, για διάφορες τιμές του V_d/V_o , διατηρώντας τη V_o σταθερή. Το όριο μεταξύ των λειτουργιών συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος βρίσκεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (82).

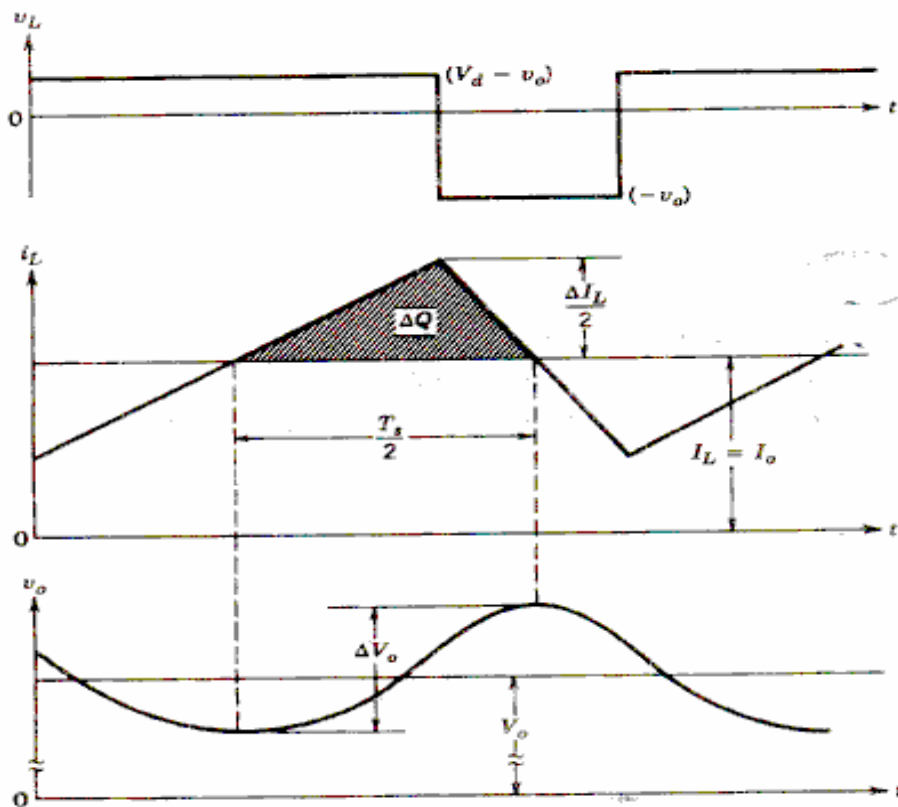


Σχήμα 66. Χαρακτηριστικές του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με σταθερή τάση εξόδου

5.3.5 Κυμάτωση της τάσης εξόδου

Κατά την προηγούμενη ανάλυση, ο πυκνωτής εξόδου θεωρείται τόσο μεγάλος, ώστε να δίνει $v_o(t) = V_o$. Ωστόσο, η κυμάτωση της τάσης εξόδου μπορεί να υπολογιστεί με μια πρακτική τιμή χωρητικότητας, θεωρώντας τις κυματομορφές που δίνονται στο σχήμα 67 για τη λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος. Υποθέτοντας ότι όλες οι συνιστώσες της κυμάτωσης του i_L ρέουν δια μέσου του πυκνωτή, ενώ η μέση τιμή του ρέει δια μέσου του ωμικού φορτίου, το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν στο σχήμα 67 αναπαριστά ένα πρόσθετο φορτίο ΔQ . Επομένως, η από κορυφή σε κορυφή κυμάτωση της τάσης ΔV_o μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \frac{T_s}{2} \quad (84)$$



Σχήμα 67. Κυμάτωση της τάσης εξόδου στο μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Από το σχήμα 61, κατά το χρονικό διάστημα t_{off} ισχύει η σχέση:

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L}(1-D)T_s \quad (85)$$

Επομένως αντικαθιστώντας το ΔI_L στην εξίσωση (74) προκύπτει:

$$\Delta V_o = \frac{T_s}{8C} \frac{V_o}{L}(1-D)T_s \quad (86)$$

$$\therefore \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1}{8} \frac{T_s^2(1-D)}{LC} = \frac{\pi^2}{2}(1-D)\left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 \quad (87)$$

όπου η συχνότητα μετάβασης $f_s = 1/T_s$ και

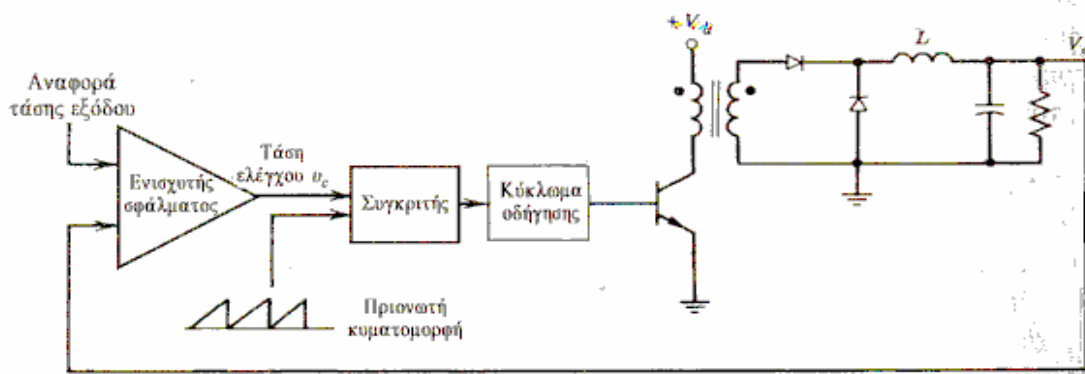
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (88)$$

Η εξίσωση (87) φανερώνει ότι η κυμάτωση της τάσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, επιλέγοντας τη συχνότητα αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου τέτοια, ώστε $f_c \ll f_s$. Επίσης, η κυμάτωση είναι ανεξάρτητη από την ισχύ εξόδου, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος. Παρόμοια ανάλυση μπορεί να γίνει και για τη λειτουργία με ασυνεχή αγωγή ρεύματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στα DC διακοπτικά τροφοδοτικά το ποσοστό της κυμάτωσης εξόδου συνήθως προδιαγράφεται για παράδειγμα μικρότερο από 1%. Επομένως, ισχύει η ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων στην οποία θεωρείται $v_o(t) = V_o$. Επιπλέον, η κυμάτωση εξόδου της (87) είναι σύμφωνη με την απόκριση συχνότητας του χαμηλοπερατού φίλτρου του σχήματος 60.

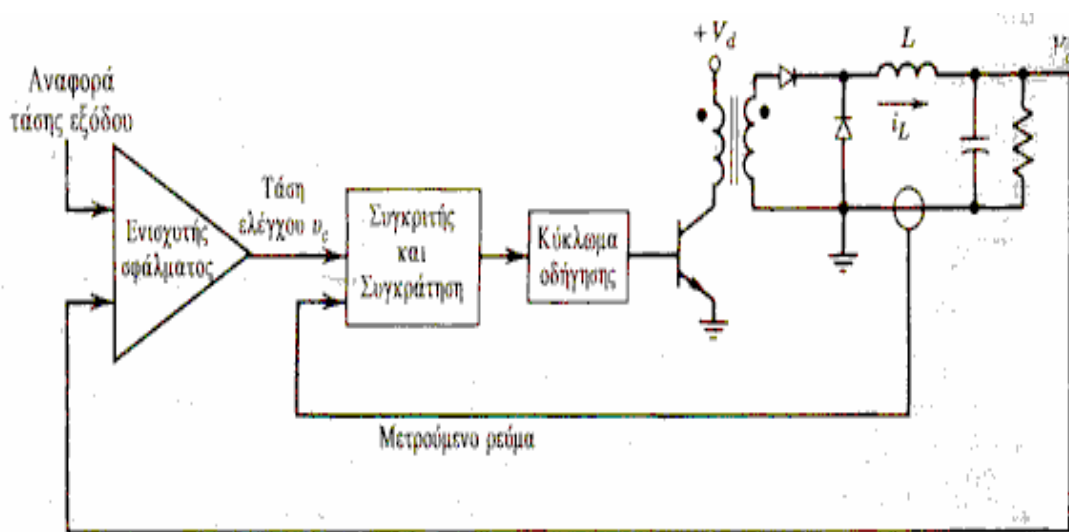
5.3.6 Έλεγχος ρεύματος του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Ένας διαμορφωτής PWM που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μετατροπέα δίνεται στο σχήμα 68, όπου η τάση ελέγχου v_c (ενισχυμένο σήμα σφάλματος μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της τάσης αναφοράς) ελέγχει τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη με τη σύγκριση της τάσης ελέγχου και μιας πριονωτής κυματομορφής με σταθερή συχνότητα. Αυτός ο έλεγχος της σχετικής διάρκειας του διακόπτη ρυθμίζει την τάση στα άκρα της αυτεπαγωγής και κατά συνέπεια το ρεύμα της αυτεπαγωγής (το οποίο τροφοδοτεί τη βαθμίδα εξόδου) και φέρνει την τάση εξόδου στην επιθυμητή τιμή αναφοράς.



Σχήμα 68. Έλεγχος της σχετικής διάρκειας αγωγής με την τεχνική PWM

Στον έλεγχο ρεύματος χρησιμοποιείται ένας πρόσθετος βρόγχος ελέγχου, όπως φαίνεται στο σχήμα 69, όπου η τάση ελέγχου v_c ελέγχει άμεσα το ρεύμα εξόδου της αυτεπαγωγής που τροφοδοτεί τη βαθμίδα εξόδου και κατά συνέπεια την τάση εξόδου.



Σχήμα 69. Έλεγχος ρεύματος

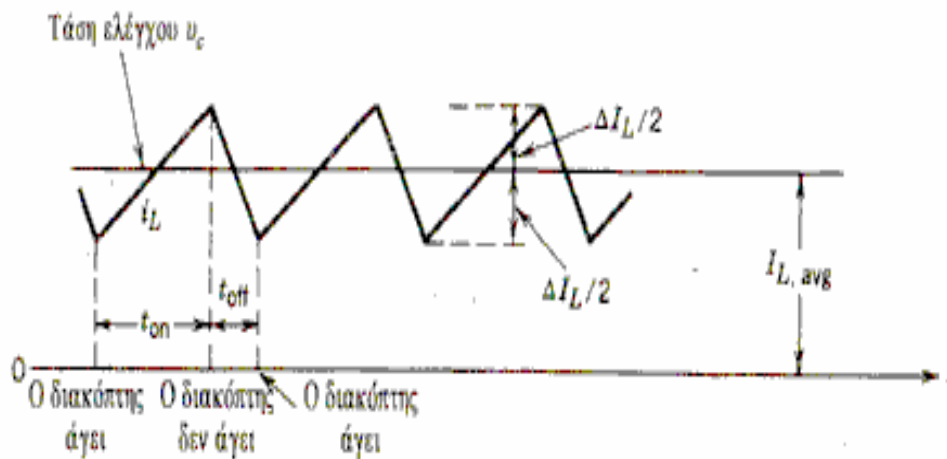
Θεωρητικά η τάση ελέγχου θα πρέπει να προκαλέσει τον άμεσο έλεγχο της μέσης τιμής του ρεύματος της αυτεπαγωγής για την ταχύτερη δυνατή απόκριση. Διάφοροι τύποι ελέγχου ρεύματος τείνουν να το πετύχουν αυτό με διαφορετικές τεχνικές. Το γεγονός ότι το ρεύμα τροφοδοσίας της βαθμίδας εξόδου ελέγχεται άμεσα έχει μια σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του βρόγχου αρνητικής ανάδρασης.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι ελέγχου του ρεύματος:

1. Έλεγχος με ζώνη ανοχής.
2. Έλεγχος με σταθερό χρόνο αποκοπής.
3. Έλεγχος με σταθερή συχνότητα και έναυση κατά την άνοδο του παλμού.

Σ' όλους αυτούς τους τρόπους ελέγχου μετρίεται το ρεύμα της αυτεπαγωγής ή του διακόπτη και συγκρίνεται με την τάση ελέγχου.

Στον έλεγχο με ζώνη ανοχής, η τάση ελέγχου v_c καθορίζει τη μέση τιμή του ρεύματος της αυτεπαγωγής, όπως φαίνεται στο σχήμα 70.

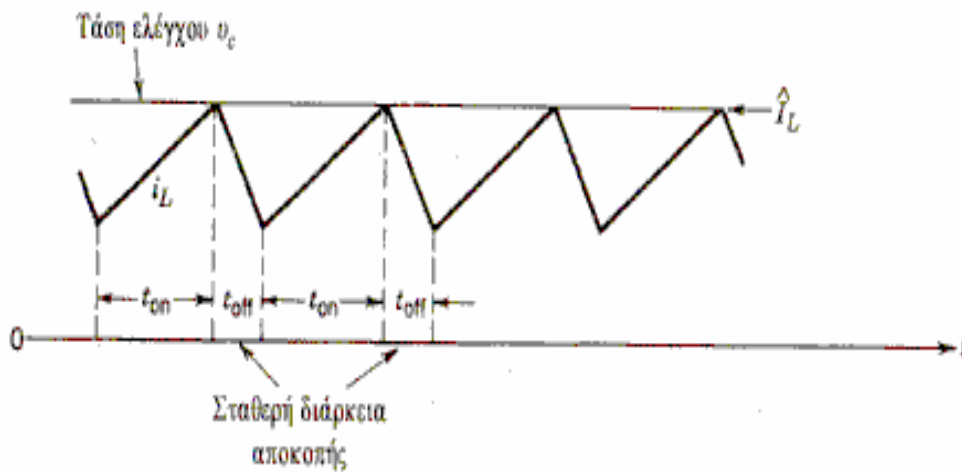


Σχήμα 70. Έλεγχος ρεύματος με ζώνη ανοχής

Ο όρος ΔI_L είναι μια παράμετρος σχεδίασης. Η συχνότητα μετάβασης εξαρτάται από το ΔI_L , τις παραμέτρους του μετατροπέα και τις συνθήκες λειτουργίας του. Αυτός ο άμεσος έλεγχος της μέσης τιμής του i_L είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό αυτού του τρόπου ελέγχου. Όμως, η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά μόνον όταν η αγωγή του ρεύματος είναι συνεχής. Αντίθετα, στην περίπτωση ασυνεχούς ρεύματος, το ρεύμα της αυτεπαγωγής μηδενίζεται. Αν ο ελεγκτής δεν είναι σχεδιασμένος να χειρίζεται αυτό το ασυνεχές ρεύμα, όταν το i_L είναι μηδέν και i_L τείνει να γίνει από τον ελεγκτή αρνητικό, ο διακόπτης δε θα κλείσει ποτέ και το ρεύμα της αυτεπαγωγής θα τείνει στο μηδέν.

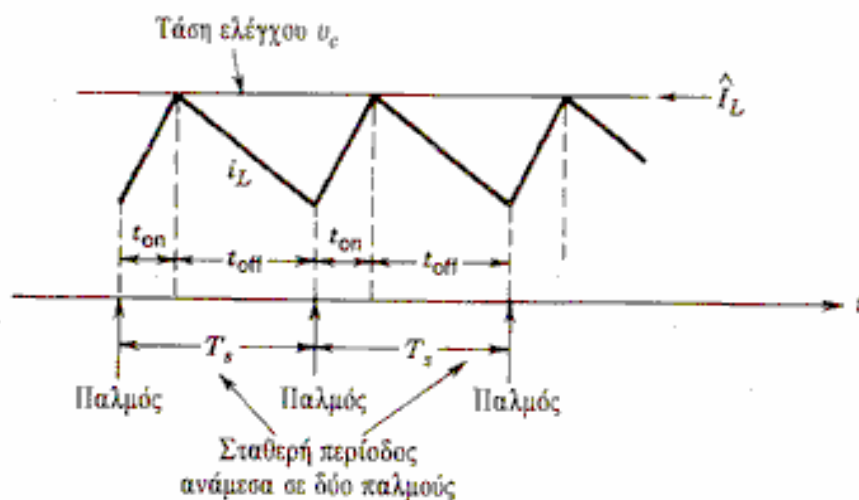
Στον έλεγχο με σταθερό χρόνο αποκοπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 71, η τάση ελέγχου καθορίζει το \hat{I}_L . Μόλις το \hat{I}_L φθάσει την τάση ελέγχου, ο διακόπτης ανοίγει για σταθερό χρονικό διάστημα, το οποίο αποτελεί παράμετρο του συστήματος.

Ακόμη, η συχνότητα μετάβασης δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τις παραμέτρους του μετατροπέα και τις συνθήκες λειτουργίας.



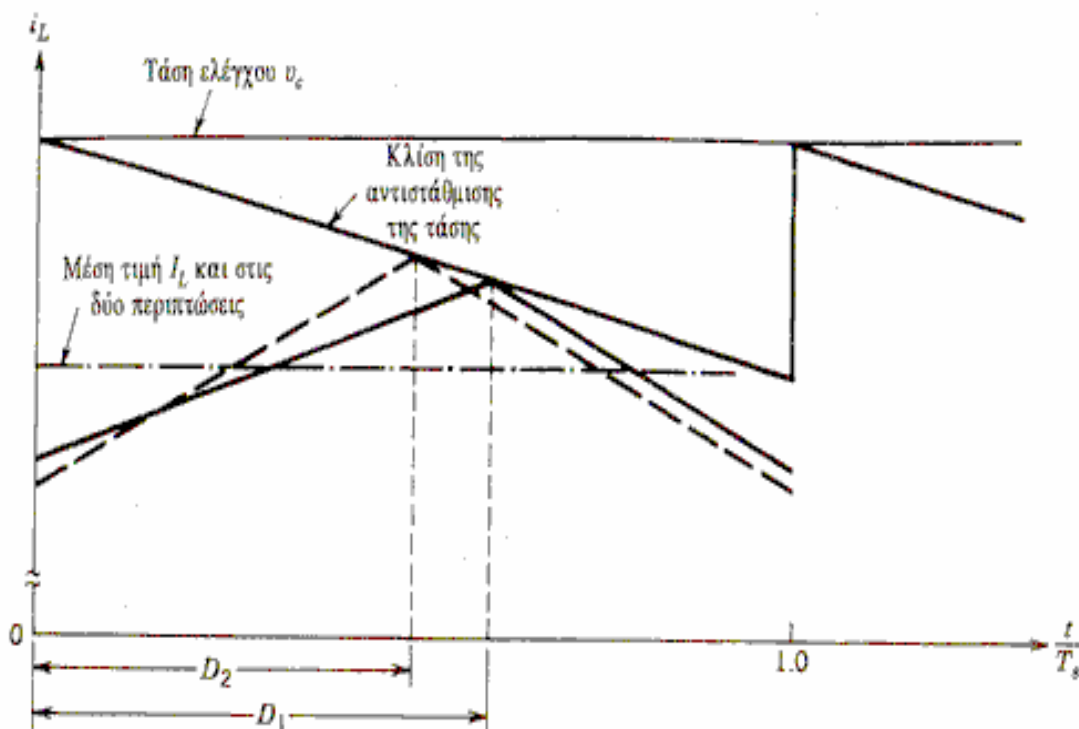
Σχήμα 71. Έλεγχος με σταθερό χρόνο αποκοπής

Ο έλεγχος με σταθερή συχνότητα και έναυση κατά την άνοδο του παλμού είναι ο πλέον κοινός τρόπος ελέγχου του ρεύματος. Εδώ ο διακόπτης κλείνει στην αρχή κάθε περιόδου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 72, η τάση ελέγχου καθορίζει το \hat{I}_L και τη στιγμή που ο διακόπτης ανοίγει. Ο διακόπτης παραμένει ανοικτός μέχρι να αρχίσει ο επόμενος κύκλος μετάβασης. Η σταθερή συχνότητα μετάβασης καθιστά ευκολότερη τη σχεδίαση του φίλτρου εξόδου.



