

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

Μελέτη πάνω στα φωτοβολταϊκά
συστήματα και υλοποίηση
συστήματος MPPT

Σπουδαστές:

Κωτσαγγέλης Παύλος 38273

Κουνάδης Σταύρος 38280

Εισηγητής:

Αλατσαθιανός Σταμάτης



Ευχαριστίες

Σε αυτό στο σημείο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Αλατσαθιανό Σταμάτη, για την καθοδήγησή του, τις συμβουλές του και γενικά όλην την βοήθεια που μας παρείχε κατά την μελέτη, την υλοποίηση και την παρουσίαση της εργασίας.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας για την υποστήριξη καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

Κωτσαγγέλης Παύλος

Σταύρος Κουνάδης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	3
Περιεχόμενα.....	4
Εισαγωγή και σκοπός εργασίας.....	7
<u>Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή στην Ηλιακή Ενέργεια.....</u>	<u>8-14</u>
1.1 Ορισμός.....	8
1.2 Ενεργητικά ,Παθητικά και Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	8
1.2.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα.....	8
1.2.2 Ενεργητικά ή Θερμικά Ηλιακά Συστήματα.....	9
1.2.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	9
1.3 Ηλιακή ακτινοβολία.....	10
1.3.1 Ενεργειακή απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας.....	11
1.3.2 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	12
1.3.3 Το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα.....	13
1.4 Σύνοψη κεφαλαίου.....	14
<u>Κεφάλαιο 2:Η τεχνολογία των Φωτοβολταϊκών.....</u>	<u>15-31</u>
2.1 Εισαγωγή.....	15-16
2.2 Το Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	16-17
2.3 Ημιαγωγοί.....	18-20
2.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	20-21
2.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	21-23
2.6 Καμπύλη V-I.....	23-25

2.7	Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών.....	25-27
2.8	Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT).....	27-29
2.9	Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα.....	29-31
2.10	Σύνοψη κεφαλαίου.....	31
Κεφάλαιο 3: Συσσωρευτές και Κυκλώματα Φόρτισης.....		32-47
3.1	Δομή του βασικού στοιχείου και ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.....	32-34
3.2	Ταξινόμηση στοιχείων και μπαταριών.....	34
3.2.1	Πρωτεύουσες μπαταρίες.....	34-35
3.2.2	Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.....	35
3.2.3	Μπαταρίες αποθήκευσης (reserve batteries)	36
3.3	Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών.....	36
3.3.1	Χωρητικότητα.....	36-37
3.3.2	Τάση.....	37-38
3.3.3	Στάθμη φόρτισης.....	38-39
3.3.4	Βάθος εκφόρτισης.....	39
3.3.5	Χρόνος ζωής.....	39-40
3.3.6	Αυτοεκφόρτιση.....	40
3.4	Μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα....	40-41
3.5	Τι λειτουργία επιτελούν στο φωτοβολταϊκό σύστημα.....	41
3.6	Ελέγχτες φόρτισης.....	41-42
3.6.1	Βασική Αρχή.....	42
3.6.2	Προστασία από υπερφόρτιση.....	42-43

3.6.3 Προστασία από βαθιά εκφόρτιση.....	43
3.6.4 Προστασια από εξωτερικές επιδράσεις.....	44
3.6.5 Κυριοι τυποι ελεγκτων φορτισης.....	44-45
3.6.6 Ρυθμιστής MPPT.....	45-47
3.7 Σύνοψη κεφαλαίου.....	47
<u>Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμοι MPPT.....</u>	48-62
4.1 Ταξινόμηση των αλγορίθμων αναζήτησης.....	48-49
4.2 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O).....	49-53
4.3 Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance - INC).....	54-56
4.4 Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance-PC).....	57-59
4.5 Αλγόριθμος Σταθερής Τόσης (Constant Voltage - CV)	59-61
4.6 Σύνοψη κεφαλαίου.....	62
<u>Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση MPPT με τον μικροελεγκτή PIC16F876A.....</u>	63-73
5.1 Εισαγωγή.....	63
5.2 Σχηματικά των κυκλωμάτων και ανάλυση αυτών.....	63
5.2.1 Τροφοδοτικό κυκλώματος.....	64-65
5.2.2 Ο προγραμματιστής του μικροελεγκτή μας.....	65-66
5.2.3 Το βασικό κύκλωμα υλοποίησης MPPT.....	67-70
5.3 Αλγόριθμος MPPT.....	70
5.3.1 Το πρόγραμμα υλοποίησης του αλγορίθμου MPPT.....	71
5.3.2 Η ανάλυση του κώδικα.....	71-73
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ,ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	74-76

Εισαγωγή και σκοπός εργασίας

Το αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη πάνω στην απολαβή της ηλιακής ενέργειας μέσω διαφόρων συστημάτων. Επίσης γίνεται αναφορά στον τρόπο αποθήκευσης αυτής της ενέργειας και στις διάφορες μεθόδους για την βελτιστοποίηση της .

Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση της ηλιακής ενέργειας και ακτινοβολίας. Επίσης γίνεται αναφορά στα διάφορα ηλιακά συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται για διαφορετικό σκοπό την ενέργεια αυτή με διάφορους τρόπους .

Στο επομένο κεφάλαιο εμβαθύνουμε στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στην τεχνολογία αυτών. Επίσης γίνεται μελέτη πάνω στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και στους παράγοντες αποδοχής τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο ασχολούμαστε με τους συσσωρευτές ενέργειας και τα κυκλώματα φόρτισης αυτών. Ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στα διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη τους καθώς και στην εύρεση του αποδοτικότερου συστήματος φόρτισης τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στους αλγόριθμους εύρεσης μεγιστου σημειου ισχυος ή αλλιώς MPP.Αναλύουμε κάθε έναν από αυτούς ξεχωριστά και αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και μειονέκτηματα τους.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος MPPT και η περιγραφή τις αναλυτικότερη δομή του.

Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή στην Ηλιακή ενέργεια

1.1 Ορισμός

Ο ήλιος μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας μεταδίδει στην γή ηλιακή ενέργεια.Η μετατροπή αυτής της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια καθαρή και πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, ικανή να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο(θεωρητικά).Αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της αξιοποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(απο εδώ και πέρα Α.Π.Ε.) και παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέλλον της ηλεκτροπαραγωγής. Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών, οι οποίες αναφέρονται στην συνέχεια.

1.2 Ενεργητικά ,Παθητικά και Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους.

- Για την δημιουργία θέρμανσης με την χρήση (α)ενεργητικών και (β)παθητικών ηλιακών συστημάτων
- Για την δημιουργία ηλεκτρισμού με την χρήση (γ)φωτοβολταϊκών συστημάτων.

1.2.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα:

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι δομικά στοιχεία του κτιρίου,τα οποία συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν με μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο εκμεταλλεύοντας τους νόμους μεταφοράς θερμότητας.Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου,δηλαδή στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός διαφανούς υλικού(π.χ. γυαλί) και τον εγκλωβισμό της θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου.Τα παθητικά ηλιακά συστήματα συνδυάζονται είτε με φυσικό φωτισμό,είτε με φυσικό δροσισμό των κτιρίων για την περίοδο του καλοκαιριού.Επίσης είναι δυνατό να εφαρμοστούν τόσο σε καινούρια,όσο και σε παλαιά κτίρια.

1.2.2 Ενεργητικά ή Θερμικά Ηλιακά Συστήματα:

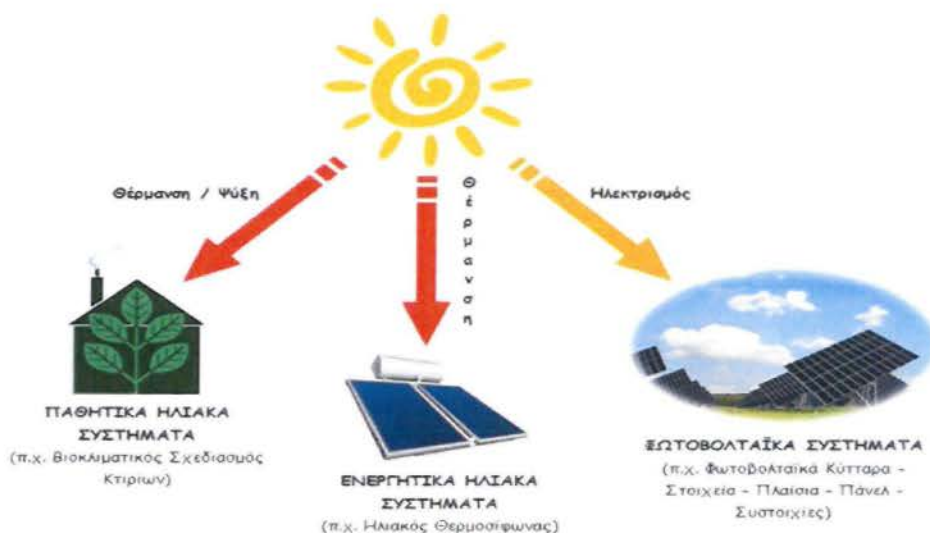
Τα ενεργητικά ή θερμικά ηλιακά συστήματα αποτελούν μηχανολογικά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, τη μετατρέπουν σε θερμότητα, την αποθηκεύουν και τη διανέμουν. Η διαφορά τους με τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι ότι η διανομή θερμότητας γίνεται με την χρήση κάποιου υγρού ή αέρα ως ρευστό μεταφοράς. Χρησιμοποιούνται για θέρμανση οικιακού νερού, για τη θέρμανση ή και ψύξη χώρων, για βιομηχανική χρήση, για διάφορες αγροτικές εγασίες, για αφαλάτωση, κλπ. Η πιο γνωστή και διαδεδομένη μορφή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων εφαρμόστηκε μέσω των ηλιακών θεμοσιφώνων. Μόνο στην χώρα μας η έκταση ηλιακών θεμοσιφώνων που έχει εγκατασταθεί είναι περίπου 3.282.200 m² (τετραγωνικά μέτρα).

1.2.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (ή Φ/Β) μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, διευκολύνοντας έτσι διάφορες περιοχές που έχουν πρόβλημα ηλεκτροδότησης και δεν μπορούν να απορροφήσουν ηλεκτρική ισχύ από το ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο (απομονωμένα σπίτια-χωριά, φάρoi, κλπ). Επίσης σε διάφορες καθημερινές εφαρμογές (ρολόγια, κομπιουτεράκια κλπ) οι οποίες έχουν χαμηλή απαίτηση ηλεκτρικής ισχύς, συναντάται η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας με την χρήση Φ/Β, αποτελεί την κύρια τεχνολογία ανάπτυξης των Α.Π.Ε. και μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στο τομέα της διανεμημένης παραγωγής.

Οι παραπάνω εφαρμογές έχουν σαν κοινό χαρακτηριστικό το ότι η παραγωγή τους περιορίζεται μόνο τις ώρες τις ημέρας που υπάρχει ηλιοφάνεια. Επομένως υπάρχουν γνωστές περιόδους κατά την διάρκεια ενός 24ώρου τις οποίες η παραγωγή ενέργειας είναι μηδενική. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται σχηματικά ο διαχωρισμός των τριών εφαρμογών ηλιακής ενέργειας.



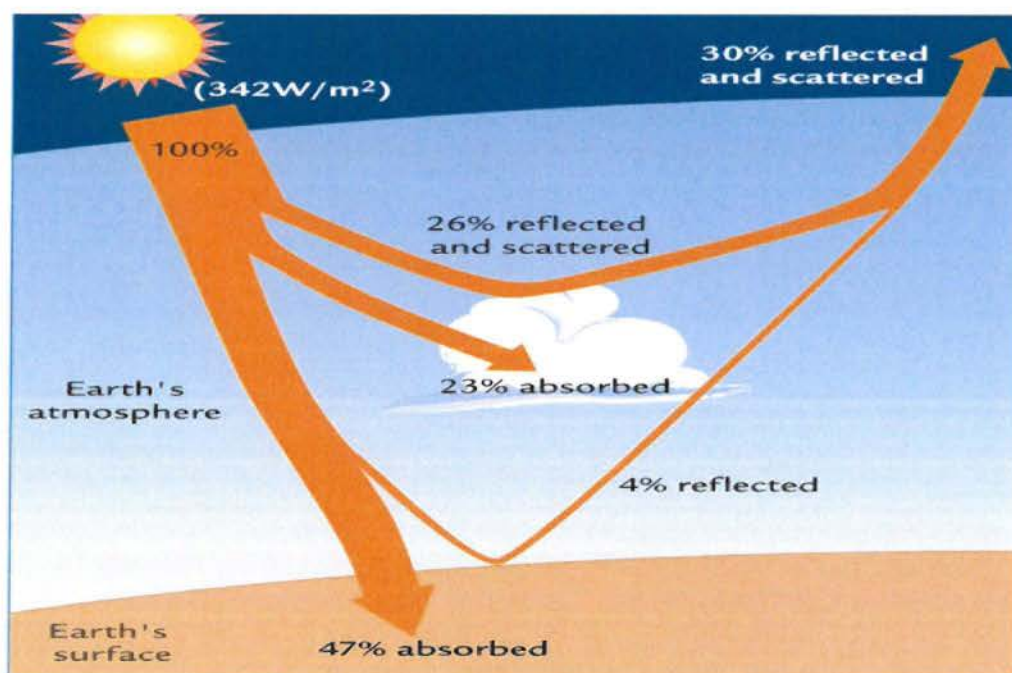
Εικόνα 1.1

1.3 Ηλιακή ακτινοβολία

Ο όρος «ηλιακή ενέργεια» χαρακτηρίζεται ως το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από ακτινοβολία του ήλιου. Τέτοιες μορφές είναι η θερμότητα, το φως και οι διάφορες ακτινοβολίες. Πρακτικά, μιας και η ηλιακή ενέργεια σαν σύνολο προέρχεται από τον ήλιο, είναι ανεξάντλητη. Για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών, τα οποία είτε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιομάζα, είτε να οδηγήσουν μετά από εκατατομμύρια χρόνια (με τις κατάλληλες συνθήκες) στην δημιουργία πετρελαίου. Η θερμότητα του ήλιου δημιουργεί διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ περιοχών και ανάπτυξη ανέμων η ενέργεια των οποίων χρησιμοποιείται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, ποσότητες νερού εξατμίζονται λόγω της θερμότητας του ήλιου, πέφτουν ως βροχή σε υψόμετρα και κατηφορίζουν προς τη θάλασσα, με δυνατότητα εκμετάλλευσης της δυναμικής τους ενέργειας σε υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Στην εικόνα 1.2 απεικονίζεται το ποσό της ηλιακής ενέργειας έτσι όπως φτάνει από τα όρια της ατμόσφαιρας μέχρι την επιφάνεια της Γης.

Γενικότερα, η ηλιακή ενέργεια που μεταδίδεται στην επιφάνεια της γης μέσω του ήλιου είναι ζωτικής σημασίας για την διατήρηση της ζωής στο πλανήτη, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί τη βάση για σχεδόν όλες τις άλλες μορφές ενέργειας

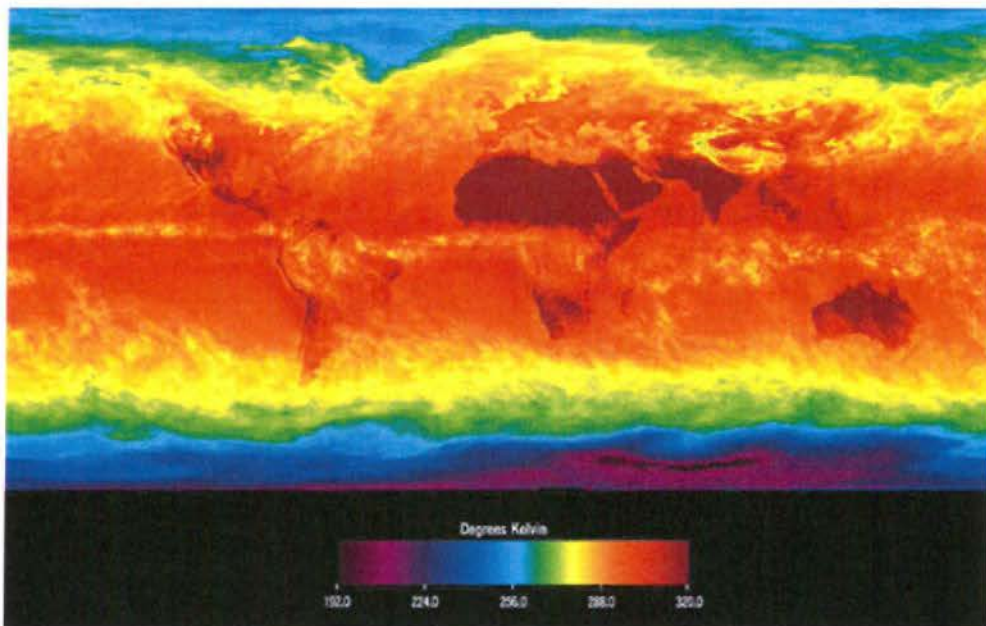
- Το 30% ανακλάται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας της γης.
- Το 47% αποβάται από την επιφάνεια της γης ενώ το 3% ανακλάται.
- Το 23% συμβάλλει στη δημιουργία των ανέμων, των κυμάτων και γενικά ρυθμίζει το κλίμα.
- Το 26% ανακλάται από τα σύννεφα και κατευθύνεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 1.2

1.3.1 Ενεργειακή απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας με σχεδόν σταθερή και προβλέψιμη ένταση στη διάρκεια του χρόνου και της ημέρας. Η ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) που φτάνει στην επιφάνεια της γης μέσα στην ημέρα, εξαρτάται από τη κλίση της συλλεκτικής επιφάνειας, από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, από τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διάφορων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών αιωρημάτων της ατμόσφαιρας. Για να μπορούμε όμως να συγκρίνουμε στοιχεία από διεθνή κλίμακα, οι μετρήσεις μας λαμβάνονται με ειδικούς αισθητήρες τα λεγόμενα πυρανόμετρα, τα οποία τοποθετούνται με την συλλεκτική επιφάνεια τους οριζόντια. Επομένως εάν λάβουμε υπόψιν όλην την επιφάνεια του πλανήτη μας, κατά μέσο όρο κάθε τετραγωνικό μέτρο (m^2) δέχεται περίπου $4,2 \text{ kWh}$ την ημέρα. Σε επιφάνειες όπως οι έρημοι τα ποσοστά αυτά μπορούν να ξεπεράσουν τις $6 \text{ kWh}/m^2$ την ημέρα. Στην εικόνα 1.3 φαίνεται σε παγκόσμια κλίμακα η ετήσια ενεργειακή απολαβή, ολικής ηλιακής ακτινοβολία σε kWh/m^2



Εικόνα 1.3

1.3.2 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

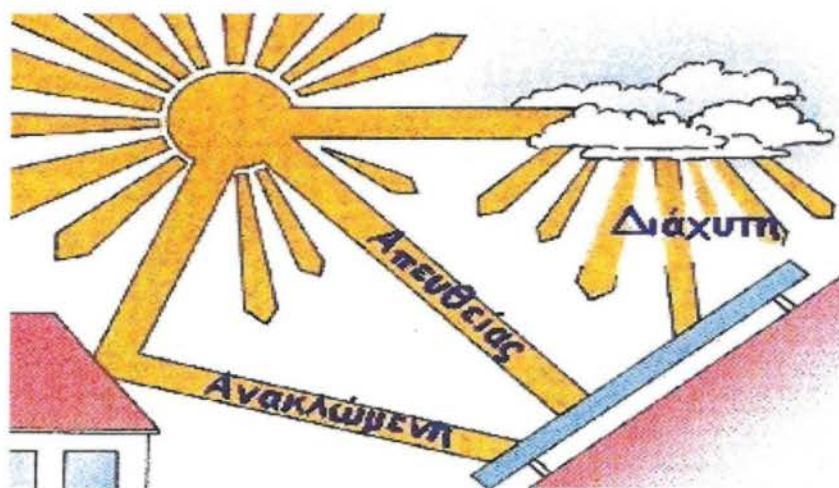
Σε κάθε τόπο της επιφάνειας της γης, φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η απευθείας (ή άμεση) και η διάχυτη στα μόρια του αέρα. Πιο συγκεκριμένα:

- Η απευθείας ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς διασκορπισμό στην ατμόσφαιρα.
- Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης με αλλαγμένη διεύθυνση, μιας και διασκορπάζεται στην ατμόσφαιρα και ανάκλαση από το έδαφος. Επομένως, ακτινοβολία αυτή φτάνει στην επιφάνεια της γης με τυχαίες διευθύνσεις.

Η απευθείας και η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τη σύσταση-κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (υγρασία και γενικά, τα αιωρήματα της ατμόσφαιρας).
- Την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους.
- Τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων σε ένα κεκλιμένο ή οριζόντιο επίπεδο, η οποία μεταβάλλεται καθώς αλλάζει το ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αξίζει να σημειωθεί, πως σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ένα τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προέρχεται και από αυτήν που ανακλάται διάχυτα από το έδαφος. Η διάχυτα ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους, το χρώμα του καθώς και από την επικάλυψη του (π.χ. χιόνι). Μεγάλο ρόλο παίζει και η πυκνότητα των νεφών. Στην εικόνα 1.4 φαίνεται σχηματικά, η απευθείας, η διάχυτη και η ανακλώμενη ακτινοβολία ως άθροισμα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε μια συλλεκτική επιφάνεια.

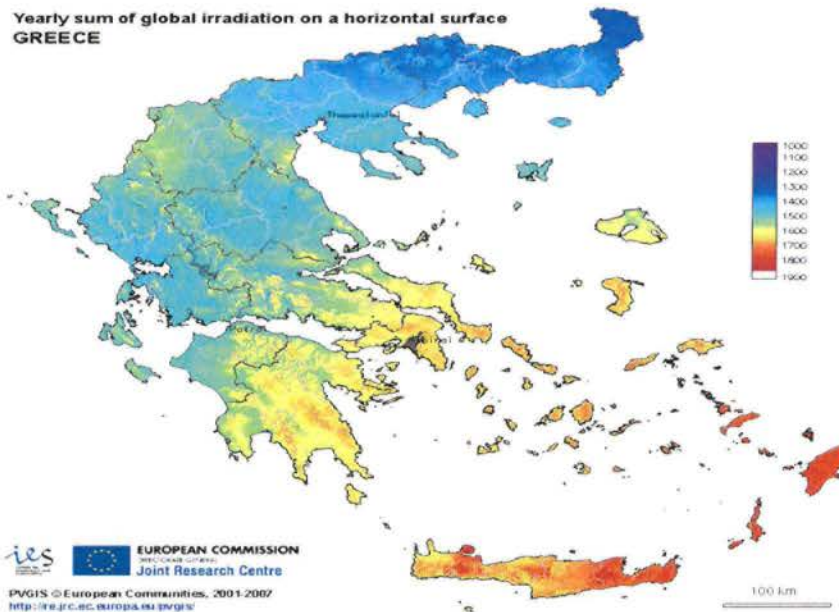


Εικόνα 1.4

Τέλος, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μια συλλεκτική επιφάνεια ή ένα κεκλιμένο επίπεδο, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και τη διάχυτα ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία. Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία.

1.3.3 Το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα

Η Ελλάδα λόγω της γεωγραφικής της θέσης, παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1.400 με 1.800 kWh/m² ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο. Αυτό εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζεται το ετήσιο ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας.



Εικόνα 1.5

Χαρακτηριστικό στοιχείο μιας περιοχής-εκτός της μέσης ημερήσιας ηλιακής ενέργειας σε μηνιαία ή ετήσια βάση-είναι η ηλιοφάνεια της. Ασφαλώς αυτή εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής καθώς και από την διαμόρφωση του τόπου. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να ευνοούν την ανάπτυξη νεφώσεων, που έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της ηλιοφάνειας. Η ηλιοφάνεια εκφράζεται σε πλήθος ωρών ανά μήνα και ανά έτος, κατά τις οποίες ο ήλιος είναι ορατός στον ουρανό. Στην Ελλάδα οι περιοχές με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια όπως βλέπουμε και στην εικόνα 1.5, είναι το νησί της Κρήτης και κυρίως το μέρος της Ιεράπετρας (περίπου 3.100 ώρες κάθε χρόνο), καθώς και το νησί της Ρόδου.

Στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις καταγράφεται και ολική ηλιακή ακτινοβολία (σε kWh/m²) για διάφορες περιοχές της χώρας.

Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών επιλέγονται ώστε οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες και να μην επηρεάζονται από φυσικά εμπόδια ή τοπικά φαινόμενα που να αλλοιώνουν το αποτέλεσμα.

Τέλος, για κάποιες περιοχές που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από την πλησιέστερη περιοχή στην οποία παρατηρείται παρόμοια μορφολογία εδάφους (λόφοι, βουνά κλπ) και παρόμοιος προσανατολισμός.

1.4 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παραπάνω κεφάλαιο είδαμε τον ορισμό και την έννοια της ηλιακής ενέργειας, η οποία αποτελεί μία ανανεώσιμη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευσή της διαχωρίζεται σε τρεις κατηγορίες με βάση την τελική αξιοποίησή της και το παραγόμενο αποτέλεσμα. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα δύο πρώτα συνήθως χρησιμοποιούνται στην παραγωγή θέρμανσης, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είδαμε ότι αποτελούν στην ουσία δομικά μέρη του κάθε κτιρίου με βάση το σχεδιασμό του και λειτουργούν κυρίως με την λογική του φαινομένου του θερμοκηπίου, ενώ τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν μηχανολογικά συστήματα που με την αξιοποίηση υγρών και αέρα παράγουν θέρμανση. Αντίστοιχα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα συμβάλλουν κυρίως στην ηλεκτροδότηση περιοχών με προβλήματα στην παροχή ηλεκτρισμού μιας και αποτελούν μέσα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Γενικότερα, η ηλιακή ακτινοβολία συνδέεται και υποστηρίζει άλλες πολύ βασικές πηγές δημιουργίας ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αλλά και τα απλά φυτά τα οποία λειτουργούν ως βιομάζα που με την πάροδο των χρόνων συντελεί στη δημιουργία πετρελαίου. Στη συνέχεια, είδαμε τον τρόπο με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια φτάνει τελικά στο έδαφος, είτε απευθείας είτε με διάχυση και τους παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα και πως η συνολική ακτινοβολία που προσλαμβάνει ένας συλλέκτης ονομάζεται ολική ακτινοβολία.

Τέλος, γνωρίσαμε το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας, το οποίο ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή της, αλλά είναι γενικά υψηλό λόγω της καλής γεωγραφικής της θέσης.

Κεφάλαιο 2: Η τεχνολογία των Φωτοβολταϊκών

2.1 Εισαγωγή

Πλεον, το μεγαλύτερο μέρος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται κατά κύριο λόγο στους μεγάλους θερμοηλεκτρικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Όμως οι παραπάνω μορφές παραγωγής ενέργειας καταναλώνουν πόρους όπως, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο, ραδιενεργά υλικά, ή χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις. Για αυτό το λόγο οι συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές είναι σχετικά περιορισμένες, μιας και τα αέρια, στερεά και υγρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται, εξαντλούνται βαθμιαία. Στην περίπτωση της υδροηλεκτρικής ενέργειας έχουμε γεωγραφικούς περιορισμούς ενώ παράλληλα είναι ποσοτικά καθορισμένη.

Επιπλέον, είναι γνωστό τι επιπτώσεις για το περιβάλλον επιφέρουν οι παραπάνω μορφές παραγωγής ενέργειας. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη και χρήση τεχνολογιών που θα εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Σε αυτό συμβάλει και η ξέφρενη πορεία του πετρελαίου που χαρακτηρίζεται από αστάθεια και υψηλές τιμές.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει κυρίως πλεονεκτήματα. Τα κυριότερα είναι:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη πηγή ενέργειας.
- Πολυ μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (τουλάχιστον 25 χρόνια)
- Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη και είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης. Ακόμα και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.
- Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση, ούτε θόρυβο και δε δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.
- Δίνει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, διευκολύνοντας έτσι τις απομακρυσμένες από το δίκτυο εγκαταστάσεις με λογικό κόστος.
- Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όση μικρή ισχύ ζητηθεί
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγώγιμων υλικών και η συνεχής μείωση του κόστους παραγωγής τους, οδηγούν σε σταδιακή μείωση και του κόστους των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Τα Φ/Β συστήματα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη λεγόμενη «δισπαρμένη Παραγωγή Ενέργειας» (Distributed Power Generation), η οποία αποτελεί το νέο μοντέλο ανάπτυξης σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαφοροποίηση στην παραγωγή ενέργειας, που προσφέρεται από τα Φ/Β συστήματα, σε συνδυασμό με την κατά μεγάλο ποσοστό απεξάρτηση από το πετρέλαιο και την αποφυγή περαιτέρω ρύπανσης του περιβάλλοντος, μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες

οικονομικής ανάπτυξης σε ένα νέο ενεργειακό τοπίο που αυτή τη στιγμή διαμορφώνεται στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Ασφαλώς δεν θα μπορούσαν να λείπουν τα μειονεκτήματα. Παραδείγματος χάριν το υψηλό κόστος για τις περισσότερες εφαρμογές (για τους οικιακούς καταναλωτές φτάνει τα 6000 Ευρώ/ kWp για ένα Φ/Β σύστημα). Επίσης η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αδυνατεί να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια λόγω της διαφοράς ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Πρακτικά είναι μια τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της οποίας η έξοδος είναι απρόβλεπτη διότι εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Ασφαλώς η χρήση συσσωρευτών μπορεί να εξασφαλίσει την αυτονομία.

Παρόλα αυτά παρατηρείται αλματώδης πρόοδος και εξέλιξη στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης και την μείωση του κόστους παραγωγής των φωτοβολταϊκών στοιχείων, τα οποία σημαντική ανάπτυξη στα επόμενα χρόνια. Εκτιμάται ότι το μέσο κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος θα μειωθεί από 6000 Ευρώ/kWp που είναι σήμερα, σε 2250 Ευρώ/kWp το 2020, δηλαδή παραπάνω από το 50%.

Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ονομάζουμε το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ήλιου. Επίσης είναι γνωστή και ως ροή ακτινοβολίας. Η ροή ακτινοβολίας ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα εμβαδού μιας επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας και εκφράζεται συνήθως σε kW/m². Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η ηλιακή ακτινοβολία δεν μετατρέπεται εξολοκλήρου σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος της ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον, ενώ από τη ακτινοβολία που διεισδύει ένα μέρος πάλι συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αυτό γίνεται λόγω των αντιστάσεων που παρουσιάζει το φωτοβολταϊκό στοιχείο αλλά στην «επιλεκτικότητα» του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγίμου υλικού. Αυτό θα περιγραφεί αναλυτικότερα σε επόμενη παράγραφο.

2.2 Το Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει μέχρι 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40mA ανά cm² της επιφάνειάς του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται από την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Το βασικότερο υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων είναι το πυρίτιο το οποίο αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά wafer, είτε λεπτά films πυριτίου (άμορφο).

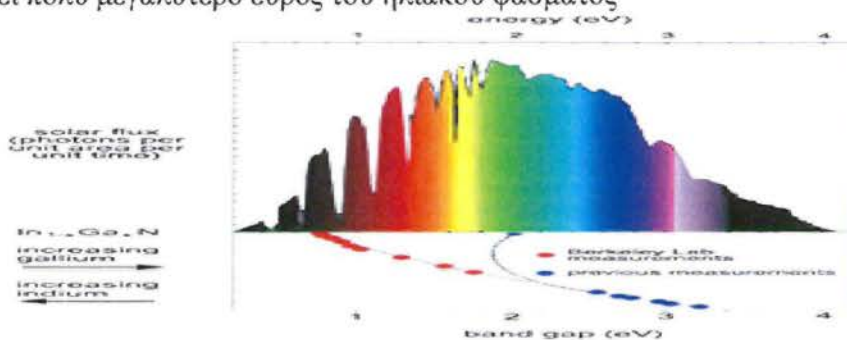
Ως συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα. Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την απόδοσή τους. Έτσι λοιπόν, οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV και δεν ξεπερνούν το 29%.

Καθημερινά όμως οι ερευνητικές προσπάθειες πανεπιστημιακών εργαστηρίων οδηγούν στην αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Συγκεκριμένα στο Πανεπιστήμιο New South Wales' ARC Photovoltaic Centre of Excellence της Αυστραλίας επιτεύχθηκε ένα νέο παγκόσμιο ρεκόρ με φωτοβολταϊκά στοιχεία που αγγίζουν το θεωρητικό 29%. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αναφερόμαστε σε στοιχεία πυριτίου πρώτης γενιάς.

Αυτή η διάκριση γίνεται γιατί έρευνες στην Αριζόνα των ΗΠΑ απέδειξαν ότι αν κατασκευαστεί Φ/Β στοιχείο από στρώσεις διάφορων ημιαγωγικών υλικών (και όχι αποκλειστικά από ένα υλικό) τότε μπορεί να απορροφηθεί σχεδόν όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε πολύ μεγάλες θεωρητικές αποδόσεις. Το 2002 ερευνητές στο Materials Sciences Division (MSD) of Lawrence Berkeley National Laboratory, σε συνεργασία με το Cornell University και το Japan's Ritsumeikan University, ανακάλυψαν ότι το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού indium nitride δεν είναι 2 eV όπως είχε καταγραφεί, αλλά 0.7 eV. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα για μετατροπή όλου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, από το υπέρυθρο μέχρι και το υπεριώδες. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 2.1. Τα παραπάνω ισχυρίζονται ότι η θεωρητική απόδοση αυτών των στοιχείων μπορεί να ξεπεράσει το 48%, ανοίγοντας νέους δρόμους για την δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι βρισκόμαστε ακόμα σε μια εποχή που η πρόοδος και εξέλιξη είναι καθημερινή, κάτι που θα οδηγήσει μέσα στα επόμενα 20 χρόνια σε νέες τεχνολογίες με δραματική μείωση του κόστους παραγωγής και ταυτοχρόνως με μεγαλύτερες αποδόσεις.

Με την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων από στρώσεις υλικών μπορεί να αξιοποιηθεί πολύ μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος



Εικόνα 2.1

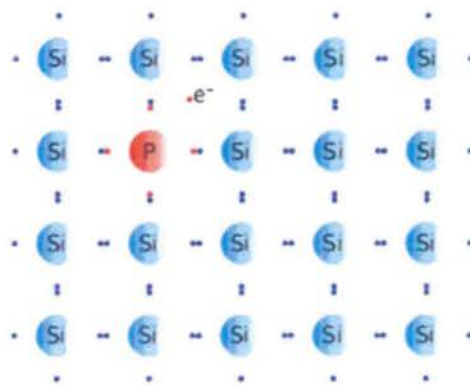
2.3 Ημιαγωγοί

Όπως αναφέραμε προηγουμένως τα φωτοβολταικά στοιχεία κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Αναλυτικότερα, τα στοιχεία αυτά δεν έχουν ελεύθερους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ στην περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά, δεν διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όταν όμως γίνει απορρόφηση κάποιας ενέργειας με την μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιούνται ριζικές μεταβολές.

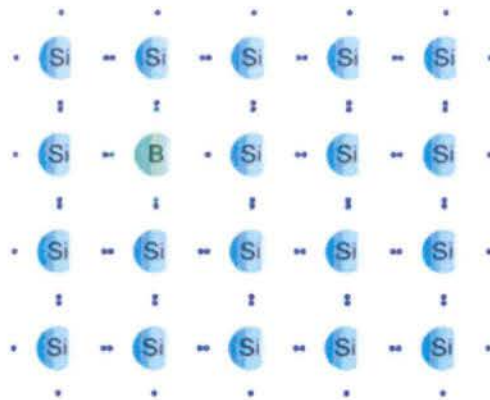
Λόγω της ενέργειας που παρέχεται και κατανέμεται στα άτομα του ημιαγωγού, έχουμε απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια σθένους χάρη στην κινητική ενέργεια που απόκτησαν απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού. Αυτό δίνει στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το ενεργειακό διάκενο που υπάρχει ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια $h\nu$ μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο ($E_g < h\nu$), δε μπορούν να την απορροφήσουν παραμένοντας έτσι στην ζώνη σθένους. Στην περίπτωση όμως που τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g \geq h\nu$), τότε το κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή.

Αν τώρα ο τετρασθενής ημιαγωγός Si, νοθευτεί με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε έχουμε ημιαγωγό προσμίξεως τύπου-n και τύπου-p αντίστοιχα.



Εικόνα 2.2



Εικόνα 2.3

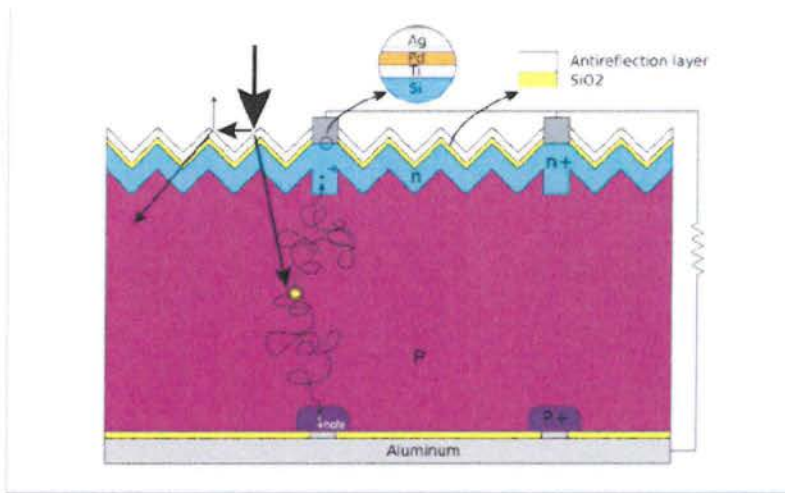
Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς (εικόνα 2.2). Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπαστεί και να κινείται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P⁺) που μένει ακίνητο στο πλέγμα.

Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπου-n ημιαγωγός). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς (εικόνα 2.3). Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σεκατιόν (B⁻).

Δηλαδή το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) ήδότης οπών (τύπου-p ημιαγωγός). Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Επίσης όταν έλθουν σε στενή επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν.

Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οισυγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών. Η συγκέντρωση των κατιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητα αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Ως

αποτέλεσμα έχουμε το ότι η διόδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του. Στην εικόνα 2.4 φαίνεται η βασική δομή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου από πυρίτιο και ο μηχανισμός λειτουργίας του.



Εικόνα 2.4

2.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι διόδους ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο, αρκεί η ενέργεια να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Έτσι για όσο διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργούνται περίσσεια ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί λοιπόν, εφόσον είναι ελεύθεροι να κυκλοφορούν μέσα στο στερεό και δεν επανασυνδέονται με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Η εκδήλωση της τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αποτελεί μια πηγή ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Όταν ένα Φ/Β στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{PH} , του οποίου η τιμή θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος δίνεται από τη σχέση 2.1.

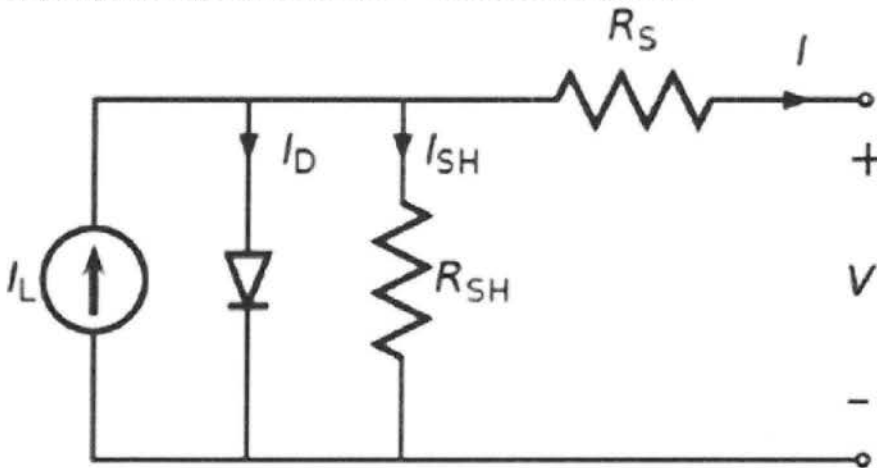
$$I_{PH} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\lambda) d\lambda$$

Σχέση 2.1

όπου e , είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και λ_g , το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό. $S(\lambda)$ είναι η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή $\Phi(\lambda)$, δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$. $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

2.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το ισοδύναμο κύκλωμα για ένα μη ιδανικό στοιχείο είναι αυτό της εικόνας 2.5. Περιλαμβάνει τις αντιστάσεις R_S (series resistance) που παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{SH} η οποία ισούται με το ανάστροφο της αγωγιμότητας G_S (Shunt resistance - Shunt conductance).



Εικόνα 2.5

Για την μαθηματική περιγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου θα μπορούσαμε να πούμε ότι στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση θα προκαλεί αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρρευμα. Δηλαδή θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$I_{PH} = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\gamma k T}} - 1 \right)$$

Σχέση 2.2

όπου I_0 , είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και γ ένας συντελεστής που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2. Από την σχέση 2.2 η τάση ανοιχτού κυκλώματος θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 \right), \quad I_0 < I_{PH}, \quad \Rightarrow V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_0} \right)$$

Σχέση 2.3

Η παραπάνω σχέση δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της V_{oc} σε συνάρτηση με το I_{PH} , δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το Φ/Β στοιχείο και την εξάρτηση της από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα, $I_{sc} = I_{PH}$. Όταν το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_{PH} - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{e I_L R_L}{\gamma k T} \right) - 1 \right)$$

Σχέση 2.4

Όπως προκύπτει από την σχέση 2.5 θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης, δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος, για την οποία η ισχύς που παράγει το Φ/Β στοιχείο θα γίνεται μέγιστη ($P_{mp} = V_{mp} I_{mp}$). Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_{mp} , που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{e V_{mp}}{\gamma k T} \right) \exp \left(\frac{e V_{mp}}{\gamma k T} \right)$$

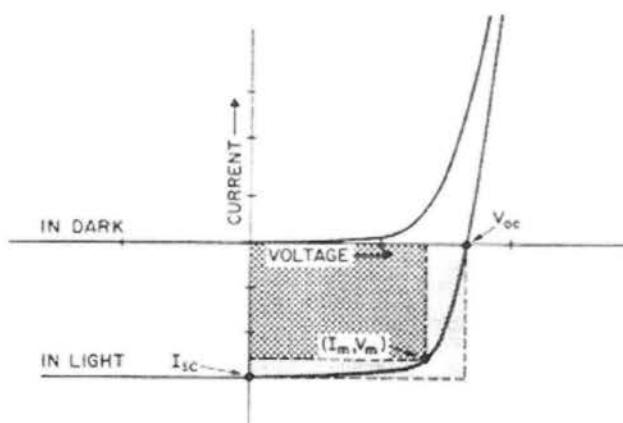
Σχέση 2.5

Η παρακάτω σχέση(2.6) αντιπροσωπεύει το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου υπό συνθήκες ακτινοβολίας, προς το εμβαδό που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} (εικόνα 2.6).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

Σχέση 2.6

2.6 Καμπύλη V – I



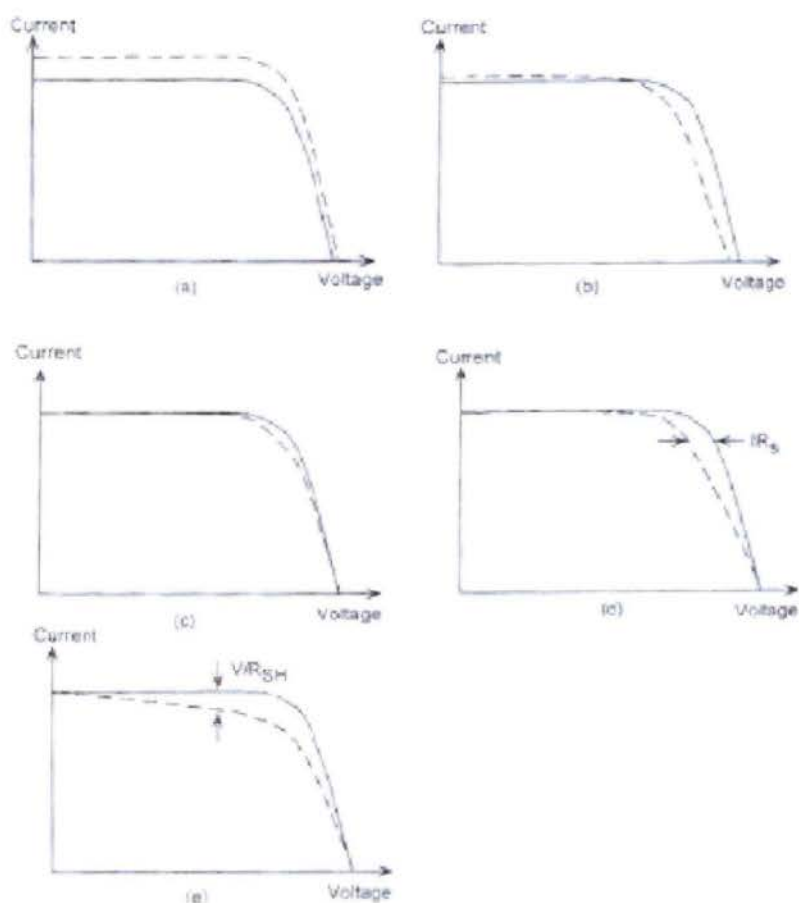
Εικόνα 2.6

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τον συντελεστή πλήρωσης ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της σκούρας περιοχής δια το εμβαδό της μεγαλύτερης.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σαν πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μια ασυνήθιστη συμπεριφορά. Οι περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές διατηρούν μια περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας. Αντίθετα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η τάση μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα. Αυτό συμβαίνει ακόμα και αν η ηλιακή ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Ένας ακόμη αρνητικός παράγοντας που επιδρά στα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η θερμοκρασία. Με την αύξηση της προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση περισσότερων επανασυνδέσεων των φορέων. Ως αποτέλεσμα έχουμε την εκδήλωση ενός ισχυρότερου ρεύματος διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} αρα και μείωση της απόδοσης του στοιχείου. Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για

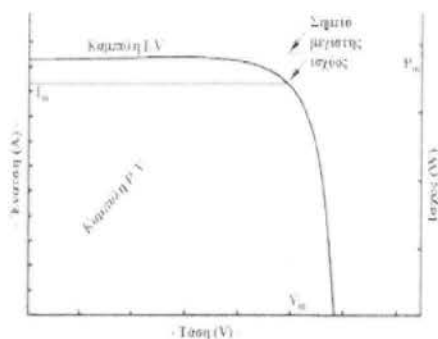
μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (κατάσταση βραχυκυκλώματος με μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (κατάσταση ανοιχτοκυκλώματος με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}). Αυτό μπορούμε να το δούμε στην εικόνα 2.7.

Συγκεκριμένα βλέπουμε (a) την αλλαγή της χαρακτηριστικής $I - V$ σε σχέση με την αυξημένη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, (b) την αυξημένη θερμοκρασία στοιχείου, (c) τον αυξημένο συντελεστή ποιότητας, (d) την αυξημένη αντίσταση σειράς R_S , (e) την μειωμένη παράλληλη αντίσταση R_{sh} .



