

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1309

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (ΜΡΡΤ)



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΠΟΥΛΟΣ ΘΑΝΑΣΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ :

Dr. ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ ΜΑΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πάτρας από τους σπουδαστές Αντωνόπουλος Α. και Χαραλαμπόπουλος Θ.. Η εργασία αφορά στην υλοποίηση ενός συστήματος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος ενός συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων σε υπάρχουσες και νέες μονάδες μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοσή τους, καθιστώντας έτσι τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πίο ελκυστικές.

Οι συγγραφείς της εργασίας αυτής επιθυμούν να ευχαριστήσουν τους κ. Νίκο και κ. Δομένικο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με την κατασκευή ενός ελεγκτή σημείου μέγιστης ισχύος. Οι ελεγκτές αυτοί χρησιμοποιούνται για την μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην συνεχή παρακολούθηση των τιμών της I-V εξόδου ενός πάνελ με συγκεκριμένες προδιαγραφές προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης λειτουργίας, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει το πάνελ τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ως που να έρθει μια ισορροπία. Η κατασκευή αυτή θα εφαρμοστεί σε πραγματικό πάνελ και οι μετρήσεις θα αξιολογηθούν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

1.1 Ηλεκτρική ενέργεια	6
1.2 Συστήματα φωτοβολταϊκών.....	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

1.1 Το Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	9
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	12
1.3 Ανασκόπηση παραγόντων.....	18
1.4 Εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών.....	23
1.4.1 Πλαίσια και συνδεσμολογία.....	23
1.4.2 Βάσεις και προσανατολισμός.....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

2.1 Γενικά.....	29
2.2 Συσσωρευτές.....	30
2.2.1 Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.....	30
2.2.2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών – τύποι.....	30
2.2.3 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτη..	32
2.2.4 Φόρτιση – Εκφόρτιση	34
2.2.5 Το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης.....	36
2.3 Ελεγκτές φόρτισης συσσωρευτών.....	37
2.3.1 Γενικά.....	37
2.3.2 Βασικοί τύποι ελεγκτών φόρτισης.....	38
2.3.3 Τρόποι φόρτισης.....	40
2.4 Μετατροπείς DC – DC.....	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Γενικά.....	45
3.2 Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης.....	46
3.3 Αλγόριθμος οριακής αύξησης αγωγιμότητας.....	48
3.5 Αλγόριθμος σταθερής τάσης.....	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΡΡΤ ΜΕ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ AVR Atmega16

4.1 Εισαγωγή.....	50
4.2 Ανάλυση και επεξήγηση της διάταξης.....	51
4.3 Ανάπτυξη του προγράμματος.....	61
4.3.1 Codevision AVR.....	61
4.4 Υλοποίηση του αλγορίθμου ΜΡΡΤ.....	61
4.5 Σύνοψη.....	71

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο ηλεκτρισμός και οι εφαρμογές του αποτελούν βασικό συστατικό του σύγχρονου τεχνολογικού πολιτισμού και δίνουν μορφή στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Η παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία των εφαρμογών αυτών κατέχει κεντρική θέση στην οικονομική δραστηριότητα του σύγχρονου κόσμου.

Κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο, το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως παράγεται σε μεγάλες θερμοηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Στις εγκαταστάσεις αυτές, μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων καίγονται για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, μέσω της οποίας παράγεται τελικά ηλεκτρισμός. Η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρκετά μειονεκτήματα, ορισμένα εκ των οποίων είναι τα εξής:

- Η ποσότητα των διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητη. Η προσκόλληση στο συγκεκριμένο μοντέλο ηλεκτροπαραγωγής εκθέτει την ανθρωπότητα σε μεγάλους κινδύνους, μόλις τα ορυκτά καύσιμα εξαντληθούν.
- Η αυξανόμενη ζήτηση των ορυκτών καυσίμων οδηγούν σε αύξηση των τιμών τους και θέτουν σε κίνδυνο το επίπεδο ζωής σε χώρες με μεγάλο βαθμό εξάρτησης από αυτά.
- Η καύση ορυκτών καυσίμων προκαλεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Για τους λόγους που προηγήθηκαν υπάρχει σαφής τάση στροφής προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (στο εξής Α.Π.Ε.). Οι ΑΠΕ έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών πηγών :

- Οι ΑΠΕ είναι περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς δεν συντείνουν στην όξυνση του προβλήματος του θερμοκηπίου.

- Οι ΑΠΕ δεν εξαντλούνται, αντίθετα έχουν την δυνατότητα να προμηθεύουν τον άνθρωπο με ηλεκτρική ενέργεια επ' αόριστον.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Μία από τις σημαντικότερες και περισσότερα υποσχόμενες τεχνολογίες ΑΠΕ είναι αυτή των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μετατρέπουν εύκολα, αποδοτικά και άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό.

Η δυνατότητα αυτή αποκαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1839 όταν ο Ανρί Μπεκερέλ (Becquerel) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Εν συντομία, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιλαμβάνει την απορρόφηση φωτεινής ενέργειας από τα ηλεκτρόνια των ατόμων των στοιχείων που αποτελούν το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα ηλεκτρόνια αυτά στην συνέχεια διαφεύγουν και δημιουργείται έτσι ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα πλέον βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι τα εξής:

- Η τεχνολογία αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται χωρίς την εκπομπή ρύπων.
- Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λειτουργούν αθόρυβα.
- Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια ζωής, Τυπικές τιμές που δίνονται από τους κατασκευαστές ξεπερνούν τα 20 έτη λειτουργίας.
- Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να τοποθετηθούν εκ των υστέρων σε ήδη υπάρχοντα κτήρια χωρίς μεγάλες δυσκολίες.
- Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών (σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ όπως τα αιολικά) είναι εντελώς αθόρυβη.
- Λόγω της μη ύπαρξης κινούμενων μερών, η λειτουργία των φωτοβολταϊκών έχει ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης.
- Τα συστήματα φωτοβολταϊκών μπορούν εύκολα να επεκταθούν, αν οι ενεργειακές ανάγκες αυξηθούν.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι πλήρως ανανεώσιμη και είναι διαθέσιμη σε κάθε γεωγραφική περιοχή.

- Τα συστήματα φωτοβολταϊκών μπορούν να έχουν μικρό μέγεθος και να τοποθετούνται κοντά στον τόπο τελικής κατανάλωσης. Αυτό σημαίνει πως δεν θα απαιτείται τροποποίηση ή επέκταση του υπάρχοντος δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το κυριότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι το σχετικά υψηλό κόστος της αρχικής εγκατάστασης. Τα κόστος για την εγκατάσταση συστήματος φωτοβολταϊκών ανά kw είναι περίπου 5000 – 7000\$ (<http://newscenter.lbl.gov>) . Με δεδομένο το ότι μία τυπική οικία καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ που συχνά ξεπερνά τα 4kW, προκύπτει πως το κόστος για την εγκατάσταση τέτοιου συστήματος είναι σημαντικό. Πρέπει όμως να τονιστεί πως το κόστος αυτό μπορεί να αποσβεστεί σε 5 – 6 έτη, ενώ κατά την υπόλοιπη διάρκεια ζωής (που συχνά ξεπερνά τα 25 έτη) το σύστημα θα παράγει δωρεάν ηλεκτρική ενέργεια.

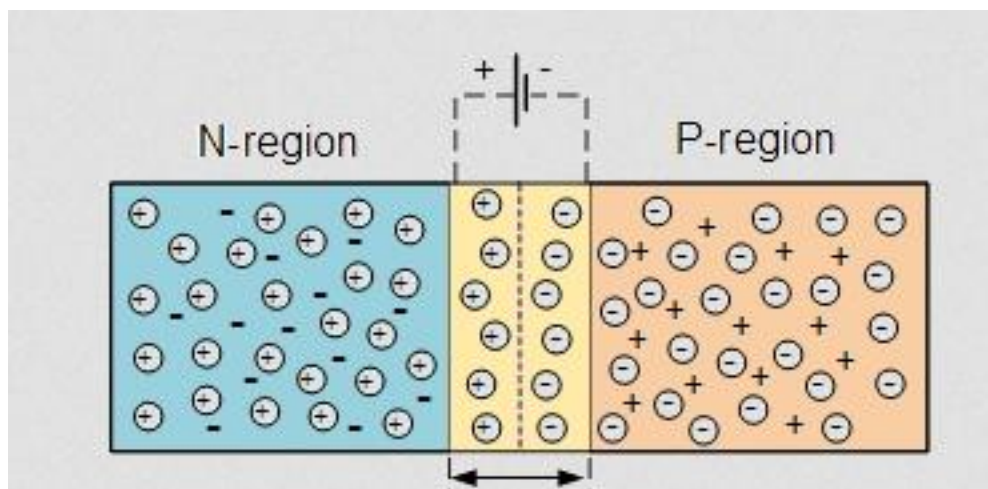
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

1.1 Το Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάζεται από υλικά που παρουσιάζουν ημιαγώγιμη συμπεριφορά. Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος της πρόσμιξης που χρησιμοποιείται :

- Ημιαγωγοί τύπου p
- Ημιαγωγοί τύπου n

Στους ημιαγωγούς τύπου p εμφανίζεται περίσσεια θετικών φορτίων (οπές). Αντίθετα, στους ημιαγωγούς τύπου n εμφανίζεται περίσσεια αρνητικών φορτίων (ηλεκτρονίων). Τα δύο στρώματα των ημιαγωγών έρχονται σε επαφή και στο επίπεδο της επαφής δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο, λόγω του ετερόσημου φορτίου.



Σχ. 1.1 : Επαφή p-n (<http://www.electronics-tutorials.ws>)

Κατά την σύνδεση των δύο επιφανειών μέσω ακροδεκτών και αντιστατικού φορτίου, θα εμφανιστεί ηλεκτρικό πεδίο, λόγω του ετερόσημου φορτίου που περιέχουν τα δύο διαφορετικά είδη ημιαγωγών. Έτσι, εμφανίζεται ροή ηλεκτρικού φορτίου και ηλεκτρικό ρεύμα.

Γίνεται έτσι προφανές πως η απλή διάταξη του σχήματος 1.1 μπορεί να

λειτουργήσει ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλεκτρικό ρεύμα διαρκεί για όσο υπάρχει προσπίπωση ηλιακού φωτός πάνω στο στοιχείο.

Ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$n = \frac{P_{outmax}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

- Φωτοβολταϊκά πυριτίου πρώτης γενιάς:

Τα ημιαγώγιμα στοιχεία στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού απορροφούν την ενέργεια ενός φωτονίου όταν αυτή είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στους δύο τύπους ημιαγωγού. Από την ενέργεια αυτή του απορροφούμενου φωτονίου το μεγαλύτερο μέρος μετατρέπεται σε θερμότητα και έτσι δεν αξιοποιείται. Το τμήμα της ενέργειας που αξιοποιείται ισοδυναμεί με το ενεργειακό διάκενο του στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό έχει τις εξής συνέπειες:

- Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με μικρό ενεργειακό διάκενο θα αξιοποιεί την ενέργεια ενός μεγάλου αριθμού φωτονίων. Το τμήμα όμως της ενέργειας που θα αξιοποιείται θα είναι σχετικά μικρό.
- Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με μεγάλο ενεργειακό διάκενο θα αξιοποιεί το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των φωτονίων που θα απορροφά. Τα περισσότερα φωτόνια όμως δεν θα απορροφώνται καθόλου, καθώς το ενεργειακό τους περιεχόμενο θα είναι μικρότερο από το διάκενο.

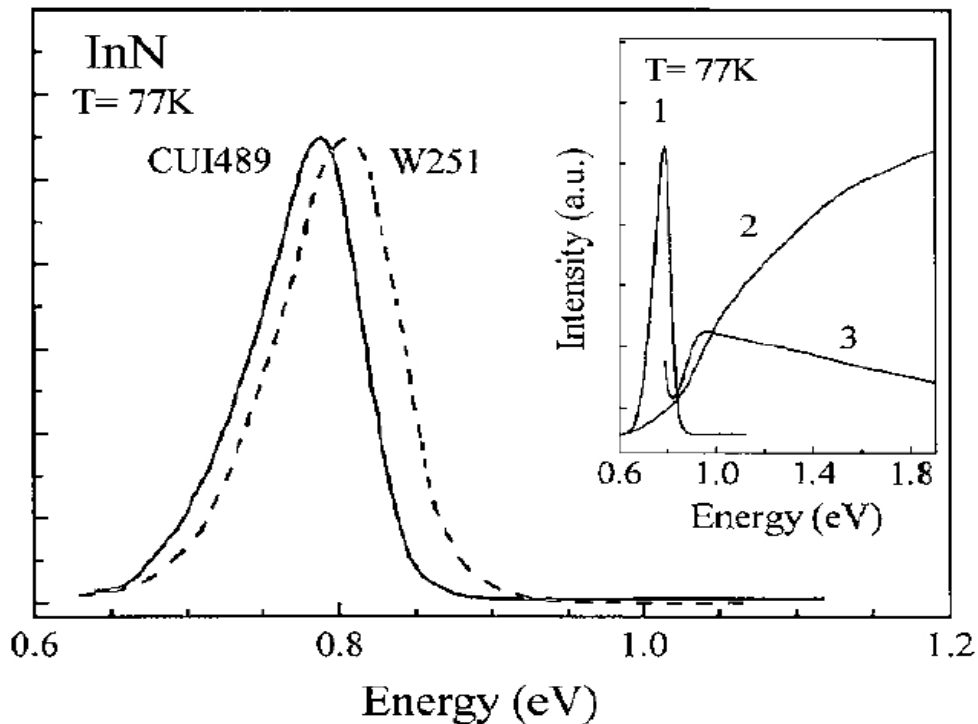
Έτσι, υπάρχει μία συγκεκριμένη τιμή του διακένου του φωτοβολταϊκού που μεγιστοποιεί την απόδοσή του. Η τιμή αυτή για το διάκενο είναι 1,5eV. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του στοιχείου θα είναι :

$$n = 29\%$$

Πρέπει να σημειωθεί πως η απόδοση αυτή είναι η μέγιστη δυνατή θεωρητικά. Οι πραγματικές αποδόσεις είναι ακόμη χαμηλότερες. Γίνονται πάντως προσπάθειες από αρκετά εργαστήρια και ερευνητικές ομάδες ώστε η απόδοση των φωτοβολταϊκών να αυξηθεί. Αξίζει να σημειωθεί η προσπάθεια του ARC Photovoltaic Centre of Excellence σε πανεπιστήμιο της Αυστραλίας, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου πρώτης γενιάς με απόδοση πολύ κοντά στο θεωρητικό όριο του 29%. (<http://photonics.com/>)

- Φωτοβολταϊκά άλλων υλικών

Γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα αποτελούνται από στρώσεις διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών, και όχι μόνο από πυρίτιο. Ιδιαίτερη μνεία αξίζει να γίνει για το νιτρίδιο του Ινδίου. Το υλικό αυτό πιστευόταν στο παρελθόν πως είχε ενέργεια διακένου περίπου 1.97eV. Νεότερες όμως έρευνες απέδειξαν πως το πραγματικό διάκενο του υλικού είναι περίπου 0.7eV, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία του (Davydov et al, 2002)



Σχ. 1.2 : Καμπύλη απορρόφησης InN (Davydov et al, 2002)

Με βάση τα παραπάνω, και με την προϋπόθεση πως οι έρευνες αυτές θα ευωδοθούν, υπάρχει η προοπτική αύξησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε επίπεδα κοντά στο 50%. Επιπλέον, υπάρχουν δυνατότητες και προοπτικές σημαντικής μείωσης του κόστους παραγωγής.

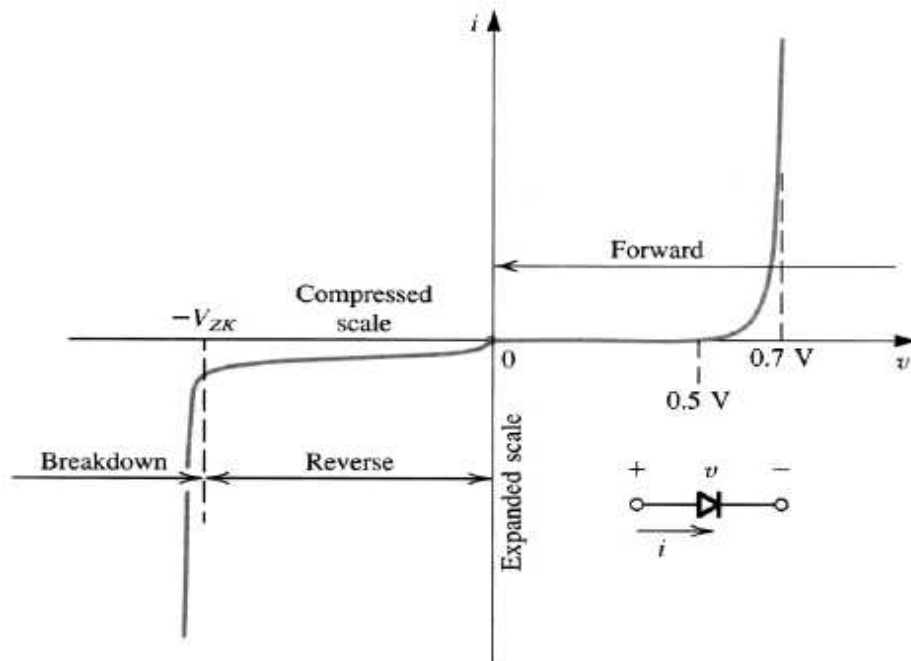
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

- Ιδανική συμπεριφορά φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί ως μια απλή πηγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αν η πηγή αυτή θεωρηθεί ιδανική, προκύπτει πως η τιμή της έντασης του ρεύματος που θα διαρρέει ένα αντιστατικό φορτίο που θα συνδεθεί με το στοιχείο θα παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από την τιμή της αντίστασης του φορτίου. Για να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο, θα πρέπει η τάση στα άκρα της πηγής ρεύματος να μεταβάλλεται σε σχέση με την τιμή της αντίστασης – φορτίου.

- Πραγματική συμπεριφορά φωτοβολταϊκού στοιχείου

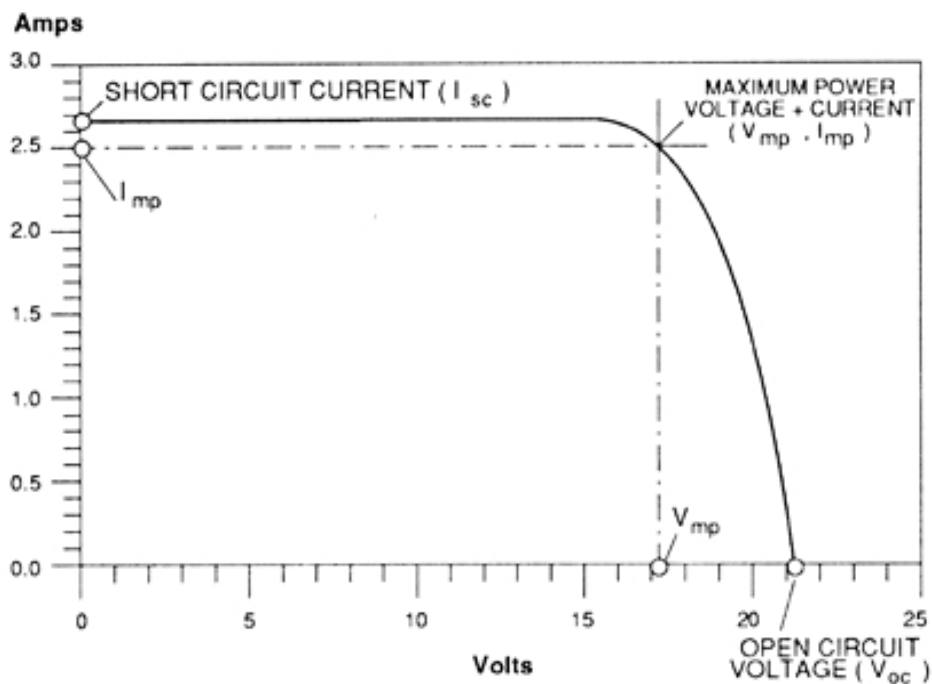
Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνειά του, συμπεριφέρεται με τρόπο παρόμοιο με αυτόν μίας τυπικής διόδου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



The diode $i-v$ relationship with some scales expanded and others compressed in order to reveal details.

