



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη, κατασκευή και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου και ανιχνευτή MPP για σύνδεση σε σύστημα συσσωρευτών για εφαρμογές χαμηλού κόστους.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξάνδρα Καπετανάκη

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη, κατασκευή και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες
πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου και ανιχνευτή
MPP για σύνδεση σε σύστημα συσσωρευτών για εφαρμογές
χαμηλού κόστους.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξάνδρα Καπετανάκη

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Ιουλίου 2011.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....

Αλεξάνδρα Καπετανάκη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλεξάνδρα Καπετανάκη

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της καμπύλης εξόδου φωτοβολταϊκού πλαισίου χαμηλού κόστους και ενδιάμεσης τεχνολογίας. Στα πλαίσια αυτά διεξήχθησαν μετρήσεις για τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος και άλλων χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πεδίο δοκιμών στην οροφή του παλιού κτιρίου της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών υπολογιστών.

Αρχικά, παρουσιάζεται η δομή των ηλιακών κυττάρων και μελετώνται ορισμένα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των φωτοβολταϊκών, όπως η ακτονοβολία, η θερμοκρασία, η μερική σκίαση, το ρεύμα κόρου, η αντίσταση σειράς και η παράλληλη αντίσταση. Η μελέτη ολοκληρώνεται με πειραματική διαδικασία. Σε αυτή αναλύονται διεξοδικά οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών σε μία πραγματική εγκατάσταση. Γίνεται σύγκριση των τιμών των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν μέσω μοντελοποίησης στο Matlab.

Έπειτα, διερευνάται το σημείο μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών, στο οποίο αυτά αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ τους. Εξετάζονται οι τρεις διατάξεις συνεχών μετατροπέων, όπως επίσης και οι αρχές λειτουργίας των αλγορίθμων αναζήτησης MPP με ιδιαίτερη ανάλυση στον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση και σχεδίαση του DC-DC buck converter, ο οποίος ελέγχεται από τον μικροεπεξεργαστή arduino με σκοπό να φορτίζει συσσωρευτή 12V.

Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού όταν σε αυτό συνδέεται το κύκλωμα υποβιβασμού τάσης. Πραγματοποιείται σύγκριση με την ισχύ που αποδίδει το φωτοβολταϊκό απευθείας στην μπαταρία, με αποτέλεσμα το σύστημα φωτοβολταϊκό-dc-dc converter-μπαταρία να παράγει έως και 10% περισσότερη ισχύ. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν την κυμάτωση της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του κυκλώματος και στην είσοδο του κυκλώματος αντίστοιχα.

Λέξεις κλειδιά

φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ηλιακή ακτινοβολία, εφαρμογές χαμηλού κόστους, ενδιάμεση τεχνολογία, μετρητικό σύστημα, μέτρηση καμπύλης ισχύος, θερμοκρασία, κλίση φωτοβολταϊκού συλλέκτη, κύκλωμα υποβιβασμού τάσης, αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης, μικροεπεξεργαστής, μπαταρία

Abstract

The scope of this thesis is the study and the measurement of the solar panels' power curve, on low cost and adequate technology applications. In this framework, measurements were conducted for the determination of the power curve and other features in a solar panel and in a test site at the roof of the old building of Electrical and Computer Engineering department of National Technical University of Athens.

Initially, we can see the structure of polycrystalline silicon solar cells, that are used to the photovoltaic science such as radiation, ambient temperature, partial shade, saturation current, series resistance and shunt resistance . A study, however, would not be completed if the experimental process did not exist. In this process the factors that influence the photovoltaic operation are analyzed at great length in a real installation. It is also remarkable to have a comparison between the experimental data and the data gathered through simulation method.

Additionally, the maximum power point of the solar panel is investigated to which the photovoltaics attribute their maximum power. Three provisions dc-dc converter are examined, as well as the operating principles of research algorithms MPP with special analysis in Perturb and Observe(P&O). Moreover, there is an analysis and design of the DC-DC buck converter, which is being controlled from the microprocessor-arduino, in order to charge a battery 12V.

Finally, results are presented associated with photovoltaic power when a dc-dc buck converter is connected to that. The comparison of the photovoltaic power is performed directly with the battery, so that the system photovoltaic panel, dc-dc buck converter-battery produces up to 10% more energy. The experimental results show the voltage and current rippling at the exit and the entrance of the circuit respectively.

Key words

photovoltaic panel, solar radiation, low cost applications, adequate technology, acquisition system, power curve measurement, temperature, tilt angle of the solar module, DC-DC buck converter, algorithm P&O, microprocessor, battery

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη για τη βοήθεια, την καθοδήγηση και τη στήριξη κατά τη διαδικασία αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π για τις υποδείξεις του και για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας αυτής της διπλωματικής. Επίσης, ευχαριστώ τον Γιώργο Κατσαρό από το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τη βοήθεια και τις συμβουλές του. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου που έκαναν υπομονή μαζί μου όλο αυτό το διάστημα.

Στην Μητέρα μου...

Contents

Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 1 ^ο	13
Ηλιακή ενέργεια	13
1.1 Ηλιακή ακτινοβολία	13
1.2 Γεωμετρικές παράμετροι προσδιορισμού ηλιακής ακτινοβολίας.....	19
1.3 Η ηλιακή ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη	20
1.4 Η επίδραση της κλίσης του συλλέκτη	21
1.5 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας	23
1.6 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη	24
1.6.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας.....	24
1.6.2 Επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία	25
1.6.3 Συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη.....	26
1.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου	27
1.7.1 Κατασκευή ηλιακών κυψελών	27
1.7.2 Τύπος ηλιακής κυψέλης	29
1.7.3 Συμβατικές κρυσταλλικές τεχνολογίες.....	29
1.8 Οργανικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία	36
Κεφάλαιο 2 ^ο	41
Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πλαισίου	41
2.1 Φωτοβολταϊκά κύτταρα	41
2.2 Ενδογενής ημιαγωγός	41
2.3 Εξωγενής ημιαγωγός	43
2.4 p-n επαφή.....	44
2.5 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	46
2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα	47
2.7 Μοντελοποίηση κυψέλης.....	50
2.7.1 Εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κύκλου από την ακτινοβολία-θερμοκρασία	51
2.7.2 Εξάρτηση της I-V από την R_s	53
2.7.3 Εξάρτηση από την ακτινοβολία.....	53
2.7.4 Θερμοκρασία κυττάρου (T)	54
2.7.5 Ρεύμα κόρου της διόδου.....	55
2.8 Βαθμός απόδοσης.....	56

2.9 Παράγοντας πλήρωσης	58
Κεφάλαιο 3 ^ο	59
Δημιουργία πεδίου δοκιμών για φωτοβολταϊκά πλαίσια σε πραγματικές συνθήκες.	59
3.1 Εισαγωγή	59
3.2 Περιγραφή εξοπλισμού	59
3.2.1 Εξοπλισμός ηλεκτρικών μετρήσεων	59
3.2.2 Εξοπλισμός μετεωρολογικών μετρήσεων	60
3.3.3 Κάρτα καταγραφής σημάτων	61
3.4 Μετρητικό Σύστημα	62
3.4.1 Πλακέτα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών	62
3.4.2 Κάρτα και πρόγραμμα καταγραφής	66
Κεφάλαιο 4 ^ο	68
Μέτρηση χαρακτηριστικής φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πεδίο δοκιμών	68
4.1 Κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου	68
4.2 Εισαγωγή στην επεξεργασία των μετρήσεων. Η καμπύλη I-V	69
4.3 Μελέτη της αποδιδόμενης ισχύος	76
4.3.1 Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ισχύ	77
4.4 Συνθήκες Συννεφιάς	80
4.5 Περίπτωση σκίασης. Φαινόμενο θερμής κηλίδας	81
4.6 Γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου	85
4.6.1 Μελέτη του παράγοντα πλήρωσης	88
4.7 Σύγκριση φωτοβολταϊκού με χρήση γυαλιού και φωτοβολταϊκού με χρήση plexi-glass.	89
4.8 Σύνδεση φωτοβολταϊκού-μπαταρίας	90
4.9 Μοντελοποίηση πλαισίου-Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα	92
Κεφάλαιο 5 ^ο	96
Μελέτη καθορισμού των βέλτιστων σημείων λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων	96
5.1 Ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος	96
5.2 Γενικά για διατάξεις Ανισχνευτών ΜΣΙ	98
5.3 MPPT με DC-DC μετατροπείς	98
5.3.1 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης	101
5.3.2 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης	106
5.3.3 Μικτός DC-DC μετατροπέας	109
5.5 Έλεγχος τάσης εξόδου μετατροπέων DC-DC με την τεχνική PWM	113
5.6 Ταξινόμηση των αλγόριθμων αναζήτησης	114
5.6.1 Διατάραξης και αναζήτησης	115

5.6.2 Αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας(Incremental conductance)	119
5.7 Κατασκευή DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.....	122
5.8 Προσομοίωση του κυκλώματος υποβιβασμού τάσης στο Psim.....	127
5.9 Παραγωγή παλμών με χρήση μικροεπεξεργαστή- Arduino uno	130
5.9.1 Γενικά.....	130
5.9.2 Ο μικροεπεξεργαστής arduino uno	131
5.10 Πειραματικά αποτελέσματα	136
5.11 Ενεργειακή απόδοση συστήματος DC-DC buck converter και φωτοβολταϊκού.....	138
Κεφάλαιο 6 ^ο	142
Βελτιωτικές προτάσεις-Συμπεράσματα	142
6.1 Εγκατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας πλαισίου.....	142
6.2 Βελτίωση του κυκλώματος MPPT	142
6.3 Βελτίωση του συστήματος επεξεργασίας δεδομένων.....	143
Παραρτήματα	144
Παράρτημα Α.....	144
Παράρτημα Β	153
Datasheet Στοιχείων	153
Βιβλιογραφία.....	164

Εισαγωγή

Οι όλο και μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας οδηγούν στην τεράστια αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Οι ανάγκες αυτές αναμένεται να αυξηθούν ακόμα περισσότερο με την αύξηση του πληθυσμού της Γης και η ζήτηση πλέον θα υπάρχει στις αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς στις ανεπτυγμένες με τα μέτρα εξοικονόμησης που εφαρμόζονται υπάρχει μια τάση σταθεροποίησης. Τα βασικά προβλήματα λοιπόν είναι:

- Η διαφαινόμενη έλλειψη καυσίμων σε μερικά χρόνια (σύμφωνα με τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις, τα γνωστά αποθέματα πετρελαίου, μαζί με αυτά που πιθανόν να ανακαλυφθούν φθάνουν με τα βίαια άλλα 30 χρόνια) και τα απαράδεκτα παιχνίδια εταιριών

σε συνδυασμό με τις τιμές τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει το πρόβλημα στην ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων.

- Η αλλαγή του κλίματος και το φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο οφείλεται στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων οδηγούν αργά και σταθερά τον πλανήτη μας στην καταστροφή. Συγκεκριμένα κάθε KW ηλεκτρισμού που προμηθευόμαστε από τη ΔΕΗ και παράγονται φυσικά από καύση ορυκτών καυσίμων ελευθερώνει στην ατμόσφαιρα το λιγότερο 1 Kg CO₂.

Η λύση λοιπόν στα ζωτικά αυτά προβλήματα είναι η ηλιακή ενέργεια από την οποία μπορούμε να παράγουμε καθαρή και ανεξάντλητη ηλιακή ενέργεια από τον ήλιο, χωρίς την μεσολάβηση ρυπογόνων, θορυβωδών εγκαταστάσεων. Συνολικά η ενέργεια που προσπίπτει πάνω στην Γη είναι $1,54 \cdot 10^{18}$ KW/έτος, δηλαδή 1500 φορές περισσότερη ενέργεια από την παγκόσμια ζήτηση ανα έτος. Επιπλέον, μειώνουμε τις εκπομπές CO₂ οπότε επιβραδύνουμε το φαινόμενο θερμοκηπίου. Αξίζει να τονίσουμε ότι 1 KW Φ/Β το οποίο στη Ελλάδα παράγει περίπου 1 Kwh το χρόνο αποτρέπει την έκλυση 1450 Kg CO₂ όσο δηλαδή απορροφούν το χρόνο 2 στρέμματα δάσους ή 100 δέντρα.

Κεφάλαιο 1^ο

Ηλιακή ενέργεια

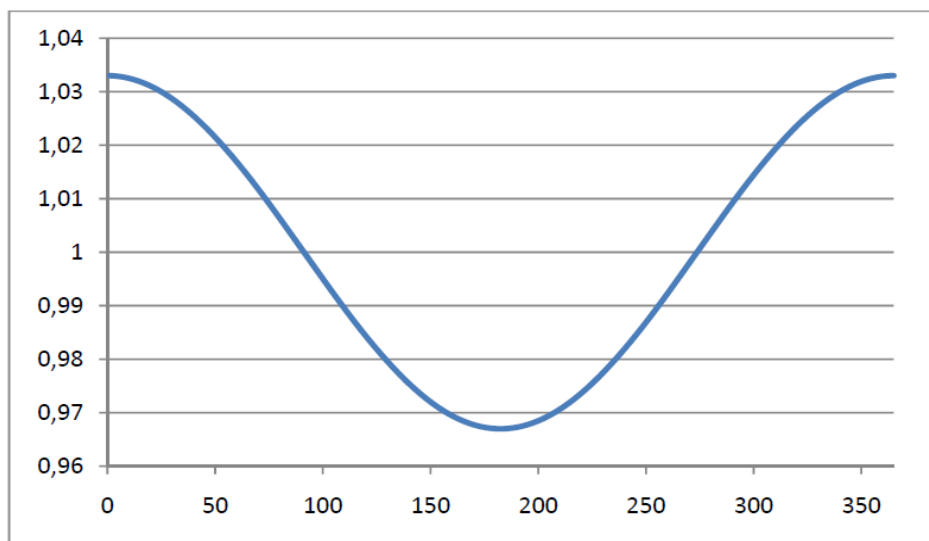
1.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται με την ηλιακή ακτινοβολία από τον ήλιο, ο οποίος βρίσκεται σε μία μέση απόσταση $149.6 \cdot 10^6 \text{ Km}$ από τη γη. Η ετήσια μεταβολή της απόστασης ήλιου-γης, λόγω της ελλειπτικής μορφής της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο είναι $\pm 1.7\%$ και επαναλαμβάνεται με μικρές μεταβολές από χρόνο σε χρόνο. Η αντίστοιχη διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας εκτιμάται στα επίπεδα του $\pm 3.4\%$ [1].

Η απόσταση ήλιου γης μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο 1.1 ως εξής:

$$r = r_0 \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360}{365} * n \right) \right) \quad (1.1)$$

όπου r_0 είναι η μέση απόσταση και n είναι η μέρα του χρόνου, από $n=1$ είναι η 1^η Ιανουαρίου και $n=365$ η 31η Δεκεμβρίου.

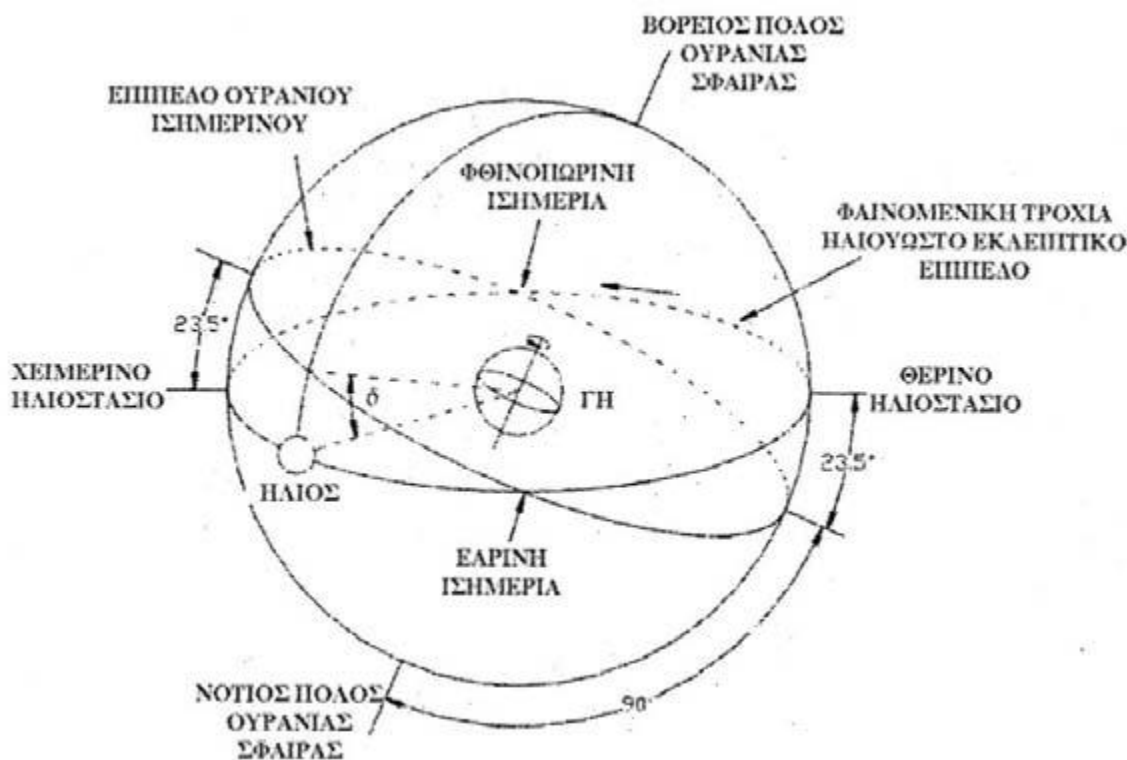


Σχήμα 1.1. Ημερήσια μεταβολή της απόστασης Ήλιου Γης(r) σε συνάρτηση με τη μέση απόσταση

Η Γη κάνοντας μία περιστροφή την ημέρα, γυρίζει με έναν ρυθμό 15° ανα ώρα (σε σχέση με τον ήλιο). Το επίπεδο περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο, ονομάζεται εκλειπτικό επίπεδο. Ο άξονας περιστροφής της γης σχηματίζει μία γωνία περίπου 23.5° , με την κάθετο στο εκλειπτικό επίπεδο. Η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της προκαλεί τις ημερήσιες μεταβολές στα

επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η θέση αυτή του άξονα σε σχέση με τον ήλιο προκαλεί εποχιακές αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία. Η γωνία όμως του άξονα περιστροφής της Γης και της καθέτου στο εκλειπτικό επίπεδο παραμένει σταθερή. Το ίδιο συμβαίνει με το επίπεδο του ισημερινού της Γης με το εκλειπτικό επίπεδο. Μεταβάλλεται όμως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα της Γης και του ήλιου με το εκλειπτικό επίπεδο του ισημερινού. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται συνεχώς και ονομάζεται ηλιακή απόκλιση (δ). Είναι μηδέν κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία και έχει την τιμή $+23,45^\circ$ το θερινό ηλιοστάσιο και $-23,45^\circ$, το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου, για το Β ημισφαίριο).

Η σχετική θέση του ήλιου και της Γης περιγράφεται απλούστερα με βάση την ουράνια σφαίρα, στο κέντρο της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται η γη. Το επίπεδο του ισημερινού της γης τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας της γης στους ουράνιους πόλους. Η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο φαίνεται ως η κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα στην εκλειπτική, η οποία σχηματίζει μέση γωνία $23,45^\circ$ με το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού.

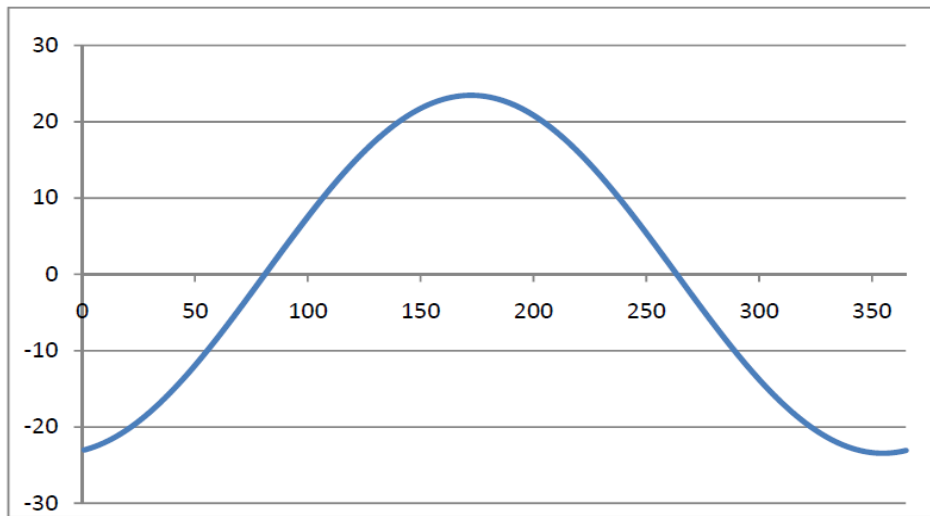


Σχήμα 1.2. Η ουράνια σφαίρα με τη φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου.

Η ηλιακή απόκλιση είναι λοιπόν η ευθεία μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης και του επιπέδου του ισημερινού. Η φαινομενική πορεία του ήλιου γύρω από τη Γη παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2 όπου απεικονίζεται η ηλιακή απόκλιση, η οποία για την κάθε ημέρα του έτους δίνεται από τη σχέση.

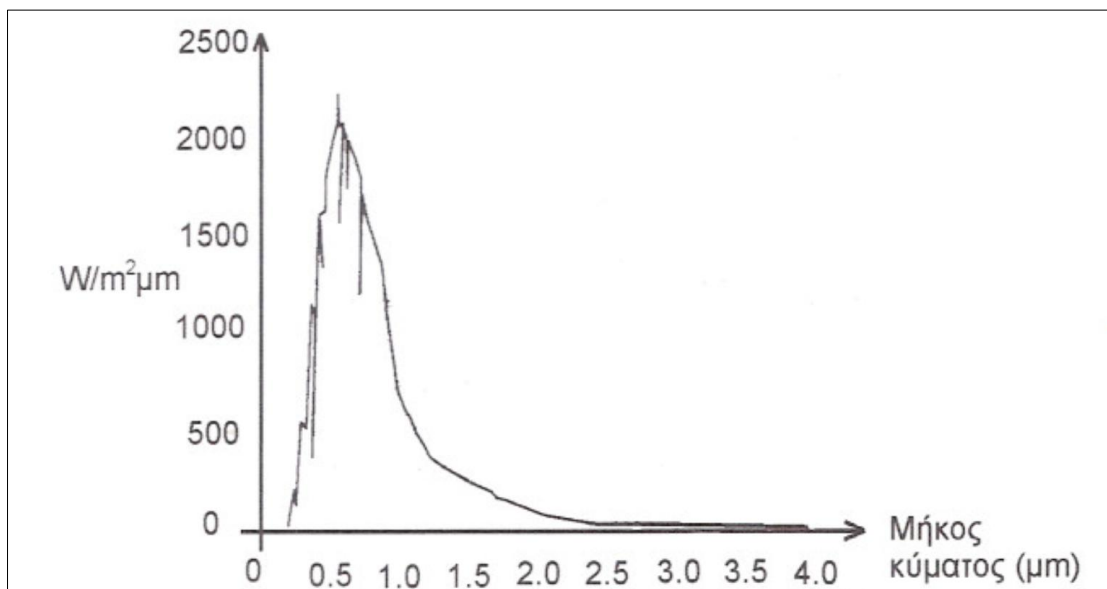
$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360*(284+n)}{365}\right) \quad (1.2)$$

Ακολούθως δίνεται η γραφική παράσταση της ηλιακής απόκλισης:



Σχήμα 1.3 Ηλιακή απόκλιση κατά τη διάρκεια του έτους

Από υφιστάμενες αναλύσεις υπολογίζεται ότι ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια (ανά μονάδα χρόνου) υπό μορφή ακτινοβολίας ισχύος $3.72 \cdot 10^{23}$ KW. Η ποσότητα εκπεμπόμενης ενέργειας, ανά μονάδα χρόνου που φτάνει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ακτινοβολίας, στη μέση ετήσια απόσταση γης-ήλιου, ονομάζεται ηλιακή σταθερά (G_{SC}) και ισούται με 1367 W/m^2 . Η ηλιακή ακτινοβολία κατανέμεται σε ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος, δηλαδή από 2500 έως 40000 Angstrom (ενώ ισχύει $1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$). Η φασματική κατανομή έξω από την ατμόσφαιρα παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4. Φασματική κατανομή Ηλιακής Ακτινοβολίας

Σύμφωνα με τις πλέον σύγχρονες αναλύσεις, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται στα μικρά μήκη κύματος, δηλαδή έως στα 3 με 4 μm . Συνεπώς, ακτινοβολία μεγαλύτερη των 4 μm ονομάζεται ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Από τα διαθέσιμα στοιχεία προκύπτει ότι το 99% της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνεται σε μήκη κύματος από 0.25 έως 4 μm . Στο ορατό τμήμα της ακτινοβολίας (0.39-0.77 μm) περιέχεται το 46.41% της ενέργειας, ενώ στο υπεριώδες (μήκος κύματος < 0.4 μm) περιέχεται το 8.03%. Τέλος η φασματική περιοχή του ηλιακού φωτός με μήκος κύματος > 0.77 μm περιέχει το υπόλοιπο 45.56% της ενέργειας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, χωρίζεται σε άμεση και διάχυτη, ενώ το άθροισμα αυτών είναι η ολική ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία συμβολίζεται με G σε (W/m^2) όταν έχουμε στιγμιαία ένταση. Αντίστοιχα με I σε (J/m^2) περιγράφεται η ωριαία ποσότητα ηλιακής ενέργειας, ενώ με H σε (J/m^2) συμβολίζεται η ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ενέργεια.

Άμεση ακτινοβολία καλείται ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει κατευθείαν στην επιφάνεια της γης χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα και συμβολίζεται με το δείκτη b . Από τις υφιστάμενες αναλύσεις η αριθμητική τιμή της άμεσης ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση ήλιου-γης, την ηλιακή απόκλιση δ , το ηλιακό ύψος α , το γεωγραφικό πλάτος του τόπου φ , το υψόμετρο του τόπου ζ , την κλίση του εδάφους καθώς και την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ακτινοβολία καλείται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της λόγω ανάκλασης ή σκέδασης μέσα στην ατμόσφαιρα. Το τμήμα αυτό της διάχυτης ακτινοβολίας συμβολίζεται με δείκτη s . Το υπόλοιπο της διάχυτης ακτινοβολίας προέρχεται από ανάκλαση στην επιφάνεια της γης και συμβολίζεται με δείκτη r . Η συνολική διάχυτη ακτινοβολία είναι το άθροισμα των επιμέρους I_s και I_r και περιγράφεται με το δείκτη d . Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία των σωματιδίων και αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Ανακλώμενη ακτινοβολία είναι αυτή που ανακλάται σε αντικείμενα όπως ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης.

Τέλος η **ολική** ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας και συμβολίζεται με G ή I ή H . Για παράδειγμα σε μία οριζόντια επιφάνεια η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία θα δίνεται από τη σχέση:

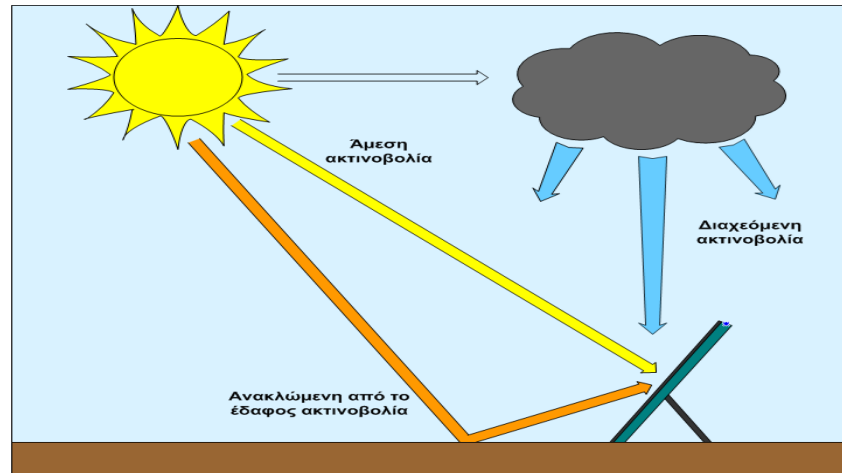
$$I = I_b + I_d \quad (1.3) \quad (1)$$

Αντίστοιχες εξισώσεις ισχύουν για στιγμιαίες ή ημερήσιες τιμές.

Από την υφιστάμενη εμπειρία είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει μία ηλιακή ακτίνα μέσα στην ατμόσφαιρα τόσο μικρότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που

προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Αντίστοιχα όσο πιο κάθετα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η έντασή της.

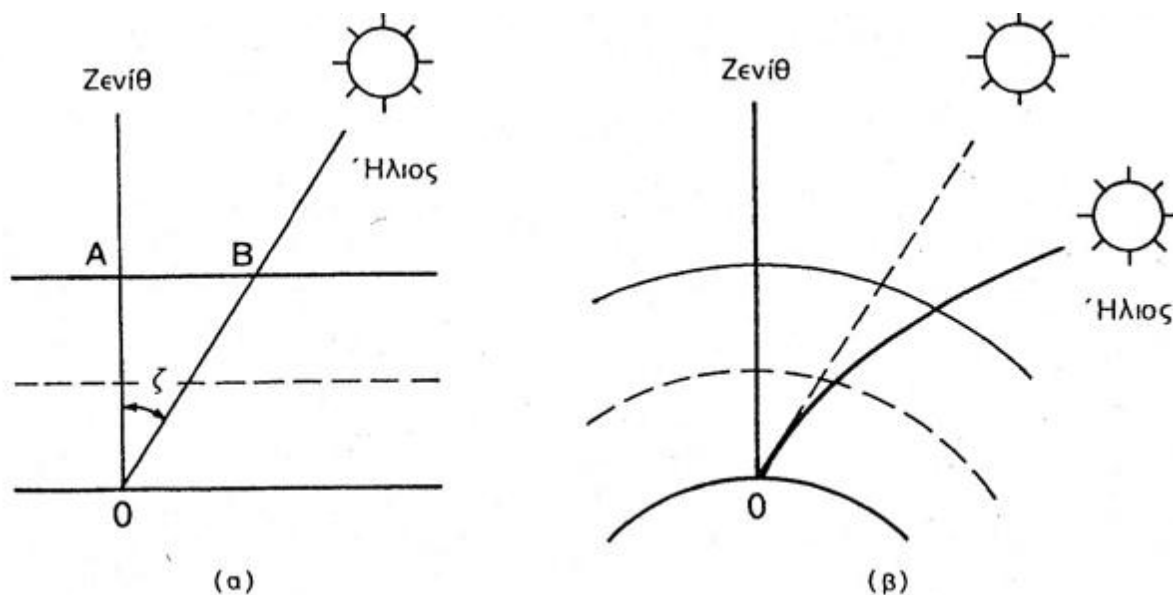
Στο σχήμα 1.6 φαίνεται η κάθε ακτινοβολία αναλυτικά[2].



Σχήμα 1.6. Συνιστώσες ακτινοβολίας

Αέρια μάζα: Επιπλέον, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, και κυρίως την θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι η άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμολογημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημιτόνου) της ζενιθιακής απόστασης, δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο. Άρα η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με την κατακόρυφο διαδρομή της.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad 0 \leq \theta_z \leq 70^\circ \quad (1.4)$$



Σχήμα 1.7 Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα (AM) από τη θέση του ήλιου. (α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση. Εξορισμού είναι $AM=OB/OA=1/\sin z$. Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας με τα στρώματά της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα στα στρώματα αυτά.

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς	Μέση ενέργεια των φωτονίων
AM0	Στο διάστημα έξω από την ατμόσφαιρα	1350	1,48eV
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	1060	1,32eV
AM2	Απόσταση του ήλιου 60 από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38eV
AM3	Απόσταση του ήλιου 70,5 από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750	1,21eV

Πίνακας 1.1.

Συγκεκριμένα ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια ως AM1.5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45 μοίρες από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία 60μοίρες κτλ. Το μηδέν της κλίμακας που ταυτίζεται με την ηλιακή σταθερά συμβολίζει την πλήρη απουσία της ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης με τον ήλιο. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζα αέρα. Πάντως η πιο πάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι εκτός από τις τιμές του πίνακα, η AM0 αναφέρεται και ως 1353 W/m^2 .

1.2 Γεωμετρικές παράμετροι προσδιορισμού ηλιακής ακτινοβολίας

Η ημερήσια κίνηση της Γης απεικονίζεται με την ημερήσια περιστροφή της ουράνιας σφαίρας περί τον πολικό άξονα και η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από τη ωριαία γωνία ω , η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περνάει από τον ήλιο και του μεσημβρινού που περνάει από τον ήλιο και του μεσημβρινού που περνάει από τη θέση εγκατάστασης. Είναι $\omega=0$ κατά το ηλιακό μεσημέρι και αυξάνει με ρυθμό $15^\circ/\text{h}=0.25/\text{min}$. Λαμβάνεται $\omega<0$ για πμ και $\omega >0$ για μμ[3],[4].

Η ωριαία γωνία του ήλιου ω υπολογίζεται από τη σχέση 1.5:

$$\omega = (t_s - 12) * 15 \quad (1.5)$$

όπου ω , η ωριαία γωνία του ήλιου σε ώρες

t_s , ο ηλιακός χρόνος σε ώρες

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό και δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο του ωρολογίου.

Οι δύο χρόνοι συνδέονται με την σχέση 1.6:

$$t_s = t_c + \left(\frac{L_{loc}}{15}\right) - T_c + E \quad (1.6)$$

όπου t_s ο ηλιακός χρόνος σε ώρες

t_c , ο τοπικός χρόνος σε ώρες

L_{loc} , το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή σε μοίρες

T_c , η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT σε ώρες (για Ελλάδα +2 ώρες)

E , μία εξίσωση χρόνου σε ώρες

$$E = 3.82(0.00075 + 0.01868\cos B - 0.032077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sin 2B)$$

$$\text{όπου } B=360 \cdot \frac{n-1}{365} \quad (1.7)$$

$n=1$ η (1^η Ιανουαρίου) έως 365(31^η Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.

Η εξίσωση του χρόνου E είναι ένας παράγοντας που συνεκτιμά τις επιδράσεις της στροφής των αξόνων της γης κατά την περιστροφή της στο επίπεδο της εκλειπτικής και της εκκεντρότητας της τροχιάς της.

Λόγω της γεωγραφικής θέσης ενός παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της γης προσφέρεται να οριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων με βάση την κατακόρυφο, η οποία τέμνει την ουράνια σφαίρα στο ζενίθ και το ναδίρ, και τον ορίζοντα που είναι το επίπεδο το κάθετο στον άξονα αυτόν. Η γωνία θ_Z μεταξύ του ζενίθ και της ευθείας όρασης του ήλιου ονομάζεται γωνία ενίθ ή ζενιθιακή γωνία, η δε συμπληρωματική της $\alpha=90^\circ-\theta_Z$, ονομάζεται ύψος του ήλιου. Η άλλη πολική συντεταγμένη για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου είναι η αζιμουθια γωνία ψ , μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ήλιου στο επίπεδο του ορίζοντα και του νότου. Είναι $\psi=0^\circ$ στο νότο, $\psi=90^\circ$ στη δύση, $\psi=-90^\circ$ στην ανατολή και $\psi=180^\circ$ στο βορρά[5].

Για οριζόντιες επιφάνειες, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι οι στατιστικές μετρήσεις αναφέρονται συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο, ισχύουν μεταξύ των παραπάνω γωνιών οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\cos\theta_Z = \sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega \quad (1.8)$$

όπου φ το γεωγραφικό πλάτος της θέσης της εγκατάστασης και $\theta_Z+\alpha=90^\circ$.

Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta_Z>90^\circ$.

Η ωριαία γωνία ω_s κατά την οποία δύνει ο ήλιος, προκύπτει προφανώς αν τεθεί $\theta_Z=90^\circ$, οπότε:

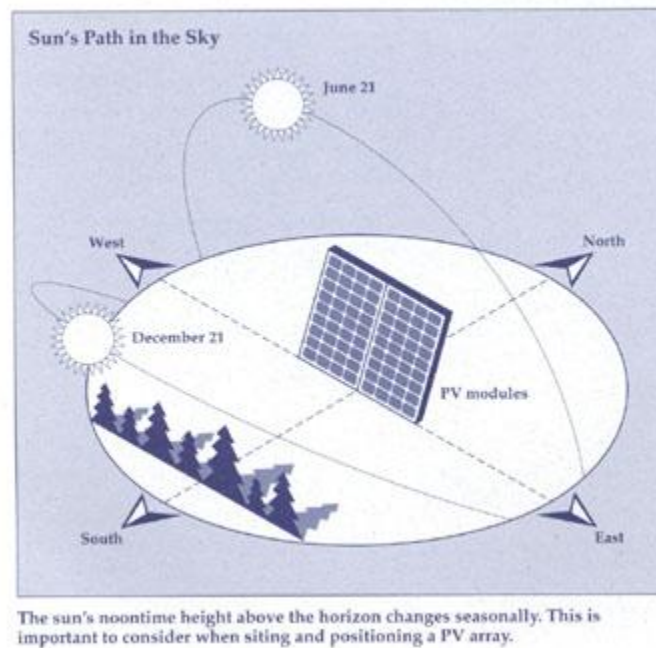
$$\cos\omega_s = -\frac{\sin\varphi * \sin\delta}{\cos\varphi * \cos\delta} = \tan\varphi * \tan\delta \quad (1.9)$$

Συνεπώς ο ήλιος θα ανατείλλει σε γωνία $-\omega_s$ και θα δύνει σε γωνία $+\omega_s$. Επίσης αν είναι N (σε ώρες) η διάρκεια της ημέρας, δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου θα είναι:

$$N = 2 * \frac{24}{360} * \omega_s = \frac{2}{15} \arccos(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad (1.10)$$

1.3 Η ηλιακή ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη διαφέρει από αυτήν που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο όταν ο συλλέκτης έχει εγκατασταθεί υπό κάποια κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η υπό γωνία εγκατάσταση του συλλέκτη συνηθίζεται για λόγους μέγιστης εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και μία τέτοια τοποθέτηση προσδίδει επιπλέον χαρακτηριστικά στην ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 1.8 Η κίνηση του ήλιου σε σχέση με το φωτοβολταϊκό συλλέκτη

1.4 Η επίδραση της κλίσης του συλλέκτη

Η απορροφούμενη ακτινοβολία είναι μέγιστη όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Συνεπώς για να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης ποσότητας της ηλιακής ενέργειας θα έπρεπε ο συλλέκτης να στρέφεται συνεχώς ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου, πράγμα όμως που κατά κανόνα αυξάνει αδικαιολόγητα το κόστος της εγκατάστασης και εφαρμόζεται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις[5].

Στην πράξη, κατά γενικό κανόνα, η θέση των συλλεκτών, δηλαδή του προσανατολισμού και της κλίσης τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο, παραμένει αμετάβλητη ή το πολύ προβλέπεται η χειροκίνητη μεταβολή της κλίσης τους μία ή δύο φορές το έτος.

Στη γενικότερη περίπτωση, η θέση του συλλέκτη προσδιορίζεται από τη γωνία β που σχηματίζει με τον οριζόντιο επίπεδο, (ονομάζεται κλίση του συλλέκτη), και την γωνία γ που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς το νότο (ονομάζεται αζιμούθια γωνία του συλλέκτη).

Για μία τυχούσα θέση του συλλέκτη ισχύουν τα παρακάτω:

- θ η γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής (ή άμεσης) ακτινοβολίας του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη.
- ϕ το γεωγραφικό πλάτος της θέσης ($-90^\circ < \phi < 90^\circ$) και
- ω η ωριαία γωνία του ήλιου

αποδεικνύεται ότι ισχύει η σχέση (για το βόρειο ημισφαίριο)

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (1.11)$$

Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta > 90^\circ$.

(Για το νότιο ημισφαίριο πρέπει να αντιστραφεί το πρόσημο του $2^{\text{ου}}$ και του $4^{\text{ου}}$ από τους πέντε προσθετέους της παραπάνω σχέσης.)

Για κάθε επιφάνεια, αρκεί να τεθεί $\beta = 90^\circ$. Για οριζόντιες επιφάνειες, αρκεί να τεθεί $\beta = 0^\circ$, οπότε η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με το ζενίθ, ώστε $\theta = \theta_z$. Επίσης για $\omega = 0$, προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης κατά το μεσημέρι.

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες στο νότο, οπότε $\gamma = 0^\circ$, προκύπτει:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (1.12)$$

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta > 90^\circ$. (Για το νότιο ημισφαίριο αρκεί να τεθεί η αρνητική τιμή της γωνίας φ)

Συχνά οι ηλιακοί συλλέκτες εγκαθίστανται ώστε να στρέφονται προς το νότο, εκτός βέβαια αν ο προσανατολισμός τους επιβάλλεται από τον τρόπο εγκατάστασης. Για εγκαταστάσεις στο βόρειο ημισφαίριο η μέγιστη απολαβή επιτυγχάνεται όταν ο συλλέκτης προσανατολίζεται στο νότο και η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με την γεωγραφική παράλληλο του τόπου, ενώ εάν η κλίση μπορεί να μεταβάλλεται χειροκίνητα (σε χρονικά διαστήματα μηνών, π.χ. ανά εποχή του έτους) ενδείκνυται η κλίση να μειώνεται κατά 10° με 15° κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και να αυξάνεται κατά το ίδιο ποσοστό κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Τα παραπάνω αποτελούν προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε μικρές εγκαταστάσεις, ενώ για μεγάλες πρέπει να γίνεται αναλυτική μελέτη [7],[6].

Παρακάτω, δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις σημαντικότερες ημερομηνίες του έτους.

Για να εξουδετερωθεί η διαφορά αυτή, βρέθηκε ότι αν τα φωτοβολταϊκά τοποθετηθούν ώστε να ώστε να σχηματίζουν με τον οριζόντιο επίπεδο ίση με $(\Phi + 15)$ μοίρες (φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου), η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τα πλαίσια γίνεται μεγαλύτερη το χειμώνα και μικρότερη το καλοκαίρι με αποτέλεσμα να υπάρχει σταθερότητα κατά τη διάρκεια του έτους. Δηλαδή, η μικρότερη ηλιοφάνεια κατά τις χειμερινές μέρες αντισταθμίζεται με την πιο κάθετη τοποθέτηση των πλαισίων προς τις ηλιακές ακτίνες και η μεγάλη ηλιοφάνεια κατά τις

καλοκαιρινές μέρες δίνει λιγότερη ηλιακή ενέργεια με την πιο πλάγια τοποθέτησή τους στις ηλιακές ακτίνες.

Έτσι πρακτικά η ηλιακή ενέργεια που δέχονται τα πλαίσια το χειμώνα είναι ίση περίπου με αυτή που δέχονται το καλοκαίρι. Επι πλέον, η ενέργεια αυτή είναι ίση περίπου με εκείνη που δέχονται τα πλαίσια την άνοιξη και το φθινόπωρο και έτσι διατηρείται σταθερότητα για όλο το χρόνο.

Οι τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά μέσο όρο κάθε μέρα για τις διάφορες εποχές του έτους, καταγράφονται στους διεθνείς χάρτες. Σημειώνεται ότι οι τιμές που αναγράφονται στους πίνακες αποτελούν μέσο όρο και καλύπτουν γενικά όλη την Ελλάδα. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για την περιοχή που θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τέτοια στοιχεία παρέχονται από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς.

Χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Στη Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 το χειμώνα και 13:25 το καλοκαίρι.

1.5 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου[8],[9].

Έτσι όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται, η βέλτιστη κλίση του φ/β συλλέκτη για την διάρκεια του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερη την ηλιακή ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης, εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1 για πλήρη ανάκλαση. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στις περιοχές όπου τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χρώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου,χαλίκια	0,30
Χιόνι	0,60

Πίνακας 1.2

1.6 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας γίνονται συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο, ενδιαφέρει η συσχέτιση μεταξύ της μετρούμενης εντάσεως της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και εκείνης που προσπίπτει στο συλλέκτη[10].

1.6.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας

Αν G_{on} είναι η ένταση της άμεσης (ακτινικής) ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, [11],[12] μετρούμενη σε κάθετο προς τις ακτίνες επίπεδο, τότε η ένταση στο οριζόντιο επίπεδο θα είναι:

$$G_o = G_{on} * \cos \theta_z \quad (1.13)$$

όπου G_o , η ένταση στο οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας

$\cos \theta_z$, η τιμή που υπολογίζεται από τη σχέση

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση στο πεδίο του χρόνου, η ωριαία μέση ακτινοβολία που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο σε κάθε ώρα του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$I_{oh} = \frac{12}{\pi} G_{on} \left[\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi}{180} (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \sin \varphi \right] \quad (1.14)$$

όπου ω_1 , η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας

ω_2 , η ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας

Η πρώτη τιμή που παίρνει η ω_1 είναι η $-\omega_s$, η ωριαία γωνία της ανατολής του ήλιου και η τελευταία τιμή της ω_2 είναι η $+\omega_s$, η ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου.

Σημειώνεται ότι η ωριαία γωνία του ήλιου αυξάνεται από την ανατολή μέχρι την δύση με ρυθμό $15^\circ/\text{h}$.

1.6.2 Επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από τις μεταβολές που υφίσταται λόγω της κίνησης της Γης περί τον ήλιο, και οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με βάση γεωμετρικές σχέσεις, υφίσταται έντονες διακυμάνσεις λόγω της παρεμβολής της ατμόσφαιρας. Οι μειώσεις αυτές μπορεί να διακρίνονται ανάλογα με το αν πρόκειται για αίθρια ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν υπάρχουν νέφη, ή μη αίθρια (νεφελώδη) ατμόσφαιρα, χωρίς όμως να μπορεί να γίνει σαφής διάκριση. Οποσδήποτε όμως λόγω των σημαντικών επιπτώσεων της αιθριότητας της ατμόσφαιρας στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών γίνεται με βάση στατιστικών μετρήσεων [13],[14],[15].

Έτσι, από τις μετρήσεις της ηλιακής συνολικής ενέργειας I σε οριζόντιο επίπεδο στην τοποθεσία της εγκατάστασης, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής αιθριότητας της ατμόσφαιρας από το πηλίκο:

$$K_T = \frac{I}{I_{oh}} \quad (1.15)$$

όπου I , η μετρούμενη ολική ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

I_{oh} , η ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας στην ίδια θέση.

Οι τιμές τους αναφέρονται συνήθως σε ημερήσιες μέσες τιμές, που προκύπτουν από μετρήσεις στη διάρκεια ενός μηνός. Ο K_T αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης και συχνά δίνεται σε πίνακες ως μέση μηνιαία τιμή. Έχει αποδειχθεί στατιστικά ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος, το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία είναι ή ίση από ορισμένη τιμή εξαρτάται άμεσα από την τιμή του K_T . Είναι επίσης διαπιστωμένο ότι όσο πιο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

Από διάφορες σχέσεις συσχέτισης διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας που έχουν διατυπωθεί, υπολογίζουμε το λόγο της διάχυτης ακτινοβολίας I_d προς την ολική I , ως συνάρτηση του συντελεστή αιθριότητας K_T , έτσι ώστε στη συνέχεια να διαχωρίσουμε την συνολική ακτινοβολία από τις συνιστώσες της.

Από διάφορες ακτινοβολίες όπως του Erbs, του Page κλπ και γνωρίζοντας την μετρούμενη συνολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται η διάχυτη ακτινοβολία.

Εδώ επιλέχθηκε η εξίσωση 1.16 του Erbs (Erbs et al, 1982):

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,09 * K_T, & K_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 * K_T + 4,388 * K_T^2 - 16,638 * K_T^3 + 12,336 * K_T^4, & 0,22 < K_T \leq 0,8 \\ 0,165, & K_T > 0,8 \end{cases} \quad (1.16)$$

Η άμεση ή ακτινική ακτινοβολία I_b που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο είναι το υπόλοιπο μέρος της ολικής ακτινοβολίας:

$$I_b = I - I_d \quad (1.17)$$

όπου I_b , η ακτινική ακτινοβολία

I_d , η διάχυτη ακτινοβολία

1.6.3 Συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη

Πριν από τον υπολογισμό της συνολικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κεκλιμένου συλλέκτη προσδιορίζονται τρεις ακόμα συντελεστές [16],[17].

Το μέρος της απευθείας ή ακτινικής ακτινοβολίας που πέφτει στην κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή που υπολογίζεται στην οριζόντια επιφάνεια, ως ποσοστό δίδεται από το ακόλουθο πηλίκο:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (1.18)$$

όπου $\cos \theta$ και $\cos \theta_z$ υπολογίζονται από τις σχέσεις αντίστοιχα.

Ο ακόλουθος συντελεστής εκφράζει την ατμοσφαιρική διαπερατότητα της ακτινικής ακτινοβολίας και δίνει μια εκτίμηση για το μέγεθος της διάχυτης ακτινοβολίας [18],[19].

$$A_i = \frac{I_b}{I_{oh}} \quad (1.19)$$

όπου I_b , η ακτινική ακτινοβολία

I_{oh} , η ακτινοβολία στο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας

Ο τελευταίος συντελεστής υπολογίζει την φωτεινότητα του οριζόντια και σχετίζεται με τη συννεφιά:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (1.20)$$

όπου I_b , η ακτινική ακτινοβολία

I , η συνολική ακτινοβολία

Η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση 1.21:

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin \left(\frac{\beta}{2} \right)^3 \right] + I_p g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1.21)$$

όπου p_g , ο συντελεστής ανάκλασης

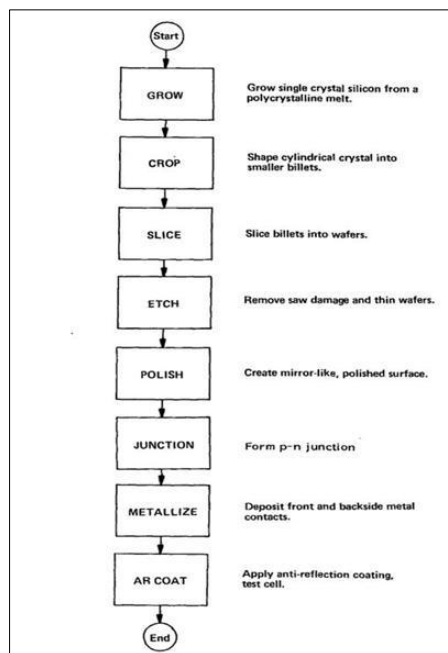
Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν υπολογισθεί παραπάνω.

1.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία των φωτοβολταϊκών κυψελίδων, είναι το Πυρίτιο (Si). Στην άμμο, το Πυρίτιο περιέχεται με τη μορφή του οξειδίου του πυριτίου. Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή έως και πολύ υψηλή καθαρότητα[20].

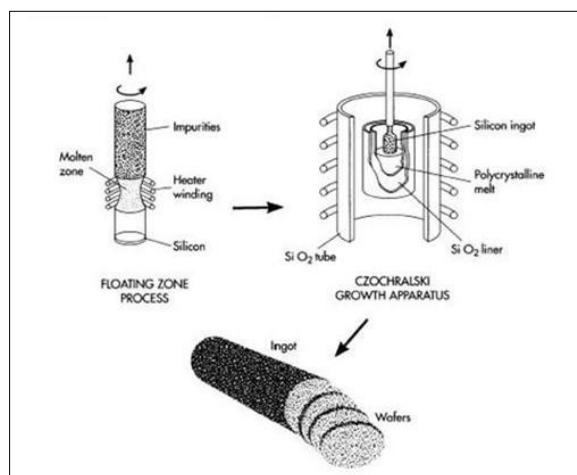
1.7.1 Κατασκευή ηλιακών κυψελών

Οι πιο αποδοτικές μορφές ηλιακών κυψελών αποτελούνται από ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου (μονοκρυσταλλικές). Το πυρίτιο είναι το στοιχείο με τη μεγαλύτερη αφθονία πάνω στη γη μετά το οξυγόνο. Παρόλα αυτά γενικά συναντάται σε σύνθετη μορφή και απαιτείται χημική αναγωγή και κάθαρση ώστε να μετατραπεί σε κατάλληλη μορφή για να αποτελέσει την πρώτη υλη για την παραγωγή μονοκρυστάλλων. Η κατασκευή ηλιακών κυψελών διαίρεται σε οκτώ βασικές λειτουργικές δραστηριότητες. Ένα διάγραμμα ροής της όλης διαδικασίας μαζί με μια σύντομη περιγραφή φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 Διαδικασία Κατασκευής Ηλιακής Κύψελης

Το πρώτο στάδιο παραγωγής είναι αυτό που ονομάζεται «GROW». Μια σειρά από τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη πυριτίου σε μορφή μονού κρυστάλλου. Οι δύο πιο ευρέως εφαρμοσμένες μέθοδοι στην βιομηχανία είναι η ‘Floating Zone’ κατεργασία και η μέθοδος Czochralski. Σε αυτές τις μεθόδους ένα μικρό κομμάτι κρυστάλλου περιστρέφεται, ενώ αποσύρεται με αργό ρυθμό 10 cm/hr σε ένα χωνευτήρι λιωμένου βορίου με προσμείξεις πυριτίου. Μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10 Σχηματική Απεικόνιση Τεχνικής Crystal Growing

Ο επακόλουθος κρύσταλλος κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 8-12 cm και μήκους 1m, περνά από το παραγωγικό στάδιο «CROP». Σε αυτήν την παραγωγική φάση τα άκρα του κρυστάλλου απομακρύνονται, στη συνέχεια μέσω μηχανικής επεξεργασίας ο τελευταίος αποκτά συγκεκριμένη διάμετρο και ύστερα κόβεται σε μικρότερα κομμάτια. Οι ράβδοι είναι πλέον έτοιμες για το στάδιο της κοπής σε φέτες όπου οι ράβδοι κόβονται σε όστιες. Αμέσως μετά είναι το στάδιο «ETCH» όπου επιτελείται χημική αραίωση (λέπτυνση) των κρυστάλλινων γκοφρετών και ακολούθως το στάδιο «POLISH» όπου έχουμε στύλωση των επιφανειών ώστε οι τελευταίες να μοιάζουν με καθρέφτη. Πλέον οι φέτες κρυστάλλου είναι έτοιμες για το σημείο του διαγράμματος ροής «JUNCTION». Στο επίπεδο αυτό δημιουργείται ο σχηματισμός της «p-n σύνδεσης». Η σύνδεση σχηματίζεται σε υψηλή θερμοκρασία διαχέοντας φώσφορο στα ενισχυμένα με βόριο πλακίδια κρυστάλλου, κάτι πολύ ουσιώδες για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το επόμενο βήμα της παραγωγής αποκαλείται «METALLIZE». Προκειμένου η ηλιακή κυψέλη να συλλέγει το ρεύμα καλύπτεται στο πίσω μέρος της με μια μεταλλική επιφάνεια. Ομοίως, ένα λεπτό πλέγμα εναποτίθεται στην μπροστινή επιφάνεια ώστε να ελαχιστοποιήσει την περιοχή των κυψελών που καλύπτεται από καλώδια συλλέκτη. Τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από το πλέγμα στην μπροστινή επιφάνεια και ρέουν μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης στην πίσω επιφάνεια της κυψέλης. Το τελικό στάδιο της διαδικασίας ονομάζεται «AR COAT». Για να περιορίσουμε τον αριθμό των

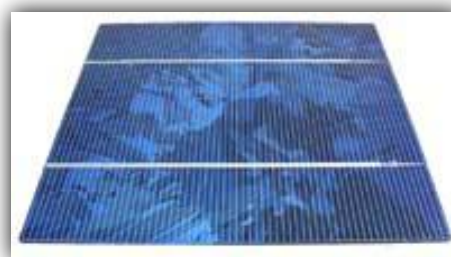
αντανακλώμενων φωτονίων εφαρμόζουμε μια αντί-αντανακλαστική επικάλυψη στην πάνω επιφάνεια της κυψέλης. Αυτό ολοκληρώνει την πλήρη επεξεργασία μιας ηλιακής κυψέλης.

1.7.2 Τύπος ηλιακής κυψέλης

Ο όρος Φωτοβολταϊκό (PV), προέρχεται από το συνδυασμό της Ελληνικής λέξης «ΦΩΣ» και της λέξης «ΒΟΛΤ» που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το ηλεκτρικό δυναμικό. Ως εκ τούτου φωτοβολταϊκό κυριολεκτικά σημαίνει «ΦΩΣ-ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ». Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι κοινώς γνωστά ως ηλιακές κυψέλες. Η πλειοψηφία των ηλιακών κυψελών κατασκευάζεται από πυρίτιο. Το πυρίτιο (Si), όντας το δεύτερο σε αφθονία ορυκτό πάνω στη γη, αποτελεί ημιαγωγό και συνθέτει το 25.7% της μάζας του φλοιού της γης. Το πυρίτιο έχει ένα έμμεσο ενεργειακό χάσμα $\sim 1.1\text{eV}$ το οποίο δεν προσεγγίζει καθόλου στο ιδεατό άμεσο ενεργειακό χάσμα ημιαγωγού που είναι $\sim 1.5\text{eV}$. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής των ηλιακών κυψελών βασίζεται στο πυρίτιο, με τους δύο βασικότερους τρόπους να αποτελούν το συμβατικό κρυσταλλικό πυρίτιο και το thin film πυρίτιο.

1.7.3 Συμβατικές κρυσταλλικές τεχνολογίες

Για αποτελεσματική ηλιακή απορρόφηση, χωρίς την βοήθεια της οπτικής αναβάθμισης, το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος του Si δισκιδίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 50 μm . Οι συμβατικές τεχνολογίες ηλιακών κυψελών κατασκευασμένες από κρυσταλλικό πυρίτιο διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου και κυψέλες πολυκρυσταλλικού .



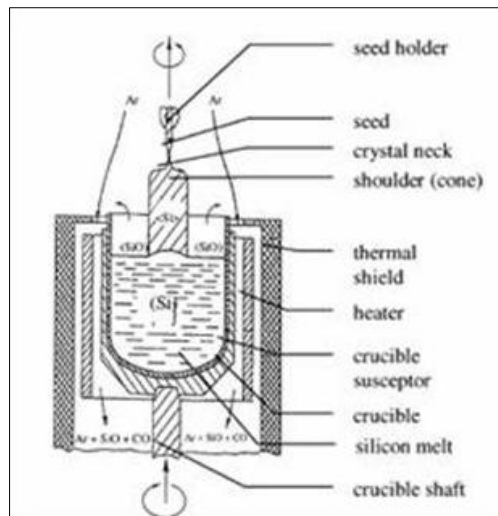
Σχήμα 1.11 Μονοκρυσταλλικό (αριστερά) και Πολυκρυσταλλικό (δεξιά)

1.7.3.1 Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Η ατομική δομή της μονοκρυσταλλικής κατασκευής είναι συνήθως διατεταγμένη ως ένας ενιαίος κρύσταλλος. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει ασημί γκρι χρώμα. Οι δύο πιο παραδοσιακές

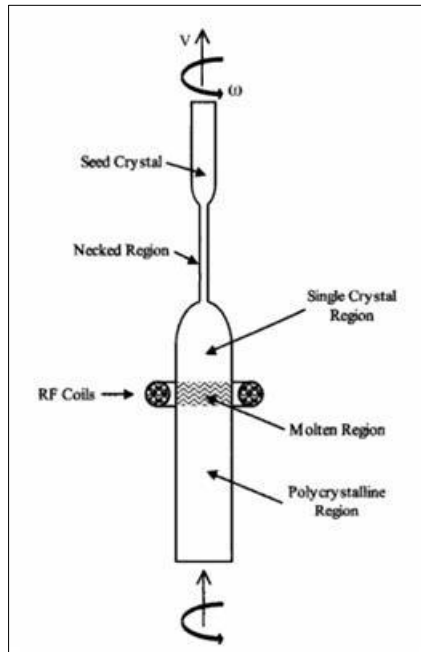
μέθοδοι παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι η μέθοδος Czochralski (Cz) και η τεχνική "Float Zone"

Η μέθοδος Czochralski (Cz) είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική για την παραγωγή μονοκρυσταλλικού πυριτίου, καθώς είναι τεχνολογία με χαμηλότερο κόστος αλλά έχει μεγαλύτερο δείκτη μόλυνσης του οξυγόνου, συγκρινόμενο με την τεχνική "Floating Zone". Η μέθοδος Czochralski ξεκινά με ένα μικρό κομμάτι ενιαίου κρυστάλλου πυριτίου πάνω από λιωμένο πυρίτιο. Καθώς το μικρό αυτό κομμάτι σταδιακά υπερυψώνεται, άτομα του λιωμένου πυριτίου στερεοποιούνται πάνω σε αυτό και έτσι επεκτείνουν την δομή του ενιαίου κρυστάλλου. Ένα κοπτικό εργαλείο με διαμαντένια επικάλυψη χρησιμοποιείται για να παράγει μια λεπτή γκοφρέτα καθώς το πυρίτιο είναι πολύ σκληρό. Στην διαδικασία της κοπής, περίπου ένα ποσοστό της τάξης του 20% του υπάρχοντος πυριτίου παράγεται ως απόβλητο, γνωστό ως "kerf". Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται μια απεικόνιση της μεθόδου Czochralski. Οι ηλιακές κυψέλες που παράγονται με αυτή την μέθοδο έχουν μια αποδοτικότητα της τάξεως του 15% έως 18%. Το πάχος των κυψελών ανέρχεται σε 0.2 έως 0.3mm και η διάμετρος τους κυμαίνεται από 4 μέχρι 6in.



Σχήμα 1.12 Μέθοδος Czochralski

Στην τεχνική "Float Zone" (σχήμα 1.12), μια στερεή ράβδος, εξαιρετικά καθαρού αλλά πολυκρυσταλλικού πυριτίου λιώνει με την εισαγωγή θερμότητας. Ένας ενιαίος κρύσταλλος εξάγεται από αυτήν την περιοχή λιωσίματος.



Σχήμα 1.13 "Float Zone" τεχνική

Επιπρόσθετες τεχνικές έχουν εξελιχθεί προκειμένου να παραχθεί μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Στην Ιαπωνία ο Shin-Etsu Handotai έχει αναπτύξει μια μέθοδο επωνομαζόμενη "Μαγνητικά ανεπτυγμένη Czochralski" (MCZ). Σε αυτήν τη διαδικασία παρουσιάζεται αλληλεπίδραση μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων του πυριτίου και ενός μαγνητικού πεδίου, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αργή ροή του κλασσικού τήγματος. Οι προσμίξεις διανέμονται πιο ομοιόμορφα με τη μείωση της μεταφοράς του οξυγόνου από τα τοιχώματα του χωνευτηριού. Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από περίπου 21% έως 24%, ενώ με τη μορφή των ΦΒ πλαισίων, μεταξύ 13 έως 18%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής.

1.7.3.2 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Από σκοπιά κόστους, οι ηλιακές κυψέλες που προέρχονται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι αρκετά φθηνότερες συγκρινόμενες με τις κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερη αποδοτικότητα εξαιτίας της λιγότερο τακτικής κρυσταλλικής διάταξης. Το πολυκρυσταλλικό παράγεται στερεοποιώντας λιωμένο πυρίτιο σε ένα καλούπι ή δίσκο, συνήθως τετραγωνικού σχήματος. Ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει το μέγεθος των κόκκων αλλά και την κατανομή των προσμίξεων. Υπάρχουν δύο είδη προσμίξεων: οι «κινητές» και οι «ακίνητες» προσμίξεις. Οι «κινητές» προσμίξεις μπορούν να αφαιρεθούν κατά την διάρκεια της εκπομπής διάχυσης. Αυτό επιτυγχάνεται ανασύροντας στην επιφάνεια τις «κινητές» προσμίξεις με την επεξεργασία φωσφορικού gettering. Οι «ακίνητες» προσμίξεις 5-luminium-5 μπορούν να «αποστρατευθούν» με την παθητικοποίηση του υδρογόνου. Η διαδικασία της κοπής είναι παρόμοια

με την παραγωγή μονοκρυσταλλικών, χρησιμοποιώντας ένα πριόνι σύρματος. Παρόμοια με την παραγωγή μονοκρυστάλλων παράγονται απόβλητα κατά την διαδικασία της κοπής. Οι πολυκρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες είναι γαλαζωπού χρώματος. Έχουν αποδοτικότητα 13% έως 16% και οφείλουν το μπλε τους χρώμα στην αντανάκλαστική τους επίστρωση. Το πάχος τους κυμαίνεται μεταξύ 0.24 και 0.33mm και με διαθέσιμα μήκη 4,5,6,,6+,8in.