Εικόνα 2.7

Στην εικόνα 2.8 φαίνονται οι μεταβολές των χαρακτηριστικών I-V για μεταβαλλόμενες συνθήκες, δηλαδή σε περίπτωση αυξημένης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, αυξημένης θερμοκρασίας του στοιχείου, αυξημένου συντελεστή ποιότητας, αυξημένης αντίστασης σειράς R_s , και μειωμένης παράλληλης αντίστασης R_{sh} .



Εικόνα 2.8

2.7 Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών

Λόγω της χαμηλής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, είναι πολύ σημαντικό να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που θα τοποθετηθεί. Για αυτό το λόγο ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα ώστε να εξασφαλιστεί η κατά το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ήλιου και η μέγιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού. Τα βήματα αυτά είναι:

- Μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με την θέση του ήλιου. Ο ήλιος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τη γη, οπότε ανάλογα με το σημείο που θα τοποθετήσουμε το Φ/Β πλαίσιο, το προσανατολίζουμε έτσι ώστε να εκμεταλευτούμε όσο τον δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Η αζιμούθια γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ηλιακού συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Για βέλτιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να είναι κάθετη στο συλλέκτη οπότε και η αζιμούθια γωνία μηδέν.

Για το βόρειο ημισφαίριο όπου και βρίσκεται η Ελλάδα, η αζιμούθια γωνία είναι μηδέν, οπότε και ο προσανατολισμός του συλλέκτη πρέπει να είναι προς το νότο. Επίσης η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα, είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που βρίσκεται αυτός. Για την Αθήνα π.χ. είναι ίση με 38 μοίρες. Για βέλτιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων προτιμάται η κλίση των συλλεκτών να μην μένει σταθερή όλο το χρόνο, αλλά να αλλάζει δύο φορές το χρόνο. Για την Αθήνα για παράδειγμα, μια καλή

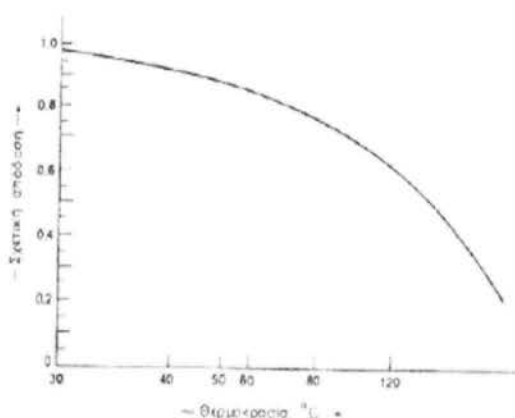
λύση είναι να τοποθετούνται οι συλλέκτες υπό κλίση 60 μοιρών τους χειμερινούς μήνες και 30 μοιρών τους θερινούς.

– Θερμοκρασία. Όπως είπαμε η θερμοκρασία δρά αρνητικά πάνω στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με την αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF.

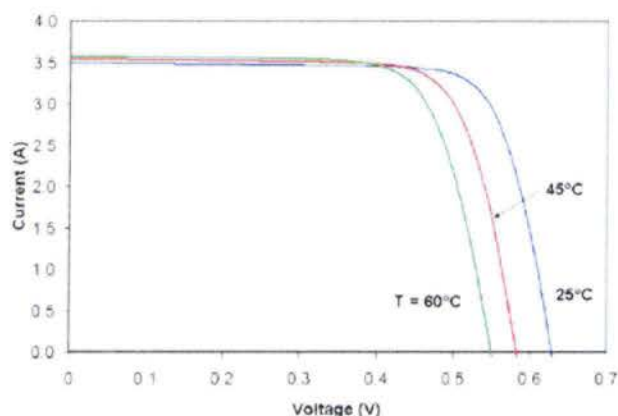
Αν υποθέσουμε ότι ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία είναι η , η τιμή του σε διαφορετική θερμοκρασία θ θα είναι:

$$\eta_{\theta} = \eta \sigma_{\theta}$$

όπου σ_{θ} , είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο σ_{θ} είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου. Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται η σχέση απόδοσης-θερμοκρασίας ενώ στην εικόνα 2.10 βλέπουμε καθαρά τη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών καμπύλων $I-V$ του φωτοβολταϊκού συστήματος όταν έχουμε αλλαγή της θερμοκρασίας



Εικόνα 2.9



Εικόνα 2.10

Για την δοκιμή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ακολουθούνται οι Πρότυπες Συνθήκες δοκιμής (Standard Test Conditions-STC) και επιτυγχάνονται σε θερμοκρασία 25oC, με ακτινοβολούμενο ηλιακό επίπεδο 1000 W/m² και μάζα αέρα AM 1,5 φασματικής διανομής. Παρ'όλαυτά η πραγματική απόδοση εκτιμάται ότι είναι συνήθως 85 έως 90 τοις εκατό της πρότυπης δοκιμαστικής κατάστασης (STC), μιας και αυτές οι συνθήκες δεν είναι πάντα χαρακτηριστικές για το πώς τα πλαίσια λειτουργούν στο πεδίο εγκατάστασης. Οι Πρότυπες Συνθήκες δοκιμής (STC) συνδυάζουν την ακτινοβολία μιας θερινής ημέρας, την θερμοκρασία στοιχείου μιας χειμερινής ημέρας και το ηλιακό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μιας ανοιξιιάτικης μέρας. Προφανώς αυτές οι καταστάσεις μέτρησης δεν αντιπροσωπεύουν την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πραγματικές στην περιοχή της εγκατάστασης.

2.8 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων δεν είναι σταθερή όπως οι άλλες πηγές ενέργειας και πάντα εξαρτάται από το φορτίο που τροφοδοτεί, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του.

Όταν αυτή η αντίσταση είναι μηδενική, έχουμε μέγιστη τάση εξόδου, δηλαδή την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} . Αντίθετα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-έντασης δεν είναι πάντα σταθερή και μηδενίζεται στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης. Προτιμάται λοιπόν σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ισχύ.

Όμως όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Στην περίπτωση όμως που μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει η δυνατότητα

να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος, ή αλλιώς maximum power point trackers (MPPT).

Την συγκεκριμένη τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, αρχίσαμε να την χρησιμοποιούμε σχετικά πρόσφατα στα φωτοβολταϊκά συστήματα και πλέον αποτελεί χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος οι ελεγχτές MPPT παρακολουθούν συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Εάν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό το σημείο είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Απο την εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων γνωρίζουμε ότι η ένταση που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μεταβάλλεται αντίστροφα από την τάση. Άρα για ένα συγκεκριμένο ζεύγος τάσης –έντασης, το φωτοβολταϊκό στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Όμως επειδή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, σταθερή δεν είναι ούτε η εξοδος του. Οπότε, για οποιαδήποτε στιγμή το Φ/Β στοιχείο δεν πρέπει να παράγει τάση και ένταση σύμφωνα με τις ανάγκες της αντίστασης του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Η παραγόμενη ισχύς από ένα Φ/Β στοιχείο είναι $P=VI$. Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης $V-I$ λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά dV και η ένταση κατά dI . Τότε η ισχύς δίνεται από την σχέση 2.7:

$$P = VI = (V + dV)(I + dI)$$

Σχέση 2.7

Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε:

$$dP = dV \cdot I + dI \cdot V$$

Σχέση 2.8

Όπως είναι φανερό από την καμπύλη ισχύος του φωτοβολταϊκού, ο όρος dP (η κλίση δηλαδή της καμπύλης ισχύος) είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο αυτό (MPP) λοιπόν η σχέση 2.8 γίνεται:

$$0 = dV \cdot I + dI \cdot V$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$$

Σχέση 2.9

Στην σχέση αυτή, ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής Z_d ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση Z_s . Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

– Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής Z_d και η στατική αντίσταση Z_s . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή $Z_d = - Z_s$

– Μια δεύτερη μέθοδος ελέγχου είναι να αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη: $dP / dV > 0$ δηλαδή η ισχύς αυξάνεται με αύξηση της τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται. Η τάση σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται σχεδόν αυτός ο ρυθμός μεταβολής.

– Μια τρίτη μέθοδος κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή,

$$V_{mp} / V_{oc} = K$$

(περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Ένα Φ/Β στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο, $K \cdot V_{oc}$ που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος.

2.9 Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

Σύμφωνα με τον Νόμο 3468/2006 για την προώθηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς, καταρτίστηκε Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών βάσει την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και εγκρίθηκε από τον υπουργό ανάπτυξης. Το πρόγραμμα αυτό άρχισε αμέσως μετά την έναρξη ισχύος του νέου νόμου και λήγει την 31. 12. 2020 και αφορά την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών που εγκαθίστανται στην Ελλάδα.

Μετά από διάφορες αλλαγές που έγιναν στον αρχικό σχεδιασμό, το πρόγραμμα αφορά την ανάπτυξη σταθμών συνολικής ισχύος τουλάχιστον 640 MW_p, για σταθμούς που συνδέονται με το Σύστημα, απευθείας ή μέσω δικτύου, και συνολικής ισχύος τουλάχιστον 200 MW_p, για σταθμούς που συνδέονται στο δίκτυο των Μη διασυνδεδεμένων Νησιών. Το «Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών» θέτει ως όριο για την αδειοδότηση της παραπάνω αναφερόμενης ισχύος, το έτος 2010.

Η ΡΑΕ ανακοίνωσε στις 7 Απριλίου 2008 την αναστολή της υποβολής αιτήσεων για την χορήγηση άδειας παραγωγής και την εξαίρεση από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς σε όλες τις περιοχές της ηπειρωτικής χώρας, εκτός των νησιών. Η αιτία αναστολής οφείλεται στο γεγονός ότι το επενδυτικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών ήταν εξαιρετικά μεγάλο, όπως προκύπτει από τα στοιχεία της ΡΑΕ. Η συνολική ισχύς των αιτήσεων που έχουν υποβληθεί έως σήμερα, για την χορήγηση εξαίρεσης από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής υπερβαίνει κατά πολύ την ισχύ που αναφέρεται στο «Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών» ως όριο. Έως τον Απρίλιο του 2008 οπότε ανακοινώθηκε η αναστολή της υποβολής αιτήσεων στη ΡΑΕ, είχαν ήδη υποβληθεί, και αφορούν συστήματα ανά των 20 kWp, 7947 αιτήσεις συνολικής ισχύος 3.756 MWp περίπου. Τελευταία διεξάγεται δημοσίως διάλογος σχετικά με τα κίνητρα και συνεπώς με το κόστος για την υλοποίηση του προγράμματος φωτοβολταϊκών αλλά και την συνέχεια υποστήριξής τους.

Ενδιαφέρον είναι το ότι τα προγράμματα που σχεδιάστηκαν στις χώρες ηγέτες στις εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, για τον υπολογισμό των οικονομικών κινήτρων των προγραμμάτων προώθησης, θεωρούσαν σαν χρόνο αποπληρωμής του φωτοβολταϊκού συστήματος τα 10 περίπου χρόνια.

Το πλαίσιο στήριξης λοιπόν, των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι πολύ ελκυστικό και κάτω από τις καλύτερες προϋποθέσεις μια επένδυση αποπληρώνεται σε 6 το περίπου χρόνια. Δυστηχώς σε αντίθεση με τις ωριμότερες στα φωτοβολταϊκά αγορές (Γαλλία, Γερμανία, Ισπανία), οι τιμές για την προμήθεια και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα στην χώρα μας. Μείωση αυτού του κόστους μπορεί να γίνει με την ανάπτυξη της αγοράς που θα έχει ως αποτέλεσμα οι επιχειρήσεις να οργανώσουν τις δραστηριότητές τους και το προσωπικό να εκπαιδευτεί πάνω σε αυτήν την τεχνολογία. Τελικά θα παρέλθει μείωση του μεγαλύτερου κόστους σχεδίασης, προμήθειας, εγκατάστασης και συντήρησης

Επομένως αυτό που χρειάζεται στην Ελληνική αγορά είναι αφού ξεκινήσουν οι εγκαταστάσεις και η λειτουργία της αγοράς, να ακολουθήσει μια προοδευτική μείωση των ενισχύσεων είτε με μείωση της τιμής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (feed-in-tariff) είτε της επιδότησης του αρχικού κόστους επένδυσης. Η υλοποίηση του συνδυασμού μέτρων και τα κίνητρα θα είναι αντικείμενο μιας μελέτης που πρέπει να γίνει.

Σε μια πρώτη προσέγγιση, έχοντας υπόψη την Ευρωπαϊκή εμπειρία και την διαμορφωμένη κατάσταση στην Ελλάδα, προτείνεται να προχωρήσουν οι διαδικασίες για τα φωτοβολταϊκά έργα που έχουν πάρει άδεια παραγωγής και για τα υπόλοιπα έργα να μελετηθεί και να ανακοινωθεί ένα νέο πλαίσιο ενισχύσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις.

Μελλοντικά, η μεγάλη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων πρέπει να έρθει στον κτηριακό τομέα που αποτελεί τον "φυσικό χώρο" των φωτοβολταϊκών. Η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για ενσωμάτωση σε κτήρια, αποτελώντας έτσι την κυριότερη συνιστώσα ενός ενεργειακού μοντέλου αποκεντρωμένης παραγωγής. Σε χώρες με αναπτυγμένη τη σχετική αγορά, όπως η Γερμανία, τα μικρά συστήματα σε κτήρια (ισχύος < 10 kWp) αποτελούν το 40% της αγοράς, ενώ συνολικά ο κτηριακός τομέας έχει ένα μερίδιο της τάξης του 90%. Μετά το πρώτο φωτοβολταϊκό πρόγραμμα που ήταν ελκυστικό για επιχειρήσεις και για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

συστημάτων σε απομακρυσμένες περιοχές και συνεπώς μακριά από την κατανάλωση, το επόμενο πρόγραμμα θα πρέπει να αφορά την εγκατάσταση και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτήρια. Το πρόγραμμα θα πρέπει να είναι κατάλληλο για ιδιώτες και για επιχειρήσεις, δηλαδή απλοποιημένο και σε χαμηλές τιμές.

Παράλληλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα συνεισφέρουν στην επίτευξη των στόχων του 2020 σχετικά με την ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ και συγχρόνως θα γίνει ουσιαστική εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της διεσπαρμένης παραγωγής.

2.10 Σύνοψη κεφαλαίου:

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια που παίρνουμε από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι μια ενέργεια που λίγο λίγο κερζίζει υποστηρικτές σε όλον τον κόσμο. Ασφαλώς αυτό συμβαίνει διότι σαν ενέργεια έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως το ότι ουσιαστικά είναι φιλική προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, χωρίς να προκαλεί ρύπους.

Επίσης είδαμε ότι με την χρήση ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος ή MPPT λαμβάνουμε την μέγιστη δυνατή ισχύ που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Ανάλυση των ελεγχτών αυτών θα γίνει σε επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 3: Συσσωρευτές και Κυκλώματα Φόρτισης

3.1 Δομή του βασικού στοιχείου και ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που έχει κάποια ενεργά υλικά τα οποία εμπεριέχουν χημική ενέργεια. Μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδωσης – μείωσης (redox) μετατρέπει αυτήν την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Σε περίπτωση που έχουμε ένα επαναφορτιζόμενο σύστημα, η μπαταρία επαναφορτίζεται με την αντιστροφή διαδικασία. Ο τύπος αυτής της αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε άλλο δια μέσου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Αντίθετα σε μια μη ηλεκτροχημική redox αντίδραση (π.χ. σκουριά), τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται απ' ευθείας και το μόνο πράγμα που εμπλέκεται σε αυτή την αντίδραση είναι η θερμότητα. Έπειδη όπως είπαμε η μπαταρία μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης, δεν υπόκειται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot που υπαγορεύει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μπαταρίες παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση στη μετατροπή ενέργειας.

Ενώ συχνά χρησιμοποιούμε τον όρο «μπαταρία», η βασική ηλεκτροχημική μονάδα στην οποία αναφερόμαστε είναι το «στοιχείο». Μια μπαταρία διαθέτει από ένα ή περισσότερα τέτοια στοιχεία. Αυτά συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα ή συνδυασμό των δύο ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα εξόδου. Το στοιχείο αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά:

- Το ηλεκτρόδιο ανόδου ή αρνητικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο μείωσης ή καυσίμου), το οποίο παραχωρεί ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
- Το ηλεκτρόδιο καθόδου ή θετικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο οξειδωσης), το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και μειώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
- Τον ηλεκτρολύτη (ιοντικό αγωγό), ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι τυπικά ένα υγρό, όπως το νερό ή άλλοι διαλύτες, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια να μεταδίδουν την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικές μπαταρίες χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

Οι χημικές και ηλεκτροχημικές αντιδράσεις των ηλεκτροδίων συμβαίνουν και στα δύο ηλεκτρόδια και απελευθερώνουν ή απορροφούν ηλεκτρόνια σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:



Σχέσεις 3.1

Τα N και P δηλώνουν το αρνητικό (negative) και το θετικό (positive) ηλεκτρόδιο αντίστοιχα και τα Sred και Sox δηλώνουν τις καταστάσεις μείωσης (reduction state) και οξείδωσης (oxidation state) αντίστοιχα των χημικών ενώσεων που αντιδρούν και n είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εμπλέκονται στη διαδικασία. Βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση οποιουδήποτε ηλεκτροχημικού στοιχείου είναι η δυνατότητα του διαχωρισμού της αντίδρασης του στοιχείου σε δύο ξεχωριστές αντιδράσεις ηλεκτροδίων. Τότε και μόνο τότε μπορεί η ανταλλαγή των ηλεκτρονίων που συνδέεται με τις αντιδράσεις των ηλεκτροδίων να συλληχθεί σαν ένα ρεύμα που ρέει μέσα από τον καταναλωτή και η ενέργεια εισόδου ή εξόδου που συνδέεται με τη χημική αντίδραση να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Διαφορετικά, η αντίδραση θα εμφανιζόταν απλώς ως μια χημική αντίδραση. Θα είχαμε ανταλλαγή του ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ των αντιδρώσων ουσιών και η ενέργεια που θα απελευθερωνόταν θα μετατρεπόταν κυρίως σε θερμότητα και σε κάποιο βαθμό σε ενεργειακή ένταση.

Το σύστημα της ηλεκτροχημικής αποθήκευσης βασίζεται στη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Σε ένα στοιχείο μπορεί να αποθηκευτεί τέτοιο ποσό ενέργειας όσο επιτρέπει το διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο των χημικών ουσιών που αναπαριστά την κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης. Επομένως το σύνολο των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και των ενεργειακών μεταβολών καθορίζουν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του κάθε συστήματος. Συνολικά, αυτές οι αντιδράσεις αποτελούν τις αντιδράσεις στοιχείου που χαρακτηρίζουν το σύστημα της μπαταρίας.

Ο συνδυασμός των υλίων ανόδου και καθόδου που έχουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα θα μας δώσει το ελαφρύτερο, με υψηλή τάση και χωρητικότητα στοιχείου αποτέλεσμα. Όμως εξαιτίας καποιών παραγόντων, όπως η αντιδραστικότητα με άλλα συστατικά του στοιχείου, η πόλωση, η δυσκολία στο χειρισμό και το υψηλό κόστος, δεν είναι πάντα πρακτικό να κάνουμε τέτοιους συνδυασμούς.

Στην πράξη επιλέγουμε την άνοδο συμφώνα με το να έχει αποδοτικότητα σαν παράγοντας μείωσης, καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και ασφαλώς χαμηλό κόστος. Ένα υλικό ανόδου που έχει όλα τα παραπάνω είναι το υδρογόνο το οποίο όμως πρέπει με κάποιο τρόπο να περιοριστεί μειώνοντας όμως ηλεκτροχημική ισοδυναμία του. Έτσι συνήθως σαν υλικά ανόδου χρησιμοποιούμε μέταλλα οόπως ο ψευδάργυρος. Ο τελευταίος προτιμάται σαν άνοδος λόγω των ευνοϊκών του ιδιοτήτων. Το λίθιο πάλι είναι ένα ελαφρύ μέταλλο με υψηλή ηλεκτροχημική ισοδυναμία και προτιμάται αρκετά σαν άνοδος αφού για να ελέγχουν τη δραστηριότητά του, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι και συμβατοί ηλεκτρολύτες και σχεδιασμοί στοιχείων.

Στην κάθοδο τώρα πρέπει να έχουμε έναν αποδοτικό παράγοντα οξείδωσης, να είναι σταθερή η επαφή της με τον ηλεκτρολύτη και να έχει μια χρήσιμη τάση λειτουργίας. Το οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν από τον ατμοσφαιρικό αέρα, τραβώντας το μέσα στο στοιχείο όπως στη μπαταρία ψευδάργυρου/αέρα (zinc/air battery). Συνήθως όμως ως υλικά καθόδου προτιμούνται τα μεταλλικά οξειδία. Σε κάποια ειδικά συστήματα μπαταριών χρησιμοποιούμε άλλα υλικά όπως τα αλογόνα και τα οξυαλογονίδια, το θείο και τα οξειδιά του.

Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα αλλά να μην είναι ηλεκτρονικά αγωγίμος, γιατί αυτό θα προκαλούσε εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι να μην αντιδράει με τα υλικά των ηλεκτροδίων, να μην παρουσιάζει μεγάλη αλλαγή των ιδιοτήτων με αλλαγή της θερμοκρασίας, να είναι

ασφάλειες στο χειρισμό και να έχει χαμηλό κόστος. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδάτινα διαλύματα, αλλά υπάρχουν και εξαιρέσεις. Μια από αυτές τις εξαιρέσεις είναι οι μπαταρίες θερμικής ανόδου, όπου λιωμένο αλάτι και άλλοι μη υδάτινοι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η αντίδραση της ανόδου με τον ηλεκτρολύτη.

Ασφαλώς, για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος πρέπει τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου να είναι ηλεκτρονικά απομονωμένα στο στοιχείο, αλλά παρόλαυτά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Στην πράξη στον σχεδιασμό στοιχείων χρησιμοποιείται ένα υλικό διαχωρισμού για να χωρίζει τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου μηχανικά. Για να διατηρείται η επιθυμητή ιοντική αγωγιμότητα πρέπει ο διαχωριστής να είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη. Μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις σχεδιασμού χωρίς διαρροή (non spill) ο ηλεκτρολύτης ακινητοποιείται. Μπορούμε επίσης να προσθέσουμε ηλεκτρικά αγώγιμες δομές και υλικά για μείωση της εσωτερικής αντίστασης.

Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε διάφορους σχηματισμούς (κυλινδρικό, επίπεδο, πρισματικό) ενώ τα μέρη του στοιχείου σχεδιάζονται για να διευκολύνουν το συγκεκριμένο σχήμα. Για να αποφευχθεί διαρροή και στέγνωμα τα στοιχεία σφραγίζονται με ποικίλους τρόπους. Κάποια στοιχεία διαθέτουν συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν στα συσσωρευμένα αέρια να διαφύγουν. Κατάλληλες θήκες ή δοχεία, μέσα για τερματική σύνδεση και τιτλοφόρηση προστίθενται για να ολοκληρωθεί η κατασκευή του στοιχείου και της μπαταρίας.

3.2 Ταξινόμηση στοιχείων και μπαταριών.

Τα ηλεκτροχημικά στοιχεία και οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται με βάση την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Έτσι έχουμε τις πρωτεύουσες (μη επαναφορτιζόμενες) και τις δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες) μπαταρίες. Αυτές οι 2 μεγάλες κατηγορίες περιέχουν υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς.

3.2.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες

Σε αυτές οι μπαταρίες η επαναφόρτιση είναι δύσκολο και καθόλου αποτελεσματική. Για αυτό εκφορτίζονται μόνο μια φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται. Σε πολλά πρωτεύοντα στοιχεία τους δεν υπάρχει ελεύθερος ή υγρός ο ηλεκτρολύτης διότι περιέχεται σε ένα απορροφητικό ή διαχωριστικό υλικό. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται «ξηρά στοιχεία».

