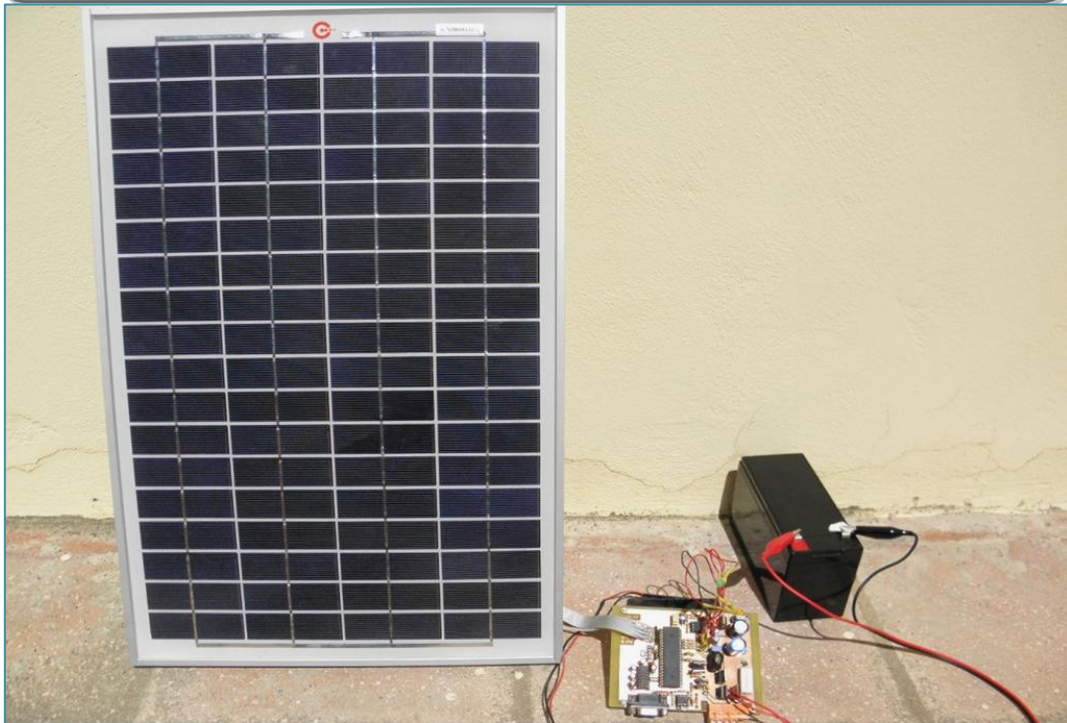




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υλοποίηση Ανιχνευτή Σημείου Μέγιστης Ισχύος  
(Maximum Power Point Tracking – MPPT)



Επιβλέποντες καθηγητές:  
Αριστείδης Κυπράκης  
Μιχάλης Σφακιωτάκης

Σπουδαστής:  
Έλσον Μπάρδι

Ηράκλειο  
Απρίλιος 2011



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Καθηγητές μου κ. Αριστείδη Κυπράκη, Research Fellow, University of Edinburgh, και Μιχάλη Σφακιωτάκη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Κρήτης, για τις υποδείξεις τους, τις συμβουλές τους και γενικά την καθοδήγησή τους κατά την μελέτη, σύνθεση και παρουσίαση της εργασίας μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου (Αντρέας, Γιάννης, Γιώργος, Κώστας Χ 2, Κυριάκος, Μαρία Χ 2, Μαρίνος, Μιχάλης, Σουέλα, Χρήστος) για την ύπαρξή τους στη ζωή μου.

**Και το πιο μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου.**

Μπάρδι Έλσον

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	3
1.1 Εισαγωγή .....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ</b> .....	6
2.1 Εισαγωγή .....	6
2.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	7
2.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και οι ημιαγωγοί .....	9
2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	11
2.5 Καμπύλη I-V .....	12
2.6 Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών .....	14
2.7 DC – DC Μετατροπείς .....	16
2.8 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT) .....	18
2.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια .....	21
2.10 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	23
2.11 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	26
2.12 Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα .....	27
2.13 Σύνοψη .....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ</b> .....	29
3.1 Εισαγωγή .....	29
3.2 Αρχή λειτουργίας και είδη συσσωρευτών .....	29
3.2.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή .....	30
3.2.2 Τύποι συσσωρευτών .....	31
3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη, όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών .....	32
3.3.1 Χωρητικότητα .....	32
3.3.2 Φόρτιση - Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης .....	33
3.3.3 Αυτοεκφόρτιση .....	35
3.4 Ελεγκτές (ρυθμιστές) φόρτισης των μπαταριών .....	36
3.4.1 Η βασική αρχή.....	36
3.4.2 Προστασία υπερφόρτισης.....	37
3.4.3 Προστασία βαθιάς εκφόρτισης.....	37