1.7.3.3 Thin film ηλιακές κυψέλες

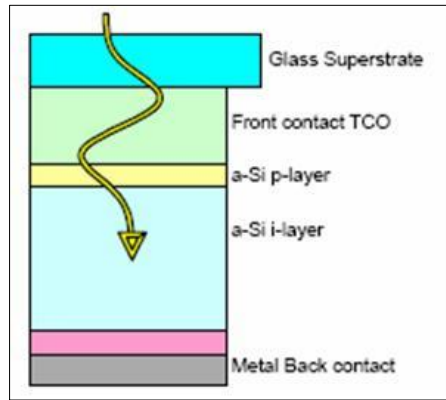
Οι Thin Film ηλιακές κυψέλες ποικίλουν στο πάχος από μερικά νανόμετρα σε δεκάδες μικρόμετρα. Είναι προτιμότερο να τις προσδιορίζουμε όσον αφορά την διαδικασία της δημιουργίας τους. Οι ηλιακές κυψέλες thin film αποτελούνται από πολλές διαφορετικές στρώσεις υλικών, συμπεριλαμβανομένου: Φωτοβολταϊκά υλικά, Διαφανές αγωγίμο οξειδίο (TCO), Στρώμα απορρόφησης, Στρώμα μεταλλικής επίστρωσης κ.τ.λ. Είναι επικαλυμμένα με ένα υπόστρωμα όπως γυαλί, πολυμερές και ανοξειδωτο χάλυβα πάντα σε συνάρτηση με τις διαδικασίες κατασκευής.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες τεχνολογίας ηλιακών κυψελών thin film:

1. Άμορφο Πυρίτιο (a-Si)
2. Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)
3. Χαλκού Ινδίου (Γάλλιο) di-Σεληνιούχο (CIS/CIGS)
4. Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Άμορφο Πυρίτιο (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο για πρώτη φορά περιγράφεται το 1965, όταν ο Στέρλινγκ ανέφερε εναπόθεση πυριτίου σε ένα υπόστρωμα χρησιμοποιώντας σιλάνιο πυράκτωσης-απαλλαγής. Με το πέρασμα των χρόνων, πολλές διαμορφώσεις έχουν εξελιχθεί. Σήμερα, οι εμπορικά διαθέσιμες διαμορφώσεις άμορφου πυριτίου είναι οι εξής: διαμόρφωση ενιαίας σύνδεσης (a-Si) η οποία είναι και η παλαιότερη με αποδοτικότητα κυψέλης λιγότερο του 5%, διαμόρφωση διπλής ζεύξης (δύο στρώματα), (a-Si (2)), διαμόρφωση τριπλής σύνδεσης (a-Si (3)) με απόδοση κυψέλης περίπου 8%. Πρόσφατα μια νέα τεχνολογία περιγράφηκε, ονομαζόμενη Micromorph (μcSi/a-Si) και η οποία σχηματίζεται από το συνδυασμό στρώματος άμορφου πυριτίου και μικροκρυσταλλικού πυριτίου διαμορφώνοντας μια “tandem” κυψέλη, δηλαδή ηλιακές κυψέλες οι οποίες περιέχουν πληθώρα συνδέσεων p-n. Καθώς η εξέλιξη του άμορφου πυριτίου προοδεύει, η αποδοτικότητα έχει βελτιωθεί και έχει επιτευχθεί μεγαλύτερη σταθερότητα. Το άμορφο πυρίτιο συνήθως “λειτουργεί” ικανοποιητικά σε συνθήκες σχετικά χαμηλής φωτεινότητας και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές που αφορούν εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 1.14 Σχηματική απεικόνιση ενός a-Si

Για την παραγωγή άμορφου πυριτίου υιοθετούνται αμφότερες οι “superstrate” και “substrate” δομές, με μια σειρά από τεχνικές σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία με τιμές από 300°C κελσίου έως 600°C. Οι διαδικασίες κατασκευής είναι η Roll to Roll, η μέθοδος CVD (χημική εναπόθεση ατμών), η μέθοδος ψεκασμού-επιμετάλλωσης, η μέθοδος εξάτμισης, η χάραξη με laser και η μέθοδος πλάσμα με ενισχυμένη χημική εναπόθεση ατμών (PECVD). Καλύτερες τεχνικές όπως η μέθοδος πολύ υψηλής συχνότητας PECVD και η μέθοδος χημικής εναπόθεσης ατμών θερμού σύρματος (HW-CVD) αναπτύχθηκαν πρόσφατα.

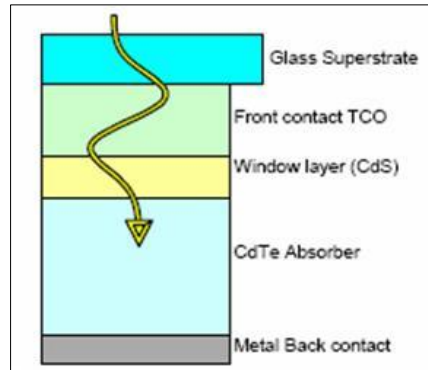
Το άμορφο πυρίτιο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως υλικό για την κατασκευή thin film ηλιακών κυψελών, καθώς το πυρίτιο βρίσκεται σε αφθονία στη φύση και είναι αβλαβές. Συνήθως χρησιμοποιείται μια επεξεργασία χαμηλής θερμοκρασίας και ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα το χαμηλό κόστος κατασκευής. Παράλληλα το άμορφο πυρίτιο έχει εγγύηση χρόνου ζωής τα είκοσι χρόνια για ενότητες που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας υπόστρωμα αποτελούμενο από γυαλί ή ανοξείδωτο ατσάλι. Συγκριτικά, οι ενότητες που αποτελούνται από πολυμερή παρουσιάζουν γενικά σύντομη διάρκεια ζωής. Το βασικό μειονέκτημα του άμορφου πυριτίου είναι ότι «υποφέρει» LIGHT-INDUCED DEGRADATION, το οποίο είναι επίσης γνωστό ως επίδραση Staebler-Wronski. Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε την υποβάθμιση, έχουν εφαρμοστεί πιο σύνθετες μέθοδοι παραγωγής με αποτέλεσμα οι τελευταίες να οδηγήσουν σε υψηλότερο κόστος κατασκευής.

Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Η έρευνα για την τεχνολογία CdTe ξεκίνησε στις αρχές του 1970. Οι ηλιακές κυψέλες CdTe thin film είναι ευρέως αποδεκτές χάριν στους λόγους που αναφέρονται παρακάτω:

A): Έχει την πιο φθηνή επαναλαμβανόμενη ροή παραγωγής, στοιχείο που μεταφράζεται στο ότι το βρίσκουμε πολύ φθηνό στην αγορά.

B): Το τελλουριούχο κάδμιο χαρακτηρίζεται από ένα άμεσο ενεργειακό κενό-bandgap της τάξεως του 1.5eV το οποίο ταιριάζει απόλυτα με το ηλιακό φάσμα, προσφέροντας έτσι την δυνατότητα για υψηλή αποδοτικότητα.



Σχήμα 1.15 Σχηματική απεικόνιση ενός CdTe

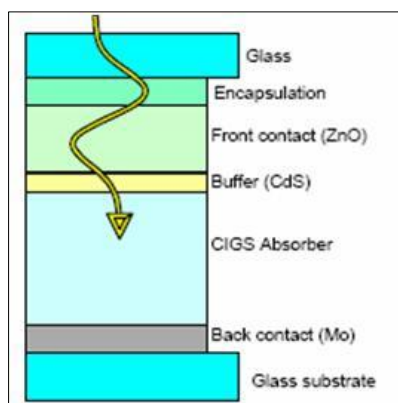
Το CdTe απαρτίζεται από τέσσερις διαφορετικές στρώσεις υλικών με την ακόλουθη αλληλουχία: ένα στρώμα γυαλιού, στρωμάτωση TCO, δεύτερο στρώμα TCO (προαιρετικά), στρώμα τύπου-n, στρώμα τύπου-p και τελικώς η πίσω μεταλλική στρωμάτωση. Το CdTe εναποτίθεται πάνω σε μια superstrate δομή. Το γυαλί soda-lime (ανθρακικό νάτριο, ασβέστης, διοξείδιο του πυριτίου) χρησιμοποιείται συχνά ως superstrate σε θερμοκρασία περίπου 550°C. Παρόλα αυτά για να επιτύχουμε καλύτερο συντελεστή θερμικής διαστολής, το καθαρό βοριοπυριτικό γυαλί το οποίο είναι πιο ακριβό υλικό, χρησιμοποιείται ως superstrate. Το πλεονέκτημα ενός superstrate, που βασίζεται στο γυαλί, είναι ότι μπορεί να επιτύχει χρόνο ζωής είκοσι ετών. Από τη στιγμή που το γυαλί είναι εύθραυστο σαν υλικό, σε περίπτωση που σπάσει, η μονάδα δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί. Το TCO ή αλλιώς το μπροστινό στρώμα επαφής του CdTe παράγεται από οξείδιο του κασσίτερου (SnO₂) ενισχυμένο με φθόριο (F). Το κάδμιο Stannate (CdSnO₄) το οποίο φέρει υψηλότερη μετάδοση έχει κατά καιρούς αναπτυχθεί ως TCO. Ένα δεύτερο στρώμα TCO (επονομαζόμενο ως TCO υψηλής αντίστασης, HRT) το οποίο έχει υψηλότερη αντίσταση συγκρινόμενο με το πρώτο στρώμα TCO μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσφέροντας τα πλεονεκτήματα των ιδιοτήτων του. Εισάγοντας ένα στρώμα HRT μπορεί να βοηθηθεί η λέπτυνση του CdS, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση του ποσοστού της απόδοσης της ηλιακής κυψέλης. Τα τυπικά στρώματα HRT είναι: SnO₂, οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) και ψευδαργύρου stannate (ZnSnO₄) τα οποία κατέχουν μέχρι και τώρα το ρεκόρ αποδοτικότητας με ποσοστό 16.5%.

Το N-type στρώμα κατασκευασμένο με CdS έχει πάχος με τιμές που κυμαίνονται από 80nm μέχρι 300nm και εναποτίθενται με μια σειρά από τεχνικές όπως χημική εναπόθεση (CBD), κλειστού χώρου εργαλείο θερμικής εξάχνωσης (CSS) και φυσική εναπόθεση ατμών (7-lumin/ PVD). Το CdTe κατατίθεται με ποικίλες τεχνικές: CSS, screen printing, PVD, ηλεκτροαπόθεση, sputtering, και spray deposition. Η Metal-Organic χημική εναπόθεση ατμών (MOCVD), έχοντας πάχος που

κυμαίνεται από 1 μέχρι 8μm σχηματίζει την στρώση p-type. Ο χαλκός (Cu) χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει ένα στρώμα, σε μεγάλο βαθμό με προσμίξεις, απαραίτητο για την ύπαρξη των πίσω επαφών.

Χαλκός Ινδίου (Γάλλιο) di-Σεληνιούχο (CIS/CIGS)

Έχοντας καταγράψει αποδοτικότητα κυψέλης 19.2% κάτω από συνθήκες εργαστηρίου, το CIGS κατατάσσεται αυτή τη στιγμή ως η ηλιακή κυψέλη με την καλύτερη επίδοση. Υποβλήθηκε σε τεστ ανεκτικότητας για παραπάνω από μια δεκαετία στο Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας (NREL) χωρίς να παρουσιάζεται κάποια σημαντική ένδειξη υποβάθμισης των επιδόσεων.



Σχήμα 1.16 Σχηματική απεικόνιση ενός CIGS

Το CIGS είναι αρκετά πολύπλευρο και μπορεί να κατασκευαστεί με αμφότερες τις superstrate και substrate μεθόδους. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα υπόστρωμα γυαλιού Soda-Lime. Κατά καιρούς έχουν αξιοποιηθεί και άλλα υποστρώματα αποτελούμενα από γυαλί και ανοξειδωτο ατσάλι. Το CIGS αποτελείται από πολλά διαφορετικά στρώματα. Το πρώτο στρώμα μετά το υπόστρωμα είναι μολυβδαίνιο (Mo), ακολουθούμενο από ένα p-type υλικό. Το θειούχο κάδμιο (CdS) εναποτίθεται ως στρώμα προστασίας και το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) ως στρώμα παραθύρου. Οι διαδικασίες κατασκευής για το CIGS περιλαμβάνουν CVD, sputtering, μονολιθική ολοκλήρωση, roll-to-roll και ηλεκτροαπόθεση.

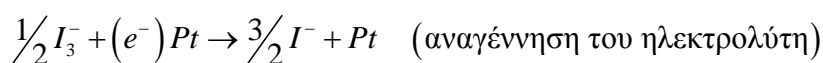
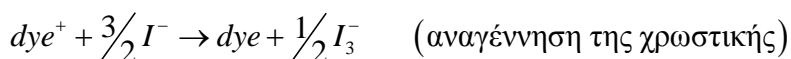
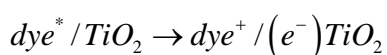
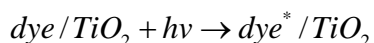
Υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα με το CIGS. Αμφότερα το κάδμιο και το ίνδιο είναι σπάνια στοιχεία στη φύση. Η συνεχής εξόρυξη τους μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση των αποθεμάτων τους στο κοντινό μέλλον. Εξάλλου το κάδμιο είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Μέχρι σήμερα δεν έχει πραγματοποιηθεί μεγάλης κλίμακας παραγωγή CIGS.

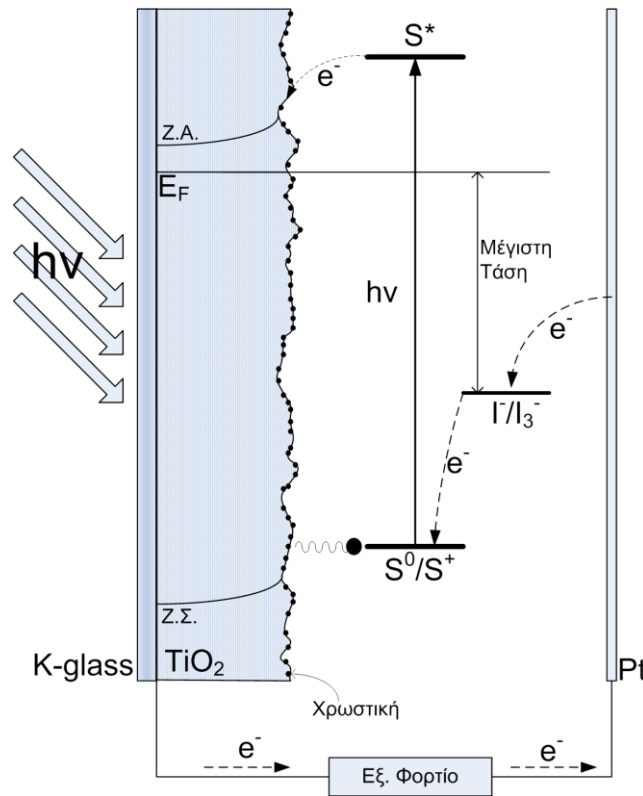
Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) υψηλής αποδοτικότητας

Το GaAs είναι ένα υλικό με άμεσο band gap με πολύ υψηλή οπτική απορρόφηση. Έχει καταγεγραμμένη απόδοση πάνω από 30% με band gap της τάξεως του 1.43eV. Το GaAs δεν είναι ευαίσθητο στην θερμότητα, παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στην ακτινοβολία και επιπλέον είναι βέλτιστο για εφαρμογές στο διάστημα. Με σκοπό να αυξήσουν την αποδοτικότητα, οι σχεδιαστές ηλιακών κυψελών μπορούν να ταιριάζουν μια σειρά από διαφορετικές συνθέσεις με διαφορετικά στρώματα, διαχειριζόμενοι την συλλογή των «τρυπών» και των ηλεκτρονίων. Ένα παράδειγμα είναι το αρσενικούχο γάλλιο 9-luminium. Τα ηλεκτρόνια και οι «τρύπες» είναι αρκετά κοντά διατεταγμένα, δίπλα στην p-n σύνδεση.

1.8 Οργανικά Φωτοβολταικά στοιχεία

Τα οργανικά φωτοβολταικά είναι νανοδομημένο υμένιο ημιαγωγού, συνήθως TiO_2 , σε επαφή με κατάλληλο ηλεκτρολύτη, ο οποίος περιέχει ένα οξειδοαναγωγικό ζεύγος. Ο ημιαγωγός που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο είναι TiO_2 , ωστόσο, εκτεταμένη έρευνα γίνεται και σε άλλους ημιαγωγούς όπως ZnO και Nb_2O_5 . Στην επιφάνεια του ημιαγωγού αποτίθεται ένα μονο μοριακό στρώμα κάποιας χρωστικής ουσίας. Όταν φως προσπέσει στα μόρια της χρωστικής αυτά διεγείρονται, με αποτέλεσμα τη μεταφορά ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Η χρωστική επανέρχεται στην ουδέτερη κατάσταση με την προσφορά ενός ηλεκτρονίου από τον ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται συνήθως από έναν οργανικό διαλύτη που περιέχει κάποιο οξειδοαναγωγικό σύστημα όπως το ζεύγος $I^- - I_3^-$ (iodide triiodide). Η αναγέννηση της χρωστικής γίνεται από το ιωδίδιο (iodide), εμποδίζοντας εκτός των άλλων, την εκ νέου σύλληψη του ηλεκτρονίου από την οξειδωμένη χρωστική. Με τη σειρά του το ιωδίδιο επαναδημιουργείται εξαιτίας της αναγωγής του τριοιωδιδίου στο αντιηλεκτρόδιο και το κύκλωμα κλείνει με τη μεταφορά του ηλεκτρονίου μέσω εξωτερικού κυκλώματος. Η διαφορά δυναμικού οφείλεται στη διαφορά μεταξύ της ενέργειας Fermi του ηλεκτρονίου στον ημιαγωγό και του δυναμικού οξειδοαναγωγής του ηλεκτρολύτη. Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι η συσκευή παράγει ρεύμα όταν φωτιστεί χωρίς να συμβαίνουν μόνιμες χημικές μετατροπές στο εσωτερικό της. Συνοπτικά, οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής :





Σχήμα 1.17 Γραφική παράσταση της αρχής λειτουργίας ενός φωτοευαίσθητοποιημένου με χρωστική κελιού

Διαπιστώνουμε επομένως, ότι η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών αυτών παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη των φωτοβολταϊκών επαφής p-n. Οι κυριότερη διαφορά συνίσταται στο ότι στα φωτοβολταϊκά αυτά υπάρχει διαχωρισμός των δύο λειτουργιών, της απορρόφησης του φωτός και της μεταφοράς των φορτίων, σε αντίθεση με τα κλασικά φωτοβολταϊκά στα οποία οι δύο αυτές λειτουργίες γίνονται στο ίδιο υλικό. Επίσης, στα ΦΚΧ η απορρόφηση του φωτός γίνεται από τα μόρια της χρωστικής ενώ η μεταφορά των φορτίων γίνεται μέσα στον ημιαγωγό (ηλεκτρόνια) και στον ηλεκτρολύτη (οπές). Δεύτερον ο διαχωρισμός των φορτίων (ηλεκτρόνια – οπές) δεν οφείλεται στην ύπαρξη ενός ηλεκτρικού πεδίου όπως συμβαίνει στην επαφή p-n με τα ηλεκτρόνια να κινούνται στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στη ζώνη σθένους. Τέλος, στα φωτοβολταϊκά επαφής p-n τα φορτία, οπές και ηλεκτρόνια, μεταφέρονται στο ίδιο υλικό, αυξάνοντας τις πιθανότητες για επανασύνδεση, ενώ στα ΦΚΧ τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω του πορώδους ημιαγωγού, ενώ οι οπές μέσω του ηλεκτρολύτη. Έτσι, επανασύνδεση μπορεί να έχουμε μόνο στη διεπιφάνεια ημιαγωγού – ηλεκτρολύτη. Αυτό σημαίνει ότι οι απαιτήσεις που έχουμε για έναν πολύ καθαρό, χωρίς προσμίξεις και ατέλειες ημιαγωγό μετριάζονται.

Το γεγονός ότι το φιλμ του TiO_2 πρέπει να είναι νανοδομημένο έχει πολύ μεγάλη σημασία ώστε το φωτοβολταϊκό να έχει μεγάλη απόδοση. Επειδή η απορρόφηση του φωτός από ένα μονομοριακό στρώμα χρωστικής είναι πολύ μικρή, είναι απαραίτητη μεγάλη εσωτερική επιφάνεια πάνω στην οποία δυνητικά θα προσροφηθούν τα μόρια της χρωστικής. Η συγκεκριμένη δομή του ημιαγωγού έχει και άλλα πλεονεκτήματα: η εγγύτητα του ηλεκτρολύτη σε πολλά νανοσωματίδια έχει ως

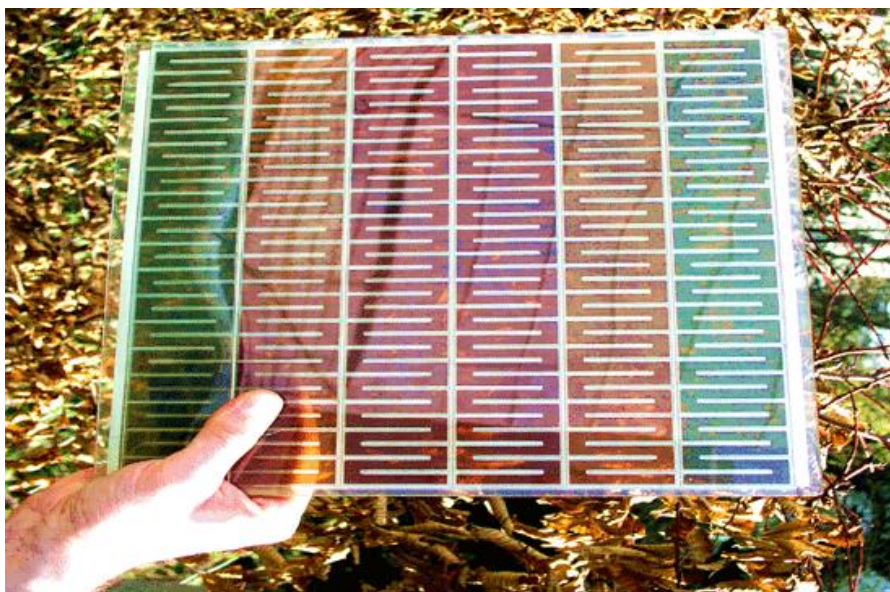
αποτέλεσμα τη θωράκιση του φορτίου των ηλεκτρονίων που εισάγονται στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά τους χωρίς σημαντική πιθανότητα επανασύνδεσης. Επιπλέον, τα μικρά σωματίδια του ημιαγωγού καθίστανται ουσιαστικά ανεξάρτητα το ένα από το άλλο όταν εισάγουμε τον ηλεκτρολύτη, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερο φωτοδυναμικό. Έτσι, το υμένιο TiO_2 δεν χρησιμεύει μόνο ως υπόστρωμα πάνω στο οποίο προσροφούνται τα μόρια της χρωστικής, αλλά χρησιμεύει επίσης για τη συλλογή φορέων (ηλεκτρονίων) και την αγωγή τους. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο χαρακτηριστικός χρόνος διάχυσης των ηλεκτρονίων στο φιλμ του ημιαγωγού είναι της τάξης των μερικών ms – περίπου 10 ms για ένα φιλμ πάχους 10 μm . Η διερεύνηση της δομής του φιλμ ήταν αυτή που έδωσε και τη μεγαλύτερη ώθηση για την περαιτέρω ανάπτυξη αυτής της κατηγορίας των φωτοβολταϊκών.

Εκτός όμως από τη δομή του ημιαγωγού και τις ιδιότητές του (μεγάλο ενεργειακό χάσμα κλπ) πολύ σημαντικό ρόλο στη συνολική απόδοση του συστήματος παίζει και η χρησιμοποιούμενη χρωστική ουσία. Ενώ στην περίπτωση του ημιαγωγού έχει επικρατήσει η χρήση TiO_2 , για τις χρωστικές δεν έχει συμβεί κάτι ανάλογο. Στις μέρες μας έχουν δοκιμαστεί πολλές χρωστικές, τεχνητές και προερχόμενες από το φυσικό περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές, η ροδαμίνη, το πράσινο του μαλαχίτη και η πινακυανόλη. Οι χρωστικές εκείνες που έχουν να επιδείξουν τις υψηλότερες αποδόσεις είναι αυτές που αποτελούνται από σύμπλοκα του ρουθενίου. Αυτές έχουν γενική δομή ML_2X_2 όπου στη θέση του M έχουμε ρουθένιο ή όσμιο, στη θέση του L είναι το 2,2'-διπυριδύλιο – 4,4'-δικαρβοξυλικό οξύ και στη θέση του X υπάρχει κάποιο αλογόνο, κυανίδιο ή θειοκυάνιο. Η διέγερση των συμπλόκων του ρουθενίου εξαιτίας της απορρόφησης φωτός ανήκει στην κατηγορία μεταφοράς φορτίου από το μέταλλο στον υποκαταστάτη (MLCT: Metal to Ligand Charge Transfer). Αυτό σημαίνει ότι το υψηλότερα κατειλημμένο μοριακό τροχιακό της χρωστικής (HOMO) είναι εντοπισμένο κοντά στο άτομο του μετάλλου, του Ru στην περίπτωση αυτή, ενώ το πιο χαμηλά μη κατειλημμένο μοριακό τροχιακό (LUMO) είναι εντοπισμένο στον υποκαταστάτη, δηλαδή στο διπυρίλιο. Κατά την διέγερση ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από το HOMO επίπεδο στο LUMO. Επιπλέον, το LUMO επεκτείνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει σημαντική υπερκάλυψη των κυματοσυναρτήσεων του ηλεκτρονίου στο LUMO της χρωστικής και στη ζώνη αγωγιμότητας του TiO_2 . Το γεγονός αυτό ευνοεί την πολύ γρήγορη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη χρωστική στον ημιαγωγό. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει η ενεργειακή στάθμη της διηγεμένης χρωστικής να είναι πιο ψηλά από το κάτω χείλος της ζώνης αγωγιμότητας του ημιαγωγού ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό.

Όσο όμως είναι σημαντική η μεταφορά ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό, άλλο τόσο σημαντική είναι και η μεταφορά των οπών στον ηλεκτρολύτη. Φυσικά όταν λέμε μεταφορά οπών στις περισσότερες περιπτώσεις μιλάμε καταχρηστικά, καθώς δεν πρόκειται για θετικά ιόντα, αλλά ανιόντα. Το ρόλο αυτό στην περίπτωσή μας τον έχουν αναλάβει τα ανιόντα I_3^- του ηλεκτρολύτη.

Επειδή στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν οπές, μπορεί να έχουμε επανασύνδεση μεταξύ των ηλεκτρονίων που εισάγονται στον ημιαγωγό και του I_3^- του ηλεκτρολύτη. Επανασύνδεση μπορεί να έχουμε επίσης μεταξύ των ηλεκτρονίων και της οξειδωμένης βαφής, η οποία είναι λιγότερο σημαντική σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Στην πρώτη περίπτωση η επανασύνδεση συμβαίνει μέσω της διεπιφάνειας ημιαγωγού – ηλεκτρολύτη και παρόλη τη μεγάλη εσωτερική επιφάνεια του ημιαγωγού δε μειώνει δραστικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών. Ένας λόγος που πιθανόν να μην εμφανίζεται ισχυρό το φαινόμενο της επανασύνδεσης είναι το γεγονός ότι οι οπές

έχουν αρνητικό φορτίο, γεγονός που μειώνει το ρυθμό της επανασύνδεσης εξαιτίας της μείωσης της ενεργούς τιμής συλλήψης.



Σχήμα 1.18 Κυψέλη Dye-sensitized

Εκτός όμως από τη δομή του ημιαγωγού και τις ιδιότητές του (μεγάλο ενεργειακό χάσμα κλπ) πολύ σημαντικό ρόλο στη συνολική απόδοση του συστήματος παίζει και η χρησιμοποιούμενη χρωστική ουσία. Ενώ στην περίπτωση του ημιαγωγού έχει επικρατήσει η χρήση TiO_2 , για τις χρωστικές δεν έχει συμβεί κάτι ανάλογο. Στις μέρες μας έχουν δοκιμαστεί πολλές χρωστικές, τεχνητές και προερχόμενες από το φυσικό περιβάλλον. Ένα παράδειγμα αυτών είναι η ροδαμίνη, το πράσινο του μαλαχίτη και η πινακυανόλη. Οι χρωστικές εκείνες που έχουν να επιδείξουν τις υψηλότερες αποδόσεις είναι αυτές που αποτελούνται από σύμπλοκα του ρουθενίου. Αυτές έχουν γενική δομή ML_2X_2 όπου στη θέση του M έχουμε ρουθένιο ή όσμιο, στη θέση του L είναι το 2,2'-διπυριδύλιο – 4,4'-δικαρβοξυλικό οξύ και στη θέση του X υπάρχει κάποιο αλογόνο, κυανίδιο ή θειοκυάνιο. Η διέγερση των συμπλόκων του ρουθενίου εξαιτίας της απορρόφησης φωτός ανήκει στην κατηγορία μεταφοράς φορτίου από το μέταλλο στον υποκαταστάτη (MLCT: Metal to Ligand Charge Transfer). Αυτό σημαίνει ότι το υψηλότερα κατειλημμένο μοριακό τροχιακό της χρωστικής (HOMO) είναι εντοπισμένο κοντά στο άτομο του μετάλλου, του Ru στην περίπτωση αυτή, ενώ το πιο χαμηλά μη κατειλημμένο μοριακό τροχιακό (LUMO) είναι εντοπισμένο στον υποκαταστάτη, δηλαδή στο διπυρίλιο. Κατά την διέγερση ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από το HOMO επίπεδο στο LUMO. Επιπλέον, το LUMO επεκτείνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει σημαντική υπερκάλυψη των κυματοσυναρτήσεων του ηλεκτρονίου στο LUMO της χρωστικής και στη ζώνη αγωγιμότητας του TiO_2 . Το γεγονός αυτό ευνοεί την πολύ γρήγορη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη χρωστική στον ημιαγωγό. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει η ενεργειακή στάθμη της διηγεμένης χρωστικής να είναι πιο ψηλά από το κάτω χείλος της ζώνης αγωγιμότητας του ημιαγωγού ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό.

Όσο όμως είναι σημαντική η μεταφορά ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό, άλλο τόσο σημαντική είναι και η μεταφορά των οπών στον ηλεκτρολύτη. Φυσικά όταν λέμε μεταφορά οπών στις περισσότερες

περιπτώσεις μιλάμε καταχρηστικά, καθώς δεν πρόκειται για θετικά ιόντα, αλλά ανιόντα. Το ρόλο αυτό στην περίπτωση μας τον έχουν αναλάβει τα ανιόντα I_3^- του ηλεκτρολύτη.

Επειδή στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν οπές, μπορεί να έχουμε επανασύνδεση μεταξύ των ηλεκτρονίων που εισάγονται στον ημιαγωγό και του I_3^- του ηλεκτρολύτη. Επανασύνδεση μπορεί να έχουμε επίσης μεταξύ των ηλεκτρονίων και της οξειδωμένης βαφής, η οποία είναι λιγότερο σημαντική σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Στην πρώτη περίπτωση η επανασύνδεση συμβαίνει μέσω της διεπιφάνειας ημιαγωγού – ηλεκτρολύτη και παρόλη τη μεγάλη εσωτερική επιφάνεια του ημιαγωγού δε μειώνει δραστικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών. Ένας λόγος που πιθανόν να μην εμφανίζεται ισχυρό το φαινόμενο της επανασύνδεσης είναι το γεγονός ότι οι οπές έχουν αρνητικό φορτίο, γεγονός που μειώνει το ρυθμό της επανασύνδεσης εξαιτίας της μείωσης της ενεργού διατομής σύλληψης.

Πολλά εργαστήρια ανά τον κόσμο, επικεντρώνουν την προσπάθεια τους σε δοκιμές και τροποποιήσεις που αποσκοπούν στην βελτίωση της αποδοτικότητας και του χρόνου ζωής των ΦΒ στοιχείων της νέας αυτής τεχνολογίας, με στόχο τη βιομηχανική τους παραγωγή. Για να παρακαμφθεί το μειονέκτημα της ευπάθειας των εγχρώμων ουσιών, που περιέχονται στα οργανικά ΦΒ στοιχεία, στο ηλιακό φως, προτάθηκαν λύσεις που βασίζονται στη χρήση υλικών σύγχρονης τεχνολογίας, όπως τα πολυμερή, καθώς και ειδικών τεχνικών βελτίωσης της αντοχής των οργανικών ουσιών στη δράση του ηλιακού φωτός. Η απόδοση των πολυμερών οργανικών ΦΒ στοιχείων βρισκόταν, το 2004, στο αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο του 4,5%. Το βασικό πλεονέκτημα των ΦΒ στοιχείων αυτής της τεχνολογίας είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους, γεγονός που επιτρέπει να θεωρούμε δυνατή την αξιοποίησή τους σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Κεφάλαιο 2^ο

Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πλαισίου

2.1 Φωτοβολταϊκά κύτταρα

Η δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Ο απλούστερος τύπος φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι p-n επαφή. Για την κατασκευή αυτού του είδους επαφής, που ουσιαστικά είναι ένας ημιαγωγός, στα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούμε κυρίως το πυρίτιο[21].

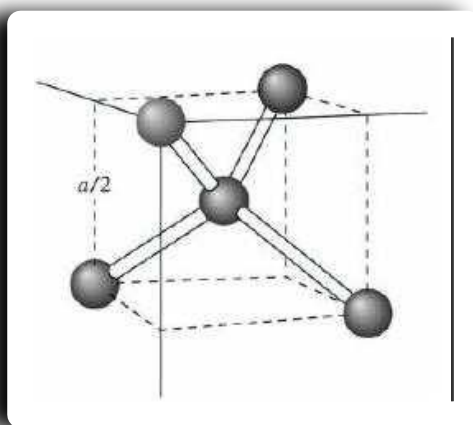
Αυτό λόγω της δομής του προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα και είναι σκόπιμο να το αναλύσουμε παραπάνω.

2.2 Ενδογενής ημιαγωγός

Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε ενδογενείς και εξωγενείς. Η φυσική τους διαφορά είναι ότι στην πρώτη περίπτωση αποτελούνται αυστηρά μόνο από ένα στοιχείο (συνήθως πυρίτιο) ενώ στη δεύτερη υπάρχουν προσμίξεις.

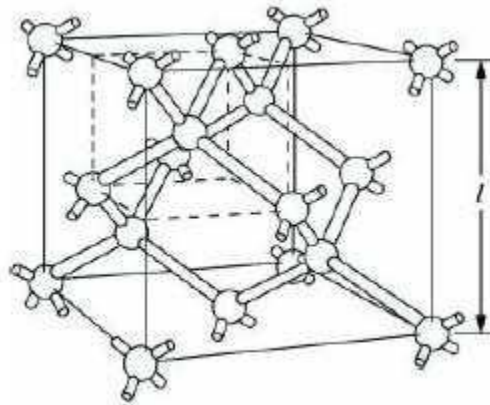
Το πυρίτιο είναι ένα στοιχείο που από τελείται από 14 ηλεκτρόνια, τα οποία δομούνται σε τρεις στοιβάδες εκ των οποίων η εξωτερική στοιβάδα σθένους έχει 4 ηλεκτρόνια. Συνεπώς ανήκει στην τεταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα και είναι τετρασθενές. Προκειμένου λοιπόν να αποκτήσει σταθερή δομή (δηλαδή 8 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα) χρειάζεται άλλα τέσσερα ηλεκτρόνια.

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να σχηματίσει τέσσερεις ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά άτομα πυριτίου, ούτως ώστε με αμοιβαία συνεισφορά να συμπληρώσει την εξωτερική στοιβάδα.



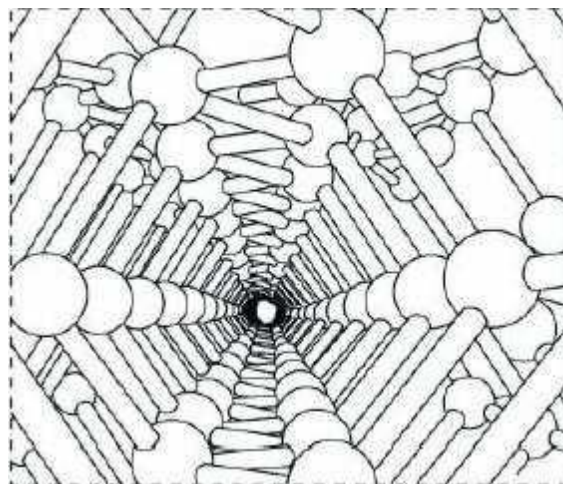
Σχήμα 2.1 Δεσμοί μεταξύ τεσσάρων γειτονικών ατόμων πυριτίου προκειμένου να επιτευχθεί σταθερή δομή

Στους περισσότερους ημιαγωγούς (πυρίτιο), τα άτομα διευθετούνται με τρόπο ώστε να σχηματίζουν μια κανονική πυραμίδα, δηλαδή καταλαμβάνουν θέσεις που αντιστοιχούν στις κορυφές μιας κανονικής πυραμίδας. Συνεπώς έχουμε ένα υλικό μόνο από πυρίτιο που, στις περιπτώσεις που μελετάμε, έχει κρυσταλλική δομή που αποτελείται από στοιχειώδεις και όμοιες κυψελίδες όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.2 Μοναδιαία κυψελίδα του κρυσταλλικού πυριτίου

Το συνολικό κρυσταλλικό πλέγμα αποτελείται από πολλές όμοιες κυψελίδες διατεταγμένες κατά μήκος συγκεκριμένων αξόνων.



Σχήμα 2.3. Το κρυσταλλικό πλέγμα όπως φαίνεται από μέσα, κατά μήκος ενός κρυσταλλικού άξονα.

Όλα αυτά συμβαίνουν όταν το κρυσταλλικό πυρίτιο βρίσκεται σε θερμοκρασία 0 βαθμούς Κελβιν. Με την αύξηση της θερμοκρασίας όμως ορισμένα ηλεκτρόνια παίρνουν αρκετή ενέργεια και

αποσπώνται από τους ομοιοπολικούς δεσμούς που τα συγκρατούσαν με αποτέλεσμα με αποτέλεσμα να κινούνται ελεύθερα στον κρύσταλλο αφήνοντας παράλληλα στη θέση τους μια οπή. Έτσι σχηματίζεται ένα ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου. Όπως θα περίμενε κανείς ένα ηλεκτρόνιο που αποσπάστηκε από το δεσμό του είναι πολύ πιθανό να δεσμευτεί στη θέση ενός άλλου αποσπασμένου ηλεκτρονίου κ έτσι να εξαφανιστεί ένα ζεύγος οπής ηλεκτρονίου. Είναι φανερό από το παραπάνω φαινόμενο ότι ο αριθμός των οπών(p) είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων(n).

$$n \cdot p = n_i \quad (2.1)$$

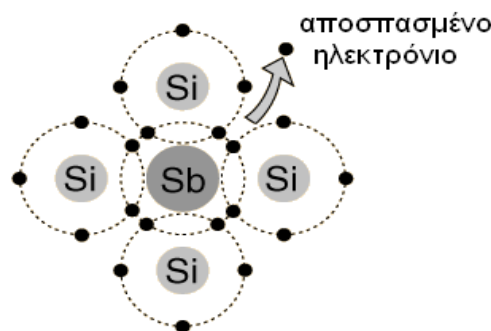
όπου n_i η ενδογενής συγκέντρωση φορέων. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (300K) η συγκέντρωση αυτή είναι πολύ χαμηλή ($7 \cdot 10^{15} \text{m}^{-3}$) τη στιγμή που στο πυρίτιο υπάρχουν $5 \cdot 10^{28}$ άτομα ανά m^3 .

2.3 Εξωγενής ημιαγωγός

Στην περίπτωση που νοθεύσουμε ένα τετρασθενές υλικό όπως το πυρίτιο με άτομα ενός πεντασθενούς στοιχείου όπως ο φώσφορος(P), το αρσενικό (As) ή το αντιμόνιο (Sb), τα άτομα προσμίξεις παίρνουν τη θέση ορισμένων ατόμων πυριτίου στον κόμβο κρυσταλλικού πλέγματος. Για να γίνει αυτό σχηματίζουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου.

Το ένα ηλεκτρόνιο που μένει είναι αζευγάρωτο (μονήρες) που συγκρατείται πολύ χαλαρά από τον πυρήνα και αποσπάται εύκολα. Θα μπορούσαμε να πούμε περιγραφικά ότι το άτομο θέλει να το διώξει για να αποκτήσει δομή ευγενούς αερίου. Η ενέργεια ιονισμού του ατόμου, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για να αποσπαστεί το μονήρες ηλεκτρόνιο είναι της τάξης των εκατοστών του eV. Όταν το ηλεκτρόνιο απελευθερωθεί, το άτομο συμπεριφέρεται σαν θετικό ιόν.

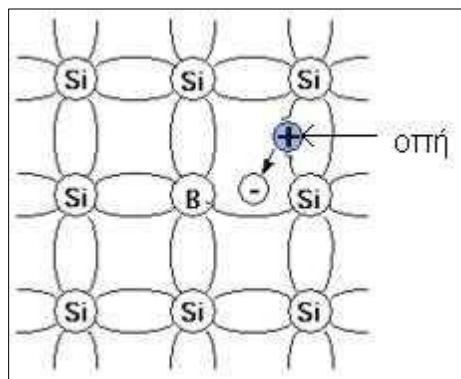
Αξίζει να σημειωθεί ότι αντίθετα με την περίπτωση του ενδογενούς ημιαγωγού, τώρα ελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο χωρίς τη δημιουργία αντίστοιχης οπής. Έτσι δημιουργείται ένας ημιαγωγός με πλεονάζοντες αρνητικούς φορείς που ονομάζονται ημιαγωγός τύπου n.



Σχήμα 2.4. Ημιαγωγός τύπου n δημιουργούμενος από νόθευση αντιμονίου στο πυρίτιο. Φαίνεται το μονήρες ηλεκτρόνιο συγκρατούνταν πολύ χαλαρά και με την απορρόφηση μικρής ποσότητας ενέργειας κατάφερε να αποσπαστεί και να συμπεριφέρεται σαν ελεύθερο.

Εάν τώρα νοθεύσουμε ένα τετρασθενές υλικό με άτομα ενός στοιχείου με τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα όπως είναι το βόριο (B), το γάλλιο (Ga) ή το αλουμίνιο (Al), τα άτομα του τρισθενούς στοιχείου θα καταλάβουν ορισμένες από τις θέσεις των τετρασθενών ατόμων στους κόμβους του κρυσταλλικού πλέγματος όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Τα άτομα που χρησιμοποιήθηκαν για τη νόθευση θα σχηματίσουν τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά τους και έτσι θα έχουν επτά ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα, ένα εκ των οποίων θα είναι μονήρες. Για να σχηματίσουν σταθερή δομή, όπως αυτή των ευγενών αερίων, χρειάζονται άλλο ένα.

Ένα ηλεκτρόνιο κάποιου γειτονικού ατόμου πυριτίου, κερδίζοντας το κατάλληλο ποσό ενέργειας από την άτακτη θερμική κίνηση, μπορεί να αποσπαστεί από το άτομό του και να προσλιφθεί από το άτομο πρόσμιξη, ώστε να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα. Το ηλεκτρόνιο ακολούθως σχηματίζει ένα αρνητικό ιόν με το άτομο που το παρέλαβε και αφήνει πίσω του μία οπή. Άρα έχουμε τη δημιουργία μίας οπής χωρίς τη δημιουργία του αντίστοιχου ελεύθερου ηλεκτρονίου. Το άτομο πρόσμιξη καλείται δέκτης ηλεκτρονίων και δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο ένας ημιαγωγός τύπου p. Πάντα υπάρχει και η ενδογενής διαδικασία, όμως τώρα οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές.



Σχήμα 2.5 Ημιαγωγός τύπου p δημιουργούμενος από πυρίτιο νοθευμένο με άτομα βορίου

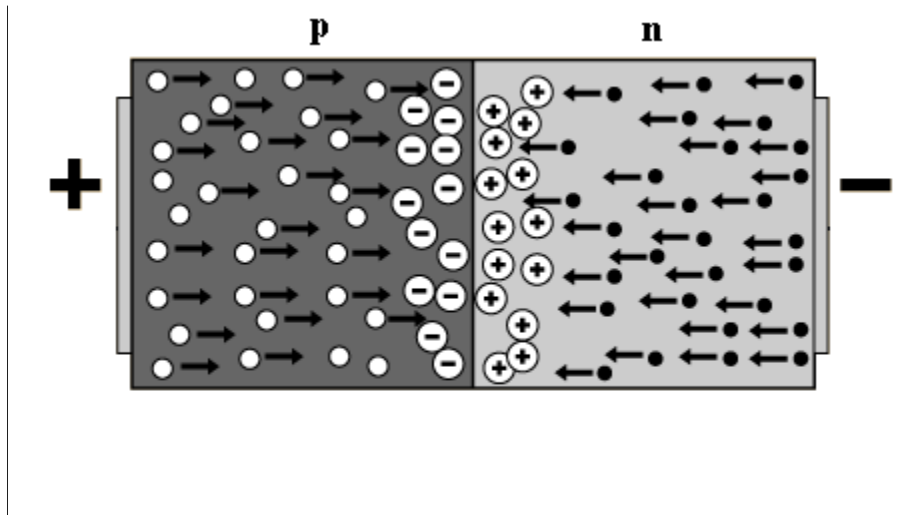
Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν ένα ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο πυριτίου, το οποίο συμμετέχει ήδη σε έναν ομοιοπολικό δεσμό, να αποσπαστεί και να καταλάβει τη θέση της οπής που είχε δημιουργηθεί προηγουμένως, δημιουργώντας παράλληλα μία οπή στο σημείο απόπου έφυγε.

2.4 p-n επαφή

Αν φέρουμε σε επαφή ένα ημιαγωγικό υλικό τύπου p και ένα τύπου n, τότε έχουμε τη δίοδο επαφής p-n. Πιο συγκεκριμένα από τη μεριά του υλικού τύπου p που οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές, ορισμένες από αυτές που βρίσκονται κοντά στο σημείο επαφής διαχέονται προς το υλικό τύπου n. Εκεί επανασυνδέονται με τα πλεονάζοντα ελεύθερα ηλεκτρόνια και έτσι χάνεται ένα ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου. Τώρα πια όμως το υλικό τύπου p δεν είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και κυρίως στην περιοχή κοντά στην επαφή έχει χαθεί μέρος του θετικού φορτίου και υπερिशύει το αρνητικό. Επίσης στο υλικό τύπου n και κοντά στην επαφή τύπου p έχουν έρθει οπές, οι οποίες είναι θετικά φορτισμένες και έτσι χαλάνε την ουδετερότητα του υλικού και κυρίως της συγκεκριμένης περιοχής η οποία φορτίζεται θετικά.

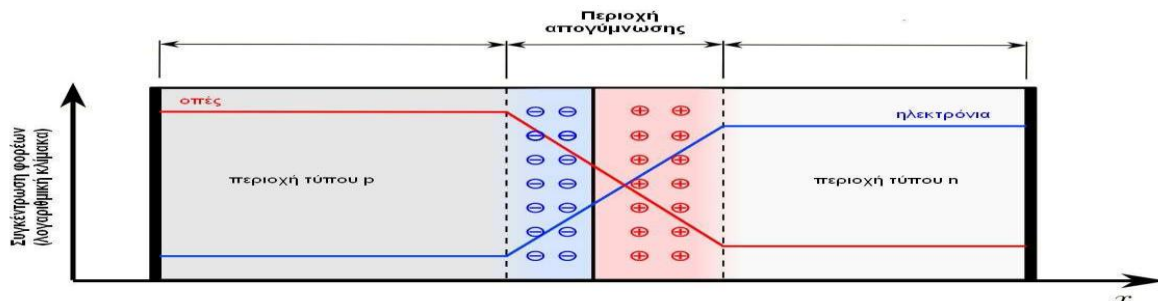
Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με το υλικό τύπου n το οποίο στέλνει ηλεκτρόνια και συνεπώς αρνητικό φορτίο στη μεριά του p γεγονός που αυξάνει την παραπάνω φόρτιση. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας περιοχής απογύμνωσης φορέων της οποίας το ένα κομμάτι είναι αρνητικά και το άλλο θετικά φορισμένο.

Η ύπαρξη του φορτίου αυτού και στις δύο μεριές δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού στην περιοχή απογύμνωσης, η οποία αντιστέκεται στην παραταίρω διάχυση των φορέων.



Σχήμα 2.6. Η ένωση p-n με την περιοχή απογύμνωσης. Τα βέλη στο σχήμα δείχνουν την κατεύθυνση των φορέων πλειονότητας.

Στο σχήμα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε πιο παραστατικά τις συγκεντρώσεις των φορέων κατά μήκος της επαφής. Φαίνεται χαρακτηριστικά η απότομη μεταβολή της συγκεντρώσεως στην περιοχή απογύμνωσης αλλά και ο πολύ μικρός αριθμός των φορέων που καταφέρνουν να περάσουν απέναντι. Παρατηρούμε ότι για παράδειγμα στην περιοχή τύπου n υπάρχει μια μικρή συκέντρωση φορέων μειονότητας η οποία δικαιολογείται αν αναλογιστούμε την ενδογενή διαδικασία.



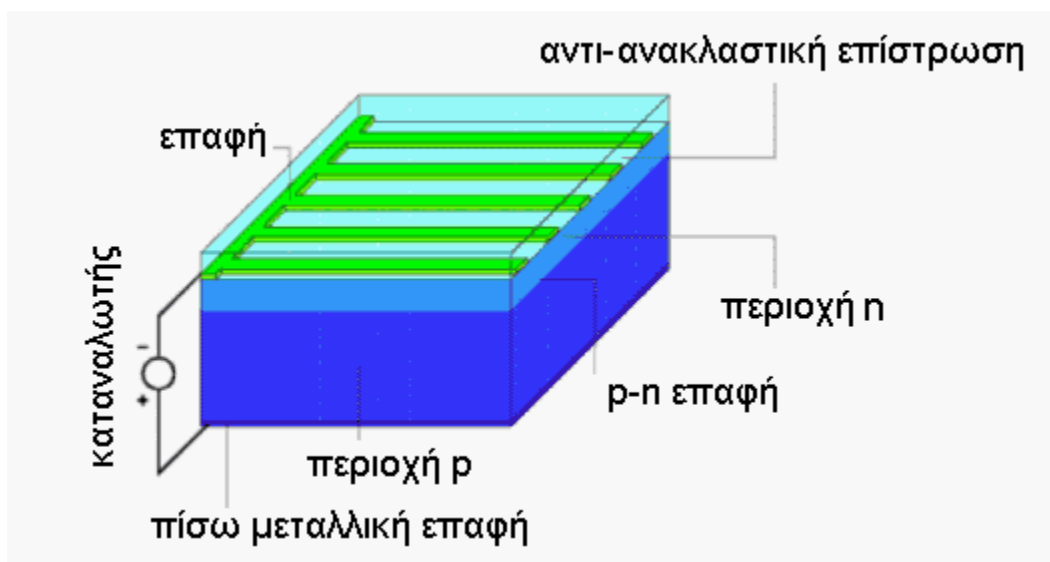
Σχήμα 2.7 Οι συγκεντρώσεις των φορέων κατά μήκος της p-n επαφής

2.5 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Αφού εξηγήσαμε τι είναι και πως δουλεύει η p-n επαφή, μελετάμε την λειτουργία της ως ηλιακό κύτταρο.

Όταν οι ακτίνες του φωτός χτυπούν την p-n επαφή, είναι δυνατόν να απορροφηθεί ένα φωτόνιο, το οποίο μπορεί να σπάσει έναν ομοιοπολικό δεσμό. Έτσι δημιουργείται ένα νέο ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου. Όπως, αναφέρεται παραπάνω όμως, το ζεύγος βρίσκεται μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο που έλκει τα ηλεκτρόνια προς την n πλευρά και τις οπές προς την p. Έτσι, τα ηλεκτρόνια αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να κυκλοφορήσουν στο κύκλωμα. Βέβαια, δεν είναι απαραίτητο το ηλεκτρόνιο να αποσπαστεί μόνο από άτομο που βρίσκεται στην περιοχή αραίωσης. Είναι δυνατόν να αποσπαστεί από το n αλλά και από το p τμήμα. Τα ηλεκτρόνια αυτά θα φτάσουν στο πεδίο που έχει δημιουργηθεί στην περιοχή αραίωσης αν το ρεύμα διάχυσης είναι αρκετά μεγάλο.

Προκειμένου οι ακτίνες του φωτός να μπορούν να διεισδύουν και στην περιοχή p, στα φωτοβολταϊκά κύτταρα η περιοχή n γίνεται ιδιαίτερα λεπτή.



Σχήμα 2.8 Φωτοβολταϊκό κύτταρο κατασκευασμένο για να φωτίζεται από τη n πλευρά

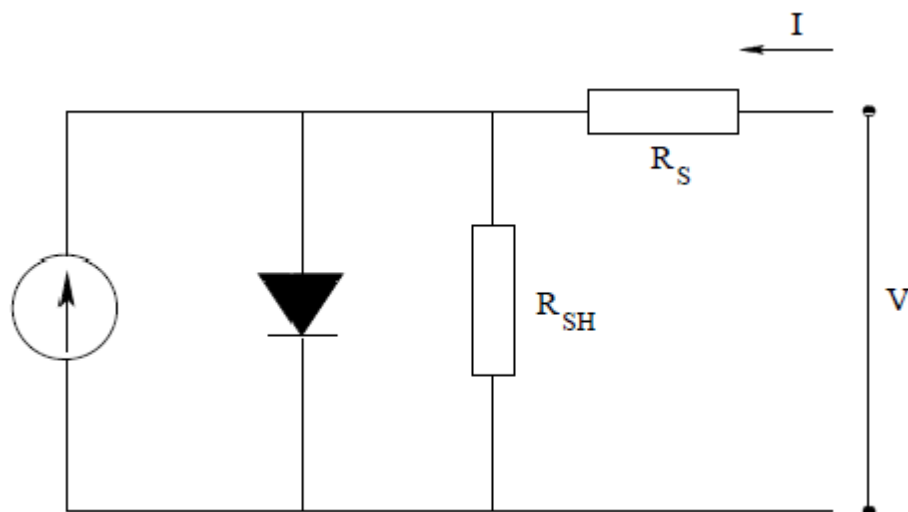
Αν τώρα συνδέσουμε τα άκρα της επαφής με κάποιο φορτίο, θα δημιουργηθεί ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι συνεχές και εξαρτάται από το φορτίο. Στη περίπτωση που το φορτίο έχει μηδενική αντίσταση, τότε θα έχουμε το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει από το κύκλωμα και ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως εξαρτάται από διάφορους παράγοντες εκ των οποίων ο κύριος είναι η ακτινοβολία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα φωτόνια ηλιακού φάσματος με $h\nu \geq E_g = 1.12\text{eV}$ που ισούται με το ενεργειακό χάσμα για το Si, αποτελούν το 74% αυτού. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα φωτόνια αυτά έχουν ενέργεια αρκετά μεγαλύτερη των 1.12eV, με αποτέλεσμα το 41% αυτής της ενέργειας που υπερβαίνει την αναγκαία, $(h\nu - E_g)$, για να μεταφερθεί ένα e-σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας,

να μετατρέπεται σε θερμότητα. Επομένως μόνο το $0.74 \cdot 0.59\% = 44\%$ της ισχύος του ηλιακού φάσματος μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα. Άρα η τιμή αυτή (44%) είναι και η ιδεατή ανώτατη απόδοση στην φωτοβολταϊκή μετατροπή, για ένα PV-στοιχείο Si.

2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα

Για να προχωρήσουμε σε μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορούμε να παραστήσουμε με ένα ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει την λειτουργία του. Το ισοδύναμο κύκλωμα που ακολουθεί καλείται πλήρες μοντέλο μίας διόδου και είναι αυτό που χρησιμοποιείται τυπικά για την μελέτη των φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 2.9. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου που περιλαμβάνει μια γεννήτρια ρεύματος στα αριστερά η οποία συνδέεται παράλληλα με μία διόδο και την αντίσταση R_{sh} . Η συνολική αντίσταση του κυττάρου, συνδέεται σε σειρά και παρίσταται από την ποσότητα R_s .

Κατά τη μετακίνηση των φορέων αγωγιμότητας παρατηρείται μία πτώση τάσης από τον ημιαγωγό προς τις ηλεκτρικές επαφές. Η αντίσταση R_s , αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στην κίνηση αυτή. Επίσης η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν είναι άπειρη, αφού λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος. Για το λόγο αυτό, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} . Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία εμπορίου, η αντίσταση R_s είναι μικρότερη των 5Ω και η αντίσταση R_{sh} είναι μεγαλύτερη των 500Ω .

Με τη βοήθεια αυτού του κυκλώματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών I-V καμπύλων για διάφορα επίπεδα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.

Σε μία διόδο μπορεί να παραχθεί ρεύμα στο σκοτάδι χωρίς να παράγεται κανενός φορέας υπο το φως του ήλιου. Το ρεύμα αυτό δίνεται από την εξίσωση.

$$I = I_0 * \exp \left[\frac{qV}{(A * K_B * T)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

όπου I_0 είναι το αποκαλούμενο ρεύμα κόρου και δίνεται από την σχέση 2.4,

$q=1,6*10^{-19}$ C το φορτίο του ηλεκτρονίου, V η τάση στην έξοδο του κυττάρου,

K_B η σταθερά Boltzman ($1.38*10^{-23}$ J/K),

T η απόλυτη θερμοκρασία

Η εξίσωση I-V αν λάβουμε υπόψιν την αντίσταση σειράς R_s και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} .

$$I = I_L - I_0 \exp \left[\frac{q * (V - IR_s)}{KT} - 1 \right] - \frac{V + R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

A είναι μια σταθερά (σταθερά ιδανικότητας της διόδου) και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.

$$I_0 = A * T^3 * \exp \left[\frac{-E_g}{(K_B * T)} \right] \quad (2.4)$$

όπου E_g , είναι το ενεργειακό διάκενο.

Όταν ο φωτισμός λαμβάνεται υπόψιν τότε η πιο πάνω εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{qV}{(A * K_B * T)} \right] - 1 \quad (2.5)$$

Όπου I_L καλείται φωτόρεύμα και είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με την σχέση

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} * \frac{M}{M_{ref}} * [I_{L,ref} + a_{I_{sc}}(T_c - T_{c,ref})] \quad (2.6)$$

όπου G η πραγματική ακτινοβολία,

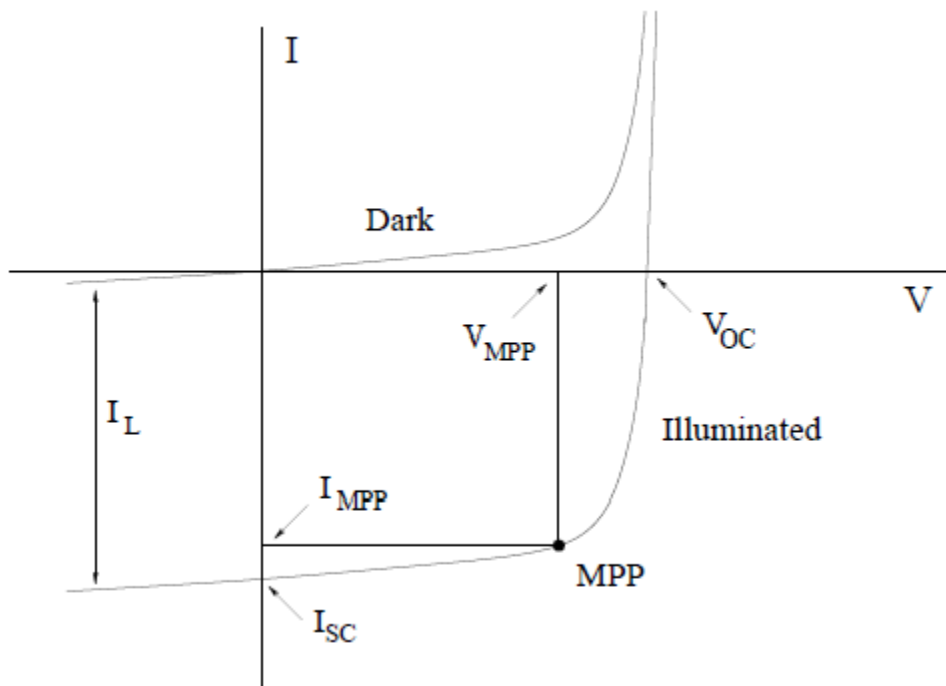
G_{ref} η ακτινοβολία σε συνθήκες STC,

M/M_{ref} ο λόγος της ηλιακής ενέργειας ανα μονάδα χρόνου και ανα μονάδα επιφάνειας σε επιφάνεια κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας κατά τη μέση απόσταση γης-ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας, α_{Isce} είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης,

T_c η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$T_{c,ref}$ η θερμοκρασία στους 298° K.

Η εξίσωση αυτή καθορίζει τη σχέση ρεύματος τάσης ενός ιδανικού ηλιακού κυττάρου με $R_s=0$ και $R_{sh} \rightarrow \infty$. Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V και η αντιστοιχία των δύο πιο πάνω εξισώσεων φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 2.10. Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Η τάση ανοιχτοκυκλώματος V_{oc} και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} , βρίσκονται στα σημεία τομής των αξόνων και η μέγιστη ισχύς εξάγεται από τα σημεία V_{mp} και I_{mp} .

Στο σχήμα 2.10 φαίνονται τέσσερις σημαντικές παράμετροι των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το ρεύμα σε μηδενική τάση καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , ενώ η τάση σε μηδενικό ρεύμα καλείται τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} .

Κατά τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, αποκαθίσταται μία ισορροπία όταν η τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις δύο όψεις του, προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή θα ισχύει:

$$I_L = I_o * \left[\exp \frac{qV}{(A * K_B * T)} - 1 \right] \quad (2.7)$$

Από την σχέση 2.6 βρίσκουμε ότι η τιμή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου V_{oc} θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{(A \cdot K_B \cdot T)}{q} * \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (2.8)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του φωτορεύματος I_L είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή του ρεύματος κόρου I_o και επομένως η σχέση απλοποιείται ως εξής :

$$V_{oc} = \frac{(A \cdot K_B \cdot T)}{q} * \ln \left(\frac{I_L}{I_o} \right) \quad (2.9)$$

Η σχέση **2.8** δείχνει την λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε συνάρτηση με το φωτόρρευμα, δηλαδή την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο

2.7 Μοντελοποίηση κυψέλης

Με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση μιας κυψέλης φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η κάθε κυψέλη έχει εμβαδόν $A=10,7\text{cm}^2$. Επίσης στην προσωμοίωση συνυπολογίζεται ότι το 59% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας έχει $E_g > 1.12\text{eV}$. Ακόμα ισχύουν οι τύποι:

$$i_{ph} = q * n_{\phi} * A \quad (2.10)$$

όπου $q=1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$

A το εμβαδόν της κυψέλης

και n_{ϕ} είναι τα φωτόνια/sec

$$n_{\phi} = I * \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.11)$$

I είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

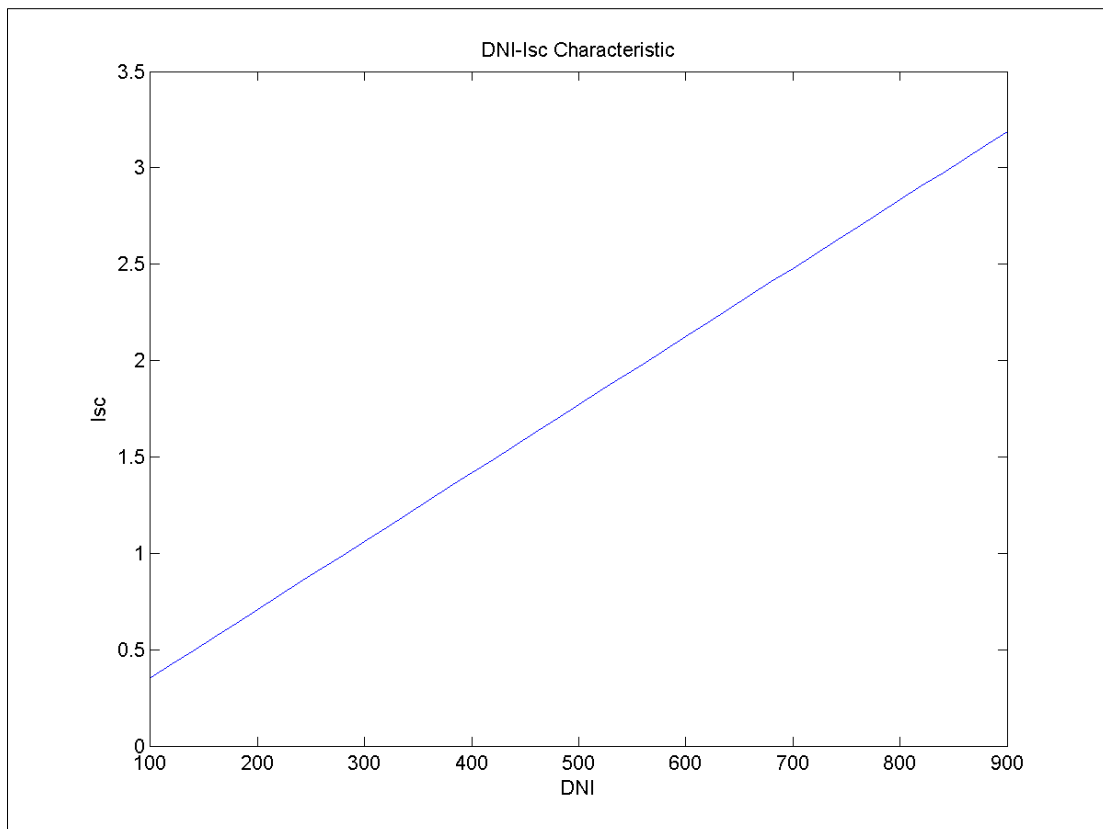
$h = 6,67 \cdot 10^{-34}\text{Js}$ σταθερά του Plank

$c=3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ η ταχύτητα του φωτός

λ το μήκος κύματος που αντιστοιχείται με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας από το σχήμα 1.4

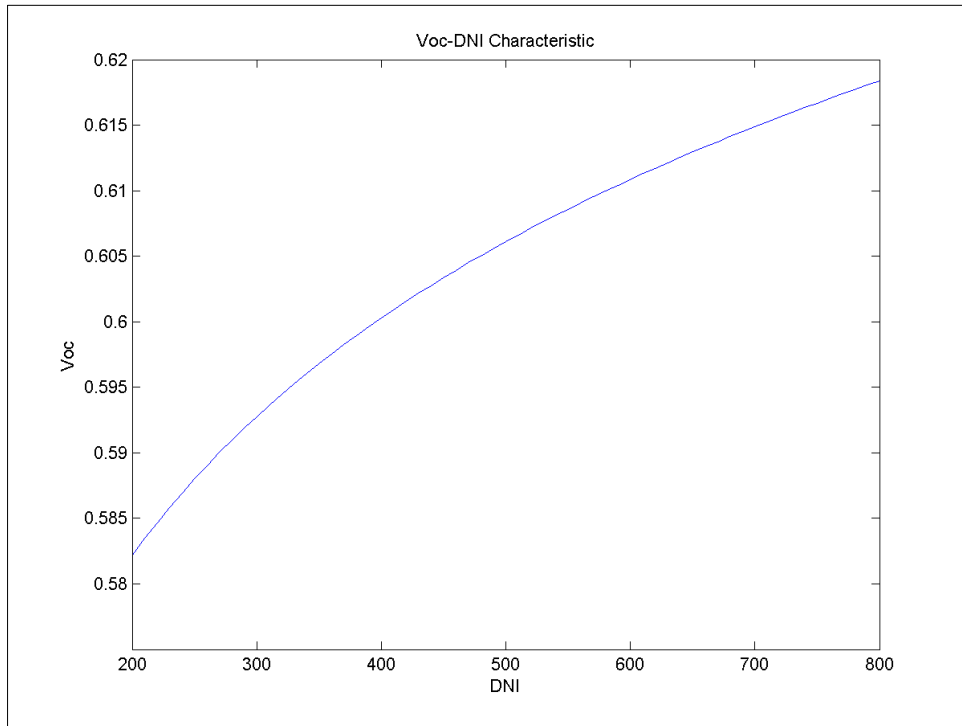
2.7.1 Εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης από την ακτινοβολία-θερμοκρασία

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.11 το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται γραμμικά σε συνάρτηση με την ακτινοβολία και παίρνει την τιμή 3,3 A για $DNI=900W/m^2$. Αυτό είναι απολύτως λογικό αν λάβουμε υπόψιν ότι το I_{sc} είναι ευθέως ανάλογο με το i_{ph} δηλαδή με τα φωτόνια που προσπίπτουν πάνω στην κυψέλη. Γι αυτό το λόγο παρατηρείται και μεγάλη μεταβολή του ρεύματος όσο μεταβάλλεται απότομα και η ακτινοβολία.