Αυτού του τύπου οι μπαταρίες (πρωτεύουσες) είναι μια βολική και συνήθως οικονομική, ελαφριά πηγή συσκευασμένης ενέργειας. Έχει αρκετές εφαρμογές όπως οι ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, τα παιχνίδια, τον φωτισμό κλπ. Τα πλεονεκτήματά τους είναι καλή διάρκεια ζωής «ραφιού», η μικρή έως ανύπαρκτη ανάγκη συντήρησης, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και η ευκολία στην χρήση. Παρ'ότι οι μεγάλες πρωτεύουσες μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, σηματοδότηση κλπ, οι ευρέως γνωστές

στον κόσμο πρωτεύουσες μπαταρίες είναι οι μπαταρίες ενός κυλινδρικού στοιχείου και flat button.

3.2.2 Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες

Αυτού του τύπου οι μπαταρίες είναι ικανές να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά από την εκφόρτισή τους, στην αρχική τους κατάσταση. Αυτό γίνεται με μια διαδικασία ροής ρεύματος μέσα από αυτές το οποίο όμως έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Είναι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι επίσης γνωστές σαν «μπαταρίες αποθήκευσης» ή «συσσωρευτές» (accumulators).

Οι εφαρμογές των δευτερευουσών μπαταριών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

– Εφαρμογές στις οποίες η μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση η μπαταρία είναι συνήθως είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη και φορτίζεται από μια κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρει την ενέργειά της στο φορτίο όταν της ζητηθεί. Για παράδειγμα τέτοια κατηγορία είναι τα συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών, πηγές ενέργειας αναμονής (UPS) για περίπτωση ανάγκης, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης (stationary energy storage – SES) για ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου.

– Εφαρμογές στις οποίες η μπαταρία χρησιμοποιείται και εκφορτίζεται σαν μια πρωτεύουσα μπαταρία, αλλά αντί να απορρίπτεται μετά τη χρήση επαναφορτίζεται. Μερικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι οι φορητές ηλεκτρονικές καταναλώσεις, τα ηλεκτρικά εργαλεία, τα ηλεκτρικά οχήματα κλπ και οι εφαρμογές που απαιτούν άντληση ενέργειας πέρα από τα όρια μιας πρωτεύουσας μπαταρίας. Σε κάθε περίπτωση έχουμε μείωση του κόστους μιας και δεν πετάμε την μπαταρία αλλά την επαναφορτίζουμε.

Εκτός της ικανότητά τους να επαναφορτίζονται οι δευτερεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ενεργειακές τους πυκνότητες είναι γενικά χαμηλότερες από αυτές των πρωτευουσών μπαταριών ενώ το ίδιο συμβαίνει και στην κατακράτηση φορτίου (charge retention) που είναι επίσης φτωχότερη από ότι στις περισσότερες πρωτεύουσες μπαταρίες. Παρόλα αυτά η χωρητικότητα που χάνεται σε μια δευτερεύουσα μπαταρία μπορεί να ανακτηθεί με την επαναφόρτιση. Σε μερικές μπαταρίες που είναι γνωστές σαν «μηχανικά επαναφορτιζόμενες», «επαναφορτίζονται» αντικαθιστώντας το εκφορτισμένο ή απεμπλουτισμένο ηλεκτρόδιο, συνήθως το μέταλλο της ανόδου με ένα καινούριο. Κάποιες από τις μπαταρίες μετάλλου/αέρος (metal/air) είναι χαρακτηριστικές αυτού του τύπου μπαταρίας.

3.2.3 Μπαταρίες αποθήκευσης (reserve batteries)

Οι συγκεκριμένες μπαταρίες διαθέτουν ένα συγκεκριμένο συστατικό το οποίο χωρίζεται από την υπόλοιπη μπαταρία πριν αυτή ενεργοποιηθεί. Στην συγκεκριμένη κατάσταση ο όποιος κίνδυνος χημικής αλλοίωσης ή αυτοεκφόρτισης εξαλείφεται με αποτέλεσμα ο δυνατός χρόνος αποθήκευσης της μπαταρίας να αυξάνεται. Συνήθως το συστατικό που απομονώνεται είναι ο ηλεκτρολύτης. Σε συστήματα όπως η θερμική μπαταρία, η μπαταρία παραμένει απενεργοποιημένη μέχρι θερμανθεί. Με την θερμοκρασία αυτή της μπαταρίας λιώνει ο στερεός ηλεκτρολύτης που εμπεριέχει και γίνεται αγωγίμος.

Οι μπαταρίες αποθήκευσης σχεδιάζονται έτσι για να ανταποκριθούν σε τεράστιες ή ακραίες για το περιβάλλον απαιτήσεις αποθήκευσης. Οι συγκεκριμένες απαιτήσεις δεν μπορούν να καλυφθούν από μια «ενεργή» μπαταρία που έχει σχεδιαστεί για τα ίδια χαρακτηριστικά απόδοσης. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν μεγάλη ισχύ για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα, όπως για παράδειγμα σε πυραύλους, τορπίλλες και άλλα οπλικά συστήματα.

3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά μεγέθη των συσσωρευτών, όπως η χωρητικότητα, η τάση, η στάθμη φόρτισης, το βάθος εκφόρτισης, χρόνος ζωής της μπαταρίας καθώς και την αυτοεκφόρτιση τους. Τέλος αναφερόμαστε στις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

3.3.1 Χωρητικότητα

Χωρητικότητα μιας μπαταρίας $C = \text{capacity}$ είναι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που μπορούμε να πάρουμε από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες εκφόρτισης (ρυθμό εκφόρτισης, τάση και θερμοκρασία). Η χωρητικότητα που μπορεί να δώσει μια μπαταρία συνδέεται άμεσα με το ποσό των ενεργών υλικών (υλικά ανόδου και καθόδου) που περιέχει. Η χωρητικότητα ενός στοιχείου/μπαταρίας μετρείται συνήθως σε αμπερώρια (Ah) και καθορίζεται από ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που εκφορτίζει τη μπαταρία μέχρι μια ορισμένη τελική τάση εκφόρτισης συνήθως ίση με περίπου 1.75 V. Η χωρητικότητα επίσης εξαρτάται από το ρεύμα εκφόρτισης και τη θερμοκρασία. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή του ρεύματος εκφόρτισης με το χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει η μπαταρία στην τελική τάση. Οι κατασκευαστές μπαταριών μπορούν να ορίσουν οι ίδιοι το ρεύμα και την τελική τάση εκφόρτισης. Ο όρος που χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει την ικανότητα της μπαταρίας να μεταφέρει ρεύμα είναι η ονομαστική της χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές συχνά καθορίζουν την ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών τους σε αμπερώρια για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης. Για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι μια μπαταρία 100Ah (για ένα ρυθμό 10 ωρών) είναι ικανή να μεταφέρει 10A ρεύματος για 10 ώρες κάτω από κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (25°C-θερμοκρασία δωματίου). Εναλλακτικά, ένας ρυθμός εκφόρτισης μπορεί να καθορίζεται από το ρυθμό φόρτισης, C rate, ο οποίος εκφράζεται σαν ένα πολλαπλάσιο της ονομαστικής

χωρητικότητας του στοιχείου ή της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μια μπαταρία μπορεί να έχει χωρητικότητα 100 Ah για ένα ρυθμό εκφόρτισης C/10. Ο ρυθμός εκφόρτισης καθορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C/10(A)=100Ah/10h=10A$$

Σχέση 3.2

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ποικίλει για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του στοιχείου. Χαμηλότεροι ρυθμοί εκφόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως ορίζουν μερικούς ρυθμούς εκφόρτισης (σε ampere) μαζί με τους χρόνους εκφόρτισης που συνδέονται με αυτούς (σε ώρες). Η χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε έναν από αυτούς τους ρυθμούς εκφόρτισης υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος η ονομαστική χωρητικότητα συνήθως καθορίζεται για ρυθμούς 8, 10 και 20 ωρών (C/8, C/10, C/20). Οι UPS μπαταρίες βαθμονομούνται σε 8 ωρών χωρητικότητες ενώ οι μπαταρίες τηλεπικοινωνιών σε 10 ωρών χωρητικότητες.

Η χαμηλή θερμοκρασία μειώνει την χωρητικότητα όλων των μπαταριών μολύβδου οξέος. Αυτό συμβαίνει διότι σε χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνεται η αντίσταση και μειώνεται ο ρυθμός διάχυσης στον ηλεκτρολύτη. Το δεύτερο έχει σαν αποτέλεσμα οι μπαταρίες με μεγάλο περιεχόμενο οξέος να χάνουν περισσότερη χωρητικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες από ότι αυτές που έχουν μικρότερο όγκο οξέος. Οι ονομαστικές χωρητικότητες συνήθως αναφέρονται από τον κατασκευαστή σε θερμοκρασία λειτουργίας 20°C με 25°C. Έτσι συνήθως όταν θέλουμε αυτονομία από μια μπαταρία σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις κανονικές, αυξάνουμε την ονομαστική της χωρητικότητα. Τέλος, σε θερμοκρασίες πάνω από 25°C παρατηρείται μια φυσιολογική αύξηση της χωρητικότητας. Εάν παρατηρηθεί μείωση χωρητικότητας κάπου υπάρχει πρόβλημα.

Στις χωρητικότητες που δίνονται από τον κατασκευαστή πρέπει να αναφέρεται η τελική τάση στην οποία αυτές εφαρμόζονται. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται μπαταρίες των οποίων η τάση κυμαίνεται μεταξύ 1.75V και 1.85V ανά στοιχείο. Η σύγκριση μεταξύ δύο μπαταριών ως προς τις χωρητικότητες πρέπει να γίνεται στις ίδιες τάσεις. Ασφαλώς όσο μικρότερη είναι η τελική τάση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαθέσιμη χωρητικότητα.

3.3.2 Τάση

Για να είναι ικανό ένα στοιχείο ή μια μπαταρία να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, πρέπει να υπάρχει μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Αυτή η διαφορά δυναμικού, η οποία μετριέται σε volts αναφέρεται ως τάση του στοιχείου ή της μπαταρίας. Ένα μόνο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει μια διαφορά δυναμικού της τάξης των 2V υπό φορτίο. Ένα πλήρως εκφορτισμένο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 1.75V, ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης. Η τάση ισορροπίας ενός στοιχείου είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος (OCV) μπορεί να

μετρηθεί εάν κανένα εξωτερικό ρεύμα δε διαρέει τη μπαταρία. Αυτή ταυτίζεται με την τάση ισορροπίας αν όλες οι εσωτερικές υπερτάσεις έχουν σταθεροποιηθεί. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτό το στάδιο εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας και τις συνθήκες λειτουργίας και κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι πολλές ώρες. Η OCV μιας μπαταρίας εξαρτάται από το πρότυπο δυναμικό των χρησιμοποιούμενων ενεργών υλικών και το ποσό του φορτίου που απομένει. Το λίθιο χρησιμοποιείται ευρέως ως άνοδος σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες μπαταρίες γιατί προσφέρει το υψηλότερο πρότυπο δυναμικό από όλες τις χημείες των μπαταριών. Η τάση του στοιχείου υπό φορτίο και η τάση κλειστού κυκλώματος (CCV), εξαρτάται από το ρεύμα, τη στάθμη φόρτισης και το ιστορικό του στοιχείου, όπως τη διάρκεια ζωής του ή το χρόνο αποθήκευσης.

Τυπικά, οι ονομαστικές τάσεις των στοιχείων είναι μεταξύ 1.2 και 3.6 V. Συνήθως, αρκετά στοιχεία συνδέονται σε σειρά για να χτίσουν μια αλυσίδα με μεγαλύτερη ονομαστική τάση. Επομένως, η ονομαστική τάση μιας μπαταρίας καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά επί την ονομαστική τάση του ενός στοιχείου. Οι μπαταρίες συχνά πωλούνται σε δομές, στις οποίες είναι ενσωματωμένα και συνδεδεμένα σε σειρά μερικά στοιχεία με μόνο ένα σετ ακροδεκτών. Μια τέτοια εφαρμογή είναι οι SLI μπαταρίες αυτοκινήτων, όπου 6 στοιχεία συνδέονται σε σειρά αλλά πωλούνται ως ένα μπλοκ των 12 V.

Η τελική τάση φόρτισης καθορίζει ένα άνω όριο για την τάση. Η φόρτιση μιας μπαταρίας δε σταματά όταν φτάσει την τελική τάση φόρτισης όπως συμβαίνει με την τελική τάση εκφόρτισης, αλλά το ρεύμα φόρτισης μειώνεται κατάλληλα για να διατηρεί την τελική τάση φόρτισης με την πάροδο του χρόνου.

3.3.3 Στάθμη φόρτισης

Η στάθμη φόρτισης (state of charge – SOC) μιας μπαταρίας μας δείχνει τη χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Εκατό τοις εκατό στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ 0% στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί πλήρως.

Η χωρητικότητα και η πραγματική στάθμη φόρτισης μιας μπαταρίας είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία της. Ιδίως για την απρόσκοπτη λειτουργία και την διαχείριση της ενέργειας στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Στα συστήματα αυτά που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ο καθορισμός της στάθμης φόρτισης είναι πιο δύσκολος διότι η πλήρη φόρτιση της μπαταρίας με συμβατικούς φορτιστές είναι πολύ ασυνήθιστη.

Αν μας δίνεται η στάθμη φόρτισης, το ερώτημα είναι ποια είναι η σημασία των συγκεκριμένων τιμών. Υπάρχουν επιμέρους ορισμοί για τη χωρητικότητα της μπαταρίας και οι αντίστοιχοι ορισμοί για τη στάθμη φόρτισης. Η μετρούμενη χωρητικότητα μιας μπαταρίας μπορεί να είναι μικρότερη ή ακόμα και μεγαλύτερη από την ονομαστική χωρητικότητα που δίνεται από τον κατασκευαστή. Καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η μετρούμενη χωρητικότητα μειώνεται όλο και περισσότερο λόγω των επιπτώσεων της γήρανσης. Η πραγματική χωρητικότητα είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα. Λόγω των ειδικών συνθηκών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι μπαταρίες δεν επαναφορτίζονται πλήρως σχεδόν ποτέ ενώ ο αριθμός των

ωρών φόρτισης είναι περιορισμένος. Η μέγιστη στάθμη φόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος ονομάζεται στάθμη φόρτισης πλήρους ακτινοβολίας (solar-full state of charge). Επίσης, το σύστημα καθορίζει ένα κριτήριο τέλους εκφόρτισης για να αποφευχθεί η βαθειά εκφόρτιση της μπαταρίας και κατά συνέπεια η επιτάχυνση της γήρανσης, το οποίο συνήθως διαφέρει από τα κριτήρια τέλους εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους της χωρητικότητας. Έτσι, η πραγματική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα.

Η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται όπως ξαναείδαμε ως η χωρητικότητα για εκφόρτιση 10 ωρών (C/10). Αυτή είναι η βάση για τον καθορισμό της στάθμης φόρτισης. Η ονομαστική χωρητικότητα δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ η μετρούμενη χωρητικότητα μεταβάλλεται με το χρόνο. Η στάθμη φόρτισης που σχετίζεται με τη μετρούμενη χωρητικότητα ονομάζεται σχετική στάθμη φόρτισης (relative state of charge – SOC_r). Η στάθμη φόρτισης που σχετίζεται με την πρακτική χωρητικότητα λέγεται πρακτική στάθμη φόρτισης (practical state of charge – SOC_p). Η SOC_p είναι 100% αν μια solar-full στάθμη φόρτισης έχει αποκτηθεί.

3.3.4 Βάθος εκφόρτισης

Το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge – DOD) είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το αντίθετο, δηλαδή, από τη στάθμη φόρτισης που όπως είδαμε παραπάνω είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που είναι ακόμα διαθέσιμη στη μπαταρία. Παρακάτω φαίνεται η απλή σχέση μεταξύ των δύο:

Στάθμη φόρτισης	Βάθος εκφόρτισης
100%	0%
75%	25%
50%	50%
25%	75%
0%	100%

3.3.5 Χρόνος ζωής

Οι συνθήκες λειτουργίας και οι στρατηγικές ελέγχου παίζουν μεγάλο στην διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας. Ο όρος χρόνος ζωής, έχει διαφορετική σημασία για τις πρωτεύουσες και για τις δευτερεύουσες μπαταρίες. Στις πρωτεύουσες μπαταρίες ο χρόνος ζωής (ή η ζωή του «ραφιού») ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται η μπαταρία για να φτάσει το 90% της αρχικής της χωρητικότητας, ενώ είναι αυτός που περιορίζεται από την αυτοεκφόρτισή τους. Στις δευτερεύουσες μπαταρίες πάλι, ο χρόνος ζωής ορίζεται σαν τη διάρκεια ικανοποιητικής επίδοσης που μετράται σε χρόνια (ημερολογιακός χρόνος ζωής) ή σαν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης (κύκλος ζωής). Για το τέλος ζωής των δευτερευουσών μπαταριών συνήθως ορίζουμε τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία το 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Μειώνοντας το DOD τυπικά αυξάνεται

ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Υπάρχουν κάποιες συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν και τους δύο τύπους χρόνου ζωής των δευτερευουσών μπαταριών. Μερικές από αυτές είναι η θερμοκρασία κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, τη μέθοδο ελέγχου της φόρτισης, τη μέθοδο ελέγχου της φόρτισης και ασφαλώς το DOD.

3.3.6 Αυτοεκφόρτιση

Η απώλεια φορτίου σε μια μπαταρία που έχει αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος ονομάζεται αυτοεκφόρτιση. Μια πρωτεύουσα μπαταρία για παράδειγμα, η οποία για κάποια χρόνια είναι τοποθετημένη στο ράφι, δεν θα έχει παραμείνει με την αρχική-ολόκληρη την χωρητικότητά της. Στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης συνήθως αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χωρητικότητας που χάνεται ανά μήνα όταν αρχίζουμε με μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Μεγάλο ρόλο στον χρόνο αυτοεκφόρτισης παίζει και η θερμοκρασία. Σε μερικές περιπτώσεις, ο χρόνος αυτοεκφόρτισης υποδιπλασιάζεται για κάθε αύξηση 10oC στη θερμοκρασία της μπαταρίας. Στους περισσότερους υπολογισμούς για φωτοβολταϊκές μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης των προτιμώμενων τύπων μπαταριών είναι χαμηλός και κυμαίνεται μεταξύ 1 και 4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20oC έως 25oC. Επίσης η αυτοεκφόρτιση συγκριτικά με το φορτίο, απαιτεί τόσο μικρό ποσοστό επιπρόσθετης φόρτισης που μπορεί να αγνοηθεί.

3.4 Μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται φανερό ότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Μερικά παραδείγματα επαναφορτιζόμενων συστημάτων μπαταριών είναι:

- Μολύβδου οξέος (Lead acid)
- Νικελίου καδμίου (Nickel cadmium)
- Νικελίου σιδήρου (Nickel iron)
- Υδριδικές νικελίου (Nickel hydride)
- Επαναφορτιζόμενες λιθίου διάφορων τύπων(π.χ. λιθίου)

Από αυτές τις μπαταρίες μόνο οι μολύβδου οξέος και οι νικελίου καδμίου(σε μικρότερο βαθμό) χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα μέχρι σήμερα. Πιο σπάνια χρησιμοποιούνται οι μπαταρίες νικελίου σιδήρου μιας και υποφέρουν από έναν ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης κάτι το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για τις περισσότερες φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Οι πιο σύγχρονες από αυτές είναι οι υδριδικές μπαταρίες νικελίου και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται είναι σε υψηλής αξίας ηλεκτρονικά όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές(laptop). Συνήθως είναι πιο ακριβές ανά kWh με σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος και επειδή δεν είναι ευρέως διαθέσιμες στις μεγάλες χωρητικότητες δεν συνατούνται με φωτοβολταϊκά συστήματα. Επίσης,

χρειάζονται μια κάπως περίπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισής τους, κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης των φωτοβολταϊκών. Μόνο τα τελευταία χρόνια που έχει σημειωθεί κάποια πρόοδος στις μπαταρίες λιθίου αρχίζουν να χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τέλος υπάρχουν και άλλοι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών υπό ανάπτυξη οι οποίες όμως δεν είναι ακόμα διαθέσιμες στο εμπόριο.

3.5 Τι λειτουργία επιτελούν στο φωτοβολταϊκό σύστημα

Τρεις κύριες λειτουργίες επιτελεί μια μπαταρία σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα:

- Δρα σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Η ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσκρούει σε αυτή (και είναι μηδέν το βράδυ). Στα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία χρειάζεται να αποδίδεται ένα σταθερό ποσό ισχύος. Η μπαταρία παρέχει ισχύ όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν παράγει τίποτα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν παράγει λιγότερη ισχύ από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, η μπαταρία, απορροφά την περίσσεια ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν αυτή παράγει περισσότερη ισχύ από ότι το φορτίο απαιτεί.

- Η μπαταρία παρέχει ένα αποθεματικό ενέργειας (αυτονομία του συστήματος) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια μερικών ημερών με συννεφιά, ή σε κάποια περίπτωση ανάγκης εάν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο τμήμα του φωτοβολταϊκού συστήματος.

- Η μπαταρία αποτρέπει μεγάλες, πιθανόν καταστροφικές, διακυμάνσεις τάσης. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να αποδώσει ισχύ σε κάθε σημείο μεταξύ βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν. Σε ένα σύστημα ονομαστικής τάσης 12V, για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0V και περίπου 20V είναι πιθανό να προκύψει από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα τόσο μεγάλο εύρος τάσεων. Η τοποθέτηση μιας μπαταρίας μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του φορτίου εξασφαλίζει ότι το φορτίο δε θα βλέπει τίποτα έξω από το εύρος τάσεων στο οποίο η μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει – στην περίπτωση ενός συστήματος 12V από περίπου 9,5 V σε βαθιά εκφόρτιση μέχρι περίπου 16V υπό συνθήκες ακραίας φόρτισης.

3.6 Ελέγκτες φόρτισης

Οι ρυθμιστές (regulators) είναι ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες ρυθμίζουν την ροή ενέργειας από και προς τους συσσωρευτές σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Γενικά, ο ελεγκτής ή ρυθμιστής φόρτισης-εκφόρτισης ενός συσσωρευτή, παρακολουθεί την διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να αποκόπτει το σύστημα

αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση τις υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις η διακοπή αυτή πραγματοποιείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω ή προς τα κάτω, ορισμένα όρια τάσης, όπου στην συνέχεια ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης-εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές, που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (ρελέ), είτε ηλεκτρονικά ισχύος (mosfet κλπ). Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος, για την προστασία του συστήματος από εκφόρτιση.