Σχ. 1-3 : Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου

Όταν υπάρχει προσπίπτουσα ακτινοβολία στο στοιχείο, τότε προκαλείται διαχωρισμός των οπών από τα ηλεκτρόνια, με τέτοιο μάλιστα τρόπο ώστε να οδηγούνται τα ηλεκτρόνια στην περιοχή n της επαφής και οι οπές στην περιοχή p της επαφής. Στην περίπτωση αυτή, η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ρεύματος του στοιχείου είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.4 : Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού στοιχείου εν λειτουργία

Η ισχύς που αποδίδει στο φορτίο το φωτοβολταϊκό στοιχείο ανά πάσα στιγμή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = V \cdot I \quad (1.2)$$

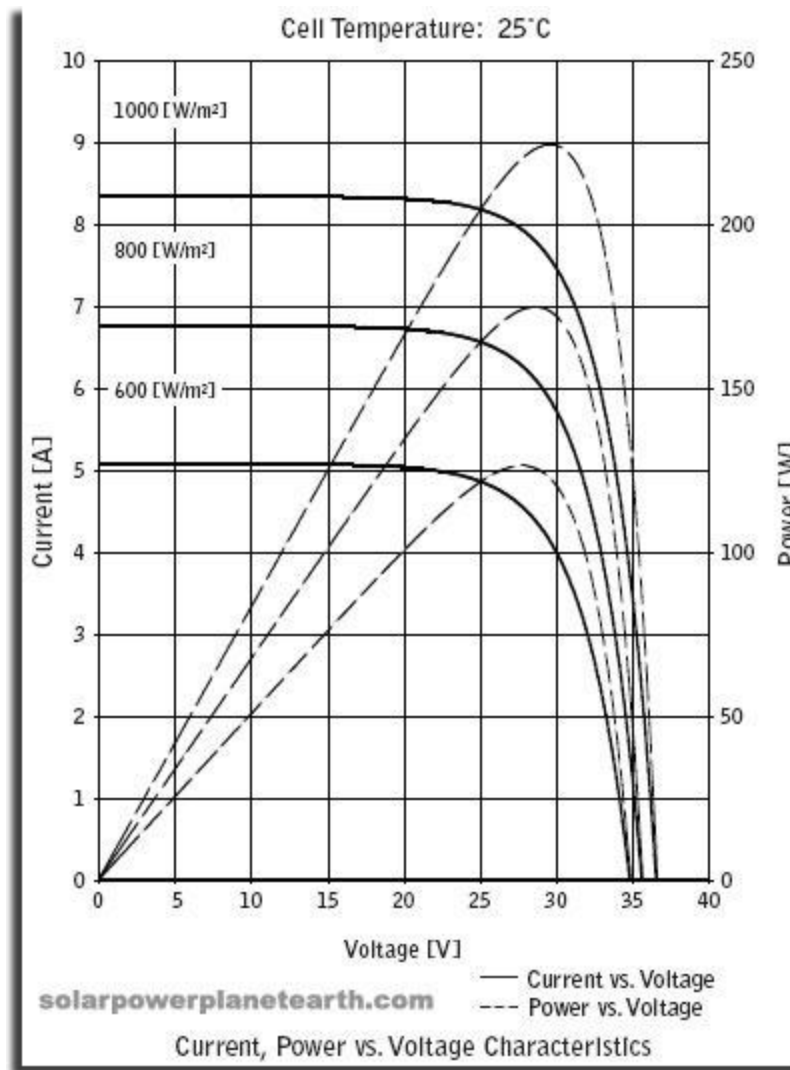
Όπου:

P : η αποδιδόμενη από το φωτοβολταϊκό στο φορτίο ισχύς σε W

V : η τάση στα άκρα του στοιχείου

I : το ρεύμα που διαρρέει τόσο το φορτίο, όσο και το φωτοβολταϊκό

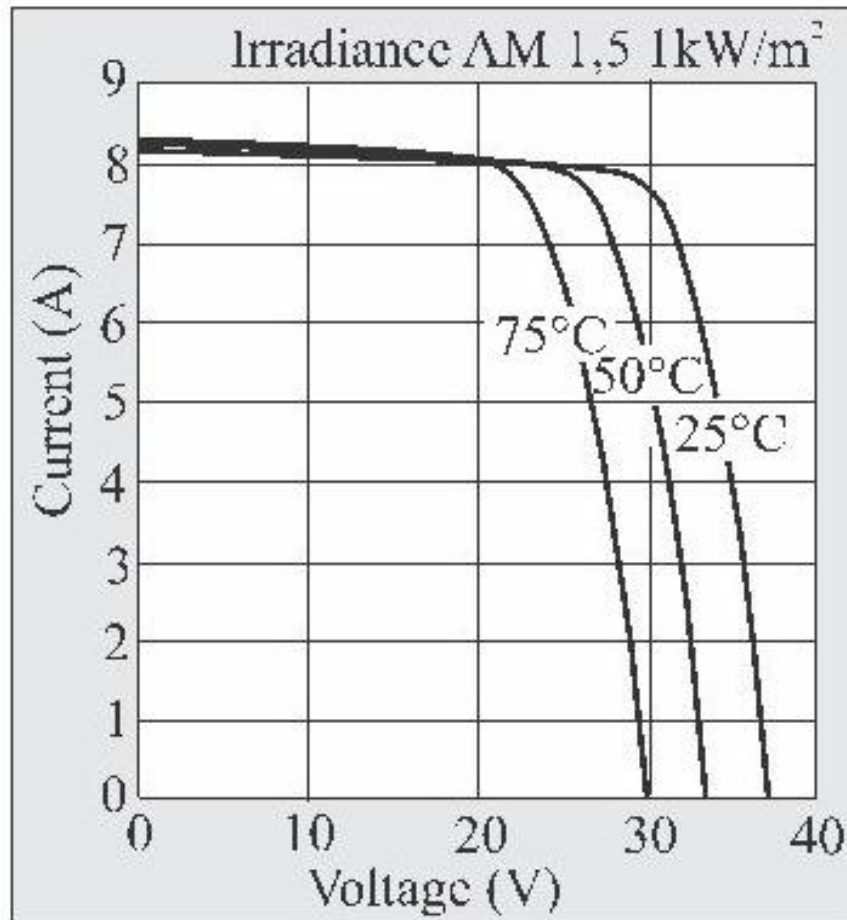
Είναι προφανές ότι η ισχύς που μπορεί να αποδώσει το φωτοβολταϊκό μειώνεται καθώς μειώνεται και η ένταση της προσπίπτουσας στην επιφάνειά του ακτινοβολίας. Αυτή η ιδιότητα γίνεται εμφανής στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.5 : Απόδοση φωτοβολταϊκού σε σχέση με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (πηγή : <http://solarpowerplanetearth.com>)

Γίνεται κατανοητό το ότι , ως πηγή ηλεκτρικής ισχύος, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει ασυνήθιστη συμπεριφορά. Οι περισσότερες κοινές πηγές ηλεκτρικής ισχύος (γεννήτριες, συσσωρευτές κτλ) διατηρούν σχετικά σταθερή πολική τάση, όταν λειτουργούν εντός της περιοχής κανονικής λειτουργίας τους. Αντίθετα, η πολική τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται έντονα με μία μη γραμμική σχέση με την ένταση του παρεχόμενου ρεύματος, ακόμη και σε συνθήκες σταθερής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, υπάρχει άμεση σχέση ανάμεσα στην θερμοκρασία

του στοιχείου και στην απόδοσή του. Πιο συγκεκριμένα, ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων στο εσωτερικό των ημιαγωγών. Συμβαίνουν έτσι περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση μεγαλύτερου ρεύματος διαρροής διαμέσω της διόδου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος του στοιχείου και η μείωση της απόδοσής του. Ο συσχετισμός αυτός γίνεται εμφανής στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.6 : Σχέση ανάμεσα στην θερμοκρασία και την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (πηγή : <http://www.intechopen.com>)

Όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία του στοιχείου παραμένουν σταθερές, οι συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού εξαρτώνται κυρίως από την αντίσταση του φορτίου που είναι συνδεδεμένο με αυτό. Πιο συγκεκριμένα, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές, τα όρια

των οποίων ορίζουν δύο οριακές καταστάσεις:

- Κατάσταση βραχυκυκλώματος:

Η νοητή κατάσταση κατά την οποία οι δύο ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού έχουν βραχυκυκλωθεί – παρεμβάλλεται δηλαδή μηδενική αντίσταση φορτίου. Στην περίπτωση αυτή συμβαίνουν τα εξής:

$$V = 0$$

$$I = I_{\max} = I_{sc}$$

Σύμφωνα με την εξ. 1.2, η ισχύς στην περίπτωση αυτή είναι :

$$P = V \cdot I$$

$$P = 0 \cdot I_{sc}$$

$$P = 0$$

- Κατάσταση ανοιχτοκυκλώματος:

Στην κατάσταση αυτή, οι δύο ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού βρίσκονται σε κατάσταση ανοιχτοκυκλώματος, παρεμβάλλεται δηλαδή μεταξύ τους άπειρη αντίσταση. Στην περίπτωση αυτή συμβαίνουν τα εξής:

$$V = V_{\max} = V_{oc}$$

$$I = 0$$

Σύμφωνα με την εξ. 1.2, η ισχύς στην περίπτωση αυτή είναι :

$$P = V \cdot I$$

$$P = V_{oc} \cdot 0$$

$$P = 0$$

1.3 Ανασκόπηση παραγόντων

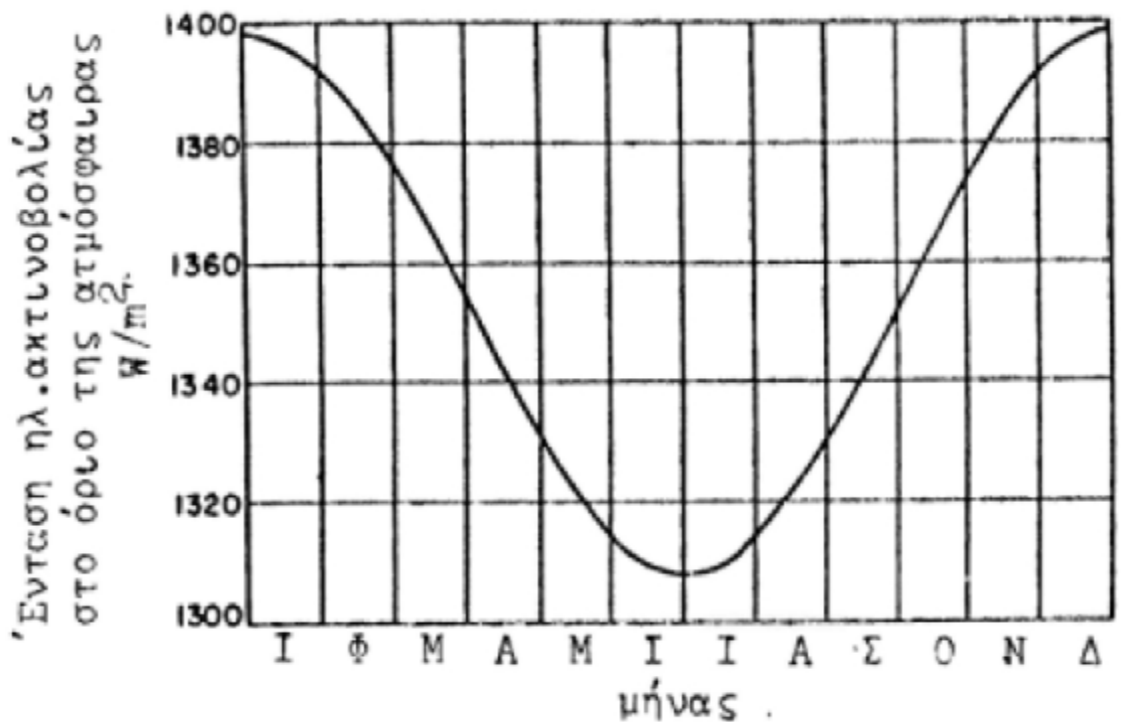
Με βάση αυτά που έχουν ήδη αναφερθεί, οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση λειτουργίας και την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι τα εξής:

- Θερμοκρασία λειτουργίας:

Όπως αναλύθηκε πιο πάνω, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση των επανασυνδέσεων των φορέων. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση ισχυρότερου ρεύματος διαρροής και η αντίστοιχη μείωση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος.

- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ακόμη και όταν μετράται έξω από την γήινη ατμόσφαιρα, ώστε να μην λαμβάνονται υπ' όψιν οι επιδράσεις των καιρικών φαινομένων, μεταβάλλεται περιοδικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:

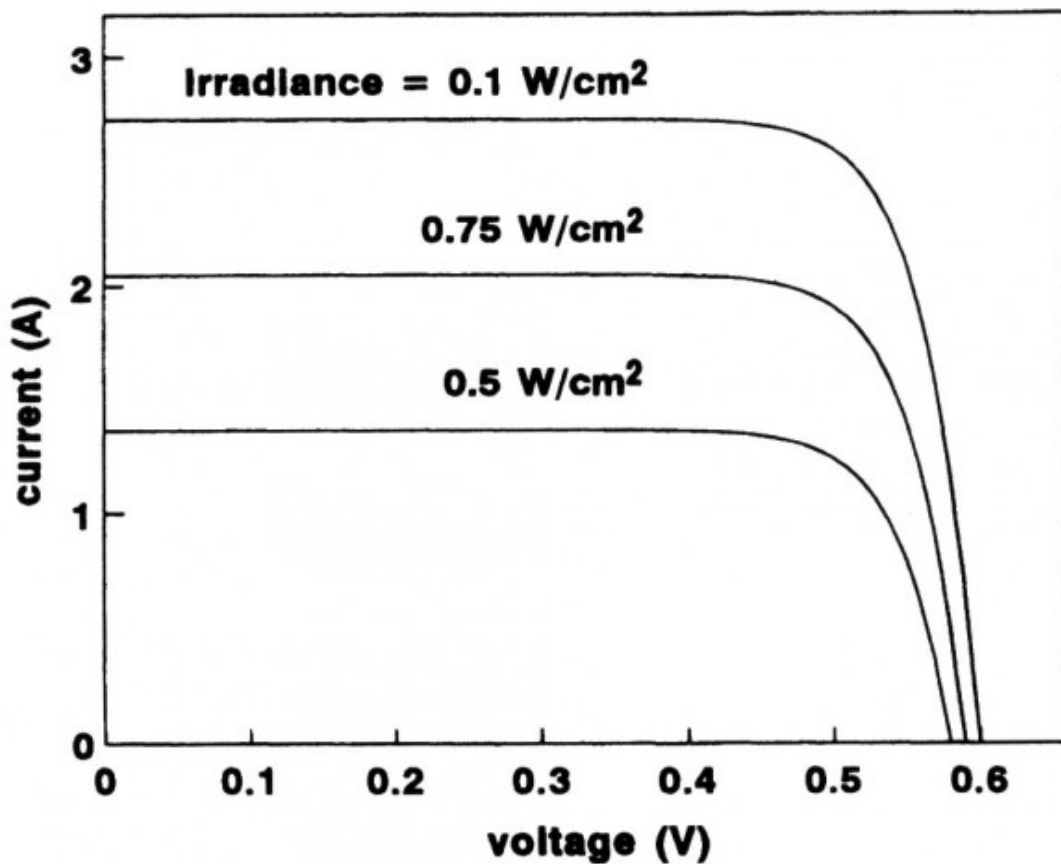


Σχ. 1.7 : Ένταση ηλ. Ακτινοβολίας (Καούρης)

Τα αίτια της μεταβολής αυτής έχουν να κάνουν με δύο παράγοντες :

- Μικρές μεταβολές στην απόσταση μεταξύ της γης και του ηλίου, που οφείλονται στο σχήμα της τροχιάς της γης
- Μικρές εποχικές μεταβολές στην ισχύ που αποδίδει ο Ήλιος

Η επίπτωση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην αποδιδόμενη ισχύ του στοιχείου είναι μεγάλη, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



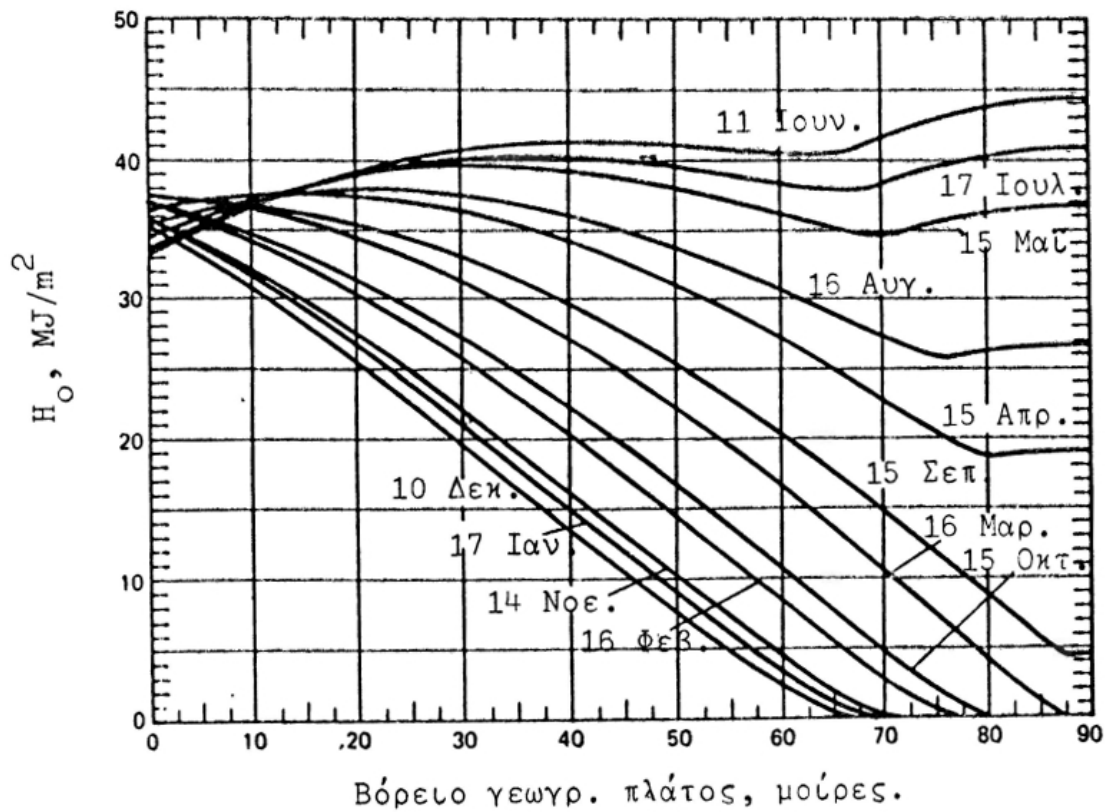
Σχ. 1.8 : Επίδραση ακτινοβολίας στην απόδοση του στοιχείου

(<http://www.itacanet.org/>)

- Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας

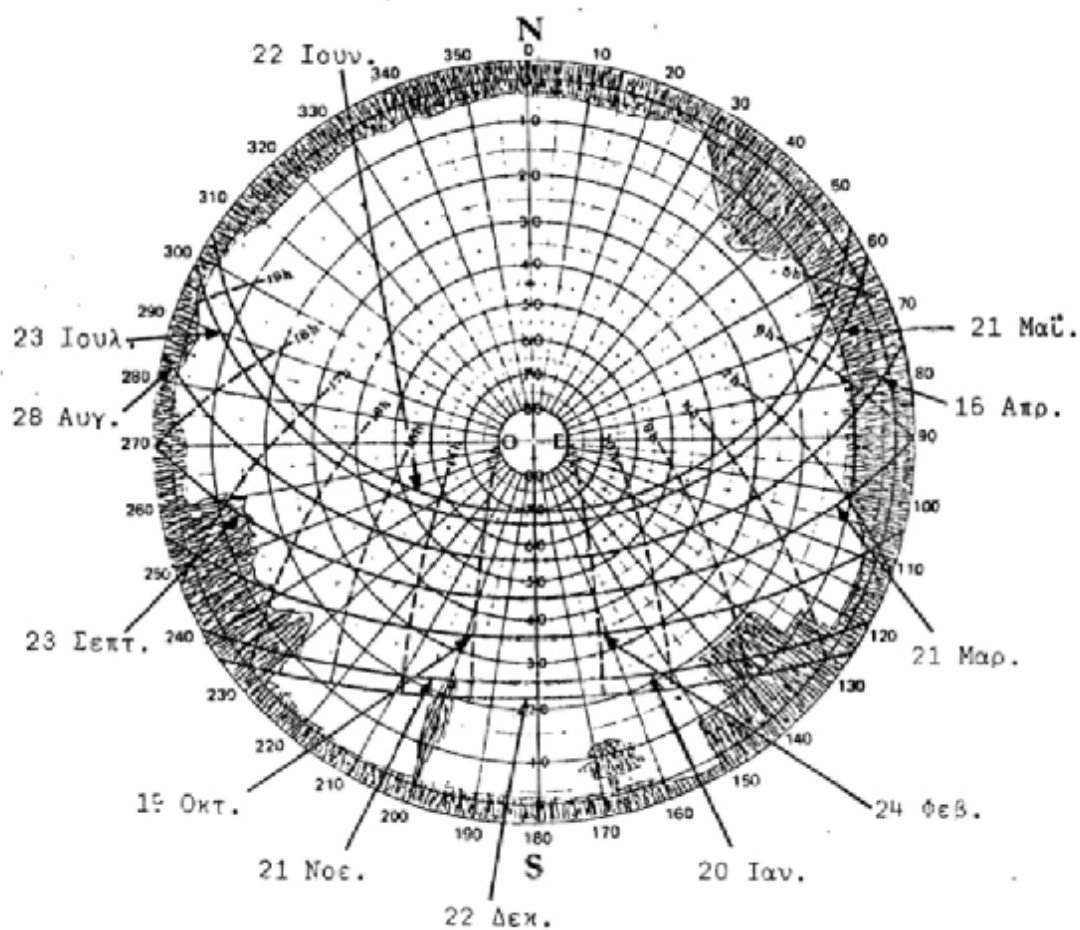
Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός τόπου ποικίλλει επίσης με την εποχή. Η μεταβολή αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη , όσο μεγαλύτερο είναι το γεωγραφικό πλάτος του εν λόγω τόπου και επιδρά άμεσα στην

μέση ισχύ της ακτινοβολίας, καθώς αυτή προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, όπως προκύπτει και από το παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.9 : Ένταση ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια (Κασύρης)

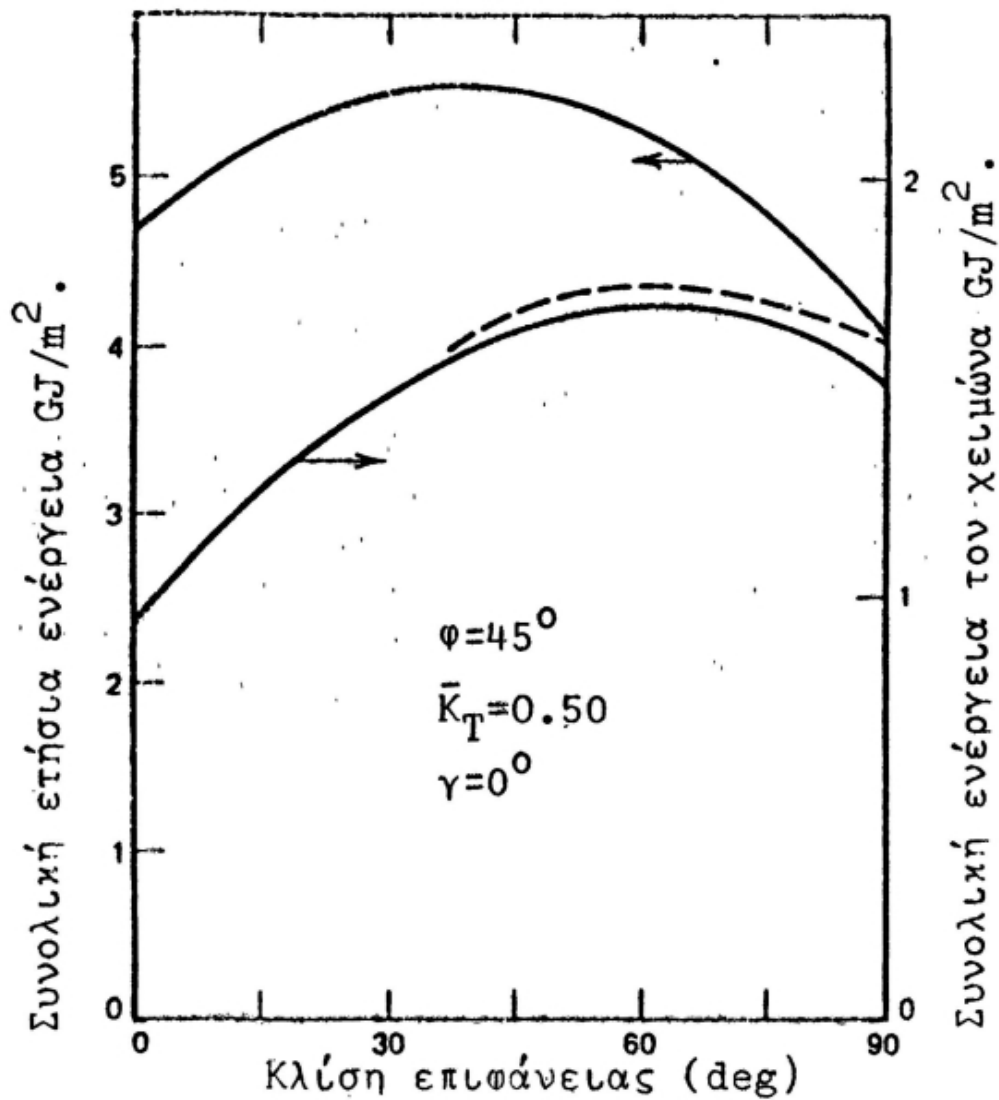
Ακριβέστερα στοιχεία για την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών δίνουν πολικά διαγράμματα για το γεωγραφικό πλάτος κάθε τόπου, όπως το παρακάτω:



Σχ. 1.10 :Πολικό ηλιακό διάγραμμα (Καούρης)

- Γωνία επιφάνειας φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού με το οριζόντιο επίπεδο επηρεάζει έντονα την απόδοση του, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα.

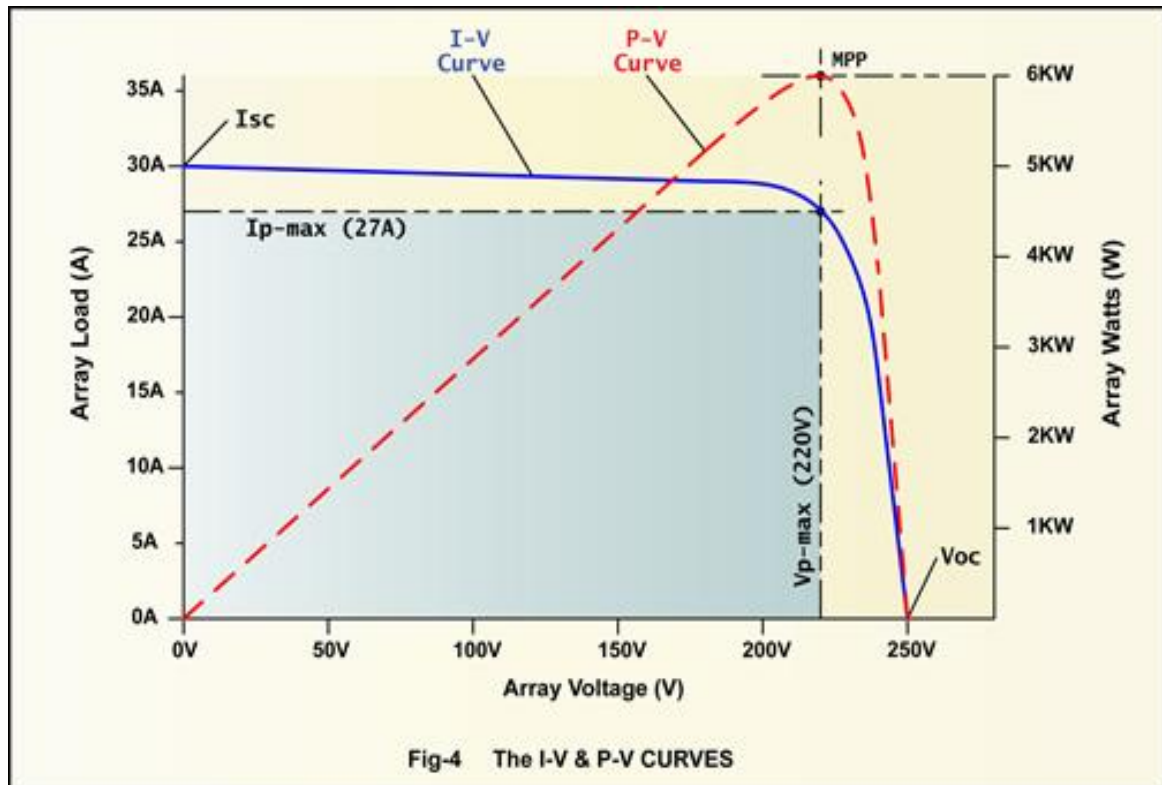


Σχ. 1.11 : Μεταβολή προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανάλογα με την κλίση του στοιχείου (Καούρης)

Η γωνία αυτή καλό είναι να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης.

- Σημείο λειτουργίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ισχύς που αποδίδει το φωτοβολταϊκό στοιχείο δίνεται από το γινόμενο της πολικής τάσης επί την ένταση του ρεύματος, δηλαδή από το εμβαδόν που ορίζει το σημείο λειτουργίας του στοιχείου πάνω στην καμπύλη I-V σε συνδυασμό με τους άξονες του διαγράμματος, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



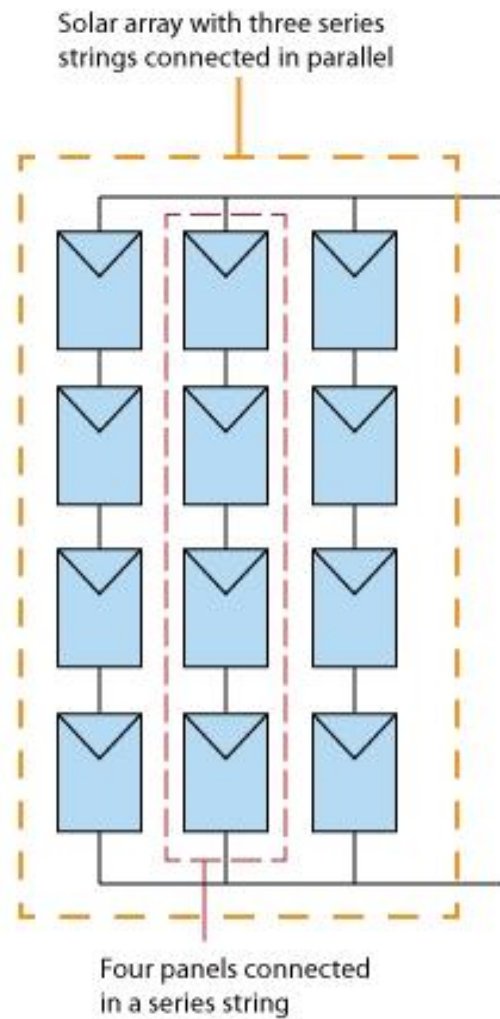
Σχ. 1.12 Καμπύλες I-V και P-V (<http://chromausa.com/>)

1.4 Εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών

1.4.1 Πλαίσια και συνδεσμολογία

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει ένα μεμονωμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πολύ μικρή για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Επιβάλλεται, κατά συνέπεια η χρήση συστοιχιών περισσότερων του ενός στοιχείων. Μία συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων αποτελείται από παράλληλες σειρές στοιχείων, τα οποία

είναι συνδεδεμένα σε σειρά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.13 : Συστοιχία φωτοβολταϊκών (<http://toolboxes.flexiblelearning.net.au/>)

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται μία συστοιχία τριών σειρών των τεσσάρων στοιχείων για την κάθε σειρά. Για την συνδεσμολογία που απεικονίζεται ισχύουν τα εξής:

- Τάση

Η πολική τάση στα άκρα της συστοιχίας ισούται με την τάση του κάθε στοιχείου επί τον αριθμό των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα εν σειρά σε κάθε στήλη (στο συγκεκριμένο παράδειγμα Χ4)

- Ένταση ρεύματος :

Η συνολική ένταση ρεύματος της συστοιχίας ισούται με την ένταση ρεύματος κάθε στοιχείου επί τον αριθμό των σειρών που είναι συνδεδεμένες εν παραλλήλω (στο συγκεκριμένο παράδειγμα X3)

- Ισχύς εξόδου:

Η συνολική ισχύς εξόδου της συστοιχίας ισούται με την ισχύ εξόδου του κάθε στοιχείου ξεχωριστά επί τον συνολικό αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων που περιλαμβάνει η συστοιχία (στο συγκεκριμένο παράδειγμα X12)

Οι συστοιχίες φωτοβολταϊκών που βρίσκονται στην αγορά συνήθως περιλαμβάνουν φύλλα γυαλιού ή πλαστικού με ανάλογες οπτικές ιδιότητες (διαφάνεια κτλ) ώστε να προστατεύουν τα στοιχεία. Το περίβλημα αυτό είναι συνήθως μόνιμα σφραγισμένο. Οι συνηθισμένες τάσεις εξόδου των μονάδων αυτών είναι 4 με 20V και το ρεύμα εξόδου κυμαίνεται από 0.5A έως 2.5A.

1.4.2 : Βάσεις και προσανατολισμός

Έχει ήδη αναφερθεί η ιδιαίτερη σημασία που έχει ο προσανατολισμός του του φωτοβολταϊκού στοιχείου στην απόδοση του συστήματος. Η ρύθμιση του προσανατολισμού των στοιχείων και η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο στοιχείο επιτυγχάνεται μέσω της βάσης που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν σε γενικές γραμμές τρεις τύποι βάσεων:

- Σταθερές βάσεις:

Οι βάσεις αυτές διατηρούν σταθερό προσανατολισμό, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:

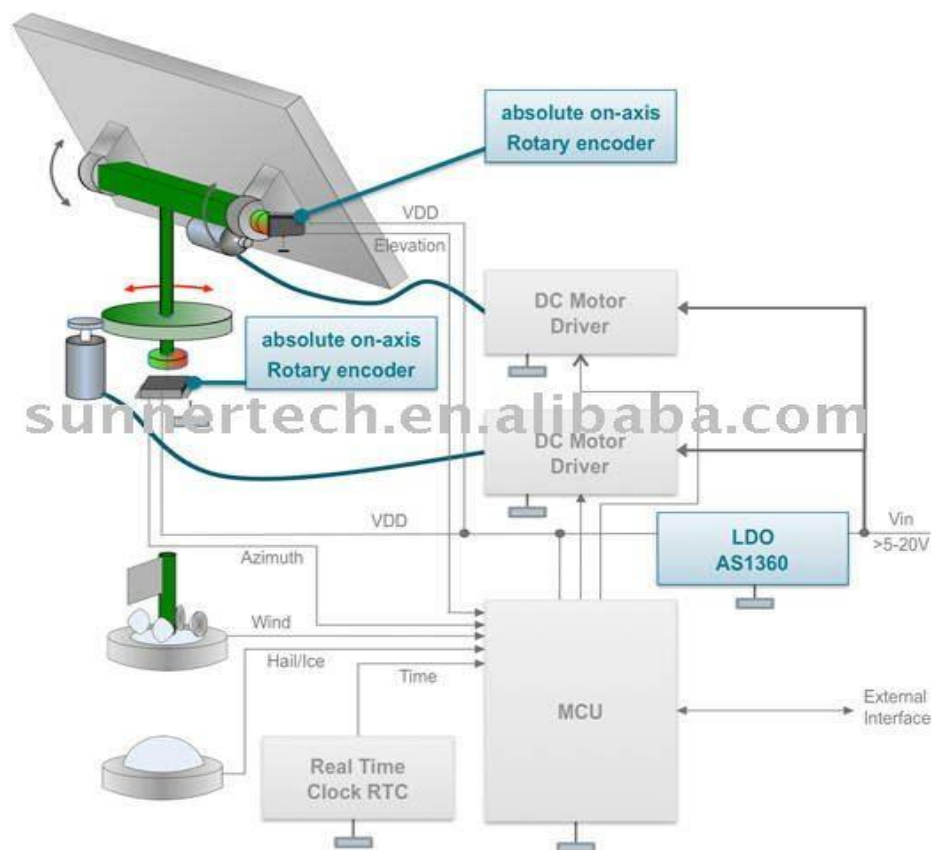


Σχ. 1.14 : Σταθερή βάση φωτοβολταϊκού (<http://www.inbalance-energy.co.uk>)

Σε αρκετές περιπτώσεις οι βάσεις αυτού του τύπου επιτρέπουν την ρύθμιση της κλίσης, αν και με σχετική δυσκολία. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να γίνεται περιοδικά (δύο ρυθμίσεις για χειμώνα – καλοκαίρι)

- Κινητές βάσεις:

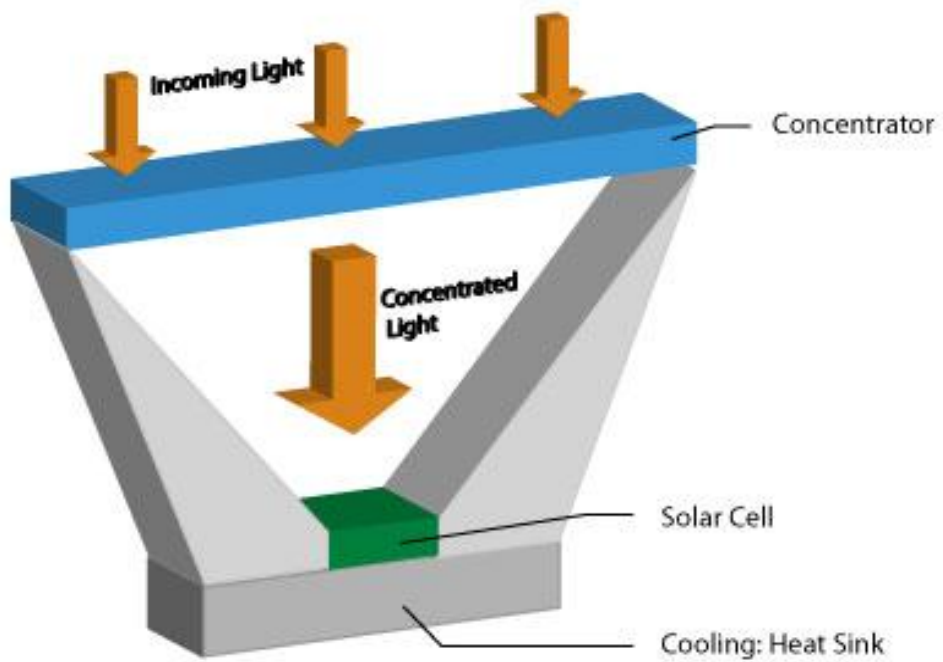
Οι βάσεις αυτές περιλαμβάνουν ένα σύστημα προσανατολισμού που αλλάζει αυτόματα την κλίση και τον αζιμουθικό προσανατολισμό του πλαισίου, ώστε η επιφάνεια του στοιχείου να είναι κατά το δυνατόν κάθετη στις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες. Η βασική δομή ενός συστήματος αυτής της κατηγορίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.15 : Σύστημα βάσης που ακολουθεί την κίνηση του ήλιου (<http://i00.i.aliimg.com/>)

- Διατάξεις με φακούς και κάτοπτρα

Οι διατάξεις αυτές αυξάνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων συγκεντρώνοντας μεγαλύτερη φωτεινή ένταση σε μικρότερο εμβαδόν. Μία τυπική τέτοια διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 1.16 : Σύστημα με φακό συγκέντρωσης (<http://www.greenrhinoenergy.com/>)

2. ΒΑΣΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

2.1 Γενικά

Το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός συστήματος φωτοβολταϊκών περιλαμβάνει πολλά στοιχεία που το βοηθούν να λειτουργήσει πιο αποτελεσματικά. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ένα τυπικό ηλεκτρικό σύστημα φωτοβολταϊκού συστήματος:



Σχ. 2.1 : Ηλεκτρικό σύστημα φωτοβολταϊκού (<http://www.renewableheatingandsolarpanelcompany.co.uk/>)

2.2 Συσσωρευτές

2.2.1 Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το ότι δεν έχει σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πέραν της 24 ωρης και των εποχικών μεταβολών, η ηλιοφάνεια ενός τόπου υπόκειται συχνά σε ξαφνικές και μη προβλέψιμες μεταβολές. Προκειμένου να επεκταθεί το εύρος των δυνατών εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυνατότητας αποταμίευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά.