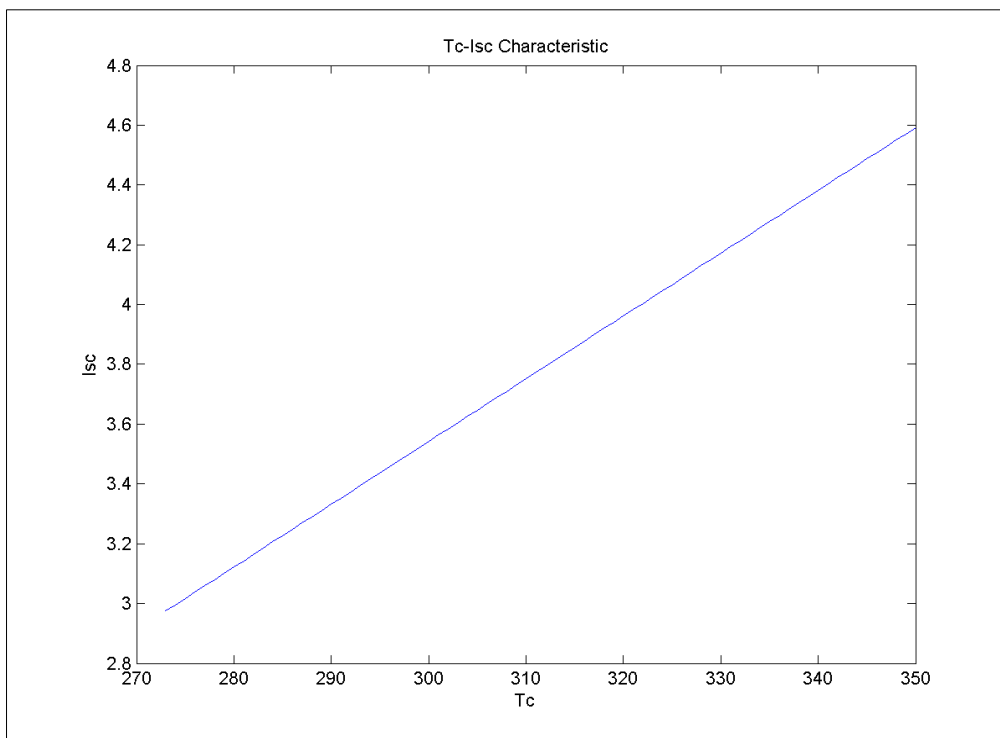
Σχήμα 2.11 Γραμμική εξάρτηση ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} σε συνάρτηση με την ακτινοβολία DNI

Στο σχήμα 2.12 φαίνεται ότι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} αυξάνεται λογαριθμικά σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία. Βλέπουμε συνεπώς πόσο σταθερή τάση παρέχουν τα φωτοβολταικά γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα και για κάποιες εφαρμογές ακόμα και χωρίς την χρήση μπαταριών. Από την άλλη μεριά η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πράγμα που μειώνει την ισχύ των φωτοβολταικών πλαισίων.



Σχήμα 2.12. Γραμμική εξάρτηση της V_{oc} σε συνάρτηση με την θερμοκρασία T_c

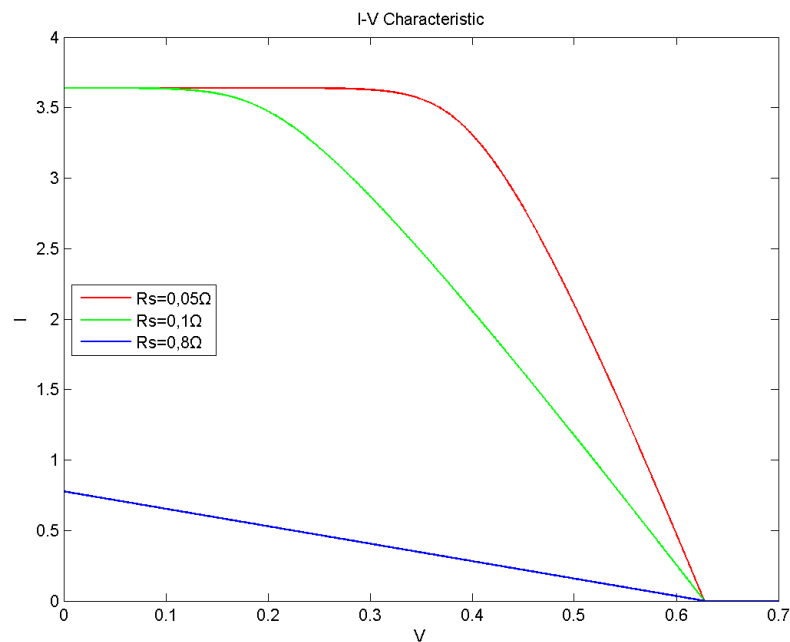
Στο σχήμα 2.14 φαίνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης το οποίο αυξάνεται επειδή με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η ενέργεια των ατόμων και έτσι είναι πιο εύκολο για ένα ηλεκτρόνιο να διεγερθεί, να εγκαταλείψει τη θέση όπου βρισκόταν και να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας παράλληλα και την αντίστοιχη οπή.



Σχήμα 2.13. Γραμμική εξάρτηση του I_{sc} σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία $T_c(K)$

2.7.2 Εξάρτηση της I-V από την R_s

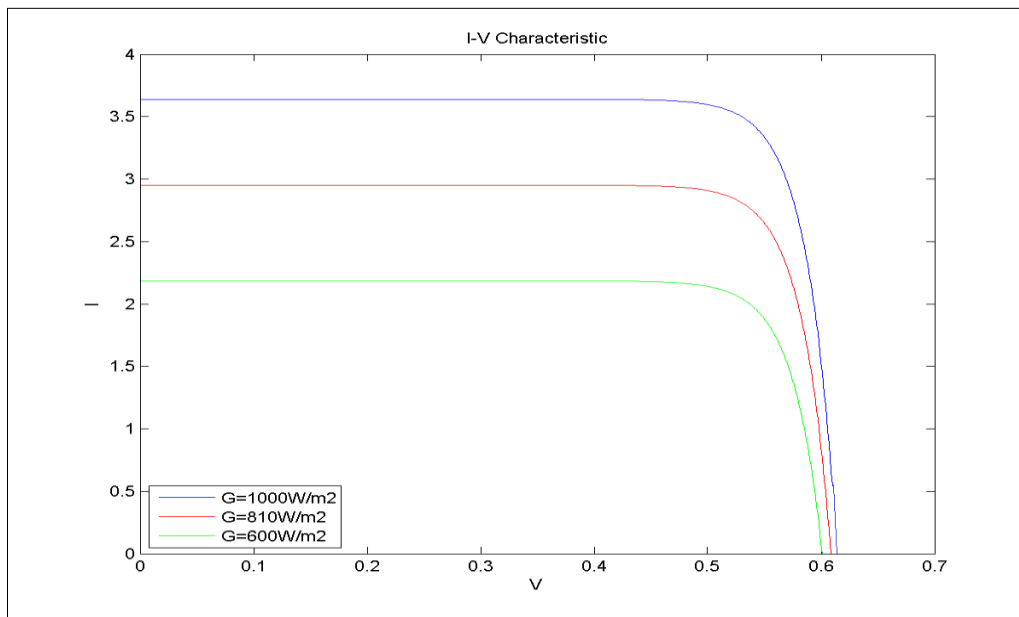
Καθώς η σειριακή αντίσταση R_s αυξάνεται, η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση γίνεται μεγαλύτερη για την ίδια ροή ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τμήμα της χαρακτηριστικής στο οποίο το ρεύμα είναι σχεδόν σταθερό να μετατοπίζεται προς τα κάτω προκαλώντας μία σημαντική μείωση της τάσης εξόδου και μία ελαφρά μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Για πολύ υψηλές τιμές της R_s βέβαια έχουμε σημαντική μείωση και στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, ενώ η συμπεριφορά του ηλιακού κυττάρου ισοδυναμεί με αυτήν μιάς αντίστασης. Η επίδραση της R_s για το ηλιακό κύτταρο κρυσταλλικού πυριτίου φαίνεται στη γραφική παράσταση[22].



Σχήμα 2.14. Επίδραση στη χαρακτηριστική εξόδου της σε σειρά αντίστασης R_s

2.7.3 Εξάρτηση από την ακτινοβολία

Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αλλάζει με τις διάφορες αυξομειώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα αν ελαττωθεί η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας το εμβαδόν του χωρίου κάτω από τη I-V ελαττώνεται. Επιπλέον, η τιμή της έντασης I επίσης ελαττώνεται καθώς το I είναι ευθέως ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ακόμα το σημείο μέγιστης λειτουργίας κινείται ελαφρά προς τα αριστερά όπως φαίνεται και από το σχήμα. Τέλος η τιμή V_{oc} δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πτώση ή την αλλαγή στην τιμή της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο το V_{oc} ελαττώνεται με την ελάττωση της ακτινοβολίας.



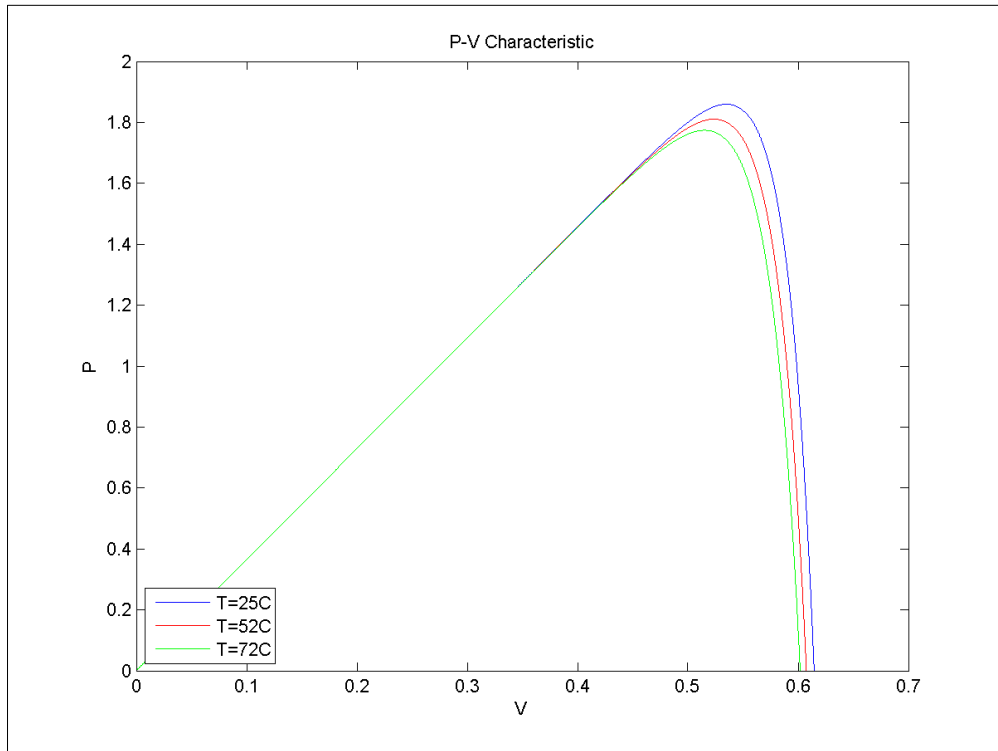
Σχήμα 2.15. Επίδραση στη χαρακτηριστική εξόδου της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

2.7.4 Θερμοκρασία κυττάρου (T)

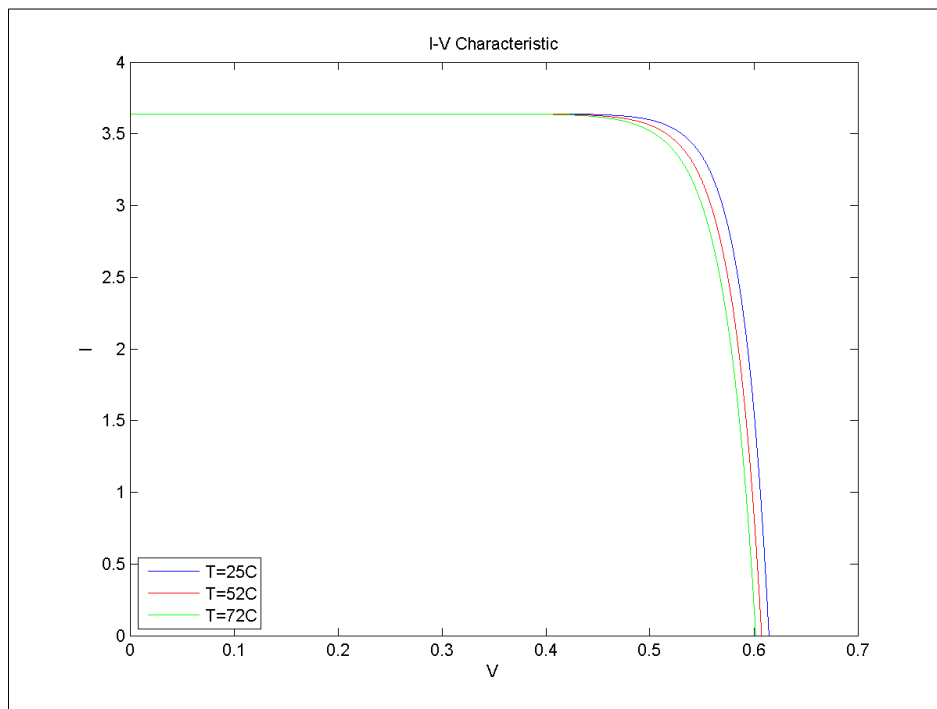
Η θερμοκρασία επηρεάζει τη χαρακτηριστική εξίσωση με δύο τρόπους: άμεσα μέσω του T που υπάρχει στη χαρακτηριστική εξίσωση μέσα στο εκθετικό και έμμεσα μέσω της επιρροής του στο ρεύμα κόρου της διόδου I_0 . Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται το πλάτος του εκθετικού μέσα στη χαρακτηριστική εξίσωση μειώνεται, αυξάνεται όμως το ρεύμα κόρου της διόδου το οποίο είναι ανάλογο της ποσότητας $\exp T$. Όσον αφορά τη V_{oc} μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ($0.50\%/^{\circ}\text{C}$ για τα περισσότερα κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου ενώ για τα υψηλής απόδοσης κύτταρα μπορεί να φτάσει και $0.35\%/^{\circ}\text{C}$ και για τα κύτταρα άμορφου πυριτίου $0.20\text{-}0.30\%/^{\circ}\text{C}$).

Η ποσότητα του φωτορεύματος I_L αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας της αύξησης του αριθμού των θερμικά παραγόμενων φορέων στο κύτταρο ($0.065\%/^{\circ}\text{C}$ για κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου και $0.09\%/^{\circ}\text{C}$ για κύτταρα άμορφου πυριτίου).

Η συνολική επίδραση της θερμοκρασίας στο κύτταρο μπορεί να προσδιοριστεί λαμβάνοντας υπόψιν τους προηγούμενους παράγοντες σε συνδυασμό με την χαρακτηριστική εξίσωση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η επίδραση της ακτινοβολίας στα πολυκρυσταλλικά πλαίσια.



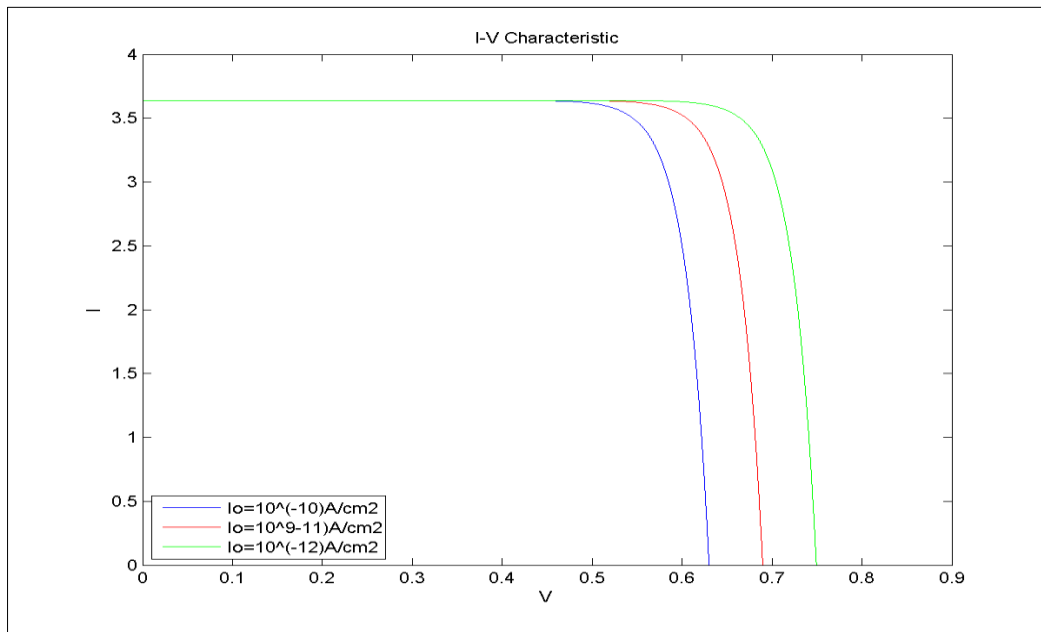
Σχήμα 2.16. P-V χαρακτηριστική μιας κυψέλης σε διαφορετικές θερμοκρασίες



Σχήμα 2.17. Επίδραση στη χαρακτηριστική εξόδου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T

2.7.5 Ρεύμα κόρου της διόδου

Από τη εξίσωση διαπιστώνουμε ότι μία αύξηση του ρεύματος κόρου της διόδου I_0 προκαλεί μία μείωση στη τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Η επίδραση του I_0 στην I-V χαρακτηριστική φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.18. Επίδραση στη χαρακτηριστική εξόδου του ρεύματος κόρου της διόδου I_0

2.8 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης ενός ηλιακού κυττάρου είναι το ποσοστό της ισχύος που μετασχηματίζεται (από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια) όταν το ηλιακό κύτταρο συνδέεται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Αυτός ο παράγοντας υπολογίζεται με χρήση του λόγου μέγιστης ισχύος P_m προς την ηλιακή ακτινοβολία εισόδου (G σε W/m^2) και προς την επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου όπως φαίνεται παρακάτω στον τύπο.

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot S} = \frac{V_m \cdot I_m}{G \cdot S} \quad (2.9)$$

Όπου το G εκφράζει την ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 και το S την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.

Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων θεωρητικά ανέρχεται στα 24%, όμως αυτά που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν βαθμό απόδοσης γύρω στα 15-18%, ο οποίος συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ) παραμένει ακόμα αρκετά χαμηλός. Η σχετική χαμηλή τιμή του βαθμού απόδοσης των ηλιακών στοιχείων οφείλεται κυρίως στους παρακάτω λόγους.

- **Επανασύνδεση**

Όταν ένα φωτόνιο απορροφηθεί από ένα ηλιακό κύτταρο και εφόσον έχει ενέργεια μεγαλύτερη από την τιμή του ενεργειακού χάσματος μπορεί να παραχθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών. Αν το ελεύθερο ηλεκτρόνιο που έχει δημιουργηθεί από την πρόσπτωση

του φωτονίου φτάσει στην περιοχή επαφής μπορεί να συνεισφέρει στο φωτόρευμα του ηλιακού κυττάρου. Διαφορετικά, υπάρχει η πιθανότητα επανασύνδεσης(πριν φτάσει στην περιοχή επαφής) με μία από τις πολυπληθείς οπές που υπάρχουν στο υλικό τύπου p αποδίδοντας την ενέργεια του υπο μορφή θερμότητας.

- **Απώλειες ανάκλασης**

Οι απώλειες από ανάκλαση παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην συνολική μειωμένη απόδοση του ηλιακού κυττάρου καθώς ο συντελεστής ανάκλασης του πυριτίου κυμαίνεται περίπου στο 0.35. Οι απώλειες από ανάκλαση δίνονται παρακάτω:

$$R(\lambda)\phi(\lambda)\exp^{-a(\lambda)\chi} \quad (2.10)$$

Όπου

$R(\lambda)$: ο συντελεστής ανάκλασης του πυριτίου

$\phi(\lambda)$: η προσπίπτουσα ποή φωτονίων ανα μονάδα μήκους κύματος

a : συντελεστής απορόφησης του πυριτίου

λ : μήκος κύματος

χ : απόσταση από την επάνω επιφάνεια του κυττάρου

Μείωση του συντελεστή ανάκλασης και άρα αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με επίστρωση της επιφάνειας με αντανάκλαστικά υλικά και επεξεργασία της με χημικά μέσα(περιορισμός του συντελεστή ανάκλασης μέχρι 3%).

- **Αντίσταση**

Μη ικανοποιητικές τιμές της εν σειρά αντίστασης R_s και της παράλληλης αντίστασης R_{sh} τείνουν να μειώσουν την τελική απόδοση του συστήματος.

- **Σκίαση από τις επαφές**

Η ανάγκη της κατασκευής ηλεκτροδίων τόσο στην επιφάνεια του υλικού τύπου n όσο και στην επιφάνεια του υλικού τύπου p συνεπάγεται την δημιουργία ενός μεταλλικού πλέγματος επαφών στην επιφάνεια του κυττάρου που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Και αυτό επειδή η αντίσταση στην επιφανειακή κίνηση των φορέων στο πάνω επιφανειακό στρώμα του κυττάρου είναι μεγάλη πρέπει να υπάρχουν πολλά σημεία απαγωγής των φορέων (ηλεκτρικές επαφές) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα ωμικά φαινόμενα. Αυτό έχει σαν συνέπεια ένα ποσοστό 5-15% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να εκτρέπεται.

- **Θερμοκρασία**

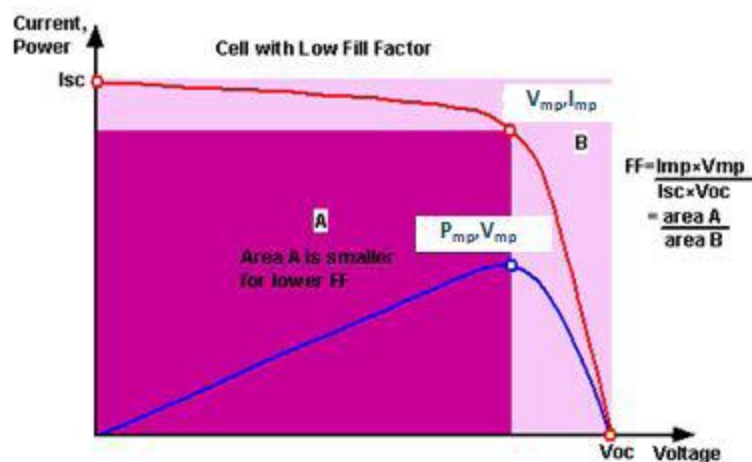
Τόσο οι αρκετά υψηλές όσο και οι αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες τείνουν να μειώσουν σημαντικά το βαθμό απόδοσης.

2.9 Παράγοντας πλήρωσης

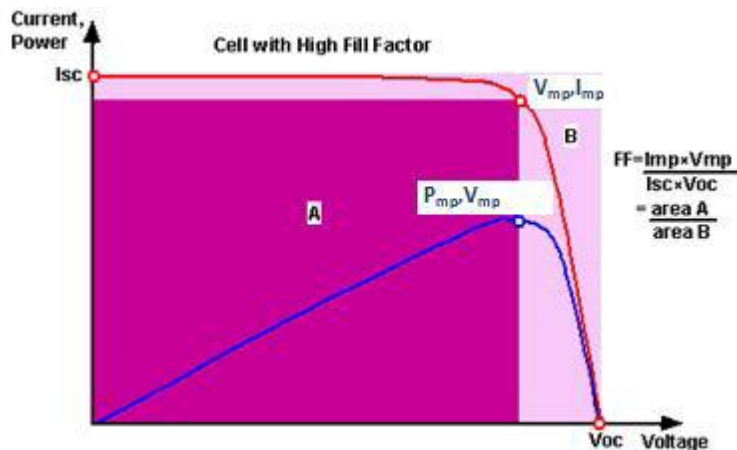
Μια άλλη σημαντική παράμετρος που προσδιορίζει τη συμπεριφορά του ηλιακού κυττάρου είναι ο συντελεστής πλήρωσης (FF). Αυτός είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως επί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.11)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης είναι ένας δείκτης του πόσο τετράγωνη είναι η χαρακτηριστική I-V του ηλικού κυττάρου. Τυπικές τιμές βρίσκονται μεταξύ 0,7 και 0,85. Παρακάτω διακρίνονται δύο περιπτώσεις χαρακτηριστικών I-V με χαμηλό και μεγάλο συντελεστή πλήρωσης αντίστοιχα.



Σχήμα 2.19. Χαρακτηριστική I-V ηλιακού κυττάρου με μικρό συντελεστή πλήρωσης



Σχήμα 2.20. Χαρακτηριστική I-V ηλιακού κυττάρου με μεγάλο συντελεστή πλήρωσης

Κεφάλαιο 3^ο

Δημιουργία πεδίου δοκιμών για φωτοβολταϊκά πλαίσια σε πραγματικές συνθήκες.

3.1 Εισαγωγή

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου ονομαστικής ισχύος 45 W που κατασκευάστηκε. Το φωτοβολταϊκό αυτό βρίσκεται στην οροφή του παλαιού κτιρίου της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΣΗΜΜΥ) στη Πολυτεχνειούπολη στη Ζωγράφου. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδέεται και φορτίζει μία μπαταρία 12V και 110 Ah, η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο Συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).

3.2 Περιγραφή εξοπλισμού

Κατά τη διαδικασία σχεδίασης της μετρητικής διάταξης, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού με τον οποίο θα ήταν δυνατό να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα στις μετρήσεις. Η επιλογή των διάφορων μετρητικών οργάνων έγινε βάσει συνδυασμού των απαιτήσεων που επιτάσσει το IEC standard για την ακρίβειά τους, του κόστους αγοράς τους, της αξιοπιστίας της εταιρείας κατασκευής τους και του χρόνου παραλαβής τους, ώστε να είναι έτοιμο το όλο σύστημα σε χρονικό διάστημα μερικών μηνών. Για το λόγο αυτό υπάρχουν μικρές αποκλίσεις από το διεθνές πρότυπο, όσον αφορά στην ακρίβεια μερικών αισθητηρίων, οι οποίες επηρεάζουν ελάχιστα το τελικό αποτέλεσμα.

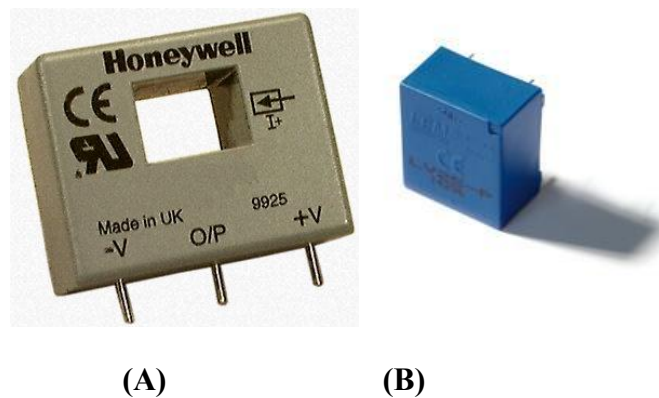
3.2.1 Εξοπλισμός ηλεκτρικών μετρήσεων

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα αισθητήριο μέτρησης του ρεύματος και ένα της τάσης.

Τα αισθητήρια ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα CSNR151 της Honeywell, τα οποία είναι τοροειδούς σχήματος ώστε να περνάει το καλώδιο από την εσοχή που διαθέτουν και τοποθετούνται πάνω σε πλακέτα (PCB). Μετρούν το ρεύμα του διερχόμενου καλωδίου κι έχουν ως έξοδο σήμα σε Volt. Το εύρος των ρευμάτων που μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια 0,5% είναι ± 200 A, με ονομαστικό ρεύμα μέτρησης τα 125 A, ενώ το σήμα εξόδου εξαρτάται από την αντίσταση που συνδέεται στην έξοδο τους (10 - 100 Ω). Η τάση τροφοδοσίας τους κυμαίνεται από ± 12 Vdc έως ± 15 Vdc.

Τα αισθητήρια τάσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα LV 25-P / SP5 της LEM, τα οποία μπορούν να μετρήσουν τάσεις μέχρι 1500 Volt με ακρίβεια 0,8% και συνδέονται παράλληλα με την τάση που επιθυμείται να μετρηθεί, ενώ επίσης τοποθετούνται πάνω σε πλακέτα (PCB). Την μέγιστη ακρίβεια τους την εμφανίζουν για ονομαστικό ρεύμα 10 mA, το οποίο δημιουργείται συνδέοντας σε σειρά, με το θετικό πόλο της μετρούμενης τάσης, αντίσταση ισχύος της τάξεως των kΩ και μεγέθους ανάλογου των μέγιστων τάσεων που επρόκειτο να μετρηθούν. Επιπλέον, έχουν ως έξοδο σήμα σε Volt το οποίο εξαρτάται από την αντίσταση εξόδου που θα συνδεθεί (100 - 340 Ω). Η τάση τροφοδοσίας τους είναι ± 15 Vdc.

Η επιλογή των κατάλληλων αντιστάσεων καθώς κι η βαθμονόμηση αυτών των οργάνων αναφέρεται στην περιγραφή της μετρητικής διάταξης.



Εικόνα 3.1 : Αισθητήρια ηλεκτρικών μετρήσεων: (A) ρεύματος , (B) τάσης

3.2.2 Εξοπλισμός μετεωρολογικών μετρήσεων

Για τη θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας 110S, ο οποίος μετράει θερμοκρασίες από -40°C έως 52,5°C και για την ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας LICOR-200SZ, ο οποίος μετράει ακτινοβολία από 0 έως 1500W/m². Αναλυτικότερα, κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των οργάνων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Αισθητήρας	Μετρούμενο μέγεθος	Εύρος μέτρησης	Τάση/ρεύμα εισόδου (Vdc)	Εύρος σήματος εξόδου
110S	Θερμοκρασία	-40 - 52,5 °C	4-35V	0-2,5 Vdc
LICOR200SZ	Ακτινοβολία	0-1500W/m ²	192μA/1000W/m ²	0-2,352 Vdc

Βασικά χαρακτηριστικά μετεωρολογικών αισθητήρων



(A)



(B)

Σχήμα 3.2. Αισθητήρια μετεωρολογικών μετρήσεων:(A)Θερμόμετρο, (B) Πυρανόμετρο

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι θα ήταν προτιμότερο να έχει χρησιμοποιηθεί αισθητήρας που μετράει απευθείας την θερμοκρασία του πλαισίου.

3.3.3 Κάρτα καταγραφής σημάτων

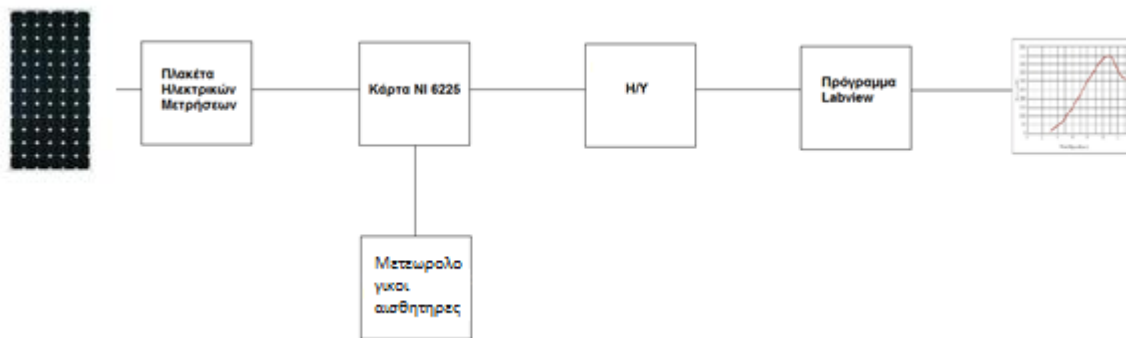
Για τη συλλογή και καταγραφή των σημάτων χρησιμοποιήθηκε η κάρτα USB 6225 της National Instruments, η οποία διαθέτει 80 κανάλια για αναλογικές εισόδους, 24 για ψηφιακές και 2 για αναλογικές εξόδους. Τα μέγιστα αναλογικά σήματα που δέχεται είναι πλάτους 12 Volt, ενώ τα μέγιστα ψηφιακά μέχρι πλάτος 5 Volt. Η κάρτα αυτή συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή στο εργαστήριο ΣΗΕ κι είναι συμβατή με το πρόγραμμα Labview, μέσω του οποίου γίνεται κι η αποθήκευση των σημάτων, όπως θα επεξηγηθεί σε επόμενη παράγραφο. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι προτιμήθηκε και χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τρόπος καταγραφής των δεδομένων, αντί της εγκατάστασης έτοιμου εμπορικού καταγραφικού συστήματος (data logger), που θα έδινε μόνο μέσες τιμές δεκαλέπτων, καθώς κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος ρυθμός δειγματοληψίας, ο οποίος θα μας επέτρεπε τη δυνατότητα παρακολούθησης κι ελέγχου του συστήματος ανά πάσα στιγμή.



Σχήμα 3.3 Κάρτα καταγραφής σημάτων (1) NI 6225 USB, (2) Μετατροπέας τετραγωνικού παλμού που συνδέεται με το ανεμόμετρο για την ανεμογεννήτρια

3.4 Μετρητικό Σύστημα

Το μετρητικό σύστημα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε αποτελείται από διάφορα μέρη, όπως φαίνεται στο σχήμα. Γενικότερα, αποτελείται από το υπο εξέταση φωτοβολταϊκό, την υπό εξέταση Α/Γ (η οποία κατασκευάστηκε από φοιτητές και βρίσκεται επίσης στην οροφή του κτιρίου), τον μετεωρολογικό ιστό, τις πλακέτες καταγραφής των ηλεκτρικών μετρήσεων, την κάρτα καταγραφής όλων των σημάτων, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το πρόγραμμα Labview που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των σημάτων των αισθητήρων. Το σύστημα αυτό ξεκίνησε την πλήρη λειτουργία του στις 24 Φεβρουαρίου 2011 και μετράει συνεχώς από τότε.

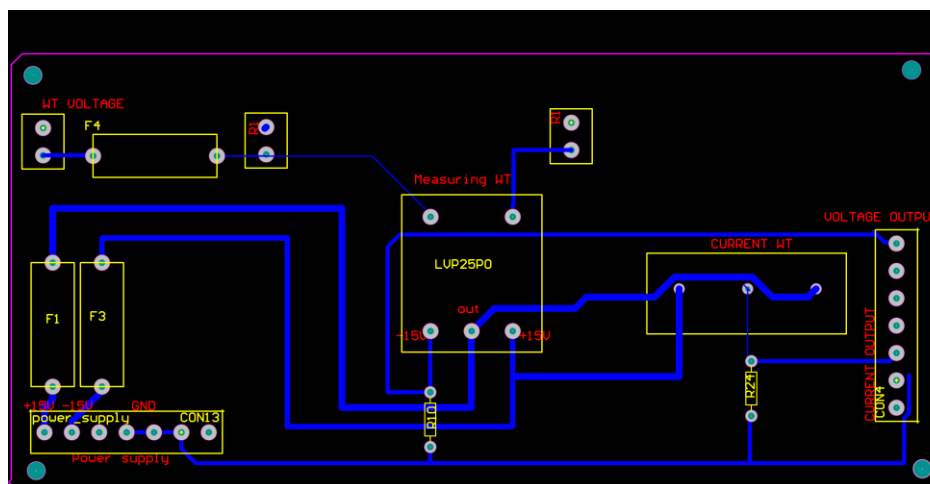


Σχήμα 3.4. Σχεδιάγραμμα μετρητικού συστήματος

3.4.1 Πλακέτα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών

3.4.1.1 Σχεδίαση πλακέτας και διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων της

Τα αισθητήρια που περιγράφηκαν, απαιτούν την τοποθέτησή τους πάνω σε πλακέτες (PCB). Λόγω του κόστους και της ευαισθησίας τους, αποφασίστηκε να μην τοποθετηθούν σε μία απλή διάτρητη πλακέτα, αλλά να σχεδιαστεί και να "τυπωθεί" ειδική πλακέτα για την εγκατάστασή τους. Η πλακέτα σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Altium Designer v.9.4, κι αφού τυπώθηκε, πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες κολλήσεις των αισθητηρίων οργάνων, των αντιστάσεων, των ασφαλειών και των θυρών (κλέμες) στις οποίες συνδέονταν τα σήματα εισόδου κι εξόδου.



Σχήμα 3.5. Σχέδιο πλακέτας ηλεκτρικών αισθητήρων. Σχεδιασμένο στο πρόγραμμα Altium Designer.

Η επιλογή των αντιστάσεων εξόδου έγινε βάσει του μέγιστου πλάτους σήματος των 10 Volt που μπορεί να δεχτεί η κάρτα καταγραφής. Επομένως, για την αντίσταση εξόδου των αισθητήρων ρεύματος, γνωρίζοντας ότι για το λόγο μετασχηματισμού τους ισχύει ότι τα 12 A αντιστοιχούν σε ρεύμα εξόδου 62,5 mA και θεωρώντας μέγιστο ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού τα 2.2 A, για λόγους ασφαλείας, το οποίο έχει ως ρεύμα εξόδου τα $11,4 \cdot 10^{-3}$ A και το οποίο επιθυμούμε να αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτος σήματος των 10 Volt, υπολογίστηκε η αντίσταση εξόδου :

$$R_{I,out} = \frac{10 \text{ V}}{0,0114 \text{ A}} = 877 \Omega \quad (3.1)$$

Επειδή τα όρια, όμως, είναι 100Ω τοποθετήθηκε αντίσταση 100Ω.

Ομοίως, στους αισθητήρες τάσης, γνωρίζοντας ότι το ονομαστικό ρεύμα εξόδου τους είναι 25 mA, υπολογίστηκε η αντίσταση εξόδου :

$$R_{V,out} = \frac{10 \text{ V}}{0,025 \text{ A}} = 400 \Omega \quad (3.2)$$

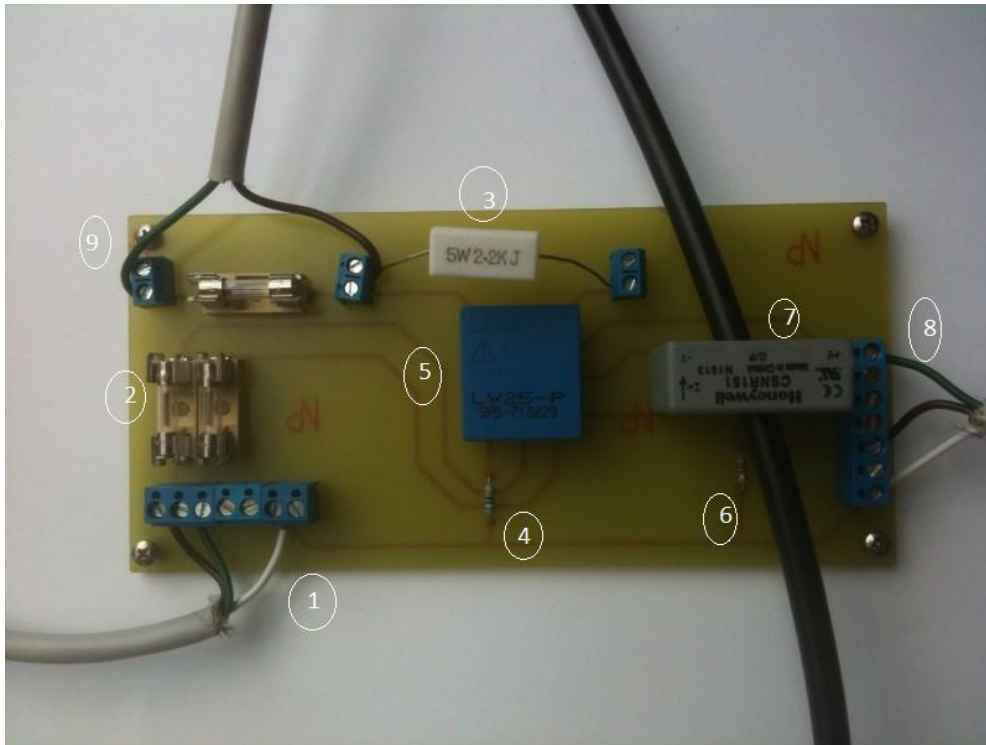
Η μέγιστη όμως αντίσταση, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, είναι 340 Ω, αλλά δεν κυκλοφορεί κι έτσι εν τέλει επιλέχθηκε, αντίσταση των 330 Ω για την έξοδο των μετρητικών τάσης.

Για την είσοδο των αισθητήρων τάσης, απαιτούνται αντιστάσεις τέτοιες ώστε να εμφανίζεται στα LV25 ονομαστικό ρεύμα εισόδου 10 mA για τη μέγιστη τάση που πρόκειται να μετρήσουν. Στο ρεύμα αυτό εμφανίζεται κι η μέγιστη ακρίβεια μέτρησης 0,8%. Μετά από την παρατήρηση των προσομοιώσεων που είχαν γίνει για το εν λόγω φωτοβολταϊκό, διαπιστώθηκε ότι μέγιστη τάση που μπορεί να εμφανιστεί είναι περίπου 20 V, έτσι για λόγους ασφαλείας θεωρήθηκε ανώτερο όριο της τάσης του Φ/Β τα 22 V και βάσει αυτού έγινε ο υπολογισμός των αντιστάσεων εισόδου:

$$R_{V,in} = \frac{22 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} = 2.2 \text{ k}\Omega \quad (3.3)$$

Η ισχύς που αναπτύσσεται στις αντιστάσεις αυτές ($22\text{V} \cdot 0,01\text{A} = 0,22 \text{ W}$), οπότε χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις ισχύος 5 W, ώστε να υπάρχει σιγουριά για την ασφάλεια και τη μη υπερθέρμανση τους. Κατά τη σχεδίαση της πλακέτας, προνοήθηκε να μην κολληθούν αυτές οι αντιστάσεις απευθείας σε αυτήν, αλλά να τοποθετηθούν κλέμες στις οποίες και θα μπορούν να μπουν αντιστάσεις διάφορων μεγεθών, ώστε με την ίδια πλακέτα να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο μέλλον κι άλλων φωτοβολταϊκών με διαφορετικές τάσεις.

Επιπροσθέτως, προστέθηκαν ασφάλειες τήξης 0,5 A στην είσοδο της τροφοδοσίας και στην είσοδο της τάσης του φωτοβολταϊκού, για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των αισθητήρων. Ακόμη, τοποθετήθηκαν κλέμες για την είσοδο της τροφοδοσίας στην πλακέτα και για την είσοδο κι έξοδο των σημάτων των αισθητήρων.



Σχήμα 3.6. Πλακέτα ηλεκτρικών αισθητήρων

- (1) Τροφοδοσία $\pm 15V$ - γείωση πλακέτας (άσπρο καλώδιο)
- (2) Ασφάλειες τήξης 0,5 A για την ασφαλή τροφοδοσία των αισθητήρων
- (3) Αντίσταση 2,2K Ω και ισχύος 5W
- (4) Αντίσταση εξόδου 330 Ω του αισθητήρα τάσης
- (5) Αισθητήρας τάσης LV25-P
- (6) Αντίσταση εξόδου 100 Ω του αισθητήρα ρεύματος
- (7) Αισθητήρας ρεύματος CSNR151
- (8) Θύρα εξόδου σημάτων ρεύματος, τάσης και γείωση
- (9) Θύρες εισόδου της DC τάση για την μέτρησή της

3.4.1.2 Βαθμονόμηση αισθητήρων

Οι αισθητήρες γενικότερα εμφανίζουν κάποια σχέση μετασχηματισμού μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου. Συνήθως, η σχέση αυτή είναι γραμμική, όπως συμβαίνει και με τους αισθητήρες ηλεκτρικών μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο μετρητικό σύστημα. Για την εύρεση αυτής της γραμμικής σχέσης απαιτείται βαθμονόμηση των οργάνων, κατά την οποία ουσιαστικά εκτελούνται μετρήσεις γνωστών τιμών, ώστε να εξακριβωθεί τι σήμα θα έχουν οι αισθητήρες για αυτές τις τιμές.

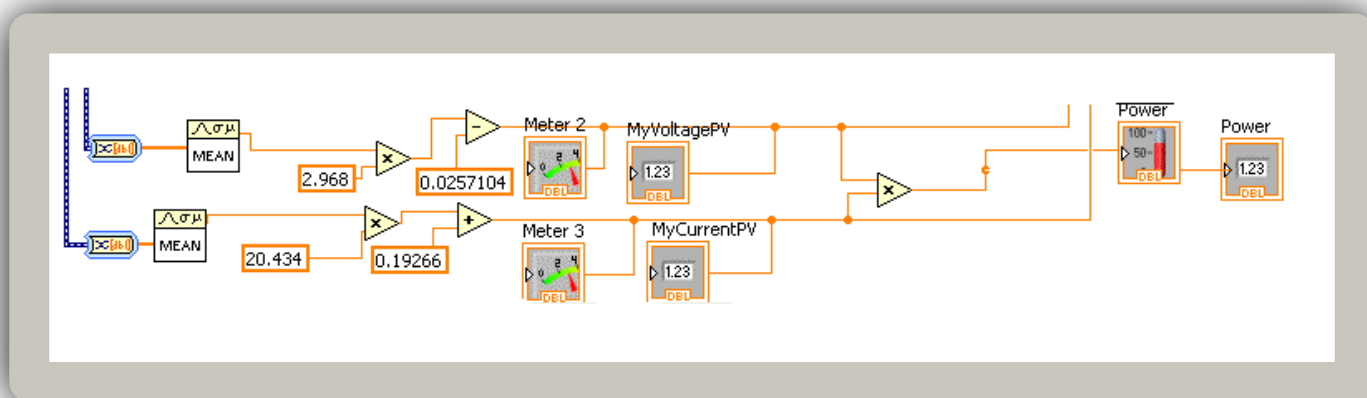
Για το λόγο αυτό, πραγματοποιηθήκαν μετρήσεις βαθμονόμησης και προέκυψαν οι συναρτήσεις μεταφοράς για κάθε ένα από τα μετρητικά αισθητήρια. Για τους αισθητήρες τάσης, χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό και το πολύμετρο υψηλής ακρίβειας FLUKE 867B, ενώ για του αισθητήρες ρεύματος χρησιμοποιήθηκε επιπλέον μία αντίσταση, ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή ρεύματος από το τροφοδοτικό.

Η διαδικασία για τους αισθητήρες τάσης περιελάμβανε 4 μετρήσεις στα 0,15,20 και 30 Volt περίπου. Αρχικά, μετρούταν η έξοδος του τροφοδοτικού με το πολύμετρο και στη συνέχεια η έξοδος του κάθε LV25. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν οι συναρτήσεις μεταφοράς που παρουσιάζονται στον Πίνακα.

Η διαδικασία για τους αισθητήρες ρεύματος περιελάμβανε 4 μετρήσεις στα 0,1,2 και 3 Ampere περίπου. Για την παραγωγή ρεύματος συνδέθηκε σε σειρά με το τροφοδοτικό μία μεταβλητή αντίσταση που είχε ρυθμιστεί στα 5 Ω. Το τροφοδοτικό που χρησιμοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα ρύθμισης κι ελέγχου του ρεύματος, για το λόγο αυτό δε χρειαζόταν να αλλάζει η τιμή της αντίστασης κάθε φορά. Έτσι, αρχικά πραγματοποιούνταν μέτρηση του ρεύματος συνδέοντας το πολύμετρο σε σειρά (λειτουργία αμπερομέτρου) κι έπειτα συνδεότανε το πολύμετρο (σε λειτουργία βολτομέτρου) παράλληλα με την έξοδο του εκάστοτε αισθητήρα ρεύματος, ώστε να μετρηθεί το σήμα εξόδου του για το δεδομένο ρεύμα.

Αισθητήρας	Συνάρτηση μετασχηματισμού
LV25-P	$V = 2,968 \cdot V_{LV,out} - 0,02571$
CNSR151	$I = 20,434 \cdot V_{CNSR,out} + 0,19266$

Οι συναρτήσεις μεταφοράς των αισθητήρων ρεύματος και τάσης διαμορφώθηκαν στο πρόγραμμα Labview όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 3.7. Πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στο Labview για την καταγραφή και την μετατροπή του αναλογικού σήματος του ρεύματος και της τάσης, το οποίο ενσωματώθηκε στο κύριο πρόγραμμα καταγραφής.

3.4.2 Κάρτα και πρόγραμμα καταγραφής

Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε η κάρτα NI 6225 για την απόκτηση των σημάτων των διάφορων αισθητήρων, η οποία συνδέεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή του εργαστηρίου ΣΗΕ. Η μετατροπή των σημάτων σε πραγματικά μεγέθη κι η αποθήκευση αυτών γίνεται από πρόγραμμα σε Labview. Το πρόγραμμα αυτό έχει προκύψει μετά από κάποιες τροποποιήσεις και διαμορφώσεις, ώστε να είναι συμβατό με το δικό μας μετρητικό σύστημα, από το υπάρχον πρόγραμμα που λειτουργεί στις μετρήσεις του εργαστηρίου Ανανεώσιμης Ενέργειας του Α.Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου. Το πρόγραμμα "διαβάζει" ουσιαστικά το κάθε σήμα και μέσω μίας συνάρτησης μετασχηματισμού, όπως παρουσιάστηκε για τους αισθητήρες τάσης και ρεύματος στον Πίνακα, τα μετατρέπει στα αντίστοιχα μεγέθη. Οι συναρτήσεις μεταφοράς για τους μετεωρολογικούς αισθητήρες φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα.

Αισθητήρας	Μετρούμενο μέγεθος	Συνάρτηση μετασχηματισμού
110S	Θερμοκρασία	$T = 55,55 \cdot V_{110S,out} - 86,38$
LiCOR-200SZ	Ακτινοβολία	$G = 637,7551 \cdot V_{Licor,out}$

Συναρτήσεις μετασχηματισμού των σημάτων κάθε μετεωρολογικού αισθητήρα

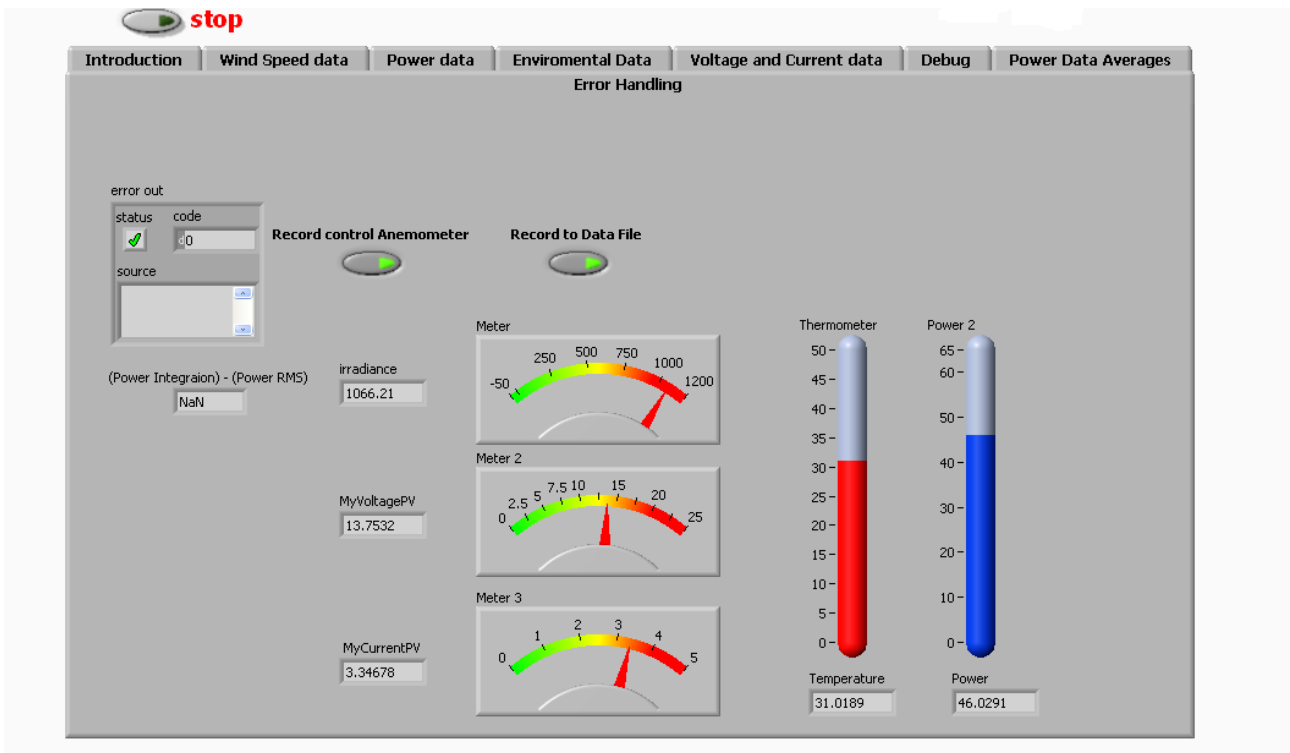
Το πρόγραμμα λαμβάνει δεδομένα ανά ένα δευτερόλεπτο (συχνότητα 1 Hz) και τα αποθηκεύει, αφού έχουν μετατραπεί σε πραγματικά μεγέθη, σε απλό αρχείο text. Είναι συγχρονισμένο με την ώρα κι ημερομηνία του Η/Υ και έτσι δημιουργεί ξεχωριστό αρχείο για την κάθε μέρα κι ουσιαστικά ξαναεκκινεί αυτόματα μόλις περάσει η ώρα 00:00. Επιπλέον, συνδέοντας τον Η/Υ στο διαδίκτυο και μέσω απλού προγράμματος απομακρυσμένης διαχείρισης (TeamViewer v.6.0) είναι δυνατός ο έλεγχος κι η διαχείριση των οποιονδήποτε σφαλμάτων παρουσιάζονται ανά πάσα στιγμή κι η απόκτηση των αρχείων με τα καθημερινά δεδομένα από οποιοδήποτε μέρος με διαθέσιμη σύνδεση διαδικτύου, χωρίς να είναι αναγκαία η παρουσία στο εργαστήριο.

Στο πρόγραμμα επίσης λαμβάνεται μέριμνα για τον υπολογισμό και την καταγραφή της ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού κάθε στιγμή μέσω των τύπων:

$$P = V * I \quad (3.4)$$

$$n = \frac{V_m * I_m}{G * S} \quad (3.5)$$

Κατά τη λειτουργία του προγράμματος είναι δυνατή η παρακολούθηση των στιγμιαίων μετρήσεων στο ειδικό προγραμματιστικό περιβάλλον που έχει διαμορφωθεί, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο διαχειριστή του συστήματος αλλά και στον κάθε επισκέπτη του εργαστηρίου να παρακολουθήσει το φωτοβολταϊκό σε λειτουργία, παρατηρώντας ταυτόχρονα την ισχύ κι όλα τα άλλα μετεωρολογικά-ηλεκτρικά μεγέθη.



Σχήμα 3.8. Παρακολούθηση των στιγμιαίων μεγεθών της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, του ρεύματος, της τάσης και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύς από το φωτοβολταϊκό

Κεφάλαιο 4^ο

Μέτρηση χαρακτηριστικής φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πεδίο δοκιμών

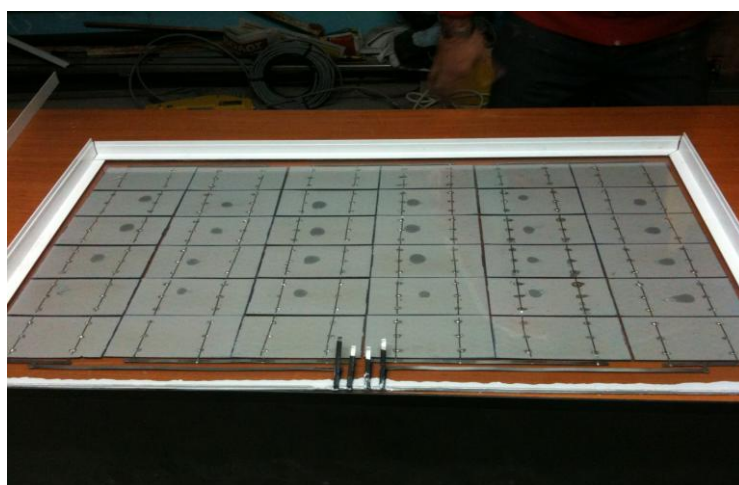
4.1 Κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Στο χώρο του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκε κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου από πολυκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου χαμηλού κόστους. Η κάθε κυψέλη έχει τάση λειτουργίας 0.5V και το φωτοβολταϊκό κατασκευάστηκε από 36 κυψέλες ούτως ώστε να έχει τάση εξόδου $V=18\text{Volt}$.

Στο πρώτο στάδιο της κατασκευής οι κυψέλες κολλήθηκαν με κολλητήρι 120W πολύ προσεκτικά σε σειρά και έπειτα τοποθετήθηκαν και κολλήθηκαν πάνω σε γυαλί όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.

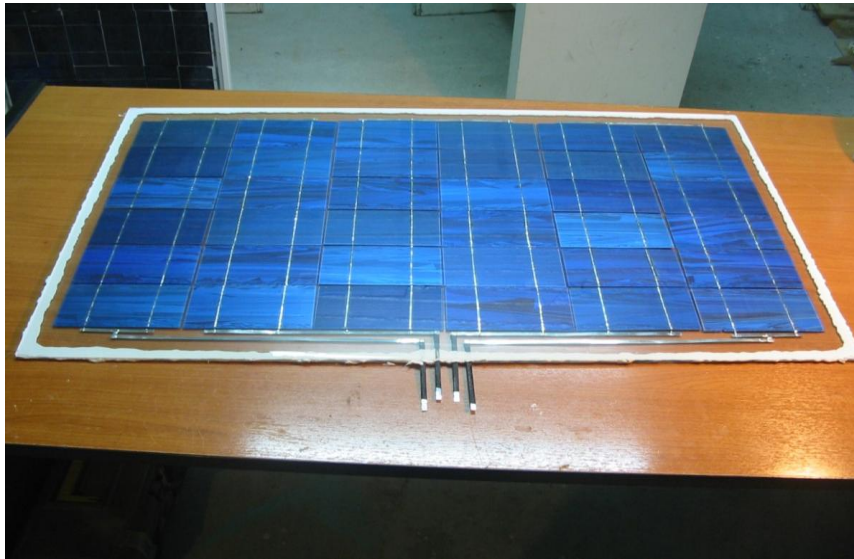


Σχήμα 4.1. Μπροστά όψη του φ/β πλαισίου τοποθετημένο πάνω σε γυαλί



Σχήμα 4.2. Πίσω όψη του φ/β πλαισίου

Μετά από αναμονή μερικών λεπτών ώστε να κολλήσουν οι κυψέλες στο γυαλί περάστηκε σιλικόνη γύρω από το φωτοβολταϊκό για να κολληθεί στο πάνω μέρος του φ/β γυαλί και να μονωθούν οι κυψέλες.

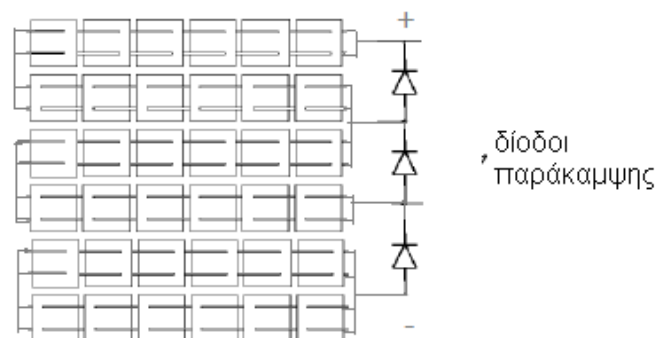


Σχήμα 4.3. Τοποθέτηση γυαλιού πάνω στις πολυκρυσταλλικές κυψέλες

Σημειώνεται ότι ο λόγος που τοποθετήθηκε γυαλί είναι για να μειώσουμε την αντανάκλαση των εισερχόμενων ακτίνων του ήλιου, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως και 5%.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι κατασκευάστηκε ένα δεύτερο φωτοβολταϊκό πλαίσιο ίδιων διαστάσεων με το αρχικό με τη μόνη διαφορά ότι στο δεύτερο τοποθετήθηκε plexiglass σε αμφότερες τις όψεις του και όχι γυαλί ώστε να σημειωθεί μέσω των πειραμάτων η διαφορά μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο που έγινε η χρήση plexiglass παρατηρήθηκε παραμόρφωση στο αρχικό σχήμα του plexiglass λόγω των αυξομειώσεων της θερμοκρασίας, συστολή-διαστολή, με άμεση συνέπεια την κύρτωση του πλαστικού. Τέλος το πλαίσιο καλύφθηκε από γωνίες αλουμινίου γύρω γύρω και συνδέθηκαν οι ακροδέκτες του πλαισίου με διόδους ελεύθερης διέλευσης Schottky ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο hot spot, το οποίο θα αναλυθεί λεπτομερώς.

Η συνδεσμολογία των κυψελών με τις διόδους παράκαμψης πραγματοποιήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.