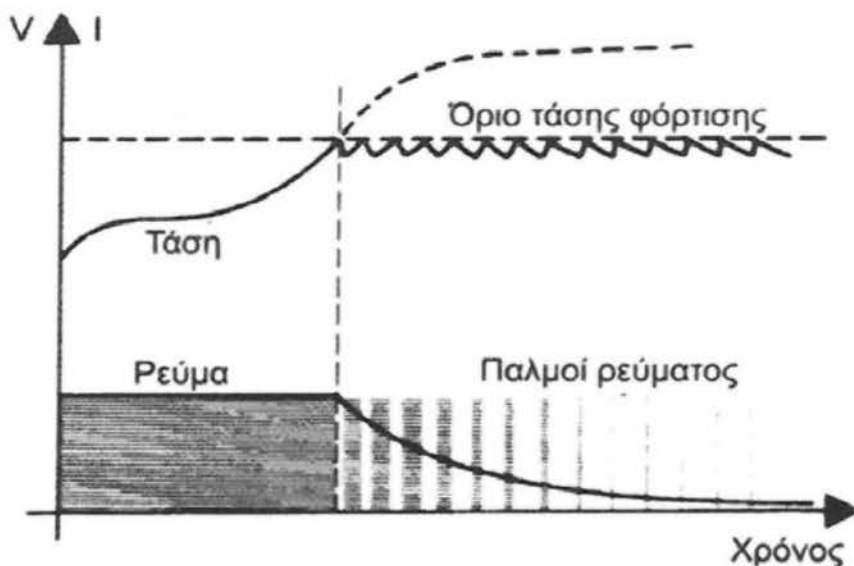
3.6.1 Βασική Αρχή

Η κύρια λειτουργία ενός ελεγκτή φόρτισης είναι να προστατεύει την μπαταρία από υπερφόρτιση και βαθιά εκφόρτιση. Για να το κάνει αυτό, έχει ένα σύστημα μέτρησης της τάσης και ανάλογα με τα επιτρεπτά επίπεδα (Low/High) ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται ο συσσωρευτής. Τα περισσότερα από τα συστήματα ΑΠΕ που περιλαμβάνουν αποθήκευση μπαταριών μολύβδου διαθέτουν ένα σύστημα ελέγχου στο οποίο έχουν καθοριστεί από πριν τα κατώφλια τάσης για την ποσότητα της μπαταρίας. Τα κατώφλια αυτά είναι:

- Ένα κατώφλι υψηλής τάσης για την αποφυγή υπερφόρτισης της μπαταρίας που οδηγεί σε υδρόλυση του ηλεκτρολύτη και διάβρωση των πλακών. Το κατώφλι αυτό ονομάζεται συχνά Αποσύνδεση Υψηλής Τάσης (ΑΥΤ)
- Ένα κατώφλι χαμηλής τάσης προκειμένου να αποφευχθεί η βαθιά εκφόρτιση της μπαταρίας το οποίο ονομάζεται Αποσύνδεση Χαμηλής Τάσης (ΑΧΤ)
- Και δύο ενδιάμεσα κατώφλια επανασύνδεσης της μπαταρίας στο σύστημα: Η Επανασύνδεση Υψηλής Τάσης και η Επανασύνδεση Χαμηλής Τάσης

3.6.2 Προστασία από υπερφόρτιση

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης εμετάλευση της ενέργειας, οι μπαταρίες μολύβδου φορτίζονται σύμφωνα με το αποκαλούμενο χαρακτηριστικό I-V. Στην αρχή της διαδικασίας φόρτισης το ρεύμα φόρτισης μειώνεται αργά μέχρι να μηδενίσει, ενώ η τάση να διατηρείται σε ένα σταθερό επίπεδο. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει πλήρη φόρτιση της μπαταρίας. Οι κατανομές της τάσης και του ρεύματος κατά την διάρκεια της φόρτισης φαίνονται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1

Η κατάλληλη επιλογή της τάσης πλήρους φόρτισης εξαρτάται κυρίως από τη συγκεκριμένη χημεία της μπαταρίας, από το μέγεθος του φορτίου και της συστοιχίας με πρόληψη για την προστασία της, από τη θερμοκρασία λειτουργίας και από τις επιθυμητές ποσότητες ηλεκτρολύτη που χάνεται.

3.6.3 Προστασία από βαθιά εκφόρτιση

Μόλις η τάση της μπαταρίας καταστεί μικρότερη της ΑΧΤ, το φορτίο αποσυνδέεται από αυτήν και δεν μπορεί να επανασυνδεθεί μέχρις ότου επαναφορτιστεί αρκετά η μπαταρία. Αυτή η τάση αποκοπής πρέπει να επιλέγεται σωστά και προσεκτικά ώστε να αποφεύγεται η βαθιά εκφόρτιση σε κάθε περίπτωση. Η τάση αποκοπής πρέπει πάντα να προσαρμόζεται στο ρεύμα εκφόρτισης.

Στην χρήση των ελεγκτών η τιμή του σταθερού ορίου πέρατος φόρτισης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1.9V ανά στοιχείο, δηλαδή 11.4V για μια μπαταρία 12V. Ασφαλώς αυτό το κατώφλι πρέπει να είναι σταθερό για όλες τις θερμοκρασίες. Δυστηχώς οι ελεγκτές φόρτισης κατά την εγκατάσταση και κυρίως κατά την λειτουργία τους εκτίθενται σε πολλές πηγές φθοράς (π.χ. καιρικές συνθήκες). Για την απρόσκοπτη λειτουργία τους πρέπει να ενσωματώνουν τις μορφές προστασίας. Μερικές από αυτές περιγράφονται στην επόμενη παραγράφο

3.6.4 Προστασια από εξωτερικές επιδράσεις

-Προστασία από την υγρασία:Η υγρασία θεωρήται ο χειρότερος εχθρός των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.Η υγρασία μπορεί να είναι είτε άμεση με την μορφή βροχής,είτε έμμεση λόγω της υψηλής υγρασίας του αέρα.Για την αντιμετώπιση της το περίβλημα του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι καλά σφραγισμένο για να προστατεύται από την είσοδο νερού.Για την περίπτωση του αέρα κατάλληλο είναι ένα περίβλημα με κάποιο βαθμό κυκλοφορίας αέρα

-Προστασία από λανθασμένη σύνδεση:Από τα συνηθέστερα λάθοι κατά την εγκατάσταση ενός ελεγκτή φόρτισης είναι η αντιστροφή της πολικότητας των συνδέσεων.Για την αντιμετώπιση του λάθους αυτού χρησιμοποιούνται δίοδοι ελεύθερης διέλευσης σε συνδυασμό με μια κατάλληλη ασφάλεια.Έτσι προστατεύονται οι είσοδοι στη γεννήτρια και την μπαταρία από την αντίστροφη σύνδεση των πόλων.

-Προστασία από υπέρταση:τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να προστατεύονται από βραχυχρόνιες αιχμές της τάσης.

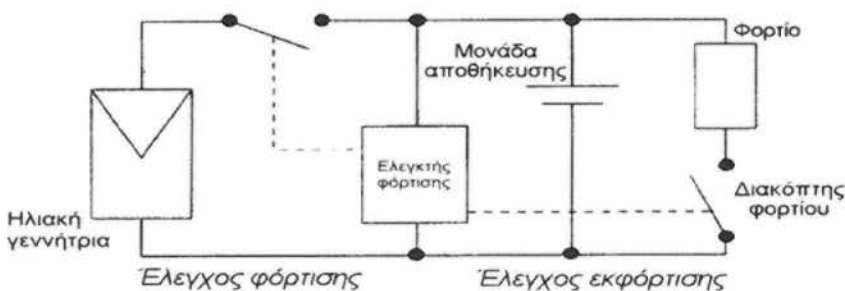
-Προστασία από υπερφόρτωση:Υπάρχει μια πιθανότητα να υπερβαίνεται η ονομαστική τιμή του ρεύματος του στοιχείου στην πλευρά της εισόδου.Επομένως πρέπει να ενσωματώνονται αντίστοιχες προστασίες στον ελεγκτή φόρτισης.Στην πλευρά της εξόδου αντίστοιχα,η προστασία από υπερφόρτωση παρέχεται από κάποια ασφάλεια.

3.6.5 Κύριοι τυποι ελεγκτων φορτισης

Τρεις είναι οι κύριοι τύποι των ελεγκτών φόρτισης:

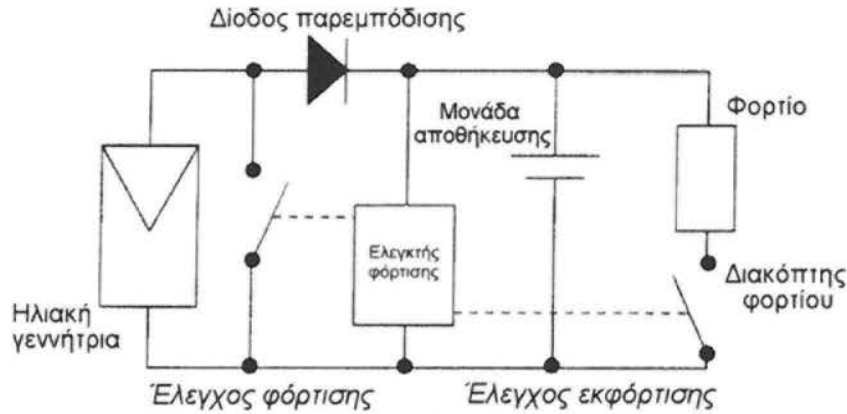
- Ο σειριακός ελεγκτής:Ο συγκεκριμένος ελεγκτής στην περίπτωση που ανακλύπει το όριο φόρτισης διακόπτει την σύνδεση μεταξύ γεννήτριας και της μονάδας αποθήκευσης της ενέργειας.Αυτό το βλέπουμε στην εικόνα 3.2.Για την διακοπή της σύνδεσης χρησιμοποιούνται ρελέ και διπολικά tranzistor ή MOSFETs.

Από τότε όμως που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν οι ημιαγωγικοί διακόπτες,οι οποίοι έχουν χαμηλή κατανάλωση,αυτό το μειονέκτημα έπαψε να υπάρχει και οι απώλειες είναι περίπου της ίδιας τάξης. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι ο σειριακός ελεγκτής εξαρτάται άμεσα στις απώλειες που υφίστανται στο διακόπτη.



Εικόνα 3.2

– Ο ελεγκτής διακλάδωσης βραχυκυκλώματος: Σε αυτήν την περίπτωση ένας ηλεκτρονικός διακόπτης βραχυκυκλώνει την γεννήτρια όταν φορτιστεί πλήρως η μπαταρία. Η τάση κατά μήκος του διακόπτη ή του transistor τότε σχεδόν μηδενίζεται. Στην εικόνα 3.3 βλέπουμε έναν ελεγκτή ρύθμισης βραχυκυκλώματος.



Εικόνα 3.3

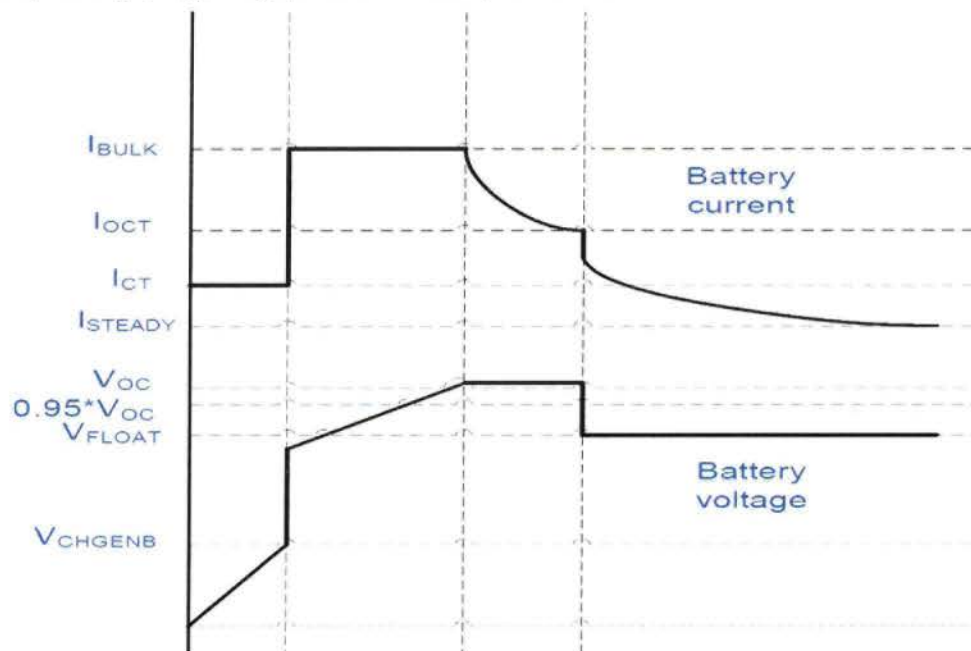
– Οι ελεγκτές PWM: Σε αυτό τον τύπο, ο ρυθμιστής ανοιγοκλείνει γρήγορα την διάταξη ελέγχου. Όταν εκφορτίζονται οι μπαταρίες η μονάδα θα ανοίξει πλήρως. Καθώς φθάνει η μπαταρία σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, η μονάδα θα αρχίσει να ανοιγοκλείνει τη διάταξη ελέγχου ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης που απαιτείται. Όταν η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως δεν επιτρέπεται στο ρεύμα να ρεύσει προς αυτήν. Στα ηλιακά συστήματα η τεχνική PWM χρησιμοποιείται σε σειρά με τα ηλιακά πλαίσια. Ο συγκεκριμένος τρόπος θα χρησιμοποιηθεί και παρακάτω για την υλοποίηση του ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT.

3.6.6 Ρυθμιστής MPPT

Στις περιπτώσεις όπου οι ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών έχουν σαν κύριο μέλημα τους την προστασία του συσσωρευτή από υπέρταση και από εκφόρτιση, η ισχύς που τροφοδοτεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο σύστημα δεν είναι για όλες τις συνθήκες λειτουργίας η μέγιστη. Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να διατηρείται η τάση της μπαταρίας κοντά σε μια προκαθορισμένη από τον σχεδιαστή στάθμη πλήρους φόρτισης, ενώ στην δεύτερη πρέπει να αποκόπτεται το φορτίο από το φωτοβολταϊκό σύστημα όταν η τάση της μπαταρίας γίνει ίση με ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο. Η μεταφορά ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία στην μπαταρία και το φορτίο είναι αποδοτική μόνο για ένα ορισμένο εύρος τιμών από μια σχετικά μεγάλη περιοχή τιμών των παραμέτρων λειτουργίας, όπως το μέγεθος του φορτίου της μπαταρίας, τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων, κλπ. Έτσι συνήθως παρατηρούνται πολύ μικρές απώλειες της τάξης του έως και 10% σε μια ηλιόλουστη μέρα. Την λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει

ο ανιχνευτής του σημείου μέγιστης ισχύος ή αλλιώς Maximum Power Point Tracker(MPPT)

Στα αυτόνομα φωτοβολταικά συστήματα είναι πολύ σημαντικό να φορτίζουμε τις μπαταρίες σε μικρό χρονικό διάστημα.Αυτή όμως η ανάγκη δεν πρέπει προκαλέσει τυχόν βλάβη στην μπαταρία κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής.Για αυτό τον λόγο οι κατασκευαστές των συσσωρευτών προτείνουν τέσσερα στάδια φόρτισης των μπαταριών μολύβδου-οξέος.Αυτά είναι:η ήπια φόρτιση,η κυρίως φόρτιση,η υπερφόρτιση και η φόρτιση συντήρησης,όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4

Ο ρυμιστής μπαταριών τύπου MPPT περιλαμβάνει τον MPPT βρόγχο και τον ρυθμιστή μπαταρίας,δηλαδή τον βρόγχο τάσης ρεύματος.Ο κάθε βρόγχος ενεργοποιείται ανάλογα με το στάδιο φόρτισης της μπαταρίας.Τα στάδια φόρτισης της μπαταρίας είναι τέσσερα και περιγράφονται παρακάτω.

– Ήπια φόρτιση:Όταν η τάση της μπαταρίας χαμηλότερη απο την τάση πλήρους εκφόρτισης(δηλαδή στο κατώφλι χαμηλής τάσης), V_{chgenb} , η μπαταρία είναι πλήρως εκφορτισμένη.Σε αυτό το στάδιο,η φόρτιση γίνεται με ένα μικρό ρεύμα "εκκίνησης" στην μπαταρία(I_{ct}).Στην περίπτωση όπου η μπαταρία είναι εκφορτισμένη,η τάσης της θα παραμείνει μεταξύ της τάσης V_{chgenb} ,παρεμποδίζοντας έτσι τον φορτιστή από το να μεταβεί στην διαδικασία της κυρίως φόρτισης.Σε κάθε άλλη περίπτωση η φόρτιση θα αρχίσει και η τάση της μπαταρίας θα αυξηθεί,για να φτάσει την ονομαστική του τιμή.Σε αυτό το σημείο η φόρτιση θα προχωρήσει στο στάδιο της γρήγορης φόρτισης που θα δούμε παρακάτω.

Στο στάδιο της φόρτισης συντήρησης,ο βρόγχος της τάσης της μπαταρίας καθώς και του MPPT βρόγχου είναι εκτός λειτουργίας.Το ρεύμα εκκίνησης I_{bref} στην μπαταρία ισούται με την τιμή I_{ct} .

–Κυρίως φόρτιση:Σε αυτό το στάδιο ο φορτιστής ενεργοποιεί μια σταθερή πηγή ρεύματος στην τιμή I_{bulk} .Τώρα ο αλγόριθμος MPPT είναι ενεργοποιημένος ενώ ο

βρόγχος τάσης της μπαταρίας είναι απενεργοποιημένος. Το ρεύμα αναφοράς στον βρόγχο ρεύματος της μπαταρίας είναι το I_{bluk} . Μόλις η τάση της μπαταρίας φτάσει το $0.95 \cdot V_{oc}$ αρχίζει το τρίτο στάδιο.

–Υπερφόρτιση: Σε αυτό το στάδιο αποδίδεται στην μπαταρία όλη η χωρητικότητα σε μικρό χρονικό διάστημα αποφεύγοντας την υπερφόρτιση. Τόσο ο βρόγχος της τάσης όσο και του ρεύματος της μπαταρίας ενεργοποιούνται ενώ η λειτουργία του MPPT σε αυτήν την λειτουργία απενεργοποιείται. Η τάση V_{bref} σε αυτό το στάδιο τώρα ισούται με την V_{boc} , όπου V_{boc} είναι το κατώφλι υψηλής τάσης της μπαταρίας. Αρχικά το στάδιο υπερφόρτισης είναι το ίδιο με το στάδιο της κυρίως φόρτισης, αλλά καθώς η τάση υπερφόρτισης προσεγγίζει την σταθερή τιμή, το ρεύμα φόρτισης αρχίζει να μειώνεται. Το I_{bref} εξαρτάται από τον βρόγχο της τάσης της μπαταρίας. Όταν η φόρτιση του ρεύματος γίνει ίση με την τιμή I_{oc} , μεταβαίνουμε στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της φόρτισης της μπαταρίας.

–Φόρτιση συντήρησης: Κατά το στάδιο αυτό, η τάση της μπαταρίας διατηρείται σταθερή στην τιμή V_{float} για να διατηρήσει την χωρητικότητα της μπαταρίας έναντι της αυτοεκφόρτισης. Ο φορτιστής θα διαθέσει όσο ρεύμα χρειάζεται για να διατηρήσει την τάση στο επίπεδο της V_{float} . Ο βρόγχος της τάσης και του ρεύματος της μπαταρίας είναι όπως και στο στάδιο της υπερφόρτισης αλλά εδώ η τάση V_{bref} είναι ίση με την V_{float} . Η μπαταρία θα παραμείνει στο στάδιο της επιπλέον φόρτισης μέχρι η τάση της μπαταρίας να πέσει στο 90% της V_{float} κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, όπου σε αυτό το σημείο η διαδικασία θα επανέρθει στο στάδιο της κυρίως φόρτισης.

3.7 Σύνοψη κεφαλαίου

Όπως είδαμε και παραπάνω, για την σωστή λειτουργία μιας εγκατάστασης που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι απαραίτητη προϋπόθεση η βέλτιστη δυνατή αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Οπότε αναλόγως την εφαρμογή χρησιμοποιούμε και τον κατάλληλο τύπο συσσωρευτή για την αποθήκευση της ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο η εγκατάσταση λειτουργεί αποδοτικότερα.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό κομμάτι στην όλη εγκατάσταση είναι οι ελεγκτές φόρτισης των συσσωρευτών. Οι ελεγκτές αυτοί βοηθούν στην σωστή φόρτιση μιας μπαταρίας καθώς την προστατεύουν από υπερφόρτιση και από υπερβολική εκφόρτιση, περιπτώσεις που έχουν άσχημες συνέπειες στην μπαταρία.

Οπότε είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή φόρτισης με τον οποίο θα ελέγχεται η φόρτιση της μπαταρίας με την μέγιστη δυνατή ισχύ κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την σωστή και ποιοτική φόρτιση της μπαταρίας. Οι ρυθμιστές φόρτισης τύπου MPPT καλύπτουν τις παραπάνω ανάγκες μιας και κάθε χρονική στιγμή ελεγχούν την κατάσταση της μπαταρίας και διαλέγουν το κατάλληλότερο στάδιο φόρτισης.

Κέφαλαίο 4: Αλγόριθμοι MPRT

4.1 Ταξινόμηση των αλγορίθμων αναζήτησης

Οι πρώτες μέθοδοι χρονολογούνται από τη δεκαετία του 70', και χρησιμοποιήθηκαν σε αεροδιαστημικές εφαρμογές 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_{pn} και ρεύματος I_{pn} της ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού. Επίσης υπάρχουν 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 μία μεταβλητή. Σχετικά με αυτή την ομάδα είναι οι μέθοδοι της τάσης ανατροφοδότησης (Feedback Voltage) δηλαδή το ανοιχτό κύκλωμα φωτοβολταϊκής γεννήτριας, το ανοιχτό κύκλωμα φωτοβολταϊκού κυττάρου και η μέθοδος του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Άλλες ταξινομήσεις βασίζονται στη λειτουργία της μεθόδου ή στη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται. Έτσι, έχουμε δύο κατηγορίες, τις άμεσες και τις έμμεσες μεθόδους.

Στις άμεσες μεθόδους περιλαμβάνονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού. Από αυτές λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις των σημείων λειτουργίας της γεννήτριας, βρίσκουμε το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Το πλεονέκτημα των συγκεκριμένων αλγορίθμων είναι ότι είναι ανεξάρτητοι της γνώσης εκ των προτέρων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Έτσι, το σημείο λειτουργίας δεν επηρεάζεται από την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία ή τα επίπεδα της υποβάθμισης. Το μειονέκτημα τους πάλι, είναι τα ανεπιθύμητα σφάλματα που παρουσιάζονται τα οποία επηρεάζουν την ακρίβεια στην αναζήτηση. Οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την ομάδα είναι η μέθοδος της διαφοροποίησης, της τάσης ανάδρασης, P&O, C.I., αυτό-ταλάντωσης όπως επίσης και της ασαφούς λογικής. Άλλοι τύποι ταξινομήσεων, οι οποίοι διακρίνουν μεταξύ των μεθόδων δειγμάτων και διαμόρφωσης μπορούν να περιληφθούν μέσα σε αυτή την ομάδα.

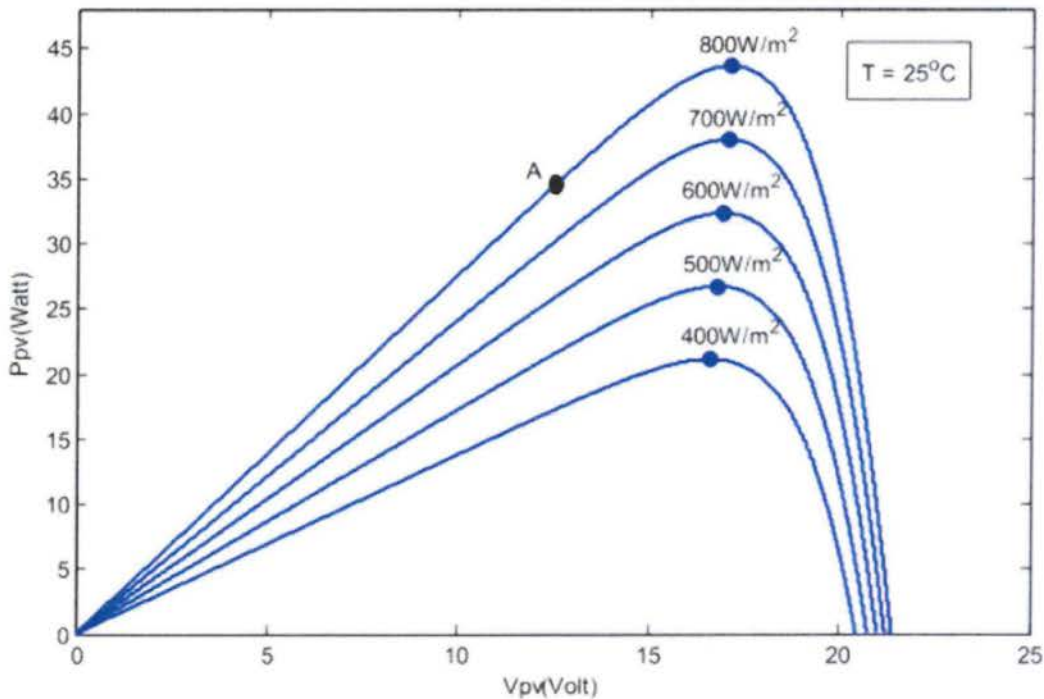
Οι έμμεσες μέθοδοι βασίζονται στη χρήση μιας βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει παραμέτρους και στοιχεία όπως τις χαρακτηριστικές καμπύλες της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, ή στη χρήση των μαθηματικών λειτουργιών που λαμβάνονται από τα εμπειρικά στοιχεία για να υπολογίσει MPP. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται μια προγενέστερη αξιολόγηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ή αλλιώς είναι βασισμένο στη μαθηματική σχέση που λαμβάνεται από εμπειρικά στοιχεία, τα οποία όμως δεν ικανοποιούν όλους τις κλιματολογικές συνθήκες. Διάφορες μέθοδοι οι οποίες ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι :

-Η προσαρμογή καμπύλων (curve fitting).