Σχήμα 72. Έλεγχος ρεύματος με σταθερή συχνότητα και έναυση στην αρχή του παλμού

Όπως φαίνεται στο σχήμα 73, για τον έλεγχο της τάσης προστίθεται στην πράξη μια αντιστάθμιση της κλίσης. Η αντιστάθμιση αυτή βελτιώνει την ευστάθεια, δεν επιτρέπει την εμφάνιση υποαρμονικών ταλαντώσεων και παρέχει τις ιδιότητες της πρόσω δράσης. Στο σχήμα 73 φαίνεται η κυματομορφή για το μετατροπέα του σχήματος 69, όπου η κλίση της κυματομορφής αντιστάθμισης της κλίσης είναι το μισό της κλίσης του ρεύματος της αυτεπαγωγής, όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός. Με δεδομένες τις τάσεις εισόδου και εξόδου η σχετική διάρκεια αγωγής είναι D_1 και η κυματομορφή του ρεύματος της αυτεπαγωγής i_L είναι αυτή που φαίνεται με συνεχή γραμμή. Αν η τάση εισόδου αυξάνει, αλλά η τάση εξόδου πρέπει να παραμείνει ανεπηρέαστη, η σχετική διάρκεια αγωγής ελαττώνεται στη D_2 και η κυματομορφή του ρεύματος της αυτεπαγωγής δίνεται με διακεκομμένη γραμμή. Η μέση τιμή του ρεύματος της αυτεπαγωγής που είναι ίση με το ρεύμα φορτίου παραμένει ίδια και στις δυο περιπτώσεις παρά το γεγονός της αλλαγής της τάσης εισόδου. Αυτό δείχνει την πρόσω δράση της τάσης στον έλεγχο του ρεύματος με κατάλληλη αντιστάθμιση της κλίσης.



Σχήμα 73. Αντιστάθμιση κλίσης στον έλεγχο ρεύματος

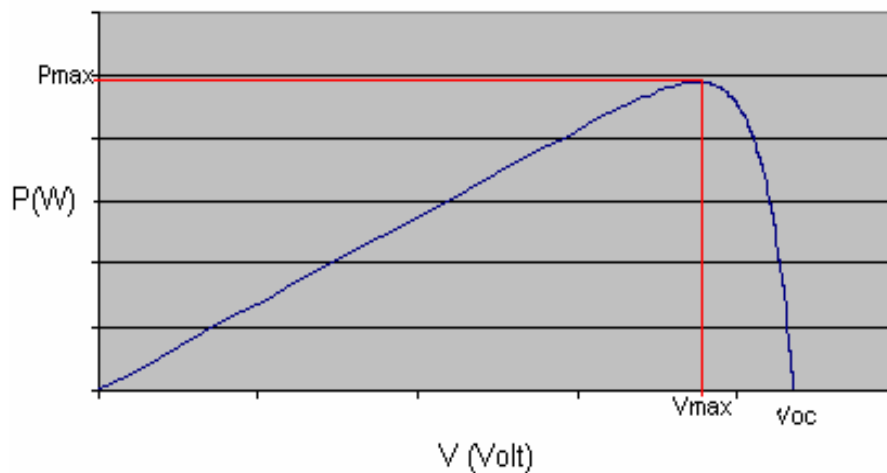
Ο έλεγχος ρεύματος έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συνήθεις διαμορφωτές PWM:

1. Περιορίζει τις τιμές κορυφής του ρεύματος των διακοπών. Εφόσον μετريέται άμεσα το ρεύμα του διακόπτη ή μετريέται σε κάποιο σημείο του κυκλώματος (συνήθως στην αυτεπαγωγή εξόδου), το ρεύμα είναι χωρίς καθυστέρηση και η τιμή κορυφής του μπορεί να περιοριστεί, αν τεθεί ένα ανώτατο όριο στην τάση ελέγχου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα στους ελεγκτές που ελέγχουν το \hat{I}_L .
2. Απομακρύνει έναν πόλο (που αντιστοιχεί στην αυτεπαγωγή εξόδου) από τη συνάρτηση μεταφοράς ελέγχου-εξόδου $\tilde{v}_o(s)/\tilde{v}_c(s)$ και έτσι απλοποιεί την αντιστάθμιση στο σύστημα αρνητικής ανάδρασης, ειδικά όταν εμφανίζεται μηδενικό στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο.
3. Επιτρέπει τη δομημένη σχεδίαση των τροφοδοτικών με εξίσου καταμερισμό των ρευμάτων, αφού αρκετά τροφοδοτικά μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα και να παρέχουν το ίδιο ρεύμα, αν όλες οι μονάδες δέχονται την ίδια τάση ελέγχου.
4. Επιτρέπουν τη συμμετρική μαγνητική ροή στους μετατροπείς push-pull και έτσι εξαλείφεται το πρόβλημα του κορεσμού του πυρήνα του μετασχηματιστή.
5. Παρέχουν πρόσω δράση της τάσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 73, μια πρόσω δράση της τάσης εισόδου εφαρμόζεται αυτόματα με αποτέλεσμα μια εξαιρετική απόρριψη των μεταβολών της τάσης εισόδου.

6. Ανάλυση του συστήματος που αναπτύχθηκε

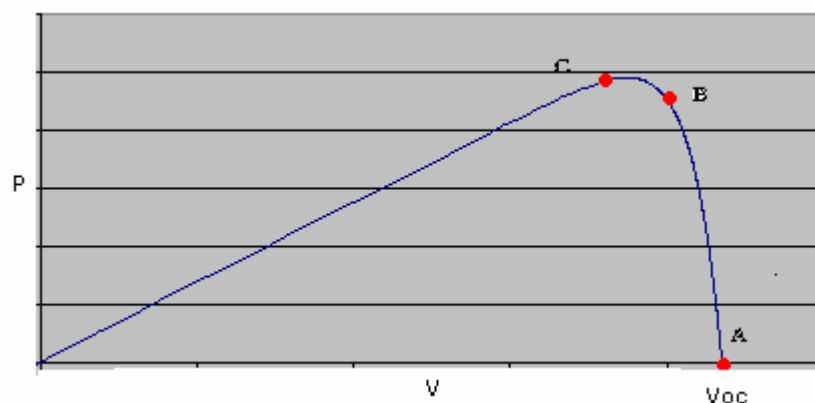
6.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην επέκταση της κλασσικής μεθόδου για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η καμπύλη ισχύος-τάσης για ένα μη σκιασμένο στοιχείο έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 74.



Σχήμα 74. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης για ένα μη σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο

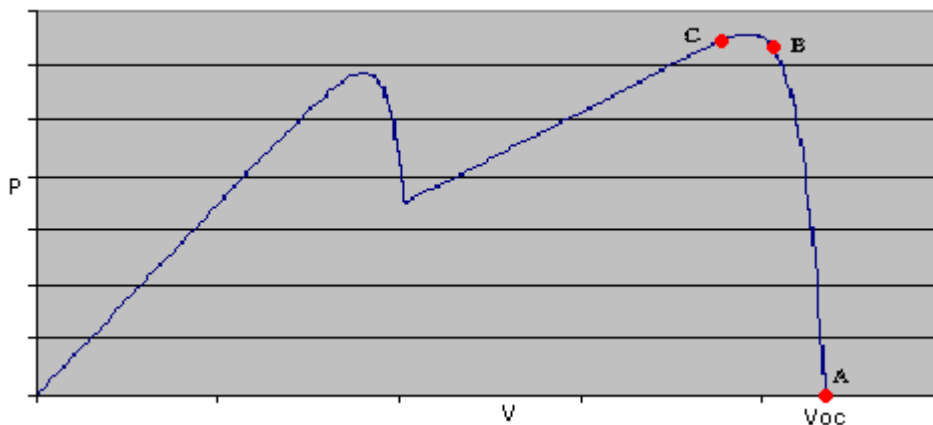
Ο τρόπος λειτουργίας της κλασσικής μεθόδου MPPT φαίνεται στο σχήμα 75 και έχει περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.



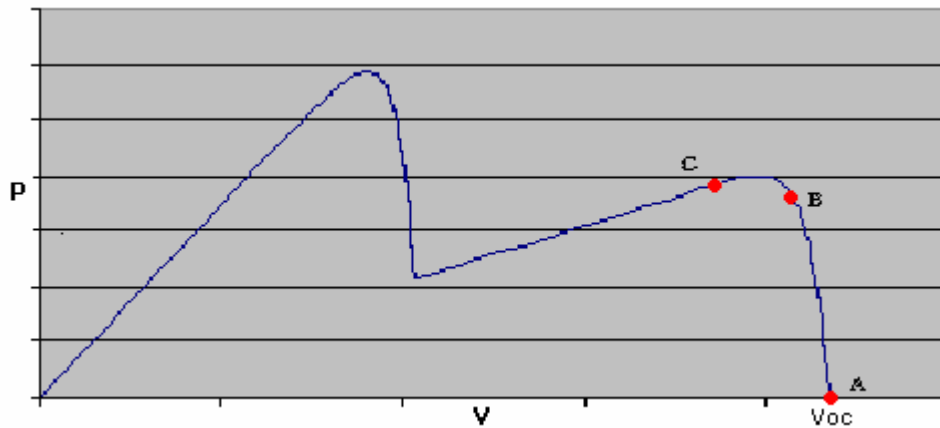
Σχήμα 75. Απεικόνιση κλασσικής μεθόδου MPPT

Ο αλγόριθμος ξεκινά να εκτελείται από το σημείο A και με συνεχείς μεταβολές της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος ελέγχου του μετατροπέα μεταβάλλεται η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου και καταλήγει σε μια ταλάντωση μεταξύ των σημείων B και C, όπου διαπιστώνεται ότι είναι το σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η απόσταση μεταξύ των σημείων B και C και επομένως η ακρίβεια εύρεσης του ζητούμενου σημείου εξαρτάται κυρίως από το βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος ελέγχου του μετατροπέα. Όσο μικρότερο είναι αυτό το βήμα τόσο πιο μικρή είναι αυτή η απόσταση και επομένως επιτυγχάνεται περισσότερη ακρίβεια. Ωστόσο με μικρό βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής η σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος επιτυγχάνεται σε περισσότερο χρόνο σε σύγκριση με τη χρήση μεγαλύτερου βήματος μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος που ελέγχει το διακόπτη του μετατροπέα. Επομένως η σχεδίαση τέτοιων συστημάτων θα πρέπει να συμβιβάζει τις απαιτήσεις σε ακρίβεια με την ταχύτητα σύγκλισης που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα σε μεταβολές της ακτινοβολίας.

Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση που η φωτοβολταϊκή συστοιχία σκιάζεται μερικώς, γιατί τότε η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης μπορεί να έχει τη μορφή που φαίνεται στα σχήματα 76 και 77.



Σχήμα 76. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης για ένα μερικώς σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπου το ολικό μέγιστο παρουσιάζεται σε υψηλότερη τάση από την τάση στην οποία παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο



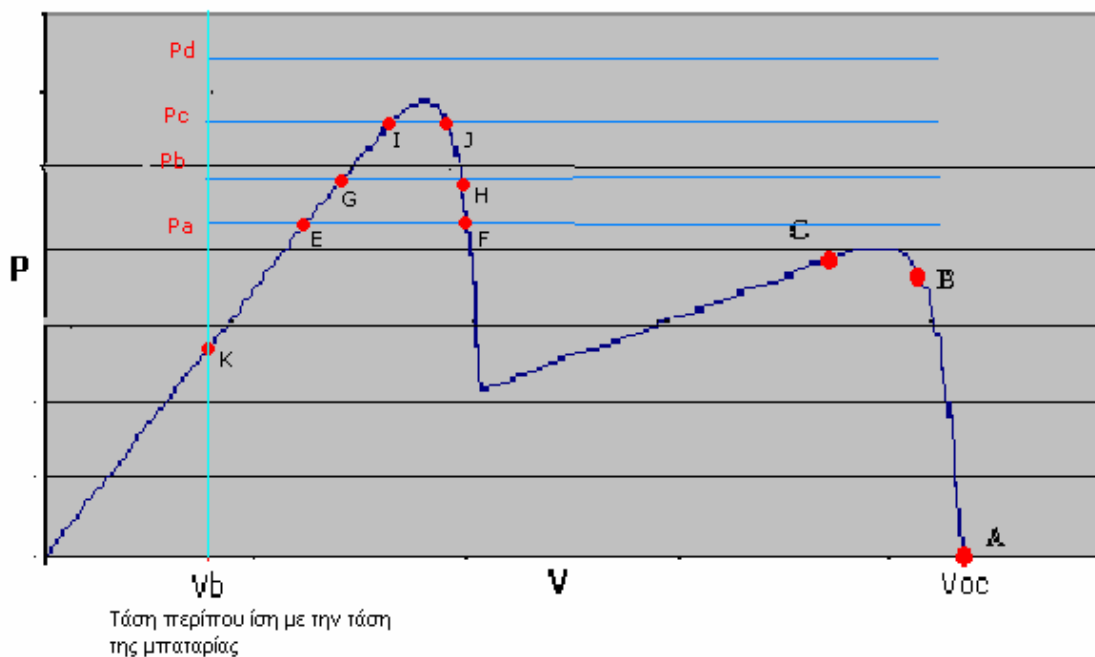
Σχήμα 77. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης για ένα μερικώς σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπου το ολικό μέγιστο παρουσιάζεται σε χαμηλότερη τάση από την τάση στην οποία παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης παρουσιάζει δυο τοπικά μέγιστα στην περίπτωση της μερικής σκίασης. Έτσι εάν εφαρμοστεί ο κλασσικός αλγόριθμος σε μια τέτοια περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος σε κάθε κατάσταση σκίασης. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο σχήμα 76, ο αλγόριθμος ανάλογα με το σημείο εκκίνησης συγκλίνει στο τοπικό μέγιστο που αποτελεί και το ολικό μέγιστο, αλλά στο σχήμα 77 το σημείο σύγκλισης είναι απλά ένα τοπικό μέγιστο.

Λόγω της αδυναμίας αυτής, που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται έως σήμερα, προτείνεται η παρακάτω επέκταση της κλασσικής μεθόδου, ώστε να μπορεί να χειριστεί τις διαφορετικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται στη χαρακτηριστική καμπύλη, λόγω μερικής σκίασης.

Η βασική ιδέα που εφαρμόζεται στην υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος περιγράφεται στα σχήματα 78 και 79 και βασίζεται στο γεγονός ότι ο μικροελεγκτής ανά τακτά χρονικά διαστήματα αλλάζει τον τρόπο λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, έτσι ώστε αυτός να μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο με σταθερή ισχύ, ανεξάρτητα από την τάση εισόδου του μετατροπέα. Το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε για την εναλλαγή του τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα είναι ένα λεπτό, αφού αυτό το διάστημα είναι αρκετό για να παρακολουθείται οποιαδήποτε σημαντική μεταβολή της ακτινοβολίας του ήλιου. Ο

προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: ο μικροελεγκτής αρχικά ελέγχει τον μετατροπέα με εφαρμογή ενός PWM σήματος μεταβαλλόμενης σχετικής διάρκειας αγωγής και με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, έτσι ώστε να εκτελείται ο κλασικός τρόπος εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα να συγκλίνει κάποια στιγμή στην περιοχή μεταξύ των σημείων B και C που φαίνονται στο σχήμα 77. Αφού περάσει ο χρόνος που έχει επιλεγεί αλλάζει ο τρόπος λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και ελέγχεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να διατηρεί σταθερή την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου (και επομένως την ισχύ εισόδου του). Στο σημείο αυτό ο μικροελεγκτής είναι ικανός να αυξάνει την παρεχόμενη, από το φωτοβολταϊκό στοιχείο ισχύ με τον τρόπο που θα περιγραφεί στη συνέχεια. Έχοντας δεδομένη αυτή την ικανότητα του μικροελεγκτή ξεκινά η διαδικασία που φαίνεται στο σχήμα 78.



Σχήμα 78. Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του συστήματος που αναπτύχθηκε

Αμέσως πριν την αλλαγή λειτουργίας του μετατροπέα το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται μεταξύ των σημείων B και C. Μόλις αυξηθεί η παρεχόμενη από το φωτοβολταϊκό στοιχείο ισχύς, το καινούριο σημείο λειτουργίας βρίσκεται από το σημείο τομής της γραμμής P_A και της χαρακτηριστικής καμπύλης. Από το

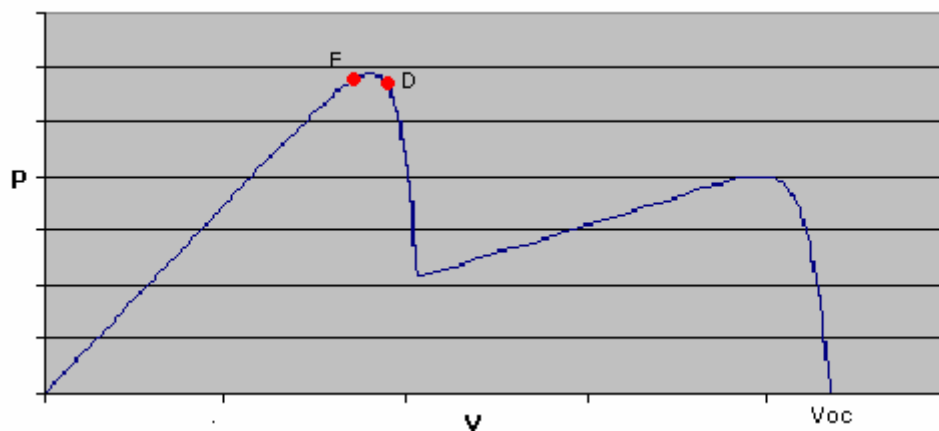
σχήμα φαίνεται, ότι τα πιθανά καινούρια σημεία λειτουργίας είναι δυο (E ή F). Αποδεικνύεται [7] ότι τα από τα δυο πιθανά σημεία λειτουργίας το σημείο F είναι ευσταθές ενώ το E είναι ασταθές.

Τη χρονική αυτή στιγμή ο μικροελεγκτής υπολογίζει την ισχύ εισόδου του μετατροπέα και τη συγκρίνει με την τιμή που είχε ήδη αποθηκεύσει, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της πρώτης λειτουργίας του μετατροπέα. Επιπλέον αποθηκεύει την μετρούμενη τιμή ισχύος και τάσης για το καινούριο σημείο λειτουργίας. Εάν από τη σύγκριση που έγινε προκύψει ότι η νέα τιμή ισχύος είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη, το οποίο σημαίνει ότι το προηγούμενο σημείο μέγιστης ισχύος ήταν τοπικό, τότε ο μικροελεγκτής αυξάνει και πάλι την παρεχόμενη ισχύ και το αποτέλεσμα είναι το νέο σημείο λειτουργίας να προκύπτει από την τομή της γραμμής P_B με τη χαρακτηριστική καμπύλη (σημεία G ή H). Το ευσταθές σημείο στο οποίο συγκλίνει ο αλγόριθμος στην περίπτωση αυτή είναι το H. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η παρεχόμενη από το φωτοβολταϊκό στοιχείο ισχύς γίνει μικρότερη από την τιμή που είχε μετρηθεί προηγουμένως. Συγκεκριμένα για το σχήμα 78, η ισχύς αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη γραμμή P_C (σημεία I ή J) με ευσταθές σημείο το J. Την επόμενη φορά που θα γίνει αύξηση της ισχύος εισόδου το σύστημα θα έπρεπε να συγκλίνει στη γραμμή P_D . Επειδή όμως η γραμμή αυτή δεν τέμνει τη χαρακτηριστική καμπύλη σε κανένα σημείο το σύστημα θα συγκλίνει στο σημείο εκείνο της χαρακτηριστικής που δίνει τάση περίπου ίση με αυτή της μπαταρίας που βρίσκεται στην έξοδο του μετατροπέα και είναι το σημείο K του σχήματος 78, το οποίο είναι επίσης ευσταθές.