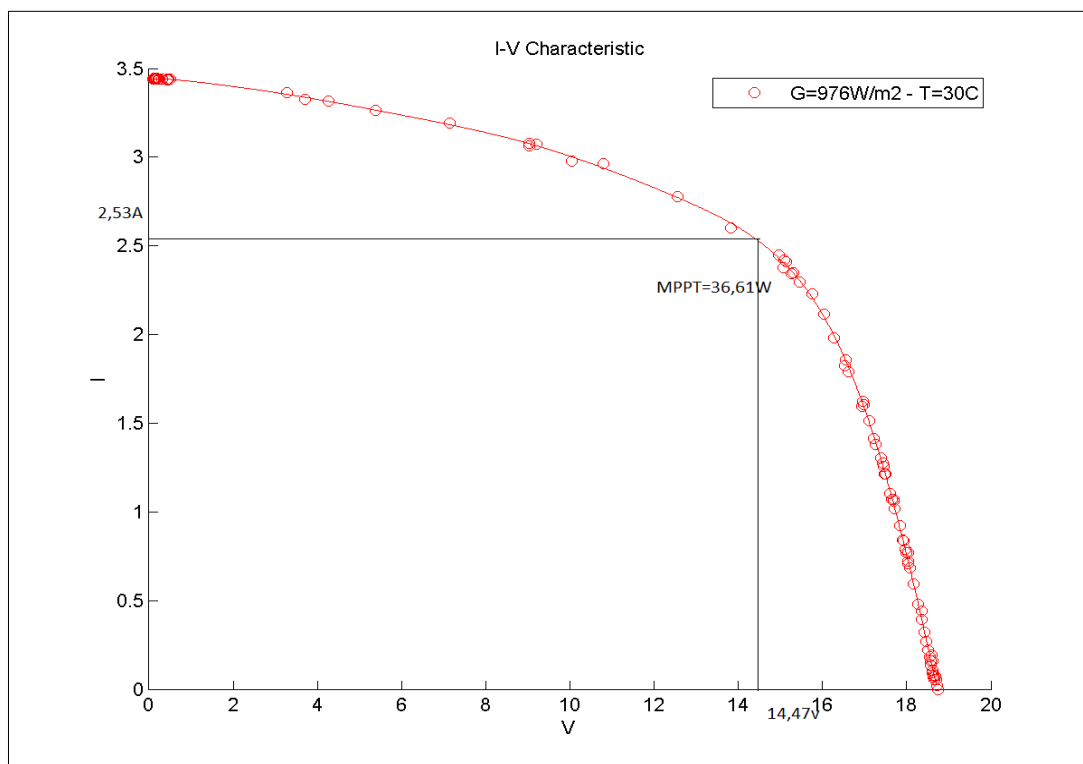
Σχήμα 4.4. Σύνδεση των ηλιακών κυττάρων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο που μελετάμε

4.2 Εισαγωγή στην επεξεργασία των μετρήσεων. Η καμπύλη I-V.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου που ενδιαφέρουν στην πράξη είναι κυρίως η τάση, το ρεύμα και η ισχύς. Ένας πρώτος τρόπος για να δούμε την συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου και καταπέκταση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι η καμπύλη τάσης ρεύματος. Για να χαράξουμε την καμπύλη αυτή πρέπει να ξεκινήσουμε από την τάση ανοιχτοκυκλώσεως και να καταλήξουμε στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Είναι απαραίτητη λοιπόν μια αντίσταση η οποία θα ξεκινήσει από άπειρη τιμή και θα μειώνεται σιγά σιγά ώσπου να πάρει μηδενική τιμή. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μια γενική εικόνα για το σημείο λειτουργίας και τη συμπεριφορά του κυττάρου/πλαίσιου που τροφοδοτεί κάποιο ωμικό φορτίο.

Κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί σε ένα σημείο λειτουργίας του συστήματος. Η ισχύς που αποδίδει το πλαίσιο για συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το σημείο καμπύλης που βρισκόμαστε. Το σημείο που η ισχύς αυτή είναι μέγιστη βρίσκεται θεωρητικά αλλά και γραφικά και σε όλες τις IV προσδιορίζεται εκεί που κάνει γόνατο η καμπύλη.

Ένα επίσης χαρακτηριστικό μέγεθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και κατ'επέκταση κυττάρων είναι ο παράγοντας πλήρωσης. Ως παράγοντας πλήρωσης ορίζεται (FF) ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος, προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως. Ο παράγοντας αυτός είναι ενδεικτικός για την αξιολόγηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων/πλαίσιων και ουσιαστικά είναι ο λόγος της πραγματικής ισχύος που αποδίδει το φωτοβολταϊκό προς τη θεωρητική ισχύ που θα μπορούσε να αποδώσει αν παίρναμε ως δεδομένα την τάση ανοιχτοκυκλώσεως και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.



Σχήμα 4.5. Χαρακτηριστική I-V του υπο μελέτη πολυκρυσταλλικού πλαισίου με χρήση plexi-glass χαραγμένη στις εξής περιβαλλοντικές συνθήκες: $G=976\text{W/m}^2$ - $T=30^\circ\text{C}$

Εξετάζοντας τη I-V του σχήματος παρατηρούμε ότι στη αρχή το ρεύμα μειώνεται αρκετά αργά έως ότου κάνει γόνατο η καμπύλη. Δηλαδή για τη μεταβολή της τάσης από 0 έως 14,47V έχουμε μεταβολή ρεύματος $3,48-2,53=0,95\text{A}$. Από εκεί και πέρα το ρεύμα μεταβάλλεται πολύ απότομα ενώ η τάση μεταβάλλεται σχετικά αργά σε σχέση με πριν. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κανονικά θα έπρεπε να υπάρχει ακόμα μικρότερη μεταβολή ρεύματος αλλά η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το φωτοβολταϊκό είναι φτιαγμένο από κυψέλες χαμηλού κόστους, οι οποίες κατά το τελικό έλεγχο ποιότητας στο εργοστάσιο παραγωγής τους κρίθηκαν ατελείς-με αρκετές προσμίξεις. Επομένως όπως φαίνεται και από το σχήμα η αντίσταση σειράς R_s είναι αρκετά μεγάλη και αυτό αποδεικνύεται από την κλίση της γραφικής παράστασης. Επιπλέον η παράλληλη αντίσταση είναι αρκετά μικρότερη απόσο θα πρέπει (οι κατασκευαστές επιδιώκουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη R_{sh} και όσο το δυνατόν μικρότερη R_s ώστε να επιτυγχάνονται λιγότερες απώλειες).

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΣΗΕ στο παλιό κτίριο των ηλεκτρολόγων. Η εκτέλεση των πειραμάτων περιελάμβανε μία μεταβλητή αντίσταση η οποία βρισκόταν σε σύνδεση με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και μεταβαλλόταν μειούμενη βαθμιαία με εύρος τιμών από 75Ω έως 0Ω . Ο λόγος χρησιμοποίησης της αντίστασης αυτής ήταν η ανάγκη μεταβολής της τάσης και της έντασης από το σημείο τάσης ανοιχτοκύκλωσης έως το σημείο ρεύματος βραχυκύκλωσης αντίστοιχα. Ακόμα πρέπει να τονιστεί ότι μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν η χειροκίνητη αλλαγή του φορτίου. Πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα που παρουσιαζόταν ήταν ότι με μικρές κινήσεις υπήρχε μεγάλη μεταβολή στα μετρούμενα μεγέθη. Και επειδή κοντά στο γόνατο οι αλλαγές ήταν ακόμα πιο απότομες χρειάστηκαν ιδιαίτερα επιδέξιες κινήσεις ώστε να καταγράψουμε ικανοποιητικό πλήθος σημείων στο τμήμα αυτό. Παρόλα αυτά όσο επιδέξιες και αν ήταν οι κινήσεις σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να αγνοήσουμε τα σφάλματα χειρισμών που υπεισέρχονται στις μετρήσεις. Τέλος, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια διαφορετικής κατασκευής. Όπως προαναφέρθηκε η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι στο ένα οι κυψέλες καλύφθηκαν με plexi-glass ενώ στο άλλο με γυαλί.

Στο σχήμα φαίνεται η μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των πειραμάτων.



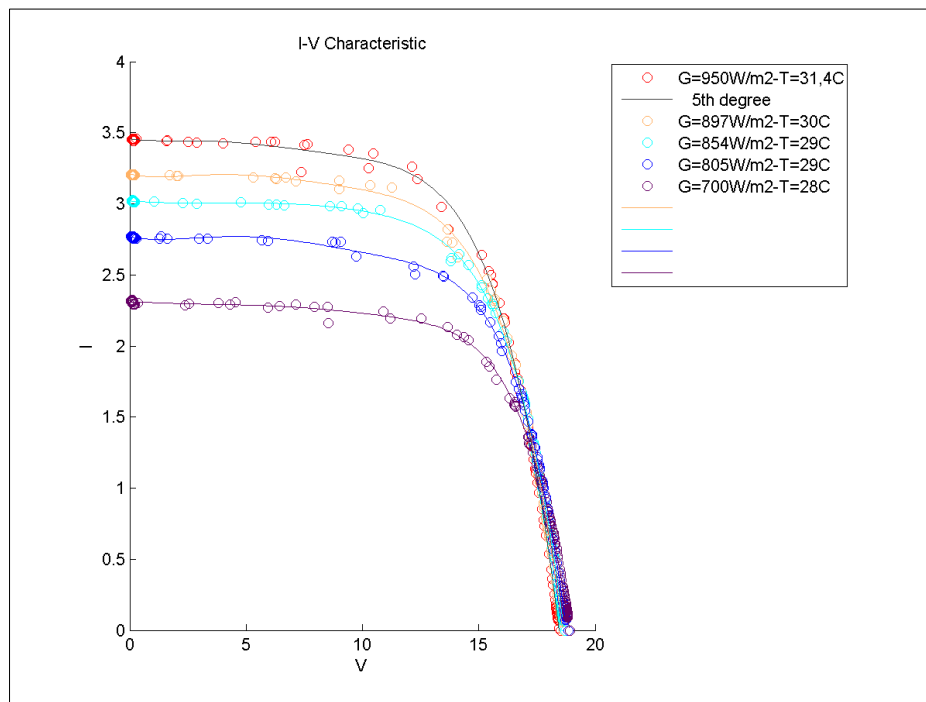
Σχήμα 4.7. Μεταβλητή αντίσταση 500W ισχύς και 150Ω συνολική αντίσταση

Στο σχήμα 4.6 φαίνονται τα φωτοβολταικά που κατασκευάστηκαν και οι μετεωρολογικοί αισθητήρες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Στο πάνω μέρος έχει τοποθετηθεί το φωτοβολταικό με χρήση plexi-glass και στο κάτω μέρος το φωτοβολταικό με χρήση γυαλιού.

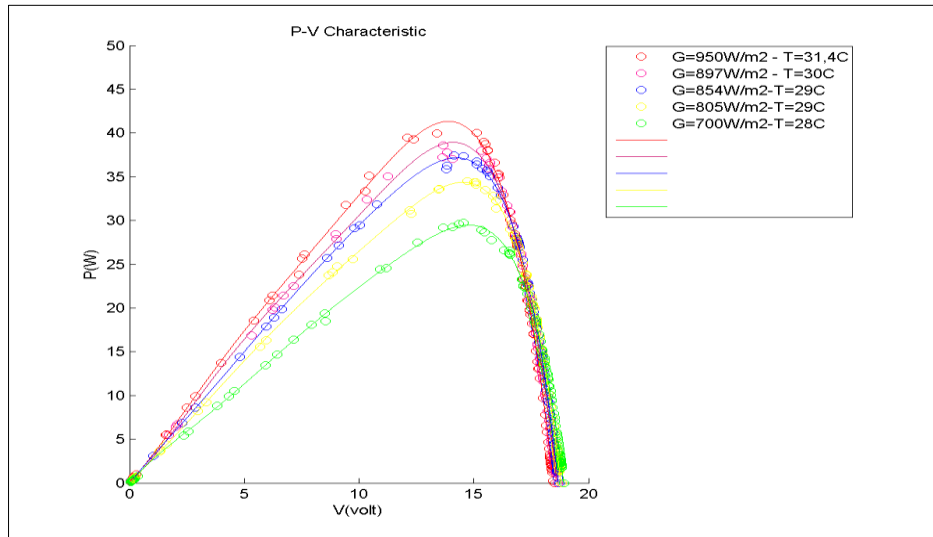


Σχήμα 4.6. Φωτοβολταικά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου στην οροφή του κτιρίου των Ηλεκτρολόγων

Παρακάτω φαίνεται πως επηρεάζει η ηλιοφάνεια τις χαρακτηριστικές I-V,P-V στο plexi-glass και στο γυαλί.



Σχήμα 4.8. Διαφορετικές I-V καμπύλες για διαφορετικές συνθήκες στο γυαλί στις 21/06/2011



Σχήμα 4.9. Χαρακτηριστική P-V για τις διαφορετικές συνθήκες στο γυαλί στις 21/06/2011

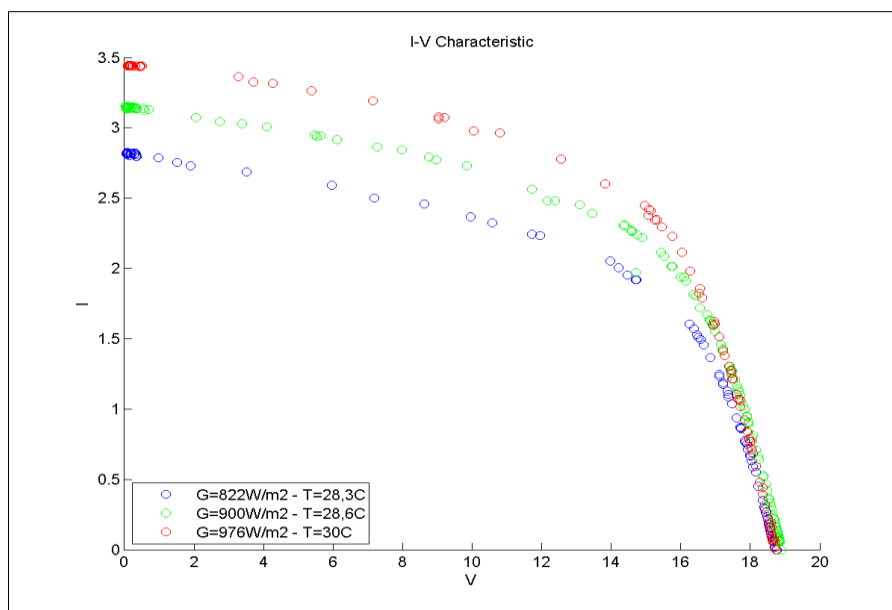
Καμπύλη Α: Ακτινοβολία $G=950\text{W/m}^2$, θερμοκρασία $T=31,4^\circ\text{C}$, Ημερομηνία μέτρησης 21/6/2011, Ώρα μέτρησης 12:56:26-12:58:17, Γωνία κλίσης 31°

Καμπύλη Β: Ακτινοβολία $G=897\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=30^\circ\text{C}$, Ημερομηνία μέτρησης 21/6/2011, Ώρα μέτρησης 11:54:38-11:56:33, Γωνία κλίσης 31°

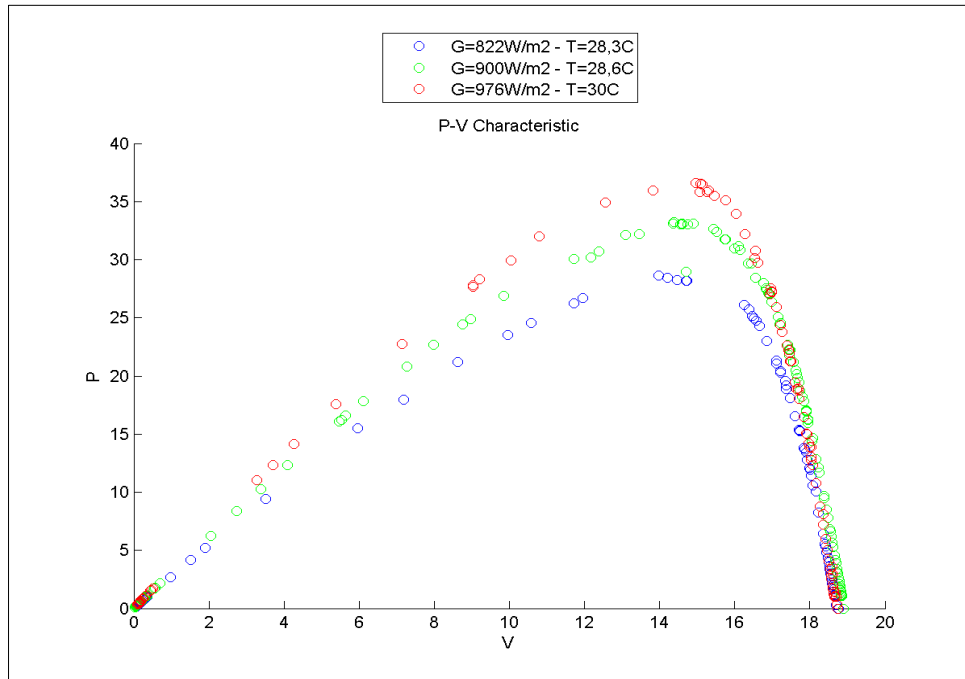
Καμπύλη Γ: Ακτινοβολία $G=854\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=29^\circ\text{C}$, Ημερομηνία 21/6/2011, Ώρες μέτρησης 11:28:52-11:30:56, Γωνία κλίσης 31°

Καμπύλη Δ: Ακτινοβολία $G=805\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=29^\circ\text{C}$, Ημερομηνία 21/6/2011, Ώρες μέτρησης 11:00:00-11:02:04, Γωνία κλίσης 31°

Καμπύλη Ε: Ακτινοβολία $G=700\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=28^\circ\text{C}$, Ημερομηνία 21/6/2011, Ώρες μέτρησης 10:17:42-10:19:55, Γωνία κλίσης 31°



Σχήμα 4.10. Διαφορετικές I-V καμπύλες για διαφορετικές συνθήκες στο plexi-glass στις 22/06/2011



Σχήμα 4.11. Διαφορετικές P-V καμπύλες για διαφορετικές συνθήκες στο plexi-glass στις 22/06/2011

Καμπύλη Α: Ακτινοβολία $G=822\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=28,3^\circ\text{C}$, Ημερομηνία μέτρησης 22/06/2011, Ώρα μέτρησης 10:52:07-10:53:49, Γωνία κλίσης 31°

Καμπύλη Β: Ακτινοβολία $G=900\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=28,6^\circ\text{C}$, Ημερομηνία μέτρησης 22/06/2011, Ώρα μέτρησης 11:33:25-11:35:38, Γωνία κλίσης 31°

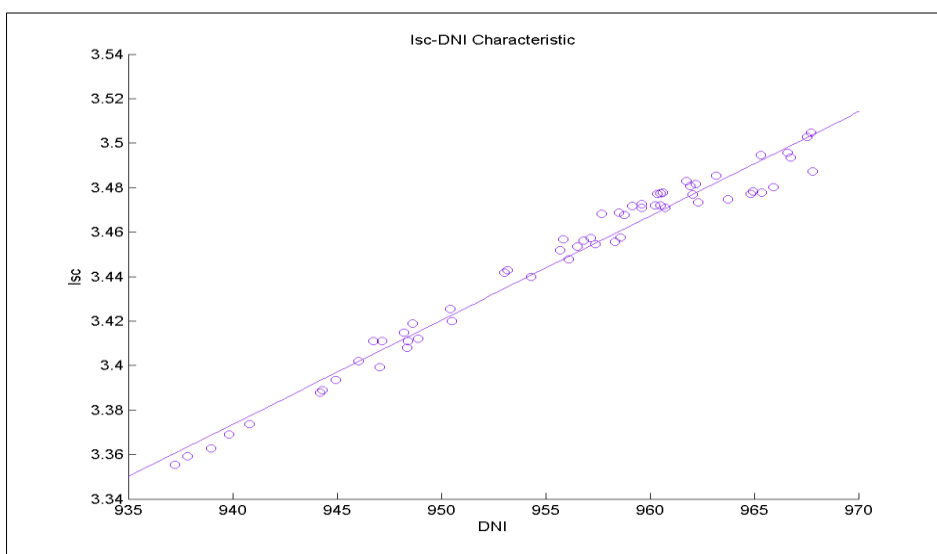
Καμπύλη Γ: Ακτινοβολία $G=976\text{W/m}^2$, Θερμοκρασία $T=30^\circ\text{C}$, Ημερομηνία μέτρησης 22/06/2011, Ώρα μέτρησης 13:03:05-11:04:25, Γωνία κλίσης 31°

Παρατηρώντας τα σχήματα βλέπουμε ότι το πλαίσιο συμπεριφέρεται ανάλογα με την ηλιοφάνεια. Όση λιγότερη ηλιοφάνεια έχουμε για την ίδια τάση το ρεύμα βραχυκυκλώσεως γίνεται πολύ μικρότερο. Για παράδειγμα στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με γυαλί για ένα φάσμα τιμών από 400W/m^2 μέχρι 950W/m^2 παρατηρούμε ελάττωση της τιμής του I_{sc} από 3,45 A σε 0,65 A. Αντιθέτως, όσον αφορά στην τάση ανοιχτοκυκλώματος V_{oc} οι διαφορές δεν είναι μεγάλες με εύρος 18,508V έως 18,95V αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή αν αναλογιστεί κανείς ότι η ακτινοβολία μίκρυνε κατά 60% περίπου.

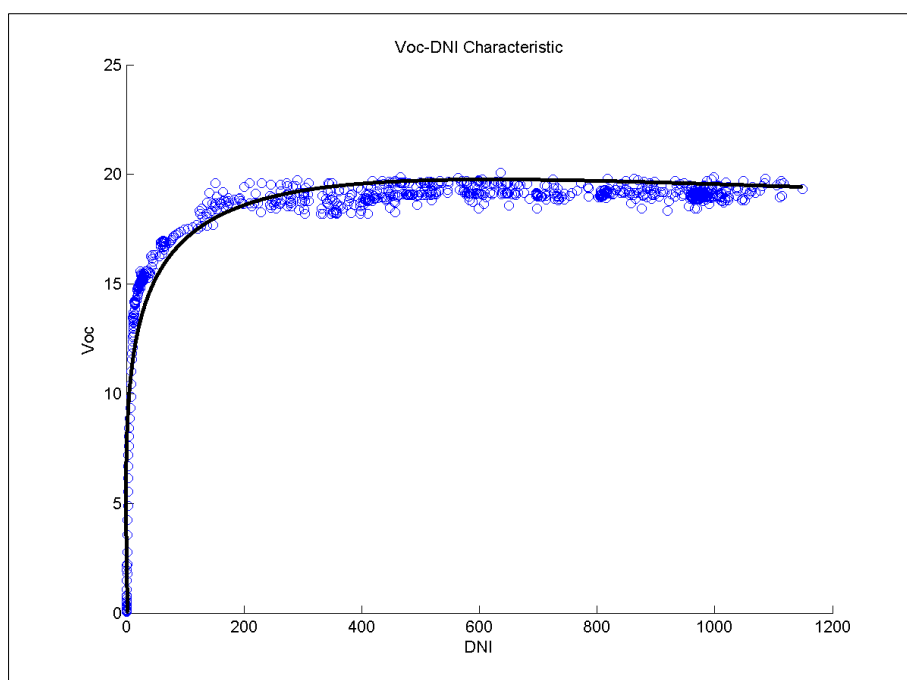
Ακτινοβολία (W/m^2)	Θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$)	Μέγιστη Ισχύς (Watt)	Μέγιστη Τάση (V)	Τάση ανοιχτοκύκλωσης (V)	Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)
700	28	29,5	14,9	18,934	2,31
805	29	34,4	14,7	18,84	2,77
854	29	37,2	14,4	18,713	3,02
897	30	38,3	14,3	18,6	3,205
950	31,4	41,1	14,4	18,508	3,45
822	28,3	28,66	13,96	18,763	2,815
900	28,6	33	14,6	18,896	3,153
976	30	36,62	14,95	18,736	3,44

Οι καμπύλες του σχήματος επελέγησαν έτσι ώστε να φανεί αισθητά η λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου υπο πραγματικές συνθήκες. Γενικά στην πράξη είναι δύσκολο να απομονωθεί ένας παράγοντας από αυτούς που επηρεάζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κυττάρων του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά και όλων των ηλιακών κυττάρων. Έτσι από τα σχήματα 4.8-4.11 παίρνουμε μια γενική εικόνα για το πόσο διαφορετική είναι η συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών κατά την αλλαγή των συνθηκών.

Για άλλη μία φορά, αξιοσημείωτη είναι η γραμμική μεταβολή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, ενώ η τάση ανοιχτοκυκλώσεως αντιδρά πολύ λιγότερο στις μεταβολές της ηλιοφάνειας. Βλέπουμε συνεπώς πόσο σταθερή τάση παρέχουν τα φωτοβολταϊκά γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για κάποιες εφαρμογές ακόμα και χωρίς την χρήση μπαταριών.



Σχήμα 4.12. Εξάρτηση του I_{sc} από την ακτινοβολία DNI με σταθερή θερμοκρασία $T=35^{\circ}\text{C}$ στις 23/06/2011



Σχήμα 4.13. Χαρακτηριστική V_{oc} -DNI για θερμοκρασία με εύρος $T=20-28,5^{\circ}\text{C}$ στις 24/06/2011

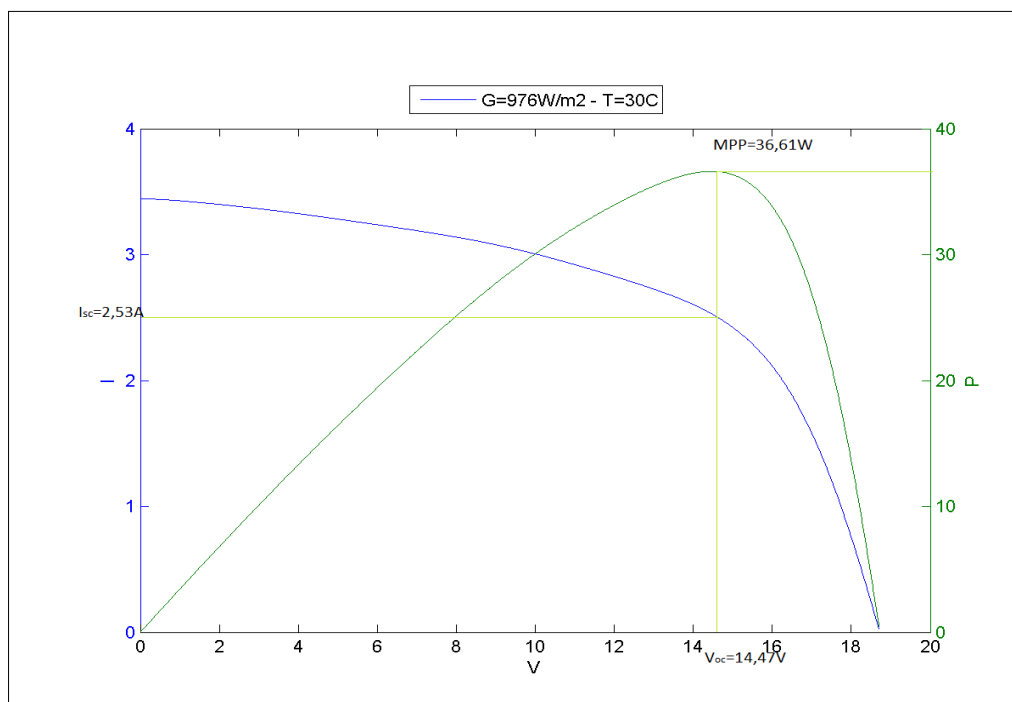
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα επηρεάζονται από ένα σύνολο παραγόντων. Όταν μιλάμε για ένα συγκεκριμένο είδος(στη συγκεκριμένη περίπτωση κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου) και ακόμα περισσότερο για ένα συγκεκριμένο κατασκευαστή, τότε τα κύτταρα πλαίσια επηρεάζονται κυρίως από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Στη συνέχεια αποδεικνύεται ότι η κύρια και ουσιαστικότερη μεταβολή των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων για μία συγκεκριμένη κλίση των πλαισίων οφείλεται στη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιοφάνειας.

4.3 Μελέτη της αποδιδόμενης ισχύος

Μπορεί η τάση των φωτοβολταϊκών κυττάρων να μένει σχετικά σταθερή κατά τις μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, όμως δεν είναι αυτό που κυρίως μας ενδιαφέρει. Μάλιστα, την τάση μπορούμε να την ανυψώσουμε ή να την μειώσουμε στην επιθυμητή τιμή μέσω μετατροπέων συνεχούς ρεύματος. Επίσης με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος είναι δυνατό να την κάνουμε εναλλασσόμενη καθορίζοντας της και τη συχνότητα.

Αντιθέτως, την ισχύ που αποδίδει ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο και κατ'επέκταση ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, δεν είναι δυνατό να την καθορίσουμε. Η ισχύς αυτή είναι δεδομένη και εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων.

Αρχικά, όπως γνωρίζουμε, εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας συστήματος. Έτσι για κάθε σημείο της IV καμπύλης έχουμε και διαφορετική τιμή ισχύος. Ένας πολύ ενδιαφέρον τρόπος να δούμε την εξάρτηση αυτή είναι να κάνουμε το διάγραμμα τάσης ισχύος.



Σχήμα 4.14. Χαρακτηριστικές I-V,P-V για το φωτοβολταϊκό με χρήση plexi-glass

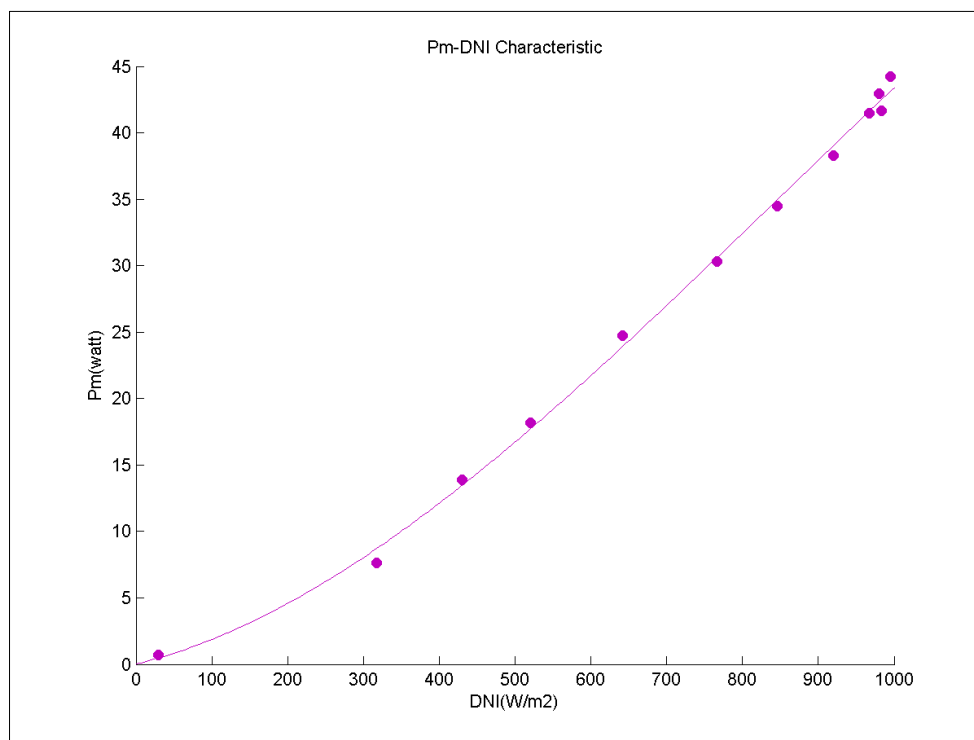
Στο σχήμα φαίνεται καθαρά, η εξάρτηση της ισχύος από το σημείο λειτουργίας. Η ισχύς αυξάνεται όσο αυξάνεται η τάση λειτουργίας μέχρι το σημείο που κάνει το γόνατο η καμπύλη IV. Από εκεί και έπειτα πέφτει ώσπου να φτάσει τη μηδενική τιμή.

4.3.1 Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ισχύ

4.3.1.1 Ακτινοβολία

Η ισχύς είναι ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο ηλεκτρικό μέγεθος των φωτοβολταϊκών όχι μόνο επειδή μεταβάλλεται σημαντικά μόλις αλλάξει έστω και ένας παράγοντας, αλλά και επειδή στην πλειονότητα των εφαρμογών είναι το ζητούμενο μέγεθος. Ας δούμε, λοιπόν την εξάρτηση της από τους διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Αρχικά, όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, η αποδιδόμενη ισχύς είναι ευθέως ανάλογη αυτής. Αυτό φαίνεται καθαρά από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.15. Εξάρτηση της μέγιστης ισχύος του πλαισίου με γυαλί από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε θερμοκρασία με μέσο όρο $T=30^{\circ}\text{C}$

Παρατήρηση

Μελετώντας τη σχέση ανάμεσα στη μέγιστη ισχύ και την ακτινοβολία προκύπτει ότι το πολυκρυσταλλικό πλαίσιο με γυαλί το οποίο βρίσκεται σε κλίση 30° , ικανοποιεί την εξίσωση:

$$P_m = -1,9 \cdot 10^{-8} \cdot \text{DNI}^3 + 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot \text{DNI}^2 + 0,014 \cdot \text{DNI} + 0,028$$

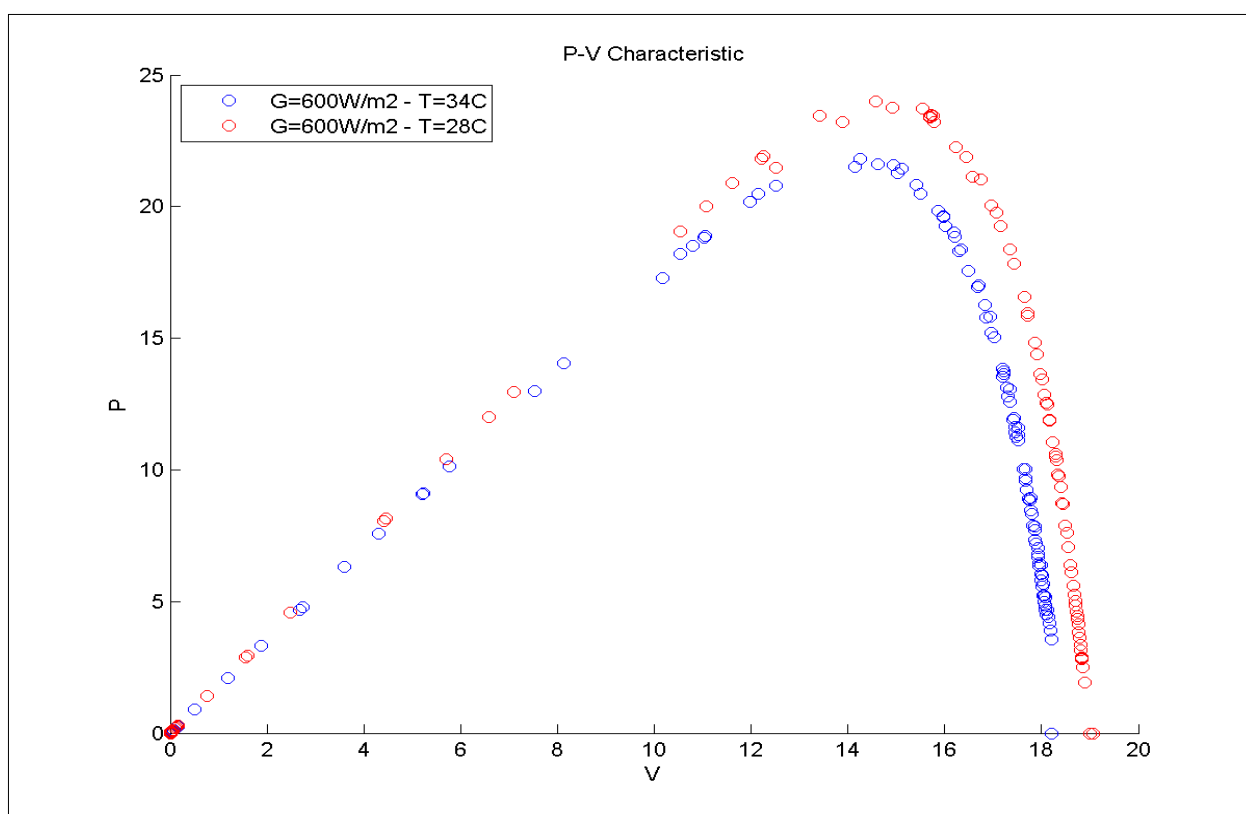
Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η εξίσωση αυτή επαληθεύει σε ένα μεγάλο βαθμό και τα υπόλοιπα πειραματικά δεδομένα. Γενικά στο μεγαλύτερο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας η απόκλιση πειράματος θεωρίας είναι της τάξης εκατοστών του Watt.

4.3.1.2 Θερμοκρασία

Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας, οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες όπως στην περίπτωση της ακτινοβολίας. Σε καμιά περίπτωση, όμως, δεν μπορούμε να την αγνοήσουμε.

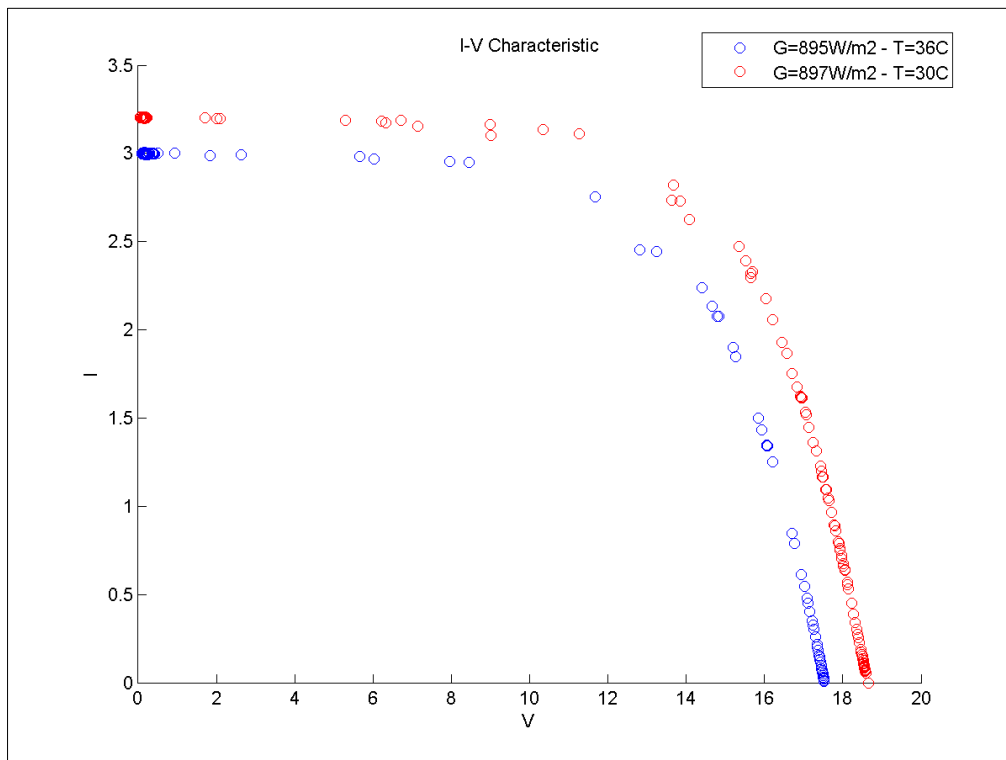
Για να επιβεβαιωθεί αυτή η επίδραση, πρέπει να συγκριθούν πειραματικές τιμές με όμοια ακτινοβολία, αλλά διαφορετική θερμοκρασία πλαισίου. Προκειμένου, να κατασκευαστεί γράφημα έπρεπε να γίνουν πειράματα καθόλη τη διάρκεια του έτους έτσι ώστε να υπάρχουν μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες σε ίδιες τιμές ακτινοβολίας. Επειδή αυτό δεν ήταν εφικτό περιοριζόμαστε να πούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας για ίδια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας η ισχύς που αποδίδει το φωτοβολταϊκό μειώνεται αισθητά. Αυτό φαίνεται από τα παρακάτω P-V διάγραμμα .

Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η καμπύλη P-V στο πλαίσιο που έγινε χρήση γυαλιού για την ίδια ακτινοβολία $G=600\text{W/m}^2$ και διαφορετικές θερμοκρασίες.

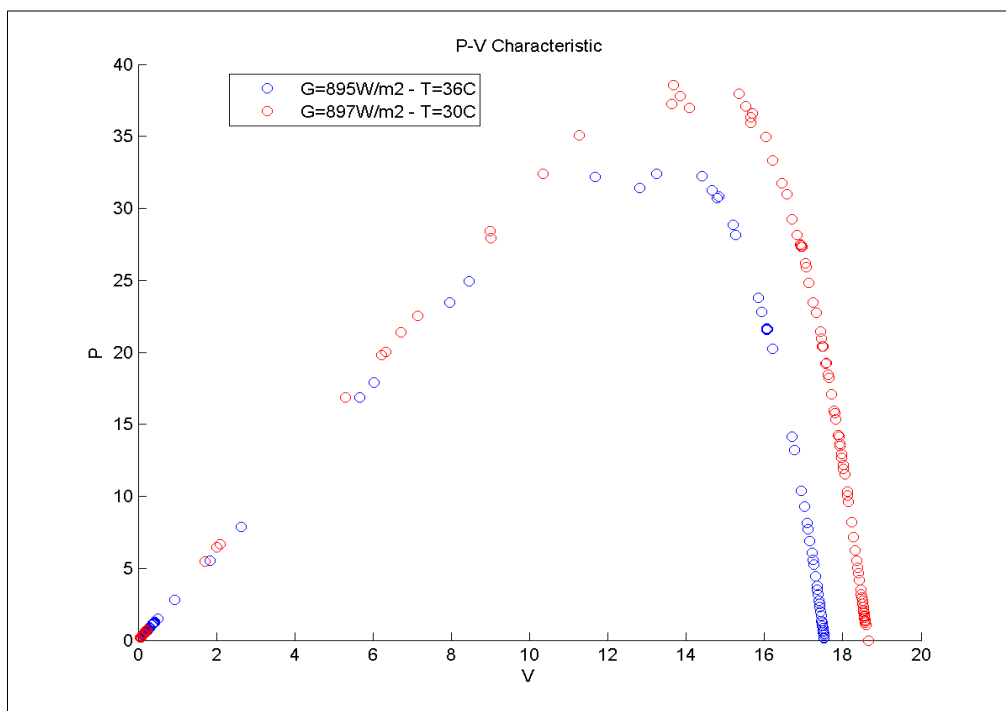


Σχήμα 4.16. Καμπύλες P-V στο φ/β πλαίσιο με γυαλί στις 20/06/2011

Αντίστοιχα μελετάται και η καμπύλη ισχύος στο πλαίσιο που έγινε χρήση plexi-glass για ακτινοβολία $G=895\text{W/m}^2$ και $G=897\text{W/m}^2$ διαφορετικές θερμοκρασίες. Να σημειωθεί ότι το plexi glass λόγω των αυξομειώσεων της θερμοκρασίας και κατεπέκταση της συστολής και διαστολής του υπέστη παραμόρφωση. Αυτό είχε σαν άμεση συνέπεια να μην απορροφάει αρκετό μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τελικά να αποδίδει λιγότερη ισχύ.



Σχήμα 4.17. I-V διάγραμμα για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με plexi-glass στις 22/06/2011



Σχήμα 4.18. P-V διάγραμμα για τις ίδιες συνθήκες με το προηγούμενο σχήμα στις 22/06/2011

Τα χαρακτηριστικά των σχημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα όπου και φαίνεται καλύτερα η σύγκριση.

Θερμοκρασία °C	P_{max} Watt	V_{max} Volt	V_{oc} Volt	I_{sc} Ampere	Ακτινοβολία Watt/m ²
34	21,7	14,5	19,062	1,85	600
28	23,8	15,1	18,2	1,77	600
36	32,8	13,7	17,528	3	895
30	38,3	14,3	18,6	3,205	897

Από τα σχήματα και από τον πίνακα προκύπτει ότι για μία μεταβολή της θερμοκρασίας του πλαισίου κατά $36-30=6^{\circ}\text{C}$ έχουμε μεταβολή της τάσης ανοιχτοκυκλώματος $18,6-17,528=1,072\text{Volt}$. Δηλαδή η V_{oc} μειώνεται κατά $0,17\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Αντίστοιχα το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αυξήθηκε κατά $3,205-3=0,205\text{ A}$ δηλαδή κατά 34mA ανα $^{\circ}\text{C}$. Τέλος για τη μέγιστη ισχύ σημειώθηκε μείωση $38,3-32,8=5,5\text{W}$ άρα $0,91\text{W}/^{\circ}\text{C}$ που σημαίνει $2,3\%$ πτώση ανα $^{\circ}\text{C}$. Η μείωση αυτή είναι αρκετά μεγάλη αν σκεφτούμε ότι στα εμπορικά φωτοβολταϊκά η αντίστοιχη μείωση περιορίζεται στο πολύ στο 1% . Η μείωση αυτή ήταν αναμενόμενη για το λόγο ότι η κυψέλες με τις οποίες κατασκευάστηκε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιείχαν αρκετές προσμίξεις άρα και μεγαλύτερες απώλειες κατά τη λειτουργία τους.

Ακόμα αξίζει να αναφερθεί ότι η ανάγκη για ακόμα καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει οδηγήσει στη χρησιμοποίηση μιας νέας τεχνολογίας που είναι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα συστήματα αυτά εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που απορροφάται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και τη διοχετεύουν για τη θέρμανση νερού. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται δύο πράγματα ταυτόχρονα. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ψύχεται καλύτερα, με αποτέλεσμα να αποδίδει περισσότερο σε ηλεκτρική ισχύ, αλλά και διοχετεύοντας κρύο νερό, πετυχαίνουμε κάτι ανάλογο με τη λειτουργία του ηλιακού θερμοσίφωνα.

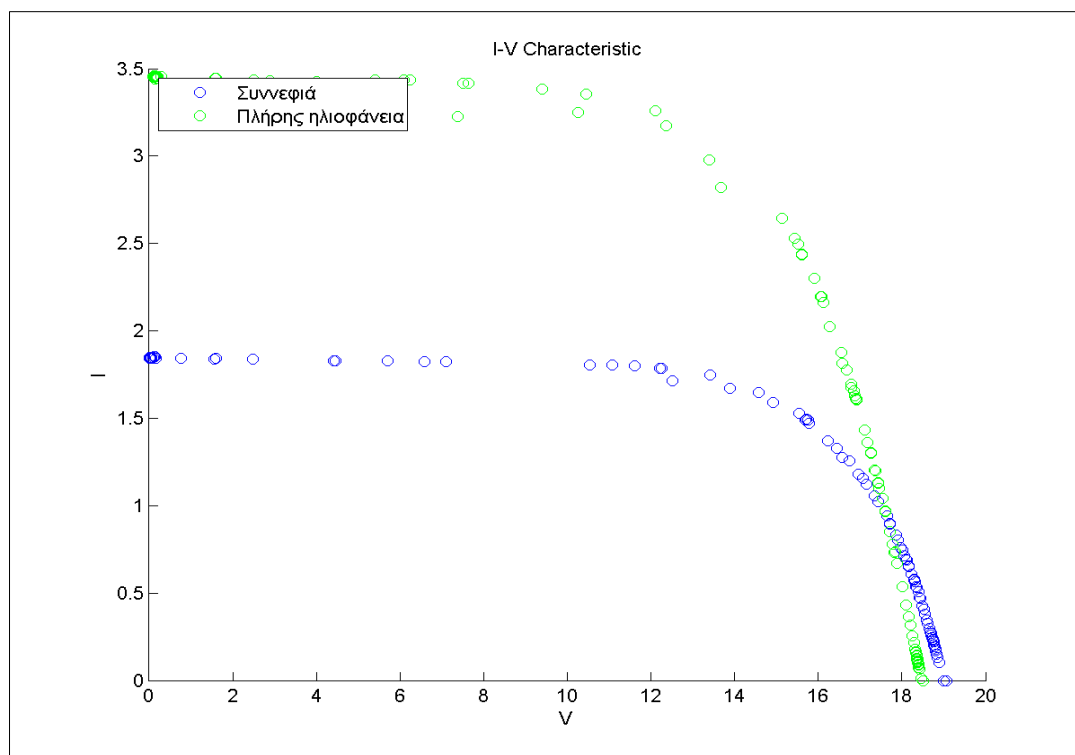
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι μιλώντας για θερμοκρασία αναφερόμασταν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και όχι στη θερμοκρασία του πλαισίου. Βέβαια, η μία δεν διαφέρει πολύ από την άλλη. Είναι γνωστό ότι τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά εκ κατασκευής έχουν χρώμα γκρι. Το μπλέ χρώμα που βλέπουμε είναι εξαιτίας της ειδικής επίστρωσης που μπαίνει ώστε το υλικό να απορροφά περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και να ανακλά λιγότερο. Πάνω ακριβώς από τη συστοιχία κυττάρων και καθαρά για λόγους προστασίας και μηχανικής αντοχής τοποθετείται ένα διαφανές τζάμι. Το γυαλί αυτό είναι ειδικά κατασκευασμένο ώστε να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο διαφανές και να ανακλά όσο το δυνατόν λιγότερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται ένα είδος φαινομένου του θερμοκηπίου το οποίο αυξάνει τη θερμοκρασία των κυττάρων. Επομένως, τα κύτταρα καταλήγουν να έχουν περι τους 20°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ακόμα ανάμεσα στα κύτταρα του ίδιου πλαισίου εμφανίζονται μεταβολές στη θερμοκρασία. Οι διαφορές στη θέρμανση των κυττάρων οδηγούν και σε διαφορετική γήρανση, γεγονός που επηρεάζει ολόκληρο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

4.4 Συνθήκες Συννεφιάς

Ένα σημείο που πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερος στη περίπτωση που αναφερόμαστε σε πραγματικές συνθήκες είναι η περίπτωση της συννεφιάς. Ειδικότερα στους υπολογισμούς της απαιτούμενης

προς εγκατάστασης ισχύος πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο παράγοντας αυτός γιατί αλλάζει και πολύ την αποδιδόμενη ισχύ των πλαισίων.

Το σχήμα δείχνει χαρακτηριστικά τις διαφορές μεταξύ μιας μέτρησης υπο συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας και συνθήκες συννεφιάς για μία συγκεκριμένη ημέρα και ώρα του Ιούνη. Για να το πετύχουμε αυτό έπρεπε να περιμένουμε ώστε οι μετρήσεις να γίνουν σε μία ημέρα με αρκετή συννεφιά.



Σχήμα 4.19. Χαρακτηριστική I-V για συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας-συννεφιάς στις 21/06/2011

4.5 Περίπτωση σκίασης. Φαινόμενο θερμής κηλίδας

Όλες οι θεωρητικές και πειραματικές μελέτες, αλλά και οι έρευνες στον τομέα των φωτοβολταϊκών γίνονται με σκοπό την βέλτιστη πρακτική εφαρμογή. Γι αυτό θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα παρακάτω προβλήματα.

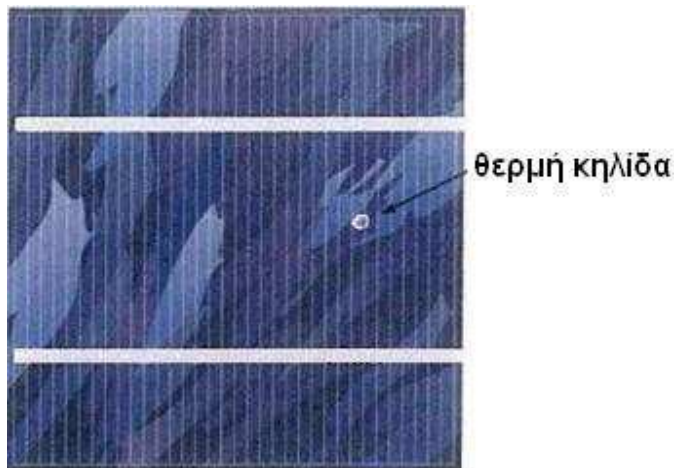
- Το πρόβλημα της σκόνης. Γι αυτό και κατά τη συντήρηση μιας εγκατάστασης τα πλαίσια πρέπει να καθαρίζονται τακτικά ώστε να μπορεί να διεισδύσει το φως.
- Το ενδεχόμενο σπασίματος κάποιου πλαισίου
- Η περίπτωση να φυτρώσει κάποιο δέντρο μετά την εγκατάσταση των φ/β και να σκιάζει τα φ/β
- Η περίπτωση μερικής σκίασης ενός πλαισίου από διάφορα αντικείμενα π.χ. από κάποιο φύλλο

Η περίπτωση της μερικής σκίασης, μικρής ή μεγάλης, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Γνωρίζουμε ότι το φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι ουσιαστικά μία p-n επαφή.

Όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος σε κλειστό κύκλωμα. Αν συνδέσουμε σε σειρά πολλά τέτοια κύτταρα, οι τάσεις στα κύτταρά τους αθροίζονται και συμπεριφέρονται σαν ενιαία πηγή. Όταν, όμως, ένα από αυτά σκιάζεται, τότε αυτό δεν συμπεριφέρεται σαν πηγή, αλλά απλά σαν μία δίοδος που είναι πολωμένη ανάστροφα αφού η συνολική τάση των υπόλοιπων κυττάρων εφαρμόζεται πάνω της με ανάποδη φορά. Το σκιασμένο ηλιακό κύτταρο με τη σειρά του δημιουργεί μη αγωγίμο δρόμο κι εμποδίζει τη ροή του ρεύματος. Άρα η συνολική συμπεριφορά του πλαισίου καθορίζεται από αυτό το συγκεκριμένο κύτταρο.

Η τάση διάσπασης ενός κυττάρου πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 150V όταν φωτίζεται επαρκώς. Υπό συνθήκες σκίασης, όμως, η ανάστροφη τάση που μπορεί να αντέξει είναι μόνο 20V περίπου. Άρα ένα ηλιακό κύτταρο σκιάζεται και δέχεται ανάστροφα τη συνολική τάση από τα υπόλοιπα (21V) είναι δυνατόν να καταρεύσει η p-n επαφή και να δημιουργηθεί το φαινόμενο zener. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού είναι δυνατόν να περάσει ρεύμα κατά την ανάστροφη φορά και με μικρή αύξηση της τάσης (αφου έχουμε ξεπεράσει την τάση διάσπασης) να διέλθει μεγάλο ρεύμα. Το ανάστροφο αυτό ρεύμα, αυξάνει τη θερμοκρασία του κυττάρου και μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας.



Σχήμα 4.20. Ηλιακό κύτταρο με θερμή κηλίδα

Συχνά το φαινόμενο της θερμής κηλίδας μπορεί να οδηγήσει στην πλήρη καταστροφή του φ/β πλαισίου, το οποίο σπάει από υπερθέρμανση.



Σχήμα 4.21. Σπασμένο πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου λόγω υπερθέρμανσης

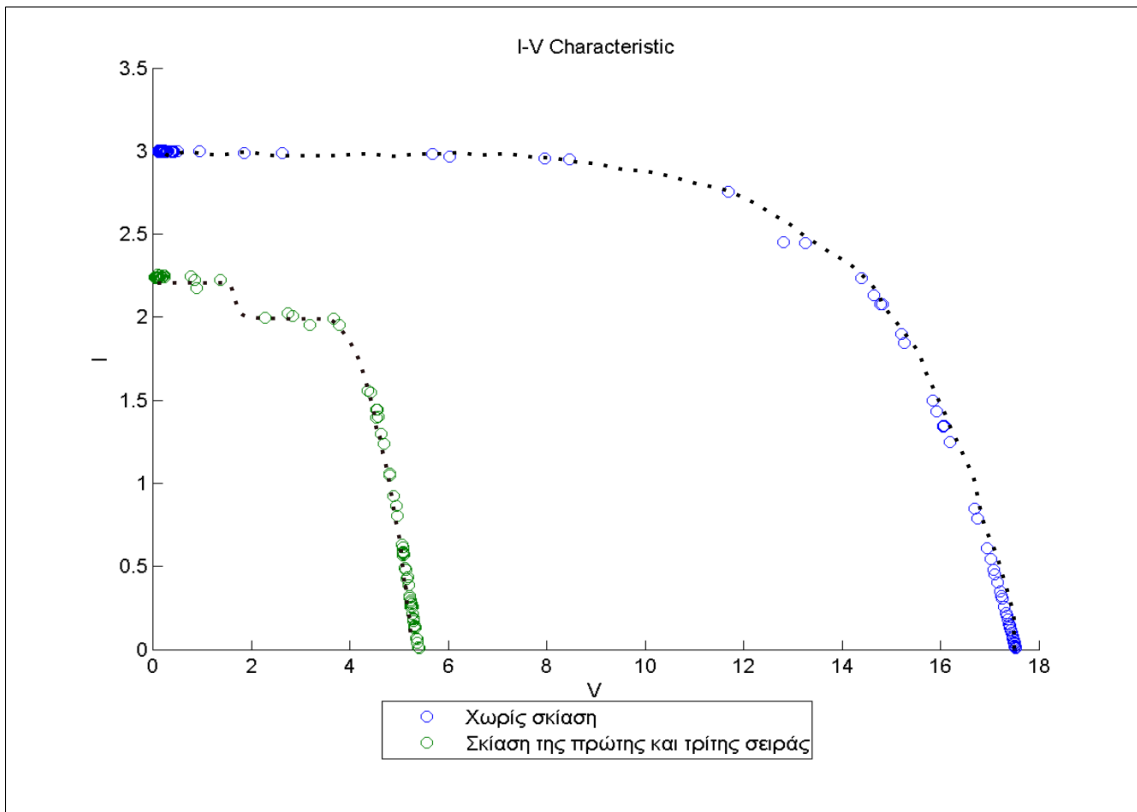
Να σημειωθεί εδώ ότι με ένα περιστατικό δεν καταστρέφεται η ηλιακή κυψέλη. Η σταδιακή, μερική σκίαση του πλαισίου είναι δυνατόν να οδηγήσει στο φαινόμενο θερμής κηλίδας. Για το λόγο αυτό, παράλληλα με το κύτταρο μπορεί να τοποθετηθεί μία διάδος παράκαμψης, ώστε να υπάρχει αγωγίμος δρόμος στην περίπτωση μερικής σκίασης. Η διάδος αυτή χρησιμεύει και στη προστασία των ηλιακών κυττάρων, αλλά και στην καλύτερη συνολική συμπεριφορά του πλαισίου σε τέτοιες συνθήκες.

Η καλύτερη λύση θα ήταν κάθε ηλιακό κύτταρο να έχει τη δική του διάοδο παράκαμψης, ώστε να μην περιορίζει το ρεύμα όλου του πλαισίου. Στην πράξη όμως οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν μία διάοδο για αρκετά ηλιακά κύτταρα. Στα πλαίσια των 36 κυττάρων όπως αυτό που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκαν τρεις διάοδοι συνολικά. Αυτές μπαίνουν στο κουτί πίσω από το πλαίσιο και συνδέονται με τους ακροδέκτες του πλαισίου. Με αυτό τον τρόπο είναι προσβάσιμες σε περίπτωση συντήρησης ή αλλαγής τους.

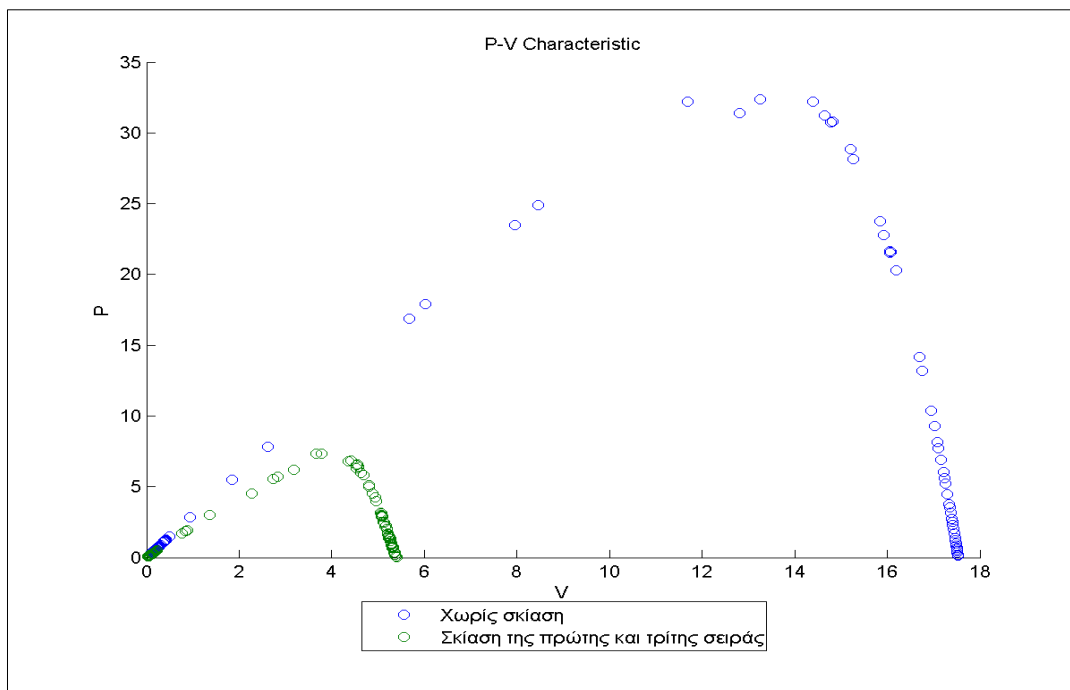


Σχήμα 4.22. Δίοδοι διέλευσης στο φωτοβολταϊκό με γυαλί στην οροφή του κτιρίου των Ηλεκτρολόγων

Για τη πειραματική μελέτη της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μελετήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις τυχαίας σκίασης. Σε μία από αυτές φαίνεται η ενεργοποίηση των διόδων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στο παράδειγμα σκιάστηκαν η πρώτη και η τρίτη σειρά



Σχήμα 4.23. Χαρακτηριστική I-V χωρίς σκίαση και σκίαση της πρώτης και της τρίτης σειράς



Σχήμα 4.24. Χαρακτηριστική P-V για την περίπτωση μερικής σκίασης.

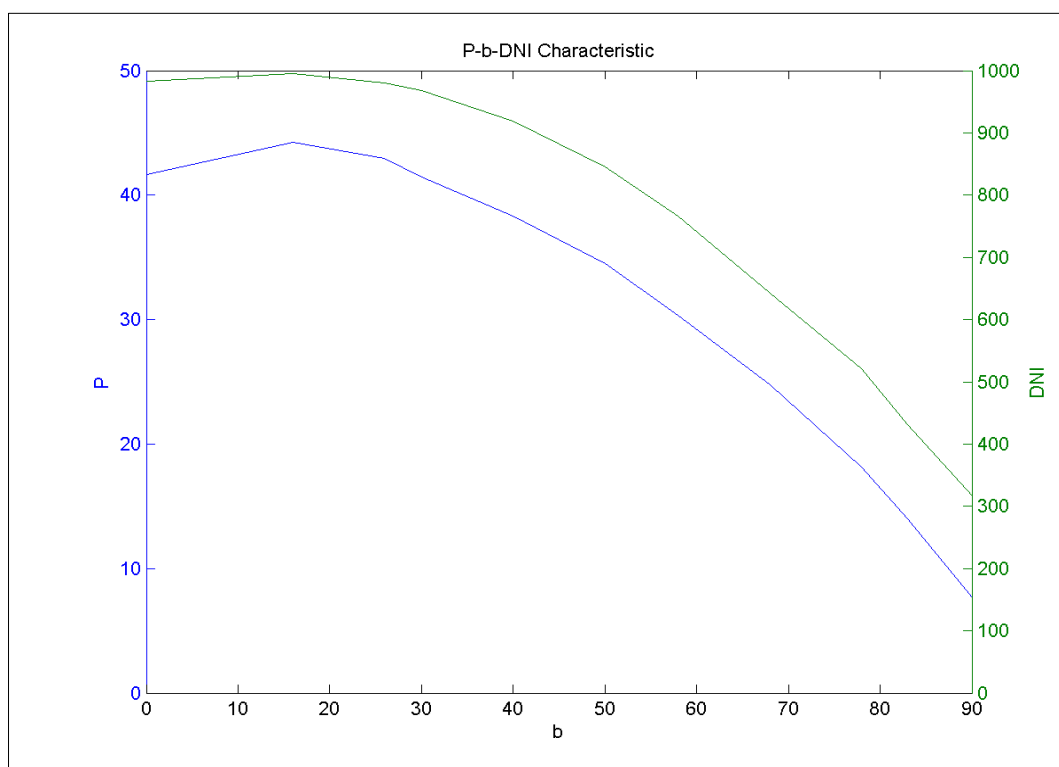
Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο φωτοβολταϊκό με γυαλί σε ακτινοβολία $G=895\text{W/m}^2$, θερμοκρασία $T=36^\circ\text{C}$, κλίση 31° , ημερομηνία 20/06/2011 και ώρα μεταξύ 14:38:00-15:00:00.

Φαίνεται καθαρά η ελάττωση των τιμών των χαρακτηριστικών, ηλεκτρικών μεγεθών του πλαισίου. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτοκύκλωσης και η μέγιστη ισχύς μειώθηκαν κατά πολύ. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κύτταρα που σκιάστηκαν έθεσαν σε λειτουργία της δύο από τις τρεις διόδους.

4.6 Γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Κατά τη μελέτη μιας πραγματικής εγκατάστασης, ζητούμενο είναι να έχουμε όσο το δυνατόν περισσότερη προσπίπτουσα πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας στη επιφάνεια του πλαισίου. Αυτή εξαρτάται άμεσα από τη γωνία κλίσης μεταξύ της επιφάνειας του πλαισίου και του οριζόντιου επιπέδου. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητο να μελετήσουμε πως συμπεριφέρεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε διαφορετικές γωνίες κλίσης. Προκειμένου, βέβαια το πλαίσιο να κοιτάζει προς τον ήλιο πρέπει να έχει κατεύθυνση προς το νότο αν βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο και προς το βορά αν βρισκόμαστε στο νότιο.

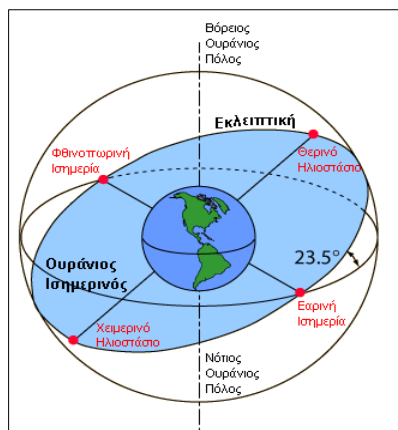
Αρχικά παρουσιάζεται η μεταβολή των ηλεκτρικών μεγεθών του πλαισίου για γωνίες από 0° έως 90° . Είναι απαραίτητο να μελετηθούν όλες οι γωνίες γιατί σε πραγματικές εγκαταστάσεις μπορούμε να έχουμε φωτοβολταϊκά τοποθετημένα σε οροφές με μικρή κλίση($\beta=0^\circ$) αλλά και κατακόρυφα σε τοίχους κτιρίων($\beta=90^\circ$).