- Ο πίνακας αναζήτησης (look – up table).
- Το ανοιχτό κύκλωμα φωτοβολταϊκής γεννήτριας (open-voltage PV generator)
- Το ανοιχτό κύκλωμα φωτοβολταϊκού κυττάρου (opencircuit cell)
- Η μέθοδος του ρεύματος βραχυκύκλωσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας (short circuit PV generator).

4.2 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O)

Ένας αλγόριθμος που εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις συστημάτων φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι αυτός της Διατάραξης και Παρατήρησης. Ο λόγος είναι η ευκολία εφαρμογής του. Στην εικόνα 4.1 βλέπουμε την χαρακτηριστική καμπύλη P-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με την χρήση του αλγορίθμου αυτού.



Εικόνα 4.1

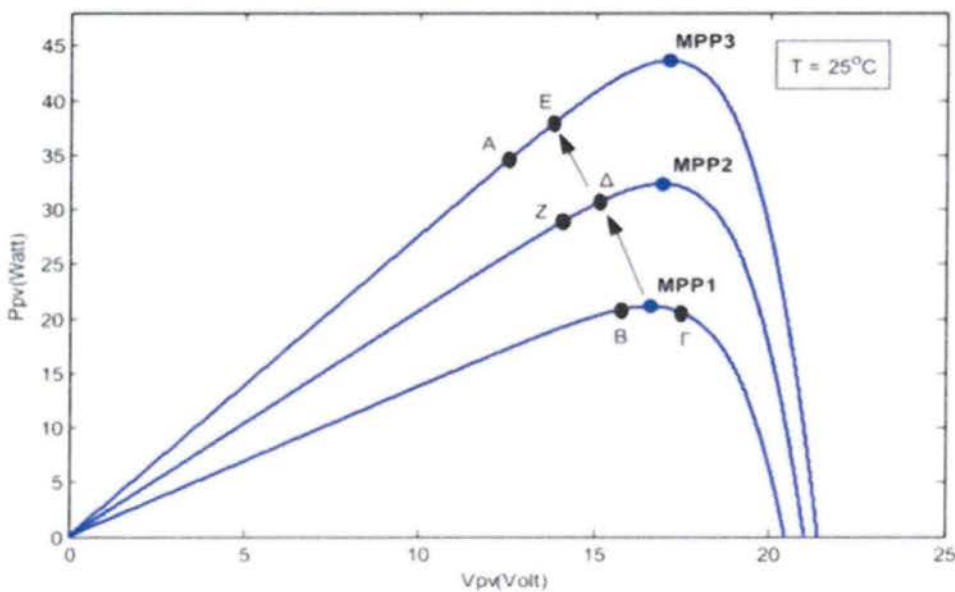
Με την εφαρμογή του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης, το μέγιστο σημείο ισχύος ανιχνεύεται με μεταβολή της τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και έλεγχο της μεταβολής της ισχύος (P). Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στο σημείο A της καμπύλης, το οποίο βρίσκεται πιο αριστερά από το μέγιστο σημείο ισχύος. Σε αυτό το σημείο λειτουργίας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λειτουργούν με μία συγκεκριμένη τάση και δίνουν μια συγκεκριμένη ισχύ μικρότερη της μέγιστης δυνατής. Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης λοιπόν, ακολουθεί μια απλή διαδικασία για να ανιχνεύσει το MPP. Συγκεκριμένα προκαλεί μια διαταραχή στην τάση

και ελέγχει τη μεταβολή της ισχύος. Αρχικά αναγνωρίζει εάν ότι το σημείο λειτουργίας είναι πιο αριστερά από το σημείο MPP. Γνωρίζοντας ότι με την αύξηση της τάσης το σημείο λειτουργίας θα μετατοπιστεί σε περιοχές της καμπύλης με μεγαλύτερη ισχύ και η μεταβολή της ισχύος θα είναι θετική, σαν επόμενο βήμα ο αλγόριθμος θα αυξήσει την τάση μέχρι η μεταβολή της ισχύος να γίνει αρνητική. Αυτό σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται προς περιοχές χαμηλότερης ισχύος. Μόλις η μεταβολή της ισχύος γίνει αρνητική, ο αλγόριθμος μειώνει την τάση ελέγχοντας ταυτόχρονα την ισχύ. Αυτό το πετυχαίνει με την αλλαγή της φοράς μεταβολής της τάσης. Αμέσως μετά η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντίστροφα με την τάση να μειώνεται μέχρι η μεταβολή ισχύος να ξαναγίνει θετική.

Ο αλγόριθμος είναι πολύ απλός στην πράξη μιας και δεν βασίζεται σε πολύπλοκες εξισώσεις και πράξεις αλλά σε μια απλή παρατήρηση. Αν όμως αναλύσουμε εκτενέστερα την διαδικασία που ακολουθεί θα γίνει αντιληπτό ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι δύσκολο να εντοπίσει με ακρίβεια το μέγιστο σημείο ισχύος. Στην περίπτωση που το εντοπίσει, δε θα μπορεί να διακρίνει ότι αυτό είναι το σημείο και έτσι οι διαταραχές της τάσης θα συνεχιστούν. Επομένως, με τη μέθοδο διατάραξης και παρατήρησης, πρακτικά δεν εντοπίζεται το μέγιστο σημείο ισχύος αλλά γίνεται μια ταλάντωση του σημείου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μια περιοχή κοντά στο μέγιστο σημείο ισχύος.

Παρατηρώντας την εικόνα 4.1 βλέπουμε ότι όσο μικρότερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο πιο επίπεδη γίνεται η καμπύλη P-V. Έτσι δυσκολεύεται ο αλγόριθμος στο να εντοπίσει το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της μικρής κλίσης της καμπύλης, η μεταβολή της ισχύος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μεταβολή της τάσης, κάτι που σημαίνει ότι για να έχουμε αξιοσημείωτη μεταβολή στην ισχύ, θα πρέπει να γίνει μια πολύ μεγάλη αλλαγή στην τάση.

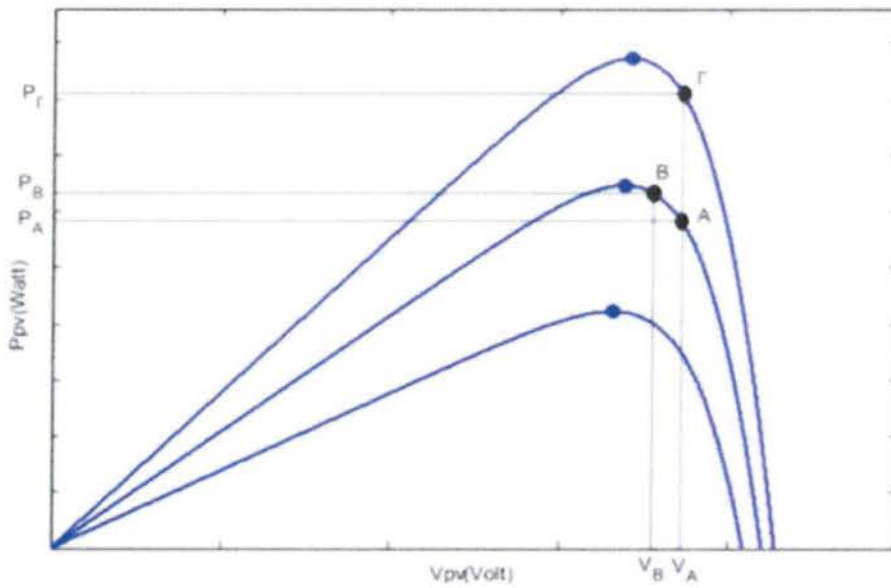
Ένα άλλο εμπόδιο κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι η απότομη αλλαγή των καιρικών συνθηκών. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται στην εικόνα 4.2 που ακολουθεί.



Εικόνα 4.2

Έστω ότι έχουμε έναν ανιχνευτής σημείου MPP που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Ας πούμε ότι ταλαντεύεται σε μια περιοχή πολύ κοντά στο μέγιστο σημείο ισχύος, δηλαδή μεταξύ των σημείων Β και Γ. Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα λειτουργούν με βάση κάποια άλλη καμπύλη που βρίσκεται πιο πάνω από την πρώτη. Επομένως, οποιαδήποτε αλλαγή της τάσης έχει σαν αποτέλεσμα μια θετική μεταβολή ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή αλλάζει το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και βρίσκεται σε καμπύλη μεγαλύτερης ισχύος από την προηγούμενη. Συγκεκριμένα, έστω ότι το νέο σημείο λειτουργίας μετά τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το Δ. Τότε όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2, 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 μέχρις ότου 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 φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το Γ. Άρα, η μεταβολή της ισχύος, $P=P_{\Delta}-P_{\Gamma}$ 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 MPP2 από ότι το Δ, δηλαδή, με την τελευταία μεταβολή τάσης που έγινε από τον αλγόριθμο, το σύστημα απομακρύνθηκε από το καινούργιο μέγιστο σημείο ισχύος MPP2. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να συνεχίζεται και σε άλλες καμπύλες, αν αυξανόταν κι άλλο η ηλιακή ακτινοβολία και ο αλγόριθμος MPPT θα απομακρυνόταν ακόμη περισσότερο από το μέγιστο σημείο ισχύος. 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 προβλημάτων σαν αυτό έχουν προταθεί κάποιοι μέθοδοι βελτίωσης του αλγορίθμου. Μια απλή αλλαγή είναι η εισαγωγή μιας συνάρτησης καθυστέρησης. Η συνάρτηση αυτή 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 αντιλαμβάνεται ότι εντόπισε το σημείο MPP ώστε να διακόπτει τις διαταραχές. Η τροποποίηση αυτή συμβάλλει στη μείωση των ταλαντώσεων και στην αύξηση της απόδοσης του αλγορίθμου κάτω από σταθερές καιρικές συνθήκες. Το μειονέκτημα της τροποποίησης είναι ότι επιβραδύνει την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος σε περίπτωση μεταβαλλόμενων συνθηκών. Μια άλλη μέθοδος βελτίωσης είναι η μέτρηση της ισχύος για μια τιμή της τάσης VA έπειτα η διαταραχή της τάσης στην τιμή VB και μέτρηση της ισχύος σε αυτή την τιμή και τέλος αλλαγή της τάσης για επιστροφή στην αρχική τιμή VA και μέτρηση της ισχύος εκ νέου. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό παρατηρώντας την εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3

Ας θεωρήσουμε ότι αρχικά το σύστημα λειτουργεί στο σημείο A με τάση V_A και ισχύ P_A , και γίνεται διαταραχή της τάσης οπότε και το σημείο λειτουργίας μετακινείται τώρα στο B 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 A, 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 το τρόπο αυτό ο αλγόριθμος καθορίζει αν έχει μεταβληθεί η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς σε μια τέτοια περίπτωση η επιστροφή στην τάση V_A οδηγεί σε ισχύ $P_Γ$ μεγαλύτερη από την P_A που μετρήθηκε στην αρχή της διαδικασίας. Μετά από τις αυτές τις μετρήσεις γίνεται σύγκριση της πρώτης και της δεύτερης τιμής της ισχύος στην τάση V_A . Η διαδικασία αυτή δίνει τη διευκολύνει τον αλγόριθμο στο να διακρίνει τις αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Μια τέτοια διαδικασία όμως είναι φανερό ότι προκαλεί σημαντικές καθυστερήσεις στον αλγόριθμο. Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης:



Εικόνα 4.4

4.3 Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance - INC)

Ο αλγόριθμος της Αυξητικής Αγωγιμότητας βασίζεται σε μια απλή μαθηματική ανάλυση. Η ισχύς μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος. Άρα για να βρούμε τη μέγιστη τιμή της ισχύος παραγωγίζουμε την ισχύ ως προς κάποια από τις δύο μεταβλητές (τάση ή ρεύμα) και θέτουμε την εξίσωση που θα προκύψει ίση με το μηδέν.

Επιλέγουμε να παραγωγίσουμε ως προς την τάση και προκύπτει ότι στο σημείο μέγιστης ισχύος ισχύει:

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

Σχέση 4.1

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η σχέση 4.2 :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Σχέση 4.2

Στο μέγιστο σημείο ισχύος 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. Επομένως, προκύπτει η σχέση ελέγχου για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος, όπου στο σημείο αυτό, σύμφωνα με την σχέση 4.2, πρέπει τα δύο μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω να είναι ίσα. Από την σχέση 4.2 προκύπτουν επίσης κάποιες σχέσεις ανισότητας, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να διακρίνει αν το σημείο λειτουργίας είναι αριστερά ή δεξιά του μέγιστου σημείου ισχύος και επομένως να κάνει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να προσεγγιστεί το σημείο αυτό. Παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις ελέγχου (4.3) που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας :

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V} & \left(\frac{dP}{dV} = 0 \right) \\ \frac{dI}{dV} &> -\frac{I}{V} & \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) \\ \frac{dI}{dV} &< -\frac{I}{V} & \left(\frac{dP}{dV} < 0 \right) \end{aligned}$$

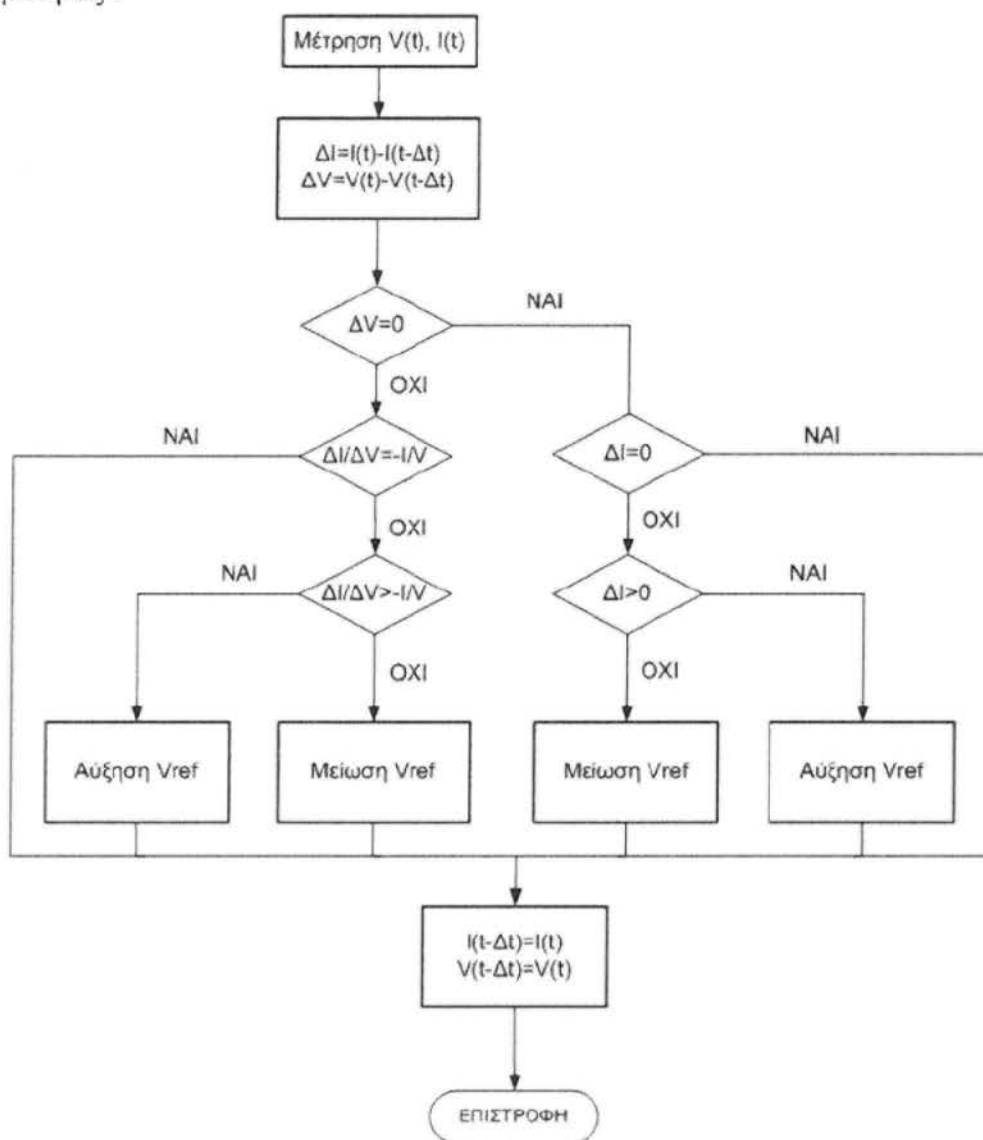
Σχέσεις 4.3

Οι δύο τελευταίες ανισώσεις χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο MPPT για να διαπιστωθεί αν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος VMPP 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 προσεγγιστεί το MPP. Η τάση μεταβάλλεται συνέχεια, έτσι όπως ορίζεται από την ανίσωση που ισχύει κάθε φορά για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, μέχρι να ικανοποιηθεί η πρώτη εξίσωση. Σε περίπτωση που ισχύει η πρώτη σχέση, έχουμε το μέγιστο σημείο ισχύος και ο αλγόριθμος ρυθμίζει και κρατάει τη 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 αντλαμβάνεται 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. Αναφέρουμε επίσης ότι η υλοποίηση του MPPT με αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας δεν οδηγεί σε ταλάντωση γύρω από το μέγιστο σημείο, αλλά σε σταθερή λειτουργία στο σημείο αυτό μέχρι να παρατηρηθεί αλλαγή του ρεύματος και συνεπώς της φωτεινότητας ή της θερμοκρασίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθεί ο αλγόριθμος. 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 MPP. Εάν $dV=0$ και $dI>0$, έχουμε αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση MPP. Σε αυτήν την περίπτωση ο MPPT αυξάνει τη τάση λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων για να ακολουθήσει το νέο μέγιστο σημείο ισχύος. Αντίθετα, αν $dV=0$ και $dI<0$, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μείωση, μειώνοντας έτσι την τάση του μέγιστου σημείου ισχύος. Οπότε ο MPPT μειώνει τη τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για να εντοπίσει το νέο μέγιστο σημείο ισχύος. 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 μέγιστο σημείο ισχύος. Αν ισχύει ότι $dI/dV > -I/V$ τότε ισχύει $dP/dV > 0$ με αποτέλεσμα το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι αριστερά από το MPP στην καμπύλη P-V. Επομένως τάση της φωτοβολταϊκής πρέπει να αυξηθεί για να προσεγγιστεί το MPP. Αντίστοιχα, αν ισχύει ότι $dI/dV < -I/V$ τότε ισχύει $dP/dV < 0$ 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 μέγιστο σημείο ισχύος.

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 MPP. Κατά συνέπεια, κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, αποφεύγεται η περίπτωση λανθασμένης μεταβολής της τάσης και απόκλισης από το μέγιστο σημείο ισχύος, όπως συμβαίνει με τον

αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Επιπλέον μπορεί να προσδιορίσει πότε έχει προσεγγίσει το σημείο αυτό, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις γύρω από αυτό. Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας :



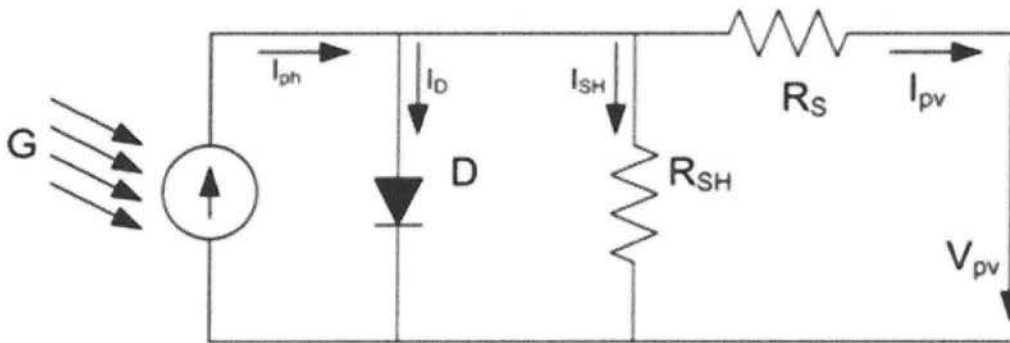
Εικόνα 4.5

4.4 Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance - PC)

Ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Με αυτό τον αλγόριθμο λαμβάνουμε υπόψιν την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων C_p . Η παρασιτική χωρητικότητα αναφέρεται στα συσσωρευμένα φορτία που συγκεντρώνονται στην επαφή των υλικών που αποτελούν το στοιχείο. Η χωρητικότητα δίνεται από τη σχέση 4.4.

$$I(t) = C_p \cdot \frac{dV}{dt}$$

Σχέση 4.4



Εικόνα 4.6

Για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ισχύει η σχέση 4.5:

$$I = I_{ph} - I_{OS} \cdot \left[\exp \frac{q}{A \cdot k_B \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right]$$

Σχέση 4.5

Όπου A ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου που φαίνεται στο στην εικόνα 4.6, q το φορτίο του ηλεκτρονίου, R είναι η αντίσταση σειράς του ισοδύναμου κυκλώματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, I_{ph} το παραγόμενο φωτόρευμα και I_{OS} το ρεύμα κορεσμού της διόδου. Η εξίσωση αυτή αποτελεί την εξίσωση του Shockley για μια φωτοευαίσθητη επαφή $p-n$. Προσθέτοντας τις σχέσεις 4.4 και 4.5 προκύπτει η σχέση 4.6.

$$I = I_{ph} - I_{OS} \cdot \left[\exp \frac{q}{A \cdot k_B \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right] + C_p \cdot \frac{dV_p}{dt} \Rightarrow I = f(V_p) + C_p \cdot \frac{dV_p}{dt}$$

Σχέση 4.6

Επομένως, το ρεύμα I αποτελείται από δύο συνιστώσες, η μία από τις οποίες είναι συνάρτηση της τάσης $f(V_p)$ και η άλλη είναι συνάρτηση του ρεύματος της παρασιτικής χωρητικότητας. Σύμφωνα λοιπόν με όσα προαναφέρθηκαν, η αυξητική αγωγιμότητα της συστοιχίας gP ορίζεται ως :

$$g_p = \frac{df(V_p)}{dV_p}$$

Σχέση 4.7

ενώ η στιγμιαία αγωγιμότητα της συστοιχίας φωτοβολταϊκών, g_L ορίζεται ως :

$$g_L = -\frac{f(V_p)}{V_p}$$

Σχέση 4.8

Η ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της σχέσης 4.7 και της τάσης V_p . Από τον πολλαπλασιασμό προκύπτει:

$$P = V_p \cdot f(V_p) + V_p \cdot C_p \cdot \frac{dV_p}{dt}$$

Σχέση 4.9

Το σημείο μέγιστης ισχύος, όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας, βρίσκεται στο σημείο των καμπυλών όπου η παράγωγος της ισχύος ως προς την τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι μηδέν. Δηλαδή στο MPP ισχύει:

$$dP/dV_p = 0$$

Σχέση 4.10

Επομένως, παραγωγίζοντας την ισχύ του φωτοβολταϊκού, που δίνεται από τη σχέση 4.10, ως προς την τάση V_p και εξισώνοντας το αποτέλεσμα με μηδέν, σύμφωνα με τη σχέση 4.1, προκύπτει η σχέση 4.11.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV_p} = 0 &\Rightarrow \frac{d}{dV_p} [V_p \cdot f(V_p)] + C_p \cdot \frac{d}{dV_p} \left[V_p \cdot \frac{dV_p}{dt} \right] = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_p \cdot \frac{df(V_p)}{dV_p} + f(V_p) + C_p \cdot \left(\frac{dV_p}{dt} + \frac{d}{dt} \cdot V_p \right) = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_p \cdot \frac{df(V_p)}{dV_p} + f(V_p) + C_p \cdot \left(\frac{dV_p}{dt} + V_p \cdot \frac{d}{dV_p} \left(\frac{dV_p}{dt} \right) \right) = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_p \cdot \frac{df(V_p)}{dV_p} + f(V_p) + C_p \cdot \left(\frac{dV_p}{dt} + V_p \cdot \frac{dt}{dV_p \cdot dt} \cdot \left(\frac{d^2 V_p}{dt^2} \right) \right) = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_p \cdot \frac{df(V_p)}{dV_p} + f(V_p) + C_p \cdot \left(\frac{dV_p}{dt} + V_p \cdot \frac{1}{\left(\frac{dV_p}{dt} \right)} \cdot \left(\frac{d^2 V_p}{dt^2} \right) \right) = 0 \end{aligned}$$

Σχέση 4.11

Διαιρώντας την τελευταία εξίσωση με την τάση V_P προκύπτει τελικά η σχέση 4.12.

$$\frac{df(V_P)}{dV_P} + \frac{f(V_P)}{V_P} + C_P \cdot \left(\frac{\left(\frac{dV_P}{dt}\right)}{V_P} + \frac{1}{\left(\frac{dV_P}{dt}\right)} \cdot \left(\frac{d^2V_P}{dt^2}\right) \right) = 0$$

Σχέση 4.12

Από τις σχέσεις 4.7 και 4.8 φαίνεται ότι οι δύο πρώτοι όροι αντιπροσωπεύουν την αυξητική αγωγιμότητα και την αντίθετη στιγμιαία αγωγιμότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο τρίτος όρος αποτελεί την κυμάτωση ρεύματος που προκαλείται λόγω της παρασιτικής χωρητικότητας. Με την πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ως προς το χρόνο, λαμβάνονται υπόψιν οι εναλλασσόμενες συνιστώσες της κυμάτωσης ρεύματος, οι οποίες δημιουργούνται από το μετατροπέα. Τέλος, να σημειωθεί ότι η παρασιτική χωρητικότητα CP τεθεί ίση με μηδέν, η σχέση 4.12 απλοποιείται και μετατρέπεται στη Σχέση 4.1 που χρησιμοποιείται για τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας.