Στο σημείο αυτό η παρεχόμενη ισχύς στο μετατροπέα είναι μικρότερη από την τελευταία που είχε μετρηθεί, η οποία στην προκειμένη περίπτωση, ήταν αυτή που προέκυπτε από το σημείο τομής της γραμμής P_C (σημείο J) του σχήματος 78 με τη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης. Αυτό αποτελεί και την αναγκαία συνθήκη για τον μικροελεγκτή, ο οποίος τη στιγμή αυτή αλλάζει τον τρόπο ελέγχου του διακόπτη του μετατροπέα και επανέρχεται στον έλεγχο με PWM σήμα με μεταβαλλόμενη σχετική διάρκεια αγωγής. Αυτό που πρέπει να γίνει στη συνέχεια είναι η ανίχνευση του τελευταίου σημείου που έδινε τη μέγιστη ισχύ. Αυτό μπορεί να γίνει πολύ εύκολα από τη στιγμή που ο μικροελεγκτής έχει αποθηκεύσει την τάση εισόδου του μετατροπέα που έδινε την ισχύ αυτή. Το μόνο που πρέπει να γίνει είναι μια σταδιακή μείωση της σχετικής διάρκειας αγωγής μέχρι να επιτευχθεί η ζητούμενη

τάση. Αυτό επιτυγχάνεται με συνεχείς συγκρίσεις της μετρούμενης τάσης εισόδου με την αποθηκευμένη τιμή της τάσης και μείωση της σχετικής διάρκειας αγωγής, όσο η μετρούμενη τιμή είναι μικρότερη από την αποθηκευμένη. Το σημείο στο οποίο καταλήγει ο αλγόριθμος, μετά από την διαδικασία που μόλις περιγράφηκε, δεν είναι το σημείο μέγιστης ισχύος, αλλά ένα σημείο πολύ κοντά σε αυτό. Επομένως για να μπορέσει να βρεθεί το σημείο μέγιστης ισχύος, ο μικροελεγκτής θα πρέπει να συνεχίσει την εκτέλεση του κλασσικού αλγορίθμου για MPPT, που έχει ως αποτέλεσμα τη σύγκλιση του συστήματος μεταξύ των σημείων D και E που φαίνεται στο σχήμα 79 και είναι πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Όπως και στην κλασσική μέθοδο που ακολουθείται για MPPT, έτσι και εδώ η ακρίβεια σύγκλισης εξαρτάται από το βήμα που επιλέγεται για την μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής.

Από τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνεται το πως γίνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου στο σημείο μέγιστης ισχύος, ακόμα και αν η εκτέλεση του αλγορίθμου ξεκινήσει από το σημείο A του σχήματος 77. Επιπλέον ο αλγόριθμος εγγυάται τη σύγκλιση στο ολικό μέγιστο ακόμα και όταν η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει περισσότερα από δυο τοπικά μέγιστα, περίπτωση που παρατηρείται κατά τη μερική σκίαση σε συστοιχίες που αποτελούνται από περισσότερα από δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή σε πλαίσια που έχουν περισσότερες από δύο διόδους παράκαμψης. Παραδείγματα τέτοιων χαρακτηριστικών φαίνονται στα σχήματα 50 έως 52, όπου φαίνεται και η σχετική θέση των μεγίστων ανάλογα με την ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε πλαίσιο.

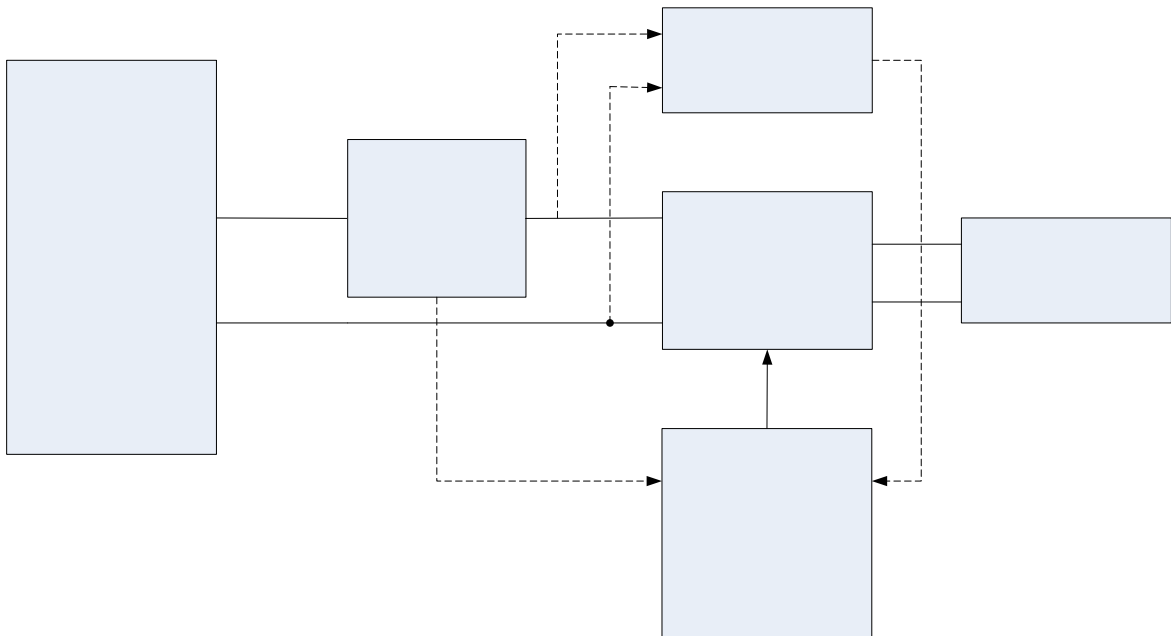


Σχήμα 79. Η σύγκλιση στο ολικό μέγιστο

Το σύστημα που αναπτύχθηκε για την πειραματική επιβεβαίωση της μεθόδου που έχει περιγραφεί παραπάνω αποτελείται από δυο φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, τον μικροελεγκτή, τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, τα υποκυκλώματα που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο και την αλλαγή του τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα, τα αισθητήρια ρεύματος και τάσης και τέλος από τη μπαταρία που αποτελεί το φορτίο του μετατροπέα.

Το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 80.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μια αναλυτική περιγραφή των κυκλωμάτων που αποτελούν το σύστημα που αναπτύχθηκε και φαίνονται στο γενικό διάγραμμα του σχήματος 80.



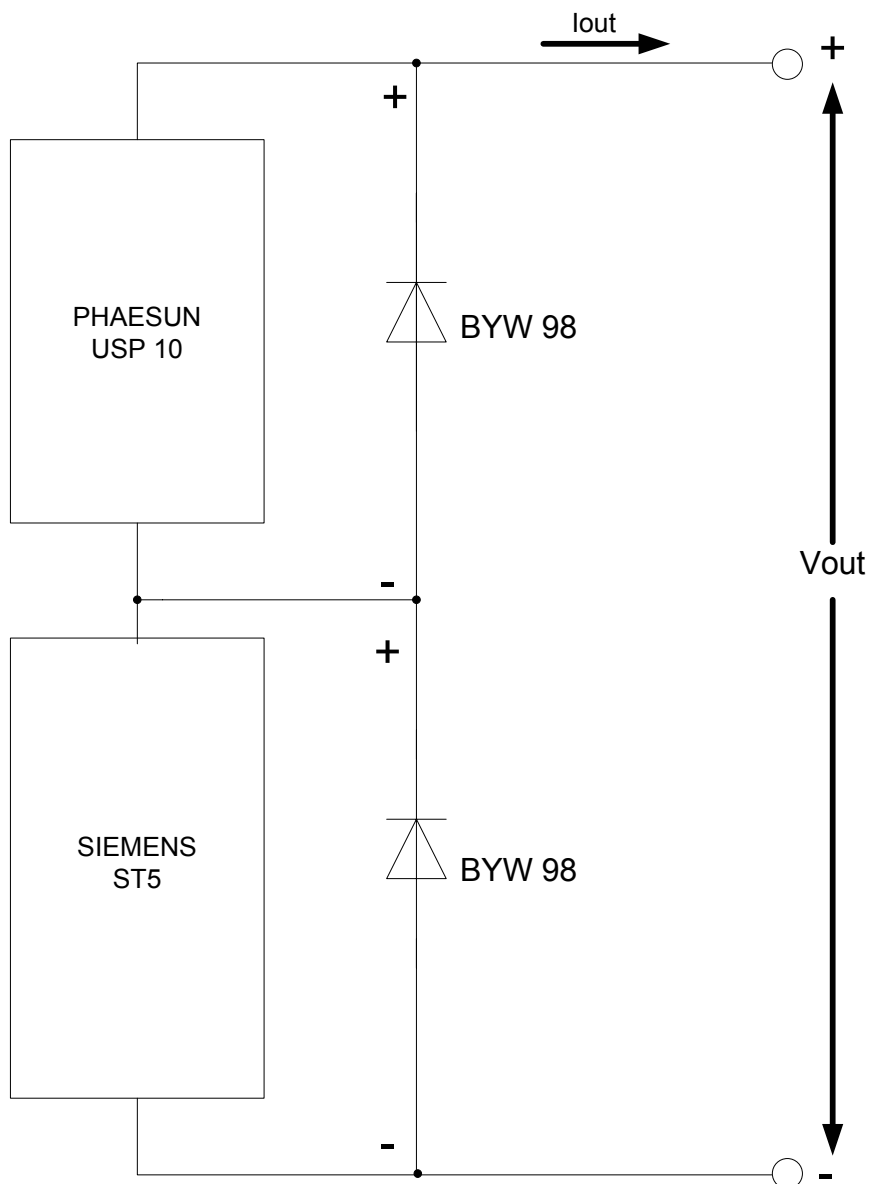
Σχήμα 80. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε

6.2 Συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για την υλοποίηση και δοκιμή του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία συνδέονται σε σειρά και είναι ικανά να παράγουν συνολική ισχύ 15 W, όταν λειτουργούν κάτω από κανονικές συνθήκες. Συγκεκριμένα το πρώτο παράγει ισχύ 10 W και το δεύτερο 5 W. Η επιλογή δυο διαφορετικών στοιχείων έγινε έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση

συνθηκών μερικής σκίασης. Όπως δείχθηκε παραπάνω δυο ανόμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία δέχονται την ίδια ακτινοβολία, συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο που συμπεριφέρονται δυο όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία και τα οποία δέχονται διαφορετική ακτινοβολία.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι το USP10 της PHAESUN και το ST5 της SIEMENS, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Συγχρόνως, παράλληλα με το κάθε ένα από αυτά έχει συνδεθεί μια δίοδος παράκαμψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 81.

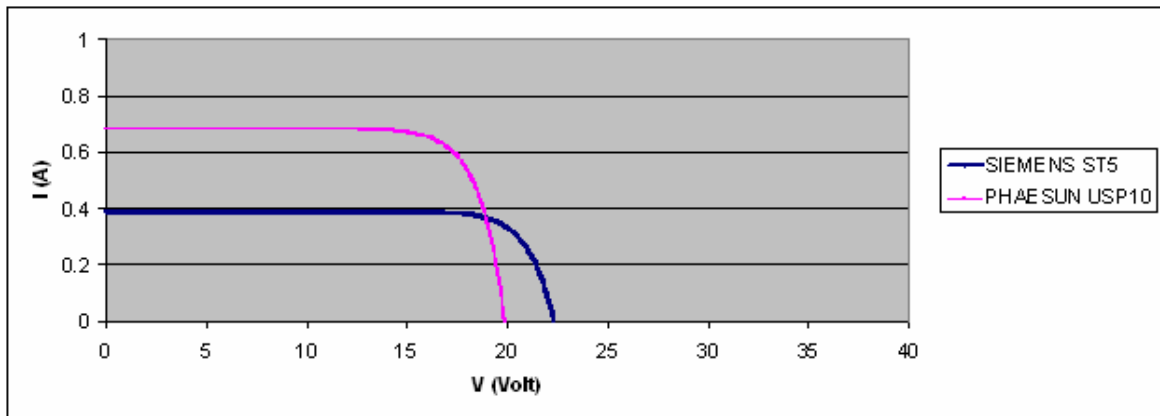


Σχήμα 81. Η συστοιχία των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιήθηκε

Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών φαίνονται στους Πίνακες 2 και 3, ενώ οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης για συνθήκες ακτινοβολίας 1 kW/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C φαίνονται στο σχήμα 82.

Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά του PHAESUN USP10	
Μοντέλο	PHAESUN USP10
P_{mpp}	10 W
I_{mpp}	0.59 A
V_{mpp}	16.9 V
V_{oc}	20.5 V
I_{sc}	0.68 A

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά του SIEMENS ST5	
Μοντέλο	SIEMENS ST5
P_{mpp}	5 W
I_{mpp}	0.32 A
V_{mpp}	15.6 V
V_{oc}	22.9 V
I_{sc}	0.39 A



Σχήμα 82. Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης των δυο στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για ακτινοβολία εντάσεως 1000 W/m^2

6.3 Αισθητήριο ρεύματος – Αισθητήριο Hall

Για τη μέτρηση του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα και επομένως του ρεύματος εξόδου της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών, χρησιμοποιήθηκε ένα αισθητήριο Hall που φαίνεται στο σχήμα 83.



Σχήμα 83. Το αισθητήριο Hall που χρησιμοποιήθηκε

Για τη μέτρηση του ρεύματος, το καλώδιο που φέρει το ρεύμα εξόδου της συστοιχίας τυλίγεται σε 5 σπείρες γύρω από το πυρήνα του αισθητηρίου Hall. Το κέρδος που μετρήθηκε πειραματικά για το αισθητήριο ήταν $G_H = 0.18 \text{ V/A}$. Ο τρόπος σύνδεσης του αισθητηρίου με το υπόλοιπο κύκλωμα, καθώς και ο τρόπος ενίσχυσης του σήματος εξόδου του αναλύεται παρακάτω.

6.4 Η μπαταρία που χρησιμοποιείται σαν φορτίο του μετατροπέα

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 84, τάσης 12 V και χωρητικότητας 3.4Ah.



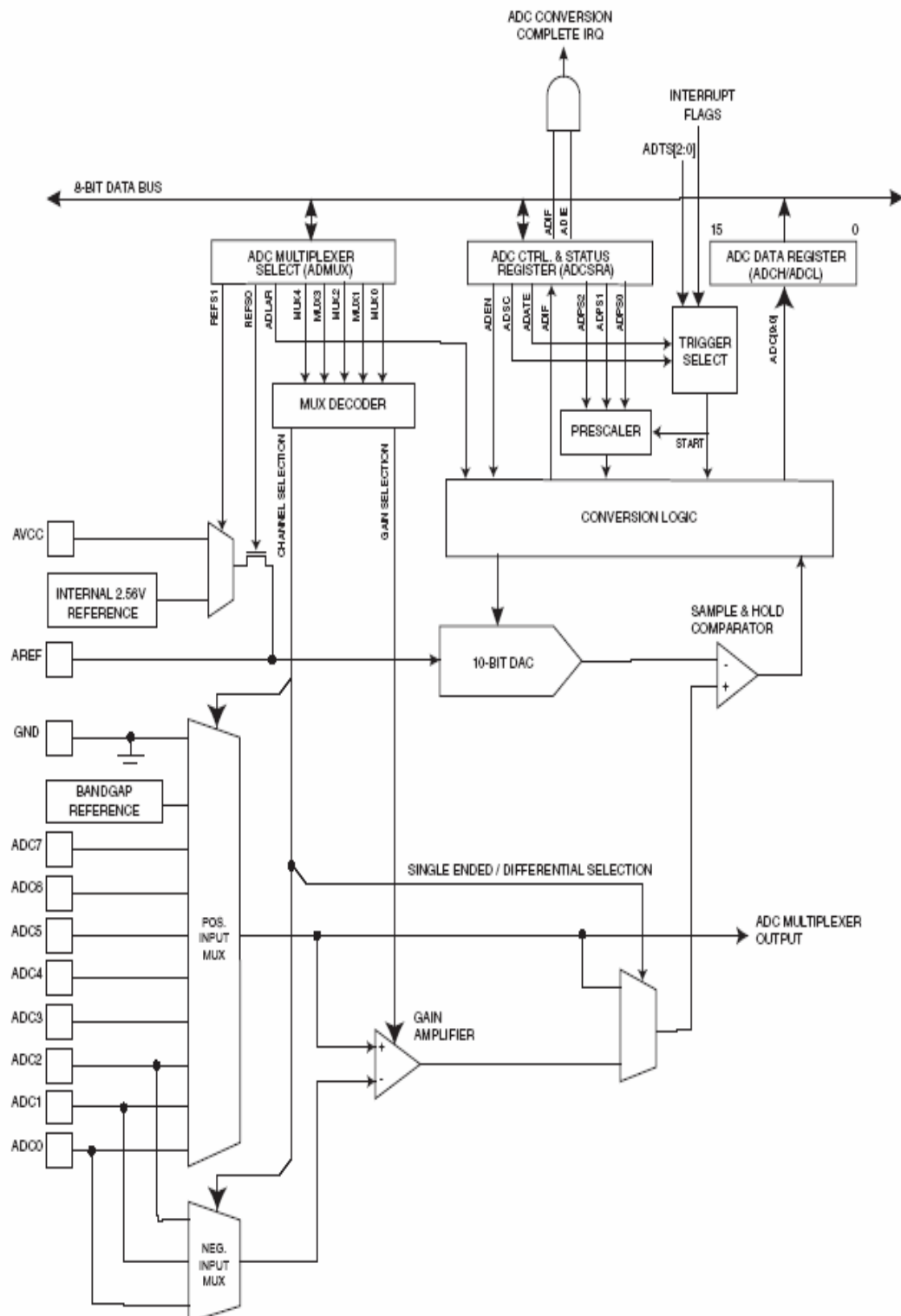
Σχήμα 84. Η μπαταρία που αποτελούσε το φορτίο του μετατροπέα

6.5 Ο μικροελεγκτής και το αναπτυξιακό του

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας είναι ο AVR ATMEGA8535 της ATMEL και το αναπτυξιακό σύστημα STK500 που χρειάζεται για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή έγινε διότι διαθέτει on-chip A/D μετατροπέα καθώς και έξοδο PWM σήματος μεταβαλλόμενης σχετικής διάρκειας αγωγής, τα οποία αποτελούν απαραίτητα χαρακτηριστικά για την υλοποίηση και σωστή λειτουργία του συστήματος που αναπτύχθηκε.

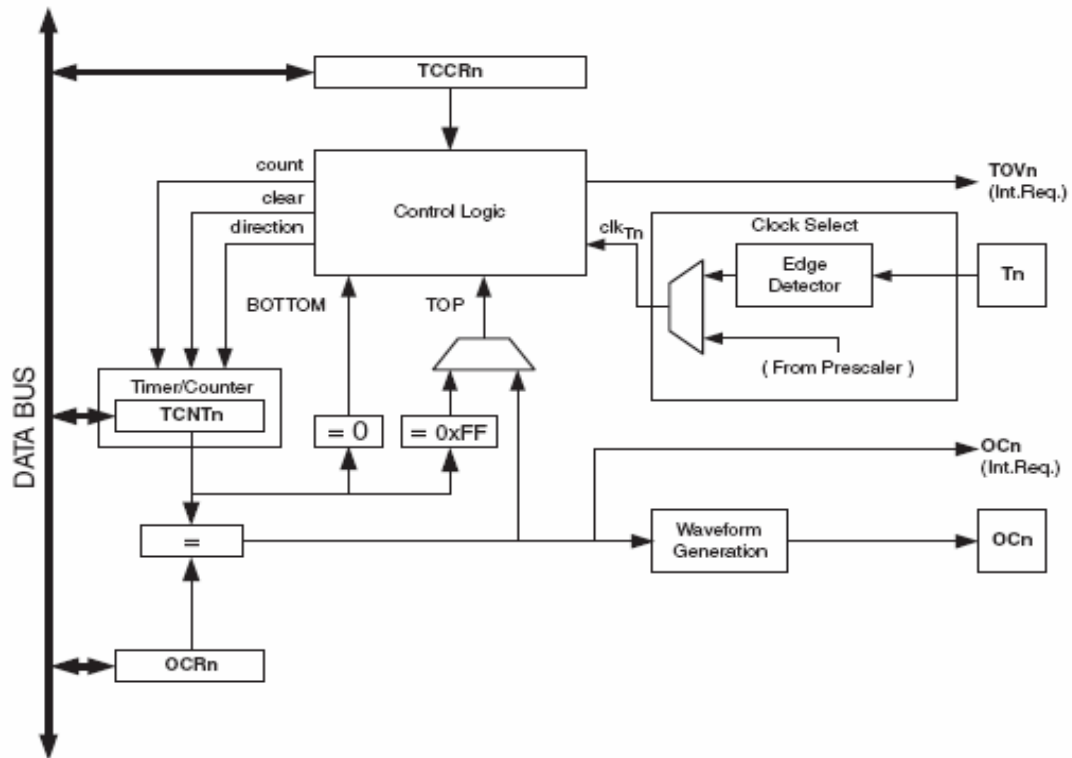
Ο A/D μετατροπέας που διαθέτει ο μικροελεγκτής μπορεί να εκτελεί μια μετατροπή με ακρίβεια 10-bit. Ο μετατροπέας συνδέεται σε έναν αναλογικό πολυπλέκτη με 8 κανάλια, τα οποία επιτρέπουν να υπάρχουν 8 διαφορετικές εισόδους στον A/D μετατροπέα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα δυο πρώτα κανάλια, ένα για τη δειγματοληψία της τάσης εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και το δεύτερο για τη δειγματοληψία του ρεύματος εισόδου. Η ακρίβεια των 10-bit

που διαθέτει ο μετατροπέας, ήταν ικανοποιητική για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Ένα σχηματικό διάγραμμα του A/D μετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 85.