Σχήμα 4.25. Διάγραμμα ισχύος και ακτινοβολίας συναρτήση της γωνίας κλίσης. Μετρήσεις που έγιναν στις 22/06/2011 μεταξύ 13:32:00-2:43:54 θερμοκρασία $T=30^\circ\text{C}$

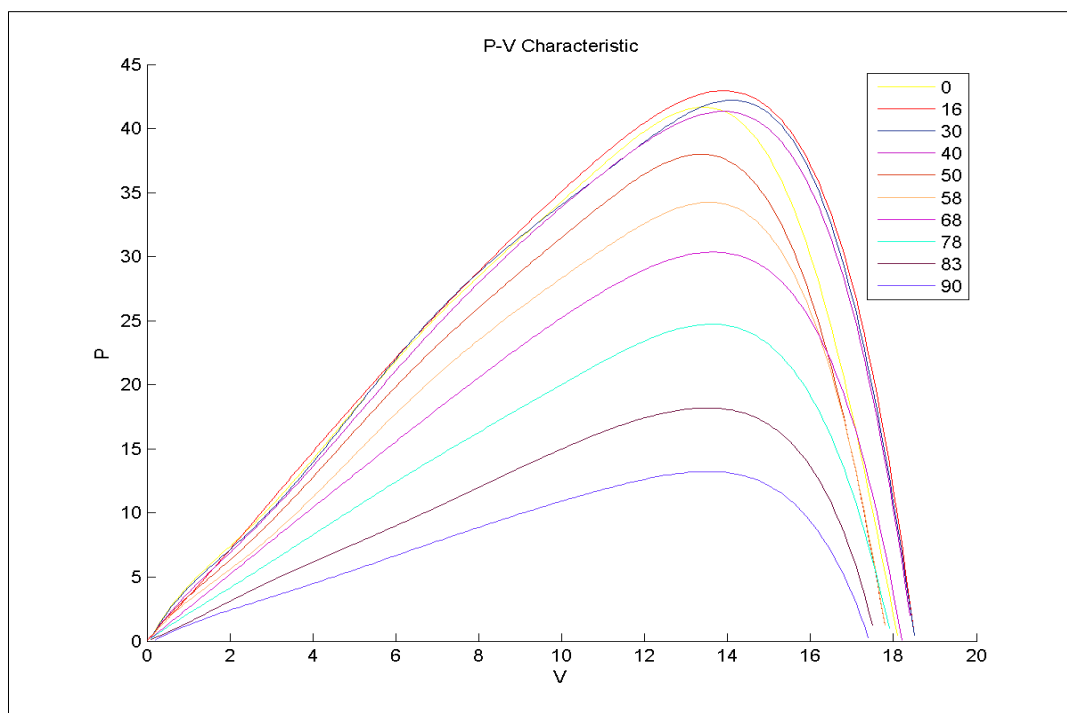
Είναι φανερό ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης του πλαισίου είναι περίπου 16° όπου επιτυγχάνεται μέγιστη ισχύς $P_m=44,37W$ σε ακτινοβολία $DNI=994W/m^2$. Είναι γνωστό ότι η βέλτιστη κλίση κατά τους θερινούς μήνες είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος μειωμένο κατά 15 έως 20 μοίρες. Στην Αθήνα το γεωγραφικό πλάτος είναι 37 μοίρες άρα $\beta=16^\circ$ είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Ακόμα να σημειωθεί ότι τη χρονιά που πραγματοποιήθηκε το πείραμα (22/06/2011) το θερινό ηλιοστάσιο-η μεγαλύτερη μέρα του χρόνου ήταν στις 21/6/2011. Αυτό σημαίνει ότι ο άξονας περιστροφής του πλανήτη μας είχε $23,5^\circ 27'$ (ενώ στο χειμερινό ηλιοστάσιο έχει $-23,5^\circ 27'$). Άρα η κλίση του φωτοβολταϊκού $\beta=16^\circ$ είναι η μικρότερη δυνατή κλίση που θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τα φωτοβολταϊκά ώστε να αυτά να αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ τους καλοκαιρινούς μήνες. Στην εικόνα φαίνεται η διάταξη ήλιου γης για να γίνει πιο κατανοητό το φαινόμενο.

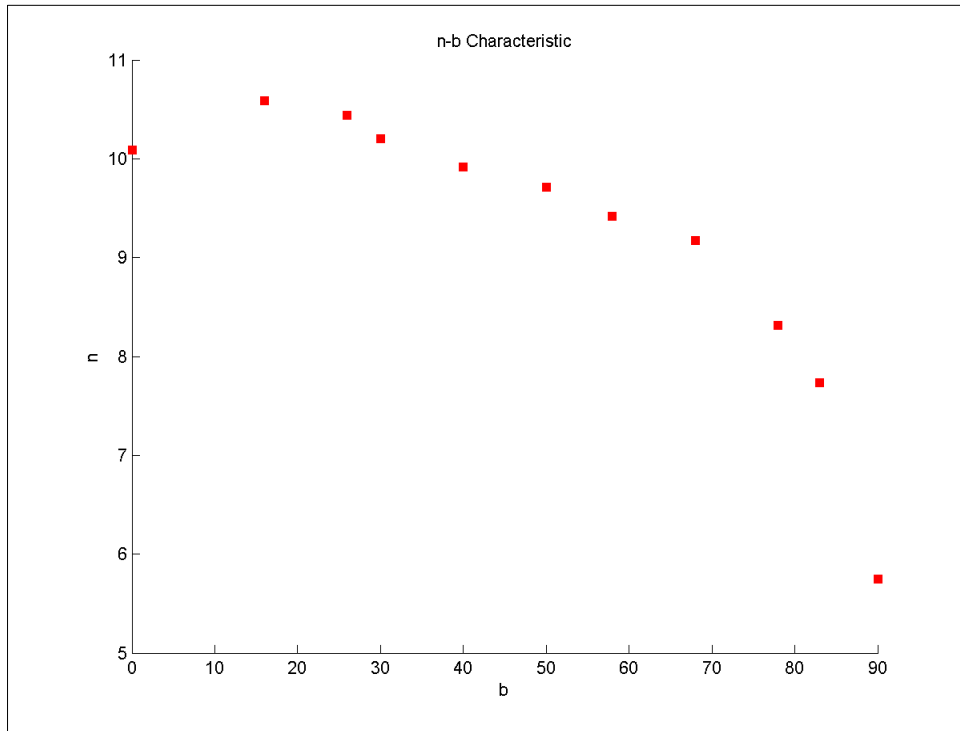


Σχήμα 4.26. Θερινό-Χειμερινό ηλιοστάσιο-Η μεγαλύτερη μέρα του χρόνου

Στο σχήμα 3.27 παρατίθεται η P-V για διαφορετικές γωνίες από $0-90^\circ$.



Σχήμα 4.27. Χαρακτηριστική εξόδου P-V για διαφορετικές γωνίες

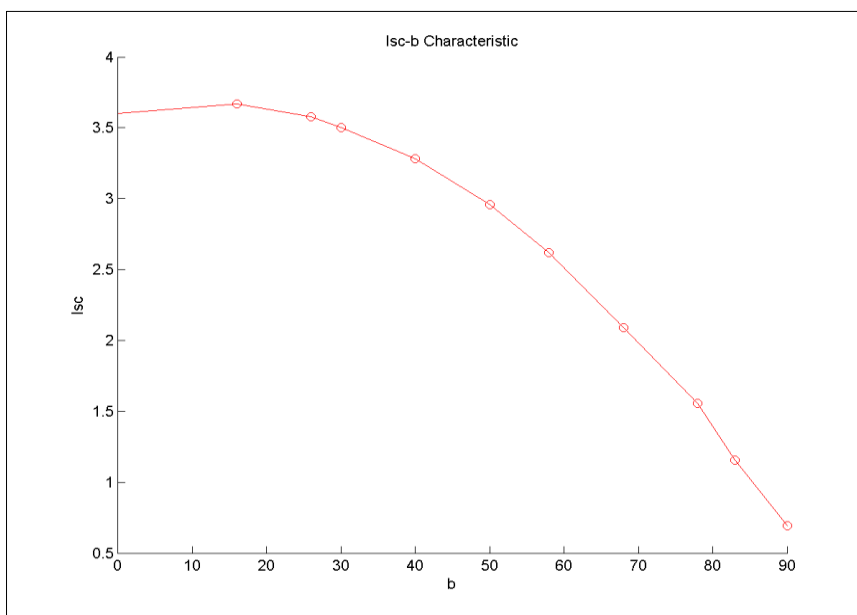


Σχήμα 4.28. Διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης του φ/β

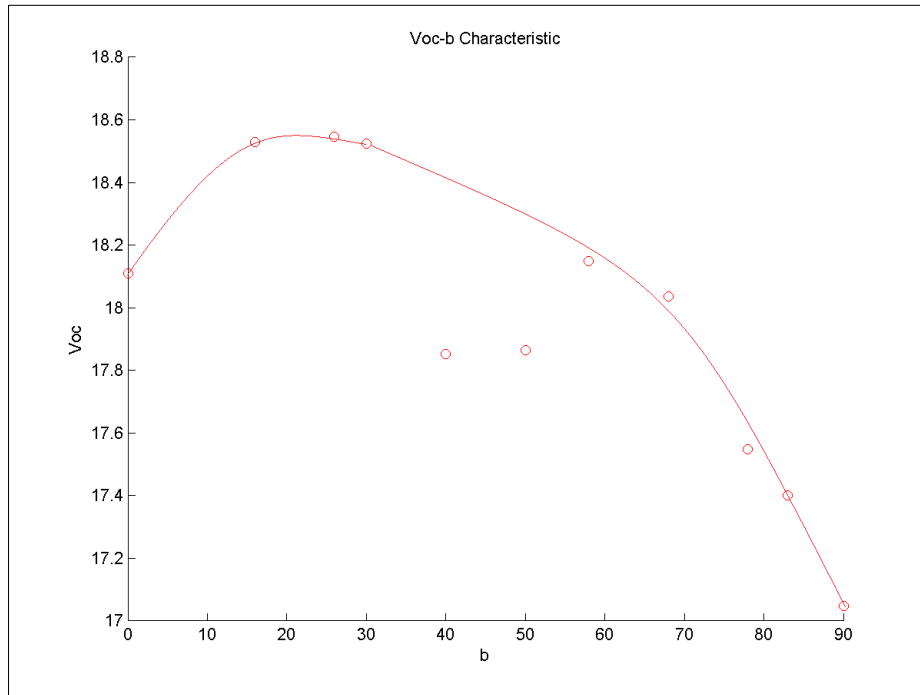
Ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$n = \frac{P_m}{0,42 * DNI} \quad (4.1)$$

Και σημειώνει τη βέλτιστη τιμή του στα 10,58% σε γωνία κλίσης β=14° .



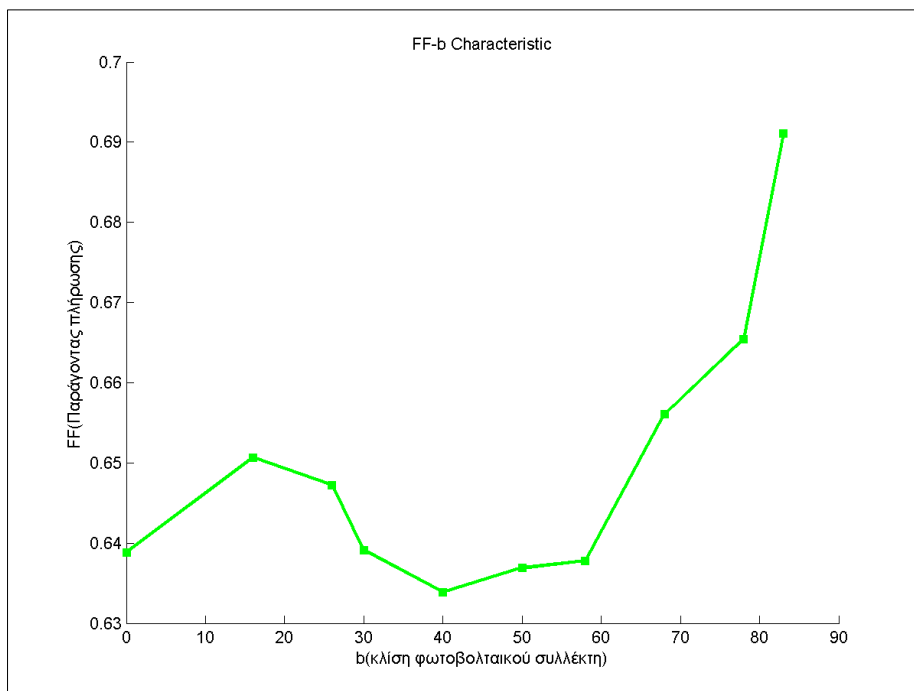
Σχήμα 4.29. Διάγραμμα ρεύματος βραχυκυκλώσεως σε συνάρτηση με κλίση φ/β συλλέκτη στις ίδιες συνθήκες με το σχήμα 4.28.



Σχήμα 4.30. Διάγραμμα τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε συνάρτηση με κλίση φωτοβολταϊκού συλλέκτη στις ίδιες συνθήκες με σχήμα 4.29.

4.6.1 Μελέτη του παράγοντα πλήρωσης

Η πειραματική αποκτημένη καμπύλη φαίνεται στο σχήμα 4.31 και όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά του ηλιακού πλαισίου σε θερμοκρασιακές μεταβολές, η διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη διεξαγωγή του πειράματος επιφέρει αποκλίσεις στις πειραματικές μετρήσεις. Στην περίπτωση του παράγοντα πλήρωσης, που είναι το γινόμενο μεγεθών που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, έστω και μια μικρή μείωση ή αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεταβολή της πειραματικά αποκτηθείσας καμπύλης.



Σχήμα 4.31. Μεταβολή του παράγοντα πλήρωσης συναρτήση της γωνίας κλίσης του φωτοβολταϊκού

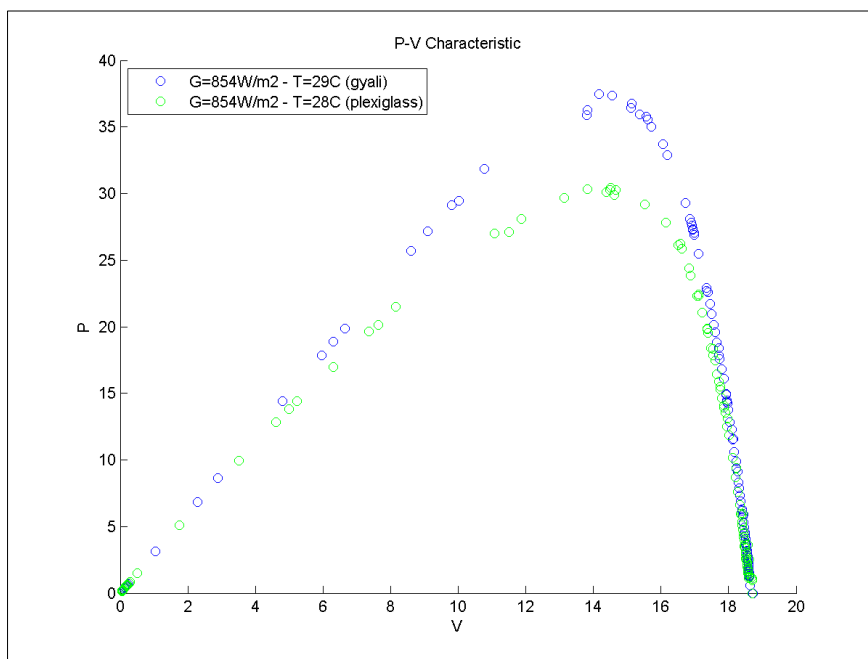
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 3.29 και 3.30 βλέπουμε ότι ελάχιστο συντελεστή πλήρωσης έχουμε για γωνία κλίσης ίδια με αυτή που τα I_{sc} και V_{oc} είναι μέγιστα. Αυτό εξηγείται από τον τύπο

$$FF = \frac{I_m * V_m}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (4.2)$$

Το FF ελαχιστοποιείται όταν όταν το γινόμενο $I_{sc} * V_{oc}$ μεγιστοποιείται. Γνωρίζουμε επιπλέον ότι ο συντελεστής πλήρωσης είναι ενδεικτικό μέγεθος της ποιότητας και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών. Δεν πρέπει να ξεχνάμε, όμως, ότι το ζητούμενο πάντα είναι η αποδιδόμενη ισχύς και η γωνία που επιτυγχάνεται αυτή, δηλαδή στις 14° στη προκειμένη περίπτωση. Έτσι παρόλα που ο παράγοντας πλήρωσης μεγιστοποιείται στις 83° επιλέγουμε σαν βασικό κριτήριο την απόδοση για την κλίση του φωτοβολταϊκού που στην περίπτωσή μας είναι $\beta=14^\circ$. Φυσικά το πιο ιδανικό θα ήταν ο παράγοντας πλήρωσης και η απόδοση να παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους για την ίδια γωνία.

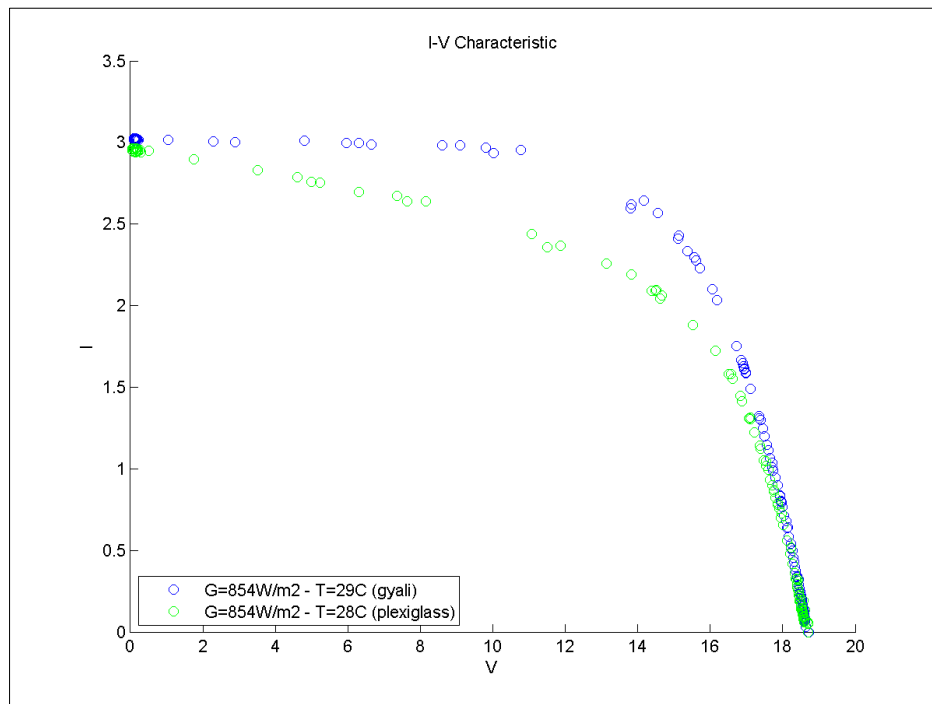
4.7 Σύγκριση φωτοβολταϊκού με χρήση γυαλιού και φωτοβολταϊκού με χρήση plexi-glass.

Στα σχήματα φαίνονται οι διαφορές στην ισχύ, στο ρεύμα βραχυκύκλωσης και στην τάση ανοιχτοκύκλωσης για το φωτοβολταϊκό με χρήση γυαλιού και για το φωτοβολταϊκό με plexi-glass. Όπως ήταν αναμενόμενο το φωτοβολταϊκό με γυαλί αποδίδει μεγαλύτερη ισχύ αφού αντακλά λιγότερο την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε σχέση με το plexi-glass. Σε ακτινοβολία $G=854W/m^2$ το plexi-glass αποδίδει ισχύ $P=30,44Watt$ ενώ το γυαλί $P=36,5 Watt$. Συνολικά το φωτοβολταϊκό με γυαλί αποδίδει 19,9% περισσότερο από το φωτοβολταϊκό με plexi-glass. Συνολικά, το γυαλί αποδίδει αρκετά περισσότερο αν λάβουμε υπόψιν ότι το γυαλί απορροφάει 5% περισσότερο την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με το πλαστικό. Το φωτοβολταϊκό με plexi-glass όμως, λόγω συστολής-διαστολής από τη μεταβαλλόμενη θερμοκρασία έχει παραμορφωθεί και μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αντανακλάται. Επίσης, η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι η κυψέλες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά οπότε είναι αναμενόμενο το ποσοστό διαφοράς τους να ξεπερνάει κατά πολύ το 5%.



Σχήμα 4.32. Σύγκριση ισχύος στο γυαλί και στο plexi-glass στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες

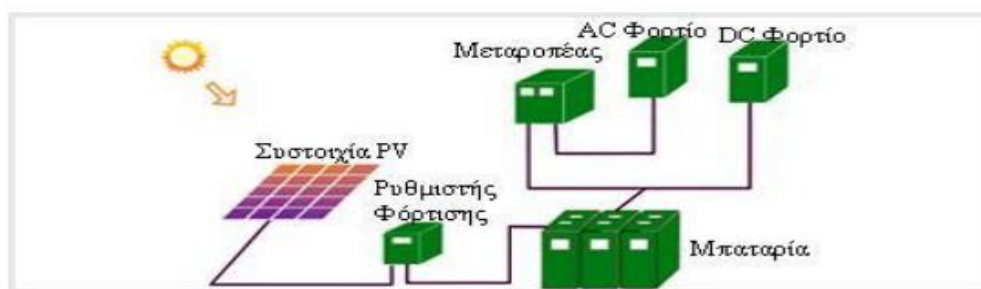
Στην χαρακτηριστική I-V διακρίνουμε διαφορετική κλίση των καμπύλων που οφείλεται στο ότι το φωτοβολταϊκό με plexi-glass έχει μεγαλύτερη αντίσταση σειράς σε σχέση με το φωτοβολταϊκό με γυαλί. Αυτό έχει να κάνει με το ότι οι κυψελες που χρησιμοποιήθηκαν είναι χαμηλού κόστους όπως προαναφέρθηκε.



Σχήμα 4.33. Σύγκριση I-V διαγράμματος στο φωτοβολταϊκό με γυαλί και με plexi-glass στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες

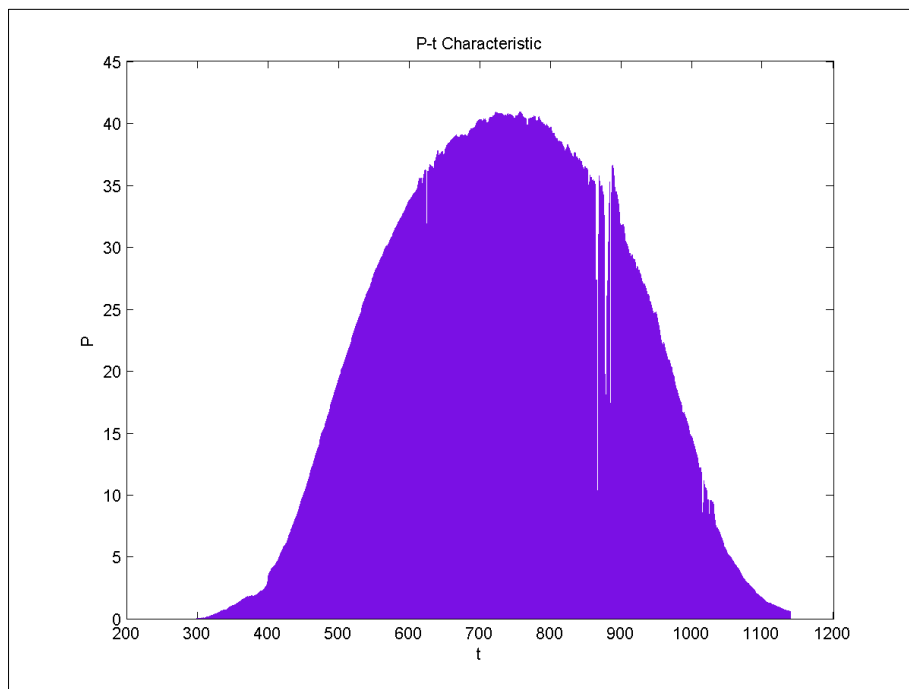
4.8 Σύνδεση φωτοβολταϊκού-μπαταρίας

Γενικά οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες παράγουν ισχύ μόνο όταν υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία, έτσι μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση περιλαμβάνει επίσης συσσωρευτές για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, σε περιόδους που η παραγόμενη ενέργεια εμφανίζει περίσσεια και για την χρησιμοποίησή της όταν είναι ανεπαρκής. Αναπόσπαστα συστατικά μιας εγκατάστασης είναι οι μετατροπείς DC-DC οι οποίοι μπαίνουν πριν τις μπαταρίες και προσαρμόζουν ανάλογα την τάση και DC-AC αντιστροφείς ώστε να συνδεθούν τα φωτοβολταϊκά με το δίκτυο.



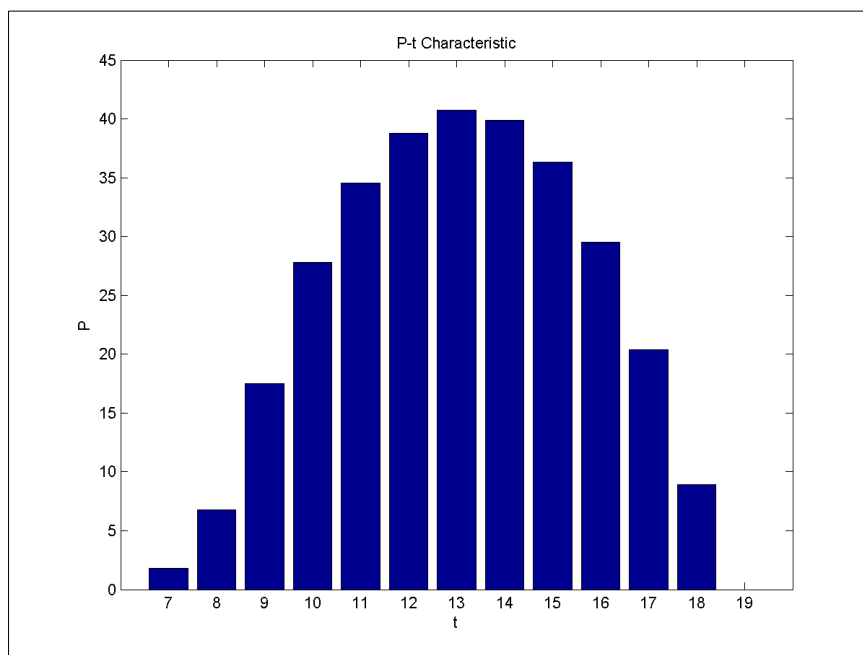
Σχήμα 4.34. Διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με αποθήκευση σε μπαταρία, η οποία τροφοδοτεί καταναλωτές συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε σύνδεση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου 45W και 18V με μια μπαταρία 12V. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο μέσος όρος της αποδιδόμενης ενέργειας στη μπαταρία κατά τη διάρκεια μίας ημέρας σε χρόνο ανα λεπτό και ανα ώρα



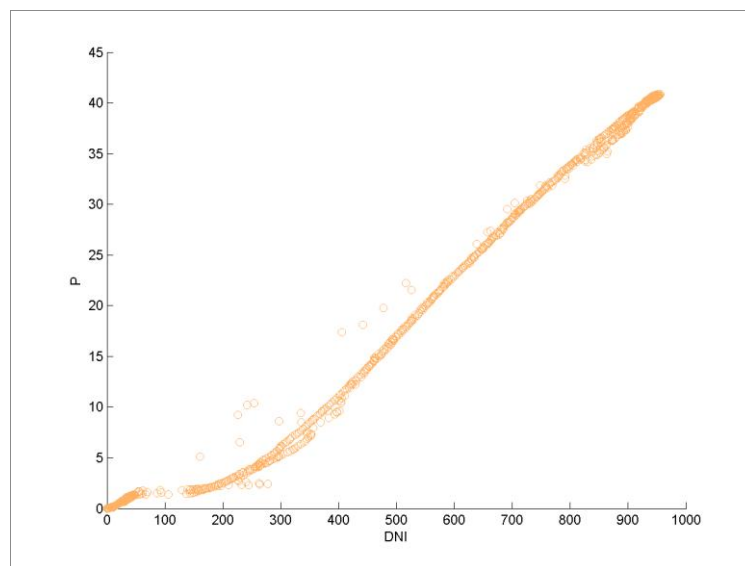
Σχήμα 4.35. Διάγραμμα P-t φωτοβολταϊκού μπαταρίας σε μέσο όρο λεπτών στη 1/07/2011

Το φωτοβολταϊκό αποδίδει μέγιστη ισχύ $P=40,86\text{Watt}$ στη μπαρία κατά τη 13:30 όπου έχουμε και μέγιστη ακτινοβολία $G=950\text{W/m}^2$. Στο σχήμα 4.36 παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος σε συνάρτηση με τη μεταβολή του χρόνου, ανα ώρα και στο σχήμα 4.35 παρουσιάζεται ο μέσος όρος της ισχύος σε συνάρτηση με την ακτινοβολία ανα λεπτό.



Σχήμα 4.36. Διάγραμμα ισχύος-χρόνου φωτοβολταϊκού-μπαταρίας στη 1/07/2011

Συνολικά η ενεργειακή απολαβή που σημειώθηκε για την 1/07/2011 ήταν $E_n=P*t=300Wh$.

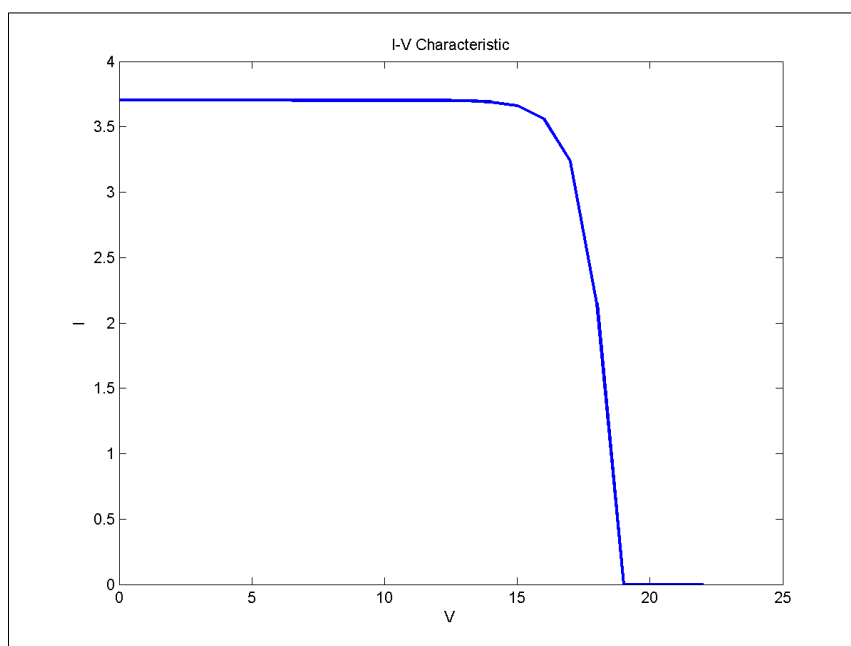


Σχήμα 4.37. Διάγραμμα ισχύς ακτινοβολίας για το σύστημα φωτοβολταϊκό μπαταρία στη 1/07/2011

4.9 Μοντελοποίηση πλαισίου-Συγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα

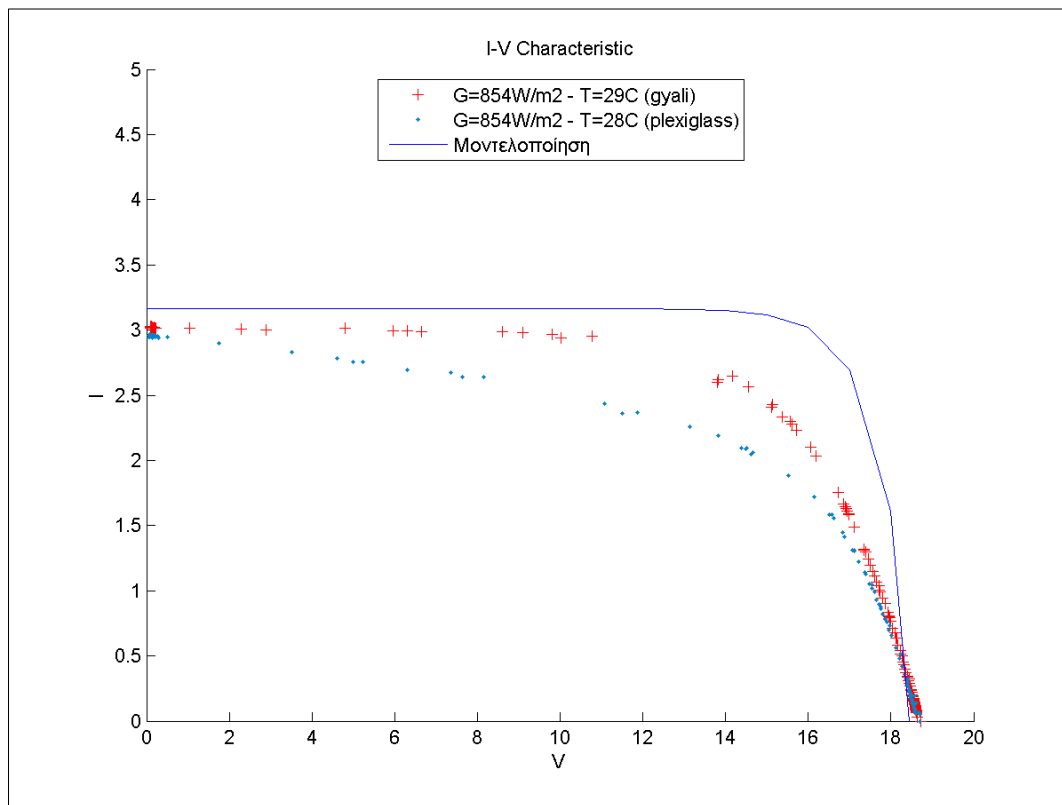
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου για να γίνει σύγκριση του φωτοβολταϊκού που κατασκευάστηκε με την θεωρητική πραγματικότητα. Στο 2^ο κεφάλαιο έχει γίνει επίσης μοντελοποίηση μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης. Η προσομοίωση του φωτοβολταϊκού έγινε στο Mathworks Matlab και για την υλοποίησή της εφαρμόστηκαν οι τύποι που ήδη έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 2.7.

Η μοντελοποίηση ενός πλαισίου αποτελούμενο με όμοια κύτταρα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 4.38. Μοντελοποίηση του πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου για STC συνθήκες

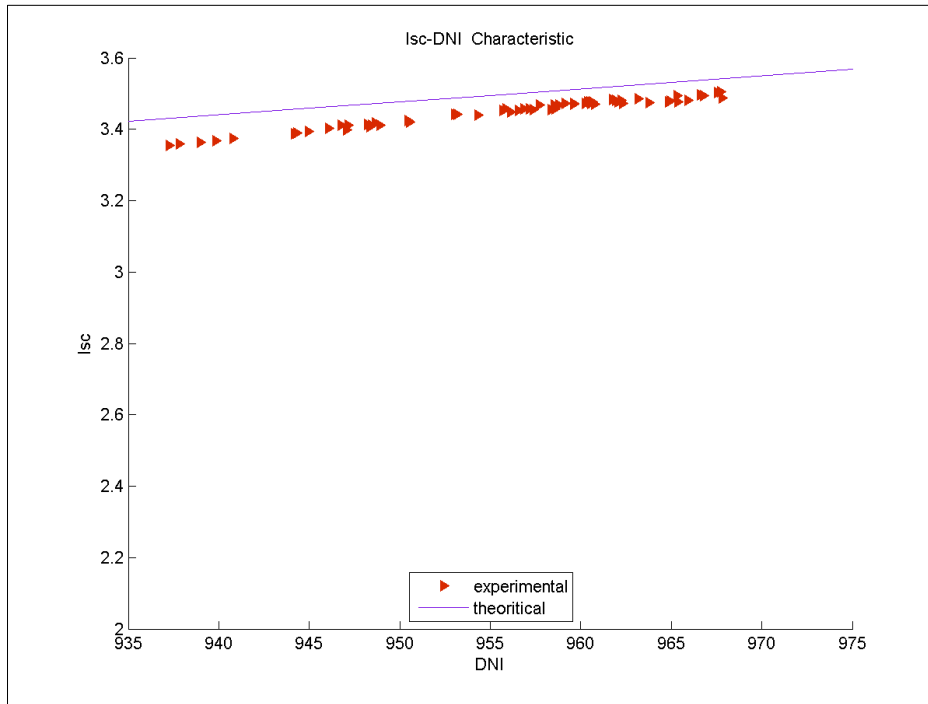
Στο σχήμα παρατίθεται ένα συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στη καμπύλη την θεωρητική , την πειραματική για το γυαλί και την πειραματική για το plexi-glass για τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.



Σχήμα 4.39. Σύγκριτικό για τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν

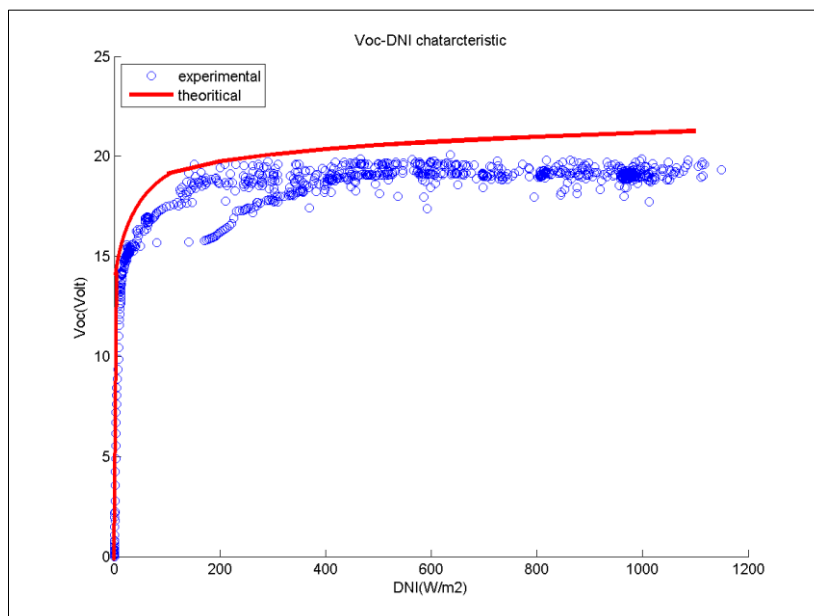
Παρατηρούμε ότι και οι τρεις καμπύλες βρίσκονται αρκετά κοντά σε όλο το εύρος των τάσεων. Οι όποιες αποκλίσεις παρατηρούνται οφείλονται σε σφάλματα μέτρησης , στο γεγονός ότι οι κυψέλες τόσο στο φωτοβολταϊκό με γυαλί όσο και στο plexi-glass έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ακόμα η καμπύλη μοντελοποίησης έχει χαραχθεί για μηδενική αντίσταση σειράς, οπότε γι αυτό παρατηρούμε διαφορά στην “κλίση” κάθε καμπύλης. Ύστερα όμως από δοκιμές βρέθηκε ότι η αντίσταση σειράς στο γυαλί είναι περίπου $R_s=1,06\Omega$ ενώ στο plexi glass $R_s=1\Omega$ και παράλληλη αντίσταση $R_{sh}=100\Omega$ (γυαλί) και $R_{sh}=20\Omega$ (plexi glass).

Στο σχήμα 4.40 φαίνεται η σύγκριση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως που μετρήθηκε πειραματικά με το ρεύμα βραχυκυκλώσεως που προέκυψε από τη μοντελοποίηση, συναρτήση της ακτινοβολίας από $935W/m^2$ - $975W/m^2$ υπο σταθερή θερμοκρασία $T=35^{\circ}C$. Η μικρή διαφορά, η οποία υπολογίζεται σε σφάλμα 1,5% συμβαίνει για τους ίδιους λόγους με πριν (οι κυψέλες δεν είναι όμοιες μεταξύ τους και είναι ατελής με αποτέλεσμα να εμφανίζουν συνολικά μεγάλη αντίσταση σειράς).



Σχήμα 4.40. Συγκριτικό για τη θεωρητική και τη πειραματική μελέτη

Στο σχήμα παρατίθεται η σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτοκύκλωσης με την ακτινοβολία. Όπως φαίνεται η σχέση τους είναι λογαριθμική και δεν έχει μεγάλη απόκλιση (σφάλμα 9,5%), η θεωρητική από την πειραματική καμπύλη. Επιπλέον, όπως διαπιστώνουμε και από το σχήμα η τάση ανοιχτοκύκλωσης παραμένει σχεδόν σταθερή από τα 150W/m^2 και πάνω.



Σχήμα 4.41. Συγκριτικό για τη θεωρητική και πειραματική μελέτη της V_{oc} με την DNI.

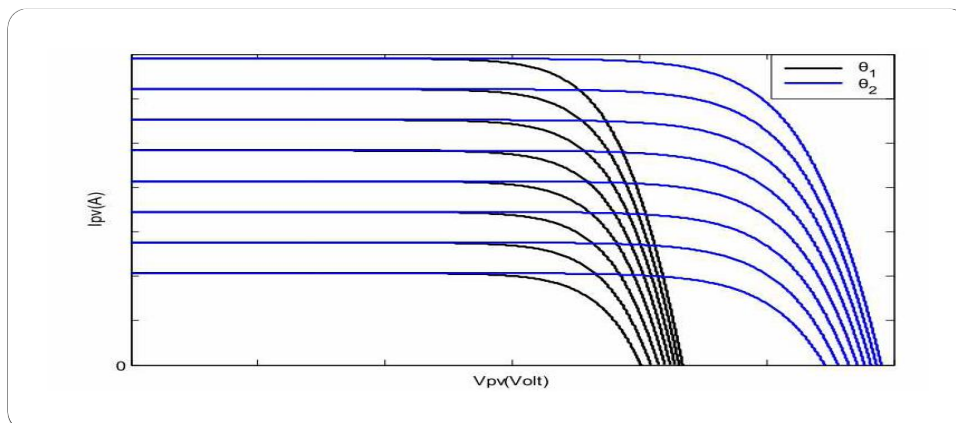
Η μικρή διαφορά που παρατηρούμε στο γόνατο της λογαριθμικής καμπύλης έγκειται στο γεγονός ότι η θεωρητική καμπύλη έγινε στους 25°C ενώ η πειραματική στο εύρος θερμοκρασιών μιας καλοκαιρινής ημέρας ($29\text{-}40^{\circ}\text{C}$).

Κεφάλαιο 5^ο

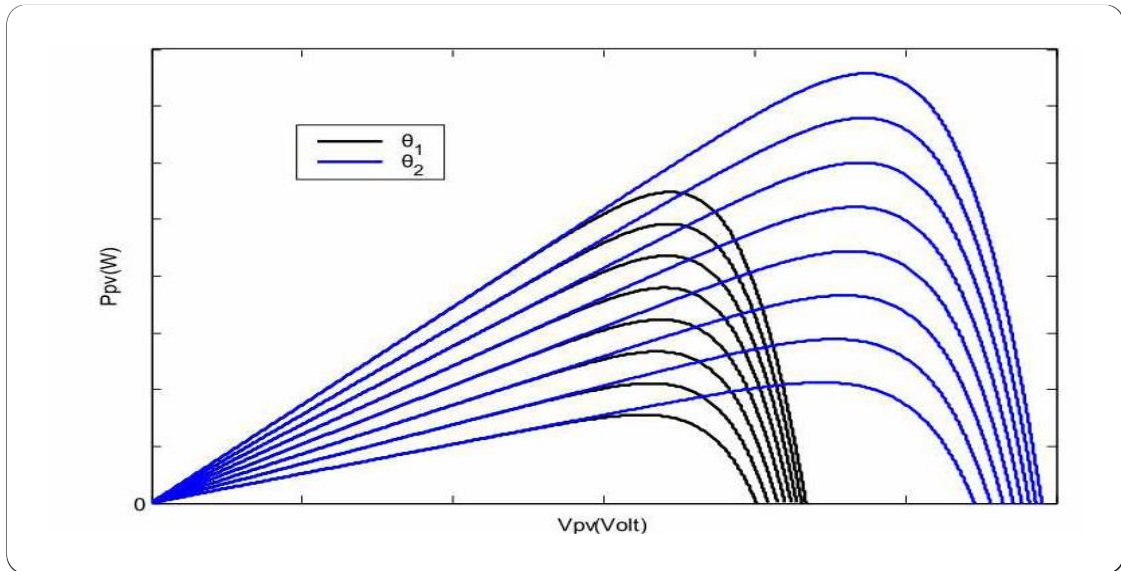
Μελέτη καθορισμού των βέλτιστων σημείων λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων

5.1 Ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος

Η ηλιακή ενέργεια είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη, όπως είναι ήδη γνωστό μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ωστόσο, δεν αρκούν μόνο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για την αξιοποίηση της ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν DC ρεύμα, το οποίο άλλοτε χρησιμοποιείται σε αυτή τη μορφή και άλλοτε μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο μέσω διατάξεων αντιστροφών. Ωστόσο η εξαγωγή την ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι απλή διαδικασία και παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Μία από τις πιο σημαντικές δυσκολίες είναι η **ανίχνευση του Μέγιστου Σημείου Ισχύος- Maximum Power Point (MPPT)** των φωτοβολταϊκών. Για να γίνει κατανοητό το τι ακριβώς είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος, να αναφερθεί ότι μία συστοιχία φωτοβολταϊκών κάτω από σταθερή και ομοιόμορφη ακτινοβολία λειτουργεί σύμφωνα με μία χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος -τάσης. Σε αυτή την καμπύλη υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη ισχύ. Αυτό είναι και το μέγιστο σημείο ισχύος της χαρακτηριστικής. Να σημειωθεί ότι το σημείο αυτό δεν μπορεί να είναι γνωστό γιατί η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει συνεχώς επομένως και η χαρακτηριστική καμπύλη. Έτσι το σημείο είναι διαφορετικό κατά τις πρωινές ώρες σε σχέση με τις απογευματινές ώρες που η ακτινοβολία είναι ασθενέστερη. Σύμφωνα με τα παραπάνω και δεδομένου ότι κατά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιθυμητή η μέγιστη απόδοση των διατάξεων και η παραγωγή μέγιστης δυνατής ισχύος, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει ανάγκη κατασκευής διατάξεων που θα ανιχνεύουν το Μέγιστο Σημείο Ισχύος και θα εξαναγκάζουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία να λειτουργεί σε αυτό το σημείο. Στο σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη P-V για διαφορετικές θερμοκρασίες και ακτινοβολίες όπου φαίνεται το MPPT και το σημείο λειτουργίας μίας διάταξης MPPT. Στο δεύτερο σχήμα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V για ανάλογες συνθήκες[23],[24].

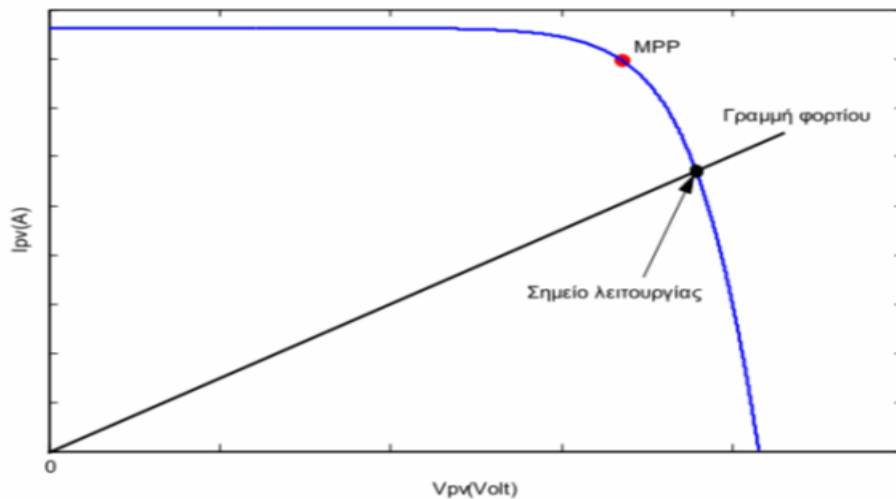


Σχήμα 5.1. Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες και θερμοκρασίες



Σχήμα 5.2. Καμπύλες P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες και θερμοκρασίες

Διατάξεις ανίχνευσης του Μέγιστου Σημείου Ισχύος ονομάζονται Ανιχνευτές Μέγιστου Σημείου Ισχύος. Αυτές οι διατάξεις εντοπίζουν το Μέγιστο σημείο Ισχύος και επιδρούν στη Φωτοβολταϊκή συστοιχία, έτσι ώστε αυτή να λειτουργεί σε αυτό το σημείο. Για παράδειγμα, όταν μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι άμεσα συνδεδεμένη με ένα φορτίο το σημείο λειτουργίας του συστήματος το οποίο καλείται και άμεσο συνδεδεμένο σύστημα θα είναι στην τομή της καμπύλης ρεύματος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και της γραμμής του φορτίου. Αυτό φαίνεται στο σχήμα παρακάτω:



Σχήμα 5.3. Σημείο λειτουργίας φωτοβολταϊκού-φορτίου

Το σημείο λειτουργίας όμως αυτό είναι πρακτικά αδύνατο να συμπέσει με το Μέγιστο Σημείο Ισχύος χωρίς τη χρήση βοηθητικών διατάξεων. Σε αυτό το σημείο λοιπόν γίνεται η χρήση των διατάξεων ανίχνευσης σημείου μέγιστου ισχύος. Οι διατάξεις αυτές με διάφορους ελέγχους τάσης και ρεύματος και με τη βοήθεια αλγορίθμων αναζήτησης εντοπίζουν το MPPT κάθε στιγμή και επιδρούν στο φωτοβολταϊκό με σκοπό τη διατήρηση αυτού του σημείου λειτουργίας. Η κατασκευή τέτοιων διατάξεων και συστημάτων ελέγχου είναι σχετικά περίπλοκη, εφόσον πρέπει να ανταποκρίνονται γρήγορα και να εντοπίζουν το σημείο μέγιστης ισχύος το οποίο εξαρτάται από την

ακτινοβολία και από τη θερμοκρασία και μεταβάλλεται με την αλλαγή κάποιου από αυτούς τους δύο παράγοντες. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν διάφορες διατάξεις Ανιχνευτών Μέγιστου Σημείου Ισχύος.

5.2 Γενικά για διατάξεις Ανισχνευτών ΜΣΙ

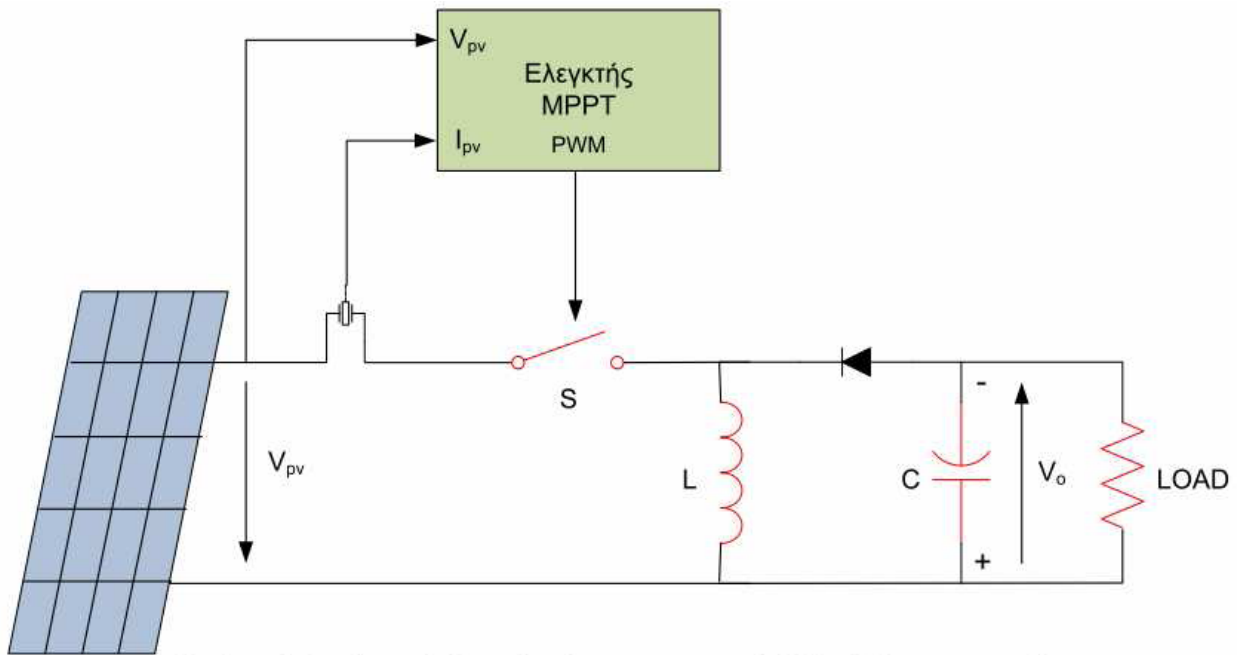
Οι βασικοί αλγόριθμοι ανίχνευσης του Μέγιστου Σημείου Ισχύος είναι οι Διατάραξης και Παρατήρησης και Αυξητικής Αγωγιμότητας και θα σχολιασθούν αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Δύο άλλες μέθοδοι για την ανίχνευση MPPT είναι η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και η μέθοδος τάσης ανοιχτοκυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου έγκειται στην υπόθεση ότι το ρεύμα λειτουργίας στο MPPT του ηλιακού πίνακα είναι γραμμικά ανάλογο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για το λόγο αυτό κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, αυτή η μέθοδος ανιχνεύει το ΜΣΙ σε σχετικά μικρό χρόνο. Ωστόσο, το κύκλωμα ελέγχου είναι αρκετά περίπλοκο και το κόστος υψηλό. Επιπλέον, η υπόθεση ότι το ρεύμα λειτουργίας στο ΜΣΙ είναι γραμμικά ανάλογο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μόνο μία προσέγγιση. Στην πράξη, η εφαρμογή αυτής της τεχνικής έχει πάντα ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου κάτω από το ΜΣΙ.

Η μέθοδος της τάσης ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού στοιχείου στηρίζεται και αυτή σε παρόμοια υπόθεση, ότι δηλαδή η τάση ανοιχτού κυκλώματος του ηλιακού πίνακα στο ΜΣΙ είναι γραμμικά ανάλογη με την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Αυτή η τεχνική εμφανίζει τις ίδιες οριοθετήσεις και τα ίδια μειονεκτήματα με την παραπάνω. Αν και αυτή η μέθοδος είναι πιο οικονομική και μπορεί να υλοποιηθεί ευκολότερα, η εφαρμογή της οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα στην ΑΜΣΙ και συνεπώς παρατηρούνται σημαντικές ενεργειακές απώλειες. Επιπλέον, τόσο η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης όσο και η μέθοδος τάσης ανοιχτοκυκλώματος φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτυγχάνουν να εντοπίσουν το ΜΣΙ αποτελεσματικά σε περιπτώσεις όπου στοιχεία του ηλιακού πίνακα είναι κατά ένα μέρος τους υποσκιά ή κατεστραμμένα, αφού και στις δύο αυτές περιπτώσεις η χαρακτηριστική I-V μεταβάλλεται. Ωστόσο, σκιασμένα ή κατεστραμμένα στοιχεία δεν είναι κάτι το ασυνήθιστο στην πράξη και για το λόγο αυτό θα πρέπει οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται να ανταποκρίνονται σε τέτοιες περιπτώσεις. Για τους παραπάνω λόγους και λόγω ενεργειακών απωλειών που προκαλούνται από τις δύο αυτές μεθόδους, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη[25].

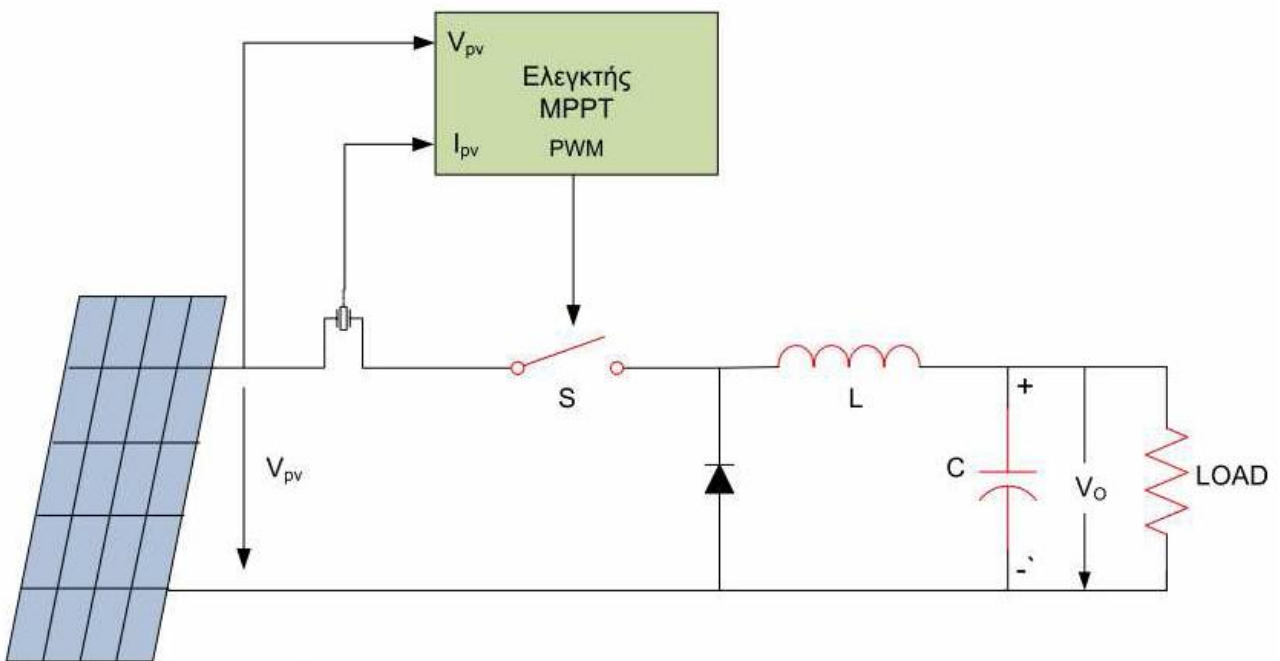
5.3 MPPT με DC-DC μετατροπείς

Από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι αυτές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι τρεις βασικές τοπολογίες DC-DC μετατροπέων. Οι μετατροπείς αυτοί είναι ο DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, ο DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης και ο μικτός DC-DC μετατροπέας. Τα συστήματα MPPT που λειτουργούν με αυτές τις διατάξεις είναι αρκετά απλά τόσο στην κατασκευή όσο και στον έλεγχο, καθώς οι συγκεκριμένες τοπολογίες περιλαμβάνουν ένα ελεγχόμενο στοιχείο. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η άποψη ενός

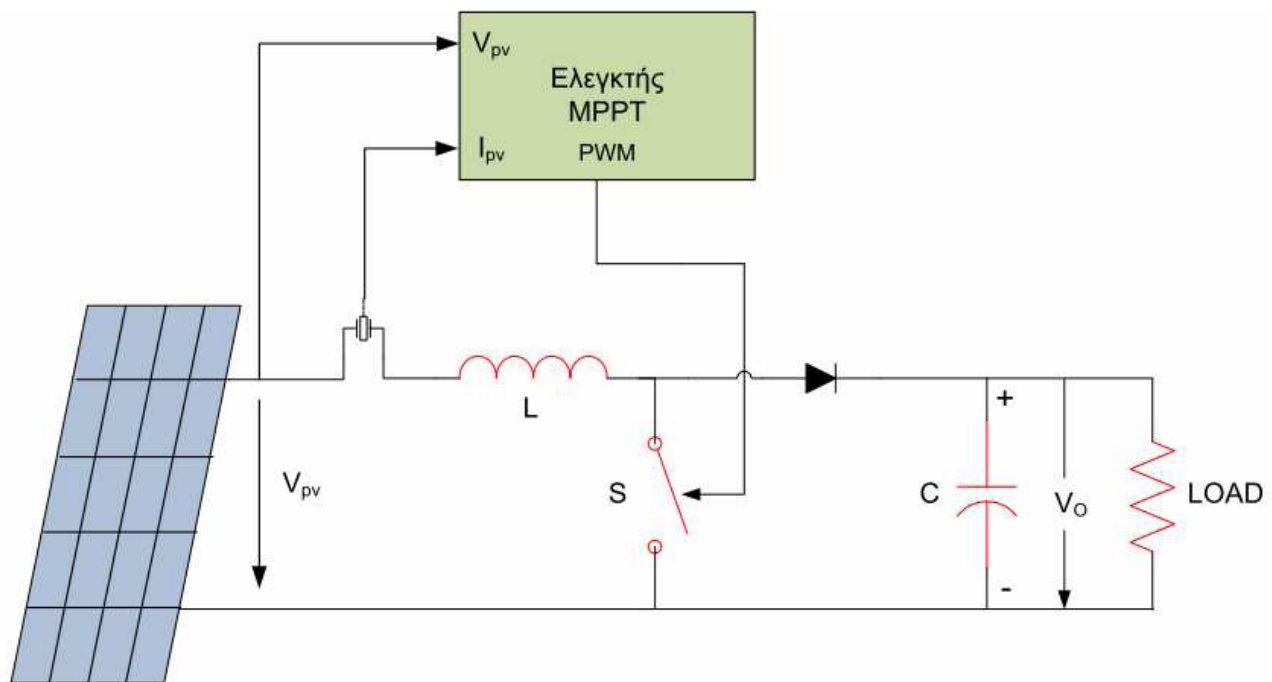
φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο MPPT με τη χρήση των τριών DC-DC μετατροπέων που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 5.4. DC-DC boost converter



Σχήμα 5.5. DC-DC buck converter



Σχήμα 5.6. DC-DC buck-boost conerter

Πριν όμως γίνει η συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του ελέγχου MPPT πρέπει να γίνει μία ανασκόπηση της λειτουργίας των DC-DC μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωση τάσης. Η λειτουργία του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο, καθώς σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται φωτοβολταϊκό σύστημα με τη χρήση του συγκεκριμένου μετατροπέα. Η λογική λειτουργίας των DC-DC μετατροπέων είναι κατά βάση η ίδια καθώς όλοι περιλαμβάνουν τα ίδια ενεργά και παθητικά στοιχεία. Η διαφορά τους έγκειται στη σχέση της τάσης εξόδου με τη σχέση εισόδου. Συγκεκριμένα, ο μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού τάσης δημιουργεί τάση εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου, ο DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης μεγαλύτερη από την τάση εισόδου, ενώ ο μικτός DC-DC μετατροπέας δημιουργεί και μεγαλύτερη και μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου, αλλά με διαφορετική πολικότητα. Το επίπεδο της τάσης εξόδου σε όλους τους DC-DC μετατροπέες ρυθμίζεται με τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής του ημιαγωγίμου διακόπτη των διατάξεων.

Επομένως, ανάλογα με την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μπορεί να επιλεγεί κάποιος από αυτούς τους DC-DC μετατροπέες. Δηλαδή, αν η τάση εξόδου των στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ 30 έως 150V και απαιτείται σταθερή τάση εξόδου 20V, είναι προφανές ότι θα χρησιμοποιηθεί ένας DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. Σε περίπτωση που η επιθυμητή τάση εξόδου είναι 160V τότε θα χρησιμοποιηθεί DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης, ενώ αν η τάση εξόδου είναι πρέπει να είναι 80V, μπορεί να εφαρμοστεί ο μικτός DC-Dc μετατροπέας. Οι εφαρμογές αυτές αποτελούν απλά παραδείγματα εφαρμογής των τριών DC-DC μετατροπέων σε φωτοβολταϊκά συστήματα με έλεγχο MPPT και αναφέρθηκαν για την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων αυτών.