Μια σημαντική διαφορά του αλγορίθμου παρασιτικής χωρητικότητας σε σχέση με τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας είναι ότι σε φωτοβολταϊκούς πίνακες μεγάλης ισχύος με πολλά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα, ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας μπορεί να αποδειχθεί πολύ πιο αποδοτικός από αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί η παρασιτική χωρητικότητα βρίσκεται σε παράλληλη σύνδεση με το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Άρα, με την παράλληλη σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων, οι παρασιτικές χωρητικότητες τους προστίθενται και άρα η παρασιτική χωρητικότητα του συνολικού πίνακα είναι σημαντική. Λόγω της αύξησης της τιμής της παρασιτικής χωρητικότητας, αυξάνει και η ευαισθησία του αντίστοιχου αλγορίθμου, με αποτέλεσμα να την ανιχνεύει με μεγαλύτερη ακρίβεια.

4.5 Αλγόριθμος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage - CV)

Ο αλγόριθμος Σταθερής τάσης (CV) βασίζεται σε μια απλή παρατήρηση που μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των καμπυλών $I-V$, όπως αυτές που φαίνονται στην Εικόνα 2. Συγκεκριμένα ισχύει εμπειρικά ότι η αναλογία της τάσης μέγιστης ισχύος V_{MPP} στο MPP και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι περίπου σταθερή για όλες τις καμπύλες. Δηλαδή για τις δύο τάσεις ισχύει μια σχέση 4.13.

$$V_{MPP}/V_{OC}=K<1$$

Σχέση 4.13

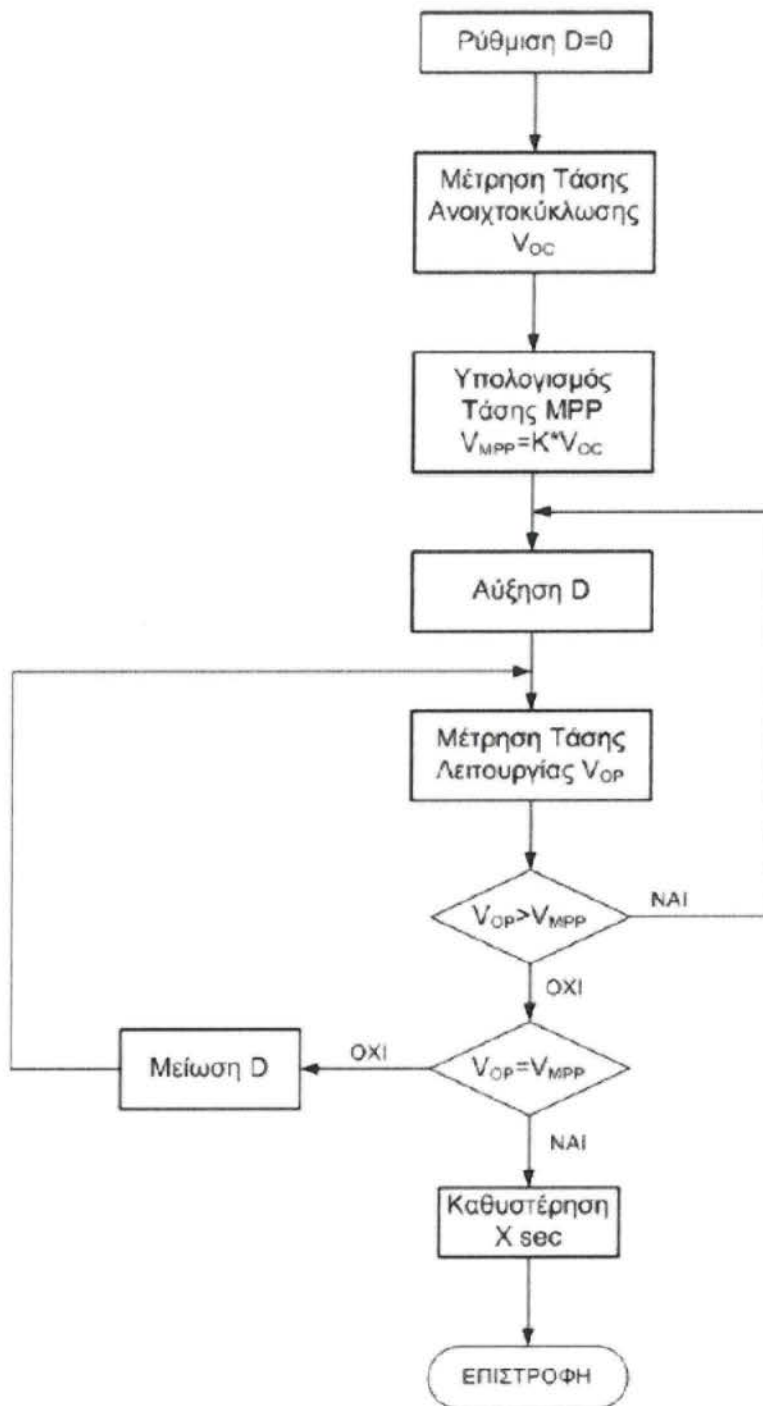
Ο αλγόριθμος σταθερής τάσης προσωρινά απομονώνει τη συστοιχία φωτοβολταϊκών από τον A και γίνεται μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος V_{oc} . Έπειτα ο αλγόριθμος, χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση και μια προκαθορισμένη τιμή του K , υπολογίζει το σωστό σημείο λειτουργίας και ρυθμίζει την τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέχρι να επιτευχθεί η υπολογισμένη, από την εξίσωση, τιμή της τάσης V_{MPP}

στο MPP. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί τη θέση του μέγιστο σημείο ισχύος και να το εντοπίζει. Αν και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή, η επιλογή της σταθεράς K δεν είναι απλά ζήτημα.

Αυτό συμβαίνει γιατί η αναλογία K δεν είναι σταθερή, όπως θεωρήθηκε προσεγγιστικά, αλλά στην πραγματικότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Επομένως, η επιλογή της σταθεράς K δεν μπορεί να γίνει ιδανικά αλλά ούτε και έχει βρεθεί τρόπος για την επιλογή της καλύτερης δυνατής τιμής. Για το λόγο αυτό η απόδοση των MPPT που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο σταθερής τάσης είναι μειωμένη σε σχέση με άλλους MPPT που χρησιμοποιούν άλλους αλγορίθμους. Στη μείωση της απόδοσης του αλγορίθμου συμβάλλει και το γεγονός ότι η μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος προϋποθέτει τη στιγμιαία διακοπή της ισχύος των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Να αναφερθεί ότι έχει προταθεί τροποποίηση του αλγορίθμου σύμφωνα με την οποία θα ρυθμίζεται η τιμή του K ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Μια τέτοια λειτουργία όμως απαιτεί την επινόηση ενός βοηθητικού αλγορίθμου και ουσιαστικά ο αλγόριθμος σταθερής τάσης γίνεται παρόμοιος με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης.

Να αναφερθεί ότι υπάρχει και ο αλγόριθμος Σταθερού Ρεύματος, ο οποίος προσεγγίζει το ρεύμα στο μέγιστο σημείο ισχύος ως σταθερό ποσοστό του ρεύματος βραχυκύκλωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου σταθερού ρεύματος, τοποθετείται ένας διακόπτης στους ακροδέκτες εισόδου του converter ο οποίος κλείνει στιγμιαία, έτσι ώστε να μετρηθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έπειτα υπολογίζεται το ρεύμα στο μέγιστο σημείο ισχύος από τη σχέση που συνδέει τα δύο ρεύματα και μεταβάλλεται το ρεύμα εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από τον MPPT μέχρι να επιτευχθεί το υπολογισμένο ρεύμα του μέγιστου σημείου ισχύος. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά. Ωστόσο, ο αλγόριθμος σταθερής τάσης είναι προτιμότερος λόγω της ευκολίας μέτρησης των τάσεων και λόγω του ότι η ανοιχτοκύκλωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι απλή διαδικασία, ενώ η βραχυκύκλωση της είναι πρακτικά αδύνατη, εφόσον δε γίνεται να εφαρμοστεί μηδενική αντίσταση στα άκρα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Οι αλγόριθμοι σταθερής τάσης και σταθερού ρεύματος, ωστόσο, μπορούν να εφαρμοστούν με την τεχνική του στοιχείου πιλότου. Αυτό σημαίνει ότι για ένα μεγάλο φωτοβολταϊκό πίνακα, ένα στοιχείο θα χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις, ηλαδή η μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος ή του ρεύματος βραχυκύκλωσης θα γίνεται πάνω σε αυτό το φωτοβολταϊκό στοιχείο και όχι σε όλο τον πίνακα. Επομένως, για τη μέτρηση των μεγεθών αυτών ανοιχτοκυκλώνεται μόνο ένα στοιχείο του πίνακα, με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα στοιχεία να παράγουν ισχύ ώστε να μη μειώνεται σημαντικά η απόδοση του συστήματος. Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου Σταθερής Τάσης (εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7

4.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό είδαμε και αναλύσαμε μερικούς απο τους αλγόριθμους MPPT. Οι συγκεκριμένοι είναι και οι πλέον χρησιμοποιούμενοι. Συγκεκριμένα είδαμε:

–Τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης ο οποίος λόγω της εύκολης εφαρμογής είναι και ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος.

–Τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας ο οποίος σε σχέση με αυτόν της διατάραξης και παρατήρησης έχει το πλεονέκτημα ότι στις γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες εντοπίζει τη σωστή κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος και σταθεροποιήτε σε αυτό. Με αυτόν τον τρόπο όταν το σημείο MPP προσεγγιστεί αποφεύγεται να ακολουθηθεί λανθασμένη κατεύθυνση γύρω από αυτό.

–Τον αλγόριθμο παρασιτικής χωρητικότητας ο οποίος είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Η διαφορά τους είναι στο ότι ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας περιλαμβάνει την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών κυττάρων C_p .

–Τέλος είδαμε τον αλγόριθμο σταθερής τάσης ο οποίος βασίζεται στην παρατήρηση των καμπυλών I-V. Από εκεί <<καταλαβαίνει>> ότι η αναλογία της μέγιστης τάσης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών V_{mp} , και της τάσης ανοιχτοκυκλώματος V_{oc} , είναι περίπου σταθερή. Ασφαλώς για να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος αυτός πρέπει να καθοριστεί η σωστή τιμή του K.

Ανάλογα λοιπόν με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής πρέπει να επιλέξουμε τον κατάλληλο αλγόριθμο MPPT.

Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση MPPT με τον μικροελεγκτή PIC16F876A

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την διαδικασία υλοποίησης του ηλεκτρονικού κυκλώματος με το οποίο θα ανιχνεύεται η μέγιστη ισχύς του ηλιακού πάνελ και θα παρέχετε στην μπαταρία ώστε να την φορτίζει με την μέγιστη δυνατή ισχύ.

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε τον μικροελεγκτή PIC16F876A της microchip ο οποίος έχει μετατροπέα ADC και λαμβάνει συνεχώς μετρήσεις για την τάση και το ρεύμα του ηλιακού πάνελ. Στην συνέχεια επιλέγουμε τον κατάλληλο αλγόριθμο υπολογισμού της μέγιστης ισχύς (maximum point tracker). Ταυτόχρονα, όπως φαίνεται και παρακάτω, ο μικροελεγκτής μας <<οδηγεί>> συνεχώς ένα φορτίο. Οπότε σε περίπτωση χαμηλής τάσης της μπαταρίας πρέπει να κόβει αυτό το φορτίο για να μην ξεφορτιστεί ο συσσωρευτής μας κάτω από τα επιτρεπτά όρια.

Στο τέλος γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση του κώδικα ο οποίος είναι γραμμένος σε γλώσσα microC.

5.2 Σχηματικά των κυκλωμάτων και ανάλυση αυτών

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκαν 3 υπο-κυκλώματα. Το κάθε ένα από αυτά επιτελεί διαφορετικό σκοπό, σημαντικό για το τελικό αποτέλεσμα. Τα υποκυκλώματα αυτά είναι:

- Το τροφοδοτικό του κυκλώματος.
- Ο προγραμματιστής του μικροελεγκτή μας.
- Το βασικό κύκλωμα υλοποίησης του MPPT.

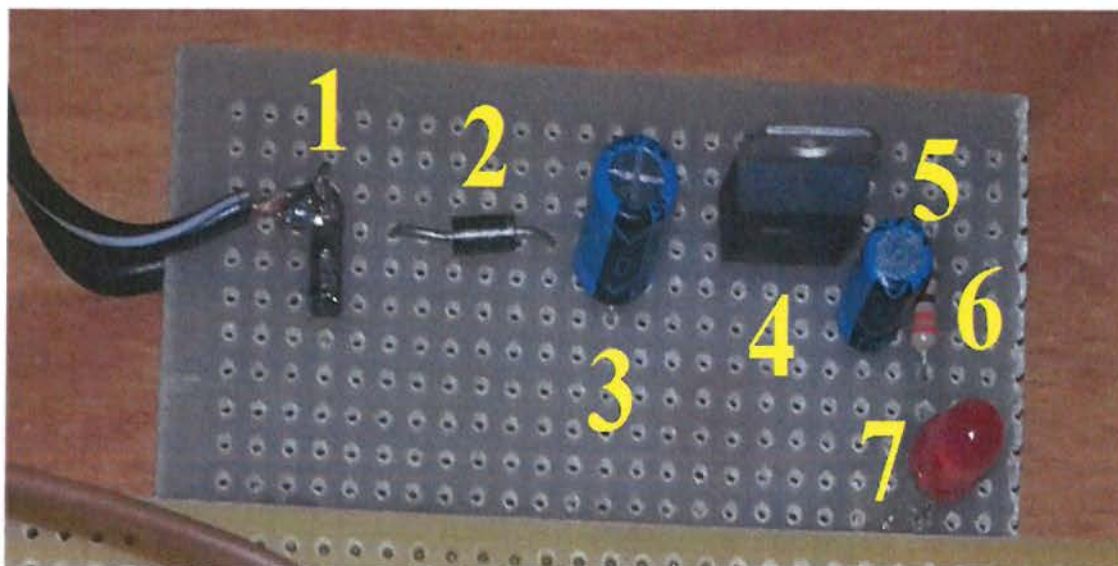
5.2.1 Τροφοδοτικό κυκλώματος

Το τροφοδοτικό του κυκλώματος δίνει στην έξοδο του τάση 5V η οποία είναι απαραίτητη για να λειτουργήσει ο μικροελεγκτής μας. Επίσης ίδια τάση χρειάζεται και το ολοκληρωμένο max232 το οποίο όπως και θα δούμε αργότερα είναι απαραίτητο για την επικοινωνία του PIC με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

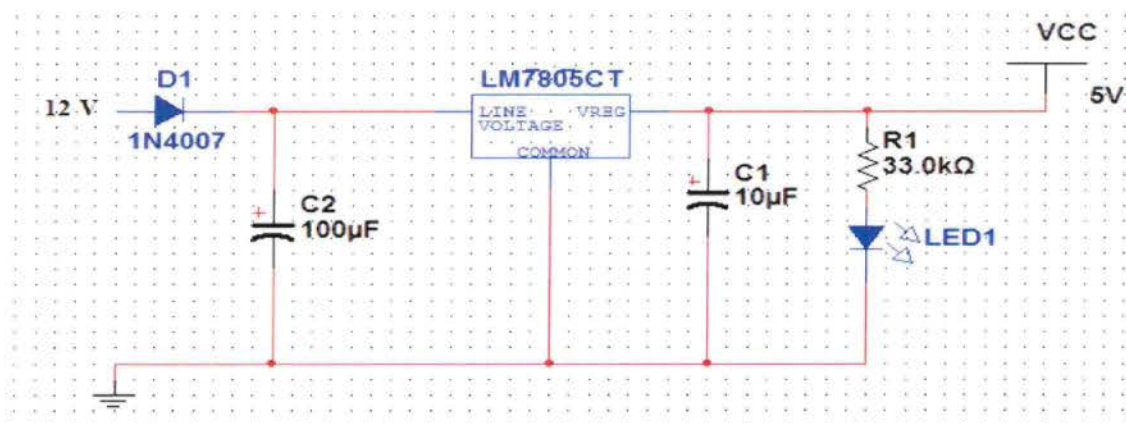
Το κύκλωμα του τροφοδοτικού αποτελείται από:

- 1) Μια είσοδο 12V DC την οποία λαμβάνουμε μέσω ενός μετασχηματιστή 220V AC σε 12V DC.
- 2) Μία δίοδο 1N4007 η οποία προστατεύει την είσοδο σε περίπτωση <<ανάποδου>> ρεύματος.
- 3) Έναν πυκνωτή 100μf ο οποίος αποτρέπει την εμφάνιση σπινθίρα στην είσοδο του 7805, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία σε περίπτωση απότομης διακοπής της εισόδου.
- 4) Έναν σταθεροποιητή τάσης LM7805 ο οποίος δέχεται στην είσοδο του μια τάση 12V DC και στην έξοδο του δίνει μια σταθερή τάση 5V DC η οποία θα τροφοδοτήσει το υπόλοιπο κύκλωμα.
- 5) Έναν πυκνωτή 10μf ο οποίος επιτελεί την ίδια εργασία με τον πυκνωτή εισόδου αλλά για την έξοδο.
- 6) και 7) Μια μικρή αντίσταση 330Ω και ένα led που μας δείχνει εάν δουλεύει το τροφοδοτικό.

Ακολουθεί μια φωτογραφία του τροφοδοτικού καθώς και το σχέδιο του στο multisim(εικόνες 5.1 και 5.2)



Εικόνα 5.1



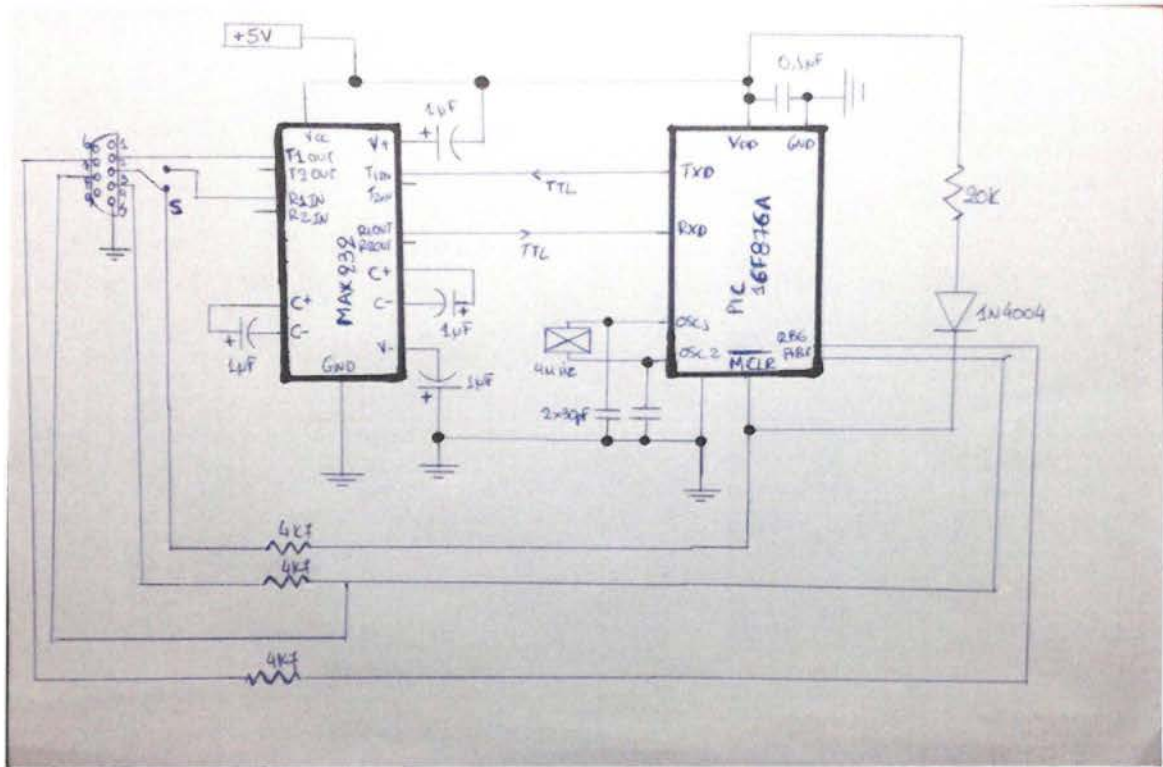
Εικόνα 5.2

5.2.2 Ο προγραμματιστής του μικροελεγκτή μας

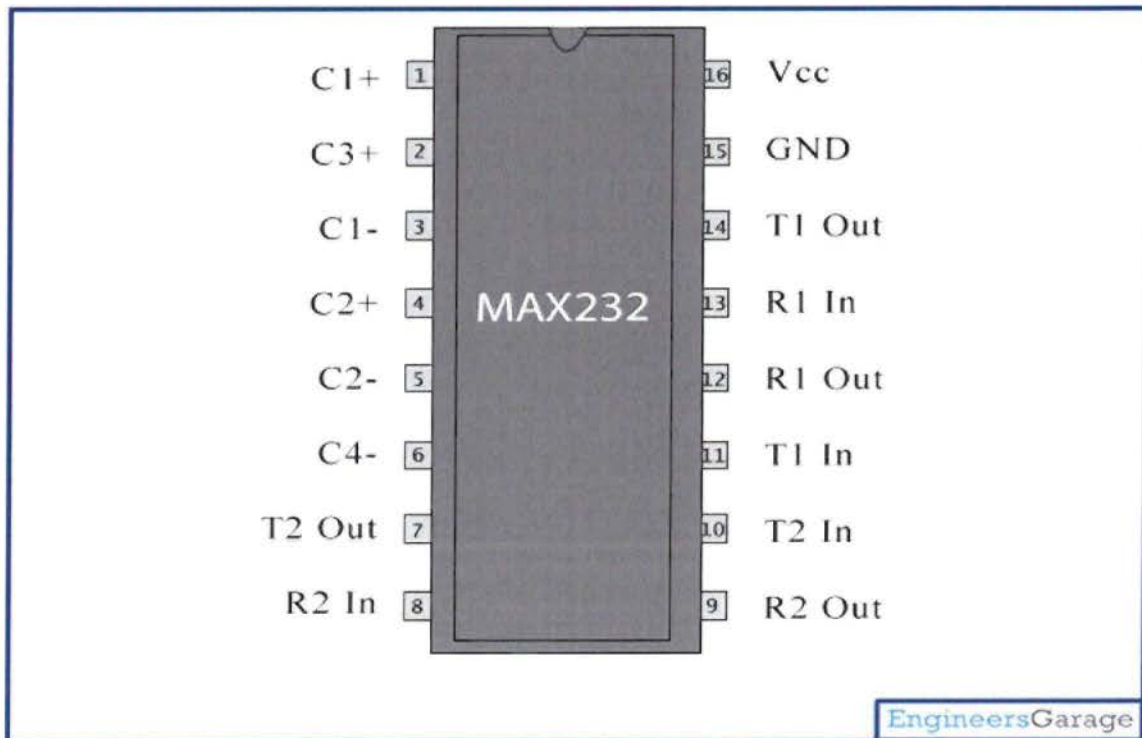
Το κύκλωμα του προγραμματιστή είναι από τα βασικότερα κυκλώματα τις εργασίας, μιας και μέσω αυτού περνάμε το πρόγραμμα από τον υπολογιστή στον μικροελεγκτή. Με την βοήθεια του MAX232 είναι εφικτή η επικοινωνία του PIC με τον Η/Υ μας μέσω της σειριακής θύρας RS232. Το ολοκληρωμένο αυτό χρησιμοποιεί πυκνωτές για να παράγει την τάση που απαιτείται από την σειριακή θύρα, έτσι ώστε επικοινωνήσει ο μικροελεγκτής με τον Η/Υ.