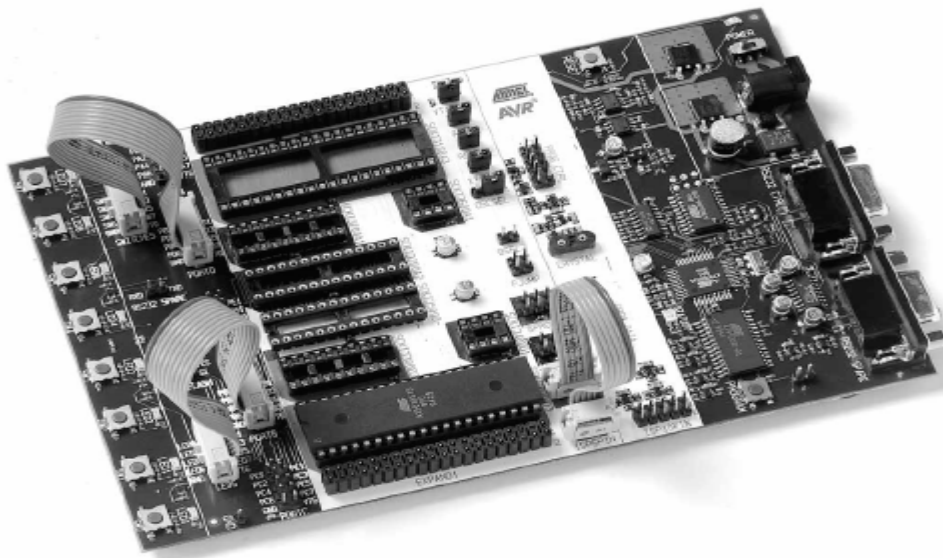


Σχήμα 85. Σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα A/D που διαθέτει ο μικροελεγκτής

Επιπλέον ο μικροελεγκτής διαθέτει τέσσερις εξόδους PWM σήματος με μεταβλητή σχετική διάρκεια αγωγής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο μία από αυτές, αφού υπήρχε μόνο ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης που έπρεπε να ελεγχθεί. Το σήμα PWM παράγεται από τη σύγκριση της τιμής ενός 8-bit μετρητή, ο οποίος μετρά συνεχώς και μιας τιμής που αποθηκεύεται σε έναν καταχωρητή 8-bit. Η σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος αυτού καθορίζεται από την τιμή που έχει ο καταχωρητής αυτός. Αλλάζοντας την τιμή αυτή, μπορεί να αλλαχθεί και η σχετική διάρκεια αγωγής του παλμού που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, ο καταχωρητής είναι των 8-bit, υπάρχουν 256 διαφορετικές περιπτώσεις για την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής. Αυτό σημαίνει ότι μεταβολή κατά 1 του καταχωρητή αυτού επιφέρει μεταβολή κατά 0.390625% στη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος PWM. Στην παρούσα εργασία, το βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής, επιλέχθηκε να είναι 2, που σημαίνει μεταβολή κατά 0.78125% στη σχετική διάρκεια αγωγής του παλμού. Η τιμή αυτή αποδείχθηκε ότι προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα στη σύγκλιση του αλγορίθμου στο σημείο μέγιστης ισχύος. Συγκεκριμένα για μικρότερη τιμή μεταβολής, το σύστημα δεν λειτουργούσε σωστά, επειδή δεν ανίχνευε αλλαγή στην τάση ή το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα, ενώ για μεγαλύτερη τιμή, υπήρχε μεγαλύτερη ταλάντωση γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σχήμα 86 φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του μετρητή που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του PWM σήματος. Επίσης στο σχήμα φαίνεται ο καταχωρητής OCR, όπου αποθηκεύεται η τιμή που καθορίζει τη σχετική διάρκεια αγωγής. Η συχνότητα του PWM σήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι ίση με 39.0625 KHz που προκύπτει ύστερα από διαίρεση που γίνεται εσωτερικά στο μικροελεγκτή, της συχνότητας των 10 MHz του εξωτερικού κρυστάλλου που χρησιμοποιήθηκε. Αναλυτικότερη περιγραφή των χαρακτηριστικών του μικροελεγκτή και του τρόπου προγραμματισμού του αναφέρονται στο [10].



Σχήμα 86. Σχηματικό διάγραμμα του μετρητή που παράγει το PWM σήμα

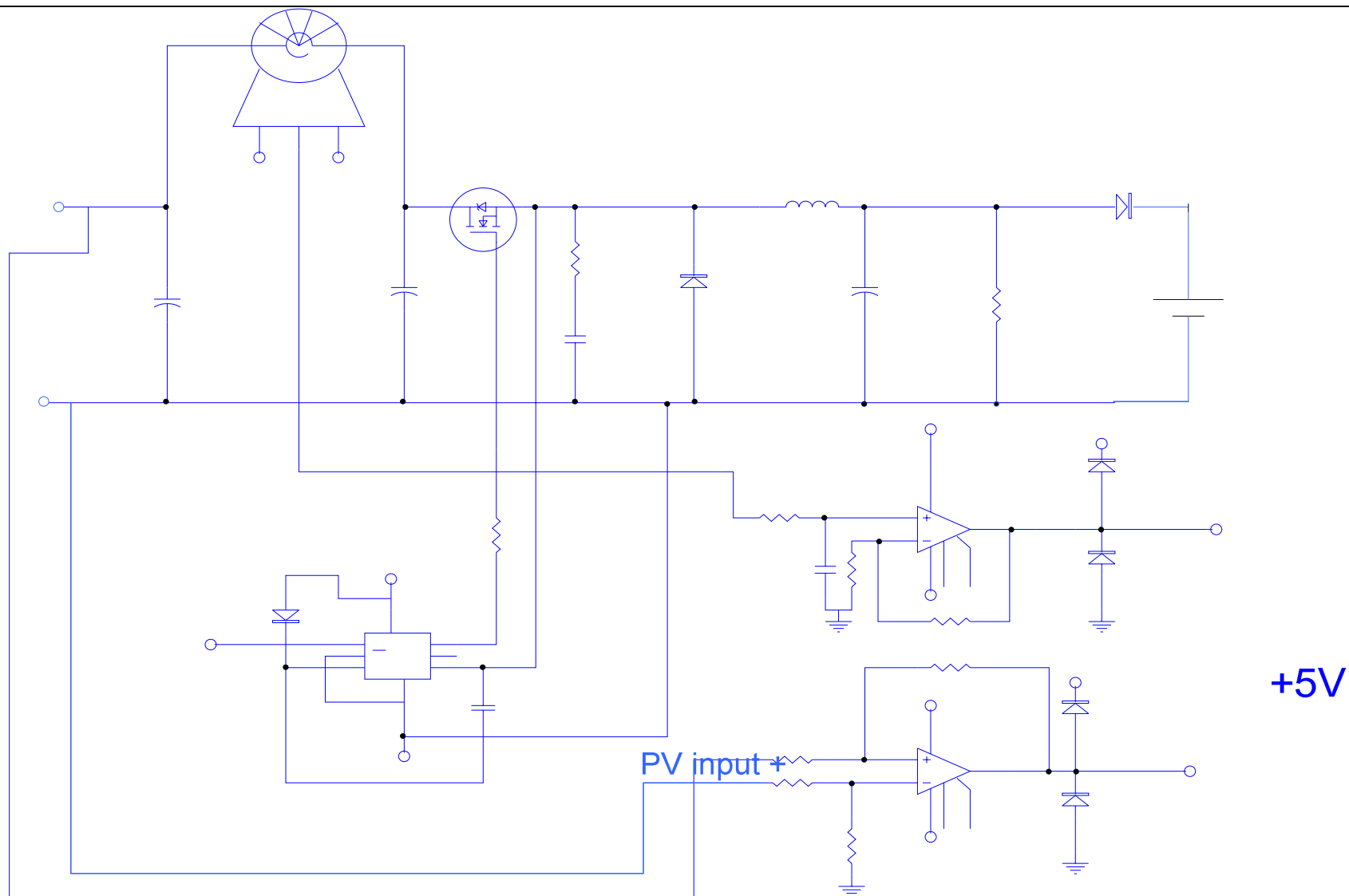


Σχήμα 87. Το αναπτυξιακό σύστημα STK500 που χρησιμοποιήθηκε

Για την διασύνδεση του μικροελεγκτή με το υπόλοιπο κύκλωμα καθώς επίσης και για τον προγραμματισμό του χρησιμοποιήθηκε το αναπτυξιακό STK500 της ATMEL, το οποίο διαθέτει μια σειριακή θύρα για την επικοινωνία με τον υπολογιστή, ώστε να γίνεται ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή, καθώς και υποδοχές για τη διασύνδεση του μικροελεγκτή με το υπόλοιπο κύκλωμα. Μια φωτογραφία του αναπτυξιακού που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 87.

6.6 Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για τη διασύνδεση της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη μπαταρία που αποτελεί και το φορτίο του συστήματος. Στο σχήμα 88 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα, το αισθητήριο Hall που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του ρεύματος, καθώς και τα αισθητήρια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης από τον μικροελεγκτή.



Σχήμα 88. Σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και των περιφερειακών αισθητηρίων που χρησιμοποιήθηκαν

Στο παραπάνω σχηματικό διάγραμμα φαίνεται ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης που χρησιμοποιήθηκε. Αυτός αποτελείται από τον πυκνωτή εξομάλυνσης στην είσοδο, από τον διακόπτη, από μια flyback δίοδο και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο που ελαττώνει τις διακυμάνσεις της τάσης εξόδου. Ο πυκνωτής εξομάλυνσης έχει χωρητικότητα 4700 μF και ο διακόπτης υλοποιείται με τη χρήση του MOSFET ισχύος IRFZ44N. Τέλος το χαμηλοπερατό φίλτρο αποτελείται από έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή χωρητικότητας 470 μF και ένα πηνίο που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο με αυτεπαγωγή 4.5 mH. Επίσης στο παραπάνω σχηματικό διάγραμμα φαίνεται ο driver που χρησιμοποιήθηκε για την οδήγηση του διακόπτη του μετατροπέα και ο τρόπος που αυτός συνδέεται στο μετατροπέα. Ο driver που χρησιμοποιήθηκε είναι ο IR2104. Η επιλογή του σήματος εισόδου του προέρχεται από έναν πολυπλέκτη, η λειτουργία του οποίου θα περιγραφεί στη συνέχεια. Τέλος στο σχήμα 88 φαίνονται τα αισθητήρια ρεύματος και τάσης που συνδέονται στον μικροελεγκτή. Το αισθητήριο ρεύματος υλοποιείται με ένα RC-φίλτρο, η έξοδος του οποίου είναι η μέση τιμή της κυματομορφής του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η έξοδος του RC-φίλτρου συνδέεται με τον μικροελεγκτή μέσω ενός τελεστικού ενισχυτή, ο οποίος ενισχύει το σήμα αυτό, ώστε να επιτευχθεί περισσότερη ακρίβεια στη μέτρηση της μέσης τιμής του ρεύματος. Επίσης προτείνεται η χρήση δυο διόδων στην έξοδο του ενισχυτή, οι οποίες συνδέονται με τον τρόπο που φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα και εξασφαλίζουν ότι η τάση εξόδου του ενισχυτή θα είναι σε επίπεδα TTL (0-5 V), αφού οι είσοδοι του μικροελεγκτή δέχονται μόνο TTL σήματα. Επίσης υπάρχει και ένα αισθητήριο μέτρησης της τάσης εισόδου του μετατροπέα, το οποίο υλοποιήθηκε με έναν διαφορικό ενισχυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 88 και συνδέεται στον μικροελεγκτή με τη χρήση δυο διόδων για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω. Τέλος φαίνεται και ο τρόπος που συνδέεται το αισθητήριο Hall στο μετατροπέα, ώστε να μετρά το ρεύμα εισόδου του.

6.7 Κύκλωμα παραγωγής της τάσης ελέγχου V_c

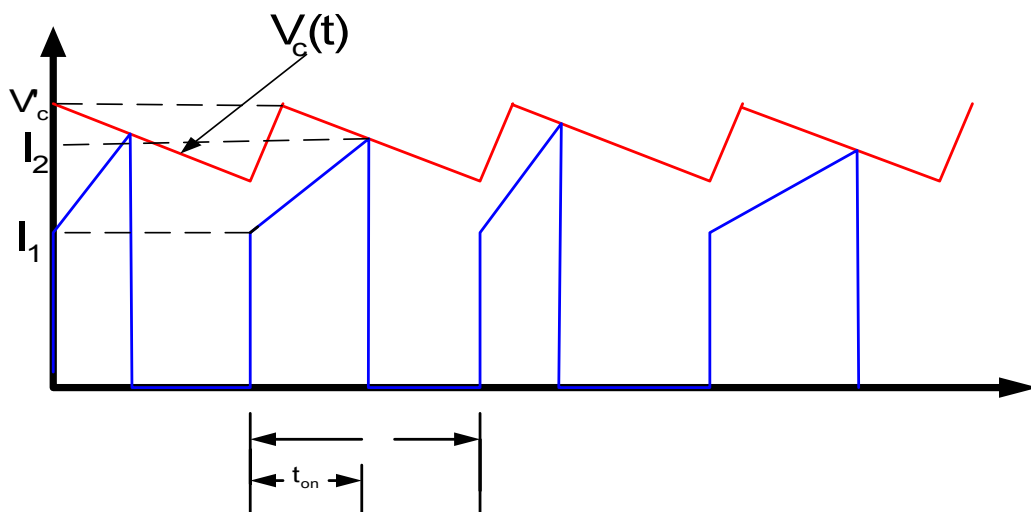
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τη σωστή εκτέλεση του αλγορίθμου, απαιτείται ο μετατροπέας να ελέγχεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να διατηρεί την ισχύ εισόδου του σταθερή ανεξάρτητα από την τάση εισόδου του. Η υλοποίηση της απαίτησης αυτής βασίζεται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται, όταν ο μετατροπέας

λειτουργεί με έλεγχο του ρεύματος εισόδου του. Συγκεκριμένα, ο τρόπος ελέγχου που χρησιμοποιείται είναι ο έλεγχος με σταθερή συχνότητα και έναυση κατά την άνοδο του παλμού. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής είναι ότι η κυματομορφή του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή σταθερής συχνότητας και μεταβλητού offset που ρυθμίζεται από το μικροελεγκτή. Λόγω της σταθερής συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής, επιτυγχάνεται η μια απαίτηση της μεθόδου για σταθερή συχνότητα. Όσο για την έναυση στην αρχή του παλμού, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός D-Flip Flop, η λειτουργία και η συνδεσμολογία του οποίου θα δειχθούν στη συνέχεια.

6.7.1 Θεωρητική απόδειξη της μεθόδου που αναπτύχθηκε

Πριν γίνει αναλυτική περιγραφή του κυκλώματος που παράγει το σήμα που ελέγχει το διακόπτη του μετατροπέα, όταν αυτός λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου, θα παρατεθεί η θεωρητική απόδειξη της μεθόδου που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα θα αποδειχθεί ότι, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο η ισχύς εισόδου του είναι ανεξάρτητη από την τάση εισόδου και εξαρτάται μόνο από την τάση ελέγχου που καθορίζει το offset της τριγωνικής κυματομορφής και από γνωστές παραμέτρους του κυκλώματος του μετατροπέα.

Στο σχήμα 89 φαίνονται με μπλε γραμμή το ρεύμα του πηνίου και με κόκκινη γραμμή η τάση ελέγχου V_c .



Σχήμα 89. Σύγκριση του ρεύματος εισόδου με την πριονωτή κυματομορφή

Έστω οι στιγμιαίες τιμές ρεύματος I_1 και I_2 που φαίνονται στο σχήμα 89. Από την θεωρία που ισχύει για τους μετατροπείς υποβιβασμού τάσης, ο χρόνος t_{on} , που ο διακόπτης είναι κλειστός δίνεται από την εξής σχέση:

$$V_o = DV_{in} \Rightarrow V_o = \frac{t_{on}}{T} V_{in} \Rightarrow t_{on} = \frac{V_o}{V_{in}} T \quad (89)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου δίνεται από την εξής σχέση:

$$\bar{i} = \int_0^{t_{on}} \left(I_1 + \frac{V_{in} - V_o}{L} t \right) dt = \frac{1}{T} I_1 t_{on} + \frac{1}{T} \frac{V_{in} - V_o}{L} \frac{t_{on}^2}{2} \quad (90)$$

Στο σημείο τομής της κυματομορφής $i(t)$ και της $V_c(t)$ ισχύει ότι:

$$I_1 + \frac{V_{in} - V_o}{L} t_{on} = V_c (= I_2) \Rightarrow I_1 = V_c - \frac{V_{in} - V_o}{L} t_{on} \quad (91)$$

Τότε από τις εξισώσεις (90) και (91) και ύστερα από πράξεις προκύπτει ότι:

$$\bar{i} = V_c \frac{V_o}{V_{in}} - \frac{V_o^2 T}{2LV_{in}} + \frac{V_o^3 T}{2LV_{in}^2} \quad (92)$$

Επίσης η εξίσωση (91) μπορεί να γραφεί, χρησιμοποιώντας το χρόνο που ο διακόπτης είναι ανοικτός, ως εξής:

$$I_1 - \frac{V_o}{L} t_{off} = V_c \Rightarrow I_1 - \frac{V_o}{L} (T - t_{on}) = V_c \Rightarrow I_1 = V_c + \frac{V_o}{L} (T - t_{on}) \quad (93)$$

Από τις εξισώσεις (90) και (93) προκύπτει ότι:

$$\bar{i} = \frac{t_{on}}{T} V_c + \frac{V_o}{L} t_{on} - \frac{3}{2} \frac{V_o}{L} \frac{t_{on}^2}{T} + \frac{1}{T} \frac{V_{in}}{L} \frac{t_{on}^2}{2} \quad (94)$$

Από την (92) προκύπτει ότι η μέση ισχύς εισόδου του μετατροπέα δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{P} = V_{in} \bar{i} = V_{in} \bar{i} = V_c V_o - \frac{V_o^2 T}{2L} + \frac{V_o^3 T}{2LV_{in}} \quad (95)$$

Θέτοντας $V_c = V_c' - \frac{V_o^2}{2LV_{in}}$ προκύπτει ότι:

$$\bar{P} = V_c' V_o - \frac{V_o^2 T}{2L} \quad (96)$$

Η εξίσωση (90) αποδεικνύει ότι με τις παραπάνω υποθέσεις, ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί με σταθερή ισχύ στην είσοδο, η οποία δεν εξαρτάται από την τάση εισόδου αλλά μόνο από την τάση ελέγχου V_c' , που παράγεται από τον μικροελεγκτή, την τάση εξόδου, την περίοδο μετάβασης και την τιμή αυτεπαγωγής του πηνίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να θεωρηθεί σχετικά σταθερή και ίση με την τάση της μπαταρίας.

6.7.2 Περιγραφή κυκλώματος παραγωγής τάσης ελέγχου V_c

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, όταν αυτό λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου, το κύκλωμα ελέγχου θα πρέπει να περιέχει ένα κύκλωμα παραγωγής πριονωτής κυματομορφής καθώς επίσης και όλα τα απαραίτητα υποκυκλώματα που χρειάζονται για τις απαιτούμενες συγκρίσεις. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 90 και η λειτουργία του αναλύεται αμέσως παρακάτω.