5.3.1 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Η περιγραφή της λειτουργίας του συγκεκριμένου μετατροπέα ισχύει για την λειτουργία με συνεχή αγωγή ρεύματος, δηλαδή για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step down ή buck DC-DC converter), όπως προαναφέρθηκε, παράγει μέση τάση εξόδου V_o μικρότερη από τη DC τάση εισόδου του V_d . Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στον ημιαγωγισμό διακόπτη και στη σχετική διάρκεια αγωγής του D . Η τάση εισόδου V_d και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με την σχέση:

$$D = \frac{V_o}{V_d} \quad (5.1)$$

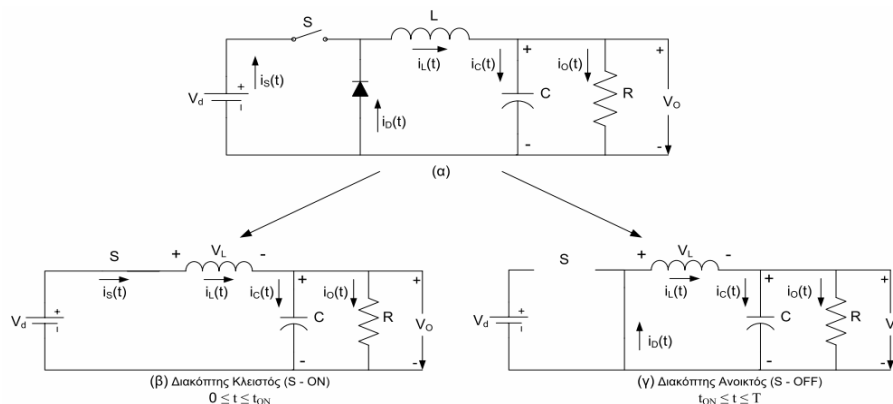
Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d και άρα προκύπτει η ανάλογη σχέση για το ρεύμα εισόδου I_d , το ρεύμα εξόδου I_o και τη σχετική διάρκεια αγωγής D .

$$P_d = P_o \Rightarrow V_d * I_d = V_o I_o \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D} \quad (5.2)$$

Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται από τη σχέση:

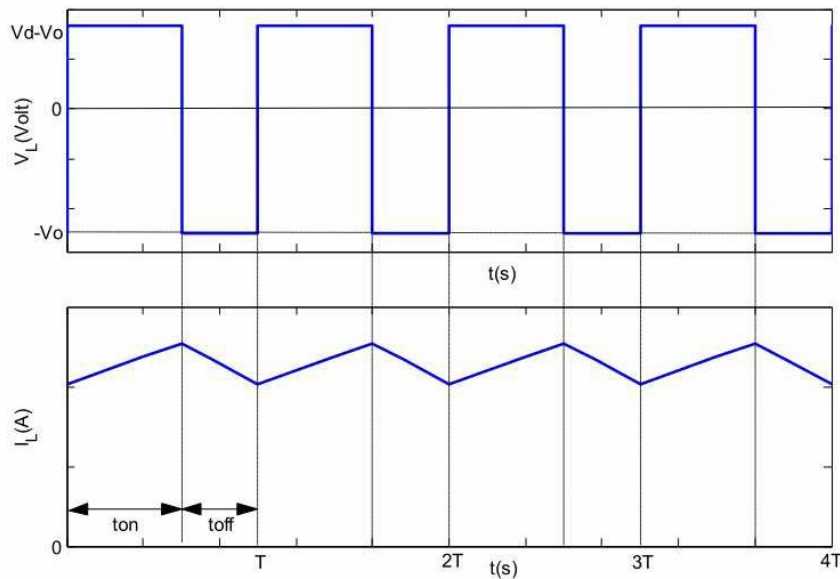
$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (5.3)$$

Όπου T η περίοδος παλμοδότησης και t_{on} είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Οι χρόνοι αγωγής t_{on} και αποκοπής t_{off} του διακόπτη καθώς και η περίοδος παλμοδότησης T φαίνονται στο σχήμα όπου παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου και του μετατροπέα υποβιβασμού κατά τη λειτουργία του με σχετική διάρκεια αγωγής $D=0,6$. Επιπλέον, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, καθώς και τα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγισμού διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά των ρευμάτων των στοιχείων.



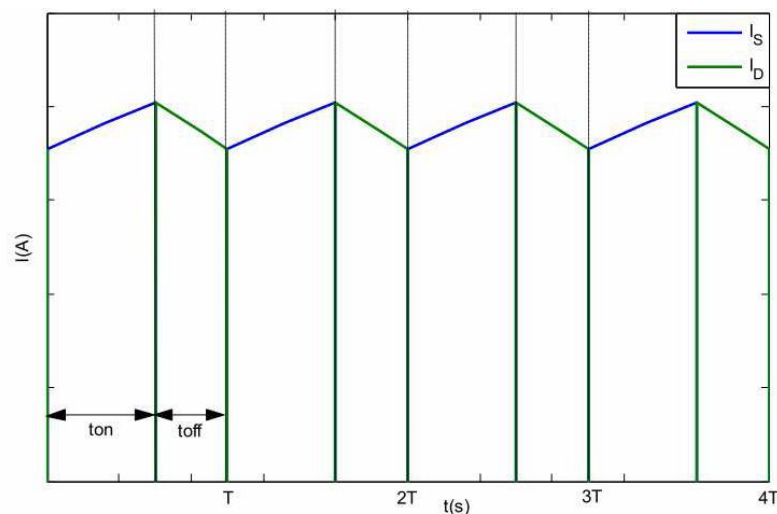
Σχήμα 5.7. (αριστερά) κύκλωμα κατά την αγωγή της διόδου, (δεξιά) κύκλωμα κατά την διακοπή αγωγής της διόδου

Όπως φαίνεται και από το σχήμα κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η διάδοσ πολώνεται ανάστροφα και βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται τάση $V_L=V_d-V_o$, η οποία προκαλεί αύξηση του ρεύματος του. Επομένως κατά το χρόνο 0 έως t_{on} το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης S ανοίξει, λόγω της αποθηκευμένης στο πηνίο ενέργεια, το τελευταίο συνεχίζει να διαρέεται από ρεύμα, το οποίο όμως διέρχεται από τη διάδο. Λόγω αγωγής της διάδο το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου όπως φαίνεται και στο τρίτο σχήμα και η τάση του γίνεται $V_L=-V_o$. Στο σχήμα φαίνεται η αύξηση του ρεύματος του πηνίου κατά το χρονικό διάστημα 0- t_{on} και έπειτα η μείωσή του κατά το διάστημα t_{on} -T.



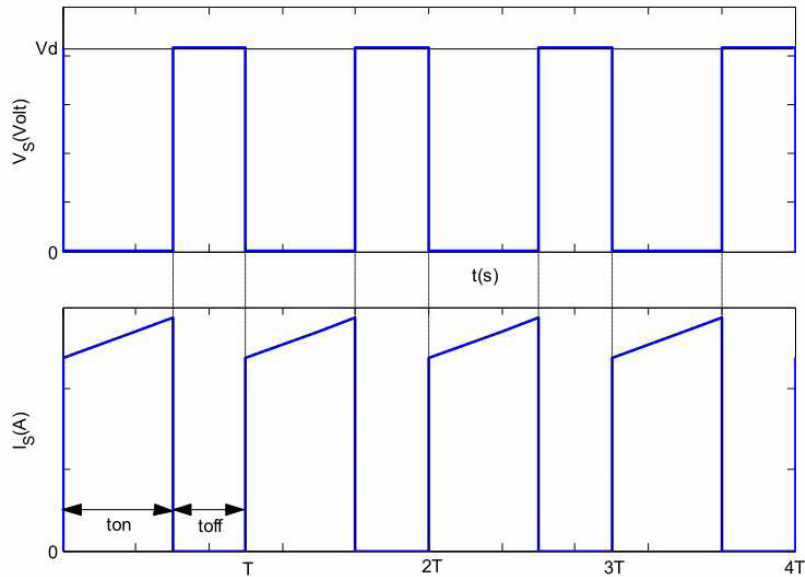
Σχήμα 5.8. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_s και της διάδο I_D , όπου κατά το χρόνο 0- t_{on} το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα διάδο είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο t_{on} -T το ρεύμα του πηνίου διαρέει τη διάδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν.



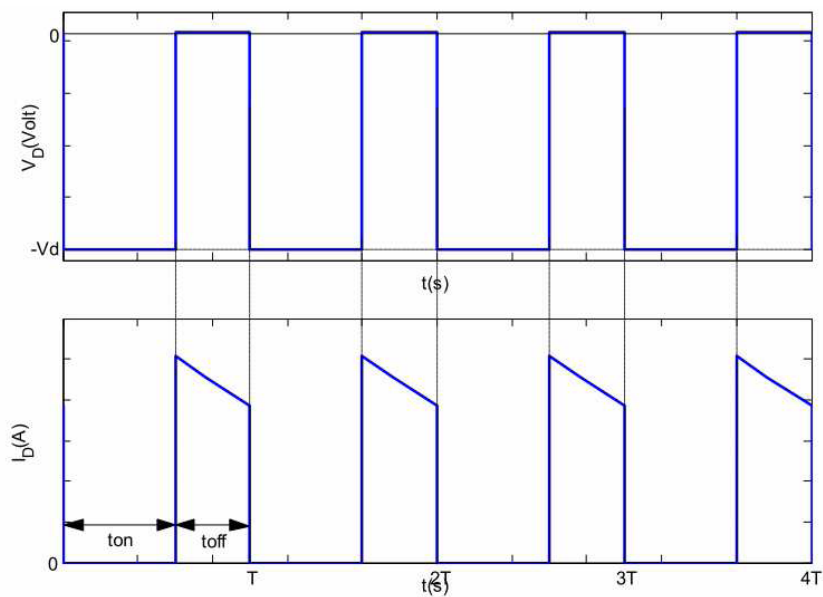
Σχήμα 5.9. Ρεύμα διακόπτη I_s και διάδο I_D DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού

Όπως φαίνεται από το Σχήμα, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Τέλος, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα τόσο του διακόπτη του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όσο και της διόδου του.



Σχήμα 5.10. Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) διακόπτη DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού

Από το σχήμα , φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εισόδου V_d . Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος.



Σχήμα 5.11. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διόδου DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Για τη δίοδο ισχύουν αυτά που ισχύουν αυτά που ισχύουν και για το διακόπτη, καθώς και η δίοδος πρόκειται για ένα ημιαγώγιμο διακόπτη με τη διαφορά ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί η αγωγή και η αποκοπή της. Επομένως, όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η δίοδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εισόδου. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος. Αντίθετα, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η δίοδος γίνεται αγώγιμη και η τάση στα άκρα της γίνεται μηδέν, όπως φαίνεται και στο σχήμα.

5.3.1.1 Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής

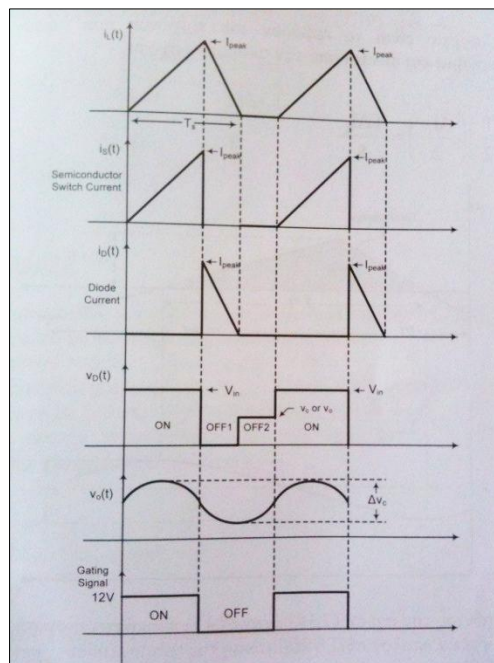
Στην παράγραφο αυτή θα διαμορφωθούν οι εξισώσεις που δείχνουν την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του κυκλώματος στον τρόπο αγωγής του ρεύματος του πηνίου (συνεχή ή ασυνεχή). Οι κυματομορφές των v_L και i_L στο όριο της λειτουργίας συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος εξορισού, το ρεύμα του πηνίου 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 είναι:

$$\frac{1}{2} * i_{L,peak} = \frac{t_{on}}{2 * L} * (V_d - V_0) = \frac{D * T_s}{2 * L} * (V_d - V_0) = I_{oB} \quad (5.4)$$

Επομένως, σε κάποια κατάσταση λειτουργίας (με ένα δεδομένο σύνολο τιμών για τα T , V_d , V_0 , 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 τότε το i_L θα γίνει ασυνεχές[26].

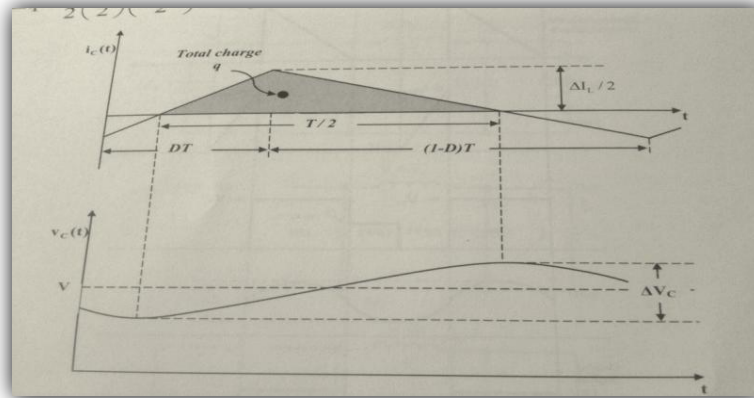
5.3.1.2 Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος



Σχήμα 5.12 Κυματομορφές υποβιβασμού όταν το ρεύμα του πηνίου είναι ασυνεχές

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το παρακάτω σχήμα, το οποίο παρουσιάζει το ρεύμα και την τάση του πυκνωτή εξόδου, το ρεύμα του πυκνωτή για τη μισή διακοπτική περίοδο είναι θετικό με αποτέλεσμα να εξαναγκάζει την τάση του πυκνωτή να αυξηθεί μεταξύ του κατώτατου και του ανώτατου ορίου του. Σε όλη αυτή τη χρονική διάρκεια, το ολικό φορτίο q το οποίο αποθηκεύεται στον πυκνωτή δίνεται από την ακόλουθη σχέση: $\Delta q = C \cdot \Delta V_o$ (αλλαγή φορτίου πυκνωτή = $C \cdot$ (αλλαγή τάσης πυκνωτή)). Το ολικό φορτίο είναι το εμβαδόν του τριγώνου που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και δίνεται από την ακόλουθη σχέση [27].

$$\Delta q = \frac{1}{2} * \left(\frac{T}{2}\right) * \left(\frac{\Delta I_L}{2}\right) = \frac{T \Delta I_L}{8} \quad (5.5)$$



Σχήμα 5.13 Τάση και ρεύμα πυκνωτή

Αντικαθιστώντας την σχέση 5.5 προκύπτει η σχέση μέσω της οποίας μπορεί να υπολογισθεί η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_L * T}{8 * C} \quad (5.6)$$

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογισθεί το ΔI_L . Όταν ο διακόπτης του μετατροπέα υποβιβασμού είναι ανοικτός τότε ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος του πηνίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} \text{ ή } \frac{\Delta I_L}{(D-1)*T} = -\frac{V_o}{L} \text{ ή } \Delta I_L = -\frac{V_o}{L} (D-1) * T \quad (5.7)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η ακόλουθη σχέση.

$$\Delta V_o = \frac{(1-D)V_o T^2}{8LC} = \frac{(1-D)V_o}{8LCf^2} \quad (5.8)$$

$$I_{L,peak} = \frac{V_o(V_{in}-V_o)}{fLV_{in}} \quad (5.9)$$

5.3.2 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης

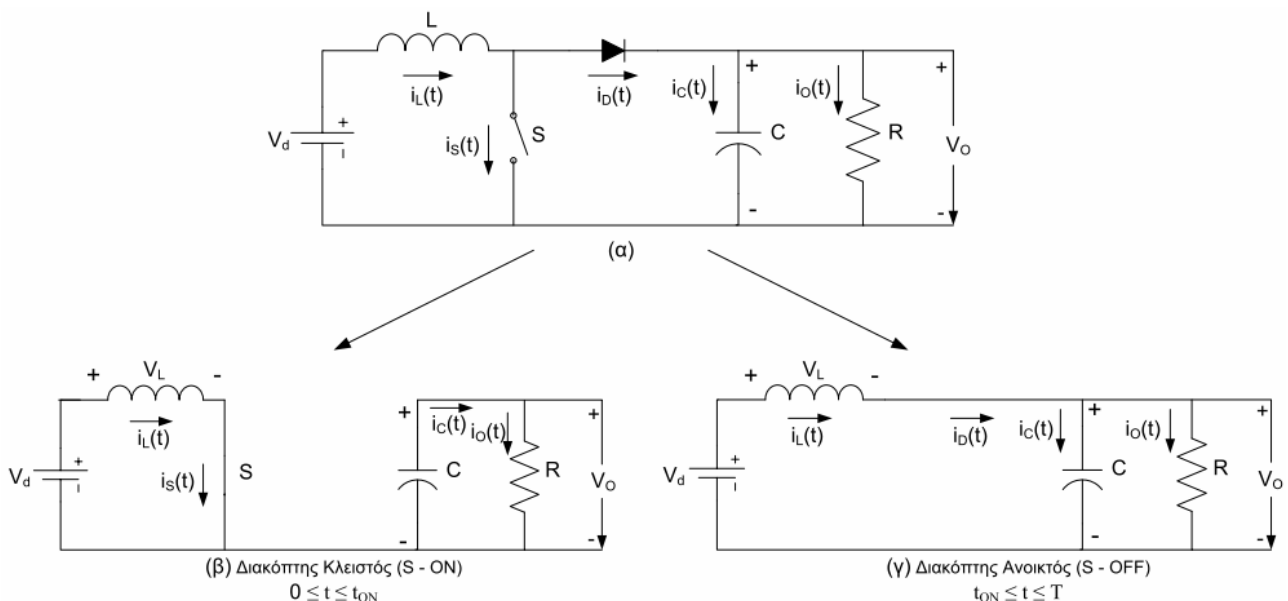
Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ανάλογη με αυτή που έγινε προηγουμένως για τον DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η περιγραφή ισχύει και εδώ για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης, παράγει μέση τάση εξόδου V_0 μεγαλύτερη από την DC τάση εισόδου του V_d . Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εισόδου V_d και η τάση εξόδου V_0 συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη σχέση[28].

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (5.10)$$

Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_0 είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d και άρα προκύπτει η ανάλογη σχέση για το ρεύμα εισόδου I_d , το ρεύμα εξόδου I_0 και τη σχετική διάρκεια αγωγής D :

$$P_d = P_0 \Rightarrow V_d * I_d = V_0 * I_0 \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = \frac{V_d}{V_0} \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = 1 - D \quad (5.11)$$

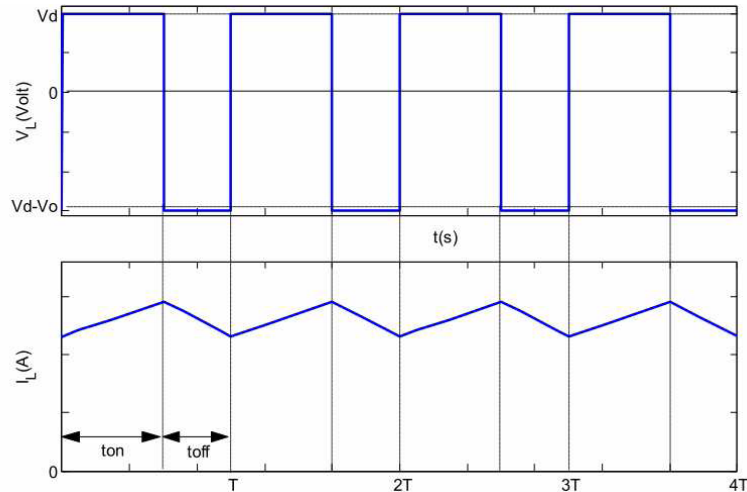
Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται και πάλι από τη σχέση. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το κύκλωμα του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.



Σχήμα 5.14. Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη

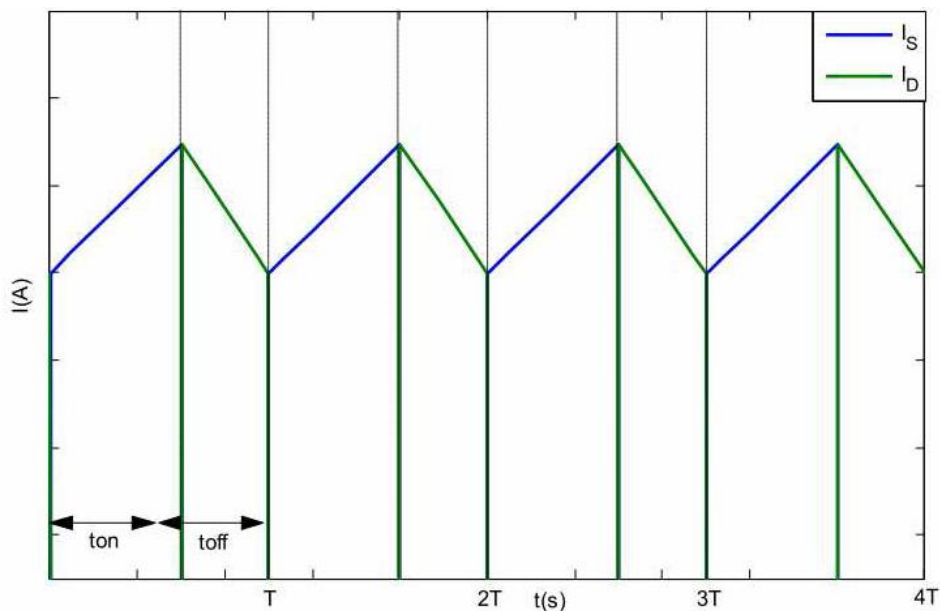
Όπως φαίνεται και από το σχήμα κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η διάοδος βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, απομονώνοντας τη βαθμίδα εξόδου από το υπόλοιπο κύκλωμα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση εισόδου $V_L=V_d$ και το ρεύμα του αυξάνει. Επομένως, κατά το χρόνο $0-t_{on}$ το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης S βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής, η αποθηκευμένη

στο πηνίο ενέργεια αποδίδεται στη βαθμίδα μέσω της διόδου. Όταν η διάδος είναι αγωγίμη, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το τρίτο σχήμα και η τάση του γίνεται $V_L=V_d-V_0$. Στο σχήμα παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη λειτουργία του με τη σχετική διάρκεια αγωγής $D=0,6$.



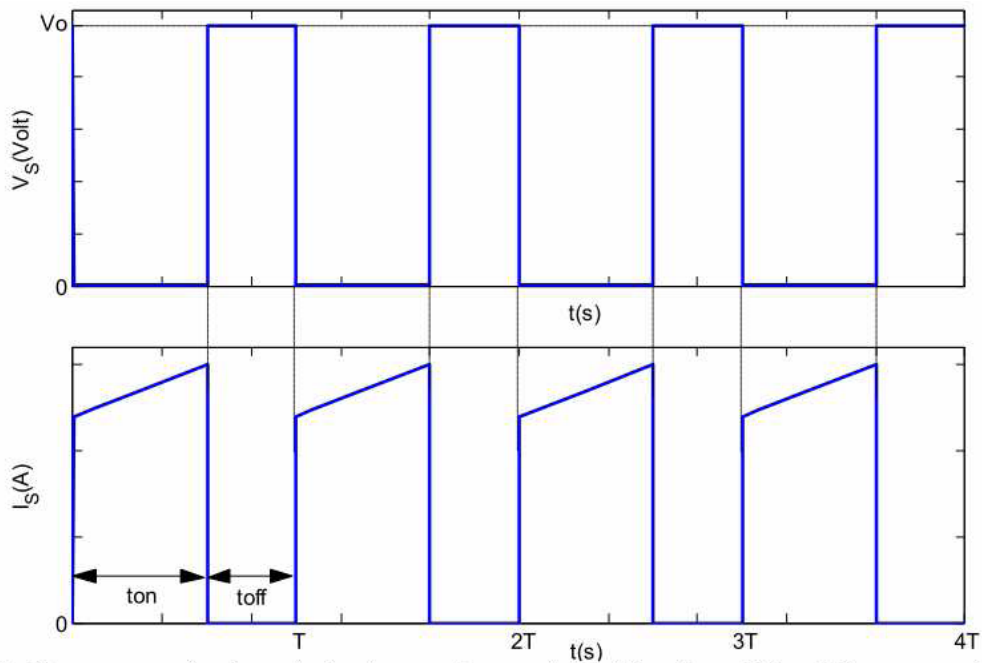
Σχήμα 5.15. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου DC-DC μετατροπέα ανύψωσης

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_s και της διόδου I_D , όπου κατά το χρόνο $0-t_{on}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{on}-T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη διάδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν:



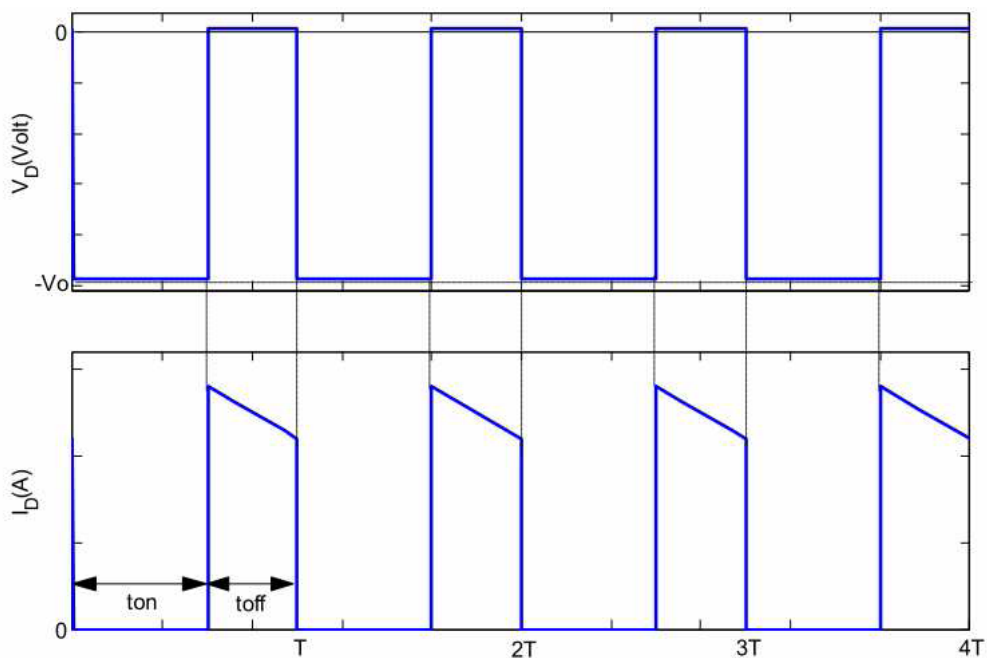
Σχήμα 5.16. Ρεύμα διακόπτη I_s και διόδου I_D DC-DC μετατροπέα ανύψωσης

Όπως φαίνεται από το σχήμα, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα του διακόπτη και της διόδου του DC-DC μετατροπέα ανύψωση τάσης.



Σχήμα 5.17. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διακόπτη DC-DC μετατροπέα ανύψωσης

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά τη κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εξόδου V_0 . Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος.



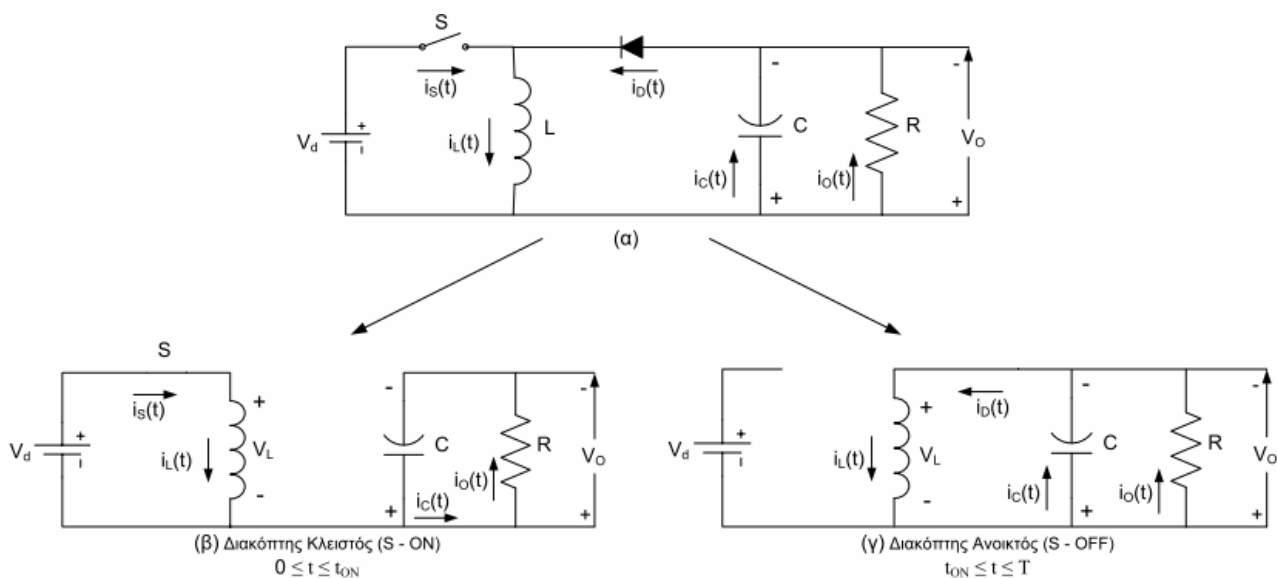
Σχήμα 5.18. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διόδου DC-DC μετατροπέα ανύψωση τάσης

Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η διάδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εξόδου V_0 . Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί οι κυματομορφές

αναφέρονται στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου, η οποία έχει αντίθετη πολικότητα από την τάση εξόδου. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος. Τέλος όταν ο διακόπτης δεν άγει, η δίοδος γίνεται αγώγιμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν.

5.3.3 Μικτός DC-DC μετατροπέας

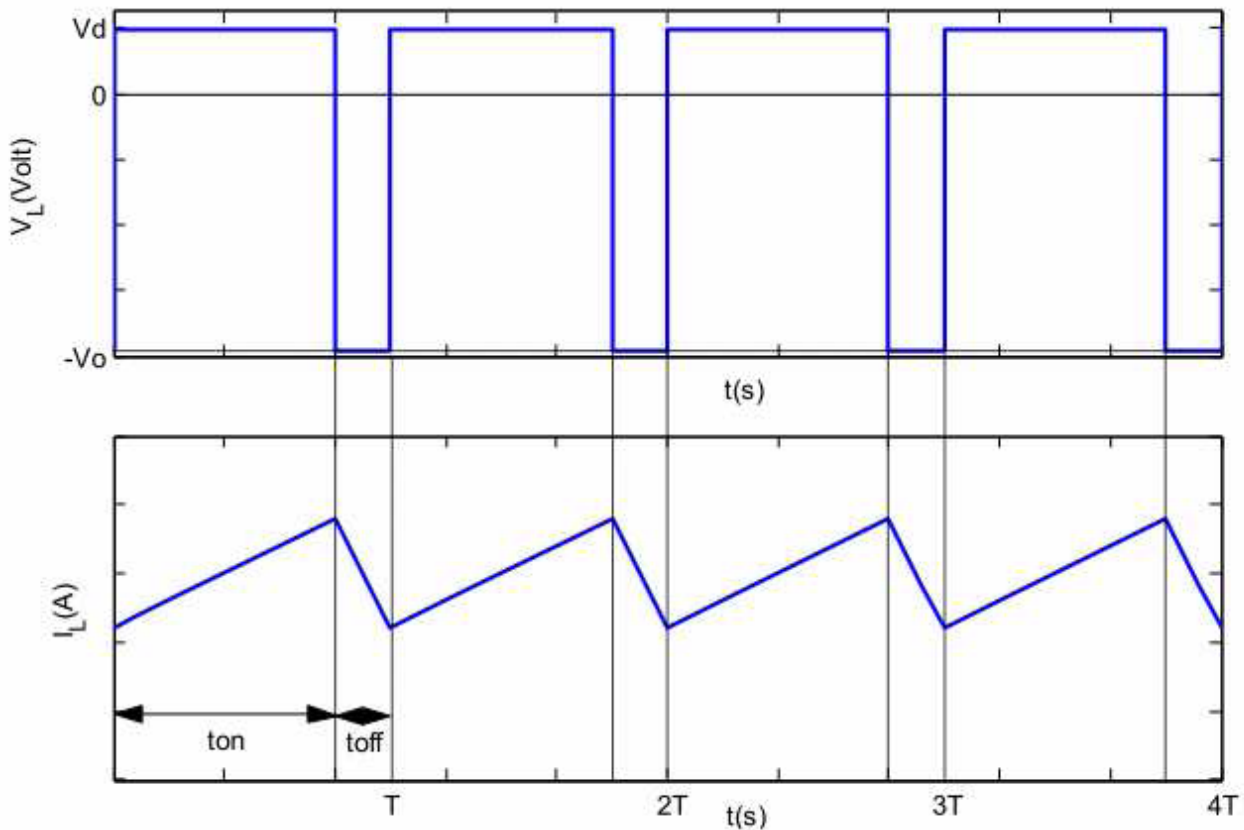
Ο μικτός DC-DC μετατροπέας έχει την ικανότητα να παράγει μέση τάση εξόδου V_0 και μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη από τη DC τάση εισόδου του V_d , αλλά με διαφορά πολικότητας. Συγκεκριμένα για μια περιοχή τιμών της διάρκειας αγωγής, ο μικτός μετατροπέας λειτουργεί σαν μετατροπέας υποβιβασμού, ενώ για μια άλλη περιοχή λειτουργεί σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Θα αναλυθεί ο μετατροπέας αυτός κατά τη συνεχή του λειτουργία. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του μικτού DC-DC μετατροπέα καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγώγιμου διακόπτη[29],[30].



Σχήμα 5.19. Κύκλωμα μικτού μετατροπέα DC-DC και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη

Να σημειωθεί ότι ο μικτός DC-DC μετατροπέας μπορεί να δημιουργηθεί και από τη σύνδεση σε σειρά των άλλων δύο βασικών τοπολογιών, δηλαδή το μετατροπέα ανύψωσης και το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση η τάση εξόδου του πρώτου θα είναι η τάση εισόδου του δεύτερου, αλλά τα ελεγχόμενα ημιαγώγιμα στοιχεία σε αυτή την περίπτωση είναι δύο. Ο έλεγχός τους είναι απλός, καθώς παλμοδοτούνται ταυτόχρονα και με την ίδια σχετική διάρκεια αγωγής. Ωστόσο, αν και ένας τέτοιος μικτός μετατροπέας δημιουργεί τάση εξόδου ίδιας πολικότητας με την τάση εισόδου, απαιτείται διπλάσιος αριθμός παθητικών και ενεργητικών στοιχείων για την κατασκευή του σε σχέση με τη τοπολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα. Για το λόγο αυτό, τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται ο μικτός μετατροπέας του σχήματος, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα όπου απαιτείται και αρνητική τάση τροφοδότησης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα που περιλαμβάνουν τελεστικούς ενισχυτές και σε DC τροφοδοτικά. Όμως, ο DC-DC μικτός μετατροπέας εφαρμόζεται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται η τάση εξόδου V_0 να παραμείνει σταθερή υπο συνθήκες μεταβαλλόμενης τάσης εισόδου V_d .

Όσον αφορά τη λειτουργία του μικτού DC-DC μετατροπέα, είναι παρόμοια με τη λειτουργία των άλλων δύο DC-DC μετατροπέων. Δηλαδή όταν ο διακόπτης είναι κλειστός όπως φαίνεται στο σχήμα η τάση της πηγής εφαρμόζεται. Όταν ο διακόπτης βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής τότε η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο αποδίδεται στη βαθμίδα εξόδου και το ρεύμα του πηνίου μειώνεται. Κατά τη χρονική αυτή περίοδο, το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο η οποία έχει περάσει σε κατάσταση αγωγής ενώ η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου $V_0 = -V_L$. Οι κυματομορφές του ρεύματος του πηνίου κατά τη συνεχή λειτουργία του διακόπτη φαίνονται παρακάτω με σχετική διάρκεια αγωγής $D=0.8$.



Σχήμα 5.20. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου

Είναι γνωστό ότι επειδή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας οι κυματομορφές επαναλαμβάνονται με περίοδο T , τότε το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου για μία περίοδο T πρέπει να ισούται με μηδέν.

$$\int_0^T V_L(t) dt = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{on}} V_L(t) dt + \int_{t_{on}}^T V_L(t) dt = 0 \quad (5.12)$$

Όπου t_{on} είναι το χρονικό διάστημα αγωγής του διακόπτη και T είναι η περίοδος παλμοδότησης, για την οποία ισχύει $T = t_{on} + t_{off}$, όπως φαίνεται και από το σχήμα. Η σχετική διάρκεια αγωγής ορίζεται και στην περίπτωση του μικτού μετατροπέα ως ο λόγος του του χρόνου αγωγής t_{on} προς τη περίοδο παλμοδότησης T και δίνεται από τη σχέση 5.13.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (5.13)$$

Προηγουμένως όμως αναφέρθηκε ότι η τάση του πηνίου κατά το χρόνο $0 - t_{on}$, όπου ο διακόπτης άγει, είναι ίση με την τάση εισόδου, ενώ κατά το χρόνο $t_{on} - T$, όπου ο διακόπτης δεν άγει, η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου. Δηλαδή για τη τάση του πηνίου ισχύει:

$$V_L(t) = \begin{cases} V_d & , 0 \leq t \leq t_{ON} \\ -V_O & , t_{ON} \leq t \leq T \end{cases} \quad (5.14)$$

Επομένως, η σχέση μετατρέπεται σύμφωνα με τις σχέσεις και επειδή οι τάσεις εισόδου και εξόδου για μια περίοδο θεωρούνται σταθερές, προκύπτει:

$$\int_0^{t_{ON}} V_d dt + \int_{t_{ON}}^T (-V_O) dt = 0 \Rightarrow V_d \cdot \int_0^{t_{ON}} dt + (-V_O) \cdot \int_{t_{ON}}^T dt = 0 \Rightarrow V_d \cdot t_{ON} + (-V_O) \cdot (T - t_{ON}) = 0$$

(5.15)

$$V_d \cdot t_{ON} = V_O \cdot (T - t_{ON}) \Rightarrow \frac{V_O}{V_d} = \frac{t_{ON}}{(T - t_{ON})} \Rightarrow \frac{V_O}{V_d} = \frac{\frac{t_{ON}}{T}}{\left(\frac{T}{T} - \frac{t_{ON}}{T}\right)} \quad (5.16)$$

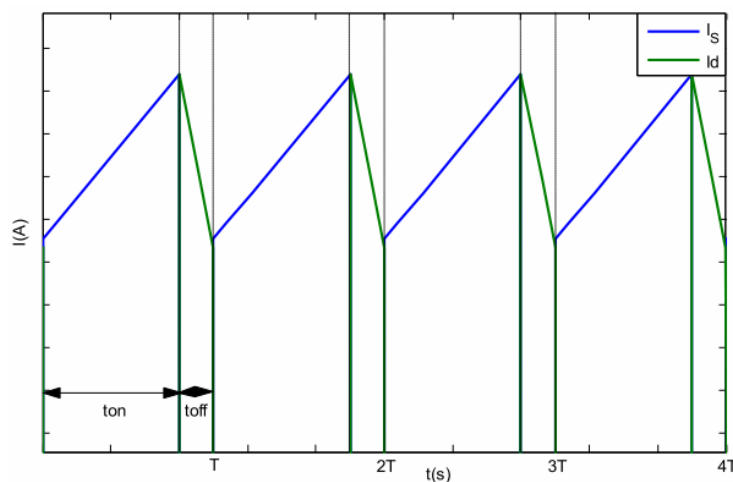
Και τελικά προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου V_d και την τάση εξόδου V_O του μικτού DC-DC μετατροπέα σε συνάρτηση της σχετικής διάρκειας αγωγής D και είναι αυτή που ακολουθεί.

$$\frac{V_O}{V_d} = \frac{D}{1-D} \quad (5.17)$$

Επιπλέον ισχύει:

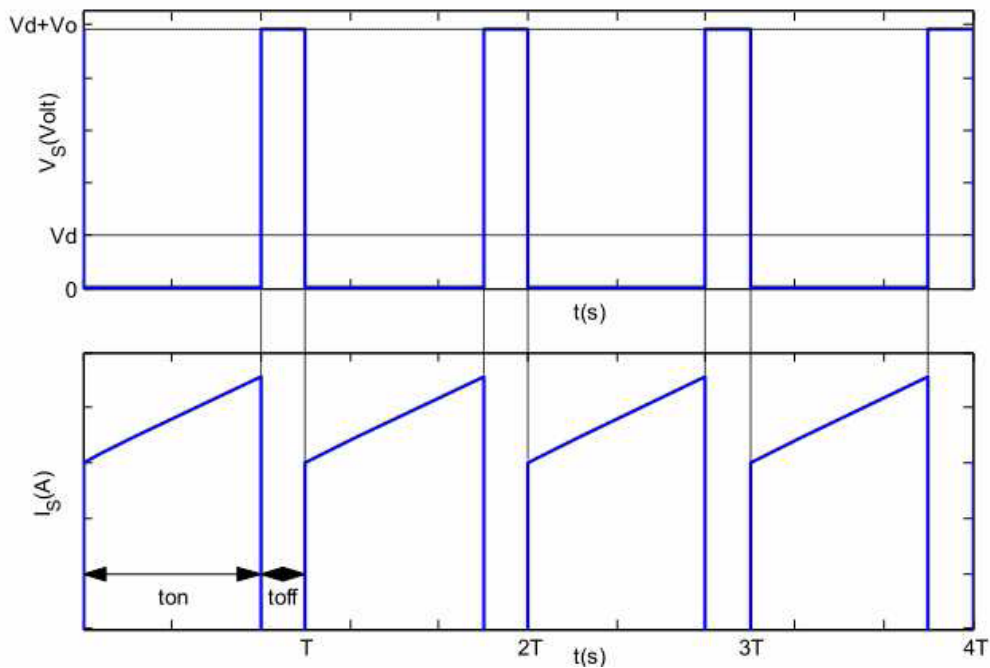
$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D} \quad (5.18)$$

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_s και της διόδου I_D για συνεχή λειτουργία και για σχετική διάρκεια αγωγής $D=0.8$. Κατά το χρόνο $0-t_{on}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{on}-T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν.



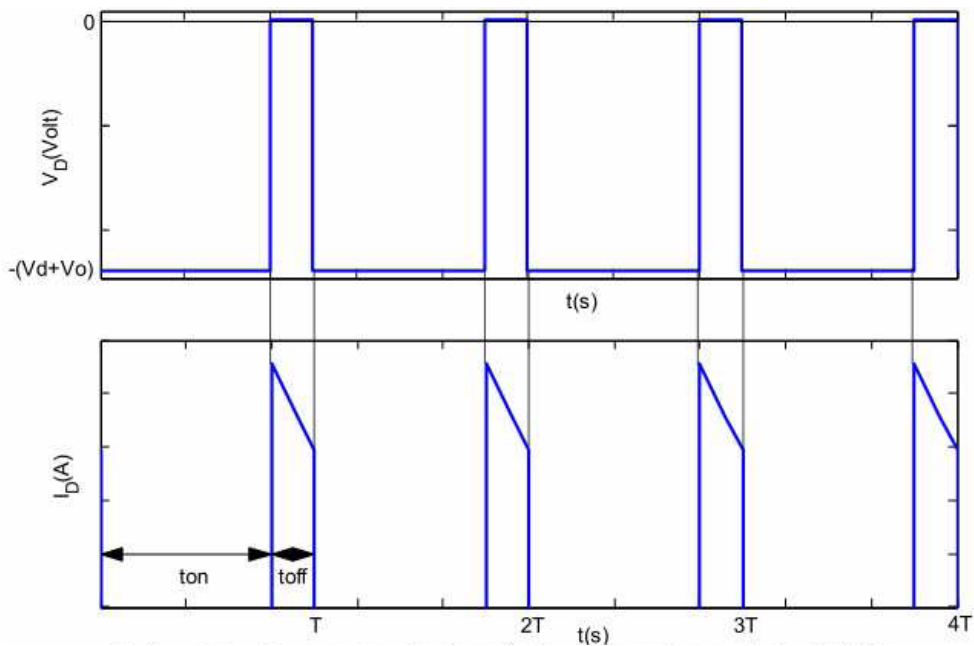
Σχήμα 5.21. Ρεύμα διακόπτη I_s και διόδου I_D

Στο πάνω σχήμα φαίνεται ότι τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα του διακόπτη και της διόδου του μικτού DC-DC μετατροπέα κατά τη συνεχή λειτουργία του.



Σχήμα 5.22. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διακόπτη μικτού DC-DC μετατροπέα

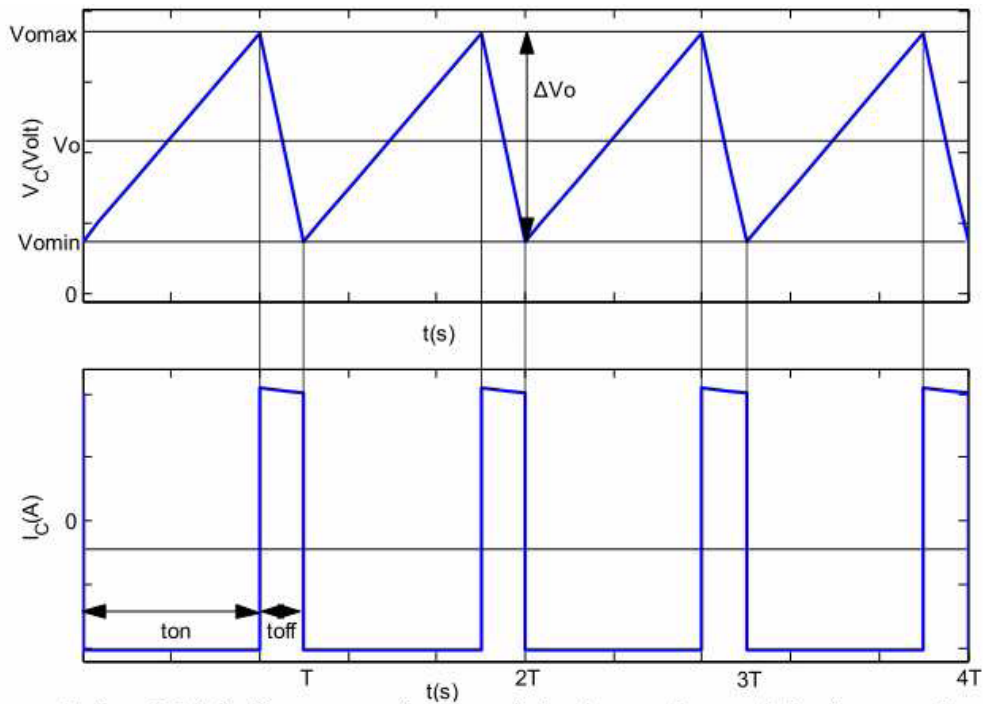
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων εισόδου και εξόδου $V_d + V_o$. Αυτό φαίνεται και από το ισοδύναμο κύκλωμα.



Σχήμα 5.23. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διόδου μικτού DC-DC μετατροπέα

Όταν ο διακόπτης άγει η διόδος είναι σε αποκοπή και η τάση στα άκρα της είναι ίση με το αντίθετο του αθροίσματος των τάσεων εισόδου και εξόδου $-(V_d + V_o)$. Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί

οι κυματομορφές αναφέρονται στη στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος. Αντίθετα, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η διόδος γίνεται αγωγίμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν. Για μια ολοκληρωμένη ολοκληρωμένη άποψη της λειτουργίας του μικτού DC-DC μετατροπέα, παρουσιάζονται και οι κυματομορφές του ρεύματος i_c και της τάσης v_c του πυκνωτή της βαθμίδας εξόδου. Οι κυματομορφές αυτές φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.24. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πυκνωτή

5.5 Έλεγχος τάσης εξόδου μετατροπέων DC-DC με την τεχνική PWM

Ο έλεγχος της μέσης τιμής της τάσης εξόδου ενός μετατροπέα DC-DC μπορεί να επιτευχθεί με την αυξομείωση του εύρους των παλμών της τάσης εξόδου. Στο σχήμα παρουσιάζεται ένα κύκλωμα ελέγχου το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM) για να επιτευχθεί ο έλεγχος της τάσης εξόδου του μετατροπέα στις διάφορες διακυμάνσεις της τάσης εισόδου ή του κυκλώματος ισχύος. Όπως διαπιστώνεται και από το σχήμα, η τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται από τον ενισχυτή σφάλματος A_1 που στην έξοδό του παρέχει μια τάση E_0 , η οποία αυξομειώνεται σύμφωνα με τις διάφορες διακυμάνσεις της τάσης εξόδου. Αν η τιμή της τάσης εξόδου αυξηθεί τότε η DC τάση E_0 αυξάνεται και αντίθετα μειώνεται όταν η τάση εξόδου μειωθεί. Στην συνέχεια η τάση E_0 εφαρμόζεται στη μια είσοδο του ενισχυτή σύγκρισης A_2 . Στην άλλη είσοδο του ενισχυτή A_2 εφαρμόζεται η γνωστή τριγωνική κυματομορφή η οποία παράγεται από μια γεννήτρια. Επομένως ο ενισχυτής A_2 συγκρίνει την τριγωνική κυματομορφή, η οποία παίρνει μόνο θετικές τιμές, με την τάση E_0 , σχήμα εφαρμόζεται στο ημιαγωγικό στοιχείο του κυκλώματος ισχύος που στο παράδειγμα αυτό είναι ένα Mosfet. Στο σχήμα παρουσιάζεται ο ορισμός της τεχνικής ελέγχου διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Η συχνότητα των παλμών έναυσης ή συχνότητα λειτουργίας του διακόπτη εξαρτάται από τη διακοπτική συχνότητα του η οποία μπορεί να είναι από 20KHz έως 300KHz ή και παραπάνω. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυξάνοντας τη συχνότητα λειτουργίας(που ρυθμίζεται από τη συχνότητα τριγωνικής

κυματομορφής) μειώνεται το μέγεθος του φίλτρου εξόδου του μετατροπέα αλλά αυξάνονται οι απώλειες του κυκλώματος ισχύος και γιατί η επιλογή διακοπτικής συχνότητας πρέπει να γίνει σε συνδυασμό και με τις δύο αυτές παραμέτρους. Αυξάνοντας όμως τη συχνότητα λειτουργίας, αυξάνονται οι απώλειες του μετατροπέα καθώς και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Επομένως, η επιλογή συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα πρέπει να γίνει σύμφωνα με το απαιτούμενο μέγεθος του μετατροπέα, την απαιτούμενη απόδοση και την απαιτούμενη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή[31],[32].

5.6 Ταξινόμηση των αλγόριθμων αναζήτησης

Οι πρώτες μέθοδοι, που χρησιμοποιήθηκαν σε αεροδιαστημικές εφαρμογές, χρονολογούνται από τη δεκαετία του 70' σε εταιρίες ή ερευνητικά κέντρα όπως η εταιρία Honeywell Inc ή η Nasa.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τις διαφορετικές παραμέτρους τους. Αν ομαδοποιούνται με βάση τις μεταβλητές που παίρνουν μέρος στην διαδικασία της αναζήτησης, τότε χωρίζονται στη μέθοδο των δύο μεταβλητών και στη μέθοδο της μίας μεταβλητής. Η μέθοδος των δύο μεταβλητών χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της τάσης V_{pv} , και ρεύματος I_{pv} της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού. Μεταξύ άλλων μπορούν να αναφερθούν οι μέθοδοι της διαφοροποίησης (Differentiation method), της διαταραχής και παρατήρησης (Perturbation and Observation, P&O method) και της σταδιακής αγωγιμότητας (Conductance Incremental, C.I method). Από την άλλη μπορούν να διακριθούν και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μια μεταβλητή. Σχετικά με αυτήν την ομάδα είναι οι μέθοδοι της τάσης ανατροφοδότησης, ανοιχτοκύκλωμα φωτοβολταϊκού κυττάρου και η μέθοδος του ρεύματος βραχυκυκλώσης.

Άλλες ταξινομήσεις μπορούν να βασιστούν στη λειτουργία της μεθόδου ή στη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται. Έτσι, δύο κατηγορίες μπορούν να παρουσιαστούν: άμεσες και έμμεσες μέθοδοι.

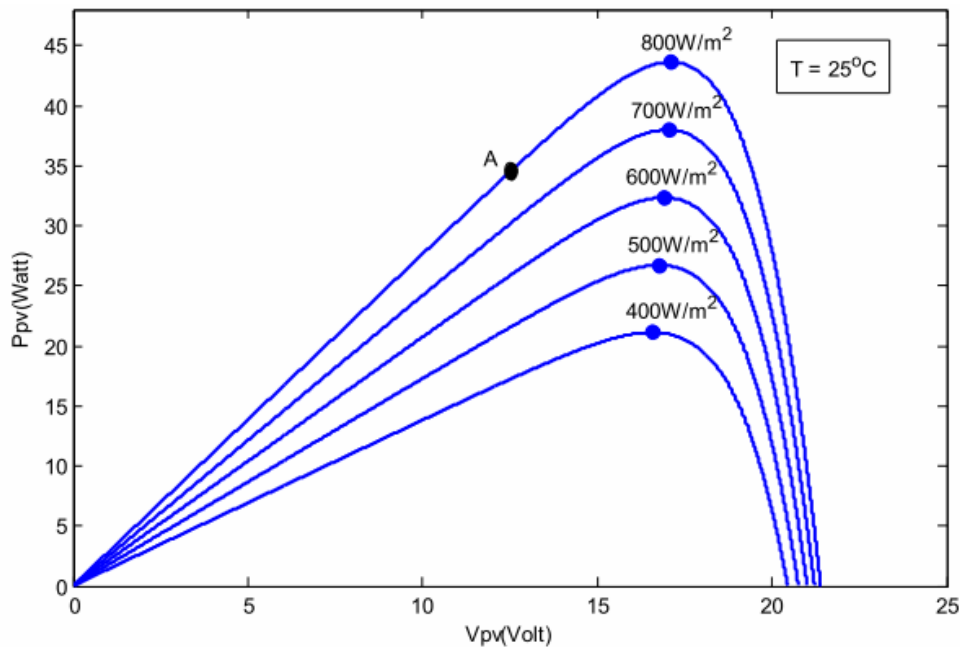
Στις άμεσες μεθόδους περιλαμβάνονται οι μέθοδοι αυτοί που χρησιμοποιούν μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού. Από αυτές, και λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις των σημείων λειτουργίας της γεννήτριας, βρίσκουμε το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητοι της γνώσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Έτσι, το σημείο λειτουργίας είναι ανεξάρτητο της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας. Το πρόβλημα είναι τα ανεπιθύμητα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια στην αναζήτηση. Οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την ομάδα είναι η μέθοδος της διαφοροποίησης, της τάσης ανάδρασης, P&O, C.I[33], αυτοταλάντωσης όπως επίσης και της ασαφούς λογικής.

Οι έμμεσες μέθοδοι είναι βασισμένες στη χρήση μιας βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει παραμέτρους και στοιχεία όπως για παράδειγμα, χαρακτηριστικές καμπύλες της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, ή στη χρήση των μαθηματικών λειτουργιών που λαμβάνονται από τα εμπειρικά στοιχεία για να υπολογίσει MPPT. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται μια προγενέστερη αξιολόγηση της φ/β γεννήτριας, ή αλλιώς είναι βασισμένο στη μαθηματική σχέση που λαμβάνεται από εμπειρικά στοιχεία, τα οποία δεν ικανοποιούν όλες τις κλιματολογικές συνθήκες. Οι παρακάτω μέθοδοι ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία προσαρμογή καμπύλων πίνακας αναζήτησης, ανοιχτοκύκλωμα φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

5.6.1 Διατάραξης και αναζήτησης

Ο αλγόριθμος Διατάραξης και Παρατήρησης είναι αυτός που εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις συστημάτων φωτοβολταϊκών στοιχείων, λόγω της ευκολίας της εφαρμογής του. Η λειτουργία του αλγόριθμου μπορεί να περιγραφεί με μεγαλύτερη ευκολία αν λάβουμε υπόψη τη χαρακτηριστική καμπύλη P-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα[34].



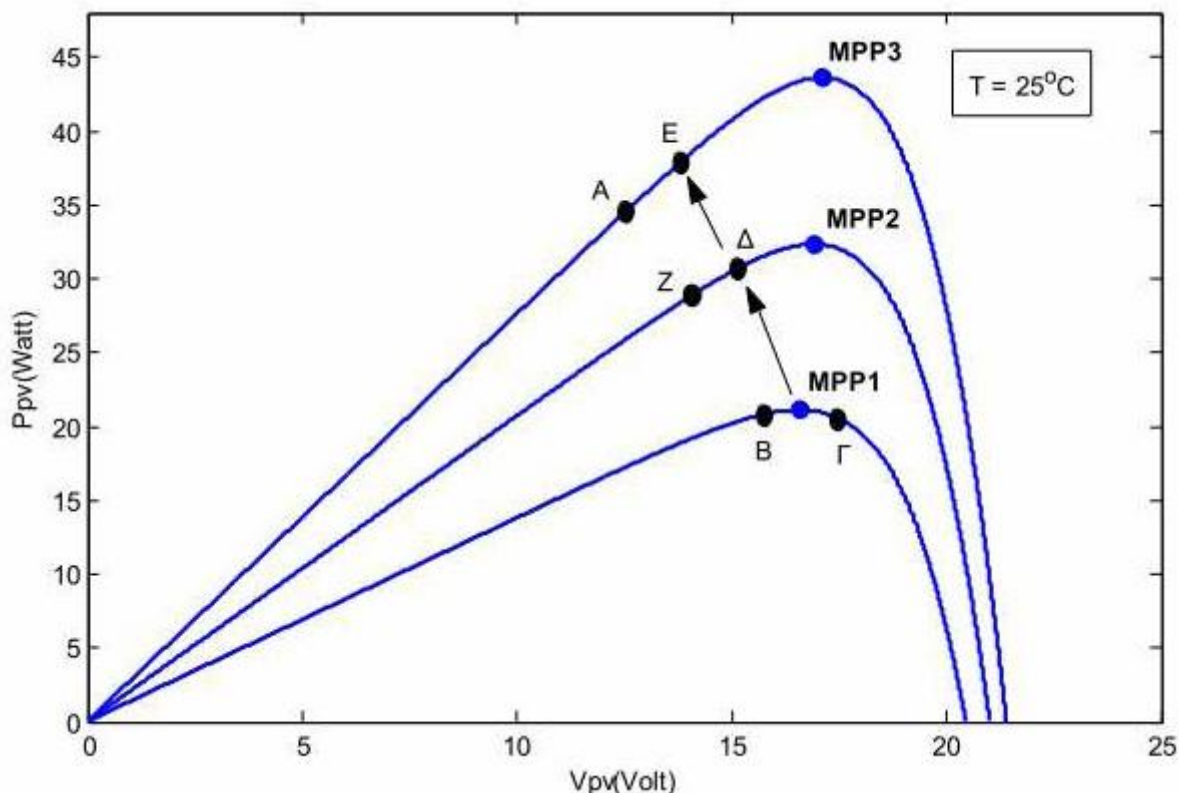
Σχήμα 5.25.

Αν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης, το ΜΣΙ θα ανιχνευτεί με μεταβολή της τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και έλεγχο της μεταβολής της ισχύος ΔP . Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στο σημείο Α της καμπύλης, το οποίο βρίσκεται πιο αριστερά από το ΜΣΙ. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε αυτό το σημείο λειτουργίας θα λειτουργούν με μία ορισμένη τάση και θα δίνουν μία συγκεκριμένη ισχύ μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή. Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης ακολουθεί μια απλή διαδικασία για να ανιχνεύσει το ΜΡΡ. Προκαλεί μια διαταραχή στην τάση και ελέγχει τη μεταβολή της ισχύος. Εφόσον έχει υποτεθεί ότι το σημείο λειτουργίας είναι πιο αριστερά από το ΜΡΡ, αν αυξηθεί η τάση το σημείο λειτουργίας θα μετατοπιστεί σε περιοχές της καμπύλης με μεγαλύτερη ισχύ και άρα η μεταβολή της ισχύος θα είναι θετική. Επομένως το επόμενο βήμα του αλγορίθμου θα είναι να αυξήσει την τάση μέχρι η μεταβολή της ισχύος να ξαναγίνει θετική.

Ο αλγόριθμος όπως φαίνεται είναι απλούστατος και δεν βασίζεται σε πολύπλοκες εξισώσεις και πράξεις αλλά σε μια απλή παρατήρηση. Αν γίνει όμως μια πιο καλή ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθεί ο αλγόριθμος, θα γίνει αντιληπτό ότι η μέθοδος είναι δύσκολο να το εντοπίσει, δε θα μπορεί να διακρίνει ότι αυτό είναι το ΜΣΙ ώστε να σταματήσει τις διαταραχές της τάσης. Επομένως, με τη μέθοδο διατάραξης και παρατήρησης, δεν εντοπίζεται το ΜΣΙ αλλά γίνεται μία ταλάντωση του σημείου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μία περιοχή κοντά στο ΜΣΙ. Επιπλέον στο πιο πάνω σχήμα φαίνεται ότι όσο μικρότερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο πιο επίπεδη γίνεται η καμπύλη P-V. Το γεγονός αυτό εισάγει μια δυσκολία εντοπισμού του ΜΣΙ με το

συγκεκριμένο αλγόριθμο, γιατί λόγω της μικρής κλίσης της καμπύλης, η μεταβολή της ισχύος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μεταβολή της τάσης. Αυτό σημαίνει ότι για να παρατηρηθεί αξιοσημείωτη μεταβολή στην ισχύ, θα πρέπει να γίνει μια πολύ μεγάλη αλλαγή στην τάση.

Πρόβλημα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να προκληθεί και από την απότομη αλλαγή των καιρικών συνθηκών. Για να γίνει πιο κατανοητό θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα μιας τέτοιας κατάστασης. Το παράδειγμα μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητό, λαμβάνοντας υπόψιν το σχήμα που ακολουθεί:

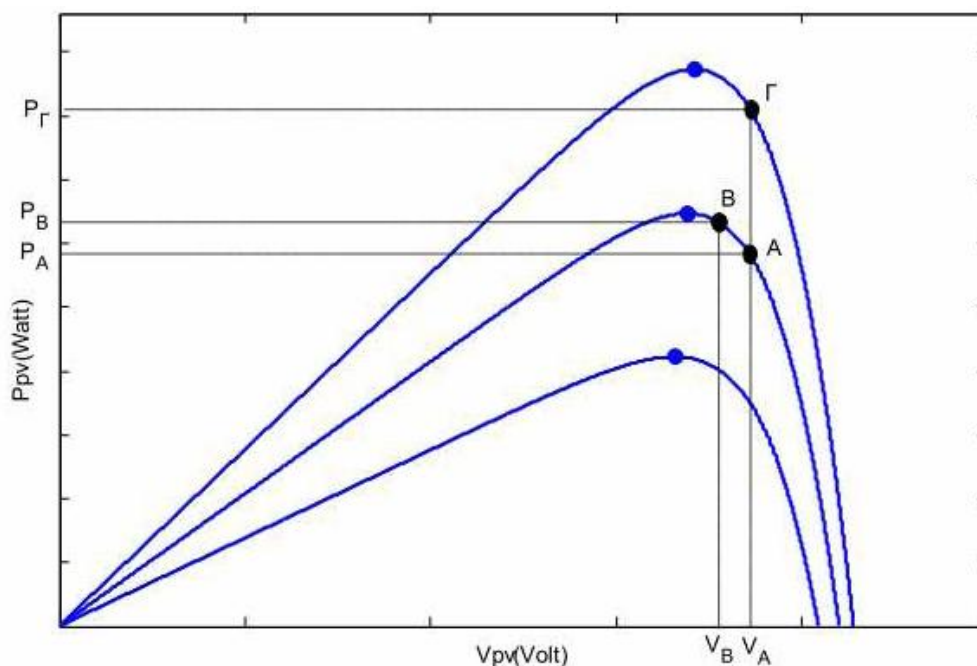


Σχήμα 5.26.

Έστω ότι ο ανιχνευτής ΜΣΙ που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης ταλαντεύεται σε μια περιοχή πολύ κοντά στο ΜΣΙ, δηλαδή μεταξύ των σημείων Β και Γ. Αν για οποιοδήποτε λόγο, αυξηθεί η ηλιακή ακτινοβολία αυτόματα τα φωτοβολταικά στοιχεία θα λειτουργούν με βάση κάποια άλλη καμπύλη που βρίσκεται πιο πάνω από την πρώτη. Άρα, οποιαδήποτε αλλαγή της τάσης οδηγεί σε θετική μεταβολή ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή αλλάζει το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταικών στοιχείων και βρίσκεται σε καμπύλη μεγαλύτερης ισχύος από τη προηγούμενη. Συγκεκριμένα έστω ότι το νέο σημείο λειτουργίας μετά τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το Δ. Τότε όπως φαίνεται και από το σχήμα η λειτουργία μεταφέρεται από τα σημεία της πρώτης καμπύλης σε αυτά της δεύτερης. Επομένως, αν το προηγούμενο σημείο λειτουργίας ήταν το Γ, τότε ο αλγόριθμος θα έπρεπε να μειώσει την τάση μέχρι η μεταβολή ισχύος να γίνει αρνητική. Καθώς γίνεται η μείωση της τάσης, αλλάζει η ακτινοβολία και το νέο σημείο λειτουργίας είναι το Δ, στο οποίο τα φωτοβολταικά στοιχεία παράγουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το Γ. Επομένως η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = P_{\Delta} - P_{\Gamma}$ είναι θετική και άρα ο αλγόριθμος θα συνεχίσει τη μείωση της τάσης. Αυτό οδηγεί σε νέο σημείο λειτουργίας Ζ, το οποίο όμως είναι πιο μακριά από το ΜΡΡ2 από ότι το Δ. Δηλαδή, με την τελευταία μεταβολή τάσης που έγινε από τον αλγόριθμο, το σύστημα απομακρύνθηκε από το

καινούριο μέγιστο σημείο ισχύος MPP2. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να συνεχίζεται και σε άλλες καμπύλες, αν αυξανόταν κ άλλο η ηλιακή ακτινοβολία και ο ΑΜΣΙ θα απομακρυνόταν ακόμα περισσότερο από το ΜΣΙ. Για παράδειγμα από το Δ θα μπορούσε το σημείο λειτουργίας να μετακινηθεί στο Ε και μετά στο Α. Επομένως, η προσέγγιση του μέγιστου σημείου ισχύος θα γινόταν μόνο αν οι καιρικές συνθήκες σταθεροποιούνταν. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να προκύψει τις μέρες που έχει συννεφιά, λόγω της συχνής και απότομης αλλαγής του καιρού και να προκαλέσει σημαντικές απώλειες ισχύος.