3.4.4 Προστασία από τις εξωτερικές επιδράσεις .....	38
3.4.5 Κύριοι τύποι ελεγκτών φόρτισης .....	38
3.4.6 Ελεγκτής (Ρυθμιστής) φόρτισης συσσωρευτών τύπου MPPT .....	40
3.5 Σύνοψη .....	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ-MAXIMUM POWER POINT TRACKERS .....</b>	<b>44</b>
4.1 Εισαγωγή .....	45
4.2 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb and Observer P&O) .....	47
4.3 Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental Conductance) .....	51
4.4 Παρασιτικής χωρητικότητας (Parasitic Capacitance) .....	53
4.5 Σταθερής τάσης (Constant Voltage) .....	54
4.6 Σύνοψη .....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ MPPT ΜΕ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ AVR ATmega16 .....</b>	<b>58</b>
5.1 Εισαγωγή .....	58
5.2 Ανάλυση και Επεξήγηση της Διάταξης .....	59
5.3 Ανάπτυξη του προγράμματος της εφαρμογής .....	68
5.3.1 CodeVision AVR .....	68
5.4 Υλοποίηση του αλγορίθμου ανίχνευσης του MPP .....	69
5.5 Σύνοψη .....	80
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....</b>	<b>81</b>
6.1 Εισαγωγή .....	81
6.2 Μετρήσεις για την εξακρίβωση της λειτουργίας του MPPT .....	83
6.3 Μετρήσεις του συνολικού συστήματος .....	88
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>95</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>97</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>100</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγή

Η **ηλεκτρική ενέργεια** αποτελεί θεμέλιο λίθο για τον άνθρωπο και την σύγχρονη κοινωνία. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται συνήθως σε μεγάλες θερμοηλεκτρικές μονάδες με πολλαπλές μετατροπές. Σαν καύσιμο χρησιμοποιείται το κάρβουνο, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο ή ραδιενεργό ουράνιο για την παραγωγή του ατμού. Στην συνέχεια ο ατμός κινεί ατμοστρόβιλους συνδεδεμένους με γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Μεγάλο μέρος της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια όπου για την κίνηση των γεννητριών χρησιμοποιούνται υδροστρόβιλοι. Οι παραπάνω πηγές ενέργειας όμως έχουν περιορισμένες προοπτικές, καθώς έχουν και μεγάλες απώλειες κατά την παραγωγή και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, εκτός από την περίπτωση των υδροηλεκτρικών εργοστασίων, είναι περιορισμένες.

Τα συμβατικά καύσιμα δηλαδή (λιγνίτης, κάρβουνο, πετρέλαιο κλπ), μειώνονται σταδιακά, ενώ η υδραυλική ενέργεια που χρησιμοποιείται στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια είναι ποσοτικά καθορισμένη και γεωγραφικά εντοπισμένη ώστε δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι λύνει γενικά το ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη. Τα πυρηνικά καύσιμα τέλος, μπορεί να έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια όμως ο αυξημένος κίνδυνος, που συνεπάγεται με την χρήση τους, αποτελεί σοβαρό λόγο για την κατάργησή τους.

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος επίσης από την χρήση των συμβατικών καυσίμων αλλά και της πυρηνικής ενέργειας έχει είδη γίνει αισθητή στο πλανήτη μας («φαινόμενο του θερμοκηπίου», αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κλπ). Για να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα η επιστημονική κοινότητα αλλά και οι εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν, εδώ και αρκετά χρόνια, στραφεί στην χρήση των «ήπιων» ή αλλιώς **ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ)**.