Η απαιτούμενη πριονωτή κυματομορφή παράγεται από το κύκλωμα που φαίνεται στο κάτω αριστερά κομμάτι του σχηματικού διαγράμματος και το οποίο αποτελείται από το ολοκληρωμένο NE555 και διάφορες αντιστάσεις και πυκνωτές. Η πριονωτή κυματομορφή που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος αυτού έχει περίπου ίση με 45 kHz και πλάτος 3.2 V.

Επειδή η κυματομορφή που απαιτείται από τον έλεγχο πρέπει να έχει τη μορφή του σχήματος 90, θα πρέπει να αντιστραφεί η παραγόμενη κυματομορφή που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επιπλέον θα πρέπει να μειωθεί το πλάτος και να γίνει περίπου ίσο με 90 mV, ώστε να μπορεί να γίνει σωστά η σύγκριση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον αντιστροφέα που υλοποιείται με τον τελεστικό ενισχυτή U_6 , ο οποίος παράλληλα μειώνει και το πλάτος της κυματομορφής. Μέσω του ακόλουθου τάσης U_5 η έξοδος του κυκλώματος που περιέχει το ολοκληρωμένο 555 συνδέεται με τον αντιστροφέα και το αποτέλεσμα είναι μια κυματομορφή που έχει ίδια συχνότητα με πριν και πλάτος 90 mV.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να γίνει η σύγκριση θα πρέπει να προστεθεί κάποιο DC offset στην πριονωτή κυματομορφή.

Για την υλοποίηση του offset αυτού, χρησιμοποιήθηκε ο D/A μετατροπέας DAC0832. Συγκεκριμένα η είσοδος του μετατροπέα αποτελείται από μια ψηφιακή λέξη, η οποία προέρχεται από το μικροελεγκτή και η τιμή της καθορίζεται από αυτόν ανάλογα με τους ελέγχους που κάνει. Ο τρόπος που αλλάζει η τιμή της ψηφιακής λέξης αναφέρεται στη συνέχεια, στην παράγραφο όπου περιγράφεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε.

Για την έξοδο του D/A μετατροπέα ισχύει:

$$V_{out} = 1.23 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{D}{256} \right) \quad (97)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των αντιστάσεων προκύπτει ότι $V_{out} = 0.0144140 * D$, όπου D η ψηφιακή λέξη που παράγεται από την έξοδο του μικροελεγκτή, γραμμένη σε δεκαδική μορφή.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση V_{out} καθορίζει την τιμή του DC offset, V_c του σχήματος 89, που θα προστεθεί στην πριονωτή κυματομορφή. Η πρόσθεση αυτού του DC offset στην πριονωτή κυματομορφή που αναφέρθηκε προηγουμένως

γίνεται με τον αθροιστή που υλοποιείται από τον τελεστικό ενισχυτή U_7 του σχηματικού διαγράμματος.

Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει η σύγκριση της πριονωτής κυματομορφής και της τάσης εξόδου του αισθητηρίου Hall, που είναι ανάλογη του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα. Πριν γίνει αυτό θα πρέπει να ενισχυθεί η τάση εξόδου του Hall, ώστε να γίνει σωστή σύγκριση με την πριονωτή κυματομορφή. Αυτό επιτυγχάνεται με το διαφορικό ενισχυτή U_9 που φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα. Επιπλέον με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου R_{11} και του ακόλουθου τάσης U_8 , επιτυγχάνεται μια διόρθωση του offset της τάσης εξόδου του αισθητηρίου. Η διόρθωση αυτή είναι απαραίτητη, επειδή θεωρητικά η τάση εξόδου του Hall, όταν το ρεύμα που το διαρρέει είναι μηδέν θα έπρεπε να είναι στο μέσο της τάσης τροφοδοσίας του αισθητηρίου Hall, δηλαδή στα 0 V. Ωστόσο η ασυμμετρία που μπορεί να υπάρχει στις τάσεις τροφοδοσίας, καθώς και οι αλλαγές της θερμοκρασίας, ίσως προκαλέσουν την εμφάνιση ενός DC offset, το οποίο είτε προστίθεται είτε αφαιρείται στην τάση εξόδου του αισθητηρίου. Επειδή αυτή η συμπεριφορά δεν είναι επιθυμητή, πριν την έναρξη λειτουργίας του κυκλώματος το ποτενσιόμετρο R_{11} ρυθμίζεται σε τέτοια τιμή, ώστε η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή U_9 να είναι μηδέν και παραμένει στην τιμή αυτή καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

Από τη στιγμή που υπάρχουν η τάση εξόδου του αισθητηρίου και η πριονωτή κυματομορφή μπορεί να γίνει η σύγκριση τους. Αυτό επιτυγχάνεται με το συγκριτή U_{10} , η έξοδος του οποίου συνδέεται στην είσοδο RESET του D-Flip Flop.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο τρόπος ελέγχου του ρεύματος που επιλέχθηκε είναι αυτός με σταθερή συχνότητα και έναυσης του διακόπτη στην αρχή του παλμού. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το D-Flip Flop HCF4013BE. Συγκεκριμένα στην είσοδο CLOCK του Flip Flop εφαρμόζεται ένας τετραγωνικός παλμός, ίδιας συχνότητας με της πριονωτής κυματομορφής, που προέρχεται από το ολοκληρωμένο 555 και αφού έχει πρώτα περάσει από το συγκριτή U_{11} . Ο συγκριτής αυτός χρησιμοποιείται ώστε να μετατρέψει το πλάτος του παλμού από τα 0 - 5 V στα ± 5 V, που είναι και οι τάσεις τροφοδοσίας του Flip Flop. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται να γίνεται η έναυση του διακόπτη στην αρχή του

παλμού. Η σταθερή συχνότητα εξασφαλίζεται από τη σταθερή συχνότητα του τετραγωνικού παλμού. Αναλυτικότερα το σήμα ελέγχου παράγεται ως εξής:

Η έξοδος του Flip Flop γίνεται '1' στη θετική ακμή του τετραγωνικού παλμού και παραμένει εκεί μέχρι το σήμα RESET που προέρχεται από τη σύγκριση της πριονωτής κυματομορφής και της τάσης εξόδου του αισθητηρίου Hall γίνει '0', που σημαίνει ότι η έξοδος του Flip Flop θα γίνει και αυτή '0'. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο έλεγχος του διακόπτη του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη εξαρτάται από το DC offset της πριονωτής κυματομορφής, αφού όσο μεγαλύτερο είναι αυτό τόσο περισσότερο αργεί να γίνει η σύγκριση της τάσης εξόδου του Hall με την πριονωτή κυματομορφή και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι η σχετική διάρκεια αγωγής.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο αλγόριθμος απαιτεί τη λειτουργία του μετατροπέα με δυο διαφορετικούς τρόπους:

1. Έλεγχος του διακόπτη του μετατροπέα με σήμα PWM μεταβλητής σχετικής διάρκειας αγωγής και
2. Έλεγχος του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα με σταθερή συχνότητα και έναυση του διακόπτη στην αρχή του παλμού.

Για να μπορεί να γίνει η εναλλαγή μεταξύ των δυο τρόπων λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε ένα κύκλωμα που περιέχει έναν αναλογικό πολυπλέκτη HCF4051BE το σχηματικό διάγραμμα του οποίου φαίνεται στο σχήμα 91.

Ο πολυπλέκτης αυτός επιλέγει ποιο σήμα θα ελέγχει το διακόπτη του μετατροπέα και ποιο συγκεκριμένα αν το σήμα ελέγχου θα είναι το PWM σήμα που παράγεται από το μικροελεγκτή ή αν θα είναι το σήμα ελέγχου που παράγεται από το κύκλωμα που αναπτύχθηκε παραπάνω.

Τα δυο αυτά σήματα συνδέονται σε δυο εισόδους του πολυπλέκτη και με ένα σήμα που παράγεται από το μικροελεγκτή επιλέγεται ποιο σήμα θα ελέγχει το διακόπτη του μετατροπέα. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με το ποια λειτουργία του μετατροπέα χρειάζεται κάθε φορά και εξαρτάται από το σημείο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Περισσότερα για το πως επιλέγεται το σήμα αυτό θα αναφερθούν στην ανάλυση του αλγορίθμου.

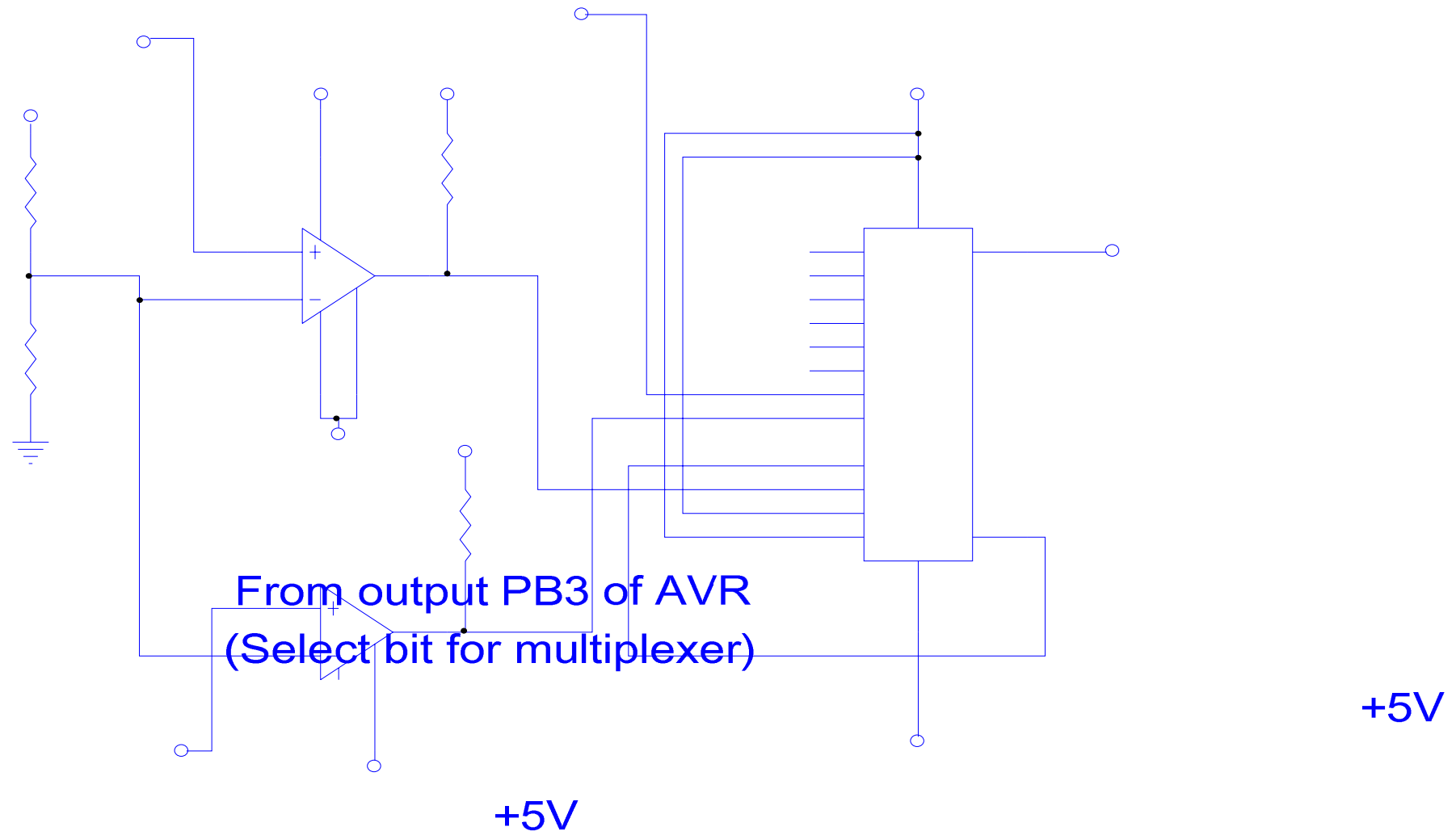
Τέλος οι δυο συγκριτές που φαίνονται στο σχηματικό διάγραμμα του πολυπλέκτη χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του πλάτους του PWM σήματος και του bit

ελέγχου από επίπεδα TTL (που είναι η έξοδος του μικροελεγκτή) σε $\pm 5\text{ V}$, που είναι οι τάσεις τροφοδοσίας του πολυπλέκτη.

Η έξοδος του πολυπλέκτη χρησιμοποιείται σαν είσοδος του driver του MOSFET ισχύος που υλοποιεί το διακόπτη του μετατροπέα και επομένως είναι εφικτός ο έλεγχος του με τον εκάστοτε επιθυμητό τρόπο.

Τα κέρδη των ενισχυτών και των αισθητηρίων που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν ύστερα από υπολογισμούς που βασίζονται στην εξίσωση (90), έτσι ώστε οι τιμές για την τάση ελέγχου και τα πλάτη των κυματομορφών ρεύματος και πριονωτής τάσης, να είναι τέτοια, ώστε το σύστημα να μπορεί να διαχειριστεί ισχύ εισόδου της τάξης των 20 W. Η τιμή αυτή κρίθηκε ικανοποιητική για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει η συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι περίπου 15 W.

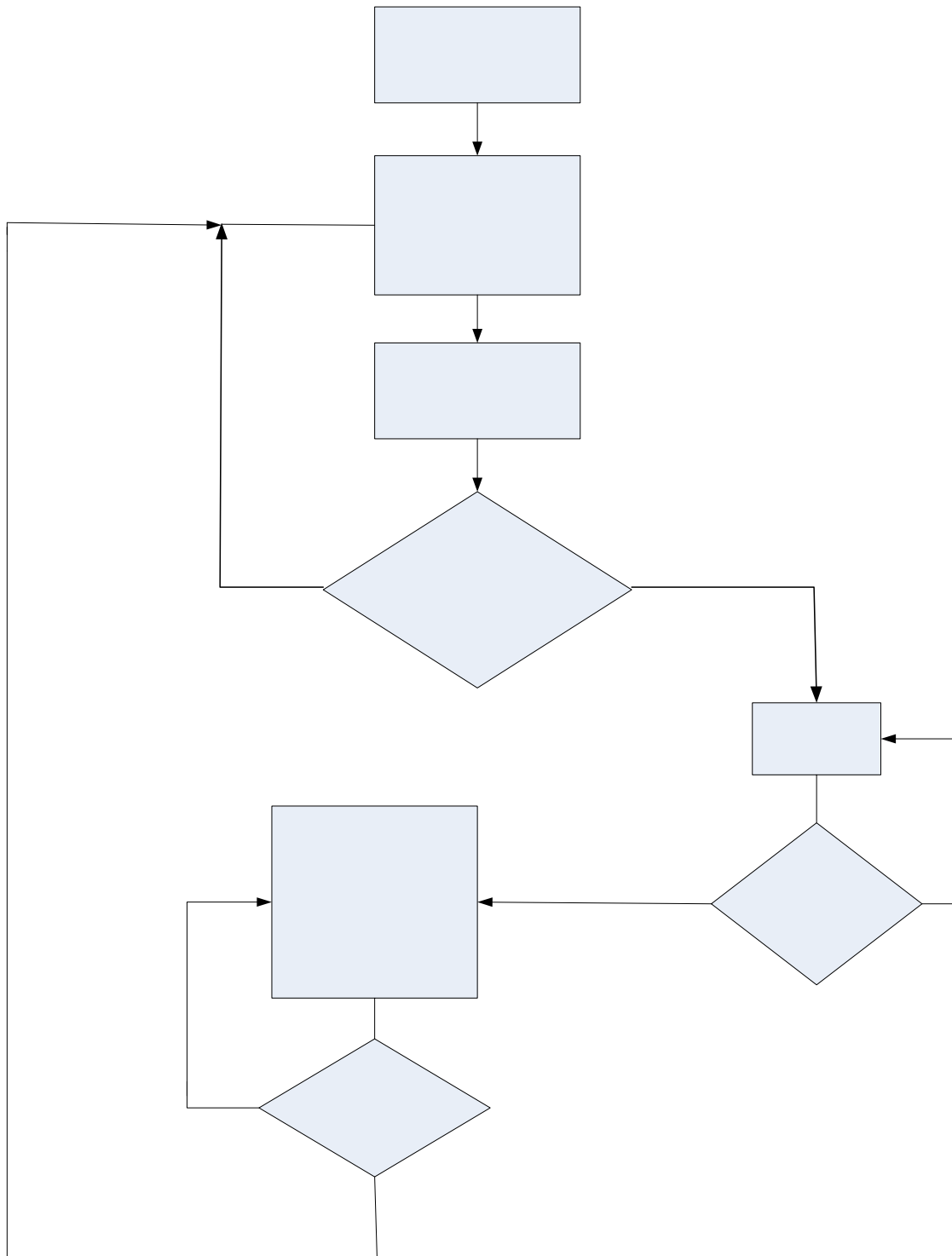
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί πως ο τελεστικός ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση όλων των επιμέρους κυκλωμάτων ο TL084 που διατίθεται σε ένα ολοκληρωμένο, που περιέχει 4 όμοιους τελεστικούς ενισχυτές. Η επιλογή του συγκεκριμένου τελεστικού έγινε επειδή είχε ικανοποιητική συμπεριφορά στη διαχείριση των κυματομορφών που χρησιμοποιούνται και στη συχνότητα στην οποία αυτές εμφανίζονται. Επιπλέον ο τελεστικός αυτός παρέχει την δυνατότητα διπλής τάσης τροφοδοσίας ($\pm 5\text{ V}$), που είναι και ο τρόπος τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος η επιλογή του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου που περιέχει τέσσερις όμοιους τελεστικούς ενισχυτές έγινε για λόγους εξοικονόμησης χώρου στο breadboard και μείωσης των απαιτούμενων καλωδίων για την τροφοδότηση τους.



Σχήμα 91. Σχηματικό διάγραμμα του πολυπλέκτη που επιλέγει τον τρόπο λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

6.8 Ανάλυση του κώδικα υλοποίησης του αλγορίθμου

Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του αλγορίθμου. Για την καλύτερη κατανόηση του κώδικα που υλοποιήθηκε στο σχήμα 92 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου και αργότερα θα περιγραφούν αναλυτικότερα τα τρία βήματα που περιλαμβάνει ο αλγόριθμος.



Σχήμα 92. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 92 ο αλγόριθμος ξεκινά αρχικοποιώντας το μετρητή, ώστε να παράγεται το PWM σήμα και τον μετατροπέα A/D για να γίνεται η δειγματοληψία της τάσης και του ρεύματος εισόδου. Αφού τελειώσει με την αρχικοποίηση αρχίζει να ελέγχει το μετατροπέα με το PWM σήμα που παράγεται. Ο τρόπος που γίνεται ο έλεγχος και η μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής θα μελετηθεί στη συνέχεια. Κάθε φορά που μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής αυξάνεται μια μεταβλητή και ελέγχεται η τιμή της. Όταν αυτή φτάσει την τιμή 2000000 τότε αλλάζει ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και πλέον ελέγχεται με έλεγχο ρεύματος με σταθερή συχνότητα. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε γιατί, ύστερα από δοκιμές που έγιναν διαπιστώθηκε ότι αντιστοιχεί στην διάρκεια περίπου ενός λεπτού, που είναι ικανοποιητικός χρόνος για την ανίχνευση σημαντικών μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας που μεταβάλλουν τη θέση των τοπικών μεγίστων στην καμπύλη ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όταν αυτές συμβαίνουν.

Αφού αλλάξει ο τρόπος ελέγχου του διακόπτη του μετατροπέα παραμένει στον τρόπο λειτουργίας με σταθερή συχνότητα μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη που περιγράφεται παρακάτω. Το επόμενο βήμα του αλγορίθμου είναι να επιστρέψει στον έλεγχο με PWM σήμα και να προσπαθήσει να ανιχνεύσει την τάση που παρήγαγε τη μέγιστη ισχύ στο προηγούμενο βήμα. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικότερα καθένα από τα τρία ξεχωριστά βήματα του αλγορίθμου.