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται συνήθως σε χημική μορφή μέσω ηλεκτρικών συσσωρευτών. Η ενέργεια που αποθηκεύεται αποδίδεται ξανά στο σύστημα όταν υπάρξει ζήτηση

2.2.2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών - τύποι

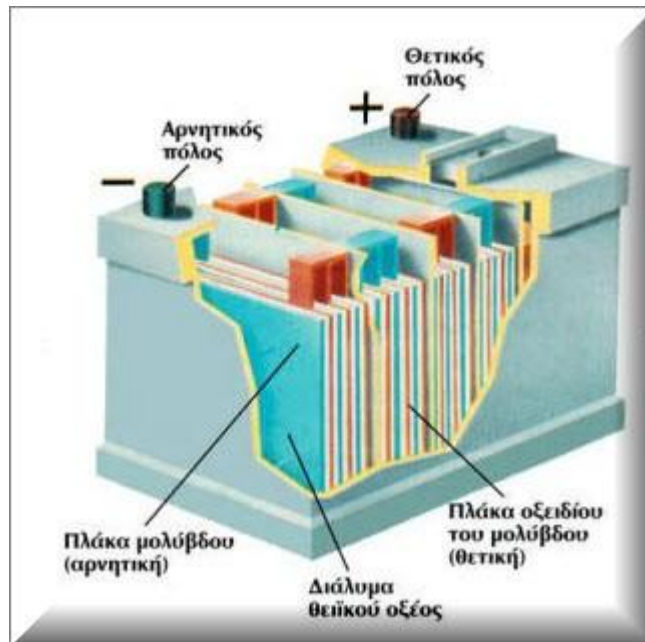
Οι συσσωρευτές λειτουργούν μετατρέποντας χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνήθως η μετατροπή αυτή μπορεί να αντιστραφεί και έτσι καθίσταται δυνατή η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Από άποψη χρήσης, οι συσσωρευτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Πρωτεύοντες συσσωρευτές:

Οι συσσωρευτές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία δεν έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης. Το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων συσσωρευτών είναι οι αλκαλικές μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης. Λόγω της μη ύπαρξης δυνατότητας επαναφόρτισης, οι συσσωρευτές αυτοί δεν είναι κατάλληλοι για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

- Δευτερεύοντες συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης και έτσι είναι κατάλληλοι για χρήση στα φωτοβολταϊκά. Ο πλέον συνηθισμένος τύπος τέτοιων συσσωρευτών είναι τα στοιχεία μολύβδου - οξειδίου.



Σχ. 2.2 : Συσσωρευτής μολύβδου – οξειδίου (<http://www.naspor.gr>)

Από χημικής άποψης, οι πλέον συνηθισμένοι δευτερεύοντος τύπου συσσωρευτές είναι οι εξής:

- Συσσωρευτές μολύβδου – θειικού οξέος
- Συσσωρευτές μολύβδου αντιμονίου
- Συσσωρευτές μολύβδου – ασβεστίου κ.α.

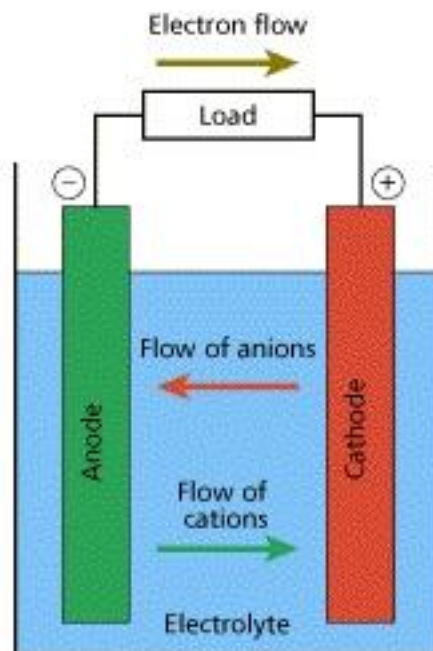
Οι συσσωρευτές θειικού οξέος συγκεντρώνουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως:

- Αυξημένη δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης
- Δυνατότητα παροχής ρεύματος μεγάλης έντασης
- Μεγάλη αντοχή

Παρόλα αυτά, σε πολλές εφαρμογές φωτοβολταϊκών προτιμώνται οι συσσωρευτές μολύβδου αντιμονίου και μολύβδου – ασβεστίου, λόγω του μικρότερου αρχικού τους κόστους.

2.2.3 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή

Ένα ηλεκτρικό στοιχείο συσσωρευτή απαρτίζεται από δύο ηλεκτρόδια από μεταλλικό υλικό τα οποία είναι εμβαπτισμένα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόδια συνήθως είναι σε μορφή πλακών και αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζεται ροή ηλεκτρονίων.



Σχ. 2.3 : Ένα βασικό ηλεκτρικό στοιχείο

Τα βασικά μεγέθη που καθορίζουν την συμπεριφορά και τις δυνατότητες ενός συσσωρευτή είναι τα εξής:

- Ονομαστική χωρητικότητα (C)

Ο όρος ονομαστική χωρητικότητα εκφράζει την ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να δώσει το στοιχείο μέχρι την αποφόρτισή του. Η χωρητικότητα μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση (<http://users.sch.gr>):

$$C = I \cdot t$$

(2.1)

Όπου:

I είναι η ονομαστική τιμή του σταθερού ρεύματος εκφόρτισης (A)

t ο χρόνος από την έναρξη της εκφόρτισης μέχρι την χρονική τιμή που η τάση φτάνει στην ελάχιστη τιμή της (σε ώρες)

Η πραγματική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή συχνά δεν συμπίπτει με την ονομαστική. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την πραγματική χωρητικότητα είναι οι εξής:

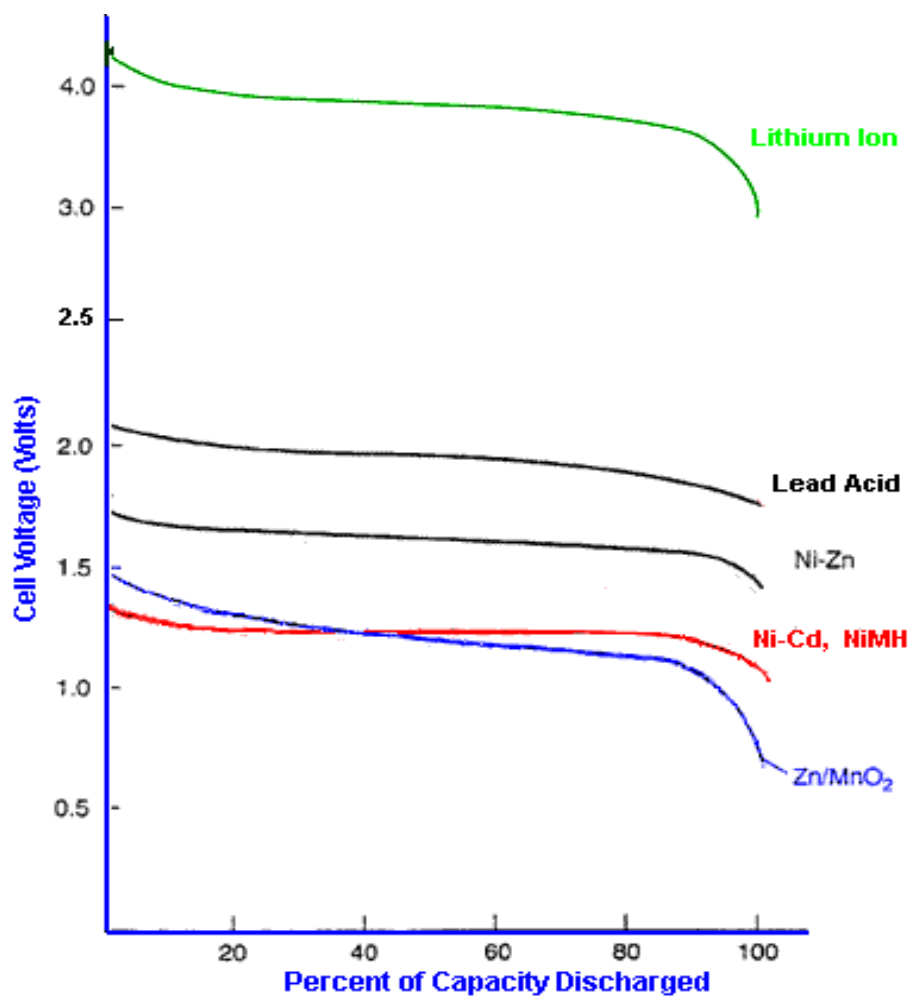
- Θερμοκρασία ηλεκτρολύτη
- Ειδικό βάρος ηλεκτρολύτη
- Χρόνος ζωής συσσωρευτή
- Ρεύμα εκφόρτισης
- Τρόπος εκφόρτισης (συνεχής, με διακοπές κτλ)

- Ονομαστική τάση:

Η ονομαστική τάση στα άκρα του συσσωρευτή. Η τάση αυτή εξαρτάται κατά βάση από δύο παράγοντες:

- Τύπος στοιχείων συσσωρευτή
- Αριθμός στοιχείων σε σύνδεση εν σειρά που περιλαμβάνονται στο εσωτερικό του συσσωρευτή

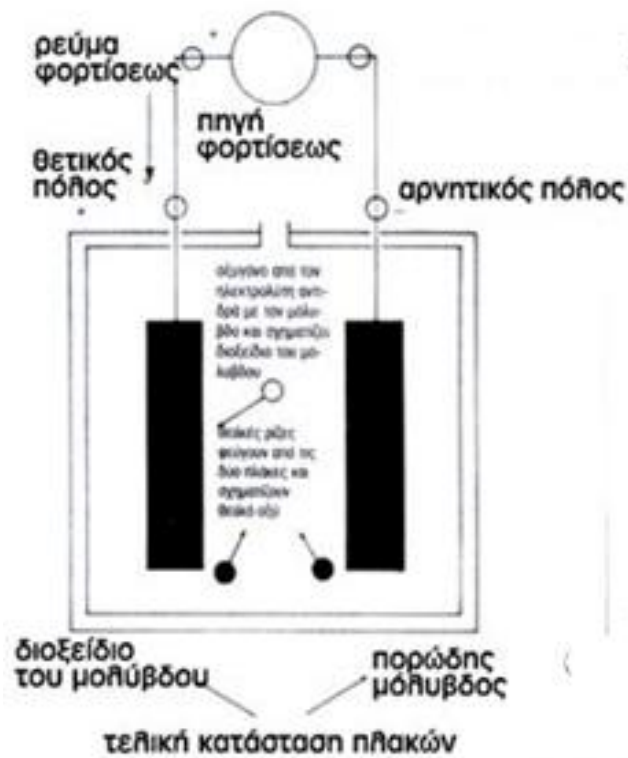
Πρέπει να επισημανθεί πως η τάση στα άκρα του συσσωρευτή δεν παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή, αλλά ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται, η τάση μειώνεται σημαντικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.4 : Τάση κατά την εκφόρτιση (<http://www.mpoweruk.com>)

2.2.4 Φόρτιση – Εκφόρτιση

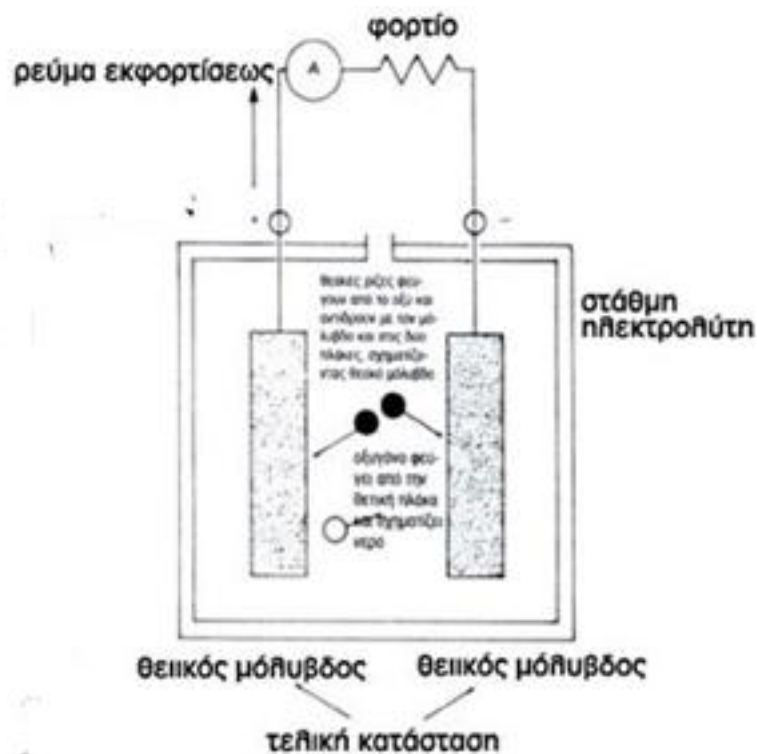
Η φόρτιση ενός συσσωρευτή γίνεται μέσω της εφαρμογής σταθερής τάσης στους πόλους. Η τάση πρέπει οπωσδήποτε να είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση του συσσωρευτή και μάλιστα σημαντικά μεγαλύτερη ώστε να υπερνικηθεί η εσωτερική αντίστασή του. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για την φόρτιση συσσωρευτή με ονομαστική τάση 12V χρειάζεται η εφαρμογή τάσεων 14 – 16V. Η τυπική διαδικασία φόρτισης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.5 : Φόρτιση συσσωρευτή (<http://www.sydesys.gr/>)

Κατά την διάρκεια της φόρτισης, η ροή ηλεκτρικού φορτίου προκαλεί ηλεκτρόλυση του νερού του ηλεκτρολύτη. Το οξυγόνο που παράγεται κινείται προς την θετική πλάκα, στην επιφάνεια της οποίας δημιουργείται διοξείδιο του μολύβδου.

Η σύνδεση ενός καταναλωτή – φορτίου στους ακροδέκτες του συσσωρευτή οδηγεί στην εκφόρτισή του.



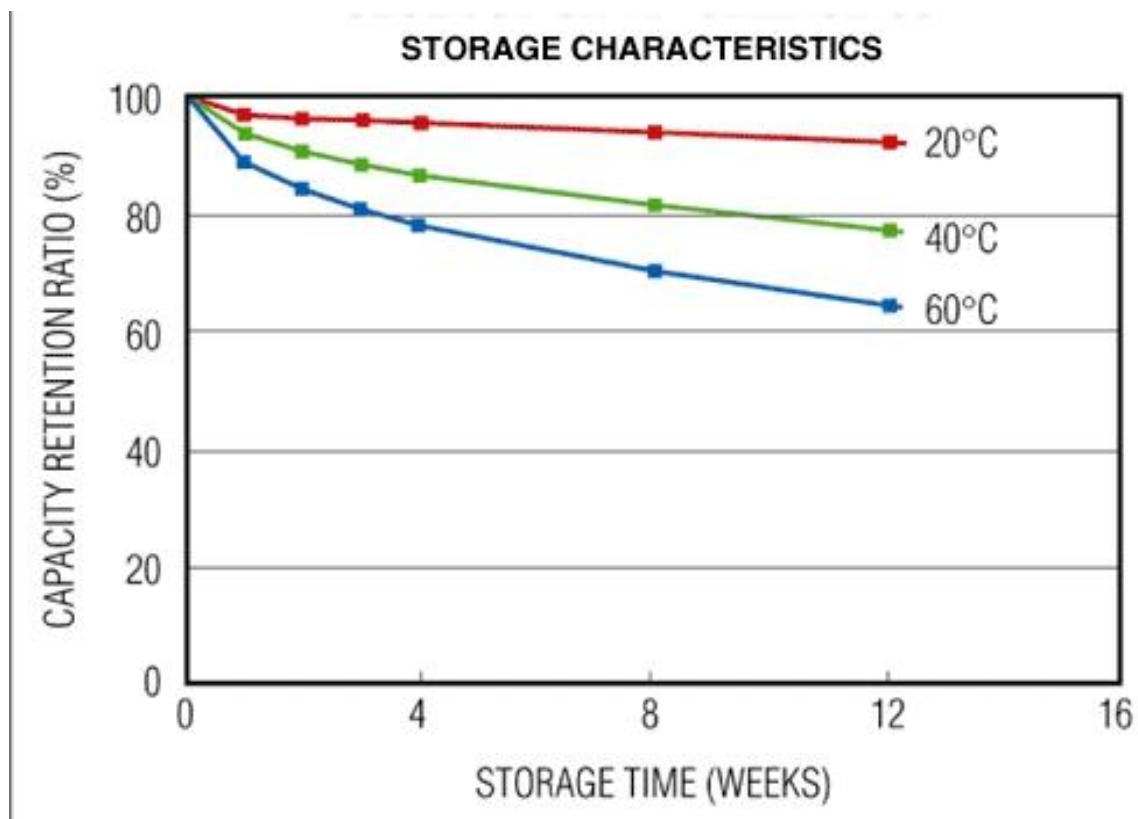
Σχ. 2.6 Εκφόρτιση συσσωρευτή (<http://www.sydesys.gr/>)

Κατά την εκφόρτιση συμβαίνουν στο εσωτερικό του συσσωρευτή οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση της περιεκτικότητας του θειικού οξέος στον ηλεκτρολύτη.

Η περιεκτικότητα του θειικού οξέος μπορεί να μετρηθεί έμμεσα μέσω της μέτρησης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη.

2.2.5 Το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης

Οι συσσωρευτές έχουν την τάση να εμφανίζουν αποφόρτιση, ακόμη και όταν δεν είναι συνδεδεμένο κάποιο φορτίο στους πόλους τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.7 : Αυτοεκφόρτιση συσσωρευτή (<http://www.maximintegrated.com>)

Γίνεται φανερό από την πιο πάνω εικόνα πως το φαινόμενο αυτοεκφόρτισης του συσσωρευτή γίνεται πιο έντονο με την αύξηση της θερμοκρασίας.

2.3 Ελεγκτές φόρτισης συσσωρευτών

2.3.1 Γενικά

Οι ρυθμιστές φόρτισης εκφόρτισης παρακολουθούν την διαδικασία και αναλαμβάνουν τα εξής:

- Την αποσύνδεση του συστήματος συσσωρευτών από την συστοιχία φωτοβολταϊκών στην περίπτωση που το σύστημα πλησιάζει την κατάσταση υπερφόρτισης

- Την αποσύνδεση του συστήματος συσσωρευτών από το φορτίο στην περίπτωση που η εκφόρτιση φθάσει σε υπερβολικά επίπεδα

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι ο έλεγχος της τάσης στους πόλους του συσσωρευτή και η κατάλληλη αντίδραση αν αυτή ξεπεράσει τα εξής όρια:

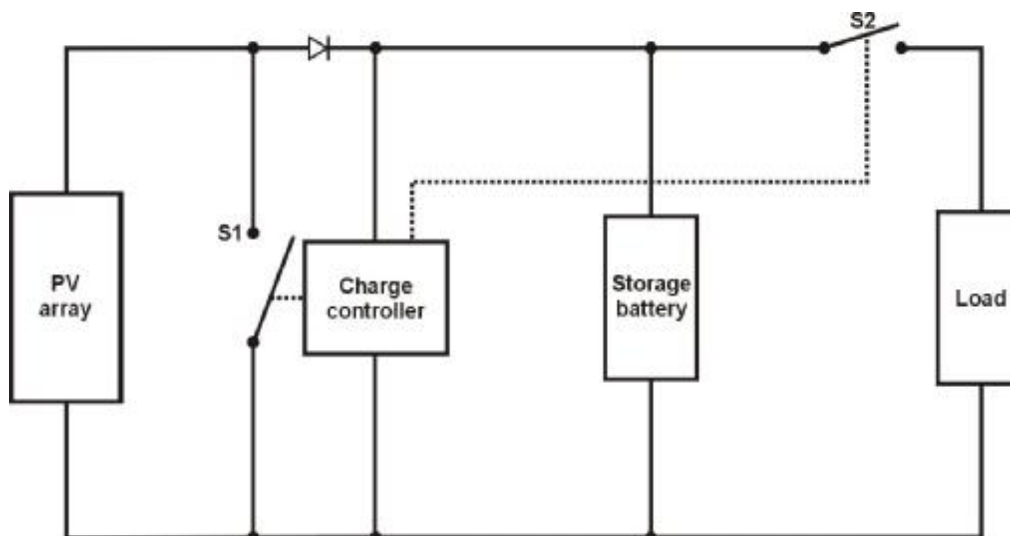
- Όριο υψηλής τάσης, το οποίο προστατεύει τον συσσωρευτή από την υπερφόρτιση και καταστροφή
- Όριο χαμηλής τάσης, ώστε να αποφεύγεται η βαθιά εκφόρτιση του συσσωρευτή.