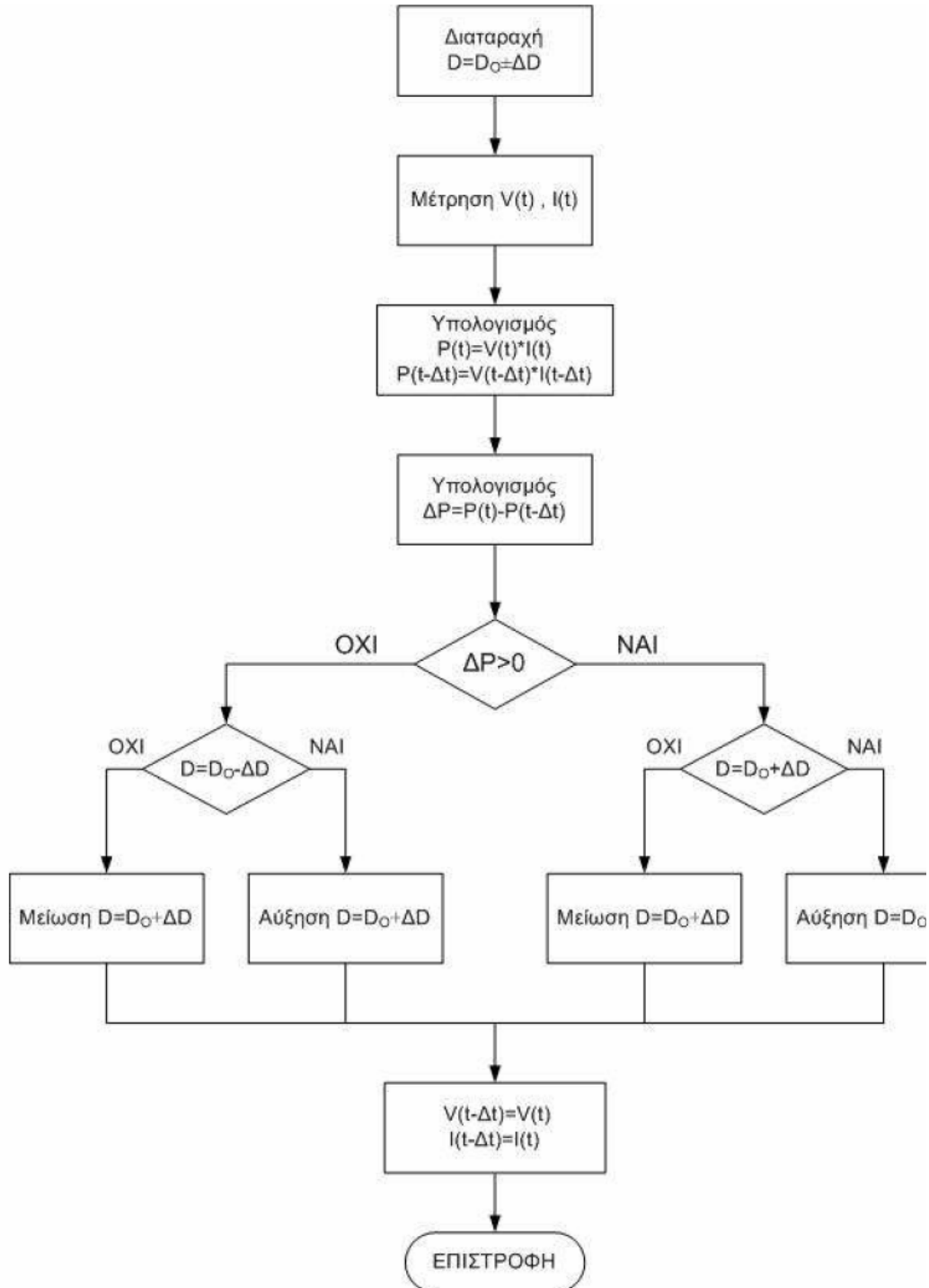
Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί κάποιοι τρόποι βελτίωσης του αλγορίθμου. Μια απλή τροποποίηση είναι η εισαγωγή μιας συνάρτησης καθυστέρησης, η οποία θα διακόπτει τις αλλαγές της τάσης σε περίπτωση που το πρόσημο της μεταβολής ισχύος εναλλάσσεται διαδοχικά πολλές φορές. Όταν παρατηρείται δηλαδή μια έντονη ταλάντωση γύρω από ένα σημείο, σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί κοντά στο μέγιστο σημείο ισχύος και οπότε η συνάρτηση καθυστέρησης θα επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου να αντιλαμβάνεται ότι εντόπισε το ΜΡΡΤ ώστε να διακόπτει τις διαταραχές. Η τροποποίηση αυτή συμβάλλει στη μείωση των ταλαντώσεων και στη αύξηση της απόδοσης του αλγορίθμου κάτω από σταθερές καιρικές συνθήκες. Το μειονέκτημα της τροποποίησης είναι ότι επιβραδύνει την ανίχνευση του ΜΣΙ σε περίπτωση μεταβαλλόμενων συνθηκών. Μια άλλη μέθοδος βελτίωσης είναι η μέτρηση της ισχύος για μια τιμή της τάσης V_A έπειτα η διαταραχή της τάσης στην τιμή V_B και μέτρηση της ισχύος σε αυτήν την τιμή και τέλος αλλαγή της τάσης για επιστροφή στην αρχική τιμή V_A και μέτρηση της ισχύος εκ νέου. Αυτό μπορεί να φανεί καλύτερα στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.28.

Έστω ότι αρχικά το σύστημα λειτουργεί στο σημείο Α με τάση V_A και ισχύ P_A , και γίνεται διαταραχή της τάσης οπότε και το σημείο λειτουργίας μετακινείται στο Β όπου η τάση είναι V_B και η ισχύς P_B . Αν αντιστραφεί η μεταβολή της τάσης, δηλαδή αν η τάση ξαναγίνει V_A και μετρηθεί η ισχύς για την τιμή αυτή της τάσης, τότε το σύστημα μπορεί να ελέγξει αν το σημείο λειτουργίας είναι το Α, οπότε η καμπύλη λειτουργίας P-V δεν έχει μεταβληθεί, ή αν το σημείο λειτουργίας είναι το Γ, οπότε η καμπύλη λειτουργίας P-V είναι διαφορετική από πριν. Με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος καθορίζει αν έχει μεταβληθεί η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς σε μια τέτοια περίπτωση η

επιστροφή στην τάση V_A , διαδικασία η οποία δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να διακρίνει τις αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Μια τέτοια διαδικασία όμως είναι φανερό ότι επιβραδύνει σημαντικά τον αλγόριθμο. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης.



Σχήμα 5.29. Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου Διατάραξης και Παρατήρησης

5.6.2 Αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental conductance)

Ο αλγόριθμος της αυξητικής αγωγιμότητας βασίζεται σε μια απλή μαθηματική ανάλυση[36]. Η ισχύς μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος. Άρα για να βρούμε τη μέγιστη τιμή της ισχύος μπορούμε να παραγωγίσουμε την ισχύ ως προς κάποια από τις δύο μεταβλητές, δηλαδή ως προς την τάση ή ως προς το ρεύμα, και να θέσουμε την εξίσωση που θα προκύψει ίση με το μηδέν. Παραγωγίζουμε ως προς την τάση και προκύπτει ότι στο ΜΣΙ ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (5.19)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η σχέση:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (5.20)$$

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης εκφράζει την αυξητική αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ο δεύτερος είναι η αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή η στιγμιαία αγωγιμότητα με αρνητικό πρόσημο. Επομένως, προκύπτει η σχέση ελέγχου για τη ανίχνευση του ΜΣΙ, όπου στο σημείο αυτό, σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, πρέπει τα δύο μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω να είναι ίσα. Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν επίσης κάποιες ανισοτικές σχέσεις, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να διακρίνει αν το σημείο λειτουργίας είναι αριστερά ή δεξιά του ΜΣΙ και επομένως να κάνει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να προσεγγίσει το ΜΣΙ. Παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} = 0 \right) \quad (5.21)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) \quad (5.22)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} < 0 \right) \quad (5.23)$$

Οι δύο τελευταίες ανισώσεις χρησιμοποιούνται από τον ΑΜΣΙ για να διαπιστωθεί αν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση στο ΜΣΙ V_{MPP} ενώ παράλληλα ελέγχεται και η τιμή του ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Επομένως, οι δύο αυτές ανισώσεις καθορίζουν τον τρόπο μεταβολής της τάσης, δηλαδή αν πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί, έτσι ώστε να προσεγγίσει το ΜΡΡΤ. Η τάση μεταβάλλεται συνέχεια, έτσι όπως ορίζεται από την ανίσωση που ισχύει κάθε φορά για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, μέχρι να ικανοποιείται η πρώτη εξίσωση. Σε περίπτωση που ισχύει η πρώτη σχέση, έχει επιτευχθεί το ΜΣΙ και ο ΑΜΣΙ ρυθμίζει και κρατάει την λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε αυτό το σημείο μέχρι να παρατηρηθεί κάποια αλλαγή στο ρεύμα. Οποιαδήποτε αλλαγή στο ρεύμα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τον επιπλέον έλεγχο της τιμής του ρεύματος, ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται την αλλαγή των καιρικών συνθηκών και επομένως να ανταποκρίνεται καλύτερα σε περιπτώσεις απότομης αλλαγής της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που τον καθιστά καλύτερο από τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Επιπλέον, ο ΑΜΣΙ με

αλγόριθμο αυξητικής δεν οδηγεί σε ταλάντωση γύρω από το ΜΣΙ, αλλά σε σταθερή λειτουργία στο ΜΣΙ μέχρι να παρατηρηθεί αλλαγή του ρεύματος και συνεπώς της φωτεινότητας ή της θερμοκρασίας.

Μία σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθεί ο αλγόριθμος παρουσιάζεται παρακάτω. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο τιμές της τάσης και δύο τιμές του ρεύματος και ελέγχει τις μεταβολές των δύο μεγεθών. Συγκεκριμένα, αν $dV=0$ και $dI=0$, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν έχουν αλλάξει και το σύστημα λειτουργεί ακόμα στο MPPT. Εάν $dV=0$ και $dI>0$, η ακτινοβολία έχει αυξηθεί με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση MPP. Επομένως ο ΑΜΣΙ αυξάνει την τάση λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων για να ακολουθήσει το νέο ΜΣΙ. Αντίθετα, αν $dV=0$ και $dI<0$, η ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί, μειώνοντας τη τάση ΜΣΙ και ο ΑΜΣΙ μειώνει τη τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για να εντοπίσει το νέο ΜΣΙ. Σε περίπτωση που οι μεταβολές στη τάση και το ρεύμα δεν είναι μηδέν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ανισώσεις για να καθορίσουν την κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να αλλάξει η τάση προκειμένου να επιτευχθεί το ΜΣΙ. Αν ισχύει:

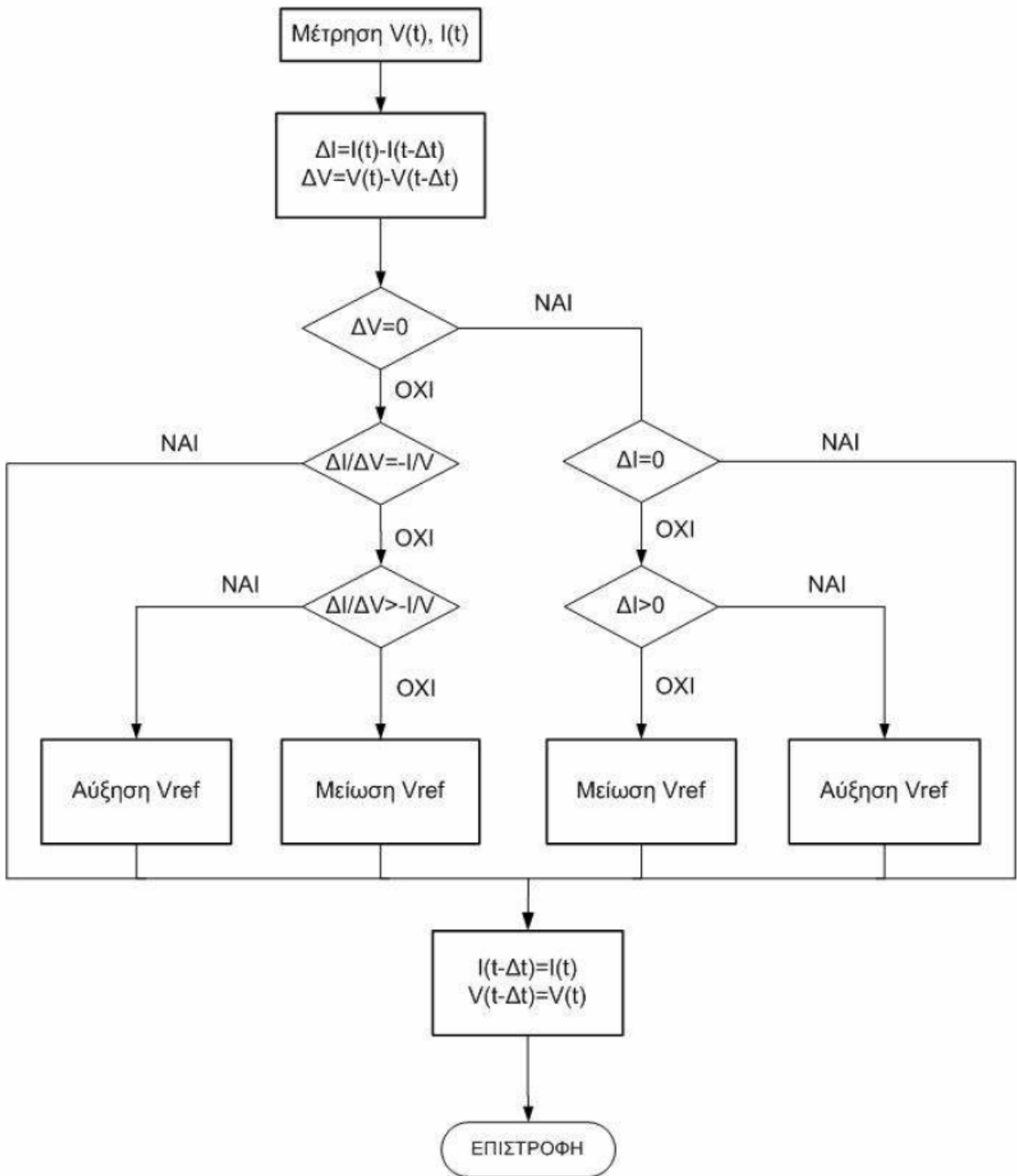
$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{τότε} \quad \frac{dP}{dV} > 0 \quad (5.24)$$

Και το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι αριστερά από το MPPT στην καμπύλη P-V. Άρα η τάση της φωτοβολταϊκής πρέπει να αυξηθεί για να προσεγγιστεί το MPPT. Αντίστοιχα αν ισχύει:

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{τότε} \quad \frac{dP}{dV} < 0 \quad (5.25)$$

και το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας βρίσκεται στα δεξιά του MPP στην καμπύλη P-V. Άρα η τάση πρέπει να μειωθεί για να ανιχνευθεί το ΜΣΙ.

Συμπερασματικά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας παρουσιάζει το βασικό πλεονέκτημα έναντι του αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης, ότι έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει και όχι να παρατηρήσει την κατεύθυνση στην οποία πρέπει να διαταράξει το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για να προσεγγίσει το MPPT. Κατά συνέπεια κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, αποφεύγεται η περίπτωση λανθασμένης μεταβολής της τάσης και απόκλισης από το ΜΣΙ, όπως συμβαίνει με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Επιπλέον μπορεί να προσδιορίσει πότε έχει προσέγγιση το ΜΣΙ, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται πο ταλαντώσεις γύρω από αυτό. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας.

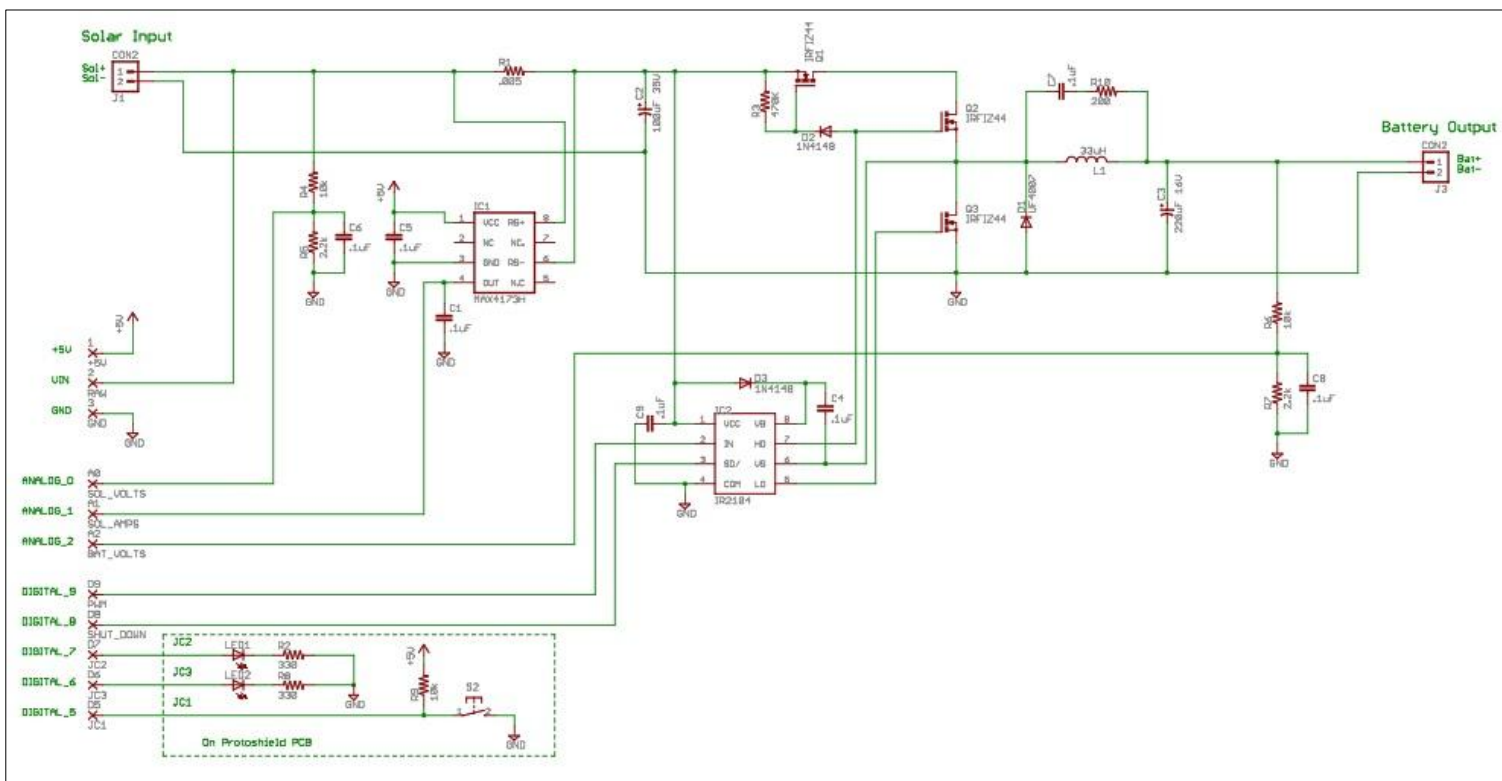


Σχήμα 5.30. Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου αυξητικής αγωγιμότητας

5.7 Κατασκευή DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, ο οποίος υποβιβάζει τα 18V του φωτοβολταϊκού στα 12 V της μπαταρίας που είναι συνδεδεμένο. Ο μετατροπέας αυτός ελέγχεται από έναν μικροεπεξεργαστή (arduino uno), ο οποίος βρίσκει το σημείο μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού με τη μέθοδο διατάραξης και παρατήρησης όπου αναλύθηκε πιο πάνω και ταυτόχρονα ελέγχει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Ο μετατροπέας αυτός δημιουργήθηκε με σκοπό το φωτοβολταϊκό να αποδίδει το μέγιστο δυνατό και να παράγει τη μέγιστη ισχύ. Λόγω της ευαισθησίας των ενεργητικών και παθητικών στοιχείων του μετατροπέα αποφασίστηκε να μην τοποθετηθούν σε διάτρητη πλακέτα και κρίθηκε απαραίτητος ο σχεδιασμός του παρακάτω κυκλώματος σε σχεδιαστικό πρόγραμμα για την τύπωση ειδικής πλακέτας(PCB) . Η πλακέτα σχεδιάστηκε στο Sprint Lay Out και αφού τυπώθηκε πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες κολλήσεις για την υλοποίησή της.

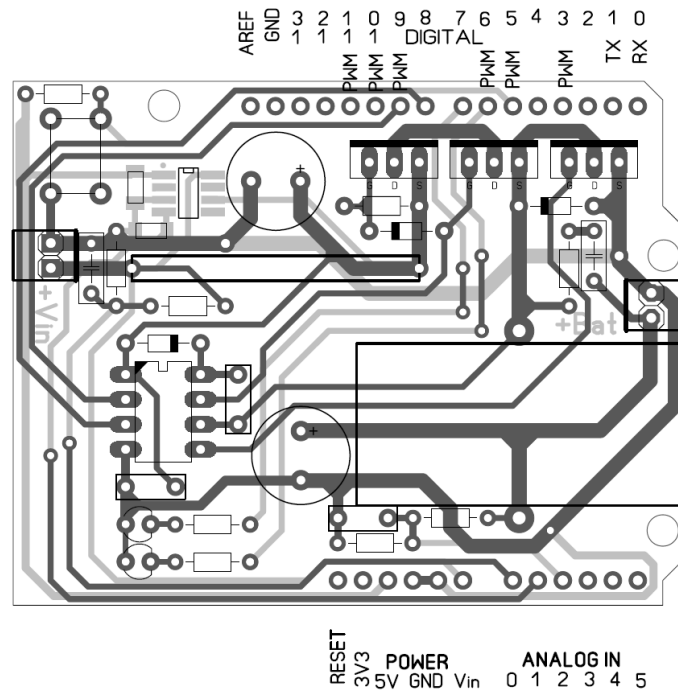
Στο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του DC-DC μετατροπέα και πως αυτό επικοινωνεί με τις αναλογικές και ψηφιακές θύρες του μικροεπεξεργαστή[37],[38].



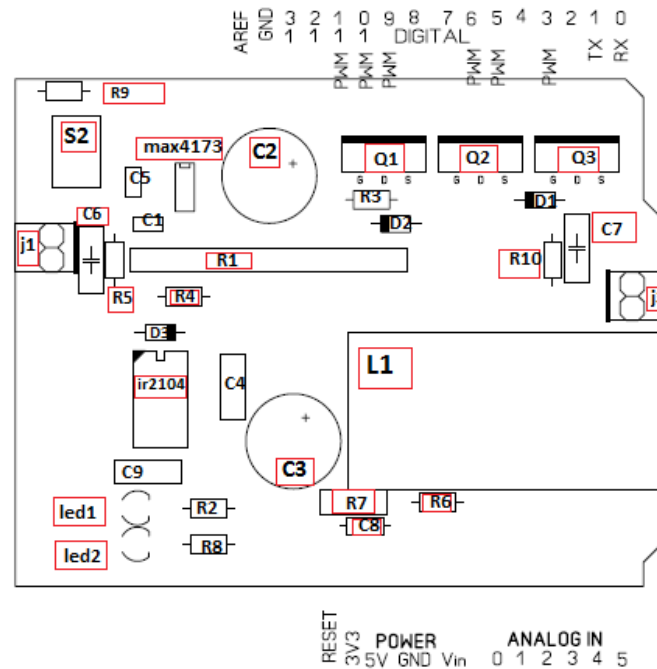
Σχήμα 5.31. Σχήμα κυκλώματος DC-DC buck converter και σύνδεσή του με τον μικροεπεξεργαστή

Το κύκλωμα αυτό μελετήθηκε και σχεδιάστηκε ώστε να έχει τις ίδιες διαστάσεις με τον επεξεργαστή arduino uno, για να κουμπώσει το ένα κύκλωμα πάνω στο άλλο. Η πλακέτα κρίθηκε

αναγκαίο να είναι διπλής όψεως λόγω των πολλών διασταυρώσεων των διαδρόμων σε περιορισμένες διαστάσεις.



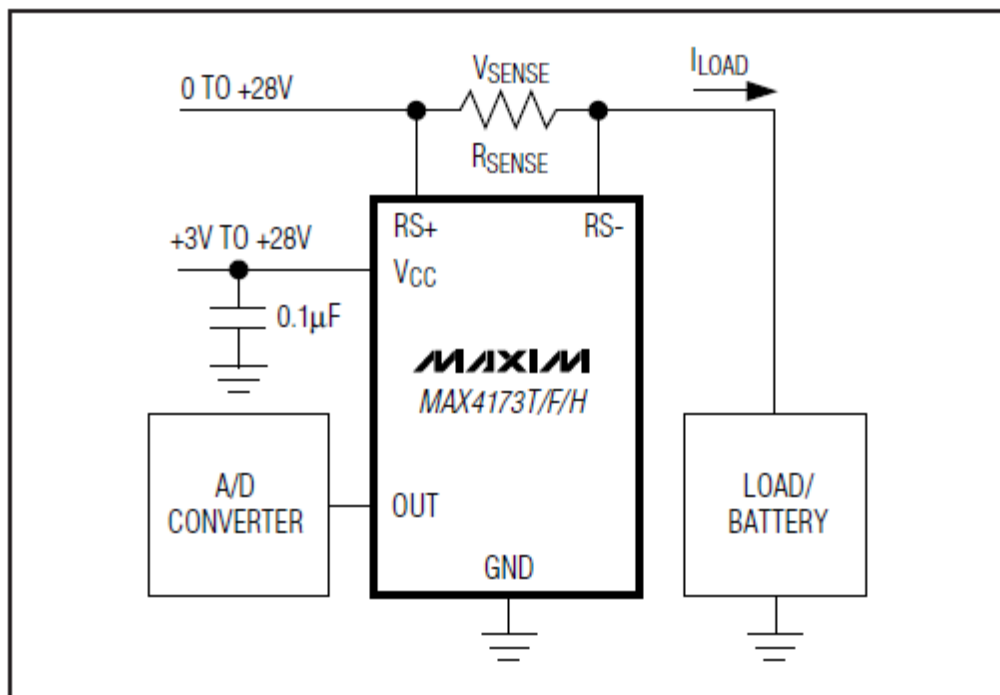
Σχήμα 5.32. Σχέδιο πλακέτας MPPT διπλής όψεως. Σχεδιασμένο στο πρόγραμμα Sprint lay out



Σχήμα 5.33. Αποτύπωση των ενεργητικών και παθητικών στοιχείων του κυκλώματος χωρίς τους χαλκοδιαδρόμους για να διακρίνονται πιο εύκολα πάνω στην πλακέτα

Τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος αυτού είναι:

- το ολοκληρωμένο Max4173(current sense amplifier) το οποίο είναι ένας αισθητήρας ρεύματος και χρησιμοποιείται στο κύκλωμα για να διαβαζει το ρεύμα που έχει το φωτοβολταϊκό στην έξοδό του. Πιο συγκεκριμένα το ρεύμα διαβάζεται μέσω της αντίστασης ακριβείας $R_1=0.005 \Omega$ (current sense resistor), η οποία παράγει ένα πολύ μικρό ποσοστό τάσης που στη συνέχεια εφαρμόζεται και ενισχύεται $\times 100$ από το Max4173. Για παράδειγμα αν 5A ρέουν κατά μήκος της αντίστασης R_1 αυτή παράγει με τη σειρά της $5A \cdot 0,005\Omega = 0,025V$ τα οποία στη συνέχεια ενισχύονται $\times 100$ και τελικά παράγονται 2,5 V. Η τάση αυτή διαβάζεται από τον επεξεργαστή μέσω της αναλογικής του εισόδου(analog 2) . Η αντίσταση υπολογίστηκε μέσω γραμμικής παρεμβολής από τις προτεινόμενες τιμές του κατασκευαστή.



Σχήμα 5.34. Τυπικής λειτουργίας κύκλωμα

- Οι πυκνωτές C_2 και C_3 χειρίζονται και εξομαλύνουν τους μεγάλους παλμούς ρεύματος του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.
- Το ολοκληρωμένο ir2104 είναι υψηλής τάσης και υψηλής ταχύτητας οδηγός Mosfet ισχύος και είναι αυτό που διαφοροποιεί το κύκλωμα σε σχέση με τα συνηθισμένα buck converter ώστε να είναι πιο αποδοτικό.Ο λόγος είναι ότι οδηγεί δύο Mosfet απτα οποία το ένα ανήκει στην υψηλή και το άλλο χαμηλή πλευρά του κυκλωματος. Αυτό το κάνει να είναι λίγο πιο αποδοτικό αφού υπάρχουν λιγότερες απώλειες.Πιο συγκεκριμένα το ir2104 δέχεται το PWM σήμα (50KHz) από την ψηφιακή είσοδο του επεξεργαστή (digital 9) και το χρησιμοποιεί για να οδηγεί τα Mosfet N-fets. Η δίοδος D_3 και ο πυκνωτής $C_4 = 0.1\mu F$ είναι μέρος του ir2104 κυκλώματος, τα οποία ενισχύουν την τάση για την υψηλής πλευράς πύλη

- Το πηνίο L, ο πυκνωτής C₃, η δίοδος D₁ και τα Mosfet ισχύος Q₂ και Q₃ αποτελούν το DC-DC κύκλωμα υποβιβασμού τάσης, το οποίο μετατρέπει τα 18V του φωτοβολταϊκού στα 12 V της μπαταρίας. Οι τιμές των στοιχείων υπολογίστηκαν από τους εξής τύπους που ισχύουν για το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης:

$$D = \frac{V_0}{V_d} = \frac{12}{18} = 0,66 \quad (5.26)$$

Η εύρεση του πηνίου ώστε να διατηρείται συνεχή αγωγή του ρεύματος της μπαταρίας είναι όταν το συνεχές ρεύμα φόρτισης είναι $\Delta I_L = 2,4$ A και δίνεται από τον τύπο:

$$L = -\frac{V_0}{\Delta I_L} * (D - 1) * T = 33\mu H \quad (5.25)$$

όπου T είναι η περίοδος και είναι ίση με T=20μsec

D ο βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη

L η ελάχιστη τιμή του επαγωγέα

Η εύρεση της χωρητικότητας υπολογίζεται με το κριτήριο η κυμάτωση στη τάση της μπαταρίας να είναι μικρότερη του 1%. Στο κύκλωμά μας συγκεκριμένα επιλέχθηκε ύστερα από προσομοίωση στο psim να είναι 0.22%. Η κυμάτωση της τάσης δίνεται από τον τύπο:

$$r = \frac{D * V_c}{V_0} \quad (5.26)$$

$$C = \frac{1-D}{8L * r * f^2} = \frac{1-0,66}{8 * 33 * 10^{-6} * 0,0022 * 50000^2} = 220\mu F \quad (5.27)$$

όπου V_c η πτώση τάσης πάνω στον πυκνωτή και ισούται με V_c=0,041V αν λάβουμε υπόψιν ότι η κυμάτωση επιθυμούμε να είναι 0,22%.

Η συχνότητα αποκοπής είναι: $f_c = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} = 1,868$ KHz (5.28)

Αρα $f = 26,75 * f_c$ αφού η διακοπτική συχνότητα είναι f=50KHz

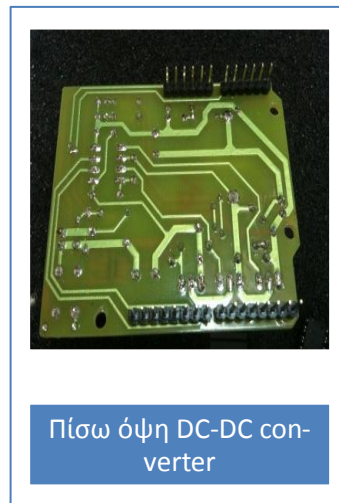
Ακόμα το μέγιστο και το ελάχιστο ρεύμα εξόδου όταν ο λόγος κατάτμισης είναι D=0,66 είναι:

$$I_{max} = I_L + \frac{D I_L}{2} = 2,6 + 1,22 = 3,8 \text{ A} \quad (5.29)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{D I_L}{2} = 1,38 \text{ A} \quad (5.30)$$

- Ο πυκνωτής C₇ και η αντίσταση R₁₀ αποτελούν το κύκλωμα προστασίας από υπερτάσεις (snubber) κατά τη διάρκεια αγωγής-σβέσης των διακοπτικών στοιχείων.

Αφού λοιπόν κολλήθηκαν όλα τα παραπάνω στοιχεία στην πλακέτα με πολύ λεπτές κινήσεις και ακρίβεια προέκυψε το παρακάτω κύκλωμα.



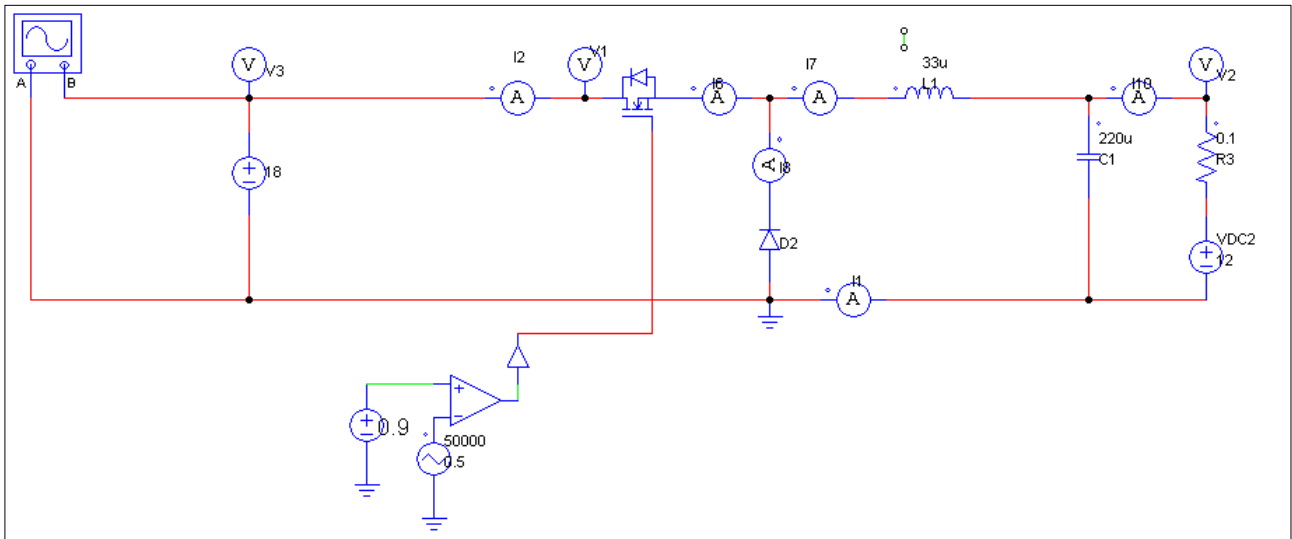
Το κόστος του κάθε στοιχείου του συστήματος DC-DC μετατροπέα και παρατίθεται στον πίνακα.

Υλικά	Κόστος
Max4173h	1,49€
Ir2104	3,83€
IRFIZ44	1,20€
Πηνίο	2,04€
Πυκνωτές	8*0,10=0,80€
Αντιστάσεις	0,60€
Δίοδοι	0,10*2=0,20€
Αντίσταση ακριβείας(0,005Ω)	1,182€
Led	0,10*2=0,20€
Διακόπτης	0,10€
Κλέμες	0,50€
Τύπωση πλακέτας	20€
Arduino uno	25€
Ψύκτρες	0,20€
Συνολικό κόστος	55,96€

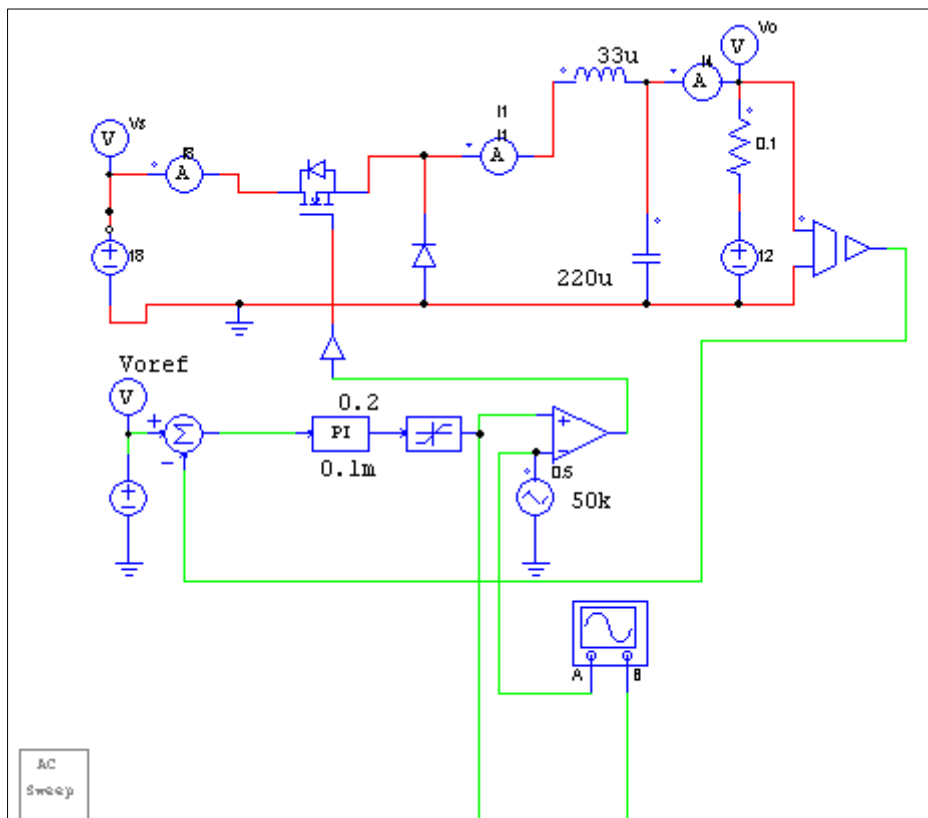
Πίνακας κόστους των στοιχείων της πλακέτας

5.8 Προσομοίωση του κυκλώματος υποβιβασμού τάσης στο Psim

Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος είναι το εξής:



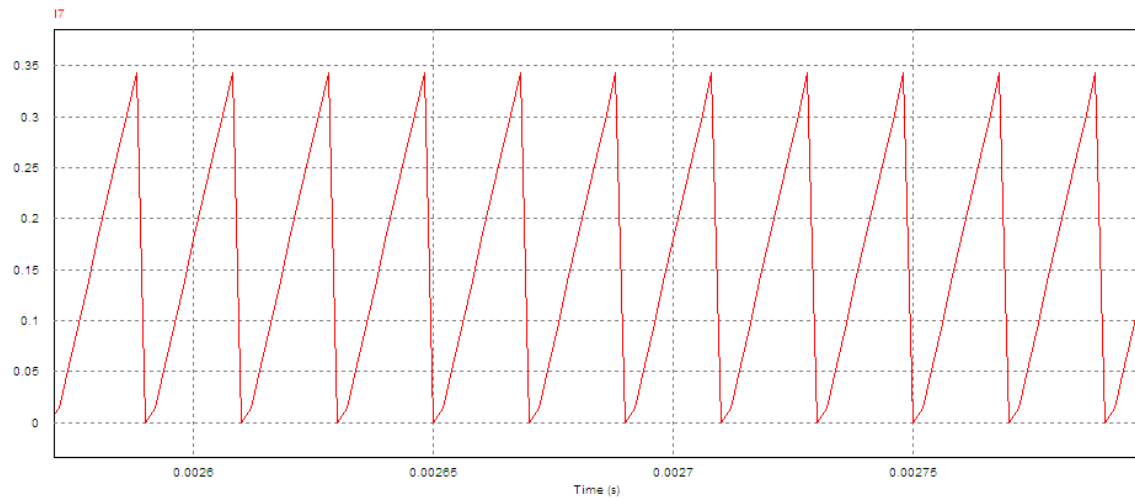
Σχήμα 5.36. Σχηματικό κύκλωμα υποβιβασμού τάσης



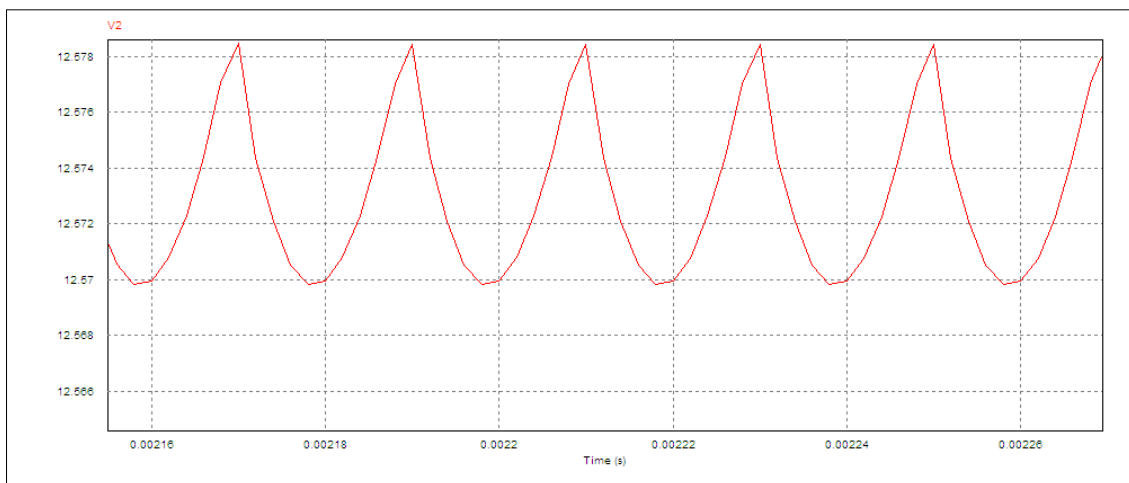
Σχήμα 5.37. Σχηματικό κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με ελεγχόμενη τάση εξόδου

Τα στοιχεία του κυκλώματος έχουν πάρει τις πραγματικές τιμές, δηλαδή το πηνίο $L=33\mu\text{H}$, ο πυκνωτής $C=220\mu\text{F}$, η συχνότητα στα 50KHz και η τάση εξόδου της μπαταρίας έχει ρυθμιστεί να ελέγχεται (από τον PI) ώστε να προσομοιωθεί η λειτουργία του μικροεπεξεργαστή.

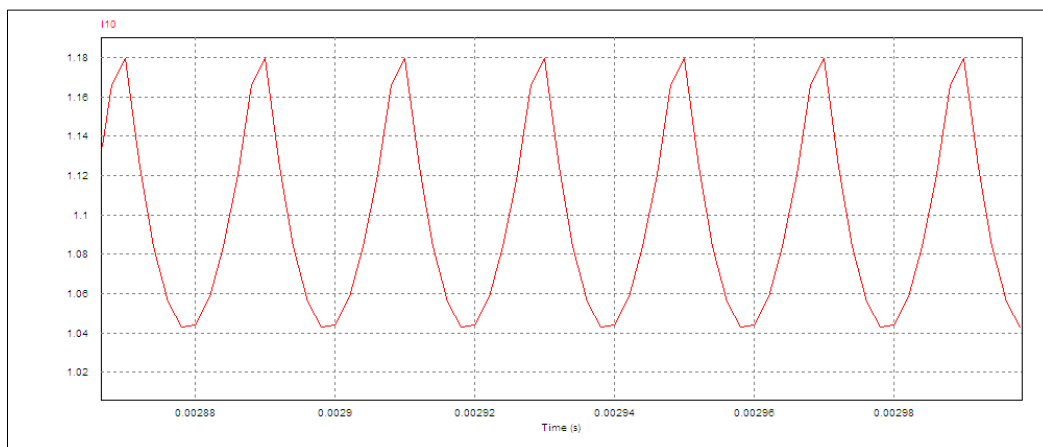
Παρακάτω φαίνονται μερικά από τα διαγράμματα της προσομοίωσης :



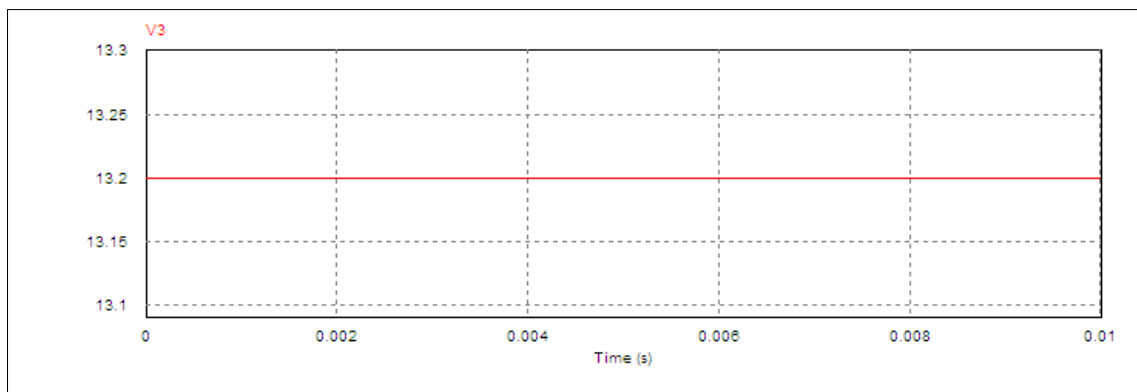
Σχήμα 5.38. Κυματομορφή ρεύματος πηνίου με τάση μπαταρίας 12.5V, τάση φωτοβολταϊκού 13.2V και PWM=90%



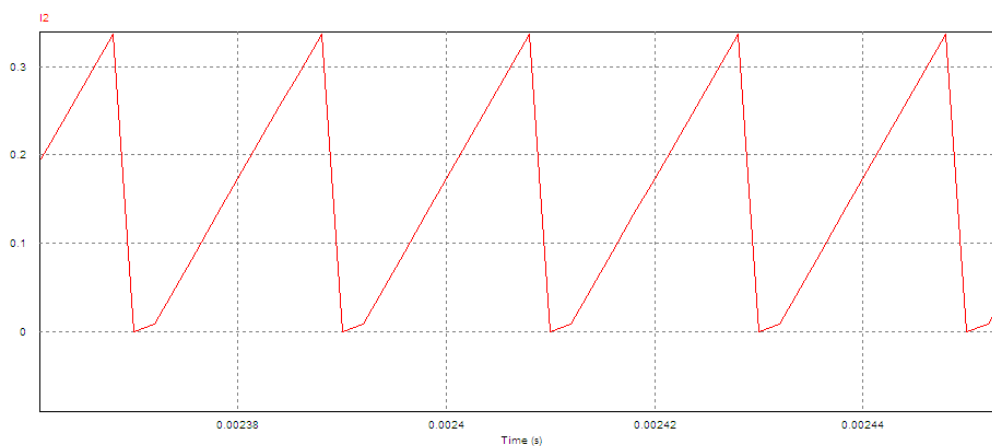
Σχήμα 5.39. Κυματομορφή τάσης εξόδου με τάση μπαταρίας 12.5V, τάση φωτοβολταϊκού 15V και PWM=90%



Σχήμα 5.40. Κυματομορφή ρεύματος εξόδου με τάση μπαταρίας 12.4V, τάση φωτοβολταϊκού 15V και PWM=90%



Σχήμα 5.41. Κυματομορφή τάσης εισόδου με τάση μπαταρίας 12.5V, τάση φωτοβολταϊκού 13.2V και PWM=90%



Σχήμα 5.42. Κυματομορφή ρεύματος εισόδου με τάση μπαταρίας 12.5V, τάση φωτοβολταϊκού 13.2 V και PWM=90%

5.9 Παραγωγή παλμών με χρήση μικροεπεξεργαστή- Arduino uno

5.9.1 Γενικά

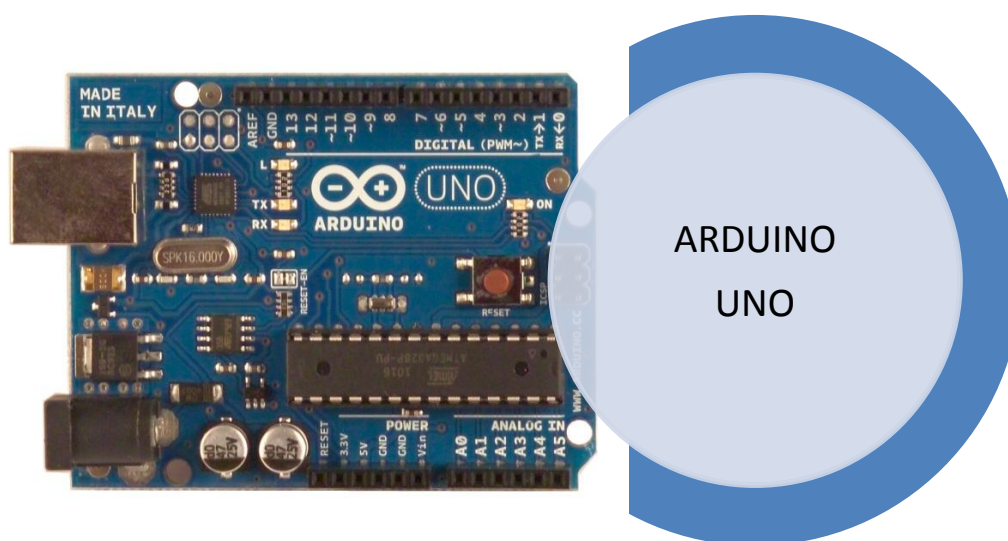
Η χρήση του μικροεπεξεργαστή σε διάφορες εφαρμογές είναι ευρέως διαδεδομένη σήμερα. Παρέχει μεγάλη αξιοπιστία έναντι διακοπτικών θορύβων λόγω των ψηφιακών κυκλωμάτων του, μπορεί να προγραμματιστεί, να μεταβάλλει τα μεγέθη που ελέγχει εύκολα και απλά, να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία ή να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο διαφόρων κυκλωμάτων και συνδεσμολογιών.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του μικροεπεξεργαστή arduino uno, ο οποίος προγραμματίστηκε σε γλώσσα c. Η χρήση μικροεπεξεργαστικών συστημάτων αφορά την ανάπτυξη και υλοποίηση απλών ή πολύπλοκων λογικών ελέγχου σε διατάξεις της μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος. Ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα ελέγχου, το μικροεπεξεργαστικό σύστημα πρέπει να

είναι σε θέση να μετρήσει ένα ή περισσότερα μεγέθη της διάταξης ισχύος, να εκτελέσει τους κατάλληλους αλγορίθμους και να παράγει τα σήματα εκείνα που θα παλμοδοτήσουν τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος. Τα μετρούμενα μεγέθη μπορεί να είναι ρεύμα, τάση, θερμοκρασία, στροφές καθώς και σήματα ελέγχου από το χρήστη.

Η αλματώδης ανάπτυξη και εξέλιξη των μικροεπεξεργαστών τα τελευταία χρόνια έχουν αναδείξει τα σύγχρονα μικροπολογιστικά συστήματα ως τη βέλτιστη λύση για την υλοποίηση πολύπλοκων και ταχύτατων λογικών ελέγχου, αυξάνοντας την αξιοπιστία, την χρηστικότητα και την απόδοση των διάφορων τοπολογιών ισχύος.

5.9.2 Ο μικροεπεξεργαστής arduino uno

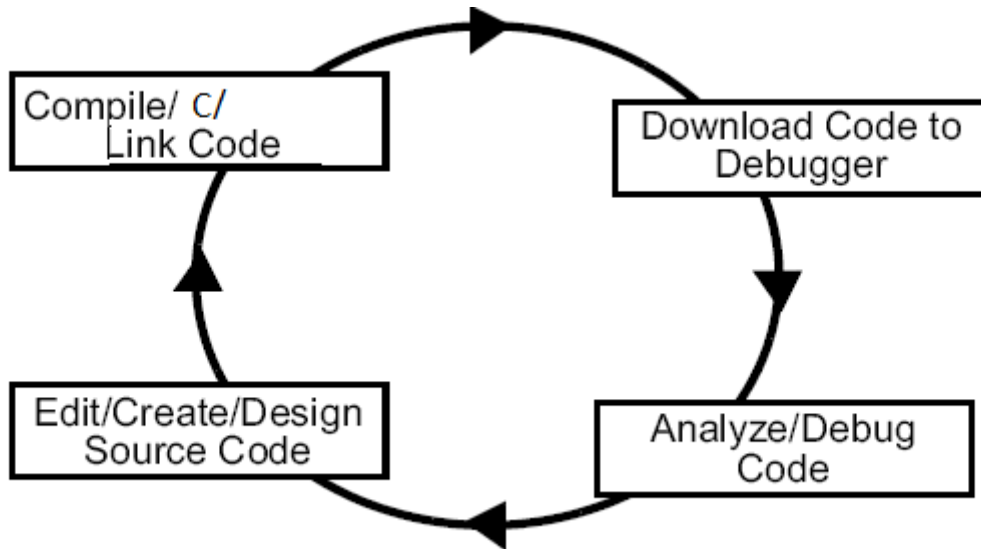


Ο arduino uno είναι ένας μικροεπεξεργαστής που στηρίζεται στο λειτουργικό πρόγραμμα του ATmega328. Αποτελείται από 14 συνολικά ψηφιακές εισόδους/εξόδους και 6 αναλογικές εισόδους. Έχει διαστάσεις 2,7 inches μήκος και 2,1 inches πλάτος και έχει USB σύνδεση. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται περιληπτικά οι λειτουργίες του[39].

Μικροεπεξεργαστής	ATmega328
Τάση λειτουργίας	5V
Τάση εισόδου(προτεινόμενη)	7-12V
Τάση εισόδου(όρια)	6-20V
Digital I/O pins	14(6 χρησιμοποιούνται για PWM)
Analog inputs	6
DC ρεύμα ανα I/O pin	40mA
Flash memory	32KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Clock speed	16MHz

Πίνακας 5.6. Γενική εικόνα λειτουργίας του arduino uno

Η διαδικασία ανάπτυξης μίας εφαρμογής στον μικροεπεξεργαστή συχνά περιγράφεται με τον όρο κύκλος σάρωσης. Αρχικά γράφεται ο κώδικας, σε γλώσσα c στην προκειμένη περίπτωση ,ελέγχεται και μετά τροποποιείται ώστε να δημιουργηθεί μία εφαρμογή που να λειτουργεί σωστά. Η λειτουργία αυτή παριστάνεται με μορφή διαγράμματος στο σχήμα 6.1



Σχήμα 5.43. Απεικόνιση κύκλου σάρωσης

Αφού πραγματοποιηθεί ο κύκλος σάρωσης ενεργοποιείται το πρόγραμμα παραγωγής παλμών μεταβλητού λόγου κατάτμησης, για την παλμοδότηση της διάταξης που κατασκευάστηκε. Το πρόγραμμα αυτό είναι γραμμένο σε γλώσσα c και ακολουθεί την εξής διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας:

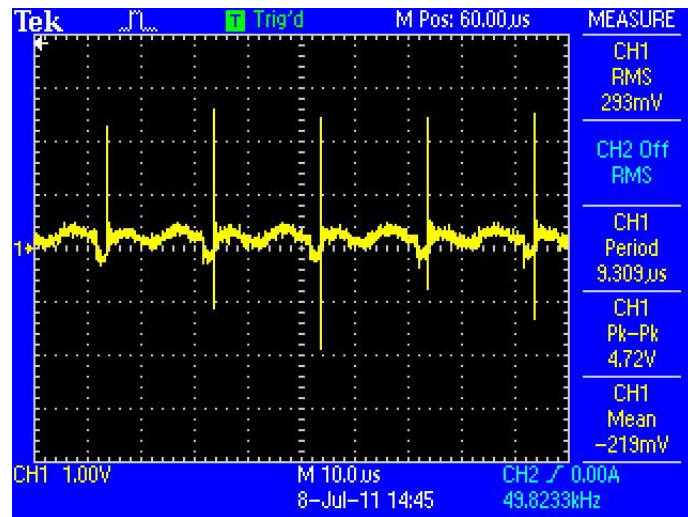
- **on state:** Είναι η κατάσταση φόρτισης όπου το φωτοβολταϊκό παράγει ελάχιστη ισχύ μεταξύ 1W και 5W. Αυτό προφανώς συμβαίνει κατά το ξημέρωμα και κατά το λυκόφως. Αυτή η κατάσταση έχει οριστεί ούτως ώστε να δίνουμε στη μπαταρία όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύ από αυτή που παράγει το φωτοβολταϊκό ρυθμίζοντας το PWM=100%.
- **bulk state:** Αυτή η κατάσταση ενεργοποιείται εφόσον το φωτοβολταϊκό παράξει πάνω από 5W και εφόσον η μπαταρία είναι αφόρτιστη. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται ο αλγόριθμος μέγιστης ισχύος (αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης) ώστε η μπαταρία να φορτίζεται με το μέγιστο δυνατό ρεύμα-τάση. Το PWM λοιπόν παίρνει τιμές έως 100% για να πετύχει το σημείο μέγιστης ισχύος.
- **float state:** Καθώς η μπαταρία φορτίζει κάποια στιγμή φτάνει στη μέγιστη τιμή της τάσης της που είναι τα 14,1V. Τότε λοιπόν αρχίζει η κατάσταση float όπου το PWM προσαρμόζεται έτσι ώστε η μπαταρία να διατηρείται φορτισμένη.

Στον πίνακα 5.2 φαίνεται η μετάβαση από την κατάσταση on στην κατάσταση bulk που έλαβε χώρα όταν ξεπεράστηκε η ισχύς $P=5W$. Στην περίπτωση αυτή το PWM αυξομειώνεται για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος σύμφωνα με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. (P&O).

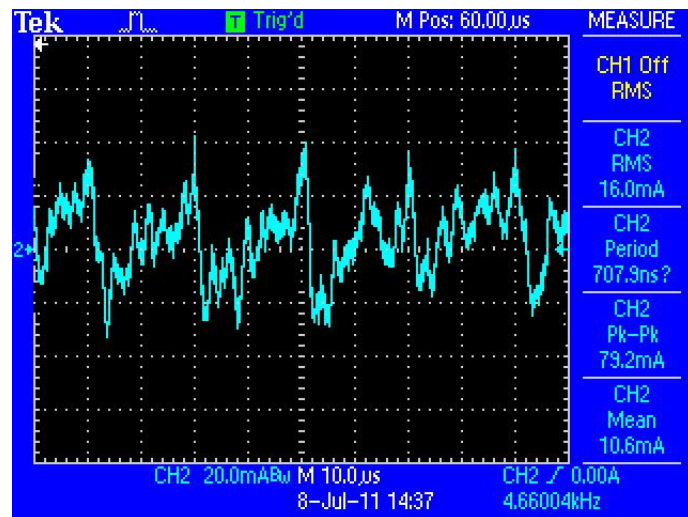
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.20
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.20
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.20
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 100	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 100	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 104	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.20
charger = on	pwm = 104	s_amps = 0.40	s_volts = 12.34	s_watts = 4.94	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 100	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = on	pwm = 99	s_amps = 0.41	s_volts = 12.34	s_watts = 5.06	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 98	s_amps = 0.40	s_volts = 12.74	s_watts = 5.10	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 97	s_amps = 0.40	s_volts = 12.93	s_watts = 5.17	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 96	s_amps = 0.40	s_volts = 13.01	s_watts = 5.20	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 97	s_amps = 0.38	s_volts = 13.20	s_watts = 5.02	b_volts = 12.23
charger = bulk	pwm = 98	s_amps = 0.40	s_volts = 13.04	s_watts = 5.22	b_volts = 12.20

Πίνακας 5.2 Μετάβαση από την on κατάσταση στην bulk

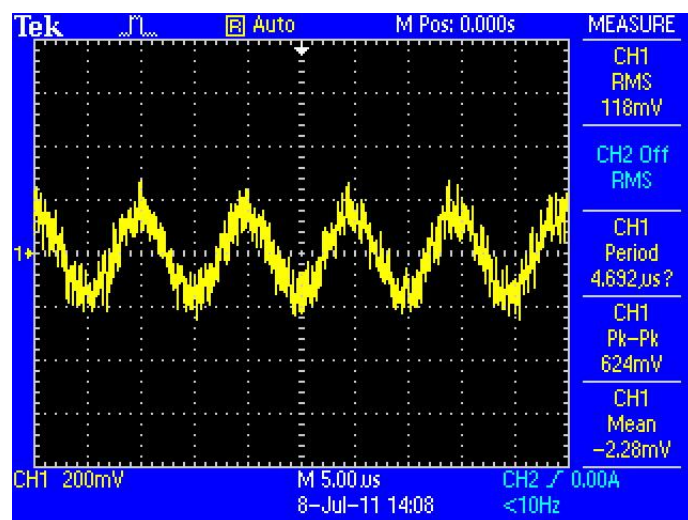
Στον πίνακα 5.3 φαίνεται η μετάβαση από την κατάσταση bulk στην κατάσταση float που πραγματοποιήθηκε όταν ξεπεράστηκε η μέγιστη τιμή της τάσης της μπαταρίας που είναι 14,1V.Απο τον πίνακα διαπιστώνουμε ότι στην float κατάσταση μειώνεται το PWM ώστε να περιοριστεί η ισχύς που τροφοδοτείται η φορτισμένη πια μπαταρία.



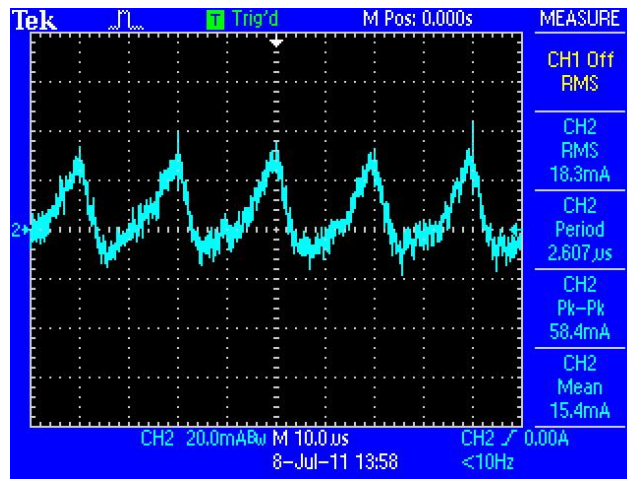
Σχήμα 5.44. Κυματομορφή τάσης εισόδου



Σχήμα 5.45. Κυματομορφή ρεύματος εισόδου



Σχήμα 5.46. Κυματομορφή τάσης εξόδου

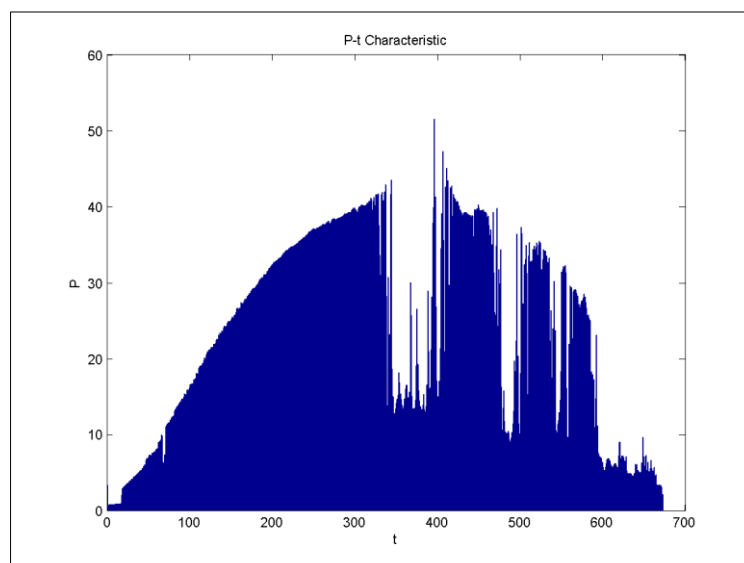


Σχήμα 5.47. Κυματομορφή ρεύματος εξόδου

5.11 Ενεργειακή απόδοση συστήματος DC-DC buck converter και φωτοβολταϊκού

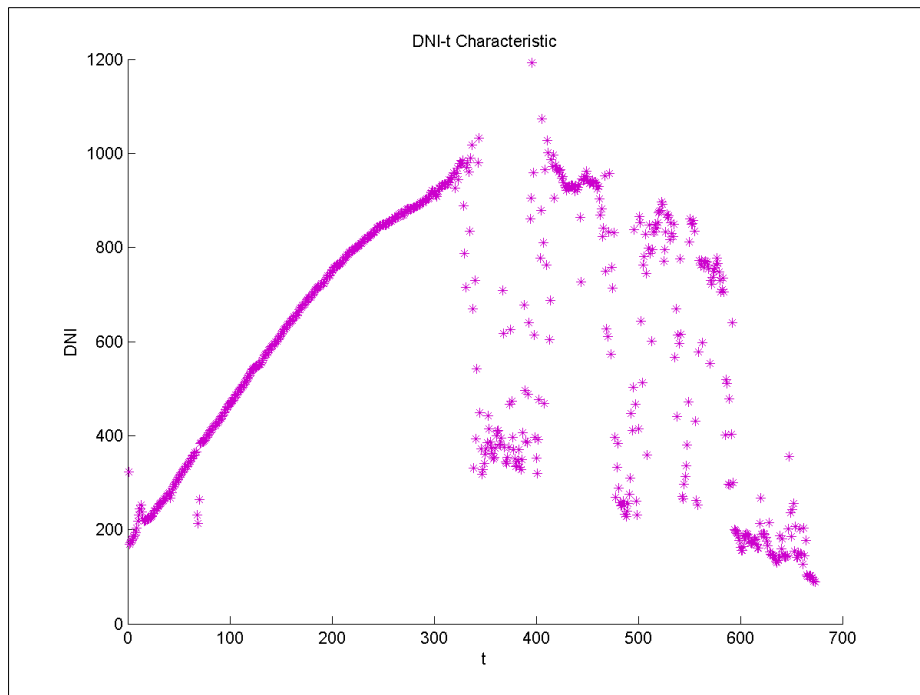
Όπως ήταν αναμενόμενο ο έλεγχος του κυκλώματος, να ανιχνεύεται το μέγιστο σημείο ισχύος ανάλογα με τις μεταβολές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αύξησε την ενεργειακή απόδοση στη μπαταρία. Βέβαια ακόμα περισσότερη ισχύ θα απέδιδε το φωτοβολταϊκό αν αντικαθιστούσαμε το DC-DC buck converter με έναν DC-DC buck-boost converter, ο οποίος όταν έπεφτε το φωτοβολταϊκό κάτω από την τάση της μπαταρίας θα ανύψωνε την τάση του φωτοβολταϊκού για να εκμεταλλευτεί τη μέγιστη δυνατή ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Στο σχήμα παρουσιάζεται η ο μέσος όρος ισχύος σε σχέση με το χρόνο ανα λεπτό για τις 6/07.2011. Αν παρατηρήσουμε υπάρχουν κάποιες απότομες αυξομειώσεις της ισχύος και αυτό οφείλεται ότι η μέρα, που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αυτές, είχε αρκετά σύννεφα(ιδίως από το μεσημέρι και μετά), με αποτέλεσμα να μην έχουμε την ενεργειακή απολαβή που περιμέναμε.