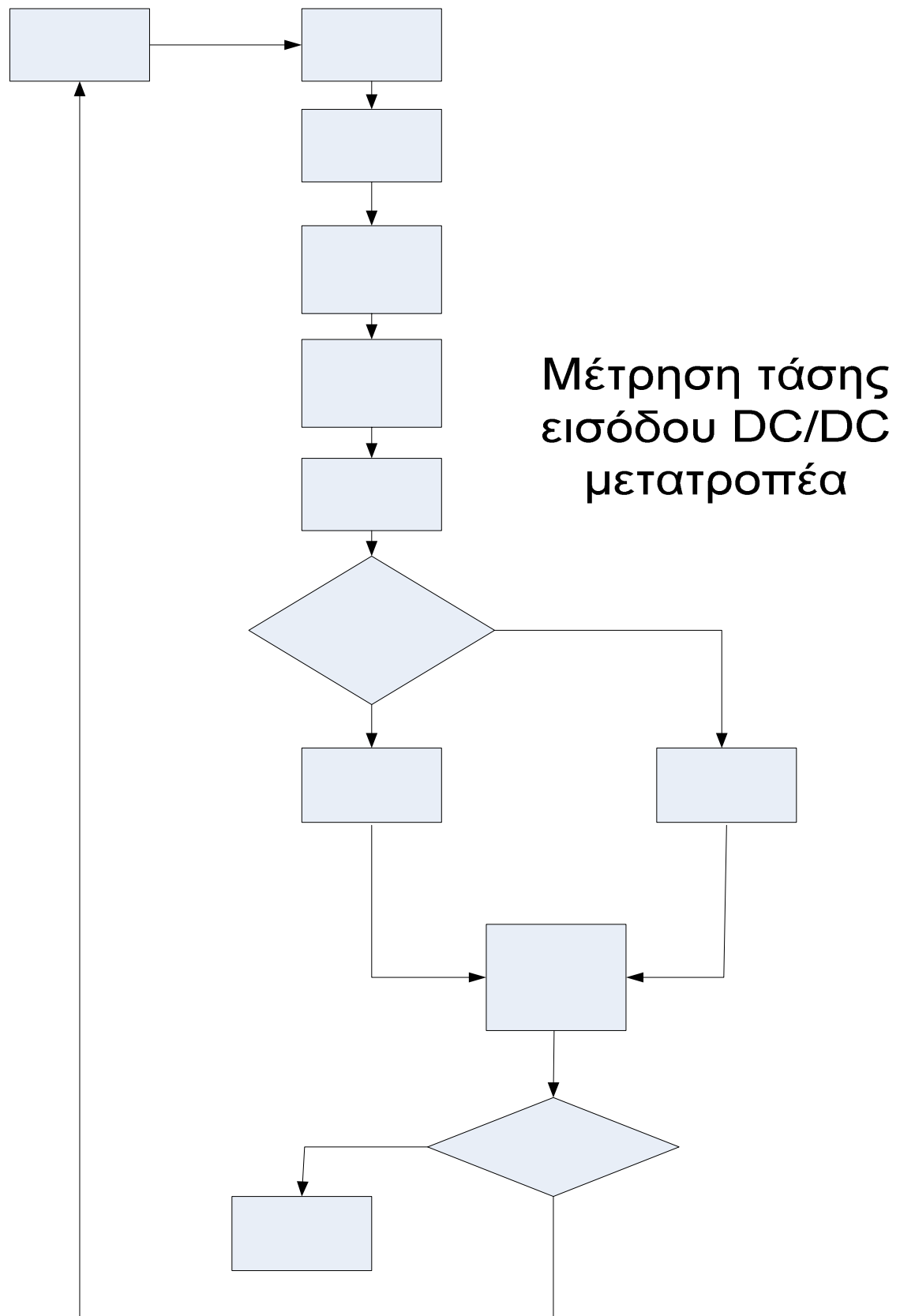
6.8.1 Περιγραφή ελέγχου με το PWM σήμα

Στο σχήμα 93 φαίνεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που ελέγχει το μετατροπέα με ένα PWM σήμα μεταβλητής σχετικής διάρκειας αγωγής.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 93 αρχικά μετριέται η τάση και το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα. Στη συνέχεια ο μικροελεγκτής υπολογίζει την ισχύ εισόδου αφού προηγουμένως έχει μετατρέψει τις μετρούμενες τιμές σε πραγματικές τιμές ρεύματος και τάσης λαμβάνοντας υπόψιν του τα κέρδη των αισθητηρίων μέτρησης ρεύματος και τάσης. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές ισχύος $P(k-1)$ και $P(k-2)$ και αποθηκεύεται στη μεταβλητή Sign_P το πρόσημο της μεταβολής της ισχύος.

Συγκεκριμένα αν $P(k-1) \geq P(k-2)$ τότε $\text{Sign_P} = 1$ αλλιώς $\text{Sign_P} = -1$. Επίσης ελέγχονται οι τιμές της σχετικής διάρκειας αγωγής $D(k-1)$ και $D(k-2)$ και αποθηκεύεται στη μεταβλητή Sign_D το πρόσημο της μεταβολής.

Αν ισχύει $D(k-1) \geq D(k-2)$ τότε $\text{Sign_D} = 1$ αλλιώς $\text{Sign_D} = -1$. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί το γινόμενο $\text{Sign_P} * \text{Sign_D}$. Αν ισχύει $\text{Sign_P} * \text{Sign_D} > 0$, που σημαίνει ότι υπήρχε είτε αύξηση της ισχύος και της σχετικής διάρκειας αγωγής είτε μείωση και των δυο, τότε η σχετική διάρκεια αγωγής αυξάνεται κατά 2 που ισοδυναμεί με αύξηση κατά 0.7%. Αν ισχύει $\text{Sign_P} * \text{Sign_D} < 0$, που σημαίνει ότι υπήρχε είτε αύξηση ισχύος και μείωση της σχετικής διάρκειας αγωγής, είτε μείωση ισχύος και αύξηση της σχετικής διάρκειας αγωγής, τότε η σχετική διάρκεια αγωγής μειώνεται κατά 2 που ισοδυναμεί με μείωση κατά 0.7%. Η μέθοδος αυτή εγγυάται τη σύγκλιση του αλγορίθμου στο τοπικό μέγιστο της καμπύλης ισχύος-τάσης αφού προηγηθεί ένας μικρός αριθμός επαναλήψεων μέχρι να ανιχνευθεί το σημείο αυτό. Στη συνέχεια αποθηκεύονται οι καινούριες τιμές ισχύος και σχετικής διάρκειας αγωγής και γίνεται η αύξηση και ο έλεγχος του μετρητή που καθορίζει εάν πρέπει να γίνει αλλαγή του τρόπου ελέγχου του μετατροπέα. Εάν δεν έχει φτάσει την τιμή 2000000 ακόμα τότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, αλλιώς αλλάζει ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα, η περιγραφή του οποίου ακολουθεί στη συνέχεια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του παραπάνω αλγορίθμου, το bit ελέγχου του πολυπλέκτη που αναφέρθηκε στην ανάλυση του κυκλώματος ελέγχου του μετατροπέα παίρνει τέτοια τιμή ώστε να παράγει στην έξοδο του το PWM σήμα.

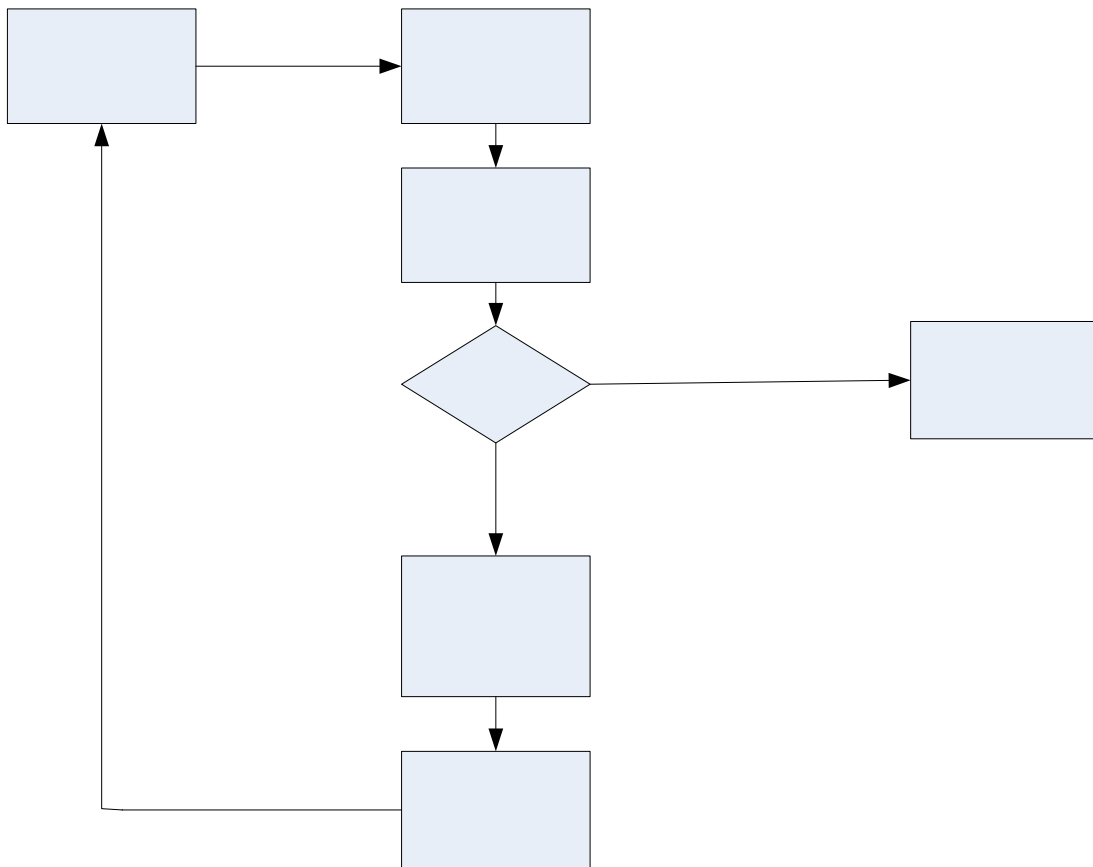


Σχήμα 93. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που ελέγχει το μετατροπέα με PWM σήμα μεταβλητής σχετικής διάρκειας

6.8.2 Περιγραφή ελέγχου με σταθερή ισχύ εισόδου

Το διάγραμμα ροής του κώδικα που είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία του μετατροπέα με σταθερή ισχύ εισόδου φαίνεται στο σχήμα 94.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης αυτού του κομματιού του αλγορίθμου, ο μικροελεγκτής συνεχίζει να δειγματοληπτεί την τάση και το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα και να υπολογίζει την ισχύ εισόδου του, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε και στο προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου. Αφού υπολογιστεί η καινούρια ισχύς εισόδου συγκρίνεται με την προηγούμενη τιμή και αν ισχύει $P(k) \geq P(k-1)$, τότε ο μικροελεγκτής αυξάνει την τάση ελέγχου κατά 5. Αύξηση κατά 5 σημαίνει ότι αυξάνεται η ψηφιακή λέξη που χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο D/A μετατροπέα κατά 5. Οπότε από την εξίσωση (91) για την τιμή της τάσης εξόδου του D/A μετατροπέα προκύπτει ότι αύξηση της ψηφιακής λέξης κατά 5 σημαίνει αύξηση του DC offset, V_c' , κατά 0.07 V. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε φορά που αρχίζει να εκτελείται η αρχική τιμή της V_c' είναι 0.



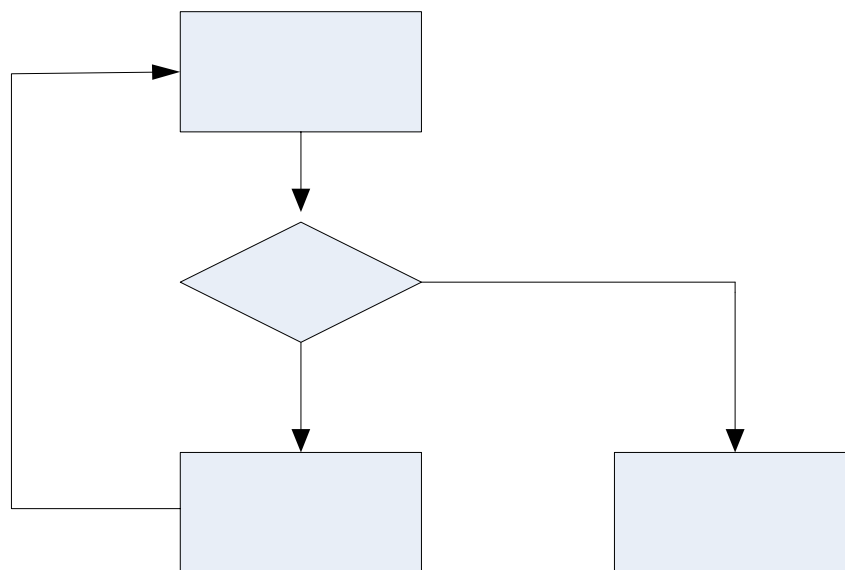
Σχήμα 94. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που ελέγχει το μετατροπέα με σταθερή ισχύ εισόδου

Αφού αυξηθεί η τάση ελέγχου αποθηκεύονται η νέα τιμή της ισχύος και της τάσης εισόδου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη $P(k) < P(k-1)$. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.1 αυτό σημαίνει ότι πλέον δεν υπάρχει κοινό σημείο τομής της γραμμής ισχύος με τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης και το σημείο λειτουργίας θα είναι εκείνο το σημείο της χαρακτηριστικής, το οποίο αντιστοιχεί σε τάση εισόδου του μετατροπέα ίση με την τάση της μπαταρίας.

Μόλις ικανοποιηθεί αυτή η συνθήκη, αλλάζει ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα με σκοπό να βρεθεί το σημείο εκείνο που στην τελευταία επανάληψη του προηγούμενου βήματος έδινε τη μέγιστη ισχύ εισόδου. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται στη συνέχεια. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι αυτή τη φορά το bit ελέγχου του πολυπλέκτη έχει τέτοια τιμή ώστε στην έξοδο του να προκύπτει το σήμα ελέγχου που παράγεται από το κύκλωμα που περιγράφηκε παραπάνω.

6.8.3 Περιγραφή εύρεσης της τάσης που έδινε τη μέγιστη ισχύ

Αυτή η λειτουργία του αλγορίθμου χρειάζεται να δειγματοληπτεί μόνο την τάση εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Συγκεκριμένα το διάγραμμα ροής για τη λειτουργία αυτή φαίνεται στο σχήμα 95.



Σχήμα 95. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που ανιχνεύει την τάση που παρουσιάστηκε η μέγιστη ισχύς

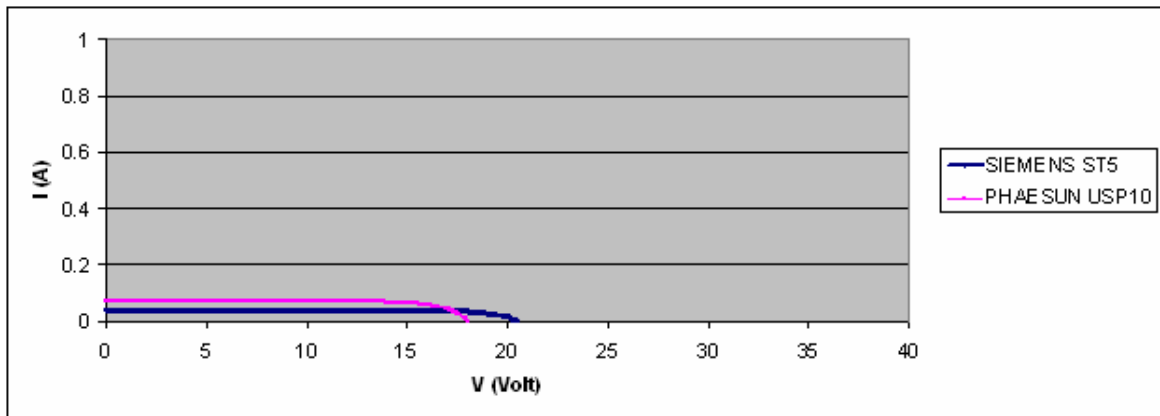
Από το προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου έχει αποθηκευθεί η τιμή της τάσης που έδινε τη μέγιστη ισχύ. Για να μπορέσει ο αλγόριθμος να επιστρέψει στο σημείο εκείνο αρκεί να μειώνει τη σχετική διάρκεια αγωγής του PWM σήματος μέχρι η μετρούμενη τάση εισόδου να γίνει μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή που είχε αποθηκευθεί σε προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου. Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο σχήμα 95. Επειδή το σημείο στο οποίο θα συγκλίνει δεν είναι το σημείο μέγιστης ισχύος αλλά ένα σημείο πολύ κοντά σε αυτό ο έλεγχος του μετατροπέα μεταφέρεται στο πρώτο βήμα του αλγορίθμου που περιγράφηκε. Τα τρία βήματα του αλγορίθμου που περιγράφηκαν παραπάνω επαναλαμβάνονται συνεχώς, κάτι που εγγυάται τη σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος ακόμα και αν υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

7. Πειραματικά αποτελέσματα

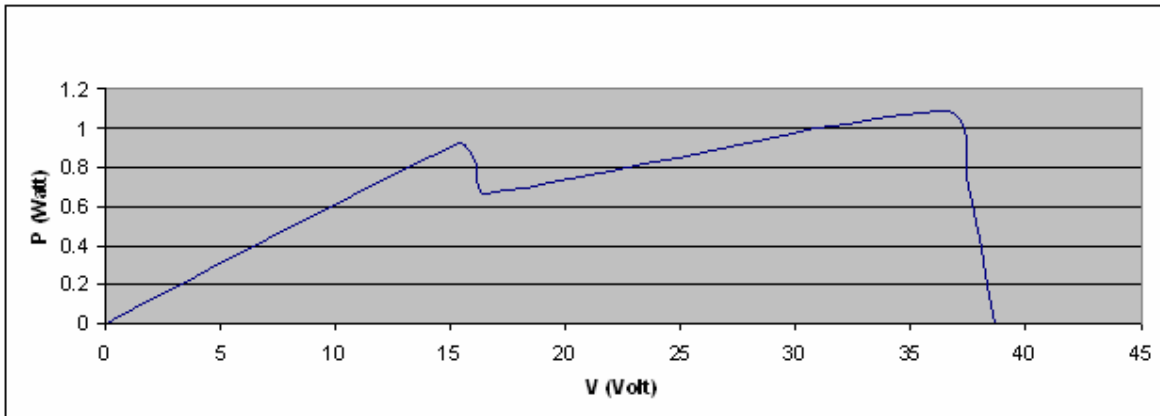
Η σωστή λειτουργία του συστήματος επαληθεύθηκε με μια σειρά μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν την 5^η Ιουνίου 2006 από τις 9:00 το πρωί μέχρι τις 14:00 το μεσημέρι. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν η τάση και το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και από αυτά υπολογίστηκε η ισχύς εισόδου του. Επίσης μετρήθηκαν το ρεύμα και η τάση εξόδου του μετατροπέα, ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για το βαθμό απόδοσης του μετατροπέα. Παράλληλα με τα παραπάνω μετρήθηκε και η ακτινοβολία που δεχόταν η συστοιχία των δυο φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη βοήθεια ενός πυρανόμετρου SP1110 της εταιρίας SKYE ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η θεωρητικά αναμενόμενη τιμή για την ισχύ και να γίνει μια σύγκριση με τις πειραματικά μετρούμενες τιμές. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 10 λεπτά με τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, να είναι οριζόντια τοποθετημένη στο έδαφος κατά τη διάρκεια του πειράματος. Για τις μετρήσεις των ρευμάτων και τάσεων εισόδου και εξόδου για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα, γινόταν μεταβολή της κλίσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Κάτι τέτοιο επέτρεψε την ύπαρξη διαφορετικής κάθε φορά ακτινοβολίας και επομένως διαφορετικής ισχύος εισόδου του μετατροπέα, λαμβάνοντας με τον τρόπο αυτό μια σειρά δειγμάτων ικανών για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης.

Για τον υπολογισμό των θεωρητικών τιμών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 και σύμφωνα με το οποίο προέκυψαν οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης για τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια, στα οποία προσπίπτει η ίδια ακτινοβολία, που φαίνονται στα σχήματα 97 έως 106 και καλύπτουν αρκετές περιπτώσεις ακτινοβολιών.