2.3.2 Βασικοί τύποι ελεγκτών φόρτισης:

Οι βασικοί τύποι των ελεγκτών φόρτισης είναι οι εξής:

- Ελεγκτής διακλάδωσης:

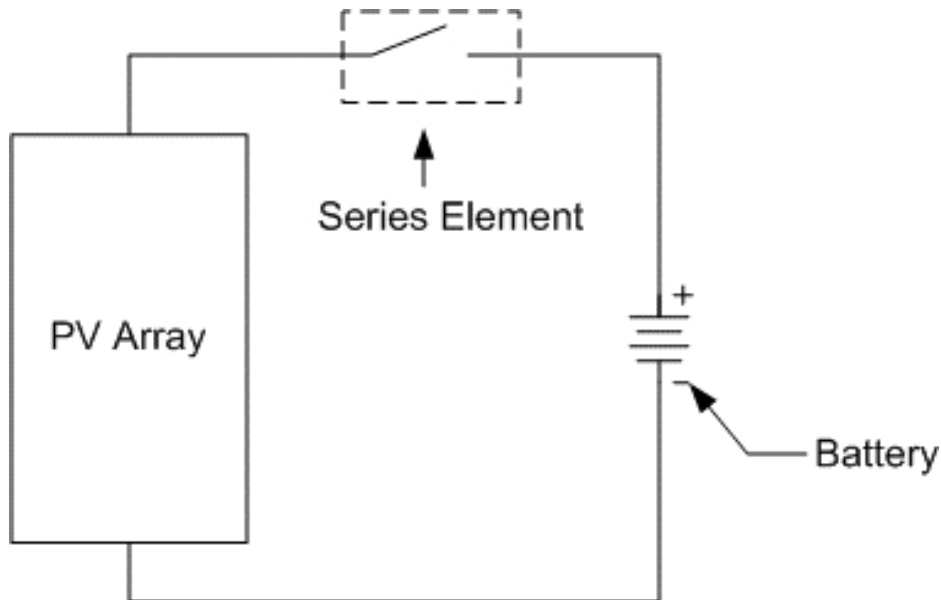
Ο ελεγκτής αυτός βραχυκυκλώνει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν η φόρτιση του συσσωρευτή ολοκληρωθεί. Πολύ συχνά, η ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό κατευθύνεται σε ένα δευτερεύον φορτίο, όπως ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού κ.λ.π. Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται η βασική συνδεσμολογία ενός ελεγκτή διακλάδωσης:



Σχ. 2.8 : Ρυθμιστής διακλάδωσης (<http://re.emsd.gov.hk/>)

- Ελεγκτής εν σειρά:

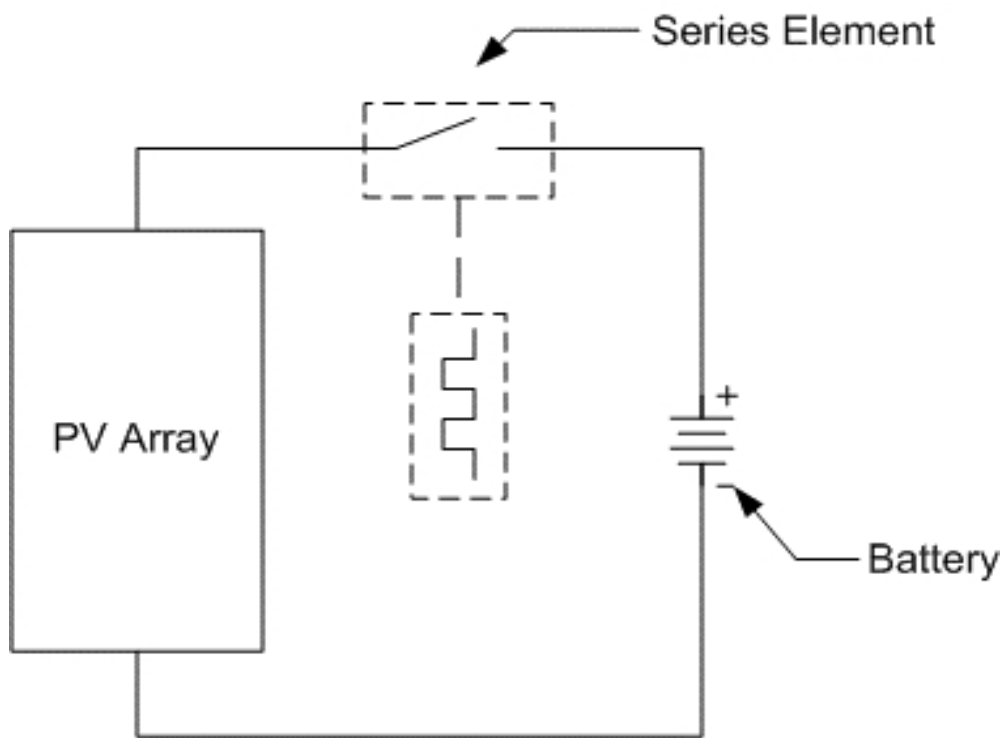
Ο ελεγκτής αυτός απομονώνει ανοιχτοκυκλώνοντας την φωτοβολταϊκή μονάδα, όταν η φόρτιση του συσσωρευτή ολοκληρωθεί. Η βασική αρχή λειτουργίας του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.9 : Ελεγκτής εν σειρά (<http://www.zeroenergy.com.np/>)

- Ελεγκτής PWM:

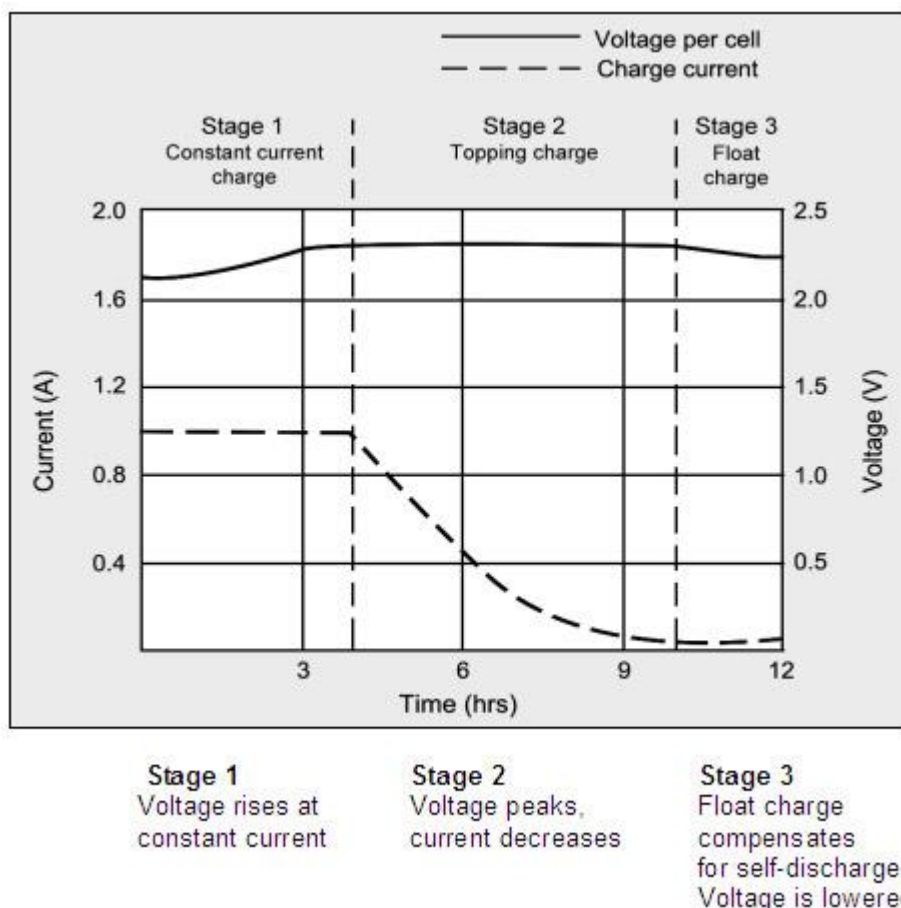
Ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί με την ίδια βασική αρχή του σειριακού ελεγκτή. Ενσωματώνει όμως ηλεκτρονικό στοιχείο ελέγχου και έχει έτσι την δυνατότητα να ανοιγοκλείνει με μεγάλη ταχύτητα.



Σχ. 2.10 : Ελεγκτής PWM

2.3.3 Τρόποι φόρτισης:

Κατά την διάρκεια φόρτισης ενός συσσωρευτή, υπάρχουν τα εξής τρία στάδια φόρτισης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχ.2.11 : Στάδια φόρτισης (<http://batteryuniversity.com/>)

- Στάδιο 1 : Κύρια φόρτιση:

Κατά την διάρκεια του σταδίου αυτού συμβαίνει το μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης. Το ρεύμα είναι περίπου σταθερό και η τάση ανεβαίνει διαρκώς.

- Στάδιο 2 : Τελική φόρτιση:

Κατά το στάδιο αυτό, η φόρτιση συνεχίζεται με ρεύμα που ολοένα και μειώνεται, μέχρι η τάση του συσσωρευτή να περάσει λίγο πάνω από την ονομαστική του.

- Στάδιο 3 : Φόρτιση συντήρησης

Κατά το στάδιο αυτό η τάση του συσσωρευτή διατηρείται σταθερή. Το ρεύμα

που δίνει ο φορτιστής είναι πολύ μικρό και σχεδόν σταθερό. Ο σκοπός του σταδίου αυτού είναι η αποφυγή της αυτοκεκφόρτισης του συσσωρευτή.

2.4 Μετατροπείς DC – DC

Οι μετατροπείς συνεχούς σε συνεχή τάση μετατρέπουν μία συνεχή τάση εισόδου σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής στην έξοδο. Χρησιμοποιούνται στα συστήματα φωτοβολταϊκών για την σωστή φόρτιση των συσσωρευτών των συστημάτων αυτών. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για τον έλεγχό τους :

- Έλεγχος μέσω διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών :

Στην περίπτωση αυτή διατηρείται σταθερή η συχνότητα τροφοδότησης των ημιαγωγίμων στοιχείων του μετατροπέα, ενώ μεταβάλλεται ο χρόνος αγωγής τους

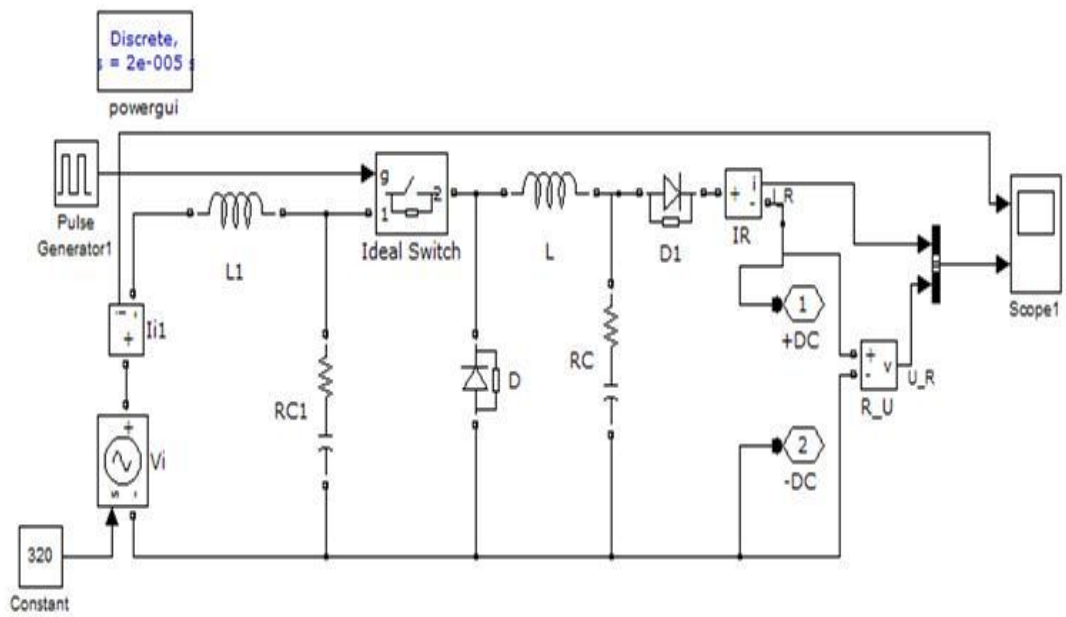
- Έλεγχος μέσω της διαμόρφωσης συχνότητας παλμών:

Στην περίπτωση αυτή διατηρείται σταθερός ο χρόνος αγωγής των ημιαγωγίμων στοιχείων του μετατροπέα, ενώ μεταβάλλεται η συχνότητα λειτουργίας τους.

Οι βασικοί τύποι μετατροπέων είναι οι εξής:

- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης Buck:

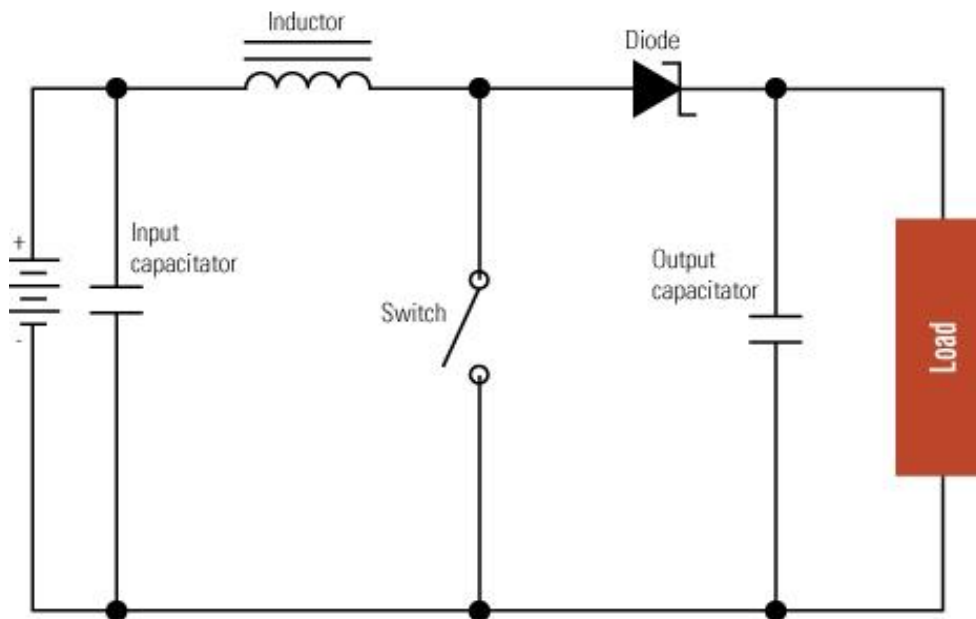
Ο μετατροπέας αυτός υποβιβάζει την τάση εισόδου στην επιθυμητή κάθε φορά τάση εξόδου. Το βασικό κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα Buck φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.12 : Μετατροπέας Buck (<http://www.mathworks.com/>)

- Μετατροπέας αύξησης τάσης (Boost)

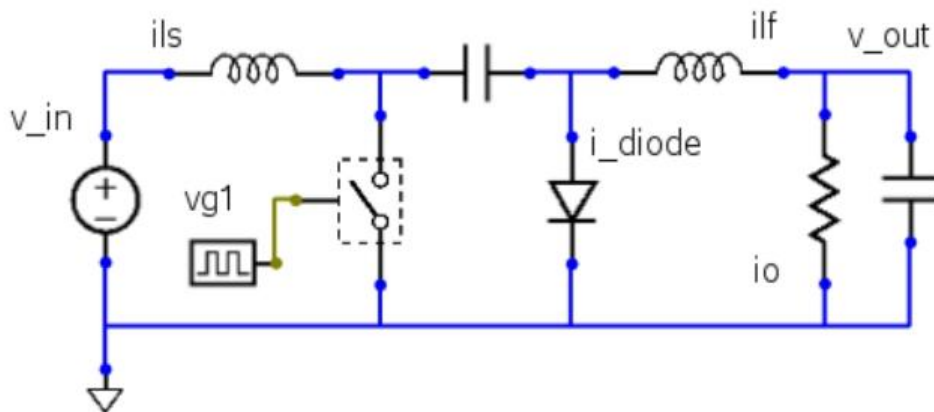
Οι μετατροπείς αύξησης τάσης δίνουν στην έξοδο συνεχή τάση μεγαλύτερη από ότι στην είσοδο. Ένας τυπικός μετατροπέας αύξησης τάσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.13 : Μετατροπέας αύξησης τάσης (<http://electronicdesign.com/>)

- Μετατροπέας αύξησης - υποβιβασμού τάσης

Ο μετατροπέας αυτός έχει την δυνατότητα τόσο να υποβιβάζει όσο και να αυξώνει την τάση εισόδου. Η τυπική κυκλωματική του μορφή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

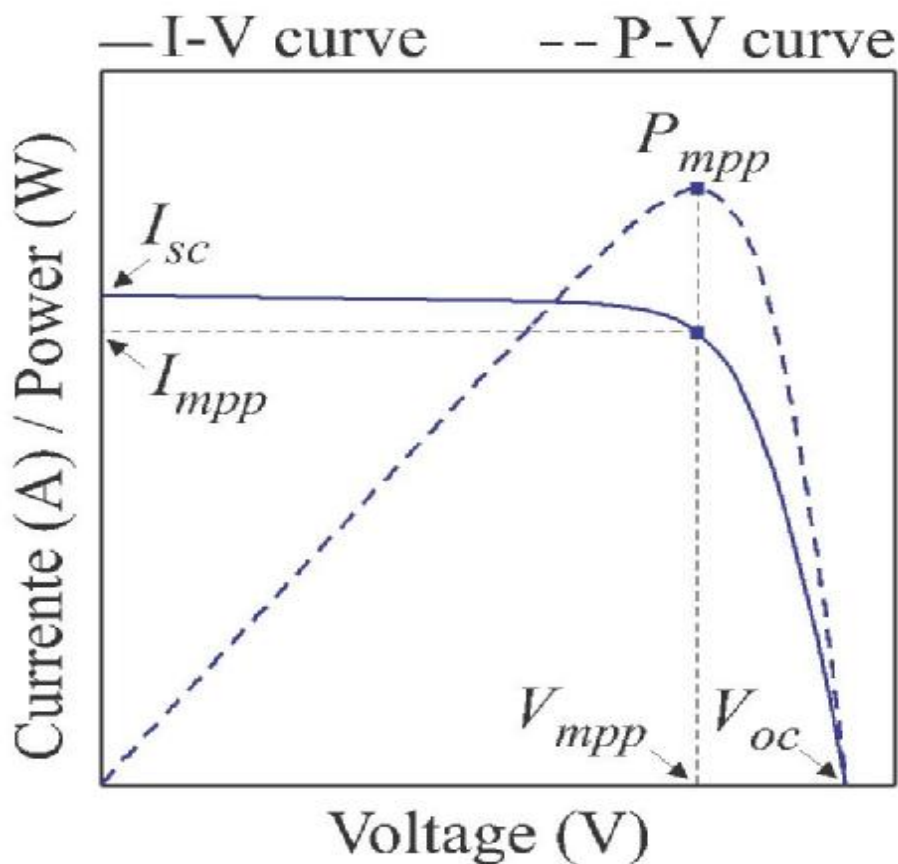


Σχ. 2.14 : Μετατροπέας αύξησης – υποβιβασμού (<http://www.ee.iitb.ac.in/>)

3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Γενικά:

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση ενός αλγορίθμου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος. Το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το σημείο εκείνο λειτουργίας πάνω στο διάγραμμα I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπου η αποδιδόμενη ισχύς του στοιχείου μεγιστοποιείται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