Όπως φαίνεται και στο σχηματικό στην εικόνα 5.3, τόσο ο MAX232, όσο και ο PIC τροφοδοτούνται με τάση ίση με 5V. Η τάση αυτή δίνεται μέσω του τροφοδοτικού που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Με τον διακόπτη S έχουμε την δυνατότητα να αλλάζουμε την λειτουργία προγραμματισμού σε λειτουργία εκτέλεσης του προγράμματος (κανονική λειτουργία) και αντιστροφά. Με την τελευταία αποκόπτεται και η σειριακή επικοινωνία του PIC με τον Η/Υ. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της συχνότητας του ταλαντωτή διότι την στιγμή του προγραμματισμού γίνεται επιλογή για το τι ταλαντωτή έχουμε εγκαταστήσει. Τέλος ο ταλαντωτής παράγει ένα σήμα χρονισμού το οποίο στην περίπτωση μας είναι 4Mhz. Στην εικόνα 5.4 βλέπουμε τους ακροδέκτες του MAX232, ενώ στην εικόνα 5.3 ολόκληρο το σχηματικό του προγραμματιστή.



Εικόνα 5.3



Εικόνα 5.4

5.2.3 Το βασικό κύκλωμα υλοποίησης MPPT

Το βασικό μας κύκλωμα είναι ένας ρυθμιστής φόρτισης μπαταρίας MPPT το οποίο ταυτόχρονα οδηγεί και ένα φορτίο που στην περίπτωση μας είναι μια λαμπά 12V LED. Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Το μικροελεγκτή της microchip PIC16F876A ο οποίος έχει μνήμη EEPROM 256bytes, μνήμη RAM 368bytes, μνήμη προγράμματος flash 8Kbytes, είναι χρονοσιμμένος στα 20Mhz και είναι 8bit.
- Δύο τρανζίστορ STP55NF06 ικανά να αντέξουν μέχρι και 55A. Το ένα για την <<οδήγηση>> της τάσης του φωτοβολταϊκού προς την μπαταρία και το άλλο για το φορτίο.
- Μια 12Volt μπαταρία μολύβδου ικανή να δώσει 2.3AH.
- Μια λάμπα LED 12V η οποία είναι το φορτίο μας.
- Το φωτοβολταϊκό το οποίο έχει μέγιστη ισχύ P_{MAX} 5W, μέγιστο ρεύμα ISC 0.29A και μέγιστη τάση VOC 21.6V.
- Δύο αντιστάσεις των 22K Ω και δύο των 10K. Τις χρησιμοποιούμε για διερρέτη τάσης ως είσοδο προς τον PIC.
- Μια βατική αντίσταση η οποία χρησιμεύει για τον υπολογισμό των ampere.

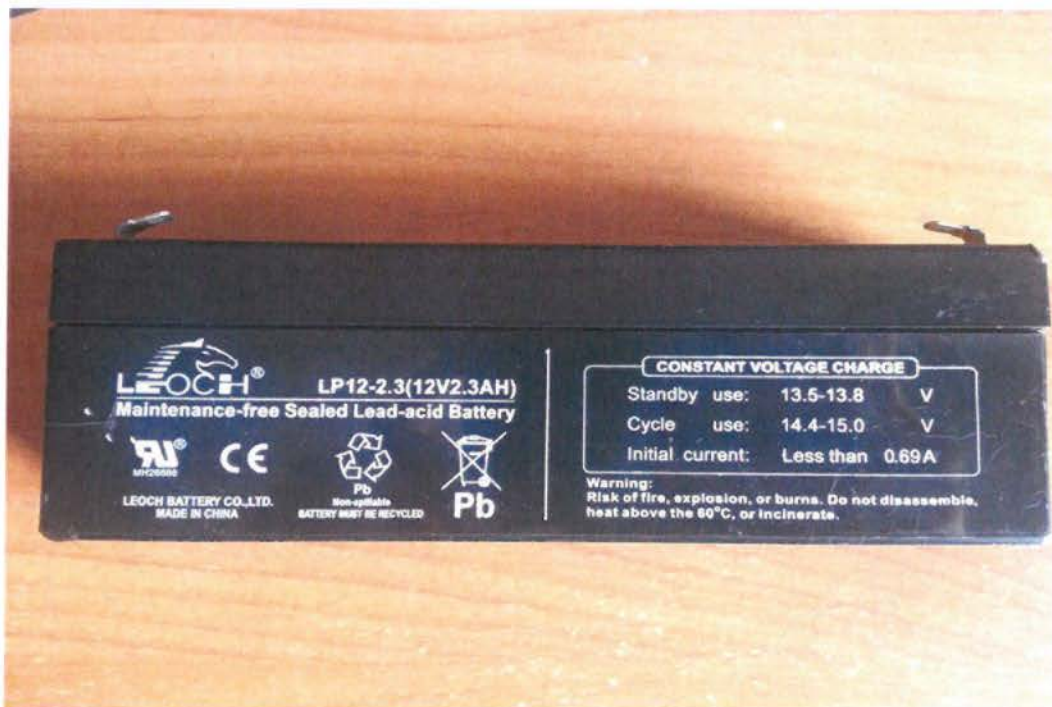
Στην πράξη ο επεξεργαστής διαβάσει μέσω τις αναλογικής εισόδου AN0 την τάση του φωτοβολταϊκού όπως αυτή ερχεται από το πρώτο τρανζίστορ. Επειδή η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από τι μπορεί να αντέξει ο μικροελεγκτής μας χρησιμοποιούμε έναν διαιρέτη τάσης (αντιστάσεις R3, R4) για να μειώσουμε την τάση τις μπαταρίας. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε μια βατική αντίσταση στις οποίας τα άκρα παρατηρούμε μια πολύ μικρή πτώση τάσης. Την τάση αυτή την διαβάσει ο μικροελεγκτής μέσω τις αναλογικής εισόδου AN2. Η τάση αυτή είναι μειωμένη μέσω ενός άλλου διαιρέτη (αντιστάσεις R1, R2) και την χρειαζόμαστε για τον υπολογισμό των ampere.

Ο μικροελεγκτής μας ανιχνεύοντας συνεχώς το σημείο MPP φορτίζει την μπαταρία με την μέγιστη δυνατή ισχύ. Αυτό γίνεται στέλνοντας παλμούς PWM στο τρανζίστορ TR1 του οποίου η είσοδος είναι συνδεδεμένη στο φωτοβολταϊκό και η έξοδος στην μπαταρία. Η μπαταρία συνεχίζει να φορτίζει μέχρι σ' ότου η μπαταρία φτάσει στα 13V. Την στιγμή που θα φτάσει ο μικροελεγκτής κλείνει το τρανζίστορ TR1 αποκόβοντας εντελώς την τάση του φωτοβολταϊκού από το υπόλοιπο κύκλωμα, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση το τρανζίστορ TR1 παραμένει ανοιχτό.

Για την διάρκεια που η τάση τις μπαταρίας κυμαίνεται μεταξύ 11,8–13V η λάμπα ανάβει. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του τρανζίστορ TR2 το οποίο ο μικροελεγκτής κρατάει ανοιχτό δίνοντας του παλμό PWM για το συγκεκριμένο εύρος τάσεων (11,8–13V) και το κλείνει μόλις η τάση τις μπαταρίας φτάσει τα 11,8V. Αυτό γίνεται διότι σε αυτή την τάση η μπαταρία θεωρείται πλήρως εκφορτισμένη οπότε σε περίπτωση μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. νύχτα) θα έχουμε περαιτέρω εκφόρτιση τις μπαταρίας κατι το οποίο θα την καταστρέψει.

Στις παρακάτω εικόνες (5.5-5.6-5.7) απεικονίζονται όλα τα υποσυστήματα του κυκλώματος καθώς και το τελικό κύκλωμα. Αυτό που προκαλεί ενδιαφέρον είναι ότι σε

πλήρη ηλιοφάνεια το φωτοβολταϊκό παράγει τάση 22.4(εικόνα 5.8). Στην εικόνα 5.9 βλέπουμε ολόκληρο το κύκλωμα πάνω στο PCB και στην εικόνα 5.10 το σχέδιο αυτού.



Εικόνα 5.5



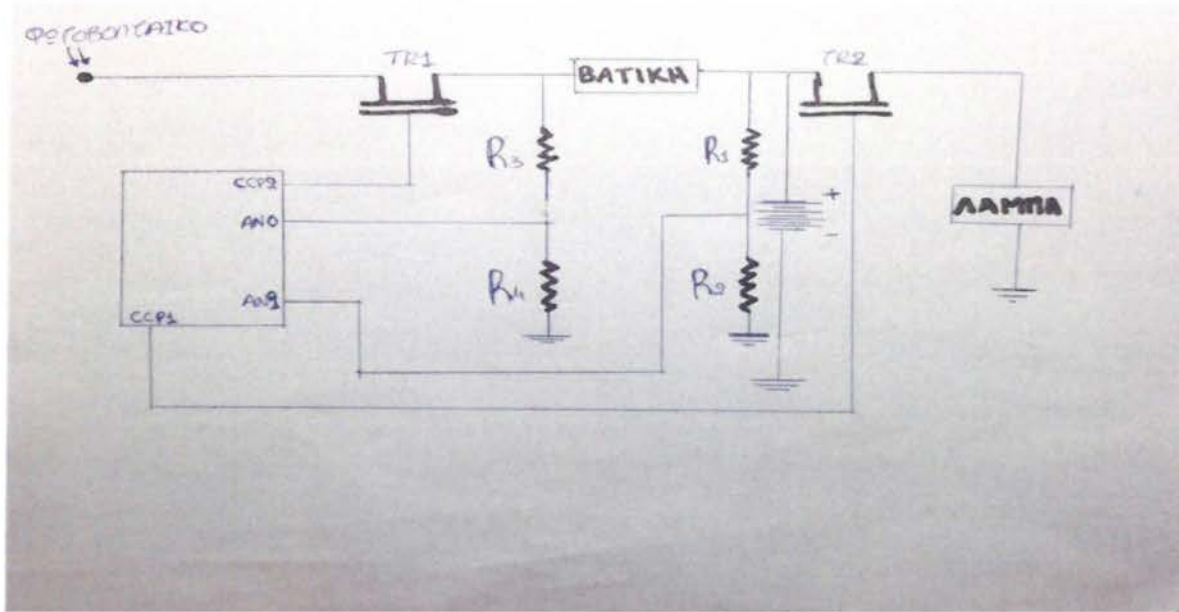
Εικόνες 5.6-5.7



Εικόνα 5.8



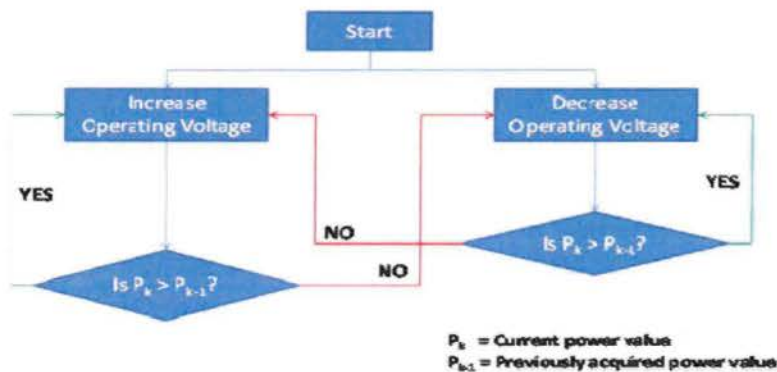
Εικόνα 5.9



Εικόνα 5.10

5.3 Αλγόριθμος MPPT

Για την εύρεση του σημείου MPP έχουμε υλοποιήσει την μέθοδο αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης (Perturb and Observation - P&O) σύμφωνα με αυτή την μέθοδο η τάση του φωτοβολταϊκού μεταβάλλεται κατά ένα μικρό ποσοστό από τον μικροελεγκτή ο οποίος στην συνέχεια υπολογίζει την ισχύ. Στην περίπτωση όπου έχουμε αύξηση της ισχύος ο ελεγκτής αυξάνει ή μειώνει την τάση μέχρις ότου η ισχύς παύσει να αυξάνεται. Προτιμήσαμε την συγκεκριμένη μεθοδος λόγω ευκολίας στην υλοποίησή της. Επίσης προσφέρει μεγάλη ταχύτητα και αποδοτικότητα στο να φτάσει στο σημείο MPP. Συναντάτε στους περισσότερους ρυθμιστές φόρτισης με το μονο μειωνέκτημα της να είναι η πιθανότητα εμφάνιση ταλαντώσεων στην έξοδο.



Εικόνα 5.10

5.3.1 Το πρόγραμμα υλοποίησης του αλγορίθμου MPPT

Ο μικροεπεξεργαστής μας από μόνος του είναι ένα κενό hardware το οποίο στην πράξη δεν κάνει τίποτα. Ουσιαστικά δεν έχει καμία αξία εάν δεν θα μπορούσαμε να τον προγραμματίσουμε ανάλογα για την αντίστοιχη εφαρμογή. Οπότε γίνεται σαφές ότι ο προγραμματισμός του χρήζει ιδιαίτερης σημασίας και προσοχής, μιας και μέσω αυτού ο μικροελεγκτής μας παίρνει αξία και γίνεται χρήσιμος.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω για την συγκεκριμένη εργασία επιλέξαμε τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Ο κώδικας για την υλοποίηση του παραπάνω αλγορίθμου γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού microC. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο που διατίθεται δωρεάν για 30 ημέρες στην ιστοσελίδα της Microchip το οποίο κάνει compile την γλωσσά προγραμματισμού και σαν έξοδο μας δίνει ένα αρχείο .hex το οποίο <<περνάμε>> στον μικροελεγκτή μας μέσω του προγράμματος PICPgm.

5.3.2 Η ανάλυση του κώδικα

```
#define v5 5000
#define v13_8 13000 \\Καθορισμός τιμών.Π.Χ. το v13_8
#define v13_7 12900 \\ έχει την τιμή 13000 ή 13Volt
#define v13_65 12850
#define v10_8 11800
```

```
unsigned int ch0, ch2, amp;
unsigned long watt, oldwatt; \\Δήλωση μεταβλητών
unsigned short Du, Du2;
```

```
unsigned int ADC_Avg(int channel){
    int sum = 0;
    short i;
    for (i = 0 ; i < 8; i++){
        sum += ADC_Get_Sample(channel);
        Delay_us(50);
    }
    return (sum/ 8);
}
```

```
void main(){
```

```
//=====//Αρχικοπιισι Kataxoriton//=====
```

```
CMCON = 0x07; \\Απενεργοποίηση καναλιού  
PORTB = 0; //καθαρισμός πορτών  
TRISB = 0;  
PORTA = 0;  
TRISA = 0x07; \\Καθορισμός δυαδικής τιμής για το ποιές θύρες θα είναι αναλογικές  
σύμφωνα με τον πίνακα από datasheet του PIC..... 0000 0111 3xADC  
PORTC = 0; \\καθαρισμός πορτών  
TRISC = 0;  
INTCON = 0x0;
```

```
//ADCON0 = 0x81; //1000 00X1  
ADCON1 = 0xC3; //11XX 0011  
ADC_Init();  
PWM2_Init(5000); \\Συχνότητα παλμού για τα tranzistors  
PWM1_Init(5000);
```

```
oldwatt = 0; \\μηδενισμός των μεταβλητών  
Du = 0; \\για τον υπολογισμό της νέας  
Du2=0; \\και της παλαιάς ισχύος(βασικό για το MPPT)
```

```
while(1){ \\Άπειρη loop
```

```
    PWM2_Start(); \\ξεκίνημα παλμών  
    PWM2_Set_Duty(Du);  
    PWM1_Start();  
    PWM1_Set_Duty(Du2);
```

```
//=====//Μετατροπή αναλογικής λήψης σε ψηφιακή=====
```

```
ch0 = ADC_Avg(0)*15.62; //για την AN0-pin 2  
ch2 = ADC_Avg(2)*15.62; //Για την AN2-pin4
```

```
//=====//Υπολογισμός των ampere μέσω της διαφοράς τάσης στα άκρα  
της βατικής αντίστασης//=====
```

```
if (ch0 > ch2){  
    amp = (ch0 - ch2)*1.1;  
  
}else{  
    amp = (ch2 - ch0)*1.1;  
  
}  
if (amp < 20){ //τιμή σε mili ampere
```



```

    amp = 0; //γίνεται 0 διότι ουσιαστικά μετράει θόρυβο
}

//=====//Υπολογισμός των watt μέσω της AN0//=====

watt = ch0 * amp;

//=====//Λειτουργία φόρτισης - MPPT//=====

if (ch0 < v13_8 && ch0 >= v13_65){ \\\An η μπαταρία έχει τάση κοντά στην
μέγιστη καθορισμένη
    Du = 100;          // τότε έχουμε μικρότερη φόρτιση.Αυτό λόγω μέγιστης
τάσης μπαταρίας
}else if (ch0 < v13_65 && ch0 > v5 ){ \\\Αλλιώς υπολογίζουμε το σημείο MPP

    if ( watt > oldwatt ){ \\\Εάν η ισχύς είναι μεγαλύτερη της προηγούμενης
        Du++; \\\τότε αυξάνουμε ισχύ
    }else if(watt < oldwatt ){ \\\αλλιώς εάν είναι μικρότερη
        Du--; \\\ τότε μειώνουμε ισχύ.
    }
    oldwatt = watt; \\\εναλλαγή της παλιάς ισχύος με την καινούρια

}else{ \\\Σε κάθε άλλη περίπτωση(μέγιστη επιτρεπεί τάση μπαταρίας )

    Du = 0; \\\Η φόρτιση να είναι 0.Δηλαδή κλειστό το τρανζιστορ του
φωτοβολταϊκο'υ
}
    Delay_us(100);

if (ch0 < v10_8){ \\\Εάν η τάση είναι μικρότερη της καθορισμένης τιμής
    Du2 = 0; \\\τότε αποκόπτεται το φορτίο.Δηλαδή το τρανζιστορ της λάμπας
είναι κλειστό
}else { \\\Σε κάθε άλλη περίπτωση το τρανζιστορ
    Du2= 245; \\\παραμένει ανοιχτό,άρα η λάμπα ανάβει
}

}
}
}

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1)Maximum point tracker .
http://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking
- 2)Μικροελεγκτές PIC.
Σταμάτης Αλατσαθιανός ΤΕΙ Πειραιά Εκδόσεις Γκιούρδας
- 3)Φωτοβολταικά συστήματα.
http://greenenergia.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=46
- 4)Ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών.
<http://www.paizanos.gr/index.php?cat=3&subcat=24>
- 5)Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων.
<http://www.aenaon.net/gr/content/view/352/28/>
- 6)Διπλωματική εργασία Συσσωρευτές στα Φωτοβολταικά Συστήματα Τσιουμπής Ελένης.
- 7)Ανάπτυξη μοντέλου ισοδύναμου φωτοβολταϊκού σταθμού. Υλοποίηση ανιχνευτή σημείου μέγιστης απόδοσης – MPP tracker των ΓΕΩΡΓΙΟΣ Σ. ΛΕΝΤΖΑΣ και ΘΩΜΑΣ Κ. ΜΠΟΥΜΠΟΥΛΗΣ.
- 8)Σχεδιασμός και διερεύνηση της απόδοσης φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη των Γάλλου Παρασκευής και Ζαμανάκου Μαρία-Θεσσαλονίκη 2011
- 9)Ηλιακή ενέργεια και Ηλικάκοι συλλέκτες.Σημειώσεις εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας ΤΕΙ Κρήτης του Δημήτρη Αλ. Κατσαπρακάκη
- 10)Διπλωματική εργασία πάνω στην Σχεδίαση Ανιχνευτή Σημείου Μέγιστης Ισχύος Φωτοβολταϊκών Συστημάτων του Βασίλειου Ε. Ρενιέρη
- 11)Maximum Point Tracker
<http://www.knowyourplanet.org/learning-zone/solarpedia/mppt-maximum-power-point-tracking-1>
- 12)Lead acid batteries
http://en.wikipedia.org/wiki/Lead-acid_battery#Sulfation_and_desulfation
- 13)Ηλιακή ενέργεια
http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%A E_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1

14) Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων

http://www.solar-wind.co.uk/pv_solar_panels.html

15) Φωτοβολταϊκά συστήματα

http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C_%CF%83%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1

16) Battery Definition

http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω είναι ο πίνακας με τον οποίο βρήκαμε την τιμή της πόρτας TRISA η οποία καθορίζει ποιές είσοδοι του επεξεργαστή μας θα είναι αναλογικές και ποιές ψηφιακές

PCFG <3:0>	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	Vss	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	Vss	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	Vss	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	AN3	Vss	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	Vss	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	AN3	Vss	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	Vss	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	Vss	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	Vss	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Analog input D = Digital I/O

C/R = # of analog input channels/# of A/D voltage references

Επίσης παρακάτω έχουμε αναλυτικά τους ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή μας.

28-Pin PDIP, SOIC, SSOP