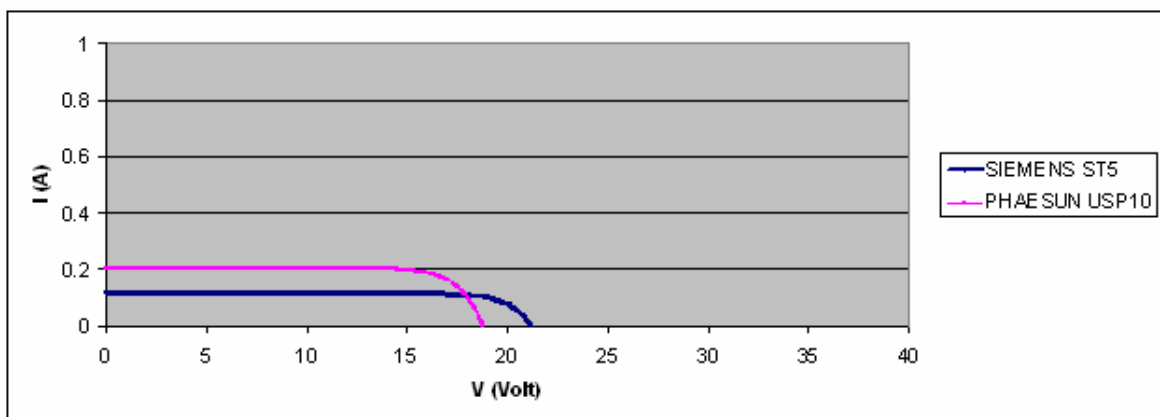
Στα σχήματα 97-106 προσομοιώνονται οι περιπτώσεις που έχουμε δύο όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου PHAESUN USP10, τα οποία δέχονται διαφορετική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα η ακτινοβολία G που αναφέρεται σε κάθε περίπτωση αντιστοιχεί σε ακτινοβολίες $G_1 = G$ και $G_2 = G/2$, όπου G_1 , G_2 οι αντίστοιχες ακτινοβολίες που προσπίπτουν στα δυο όμοια πλαίσια.



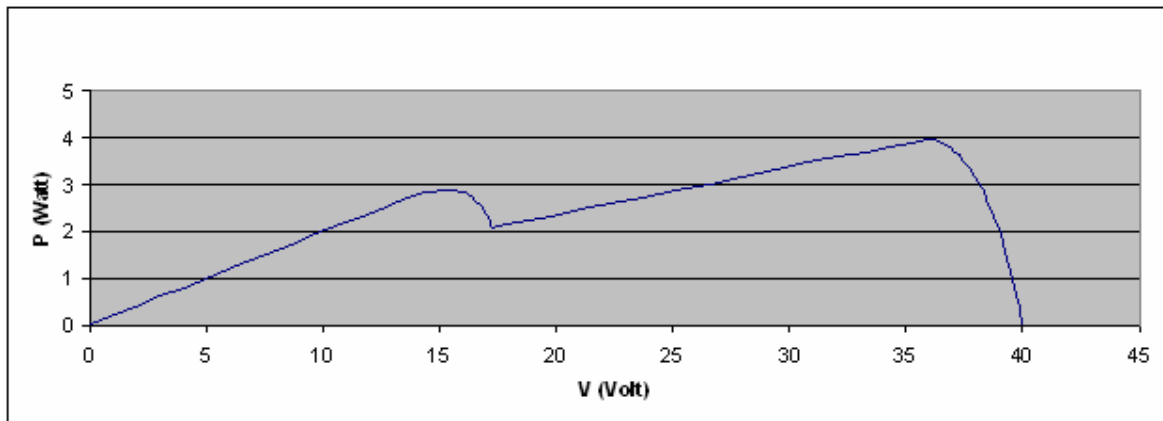
Σχήμα 97. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κάθε πλαισίου της συστοιχίας για $G = 100 \text{ W/m}^2$



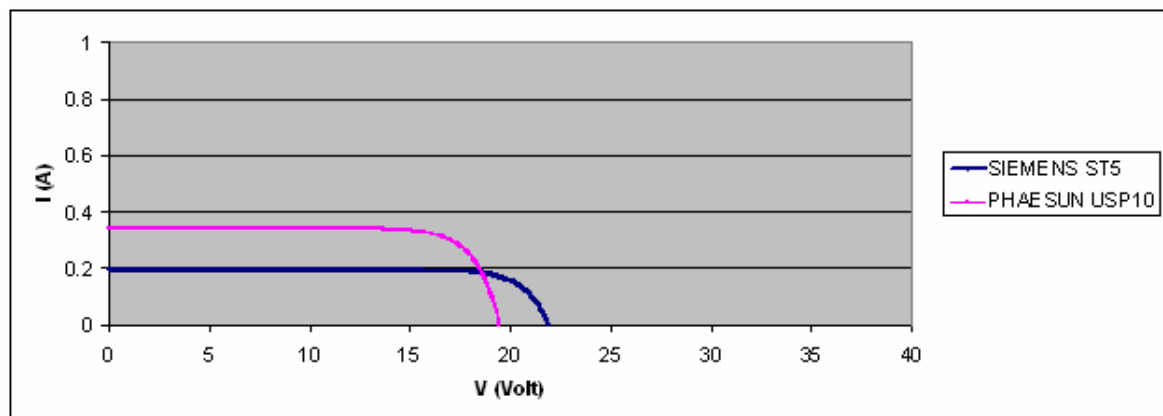
Σχήμα 98. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της συστοιχίας για $G = 100 \text{ W/m}^2$



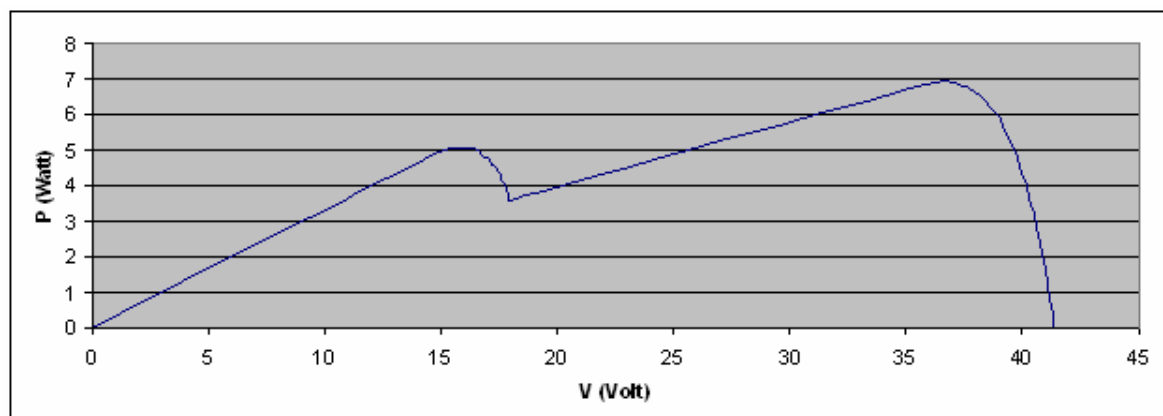
Σχήμα 99. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κάθε πλαισίου της συστοιχίας για $G = 300 \text{ W/m}^2$



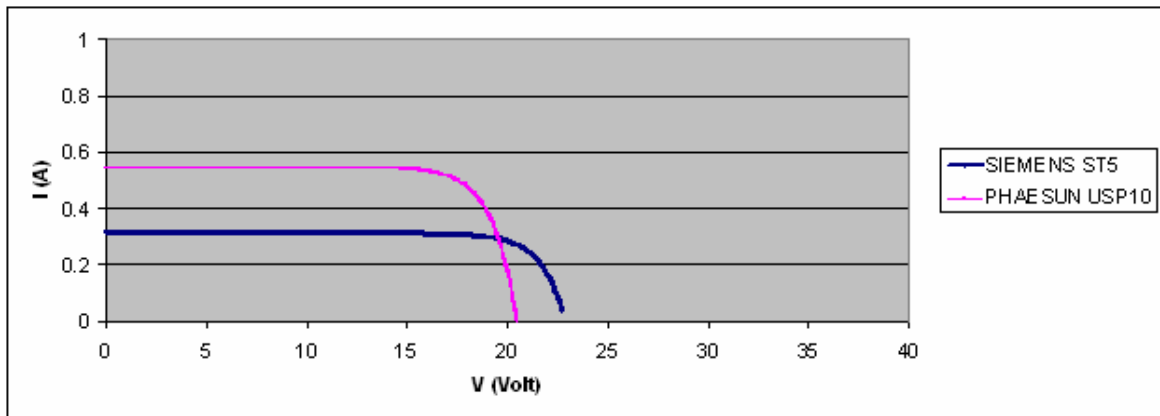
Σχήμα 100. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της συστοιχίας για $G = 300 \text{ W/m}^2$



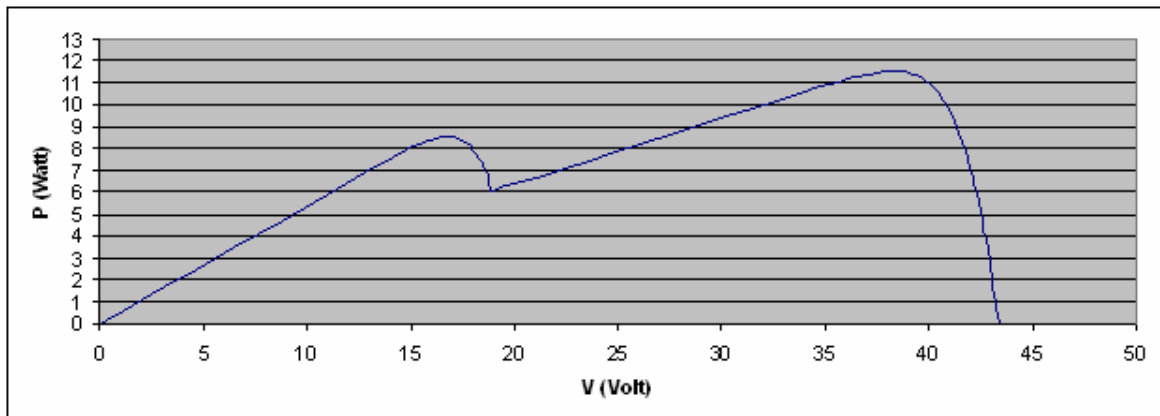
Σχήμα 101. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κάθε πλαισίου της συστοιχίας για $G = 500 \text{ W/m}^2$



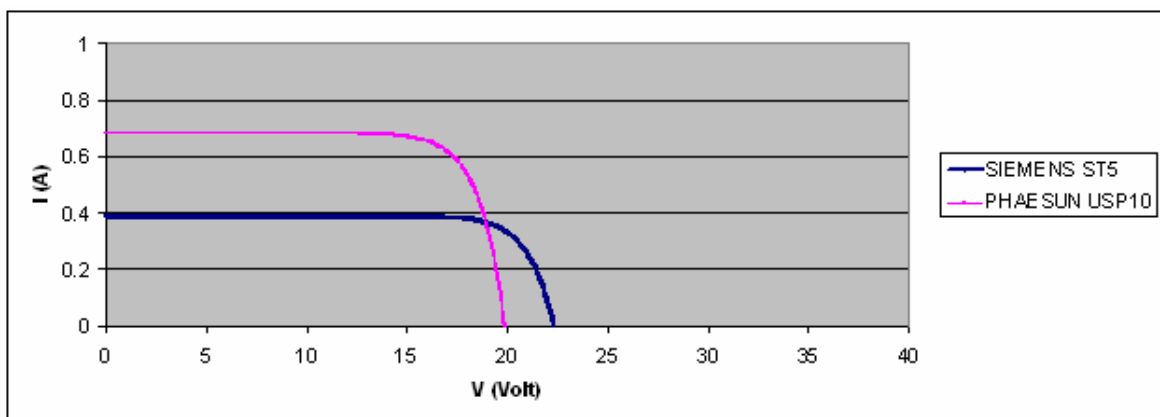
Σχήμα 102. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της συστοιχίας για $G = 500 \text{ W/m}^2$



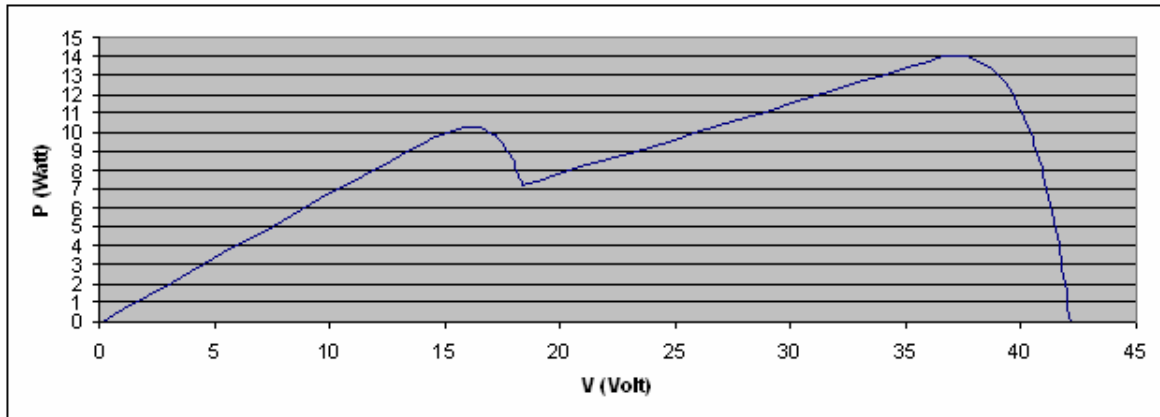
Σχήμα 103. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κάθε πλαισίου της συστοιχίας για $G = 800 \text{ W/m}^2$



Σχήμα 104. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της συστοιχίας για $G = 800 \text{ W/m}^2$



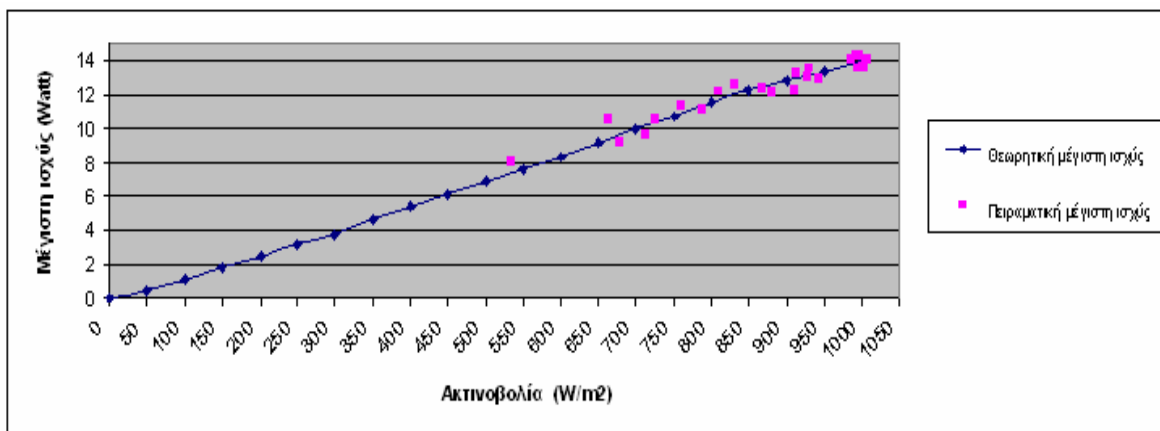
Σχήμα 105. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κάθε πλαισίου της συστοιχίας για $G = 1000 \text{ W/m}^2$



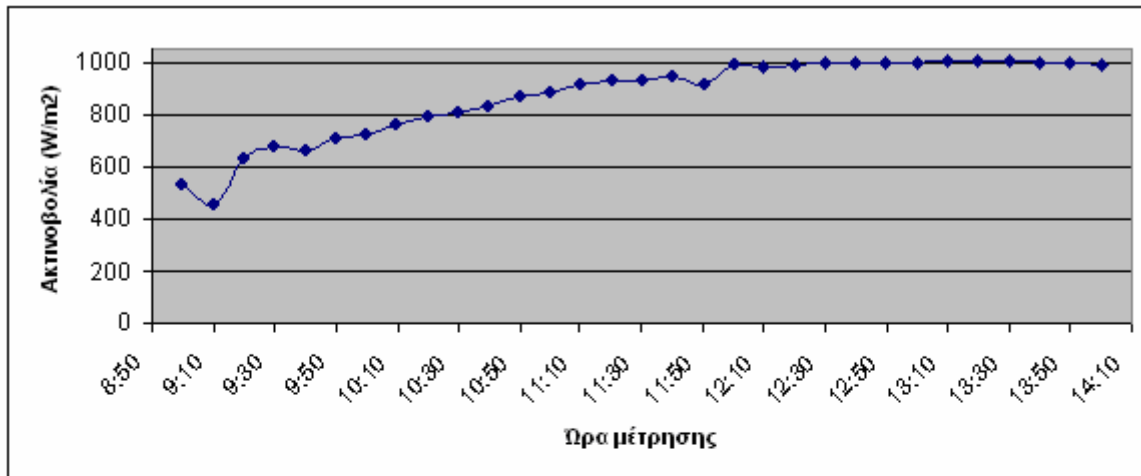
**Σχήμα 106. Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της συστοιχίας για
 $G = 1000 \text{ W/m}^2$**

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα σχήματα 107 και 108. Στο σχήμα 107 με συνεχή μπλε γραμμή φαίνεται η θεωρητική τιμή του ολικού μεγίστου ισχύος εξόδου της συστοιχίας των δυο φωτοβολταϊκών πλαισίων για τιμές ακτινοβολίας από 0 W/m^2 έως 1000 W/m^2 , ενώ τα κόκκινα σημεία δείχνουν τις τιμές μέγιστης ισχύος που υπολογίστηκαν από τις τιμές για το ρεύμα και την τάση εισόδου που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι ίδια αφού και τα δυο βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

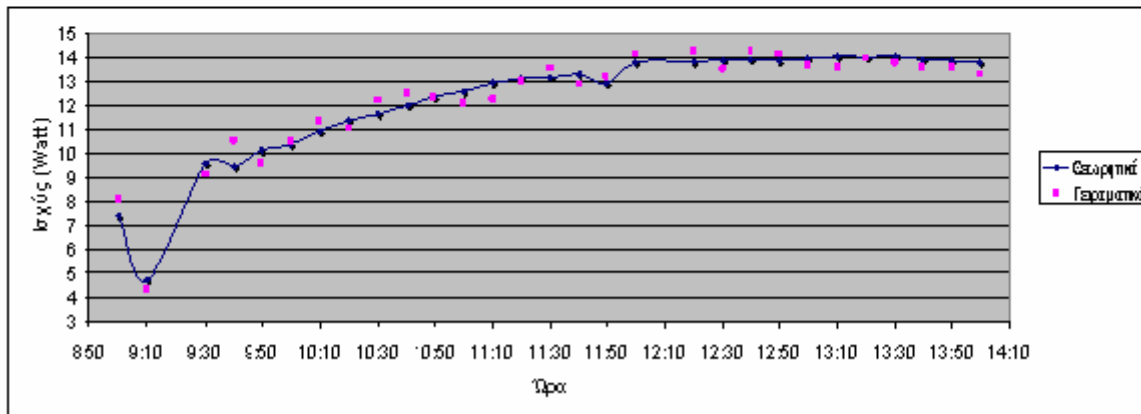
Παρατηρείται ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στις πειραματικά μετρούμενες τιμές μέγιστης ισχύος είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές τιμές.



Σχήμα 107. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την μέγιστη ισχύ εξόδου για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας



(α)



(β)

Σχήμα 108. (α) Το διάγραμμα της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την ώρα της μέτρησης και (β) Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την μέγιστη ισχύ εξόδου κατά τη διάρκεια του πειράματος

Στο σχήμα 108(β) με μπλε συνεχή γραμμή φαίνεται η θεωρητική τιμή μέγιστης ισχύος σε σχέση με την ώρα που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ακτινοβολία που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν ίδια και για τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το διάγραμμα της ακτινοβολίας σε σχέση με την ώρα μέτρησης φαίνεται στο σχήμα 108(α).