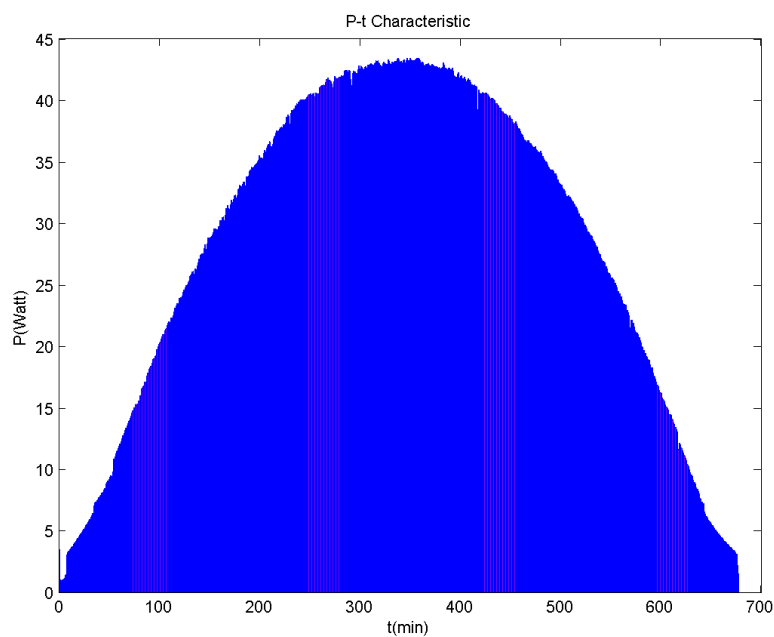
Σχήμα 5.49. Μέσος όρος P-t ανα λεπτό για τις 6/07/2011

Στο σχήμα απεικονίζεται ο μέσος όρος την ακτινοβολίας DNI σε συνάρτηση με το χρόνο ανα λεπτό για τις 6/07/2011.

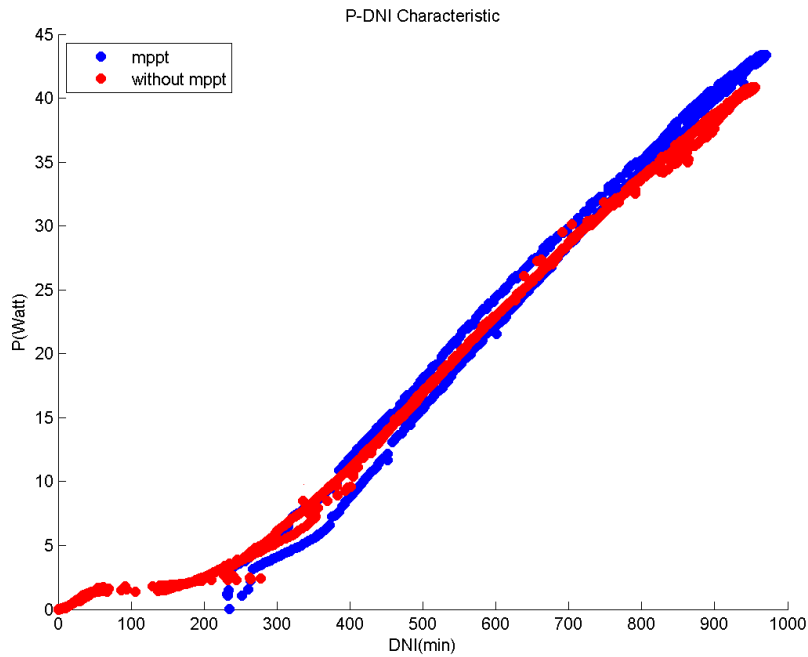


Σχήμα 5.50. Μέσος όρος DNI-t ανα λεπτό για τις 6/07/2011

Στο σχήμα 5.51 φαίνεται η γραφική ισχύος χρόνου P-t του συστήματος φωτοβολταϊκού-μετατροπέα-μπαταρία που έλαβε χώρα στις 8/07/2011 μία μέρα με καθαρό ουρανό.



Σχήμα 5.51. Διάγραμμα ισχύος-χρόνου

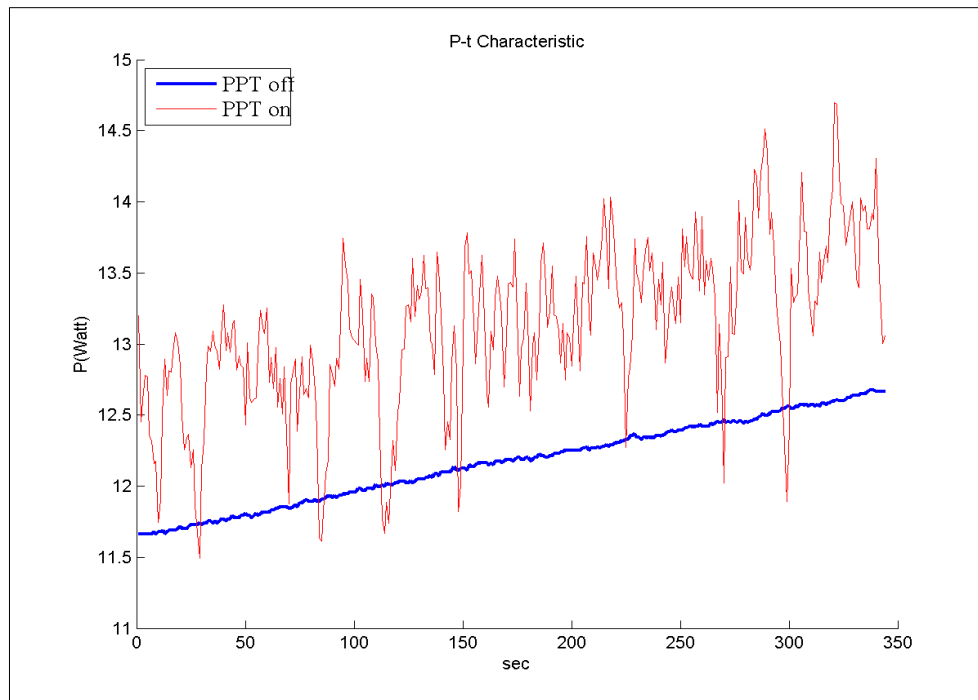


Σχήμα 5.52. Διάγραμμα P-DNI(W/m²) /min για την ισχύ που αποδίδει το φωτοβολταϊκό στη μπαταρία με το DC-DC buck converter αλλά και χωρίς αυτό.

Από το σχήμα 5.52 είναι φανερό ότι το κύκλωμα που ανιχνεύει το μέγιστο σημείο ισχύος απέδωσε μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με αυτή που αποδόθηκε από την απευθείας σύνδεση του φωτοβολταϊκού με την μπαταρία. Παρατηρούμε ότι στα πρώτα 240 W/m² το κύκλωμα με mppt δεν έχει ξεκινήσει την λειτουργία του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βρίσκεται στην κατάσταση off που έχει αναλυθεί στην προηγούμενη παράγραφο. Επίσης στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια που η ακτινοβολία μειώνεται το κύκλωμα dc-dc converter-arduino αποδίδει λιγότερη ισχύ στη μπαταρία γιατί ο μικροεπεξεργαστής έχει ρυθμιστεί να δίνει μειωμένη ισχύ στην φορτισμένη πλέον μπαταρία. Αυτή είναι η κατάσταση float όπου το PWM ελαττώνεται ούτως ώστε να διατηρεί την μπαταρία φορτισμένη.

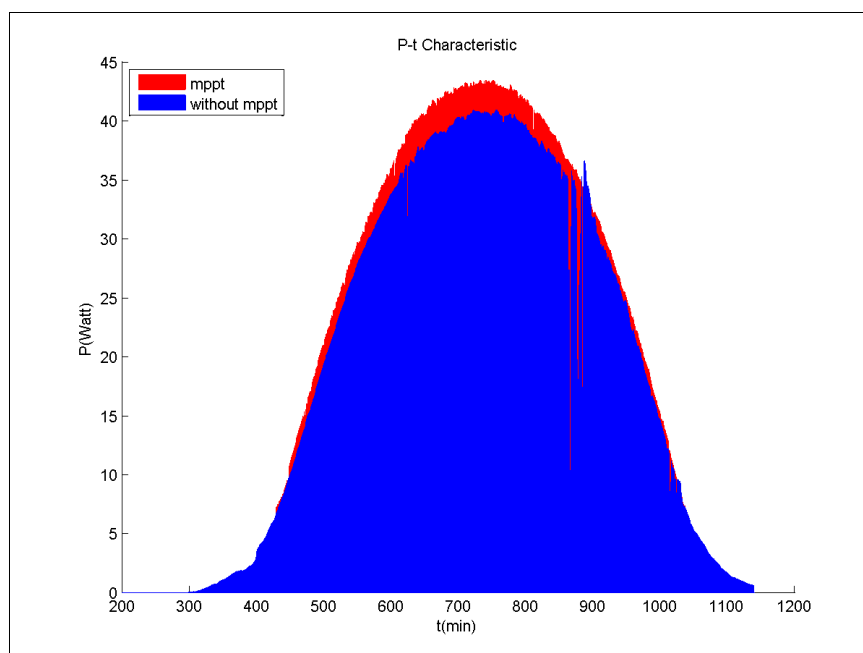
Ακόμα, γνωρίζουμε ότι η αναμενόμενη αύξηση της ισχύος με κύκλωμα ελέγχου mppt είναι κατά 20% περισσότερη απότι χωρίς αλγόριθμο αναζήτησης σημείου μέγιστης ισχύος. Στο σχήμα 5.53, όμως, φαίνεται ότι το κύκλωμα που κατασκευάστηκε για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα απέδωσε μέση τιμή 8.5% περισσότερο απότι αν συνδέαμε το φωτοβολταϊκό απευθείς στην μπαταρία. Ο λόγος που το ενεργειακό κέρδος δεν είναι 20% περισσότερο έγκειται στο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Με άλλα λόγια, όταν η μπαταρία είναι αφόρτιστη το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού και της μπαταρίας δεν είναι κοντά στο γόνατο(που έχει αναλυθεί στη θεωρία) της I-V επομένως η ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος σε αυτή την περίπτωση αποδίδει το ενεργειακό κέρδος κοντά στο 20%. Από την άλλη μεριά όταν η μπαταρία είναι ‘ελαφρώς’ φορτισμένη το σημείο λειτουργίας της είναι πιο κοντά στο MPP οπότε η χρήση ανίχνευσής του δεν βελτιώνει κατά μεγάλο ποσοστό την ενεργειακή απολαβή από το φωτοβολταϊκο. Τέλος, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ισχύ που θα αποδοθεί στη μπαταρία είναι η θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης και κατεπέκταση η μέγιστη ισχύς.

Επομένως, από το σχήμα 5.53 υπολογίζεται ότι το μέγιστη διαφορά ισχύος που σημειώνεται για την κατάσταση φόρτισης της συγκεκριμένης μπαταρίας είναι 16,65% .



Σχήμα 5.53. Διάγραμμα ισχύος χρόνου με PPT και χωρίς για εύρος ακτινοβολίας $G=410\text{W/m}^2 - 430\text{W/m}^2$

Συνολικά το σύστημα φωτοβολταϊκό-κύκλωμα mppt-μπαταρία απέδωσε 6,7% ημερήσια ενεργειακή απόδοση περισσότερο από τη σύνδεση του φωτοβολταϊκού απευθείας με την μπαταρία. Συγκεκριμένα η ημερήσια ενεργειακή απολαβή με το κύκλωμα mppt ήταν $E_p=320\text{Wh}$ και η ημερήσια ενεργειακή απολαβή χωρίς το κύκλωμα mppt ήταν $E_p=300\text{Wh}$.



Σχήμα 5.54. Σύγκριση ισχύος με κύκλωμα mppt και χωρίς

Κεφάλαιο 6^ο

Βελτιωτικές προτάσεις-Συμπεράσματα

6.1 Εγκατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας πλαισίου

Για να αναπτύξουμε πιο καλά συμπεράσματα στην επίδραση που έχει η θερμοκρασία στην συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού θα πρέπει να μετρήσουμε την θερμοκρασία της κυψέλης. Έτσι, θα έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα στο πόσο μειώνεται την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών και στο πως μεταβάλλονται τα ηλεκτρικά μεγέθη αυτών.

6.2 Βελτίωση του κυκλώματος MPPT

Ο DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τάση εισόδου έως και 20 V και για ρεύμα εισόδου έως και 5 A. Το πηνίο έχει επιτρεπτά όρια ρεύματος 11 A και τα Mosfet 20A. Έτσι, ο μετατροπέας μπορεί να χειριστεί έως και 200watt. Τα Mosfet χρειάζονται επαρκή ψύξη γι αυτό έχουμε τοποθετήσει επάνω τους τις ψύκτρες.

Ακόμα θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον μετατροπέα με είσοδο 24V φωτοβολταϊκά. Αυτό θα ήταν προτιμότερο να γίνει με μακριά καλώδια στην έξοδο του φωτοβολταϊκού ούτως ώστε να μειωθούν οι απώλειες πάνω στην αντίσταση του καλωδίου. Ακόμα οι ηλεκτρολητικοί πυκνωτές έχουν εύρος τάσης 35V, ο C1=100μF και 16V, ο C2=220μF για φωτοβολταϊκό τάσης εξόδου 18V. Γι αυτό αν βάλουμε στην είσοδο του κυκλώματος 24V θα πρέπει ο C1 να έχει επιτρεπτά όρια λειτουργίας 50V. Ακόμα θα πρέπει να περιορίσουμε τα όρια τάσης της πύλης οδήγησης, η οποία τροφοδοτείται από ένα κύκλωμα ενίσχυσης τάσης(D₃, C₄) ώστε να λειτουργεί το Mosfet υψηλής πλευράς. Το IRFIZ44 έχει όριο τάσης V_{gs}=20V και το κύκλωμα ενίσχυσης τάσης χρησιμοποιεί την τάση εισόδου για να τροφοδοτήσει την πύλη που οδηγεί το Mosfet. Όταν η τάση εισόδου ξεπεράσει 20V (στην περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά έχουν έξοδο 24V) θα έχουμε υπέρβαση του ορίου τάσης του Mosfet. Γι αυτό προτείνεται να συνδεθεί μαζί με τη δίοδο D3 ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης, όπως για παράδειγμα ο 78M15 15V, ο οποίος θα αντικαταστήσει την τάση εισόδου και θα τροφοδοτεί την πύλη με όριο τάσης 15V. Επιπλέον, θα πρέπει όλο το σύστημα να έχει κοινή γείωση ώστε να μην υπάρξουν επιπλοκές στα μετρούμενα μεγέθη που διαβάζει ο μικροεπεξεργαστής.

Τέλος, θα ήταν ακόμα πιο αποδοτικό στο σύστημα μπαταρία-φωτοβολταϊκό να χρησιμοποιήσουμε μικτό DC-DC μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός έχει την ικανότητα να παράγει μέση τάση εξόδου μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη από την DC τάση εισόδου. Έτσι, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλη την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού. Για παράδειγμα όταν η τάση του φωτοβολταϊκού πέσει κάτω από τα 12V ο DC-DC buck converter θα σταματήσει την λειτουργία του. Ενώ στην περίπτωση του DC-DC buck-boost converter θα ανυψώναμε την τάση στα 12 V της μπαταρίας και θα εκμεταλλευόμασταν πλήρως την αποδιδόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού.

6.3 Βελτίωση του συστήματος επεξεργασίας δεδομένων

Ως βελτίωση του μετρητικού συστήματος συνίσταται η δημιουργία μιας πιο αυτοματοποιημένης διαδικασίας για την επεξεργασία των μετρούμενων μεγεθών. Προτείνεται η δημιουργία βάσης δεδομένων που να συνδέεται με το πρόγραμμα καταγραφής Labview για την αποθήκευση των συνολικών αποτελεσμάτων και την επεξεργασία αυτών ή η αναβάθμιση του ήδη υπάρχοντος προγράμματος Labview ώστε και να επεξεργάζεται, πέρα από το να καταγράφει, τα δεδομένα.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Ο κώδικας που υλοποιεί τη λειτουργία του φόρτισης της μπαταρίας και MPPT είναι ο εξής:

```
#define SOL_AMPS_CHAN 1          // the adc channel to read solar amps
#define SOL_VOLTS_CHAN 0        // the adc channel to read solar volts
#define BAT_VOLTS_CHAN 2        // the adc channel to read battery volts
#define AVG_NUM 8               // number of iterations of the adc routine to average the adc readings
#define SOL_AMPS_SCALE 12       // the scaling value for raw adc reading to get solar amps scaled by
100
#define SOL_VOLTS_SCALE 27      // the scaling value for raw adc reading to get solar volts scaled by
100
#define BAT_VOLTS_SCALE 27      // the scaling value for raw adc reading to get battery volts scaled
by 100
#define PWM_PIN 9               // the output pin for the pwm
#define PWM_ENABLE_PIN 8        // pin used to control shutoff function of the IR2104 MOSFET driver
#define PWM_FULL 1023           // the actual value used by the Timer1 routines for 100% pwm duty cy-
cle
#define PWM_MAX 100             // the value for pwm duty cycle 0-100%
#define PWM_MIN 60              // the value for pwm duty cycle 0-100%
#define PWM_START 90            // the value for pwm duty cycle 0-100%
#define PWM_INC 1               //the value the increment to the pwm value for the ppt algorithm
#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define ON TRUE
#define OFF FALSE
#define TURN_ON_MOSFETS digitalWrite(PWM_ENABLE_PIN, HIGH)
#define TURN_OFF_MOSFETS digitalWrite(PWM_ENABLE_PIN, LOW)
```

```

#define ONE_SECOND 50000

#define LOW_SOL_WATTS 500

#define MIN_SOL_WATTS 100

#define MIN_BAT_VOLTS 1100

#define MAX_BAT_VOLTS 1410

#define HIGH_BAT_VOLTS 1300

#define OFF_NUM 9

int ledPin = 13;

int ledPin_jc2 = 5;

int ledPin_jc3 = 6;

int digPin = 4;

int count = 0;

int pwm = 0;

int sol_amps;

int sol_volts;

int bat_volts;

int sol_watts;

int old_sol_watts = 0;

unsigned int seconds = 0;

unsigned int prev_seconds = 0;

unsigned int interrupt_counter = 0;

boolean led_on = TRUE;

int led_counter = 0;

int delta = PWM_INC;

enum charger_mode {off, on, bulk, bat_float} charger_state;

void callback()

{

    if (interrupt_counter++ > ONE_SECOND) {

```



```

    interrupt_counter = 0;
    seconds++;
}
}
int read_adc(int channel){

    int sum = 0;
    int temp;
    int i;

    for (i=0; i<AVG_NUM; i++) {
        temp = analogRead(channel);
        sum += temp;
        delayMicroseconds(50);
    }
    return(sum / AVG_NUM);
}
void print_int100_dec2(int temp) {

    Serial.print(temp/100,DEC);
    Serial.print(".");
    if ((temp%100) < 10) {
        Serial.print("0");
        Serial.print(temp%100,DEC);
    }
    else {
        Serial.print(temp%100,DEC);
    }
}
}

```

```

void set_pwm_duty(void) {

    if (pwm > PWM_MAX) {
        pwm = PWM_MAX;
    }
    else if (pwm < PWM_MIN) {
        pwm = PWM_MIN;
    }
    if (pwm < PWM_MAX) {
        Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL * (long)pwm / 100), 20);
    }
    else if (pwm == PWM_MAX) {
        Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL - 1), 1000);
        //Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL - 1));
    }
}

void print_data(void) {

    Serial.print(seconds,DEC);

    Serial.print(" ");

    Serial.print("charger = ");

    if (charger_state == on) Serial.print("on ");
    else if (charger_state == off) Serial.print("off ");
    else if (charger_state == bulk) Serial.print("bulk ");
    else if (charger_state == bat_float) Serial.print("float");

    Serial.print(" ");

    Serial.print("pwm = ");

```

```

Serial.print(pwm,DEC);

Serial.print(" ");

Serial.print("s_amps = ");
print_int100_dec2(sol_amps);
Serial.print(" ");

Serial.print("s_volts = ");
//Serial.print(sol_volts,DEC);
print_int100_dec2(sol_volts);
Serial.print(" ");

Serial.print("s_watts = ");
//Serial.print(sol_volts,DEC);
print_int100_dec2(sol_watts);
Serial.print(" ");

Serial.print("b_volts = ");
//Serial.print(bat_volts,DEC);
print_int100_dec2(bat_volts);
Serial.print(" ");

Serial.print("\n\r");
}

void read_data(void) {

sol_amps = ((read_adc(SOL_AMPS_CHAN) * SOL_AMPS_SCALE) + 5) / 10;
sol_volts = ((read_adc(SOL_VOLTS_CHAN) * SOL_VOLTS_SCALE) + 5) / 10;
bat_volts = ((read_adc(BAT_VOLTS_CHAN) * BAT_VOLTS_SCALE) + 5) / 10;

```

```

sol_watts = (int)((long)sol_amps * (long)sol_volts) + 50) / 100);
}

void blink_leds(void) {

static boolean led_on = TRUE;

static int led_counter = 0;

if (!(led_counter++ % 4)) {
    if (led_on) {
        led_on = FALSE;
        digitalWrite(ledPin_jc2, HIGH);
    }
    else {
        led_on = TRUE;
        digitalWrite(ledPin_jc2, LOW);
    }
}

void run_charger(void) {

static int off_count = OFF_NUM;

switch (charger_state) {
    case on:
        if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {
            charger_state = off;
            off_count = OFF_NUM;
            TURN_OFF_MOSFETS;
        }
}

```

```

else if (bat_volts > MAX_BAT_VOLTS) {
    charger_state = bat_float;
}
else if (sol_watts < LOW_SOL_WATTS) {
    pwm = PWM_MAX;
    set_pwm_duty();
}
else {
    pwm = ((bat_volts * 10) / (sol_volts / 10)) + 5;
    charger_state = bulk;
}
break;
case bulk:
if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {
    charger_state = off;
    off_count = OFF_NUM;
    TURN_OFF_MOSFETS;
}
else if (bat_volts > MAX_BAT_VOLTS) {
    charger_state = bat_float;
}
else if (sol_watts < LOW_SOL_WATTS) {
    charger_state = on;
    TURN_ON_MOSFETS;
}
else {
    if (old_sol_watts >= sol_watts) {
        delta = -delta;
    }
}

```

```

    pwm += delta;

    old_sol_watts = sol_watts;

    set_pwm_duty();
}

break;

case bat_float:

    if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {

        charger_state = off;

        off_count = OFF_NUM;

        set_pwm_duty();

        TURN_OFF_MOSFETS;

    }

    else if (bat_volts > MAX_BAT_VOLTS) {

        pwm -= 1;

        set_pwm_duty();

    }

    else if (bat_volts < MAX_BAT_VOLTS) {

        pwm += 1;

        set_pwm_duty();

        if (pwm >= 100) {

            charger_state = bulk;

        }

    }

    break;

case off:

    if (off_count > 0) {

        off_count--;

    }

    else if ((bat_volts > HIGH_BAT_VOLTS) && (bat_volts < MAX_BAT_VOLTS) && (sol_volts >
bat_volts)) {

```

```

    charger_state = bat_float;
    set_pwm_duty();
    TURN_ON_MOSFETS;
}

else if ((bat_volts > MIN_BAT_VOLTS) && (bat_volts < MAX_BAT_VOLTS) && (sol_volts > bat_volts)) {
    pwm = PWM_START;
    set_pwm_duty();
    charger_state = on;
    TURN_ON_MOSFETS;
}

break;

default:
    TURN_OFF_MOSFETS;
    break;
}
}

void loop()
{
    blink_leds();
    read_data();
    run_charger();
    print_data();
}

```

Datasheet Στοιχείων

IR2104(S)&(PbF)

International
IR Rectifie

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating absolute voltage	-0.3	625	V
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$	
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S - 0.3$	$V_B + 0.3$	
V_{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	-0.3	25	
V_{LO}	Low side output voltage	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
V_{IN}	Logic input voltage (IN & \overline{SD})	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
dV_S/dt	Allowable offset supply voltage transient	—	50	V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25^\circ\text{C}$	(8 lead PDIP) — (8 lead SOIC)	1.0 0.625	W
R_{thJA}	Thermal resistance, junction to ambient	(8 lead PDIP) — (8 lead SOIC)	125 200	$^\circ\text{C/W}$
T_J	Junction temperature	—	150	$^\circ\text{C}$
T_S	Storage temperature	-55	150	
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The Input/Output logic timing diagram is shown in Figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S offset rating is tested with all supplies biased at 15V differential.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply absolute voltage	$V_S + 10$	$V_S + 20$	V
V_S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V_{HO}	High side floating output voltage	V_S	V_B	
V_{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V_{LO}	Low side output voltage	0	V_{CC}	
V_{IN}	Logic input voltage (IN & \overline{SD})	0	V_{CC}	
T_A	Ambient temperature	-40	125	$^\circ\text{C}$

Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to - V_{BS} . (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V, C_L = 1000 pF and T_A = 25°C unless otherwise specified.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	—	680	820	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	—	150	220		$V_S = 600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	—	160	220		
t_r	Turn-on rise time	—	100	170		
t_f	Turn-off fall time	—	50	90		
DT	Deadtime, LS turn-off to HS turn-on & HS turn-on to LS turn-off	400	520	650		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	—	60		

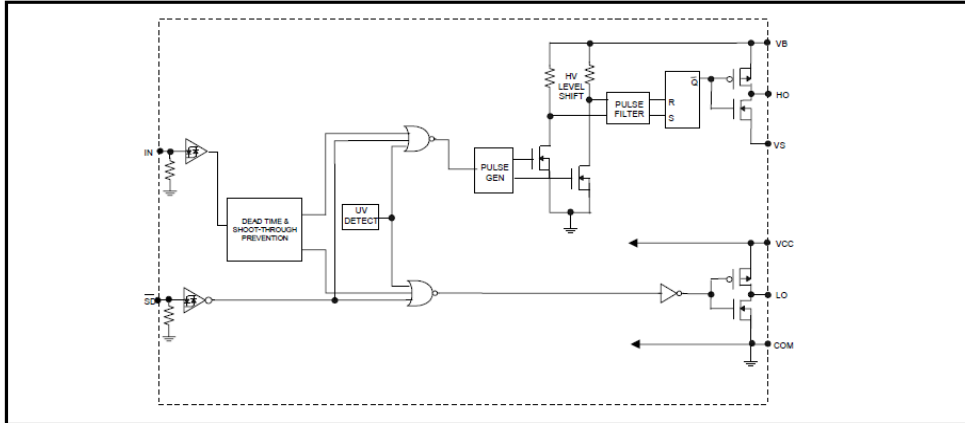
Static Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V and T_A = 25°C unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to COM. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" (HO) & Logic "0" (LO) input voltage	3	—	—	V	$V_{CC} = 10V$ to 20V
V_{IL}	Logic "0" (HO) & Logic "1" (LO) input voltage	—	—	0.8		$V_{CC} = 10V$ to 20V
$V_{SD,TH+}$	SD input positive going threshold	3	—	—		$V_{CC} = 10V$ to 20V
$V_{SD,TH-}$	SD input negative going threshold	—	—	0.8		$V_{CC} = 10V$ to 20V
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	—	—	100	mV	$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	—	—	100		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	—	30	55		$V_{IN} = 0V$ or 5V
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	—	150	270		$V_{IN} = 0V$ or 5V
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	—	3	10		$V_{IN} = 5V$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	—	—	1		$V_{IN} = 0V$
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	8	8.9	9.8	V	
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	7.4	8.2	9		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	130	210	—	mA	$V_O = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	270	360	—		$V_O = 15V$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2104(S)&(PbF)

Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
IN	Logic input for high and low side gate driver outputs (HO and LO), in phase with HO
\overline{SD}	Logic input for shutdown
V_B	High side floating supply
HO	High side gate drive output
V_S	High side floating supply return
V_{CC}	Low side and logic fixed supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments

<p>8 Lead PDIP</p>	<p>8 Lead SOIC</p>
IR2104	IR2104S

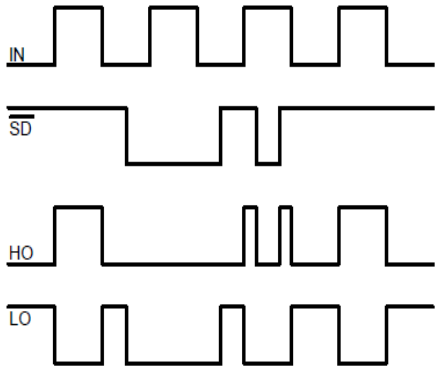


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

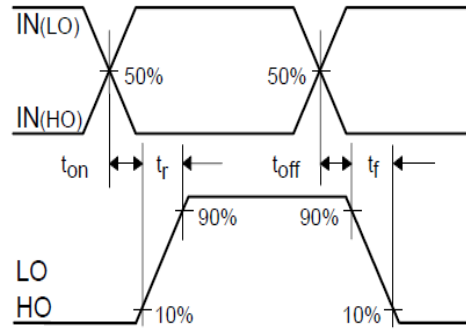


Figure 2. Switching Time Waveform Definitions

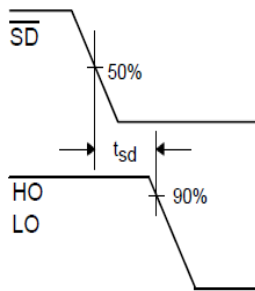


Figure 3. Shutdown Waveform Definitions

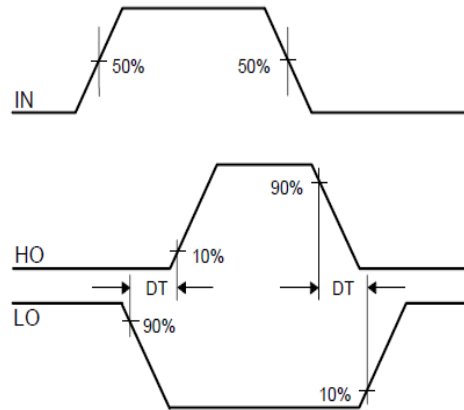


Figure 4. Deadtime Waveform Definitions

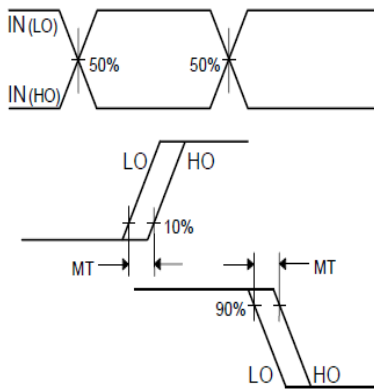


Figure 5. Delay Matching Waveform Definitions

IR2104(S)&(PbF)

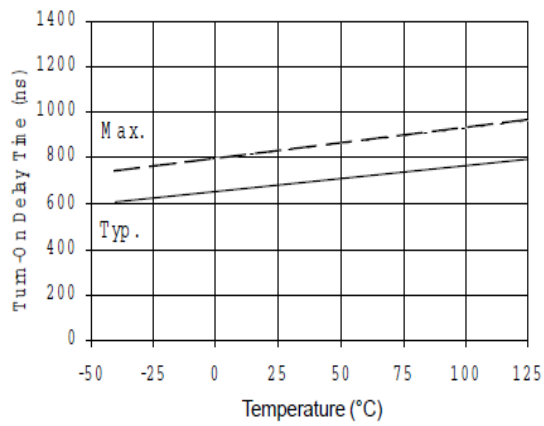


Figure 6A. Turn-On Time vs Temperature

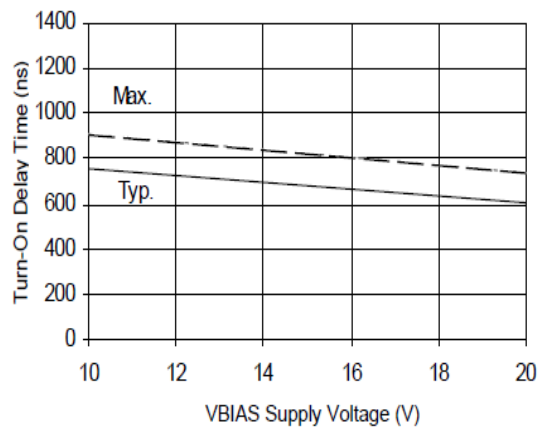


Figure 6B. Turn-On Time vs Supply Voltage

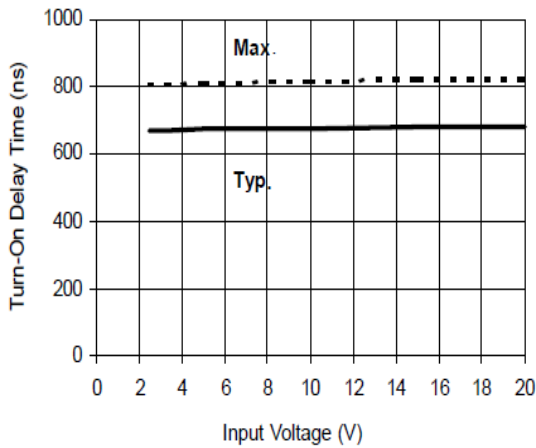


Figure 6C. Turn-On Time vs Input Voltage

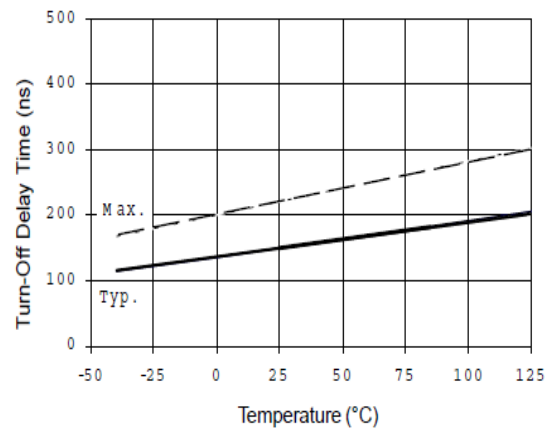


Figure 7A. Turn-Off Time vs Temperature

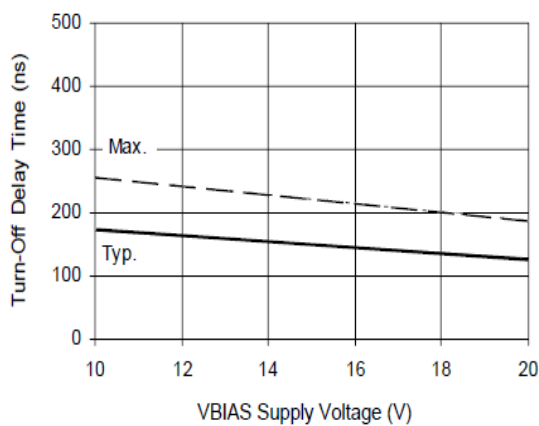


Figure 7B. Turn-Off Time vs Supply Voltage

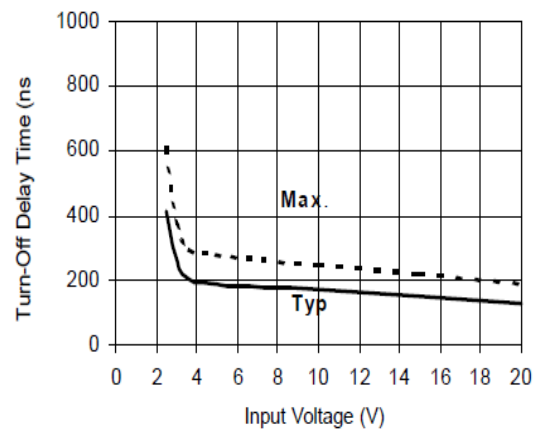


Figure 7C. Turn-Off Time vs Input Voltage

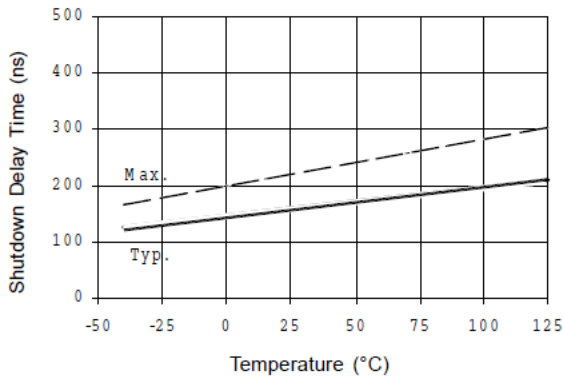


Figure 8A. Shutdown Time vs Temperature

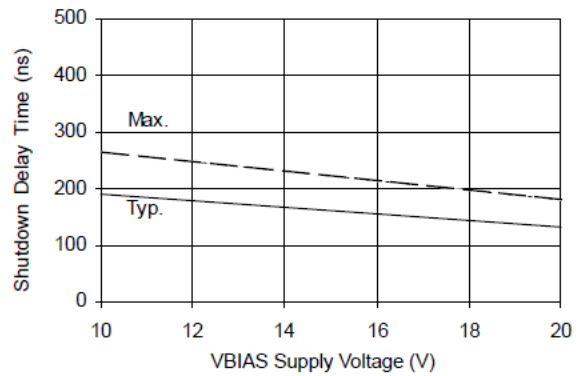


Figure 8B. Shutdown Time vs Voltage

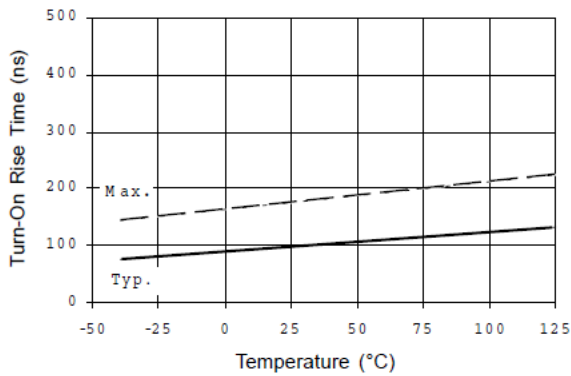


Figure 9A. Turn-On Rise Time vs Temperature

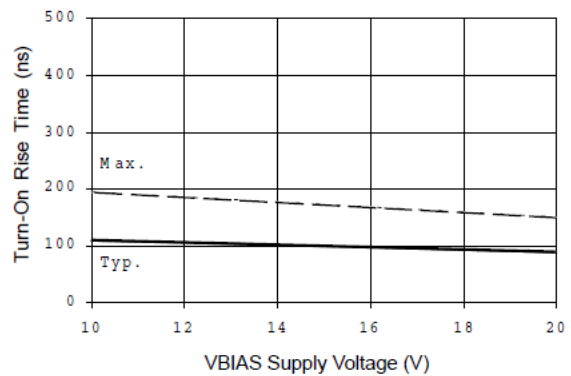


Figure 9B. Turn-On Rise Time vs Voltage

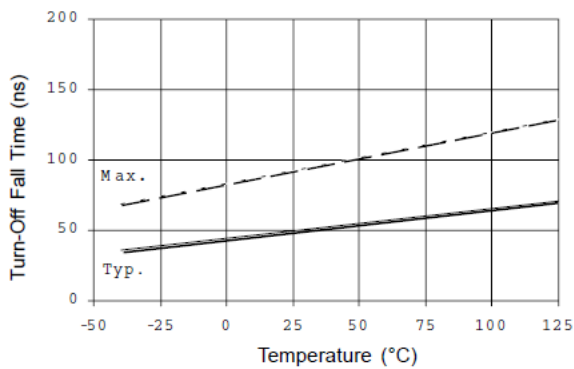


Figure 10A. Turn-Off Fall Time vs Temperature

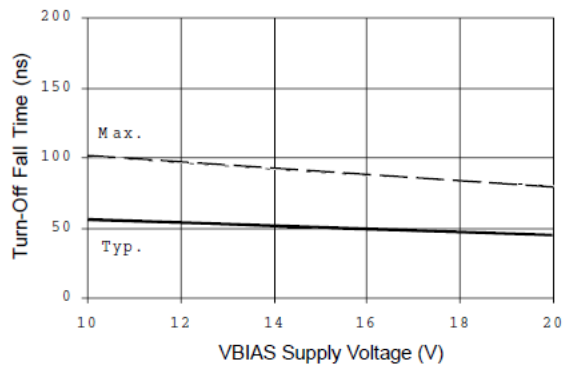


Figure 10B. Turn-Off Fall Time vs Voltage



Low-Cost, SOT23, Voltage-Output, High-Side Current-Sense Amplifier

General Description

The MAX4173 low-cost, precision, high-side current-sense amplifier is available in a tiny SOT23-6 package. It features a voltage output that eliminates the need for gain-setting resistors and it is ideal for today's notebook computers, cell phones, and other systems where current monitoring is critical. High-side current monitoring is especially useful in battery-powered systems, since it does not interfere with the ground path of the battery charger. The input common-mode range of 0 to +28V is independent of the supply voltage and ensures that the current-sense feedback remains viable even when connected to a battery in deep discharge. The MAX4173's wide 1.7MHz bandwidth makes it suitable for use inside battery charger control loops.

The combination of three gain versions and a user-selectable external sense resistor sets the full-scale current reading. This feature offers a high level of integration, resulting in a simple and compact current-sense solution.

The MAX4173 operates from a single +3V to +28V supply, typically draws only 420 μ A of supply current over the extended operating temperature range (-40°C to +85°C), and is offered in the space-saving SOT23 package.

Applications

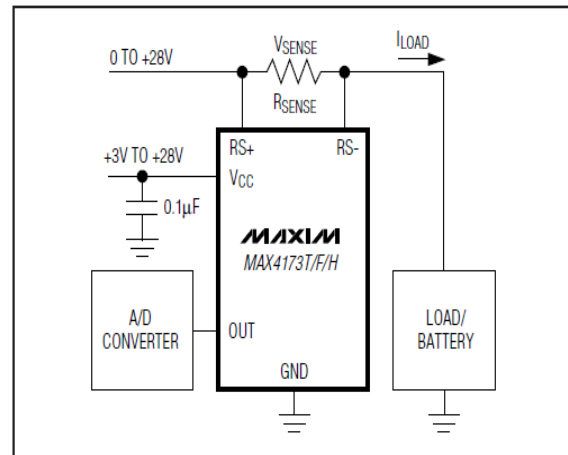
- Notebook Computers
- Portable/Battery-Powered Systems
- Smart Battery Packs/Chargers
- Cell Phones
- Power-Management Systems
- General System/Board-Level Current Monitoring
- PA Bias Control
- Precision Current Sources

Features

- ◆ Low-Cost, Compact Current-Sense Solution
- ◆ High Accuracy +2V to +28V Common-Mode Range, Functional Down to 0V, Independent of Supply Voltage
- ◆ Three Gain Versions Available
 - +20V/V (MAX4173T)
 - +50V/V (MAX4173F)
 - +100V/V (MAX4173H)
- ◆ $\pm 0.5\%$ Full-Scale Accuracy
- ◆ $\pm 3\text{mV}$ Input Offset Voltage (MAX4173T)
- ◆ Wide 1.7MHz Bandwidth (MAX4173T)
- ◆ 420 μ A Supply Current
- ◆ Available in Space-Saving SOT23 Package

MAX4173T/F/H

Typical Operating Circuit



Ordering Information

PART	GAIN (V/V)	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	SOT TOP MARK
MAX4173TEUT+T	20	-40°C to +85°C	6 SOT23	AABN
MAX4173TESA+	20	-40°C to +85°C	8 SO	—
MAX4173FEUT+T	50	-40°C to +85°C	6 SOT23	AABO
MAX4173FESA+	50	-40°C to +85°C	8 SO	—
MAX4173HEUT+T	100	-40°C to +85°C	6 SOT23	AABP
MAX4173HESA+	100	-40°C to +85°C	8 SO	—

+Denotes a lead(Pb)-free/RoHS-compliant package.

T = Tape and reel.

Pin Configurations appear at end of data sheet.

Low-Cost, SOT23, Voltage-Output, High-Side Current-Sense Amplifier

MAX4173T/F/H

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

($V_{RS+} = 0$ to $+28V$, $V_{CC} = +3V$ to $+28V$, $V_{SENSE} = 0V$, $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , $R_{LOAD} = \infty$ unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Bandwidth	BW	$V_{RS+} = +12V$, $V_{CC} = +12V$, $C_{LOAD} = 5pF$	MAX4173T, $V_{SENSE} = +100mV$		1.7		MHz
			MAX4173F, $V_{SENSE} = +100mV$		1.4		
			MAX4173H, $V_{SENSE} = +100mV$		1.2		
			$V_{SENSE} = +6.25mV$ (Note 4)		0.6		
Gain	A_V	MAX4173T			20		V/V
		MAX4173F			50		
		MAX4173H			100		
Gain Accuracy	ΔA_V	MAX4173T/F $V_{SENSE} = +10mV$ to $+150mV$, $V_{CC} = V_{RS+} = 12V$	$T_A = +25^\circ C$	0.5	± 2.5	%	
			$T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$		4.0		
	ΔA_V	MAX4173H $V_{SENSE} = +10mV$ to $+100mV$, $V_{CC} = V_{RS+} = 12V$	$T_A = +25^\circ C$	0.5	± 2.5		
			$T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$		4.0		
Input Offset Voltage (Note 6)	V_{OS}	MAX4173TEUT	$T_A = +25^\circ C$	0.3	± 3	mV	
			$T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$		± 5		
OUT Settling Time to 1% of Final Value		$V_{CC} = +12V$, $V_{RS+} = 12V$, $C_{LOAD} = 5pF$	$V_{SENSE} = +6.25mV$ to $+100mV$	400		ns	
			$V_{SENSE} = +100mV$ to $+6.25mV$	800			
OUT Output Resistance	R_{OUT}			12		k Ω	
Power-Supply Rejection	PSR	MAX4173T, $V_{SENSE} = 80mV$, $V_{RS+} \geq +2V$		60	84	dB	
		MAX4173F, $V_{SENSE} = 32mV$, $V_{RS+} \geq +2V$		60	91		
		MAX4173H, $V_{SENSE} = 16mV$, $V_{RS+} \geq +2V$		60	95		
Power-Up Time to 1% of Final Value		$V_{SENSE} = +100mV$, $C_{LOAD} = 5pF$		10		μs	
Saturation Recovery Time		$V_{CC} = +12V$, $V_{RS+} = 12V$ (Note 7)		10		μs	

Note 1: All devices are 100% production tested at $T_A = +25^\circ C$. All temperature limits are guaranteed by design.

Note 2: Guaranteed by Total Output Voltage Error Test.

Note 3: Total OUT Voltage Error is the sum of gain and offset voltage errors.

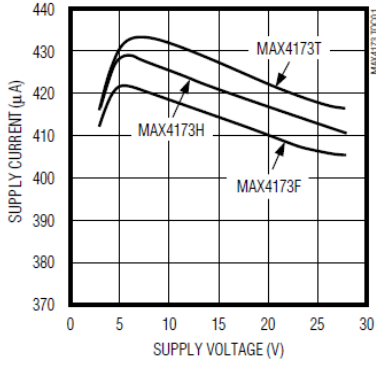
Note 4: $+6.25mV = 1/16$ of $+100mV$ full-scale voltage.

Note 5: V_{SENSE} such that output stage is in saturation.

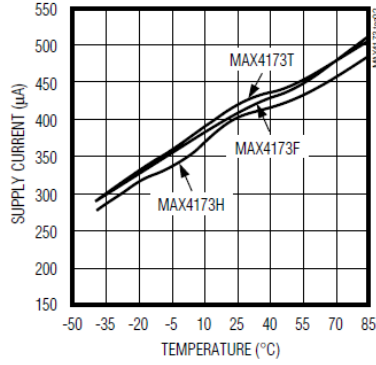
Note 6: V_{OS} is extrapolated from the Gain Accuracy tests.

Note 7: The device does not experience phase reversal when overdriven.

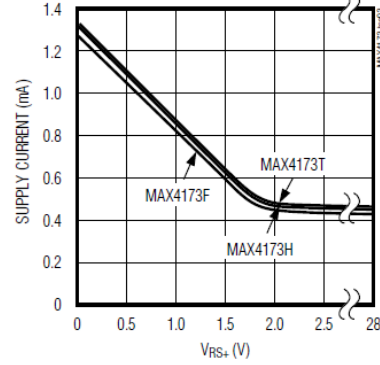
SUPPLY CURRENT vs. SUPPLY VOLTAGE



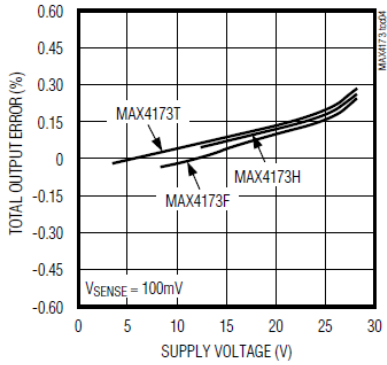
SUPPLY CURRENT vs. TEMPERATURE



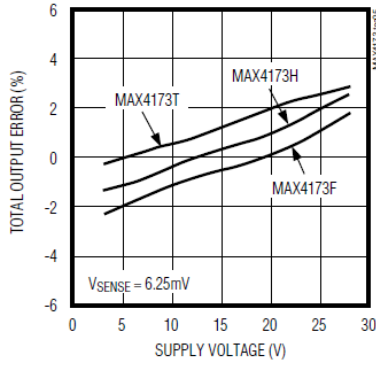
SUPPLY CURRENT vs. RS+ VOLTAGE



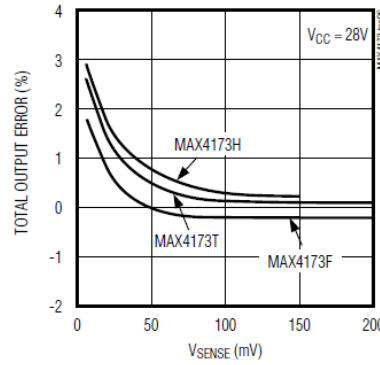
TOTAL OUTPUT ERROR vs. SUPPLY VOLTAGE



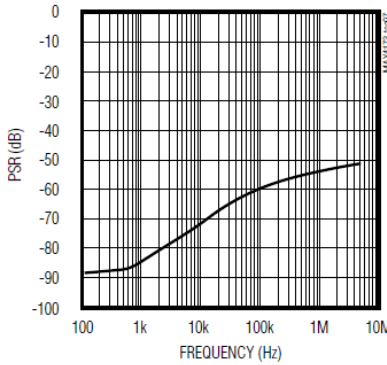
TOTAL OUTPUT ERROR vs. SUPPLY VOLTAGE



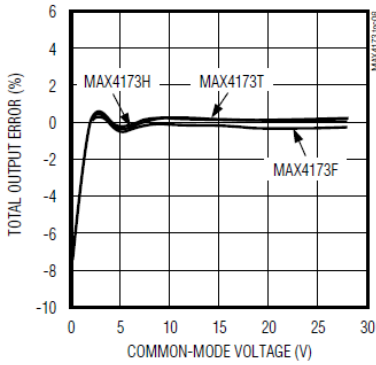
TOTAL OUTPUT ERROR vs. FULL-SCALE SENSE VOLTAGE



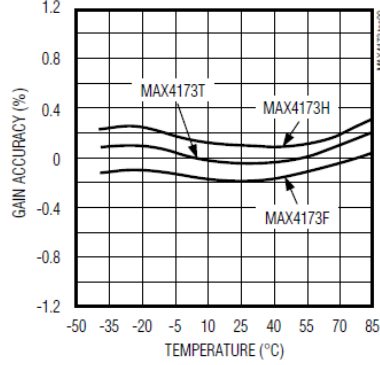
POWER-SUPPLY REJECTION vs. FREQUENCY



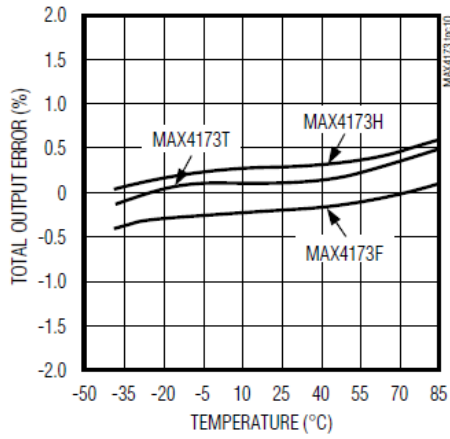
TOTAL OUTPUT ERROR vs. COMMON-MODE VOLTAGE



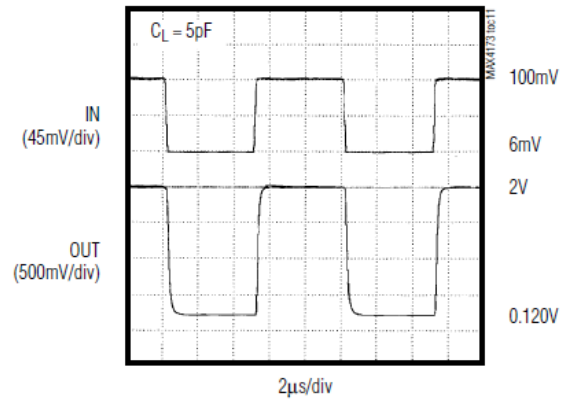
GAIN ACCURACY vs. TEMPERATURE



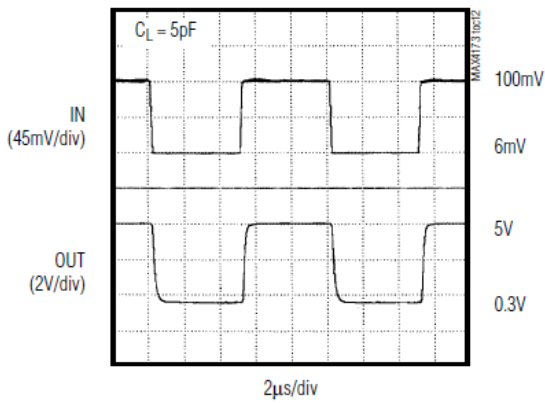
TOTAL OUTPUT ERROR vs. TEMPERATURE



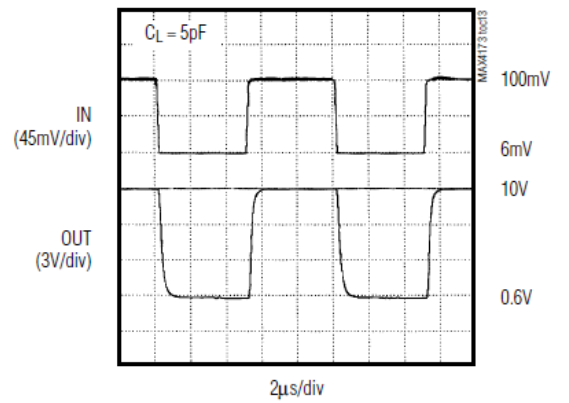
**MAX4173T
LARGE-SIGNAL TRANSIENT RESPONSE
($V_{SENSE} = 6\text{mV to } 100\text{mV}$)**



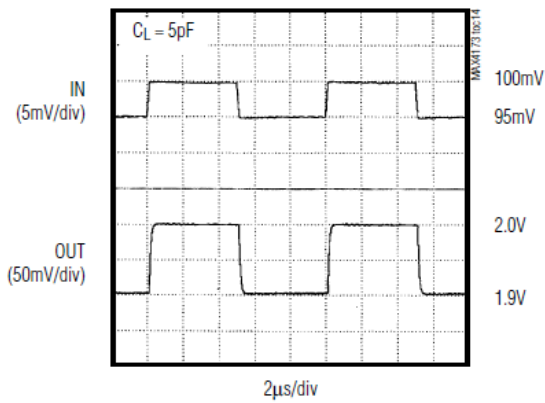
**MAX4173F
LARGE-SIGNAL TRANSIENT RESPONSE
($V_{SENSE} = 6\text{mV to } 100\text{mV}$)**



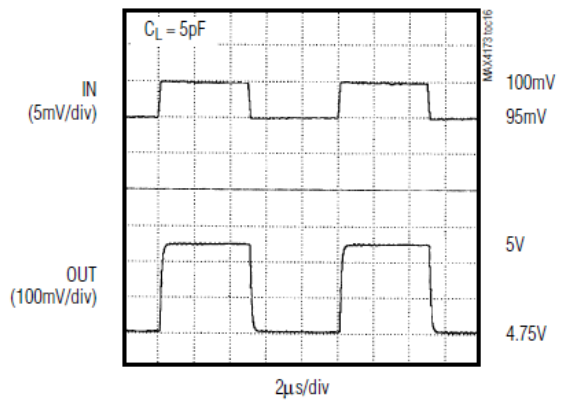
**MAX4173H
LARGE-SIGNAL TRANSIENT RESPONSE
($V_{SENSE} = 6\text{mV to } 100\text{mV}$)**



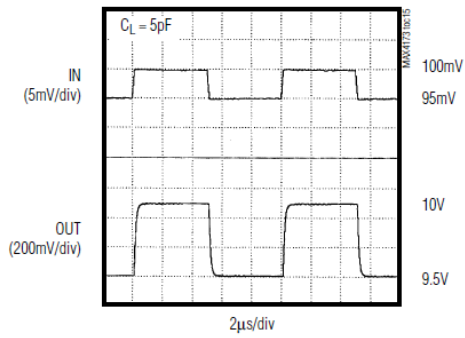
**MAX4173T
SMALL-SIGNAL TRANSIENT RESPONSE
($V_{SENSE} = 95\text{mV TO } 100\text{mV}$)**



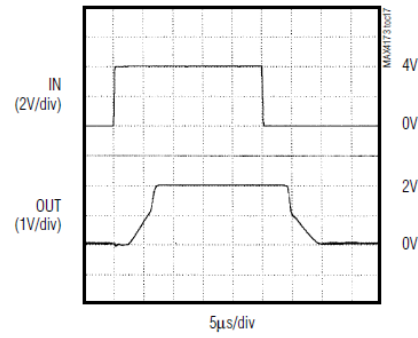
**MAX4173F
SMALL-SIGNAL TRANSIENT RESPONSE
($V_{SENSE} = 95\text{mV TO } 100\text{mV}$)**



MAX4173H
SMALL-SIGNAL TRANSIENT RESPONSE
($V_{SENSE} = 95\text{mV}$ to 100mV)



START-UP DELAY ($V_{CC} = 0$ to 4V)
($V_{SENSE} = 100\text{mV}$)



Pin Description

PIN		NAME	FUNCTION
SOT23	SO		
1, 2	3	GND	Ground
3	1	V_{CC}	Supply Voltage Input. Bypass to GND with a $0.1\mu\text{F}$ capacitor.
4	8	RS+	Power-Side Connection to the External Sense Resistor
5	6	RS-	Load-Side Connection for the External Sense Resistor
6	4	OUT	Voltage Output. V_{OUT} is proportional to V_{SENSE} ($V_{RS+} - V_{RS-}$). Output impedance is approximately $12\text{k}\Omega$.
-	2, 5, 7	N.C.	No Connection. Not internally connected.

Βιβλιογραφία

- [1]: Σ.Ν.Καπλάνης.Μηχανική των Φωτοβολταικών Συστημάτων.Ήπιες Μορφές ενέργειας(3εκδοση).Εκδόσεις Ίων 2004
- [2]:Ι.Ε.Φραγκιαδάκης. Φωτοβολταικά Συστήματα(3^η έκδοση).Εκδόσεις Ζητή Θεσσαλονίκη 2009
- [3]: Angstrom AK, Solar and atmospheric radiation. Q.J.R.M.S.1924;20:121-126
- [4]: Bird Rand Hulstrom RL, A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. SERI/TR-642-761. Solar energy Research institute, Golden, Colorado, U.S.A, 1981.
- [5]:Black JN, Bonython CW and Prescott JA, Solar radiation and the duration of sunshine,Q.J.R.M.S. 1954;84:231-235.
- [6]: Davies JA, McKay DC . Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces.Solar energy 1989;43:153-68
- [7]: Duffie J.A, Beckman W.A, Solar engineering on Thermal processes,third edition, John Wiley & Sons, LTD, New York,2006
- [8]: Gopinathan KK and Soler A. Diffuse radiation models and monthly –average, daily, diffuse data for a wide latitude range. Energy 1996; 20(7):65-67
- [9]: Gordon JM, Reddy TA. Time series analysis of hourly global horizontal solar radiation. Solar energy 1988;41:423-9
- [10]: Gueymard C.Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data,. Solar energy 1993;51:121-38
- [11]: Guemard GA. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part1 : detailed theoretical performance assessment. Solar energy 2003; 74:355-79
- [12]: Hamilton HL and Jackson A, A shield for obtaining diffuse sky radiation from portions of the sky, Solar energy 1985; 34:121-123.
- [13]: Iqbal M. An introduction to solar radiation. Toronto: Academic press, 1983
- [14]: Jain PC, Jain S, Ratto CF. A new model for obtaining horizontal instantaneous global and diffuse radiation from Daily values . Solar energy 1988;41:397-404
- [15]: Rahman S and Chowdhury BH, Simulation of photovoltaic power systems and their performance prediction. IEEE Transactions on Energy Conversion , 440446 (1988)
- [16]: ReindlDT, Beckman WA, Duffie JA. Diffuse fraction corrections. Solar energy 1990;45(1):1-7
- [17]: Samuel TDMA. Estimation of global radiation for Sri Lanka, Solar energy 1991;47:333
- [18]: Sefa Tarhan, Ahmet Sary, Model selection for global and diffuse radiation over the central black sea(CBS) region of Turkey, energy conversion and management 46 (2005) 605-613.

- [19]: Wong LT, Chow WK. Solar radiation model . Applied energy 2001; 69:191-224
- [20]: Βασιλική Περράκη. Νέες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- [21]: Planning and installing photovoltaic system
- [22]: Mukund R.patel. Wind and solar Power systems.
- [23]: S.Sedra, C,Smith. Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα
- [24]: P.Wurfel. Physics of solar cells
- [25]: Green M, Solar cells: Operating principles, Technology, and system applications
- [26]:N.Mohan, T.Undeland, W.Robbins. Ηλεκτρονικά ισχύος
- [27]:Στέφανος Ν.Μανιάς.Ηλεκτρονικά Ισχύος.Έκτη έκδοση. Εκδόσεις Συμевών.Αθήνα 2007
- [28]: Ε.Τατάκης Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος και βιομηχανικές εφαρμογές
- [29]: Gi-Hwan Kangla , Kyung-Soo Kiml , Chi-Hong Parka, L.Waithirua, Gwon-Jong Yul, HyungKeun Ahna, Deuk-Young Hana 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- [30]: Roland Bruendinger , Benoit Bletterie, Matthias Milde, henk Oldenkamp 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference
- [31]: W.Swiegers, Johan H.R. Enslin, (1998) An integrated Maximum power point Tracker for photovoltaic panels.[online], Available: IEEE explore database. [20th july 2006]
- [32]: K.H Hussein, I.Muta. T.Hoshino , M.Osakada, maximum Photovoltaic Power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. [online], IEEE Proceeding of
- [33]: P.Huynh and B.H.Cho , “Design and analysis of microprocessor control led peak power tracking system”, in Proc.27th IECEC 1992,vol.1, pp.67-72.
- [34]: O. Wasynczuk, “Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems,” IEEE Trans. Power App.Syst. , vol.PAS-102, pp3031-3037, Sept .1983.
- [35]: KHOUZAM, K.Y.: ‘Optimum load matching in direct –coupled photovoltaic power systems –application to resistive loads ‘, IEEE Trans. 1990, EC-5, (2),pp.265-271.
- [36]: Leyva R, Alonso C., Queinnec I., PastorCid A, Lagarnge D. and Martinez L. “MPPT of photovoltaic systems using extremum seeking control”. IEEE transactions on aerospace and electronics systems, vol.42., NO.1. January 2006,.pp249-256.
- [37]: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>.
- [38]: www.timnolan.com
- [39]: www.arduino.cc/playground/Code/Timer1