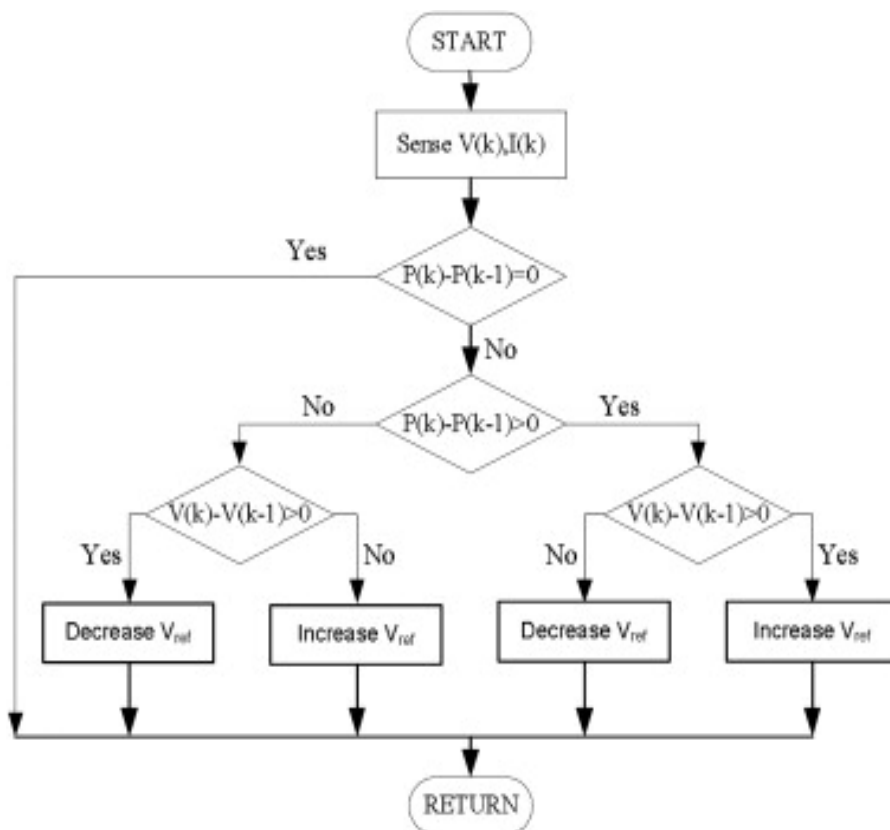
Σχ. 3.1 : Σημείο μέγιστης ισχύος (<http://www.intechopen.com/>)

Σκοπός ενός συστήματος ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος είναι η τροποποίηση της λειτουργίας του στοιχείου, ώστε αυτό να λειτουργεί πάντα στο σημείο μέγιστης ισχύος. Τα κυκλώματα που υλοποιούν την λειτουργία αυτή συνήθως μεταβάλλουν την αντίσταση εισόδου τους με τον κατάλληλο τρόπο και ταυτόχρονα αποδίδουν την

ενέργεια που προσφέρει το φωτοβολταϊκό στο φορτίο με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Το σημείο μέγιστης ισχύος για κάθε κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού μπορεί να βρεθεί με την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, οι οποίοι θα εξεταστούν στην συνέχεια:

3.2 Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται ευρύτατα καθώς είναι ιδιαίτερα απλός στην εφαρμογή του. Ο υπολογισμός της ισχύος στην περίπτωση του αλγορίθμου αυτού γίνεται με τον έλεγχο είτε της τάσης είτε του ρεύματος. Η τυπική διαδοχή των βημάτων του αλγορίθμου αυτού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 3.2 : Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης (<http://origin-ars.els-cdn.com/>)

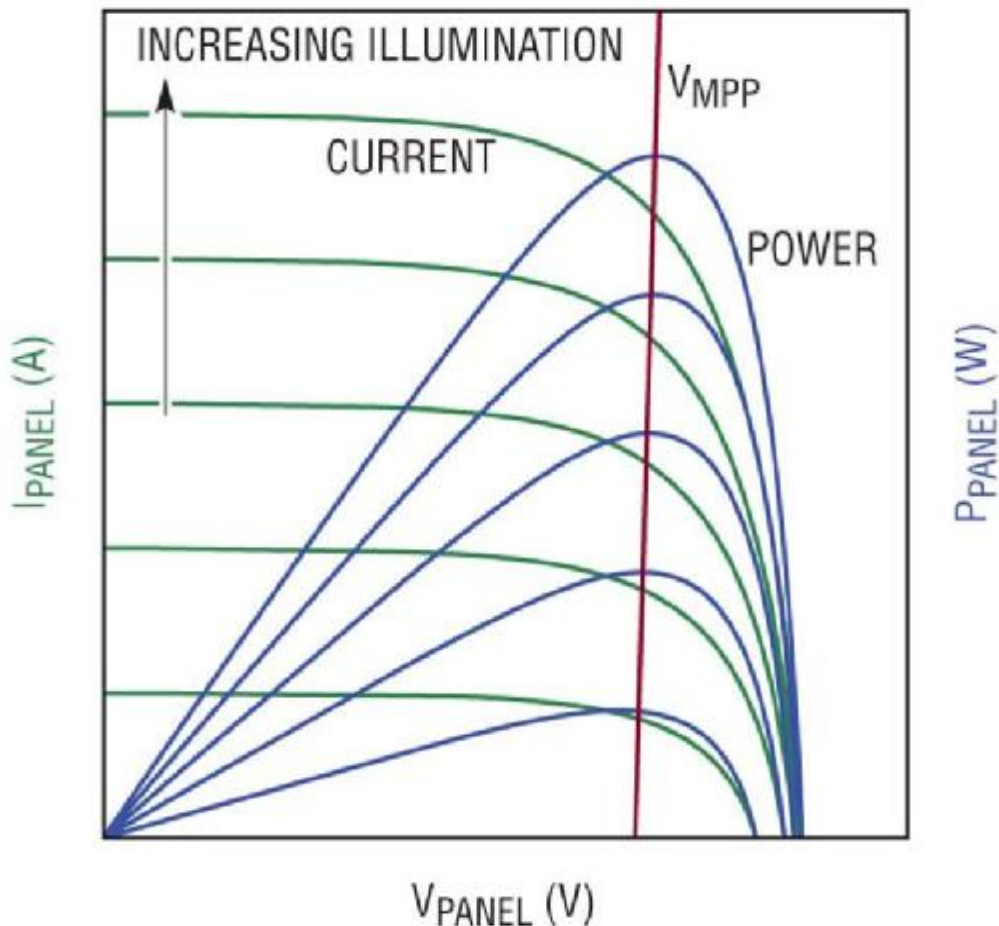
Η βασική λογική του αλγορίθμου αυτού είναι η ακόλουθη :

- Το σύστημα ανίχνευσης προκαλεί μία μικρή διατάραξη στην τάση ή στο ρεύμα

του συστήματος

- Το σύστημα μετρά την μεταβολή της ισχύος που προκάλεσε η διαταραχή
- Αν η μεταβολή αυτή είναι θετική, το σύστημα συνεχίζει τις μεταβολές προς την ίδια κατεύθυνση.
- Αν η μεταβολή είναι αρνητική, το σύστημα μεταβάλλει την κατάσταση λειτουργίας προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι η κακή απόδοσή του σε συνθήκες μειωμένης ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, σε τέτοιες συνθήκες η κλίση του διαγράμματος ισχύος ως προς την τάση είναι πολύ μικρότερη και έτσι το σύστημα δυσκολεύεται να ανιχνεύσει την μεταβολή.



Σχ. 3.3 : Διαγράμματα P-V με μεταβολή έντασης ακτινοβολίας (<http://origin-ars.els-cdn.com/>)

3.3 Αλγόριθμος οριακής αύξησης αγωγιμότητας

Ο αλγόριθμος αυτός εκμεταλλεύεται την ακόλουθη ιδιότητα της παραγωγού του ρεύματος ως προς την τάση (Bhaskar, Lokanadham, 2012):

- Στο σημείο μέγιστης ισχύος ισχύει το εξής:

$$dI / dV = -I/V$$

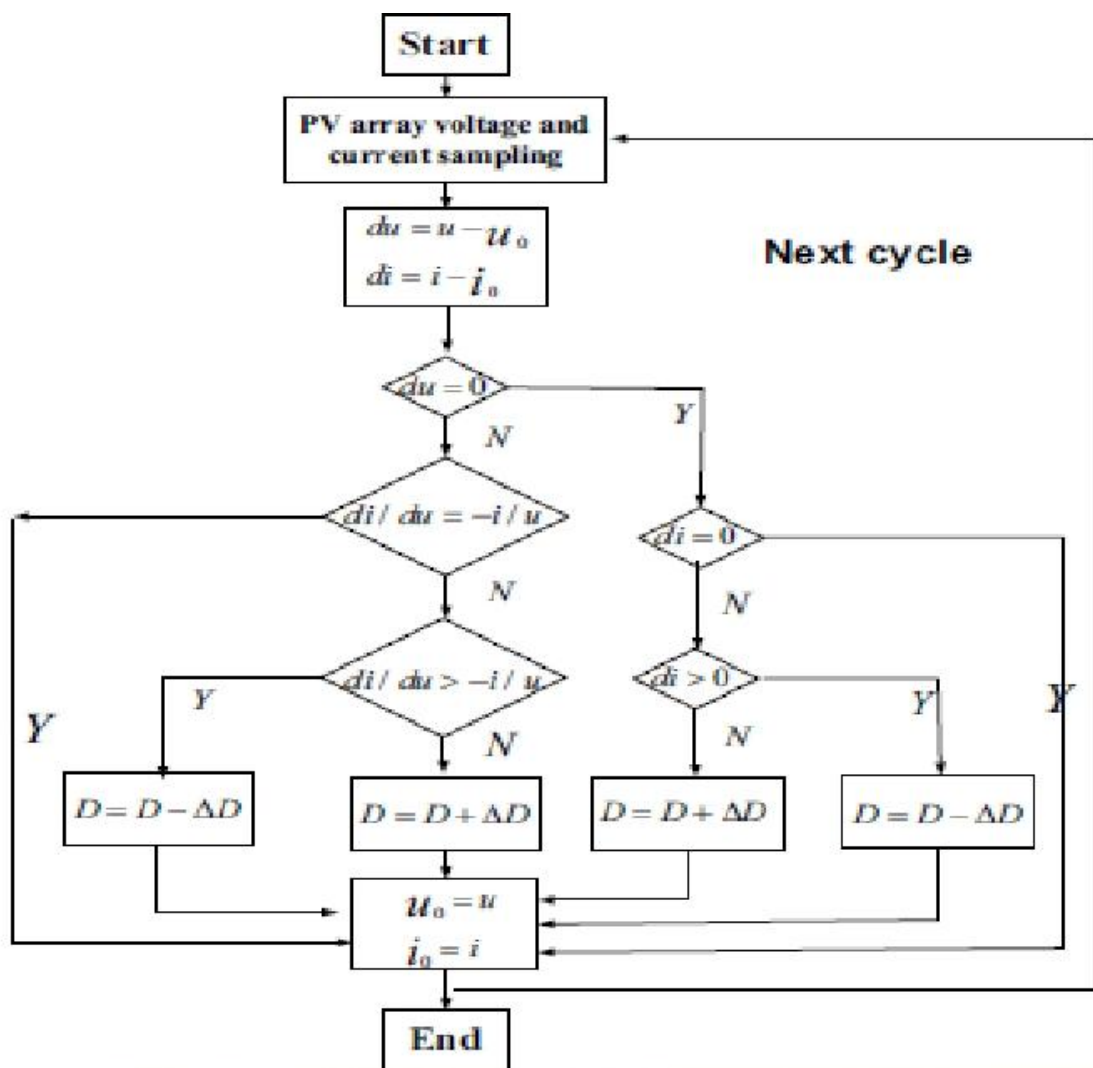
- Αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος ισχύει το εξής:

$$dI / dV > -I/V$$

- Δεξιά του σημείου μέγιστης ισχύος ισχύει το εξής:

$$dI / dV < -I/V$$

Ο αλγόριθμος λειτουργεί με βάση το παρακάτω διάγραμμα:



Σχ. 3.4 : Αλγόριθμος οριακής αύξησης χωρητικότητας (Bhaskar, Lokanadham, 2012)

3.5 Αλγόριθμος σταθερής τάσης

Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί με βάση την ιδιότητα του λόγου της τάσης του σημείου μέγιστης ισχύος προς την τάση ανοιχτοκυκλώματος του στοιχείου να παραμένει σταθερός, ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Η ιδιότητα αυτή περιγράφεται στην παρακάτω σχέση:

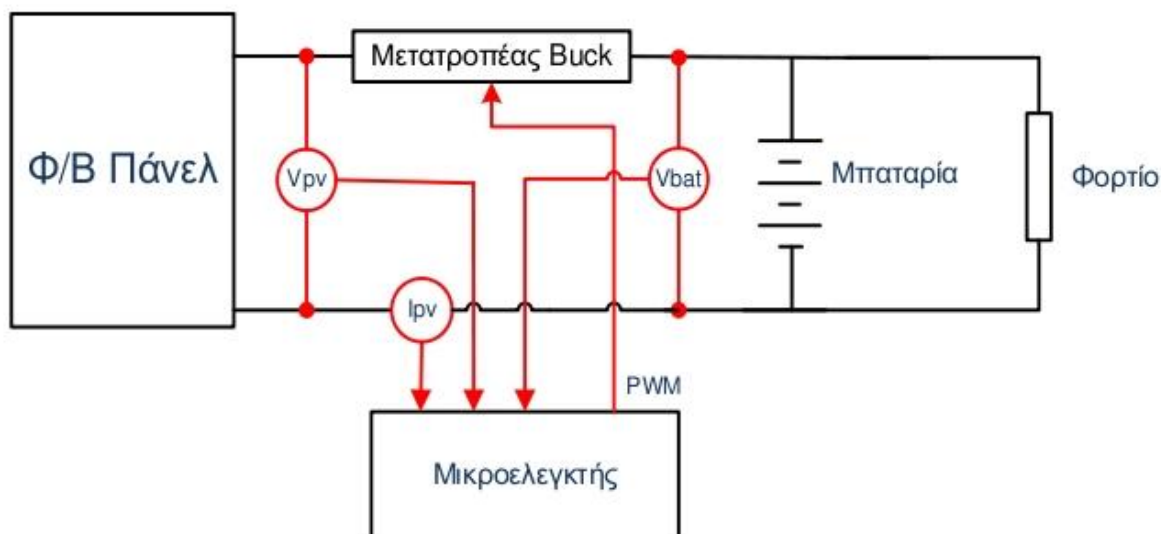
$$V_{MPP} / V_{OC} = C \quad (3.1)$$

Το σύστημα μετρά την τάση ανοιχτοκυκλώματος του στοιχείου και στην συνέχεια προσαρμόζει την τάση λειτουργίας με βάση την εξίσωση 3.1. Η σταθερά C έχει εκ των προτέρων προσδιοριστεί.

Κεφάλαιο 4: Υλοποίηση του MPPT με τον μικροελεγκτή AVR Atmega16

4.1 Εισαγωγή:

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος με το οποίο ανιχνεύεται η μέγιστη ισχύς του πάνελ και παρέχεται στην μπαταρία, φορτίζοντας έτσι με τον καλύτερο δυνατό ρυθμό. Στην συνέχεια, η διατάξη αναλύεται και επεξηγείται. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος είναι το εξής:



Σχ. 4.1 : Διάγραμμα του συστήματος

Μέσω του μετατροπέα ADC του μικροελεγκτή Atmega16 λαμβάνονται μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του πάνελ και της τάσης της μπαταρίας. Στην συνέχεια, μέσω του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης υπολογίζεται η διαθέσιμη ισχύς του πάνελ και μέσω ενός PWM σήματος συχνότητας 15kHz που δημιουργείται από τον μικροελεγκτή, ελέγχεται κατάλληλα το P-Mosfet του Buck μετατροπέα ώστε να φορτίζεται η μπαταρία με την μέγιστη δυνατή ισχύ.

Θα αναφερθούν επίσης στοιχεία για τον μικροελεγκτή AVR Atmega16 και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του και θα αναλυθεί το λογισμικό προγραμματισμού Codevision C compiler.

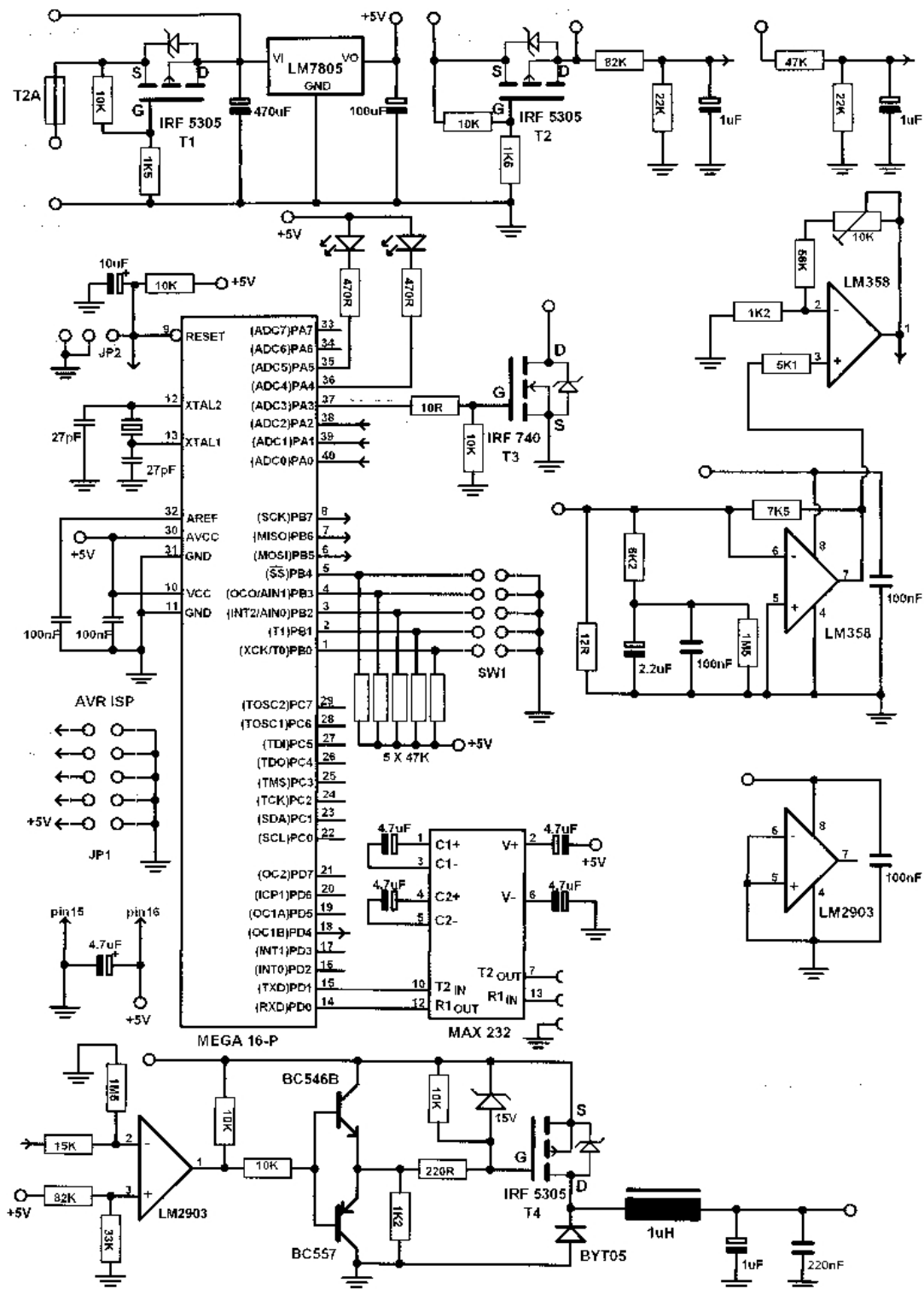
Τέλος, θα παρουσιαστεί λεπτομερώς ο κώδικας υλοποίησης των δύο αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

4.2 Ανάλυση και επεξήγηση της διάταξης

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης που κατασκευάστηκε για την υλοποίηση του αλγορίθμου. Τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται η διάταξη είναι τα εξής:

1. Το κύκλωμα του μικροελεγκτή

2. Ο Buck DC-DC μετατροπέας
3. Το κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος του πάνελ
4. Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης του πάνελ
5. Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας
6. Το κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας



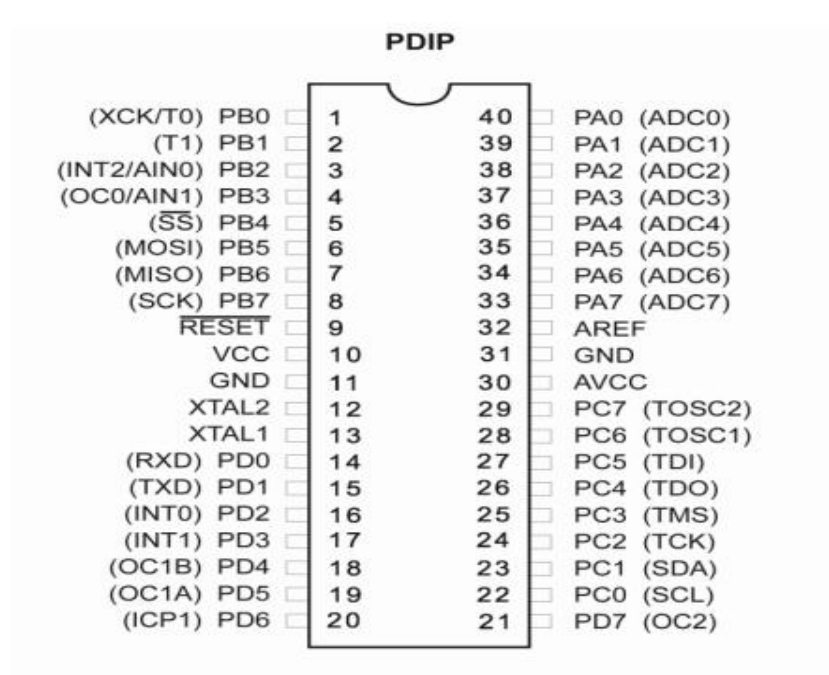
Σχ. 4.2 Διάγραμμα της διάταξης του MPPT

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα επιμέρους τμήματα της κατασκευής:

1. Το κύκλωμα του μικροελεγκτή

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται είναι ο Atmega16 της εταιρείας Atmel, με τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- 8 bit με αρχιτεκτονική RISC
- 16Kb μνήμη προγράμματος FLASH
- 512b μνήμη EEPROM 1kb μνήμη SRAM
- 32 γραμμές ψηφιακών εισόδων / εξόδων
- 2X8 bits χρονιστές, 1X16 bit χρονιστής
- Μετατροπέας ADC 10bits για έως 8 αναλογικές εισόδους
- Μονάδα αναλογικού συγκριτή
- Προγραμματιζόμενη μονάδα USART σύγχρονης / ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας
- Υποστήριξη πρωτοκόλλων SPI, I2C
- Χρονιστής επιτήρησης WDT με ξεχωριστό ταλαντωτή
- 6 συνολικά καταστάσεις λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας



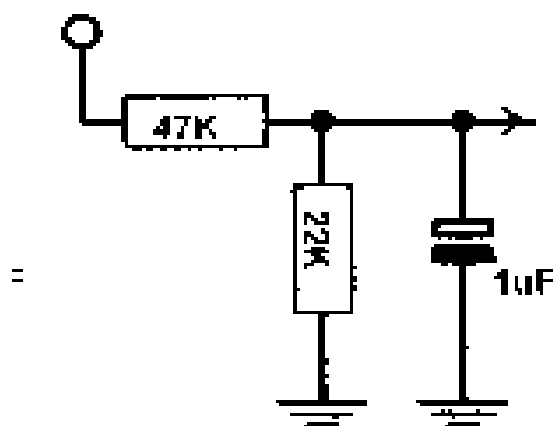
Σχ. 4.3 : Οι ακροδέκτες του Atmega16

Προκειμένου να εκτελεστεί κάθε εντολή όπως καθορίζει το πρόγραμμα η κεντρική μονάδα επεξεργασίας εκτελεί μία σειρά διαδοχικών λειτουργιών, ο συγχρονισμός των οποίων παρέχεται από ένα σήμα ρολογιού. Οι μικροελεγκτές γενικά υποστηρίζουν διάφορες πηγές παραγωγής σήματος ρολογιού του συστήματος. Η κατασκευή αυτή διαθέτει έναν εξωτερικό ταλαντωτή 8 Mhz. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της μεγάλης ακρίβειας, της ανθεκτικότητας σε μεταβολές της θερμοκρασίας και του αρκετά χαμηλού κόστους αγοράς.

Στην θύρα A όπου βρίσκεται ο μετατροπέας ADC έχουν συνδεθεί οι 3 αναλογικές εισοδοί για την μέτρηση του ρεύματος του πάνελ της τάσης του πάνελ και της τάσης της μπαταρίας. Μέσω της PA.3 και του Mosfet IRF740 γίνεται έλεγχος του φορτίου. Στις επόμενες δύο θύρες συνδέονται δύο led που θα αναβοσβήνουν ανάλογα με τις διάφορες καταστάσεις που έχουν οριστεί στο κυρίως πρόγραμμα. Ο ADC μετατροπέας μετατρέπει το αναλογικό σήμα εισόδου σε ψηφιακό σήμα 10bit με μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων.

Στην θύρα B έχουν συνδεθεί πέντε διακόπτες για τον χειροκίνητο έλεγχο του συστήματος. Με την βοήθεια του ολοκληρωμένου max232n είναι εφικτή η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή μέσω της σειριακής θύρας RS-232. Το ολοκληρωμένο αυτό χρησιμοποιεί διατάξεις με πυκνωτές και παράγει την απαιτούμενη τάση που χρειάζεται η σειριακή θύρα.

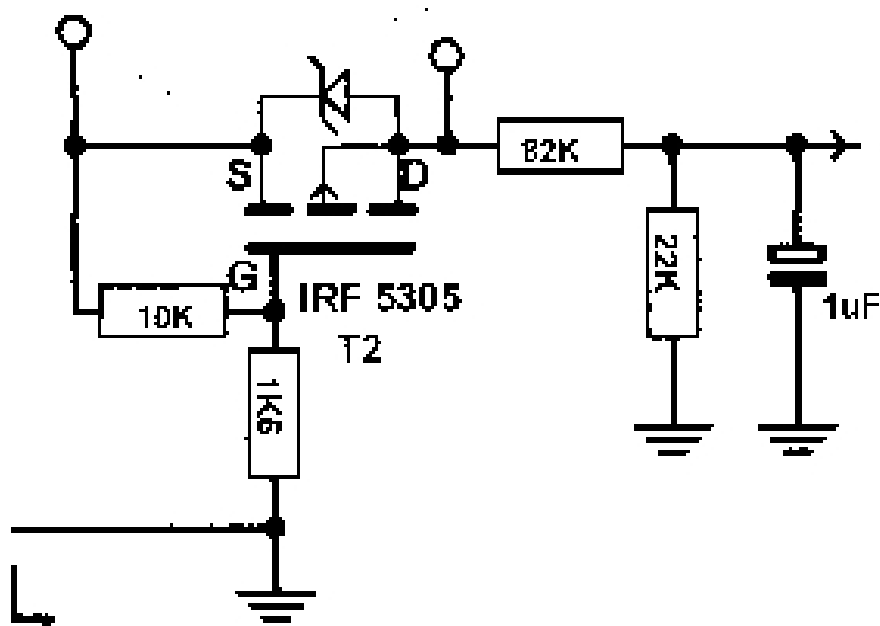
Για να μπορέσει ο μικροελεγκτής να λειτουργήσει χρειάζεται τάση τροφοδοσίας 5V που παρέχονται μέσω του κυκλώματος του παρακάτω σχήματος:



Σχ. 4.4 : Κύκλωμα τροφοδοσίας του μικροελεγκτή

Ο σταθεροποιητής 7805 δέχεται στην είσοδο την τάση της μπαταρίας και στην έξοδο δίνει 5V σταθερά για την τροφοδοσία του Atmega 16. Για τον λόγο αυτό πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η μπαταρία θα είναι πάντα τοποθετημένη, αλλιώς το σύστημα θα τίθεται εκτός λειτουργίας.

2. Ο Buck DC-DC μετατροπέας

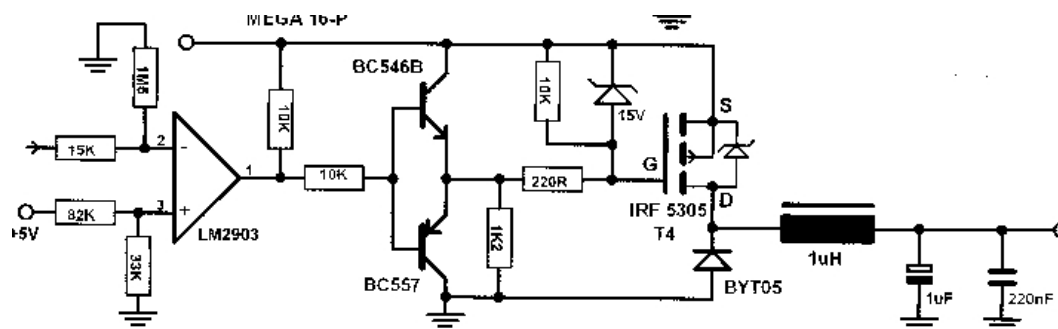


Σχ. 4.5 Ο Buck μετατροπέας

Το κύκλωμα προσαρμογής της ισχύος του πάνελ υλοποιεί έναν DC-DC μετατροπέα τύπου Buck, για τον έλεγχο της διακοπτικής λειτουργίας του οποίου έχει χρησιμοποιηθεί το p-channel MOSFET IRF5305. Καθώς η οδήγηση του mosfet δεν μπορεί να γίνει απευθείας από το PWM σήμα του μικροελεγκτή, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ειδικό στάδιο οδήγησης που φαίνεται στο σχήμα 4.5. Συγκεκριμένα ο λόγος τοποθέτησης του συγκρητή LM2903N και τα δύο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία “totem pole”, είναι ότι σε υψηλές συχνότητες οι παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ πύλης – πηγής και πύλης -εκροής έχουν σημαντική επίδραση στην συνολική

λειτουργία του IRF5305. Έτσι, για να τις φορτίσουμε και να τις εκφορτίσουμε σύντομα ώστε η τάση της πύλης να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα γρήγορα και το MOSFET να ανοιγοκλείνει σωστά, θα πρέπει η οδήγηση να γίνει από πηγή ρεύματος. Τα δύο συμπληρωματικά (NPN – PNP) τρανζίστορ Q5-Q6 συνδέονται σε “totem pole” για τον λόγο αυτόν. Όμως, για να πολωθούν σωστά οι βάσεις τους δεν αρκεί η τάση του μικροελεγκτή. Η απαραίτητη ανύψωση τάσης επιτυγχάνεται μέσω του συγκρητή LM2903N, στην μη αναστρέφουσα είσοδο του οποίου υπάρχει ένας διαιρέτης τάσης ενώ στην αναστρέφουσα είσοδο βρίσκεται το PWM σήμα που λαμβάνεται από τον ακροδέκτη PD.4 του μικροελεγκτή.

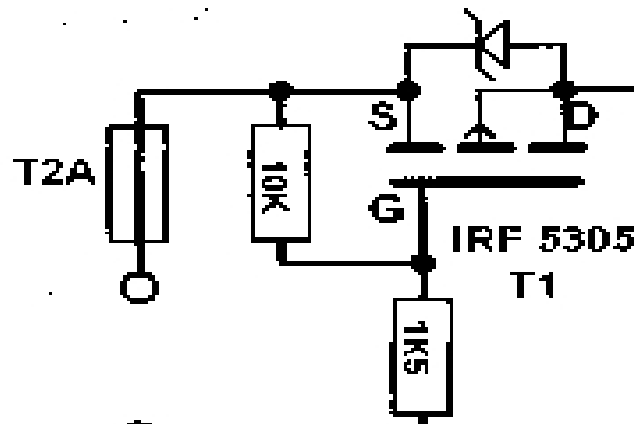
3. Το κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος του πάνελ



Σχ. 4.6 : Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος του πάνελ

Για τον υπολογισμό της ισχύος του πάνελ απαιτείται μέτρηση του ρεύματος και της τάσης του. Έτσι, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα τοποθετείται μία βατική αντίσταση μικρής τιμής (0.39Ω) ως προς την γη και λαμβάνεται η πτώση τάσης πάνω σε αυτήν. Η πτώση τάσης, διαιρούμενη με την τιμή της αντίστασης δίνει το συνολικό ρεύμα του πάνελ. Η πτώση τάσης αυτή στην συνέχεια ενισχύεται με τον ενισχυτή LM358N ώστε να οδηγηθεί στον μικροελεγκτή. Η μετατροπή της μέτρησης αυτής του ADC σε A ώστε να καταγραφεί η ακριβής τιμή του ρεύματος γίνεται στο πρόγραμμα λαμβανωμένων υπ' όψιν των χαρακτηριστικών του κυκλώματος.

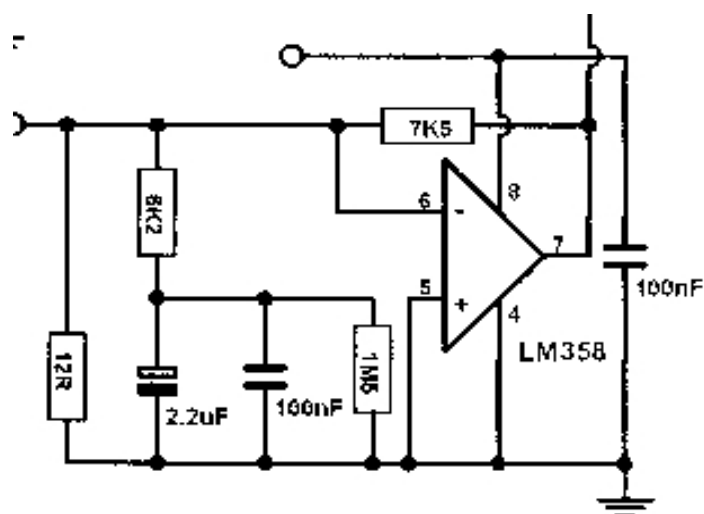
4. Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης του πάνελ



Σχ. 4.7 : Κύκλωμα μέτρησης τάσης στο πάνελ

Η μέτρηση της τάσης του πάνελ γίνεται μέσω του διαιρέτη τάσης, ο οποίος υποβιβάζει την τάση περιορίζοντας το μέγιστο πλάτος της στα 5V, ώστε να είναι ασφαλής η μέτρησή της από τον ADC του μικροελεγκτή. Η μετατροπή της μέτρησης σε V ώστε να καταγραφεί η ακριβής τιμή της τάσης γίνεται στον κώδικα του προγράμματος. Ο πυκνωτής που τοποθετήθηκε χρησιμεύει στην εξομάλυνση της τάσης αναφοράς και το mosfet irf5305 στην προστασία του πάνελ από λανθασμένη πολικότητα της σύνδεσης.

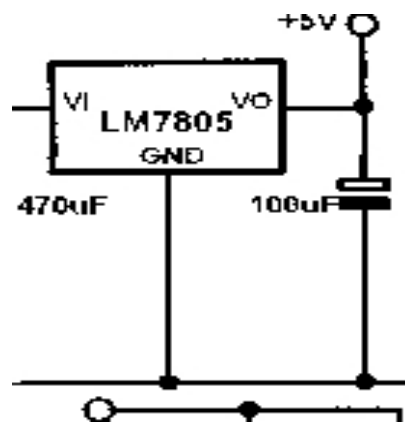
5. Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας



Σχ. 4.8 : Κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας

Η μέτρηση της τάσης της μπαταρίας γίνεται μέσω του παραπάνω διαιρέτη τάσης που υποβιβάζει την τάση περιορίζοντας το μέγιστο πλάτος της στα 5V, ώστε να είναι ασφαλής η μέτρησή της από τον ADC του μικροελεγκτή. Η μετατροπή της μέτρησης σε V ώστε να καταγραφεί η ακριβής τιμή της τάσης γίνεται στον κώδικα του προγράμματος.

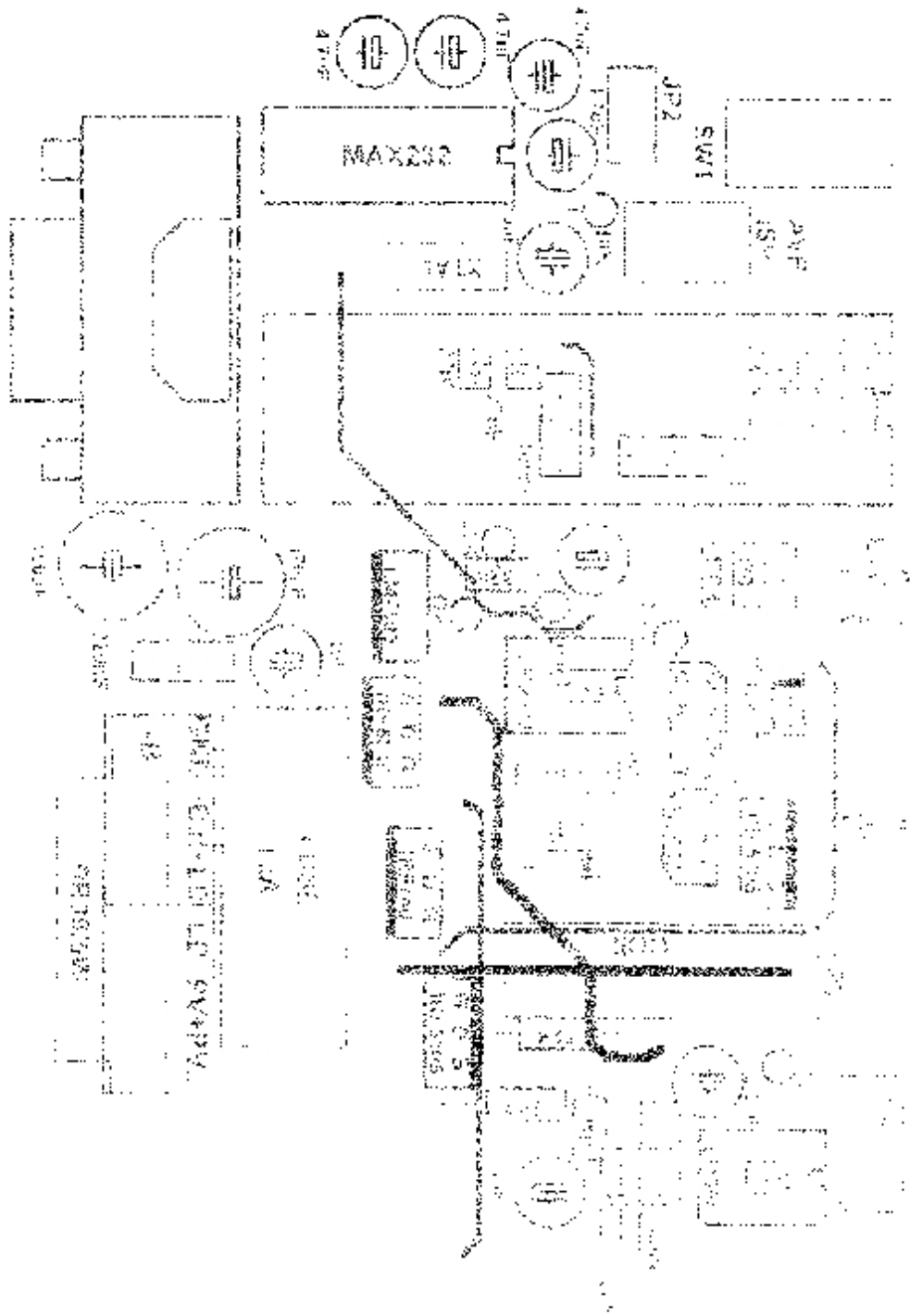
6. Κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας



Σχ. 4.9 : Κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας

Η ασφάλεια των 2 Ampere τοποθετείται για την προστασία του συστήματος, ενώ με το mosfet irf5305 προστατεύεται η μπαταρία από τυχόν λάθος σύνδεση του φορτίου.

Τέλος, στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η πλακέτα που κατασκευάστηκε για την υλοποίηση του MPPT και τα κύρια μέρη της.



Σχ. 4.10 : Πλακέτα υλοποίησης

4.3 Ανάπτυξη του προγράμματος

Ο μικροελεγκτής αποτελεί το υλικό μέρος του συστήματος αλλά δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς το πρόγραμμα. Έτσι ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έχει ιδιαίτερη αξία. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή μπορεί να γίνει σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου assembly η οποία προσφέρει σημαντικά μειωμένο μέγεθος κώδικα, αλλά παρουσιάζει δυσκολίες στον προγραμματισμό και την συντήρηση.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, ο μικροελεγκτής μπορεί να προγραμματιστεί και με γλώσσες υψηλού επιπέδου. Για να μεταφερθεί ένα πρόγραμμα στον μικροελεγκτή απαιτείται μεταγλώτισή του, ώστε αυτό να μεταφραστεί σε γλώσσα μηχανής, καθώς και ένας “προγραμματιστής” που αναλαμβάνει το φόρτωμα του προγράμματος στην μνήμη του μικροελεγκτή. Ο κώδικάς μας για την υλοποίηση του MPPT έχει γραφτεί σε γλώσσα C στο περιβάλλον του μεταγλωτιστή Codevision AVR.