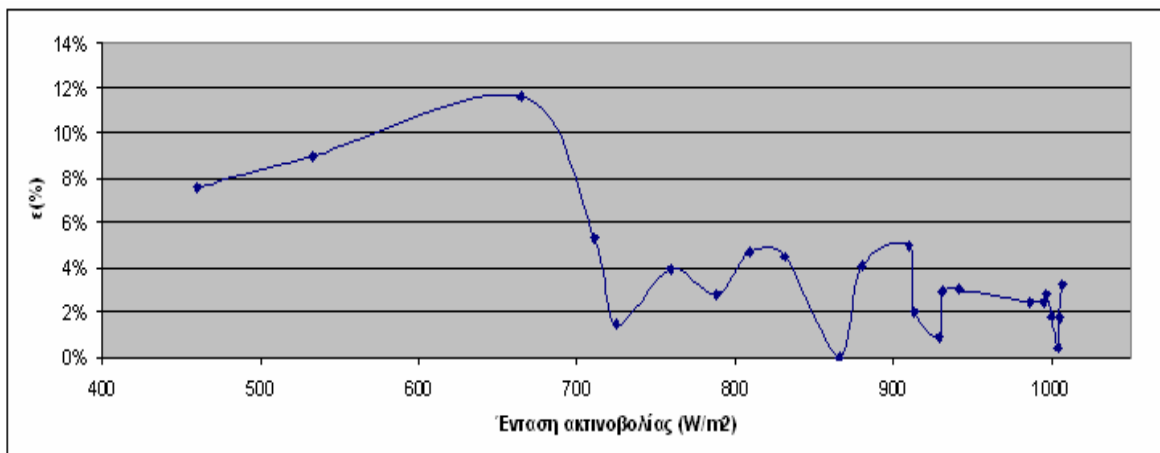
Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, οι θεωρητικές τιμές της ισχύος για τα σχήματα 107 και 108(β) προέκυψαν από το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών, όταν είναι

γνωστή η ακτινοβολία που δέχεται η συστοιχία. Με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 108(β) φαίνονται τα σημεία της πειραματικά μετρούμενης ισχύος για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Η ανωμαλία που παρατηρείται στην καμπύλη στις 9:10, οφείλεται στην παρουσία ενός σύννεφου, η οποία μείωσε αισθητά την ακτινοβολία. Ωστόσο όπως φαίνεται από την πειραματικά μετρούμενη τιμή, ο αλγόριθμος δεν είχε κανένα πρόβλημα να συγκλίνει στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος.

Στο σχήμα 109 φαίνεται η % απόκλιση του σημείου μέγιστης ισχύος που μετρήθηκε πειραματικά ως προς την αντίστοιχη θεωρητική τιμή μέγιστης ισχύος. Οι τιμές που προέκυψαν υπολογίστηκαν με βάση την παρακάτω εξίσωση για κάθε σημείο:

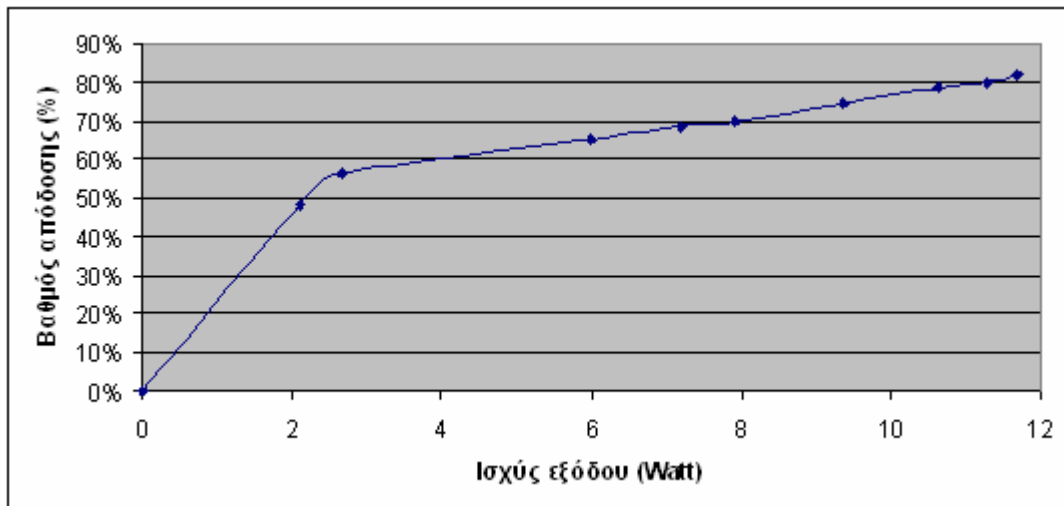
$$\varepsilon\% = \frac{|P_{\text{πειραματικό}} - P_{\text{θεωρητικό}}|}{P_{\text{θεωρητικό}}} \times 100\% \quad (98)$$

όπου η μέση τιμή της απόκλισης $\varepsilon(\%)$ μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης ισχύος είναι ίση με 3.47%, που σημαίνει ότι ο αλγόριθμος προσφέρει ικανοποιητική σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος.



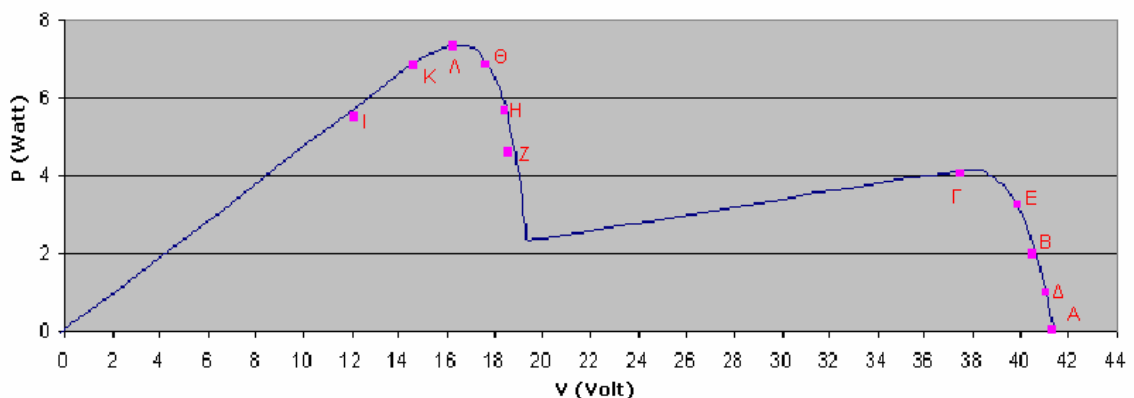
Σχήμα 109. Διάγραμμα της απόκλισης $\varepsilon(\%)$ σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία

Τέλος στο σχήμα 110 φαίνονται οι μετρήσεις του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα σε σχέση με την ισχύ εξόδου του.



Σχήμα 110. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα σε σχέση με την ισχύ εξόδου του

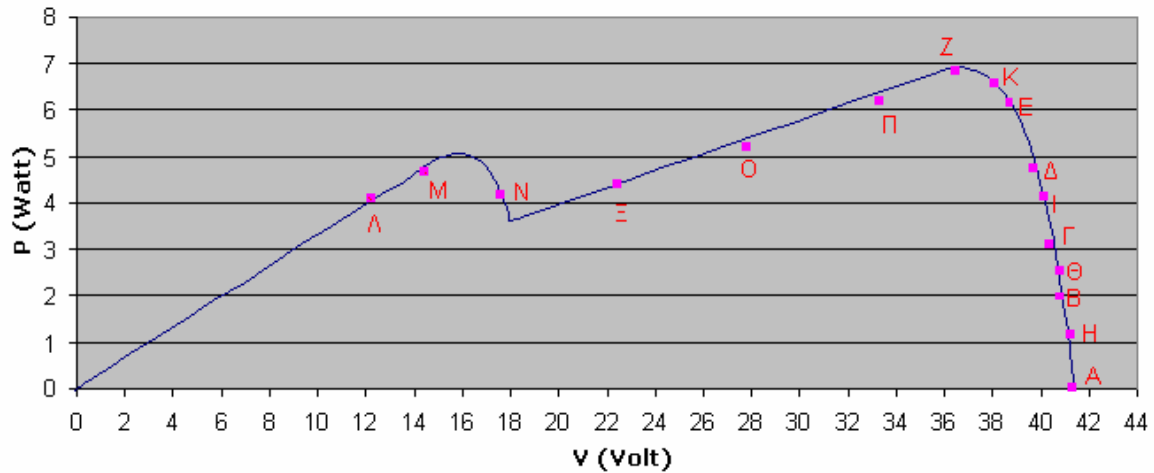
Για να κατανοηθεί καλύτερα η λειτουργία του αλγορίθμου στα σχήματα 111 και 112 φαίνονται με μπλε χρώμα οι θεωρητικές καμπύλες ισχύος-τάσης και με κόκκινο χρώμα τα σημεία λειτουργίας, τα οποία μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στα δυο αυτά σχήματα καλύπτονται οι δυο πιθανές περιπτώσεις για τη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης, η οποία μπορεί να παρουσιάζει το ολικό μέγιστο είτε σε χαμηλότερη είτε σε υψηλότερη τάση από την τάση στην οποία παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο.



Σχήμα 111. Η θεωρητική χαρακτηριστική ισχύος-τάσης όπου φαίνονται και τα σημεία λειτουργίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου για την περίπτωση που το ολικό μέγιστο εμφανίζεται σε χαμηλότερη τάση από το τοπικό μέγιστο

Συγκεκριμένα στο σχήμα 111 το ολικό μέγιστο της θεωρητικής καμπύλης παρουσιάζεται σε χαμηλότερη τάση από το τοπικό μέγιστο. Η χαρακτηριστική αυτή προκύπτει όταν στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο τύπου SIEMENS ST5 προσπίπτει ακτινοβολία εντάσεως 300 W/m^2 και στο τύπου PHAESUN USP10 ακτινοβολία εντάσεως 700 W/m^2 . Οι τιμές αυτές προσομοιώθηκαν τοποθετώντας τα δύο πλαίσια με κάποια κλίση, διαφορετική για το καθένα, ως προς το οριζόντιο επίπεδο έτσι ώστε στο καθένα από αυτά να προσπίπτει η επιθυμητή ακτινοβολία. Στη συνέχεια άρχισε να εκτελείται ο αλγόριθμος κατά τη διάρκεια του οποίου παρατηρήθηκαν τα σημεία λειτουργίας που φαίνονται με κόκκινο χρώμα. Ο αλγόριθμος ξεκίνησε από τάση ανοιχτοκύκλωσης (σημείο Α) και ο μετατροπέας ελεγχόταν με την εφαρμογή του σήματος PWM στο διακόπτη του. Μεταβάλλοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος αυτού το επόμενο σημείο λειτουργίας ήταν το σημείο Β και καθώς συνεχιζόταν ο έλεγχος του μετατροπέα με αυτόν τον τρόπο το σύστημα κατέληξε να ταλαντώνεται γύρω από το σημείο λειτουργίας Γ, το οποίο είναι πολύ κοντά στο τοπικό μέγιστο που παρουσιάζει η θεωρητική χαρακτηριστική. Αφού το σύστημα ταλαντώθηκε για κάποιο χρονικό διάστημα γύρω από το σημείο Γ, άλλαξε ο τρόπος ελέγχου του διακόπτη του μετατροπέα, έτσι ώστε αυτός να λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου. Έτσι το καινούριο σημείο λειτουργίας επέστρεψε στο σημείο Α από το οποίο με σταδιακές αυξήσεις της τάσης ελέγχου V_c μετατοπίστηκε διαδοχικά στα σημεία Δ, Ε, Ζ, Η και Θ. Στο σημείο Θ όταν έγινε η επόμενη αύξηση της V_c δεν υπήρχε σημείο τομής της θεωρητικής χαρακτηριστικής με την γραμμή ισχύος που αντιστοιχεί στη νέα V_c και επομένως όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6 το καινούριο σημείο σύγκλισης του αλγορίθμου θα είναι εκείνο που δίνει τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ίση με την τάση της μπαταρίας. Πράγματι το καινούριο σημείο λειτουργίας ήταν το σημείο Ι. Στο σημείο αυτό ικανοποιήθηκε η συνθήκη για να αλλάξει ο τρόπος ελέγχου του διακόπτη του μετατροπέα ισχύος έτσι ώστε με σταδιακή αύξηση της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος PWM να βρεθεί το σημείο το οποίο έδινε τη μέγιστη ισχύ την προηγούμενη φορά. Έτσι το σύστημα συνέκλινε σταδιακά στα σημεία Κ και Λ για να καταλήξει πάλι στο σημείο Θ. Στο σημείο αυτό άλλαξε και πάλι ο τρόπος ελέγχου του διακόπτη του μετατροπέα και με αυξομειώσεις της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος PWM το σύστημα κατέληξε να

ταλαντώνεται γύρω από το σημείο Λ, το οποίο όπως διαπιστώνεται είναι και το ολικό μέγιστο.



Σχήμα 112. Η θεωρητική χαρακτηριστική ισχύος-τάσης όπου φαίνονται και τα σημεία λειτουργίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου για την περίπτωση που το ολικό μέγιστο εμφανίζεται σε υψηλότερη τάση από το τοπικό μέγιστο

Στο σχήμα 112 φαίνεται η περίπτωση εκείνη, όπου το ολικό μέγιστο της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος-τάσης παρουσιάζεται σε μεγαλύτερη τάση από αυτή που παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο. Τα σημεία λειτουργίας που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αλγορίθμου φαίνονται με κόκκινο χρώμα ενώ με μπλε χρώμα φαίνεται η θεωρητική χαρακτηριστική που προκύπτει όταν ακτινοβολία εντάσεως 500 W/m^2 προσπίπτει και στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Πιο συγκεκριμένα ο αλγόριθμος ξεκινά τη λειτουργία του από την τάση ανοιχτοκύκλωσης της συστοιχίας (σημείο Α) και με διαδοχικές μειώσεις της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος PWM που ελέγχει το διακόπτη του μετατροπέα περνά από τα σημεία λειτουργίας Β, Γ, Δ και Ε για να καταλήξει στο σημείο Ζ, όπου ταλαντώνεται γύρω από αυτό μέχρι να περάσει το χρονικό διάστημα που είναι η συνθήκη για να αλλάξει ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο Ζ είναι πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Ωστόσο η εκτέλεση του αλγορίθμου δεν έχει τελειώσει και το επόμενο βήμα είναι να ελεγχθεί ο μετατροπέας με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί σταθερή την ισχύ

εισόδου του. Πράγματι ο μικροελεγκτής που ελέγχει το μετατροπέα αρχίζει να αυξάνει σταδιακά την τάση ελέγχου V_c' και το νέο σημείο λειτουργίας θα είναι το σημείο A και μέσα από τα H, Θ και I θα καταλήξει στο σημείο K. Επειδή με την επόμενη αύξηση της V_c' δεν υπάρχει σημείο τομής μεταξύ της θεωρητικής χαρακτηριστικής και της γραμμής ισχύος που προκύπτει για τη νέα V_c' το καινούριο σημείο λειτουργίας θα είναι εκείνο που δίνει τάση εξόδου της συστοιχίας ίση με την τάση της μπαταρίας. Πράγματι το νέο σημείο λειτουργίας που μετρήθηκε πειραματικά είναι το σημείο Λ. Η σύγκλιση στο σημείο αυτό αποτελεί και τη συνθήκη για την εκ νέου αλλαγή του τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα από το σημείο αυτό και μετά ο μικροελεγκτής αρχίζει να αυξάνει σταδιακά τη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος PWM μέχρι να ανιχνεύσει το σημείο που έδινε τη μέγιστη ισχύ την τελευταία φορά. Έτσι τα καινούρια σημεία λειτουργίας που προκύπτουν είναι τα M, N, Ξ και Π μέχρι το σύστημα να συγκλίνει στο σημείο Z, όπου πλέον ο μετατροπέας αρχίζει να ελέγχεται με αυξομειώσεις της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος PWM. Έτσι το σύστημα καταλήγει σε μια ταλάντωση γύρω από το σημείο Z, το οποίο όπως φαίνεται και από το σχήμα 113 είναι πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος.

8. Συμπεράσματα

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία προσφέρει σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος με αρκετή ακρίβεια, όπως αποδεικνύεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών μετρήθηκε ίση με 3.47 %. Επιπλέον η σύγκλιση αυτή γίνεται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, κάτι που αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο σε περιπτώσεις γρήγορων μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους για εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος, το σύστημα αυτό υπερτερεί, λόγω ακριβώς της δυνατότητας του να συγκλίνει στο σημείο μέγιστης ισχύος, ακόμα και όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης. Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου που αναπτύχθηκε είναι ότι παρέχει μια ταχύτατη σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος, όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης σε σχέση με τη μέθοδο που δειγματοληπτεί όλη τη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης μέχρι να ανιχνεύσει το σημείο μέγιστης ισχύος. Επιπλέον δεν απαιτείται ξεχωριστός μετατροπέας για κάθε στοιχείο μιας συστοιχίας και τέλος δεν βασίζεται σε γνωστά μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων και επομένως δεν απαιτεί γνώση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης, η ονομαστική ισχύς και ο αριθμός των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Επομένως η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων με άγνωστα χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Ωστόσο, το σύστημα που αναπτύχθηκε παρουσιάζει το μειονέκτημα της σχετικά αυξημένης πολυπλοκότητας του κυκλώματος που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης όταν αυτός λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου. Ωστόσο η πολυπλοκότητα του κυκλώματος αντισταθμίζεται από την σημαντικά υψηλότερη απόδοση του συστήματος όταν επικρατούν συνθήκες μερικής σκίασης.

Μια επέκταση του συστήματος που αναπτύχθηκε είναι ο έλεγχος περισσότερων από μίας συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων και συγκεκριμένα μέχρι τεσσάρων συστοιχιών, λόγω της δυνατότητας που παρέχει ο μικροελεγκτής για τέσσερις εξόδους σήματος PWM και των οκτώ καναλιών που διαθέτει ο μετατροπέας A/D.

Για τον έλεγχο συστοιχιών που μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αρκεί να τροποποιηθούν τα κέρδη των αισθητηρίων που χρησιμοποιήθηκαν.

Η πιο αποδοτική εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος είναι η ενσωμάτωση του σε συστήματα sun-tracking, αφού σε μια τέτοια περίπτωση το σύστημα όχι μόνο θα συνέκλινε στο σημείο μέγιστης ισχύος πάνω στη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης αλλά επιπλέον θα παρακολουθούσε την πορεία του ήλιου ώστε να ανιχνεύει και τη βέλτιστη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης.

9. Βιβλιογραφία

9.1 Δημοσιευμένα Papers

- [1] Toshihisa Shimizu, Masaki Hirakata, Tomoya Kamezawa and Hisao Watanabe, “Generation Control Circuit for Photovoltaic Modules”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 3, pp. 293-300, May 2001.
- [2] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis and Nicholas Voulgaris, “Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No.1 pp. 46-54, January 2001.
- [3] Teolan Tomson and Gunnar Tamm, “Short-term variability of solar radiation”, Solar Energy, Vol. 80, No. 5, pp. 600-606, May 2006.
- [4] Volker Quaschning and Rolf Hanitsch, “Irradiance calculation on shaded surfaces”, Solar Energy, Vol. 62, No. 5, pp. 369-375, 1998.
- [5] Volker Quaschning and Rolf Hanitsch, “Numerical Simulation of Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic Systems with Shaded Solar Cells”, Solar Energy, Vol, 56, No. 6, pp. 513-520, 1996.
- [6] Achim Woyte, Johan Nijs and Ronnie Belmans, “Partial Shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results”, Solar Energy, Vol. 74, No 3, pp. 217-233, March 2003.
- [7] Bo H. Cho, Jae R. Lee and Fred C. Y. Lee, “Large-Signal analysis of Spacecraft Power Processing Systems”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, No. 1, January 1990.

9.2 Βιβλία

- [8] Ned Mohan, Tore A. Underland and William P. Robins. “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, 1995, Β' έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.

[9] E. Lorenzo. “Solar electricity Engineering of photovoltaic Systems”, 1994 Progenesa.

9.3 Τεχνικά κείμενα

[10] ATMega8535 Full Data Sheet. Atmel Corporation, Rev 2502G 04/05, Available online at www.atmel.com.