4.3.1 Codevision AVR

Ο μεταγλωτιστής που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας HP Info Tech. Υποστηρίζει όλους τους μικροελεγκτές AVR και έχει δυνατότητα ανάπτυξης κώδικα σε C και assembly, ενώ διαθέτει λειτουργία για την μεταφορά του προγράμματος στον μικροελεγκτή.

4.4 Υλοποίηση του αλγορίθμου MPPT

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου γράφτηκε πρόγραμμα στο Codevision που περιλαμβάνει όλα τα τμήματα που εξασφαλίζουν την σωστή φόρτιση των μπαταριών σε κάθε στάδιο, ανάλογα με την διαθέσιμη χωρητικότητά τους.

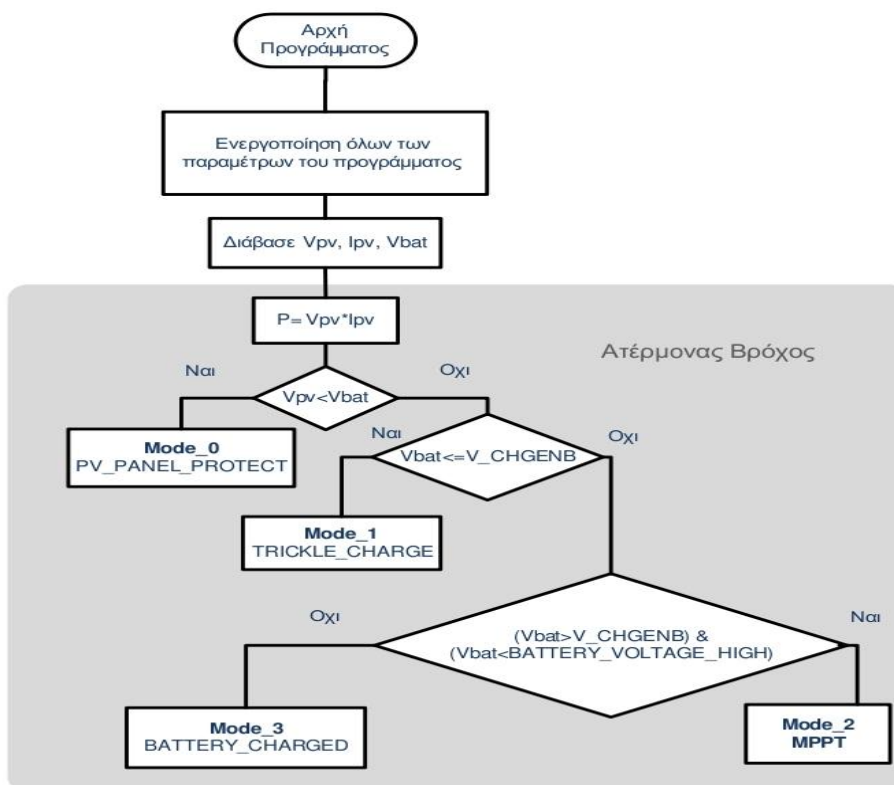
Για την εύρεση του MPP έχουν υλοποιηθεί δύο παραλλαγές του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης. Στην πρώτη παραλλαγή η αυξομείωση της τιμής του DC του PWM υπολογίζεται στη βάση της μεταβολής της αποδιδόμενης ισχύος συναρτήσει της προηγούμενης μεταβολής του DC του PWM. Στη δεύτερη παραλλαγή η αυξομείωση του DC του PWM σήματος υπολογίζεται από την μεταβολή της

αποδίδς ισχύος συναρτήσεϊ της μεταβολής του ρεύματος του πάνελ. Τα διαγράμματα ροής των αλγορίθμων αυτών βρίσκονται στο κεφ. 3.

Για την επιτήρηση της διαδικασίας φόρτισης έχουν προγραμματιστεί 4 καταστάσεις λειτουργίας, η κάθε μία από τις οποίες υλοποιεί τις ενδεδειγμένες ενέργειες. Όλα τα δεδομένα της λειτουργίας του συστήματος αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο μέσω της σειριακής θύρας του μικροελεγκτή και μπορούν να παρακολουθηθούν μέσω κατάλληλου προγράμματος σειριακής επικοινωνίας.

Για τον αυστηρό χρονισμό των ενεργειών του προγράμματος έχει χρησιμοποιηθεί χρονικό interrupt των 54 msec μέσω του χρονιστή timer0 του Atmega16 και εξασφαλίζεται έτσι σταθερός χρόνος εκτέλεσης για τον κάθε κύκλο ελέγχου.

Τέλος, για την δημιουργία του PWM σήματος του μικροελεγκτή χρησιμοποιείται ο 16bit χρονιστής timer1, η συχνότητα του οποίου είναι ίση με 15.686kHz. Οι ρυθμίσεις των καταχωρητών τόσο για την δημιουργία του PWM σήματος όσο και τον χρόνο των 64msec βρίσκονται στο παρακάτω πρόγραμμα. Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας φαίνεται παρακάτω:



Σχ. 4.11 : Διάγραμμα ροής του προγράμματος

Ενσωμάτωση των βιβλιοθηκών της codevision που χρησιμοποιούνται:

```
//ensomatosi vivliothikon
#define F_CPU 4000000UL
#include <util/delay.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <stdio.h>
```

ορισμός των σταθερών του προγράμματος

```
// Orismos staθerwn
#define ADC_VREF_TYPE 0x40
#define STEP_UP 4
#define STEP_DOWN 4
#define V_CHGENB 11.2 // [Volt]
#define C 7.20 // [AH]
#define I_BULK C/20 // [Amper]
#define I_TC 0.02*I_BULK // [Amper]
#define BATTERY_VOLTAGE_HIGH 12.8 // [Volt]
#define BATTERY_VOLTAGE_LOW 11.4 // [Volt]
#define R6 68.1 // [kOhm]
#define R7 21.8 // [kOhm]
#define R8 12 // [Ohm]
#define R20 47.5 // [kOhm]
#define R21 21.85 // [kOhm]
#define A_GAIN 51.25 // [-]
#define LOAD_EN PORTA3 // [-]
#define BAT_OK_LED PORTA4 // [-]//
#define MPPT_ON_LED PORTA5 // [-]
#define PV_PANEL_PROTECT_MODE 0
#define TRICKLE_CHARGE_MODE 1
#define MPPT_MODE 2
#define BATTERY_CHARGED_MODE 3
#define USART_BAUDRATE 9600UL
#define BAUD_PRESCALE (((F_CPU / (USART_BAUDRATE * 16UL))) - 1)
unsigned char terminal_output[64], output_length=0, bytetosend=0;
unsigned char *draft;
```

δήλωση των μεταβλητών

```
// Dilwsi Metavlhtwn
volatile float P, Vbat, V, I, P0, V0, I0, Vbat0;
unsigned int volt_bat, volt_in, current_in, k=85, k0;
unsigned char tr=0, jj=0, k_UD=0, mode, mode0;
volatile unsigned char flag=0;
void USART_Init( unsigned int ubrr);
void USART_Transmit( unsigned char data );
```

```
unsigned char printFloat(unsigned char* p, float fnum);
```

γενική συνάρτηση μέτρησης από τον ADC

```
// Synarthsh lhpshs metrhsewn mesw tou ADC
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
    _delay_us(10);
    ADCSRA|=0x40;
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10; return ADCW;
}
```

```
ISR(TIMERO_COMP_vect)
{
    flag=1;
    tr=0;
}
```

```
// Metrhsh tou xronou twv 64msec me xrhsh tou timer0
/*interrupt [TIMD_COMP] void timer0_compare_isr(void)
{
    tr++;
    if (tr==2)
    {
        flag=1;
        tr=0;
    }
}*/
```

MODE_0 – προστασία πάνελ : αποσύνδεση του πάνελ σε περίπτωση που η τάση της μπαταρίας υπερβεί αυτή του πάνελ

```
// MODE_0 - Prostasia Panel
void do_pv_panel_protect(void)
{
    k=50;
    PORTA|=0x10; // Red LED ON
    PORTA&=~0x20; // MPPT Off
}
```


MODE_1- λειτουργία ήπιας φόρτισης: Σε αυτή την λειτουργία η τάση της μπαταρίας είναι πολύ χαμηλή και για να μην καταπονηθεί, δίνεται σταθερά χαμηλή τιμή ρεύματος μέχρι κάποιο όριο τάσης. Όσο η μπαταρία βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση το φορτίο είναι αποσυνδεδεμένο.

```
// MODE_1 - Fortisi Mpatarias me tricle_charge
void do_tricle_charge(void)
{
    PORTA&=~0x80; //To fortio einai apenergopoihmeno se afth th
    λειτουργία
    PORTA|=0x20; // MPPT Off

    if(jj<2)
    {
        PORTA&=~0x10; // Green LED anabosbi nei
    }
    else
    {
        PORTA|=0x10; // To Led ths endeiksis mpatarias einai
        svhsto
    }

    if (I < I_TC) // Dinoume mia staðeri timi revmatos
    if(k<255)k++; // sth mpataria gia na "zwntanepsei "
    else if (I > I_TC)
    if(k>0)k--;
}

```

MODE_2 – Λειτουργία MPPT : στο mode αυτό λειτουργούν οι δύο αλγόριθμοι MPPT που έχουν σχεδιαστεί. Ο διακόπτης PB.4 εναλλάσει την λειτουργία των δύο παραλλαγών του αλγορίθμου.

```
// MODE_2 - Leitourgia MPPTs (Algorithmos auxitikis agogimotitas)
void do_mppt(void)
{
    float dV=I-I0;
    float dP=P-P0;
    float dI=I-I0;
    if (jj<2) // Ta LED mpatarias kai MPPT anavosvhnoun
    { PORTA&=~0x10; // me staðeri syxnothta
        PORTA&=~0x20;
    }
}

```

```

else
{
    PORTA|=0x10;
    PORTA|=0x20;
}
if (Vbat>=BATTERY_VOLTAGE_LOW + 0.05) // To fortio exei
energopoi h8ei
PORTA|=0x80; // otan h tash ths mpatarias ginei megalyterh h
ish
// me thn (BATTERY_VOLTAGE_LOW + 0.05)
    if(dV!=0)
        {

            if(dI/dV == -I/V) return;
            else
            {
                if(dI/dV>-I/V)
                {
                    if(k<255)
                    k++;

                }
                else
                {
                    if(k>0)
                    k--;
                }
            }
        }
    else
    {

        if(dI==0) return;
        else
        {
            if(dI>0)
            {
                if(k<255) k++;
            }
            else
            {
                if(k>0) k--;
            }
        }
    }
}

```

```
    }  
}
```

MODE_3 – Λειτουργία πλήρως φορτισμένης μπαταρίας. Στο mode αυτό ο αλγόριθμος MPPT είναι ανενεργός, ενώ αποδίδεται μία σταθερή μικρή τιμή του DC του παραγόμενου PWM ώστε η μπαταρία να διατηρείται φορτισμένη.

```
// MODE_3 – Η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη  
void do_battery_charged(void)  
{  
    PORTA&=~0x10; // Green LED ON  
    PORTA|=0x20; // MPPT Off  
    PORTA|=0x80; // Το fortio είναι ON  
    k=100;  
}
```

Στο κυρίως πρόγραμμα αρχικά ορίζονται οι παράμετροι, ενεργοποιούνται οι θύρες του μικροελεγκτή και αρχικοποιούνται οι καταχωρητές και τα interrupts των ενσωματωμένων περιφερειακών του μικροελεγκτή.

```
// Main Programma  
int main (void)  
{  
  
    /*Uart control registers*/  
  
    USART_Init (BAUD_PRESCALE); /*  
        UCSRA=0x00;  
        UCSRB=0x08;  
  
        UCSRC=0x86;  
        UBRRH=0x00;  
        UBRRL=0x08; */  
  
    /*Enable A/D and initialize*/  
    ACSR=0x80;  
    SFIOR=0x00;  
  
    ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;  
    ADCSRA=0x87; SFIOR&=0x1F;  
  
    /*Ports-Pins Initialization*/
```

```

DDRA=0b11111000;
PORTA=0b11111000; // Porta A. 0-?.2 Eisodoi xwris antistaseis
Pull-up
DDR D=0b00010000; // Porta D: 0-3 Eisodos, 4 Eksodos
(PWM) (OCR1B)
PORTD=0b11111111; // Porta D: 0-3 Pull Up energopoihmena
DDRB=0b00000000; // Porta B: eisodos
PORTB=0b11111111;

OCR1B= 0; // ksekinwntas h timi tou OCR1B einai mhden

/*Timer init for PWM use*/

TCCR1A=0b00100001; // Energos o akrodektis OCR10, 8-bit fast
PWM mode
TCCR1B=0b00001001;

OCR0= 249; //0 kataxwrhths aftos periexei thn timh sygkrisis
TCCR0 = 0x0D; // Xronos 32msec me N=1023 me ton timer0
TIMSK |= (1<<OCIE0); // Energopoihsh toy timer0

sei (); // Energopoihsh tw n interrupt

P=0;
OCR1B=k;
output_length =
6

sprintf(terminal_output, "V\tVbat\tI\tP\t\tk\tMODE");
for (bytetosend=0; bytetosend<output_length; bytetosend++)
  USART_Transmit(terminal_output[bytetosend]);
// ekteleoumenos atermonas broxos
while (1)
{

  jj++;
  if (jj==10) jj=0;
  current_in = read_adc(0); // Metrshsh toy revmatos tou
panel
  volt_in = read_adc(1); // Metrshsh ths tashs toy panel
  volt_bat = read_adc(2); // ?etrshsh ths tashs ths mpatarias

  // Revma tou Panel se real [Amper]
  //I=(((float)current_in)*(5.0/1024)/(R8*1.00));
  I=((float)current_in)*(5.0/1024)*(25);

  // STasi tou Panel [PV] se real [Volt]

```

```

V=((float) volt_in) * (5.0/1024) * ((R6+R7) / R7);
V=V*1.2851222;
// Tasi ths mpatarias se real [Volt]
Vbat=((float) volt_bat) * (5.0/1024) * ((R20+R21) / R21);
Vbat/=0.9926244725738;
// Ypologismos ths isxyos [Watt]
P=V*I;

// Aposyndesi toy panel an Vbat>Vpanel
if (V<(Vbat))
mode = PV_PANEL_PROTECT_MODE;

// To revma ekkinesis gia th fortisi ths mpatarias
if (Vbat<=V_CHGENB)
mode = TRICKLE_CHARGE_MODE;

// Syn8hkh leitourgias tou MPPT - h mpataria doulevei
if ((Vbat>V_CHGENB + 0.02) && (Vbat<BATTERY_VOLTAGE_HIGH -
0.2))
mode = MPPT_MODE;

// Syn8hkh plhrws fortismenis mpatarias
if (Vbat>BATTERY_VOLTAGE_HIGH + 0.2)
mode = BATTERY_CHARGED_MODE;

// Klhsh ths katalhlhs synarthshs gia to trexwn mode
switch (mode)
{
break;
case(PV_PANEL_PROTECT_MODE): do_pv_panel_protect();
break;
case(TRICKLE_CHARGE_MODE): do_trickle_charge();
break;
case(MPPT_MODE): do_mppt(); break;
case(BATTERY_CHARGED_MODE): do_battery_charged();
break;
}
OCR1B=k; // ananewsi toy duty cycle [0..255]
PO = P;
VO = V;
Vbat0 = Vbat;
IO = I;
mode0 = mode;

output_length = 0;

```

```

        output_length += sprintf(terminal_output +
output_length, "v=");
        output_length +=printfloat(terminal_output +
output_length, V);

        output_length += sprintf(terminal_output +
output_length, "\tvb=");
        output_length +=printfloat(terminal_output +
output_length, Vbat);

        output_length +=
sprintf(terminal_output+output_length, "\tI=");
        output_length +=printfloat(terminal_output +
output_length, I*1.0);

        output_length +=
sprintf(terminal_output+output_length, "\tP=");
        output_length +=printfloat(terminal_output +
output_length, P);

        output_length +=
sprintf(terminal_output+output_length, "\tk=%d", k);

        output_length +=
sprintf(terminal_output+output_length, "\tmode=%d\r\n", mode);

        for(bytetosend=0; bytetosend<output_length; bytetosend++)
        USART_Transmit(terminal_output[bytetosend]);
        //USART_Transmit('\n');
        // ?postoli dedomenwn sth seiriaki 8yra
        //sprintf("v=%02.3f vb=%02.3f i=%02.3f P=%02.3f k=%03i
mode=%d\r\n", V, Vbat, I, P, k, mode);
        // Anamoni
        flag=0;
        while(!flag);
    } //telos atermona broxou
}

void USART_Transmit( unsigned char data )
{
    /* Wait for empty transmit buffer */
    while ( !( UCSRA & (1<<UDRE)) );
    /* Put data into buffer, sends the data */
    UDR = data;
}

```

```

void USART_Init( unsigned int ubrr)
{
    /* Set baud rate */
    UBRRH=0;
    UBRRL=0;
    UCSRB=0;
    UCSRC=0;
    UBRRH = (unsigned char) (ubrr>>8);
    UBRRL = (unsigned char)ubrr;
    /* Enable receiver and transmitter */
    UCSRB = (1<<TXEN) | (1<<RXEN);
    /* Set frame format: 8data, 2stop bit */
    UCSRC = (1<<URSEL) | (1 << UCSZ0) | (1 << UCSZ1);
}

unsigned char printFloat(unsigned char* p, float fnum)
{
    int d1 = fnum;           // Get the integer part (678).
    float f2 = fnum - d1;   // Get fractional part (678.0123 -
678 = 0.0123).
    int d2 = trunc(f2 * 10000); // Turn into integer (123).

    // Print as parts, note that you need 0-padding for fractional
bit.
    // Since d1 is 678 and d2 is 123, you get "678.0123".

    return sprintf (p, "%d,%04d", d1, d2);
}

```

4.5 Σύνοψη:

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε αναλυτικά το σύστημα που αναπτύχθηκε για την πρακτική υλοποίηση του MPPT. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η κατασκευή της πλακέτας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία ενώ οι διαστάσεις είναι πολύ μικρές και μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε, αρκεί να προστατεύεται από τις καιρικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

Καούρης, Γ., Παραδόσεις ηλιακής θερμικής τεχνικής, Πάτρα

Davidov et al, Absorption and Emission of Hexagonal InN, Evidence of Narrow Fundamental Band Gap, Phys. Stat. Sol (b) 229 No.3 2002

Bhaskar, K., Lokanadham, M., Incremental Conductance Based Maximum Power Point tracking for pv system, International Journal of Engineering Research and Applications, V.2 I.2, 2012 pp 1420 – 1424

<http://newscenter.lbl.gov/news-releases/2012/11/27/the-installed-price-of-solar-photovoltaic-systems-in-the-u-s-continues-to-decline-at-a-rapid-pace/>

<http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode4.gif>

http://solarpowerplanetearth.com/images/Solar_IV_curve.jpg

http://www.intechopen.com/source/html/37984/media/image4_w.jpg

<http://chromausa.com/images/solarpv-fig-4.jpg>

<http://www.itacanet.org/wp-content/uploads/2011/05/cell4-600x498.jpg>

http://toolboxes.flexiblelearning.net.au/demosites/series13/13_02/content_sections/learn_about/images/08_solar_page_010_01.gif

<http://users.sch.gr/jabatzo/files/articles/mpataries.pdf>

http://www.inbalance-energy.co.uk/images/solar_pv_mounts/gamma/gamma_ground_mount.jpg

http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/328036916/solar_tracking_pv_systems_solar_power_generator.jpg

http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php

<http://www.renewableheatingandsolarpanelcompany.co.uk/images/Grant-Solar-PV-system-diagram-large.png>

http://www.naspor.gr/images/articles_various/battery2.jpg

<http://www.sydesys.gr/images/bat04.jpg>

<http://www.mpoweruk.com/performance.htm>

<http://www.maximintegrated.com/images/appnotes/3958/3958Fig03.gif>

http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar_ph/images/redraw10.jpg

<http://www.zeroenergy.com.np/solar-charge-controller-intro.php>

<http://batteryuniversity.com/img/content/clead1.jpg>

http://www.mathworks.com/matlabcentral/figure_files/31321/1/Buck_DC_DC_converter.jpg

<http://electronicdesign.com/power/inductive-boost-dc-dc-converters>

http://www.ee.iitb.ac.in/~sequel/sim_exercises/cuk.pdf

http://www.intechopen.com/source/html/37984/media/image6_w.jpg

<http://origin-ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032113000476-gr9.jpg>

<http://origin-ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032113000476-gr9.jpg>