Ένα από τα σημαντικά κομμάτια των ΑΠΕ είναι η **φωτοβολταϊκή ενέργεια** όπου με την χρήση των Φ/Β γεννητριών (συστοιχιών) γίνεται άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην εργασία αυτή συγκεκριμένα θέλουμε να πραγματοποιήσουμε ένα κύκλωμα

το οποίο να εκμεταλλεύεται, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, την ενέργεια που παράγει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στην συνέχεια την ενέργεια αυτή την αποδίδουμε σε μια μπαταρία ώστε αυτή να φορτιστεί στην μέγιστη ισχύ που αποδίδει η συστοιχία αυτή. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που έχουν αυτή την δυνατότητα ονομάζονται **κυκλώματα Ανίχνευσης σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracker – MPPT)**.

Τα κυκλώματα MPPT ανιχνεύουν δηλαδή την παραγόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό στοιχείο και με διάφορες τεχνικές ελέγχου και υπολογισμού απορροφούν την μέγιστη ισχύ από αυτή και την αποδίδουν στο εκάστοτε φορτίο.

Για την πραγματοποίηση της κατασκευής του MPPT χρησιμοποιείτε ένας μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου τύπου Buck και ο **μικροελεγκτής ATmega16** της εταιρίας Atmel. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή έγινε διότι έχει πολλές δυνατότητες που είναι απαραίτητες για εφαρμογές ελέγχου, όπως κυκλώματα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), χρονιστές (Timers) κλπ. Έχει επίσης χαμηλή κατανάλωση και χαμηλό κόστος αγοράς. Παρακάτω αναφέρουμε μια σύντομη παρουσίαση του περιεχομένου των κεφαλαίων.

Στο **κεφάλαιο 2** γίνεται περιγραφή της αρχής λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Επίσης, γίνεται μια αναφορά στον μετατροπέα τύπου Buck και σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του MPPT.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η λειτουργία και οι δυνατότητες των ηλεκτρικών συσσωρευτών, δεδομένης της σημασίας τους στην αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αναφέρονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά που διέπουν την λειτουργία τους. Επίσης γίνεται σύντομη αλλά περιεκτική περιγραφή των ελεγκτών φόρτισης των συσσωρευτών από τους πιο απλούς μέχρι και τους πιο σύνθετους. Αναφέρουμε τους κύριους ελεγκτές φόρτισης και περιγράφουμε τέλος τον ελεγκτή (ρυθμιστή) φόρτισης τύπου MPPT.

Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται περιγραφή των τεσσάρων πιο χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και αναφέρουμε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλγορίθμων αυτών.

Στο **κεφάλαιο 5** περιγράφεται αναλυτικά η κατασκευή που πραγματοποιήθηκε καθώς και το πρόγραμμα υλοποίησης του MPPT με τον μικροελεγκτή AVR ATmega16.

Στο **κεφάλαιο 6** κατασκευάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του P&O αλγορίθμου σύμφωνα με τις μετρήσεις που έχουμε πραγματοποιήσει και αναφέρουμε πιθανές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 7** αναφέρουμε τα συμπεράσματα που καταλήξαμε όσον αφορά την χρησιμότητα του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος - MPPT που κατασκευάσαμε.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Στις ημέρες μας η ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί σημαντικό κομμάτι σε μια σύγχρονη κοινωνία. Η παραγωγή της πραγματοποιείται κυρίως σε μεγάλες θερμοηλεκτρικές και υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Χρόνο με το χρόνο όμως και όσο οι απαιτήσεις των ανθρώπων για ενέργεια αυξάνονται τόσο η παραγωγή της μειώνεται διότι τα συμβατικά αυτά καύσιμα έχουν περιορισμένη ποσότητα. Επίσης οι αρνητικές επιπτώσεις της παραπάνω μορφής ενέργειας στο περιβάλλον και στον άνθρωπο είναι γνωστές (φαινόμενο το θερμοκηπίου, τρύπα του όζοντος κλπ).

Για τους παραπάνω λόγους κυρίως, ο άνθρωπος προσπάθησε να καταφύγει σε άλλες μορφές ενέργειας που και φιλικές προς το περιβάλλον θα είναι και επίσης η διαθεσιμότητά τους θα είναι μεγάλη. Έτσι στράφηκε στις λεγόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Ένα από τα μεγαλύτερα κομμάτια των ΑΠΕ είναι η Φωτοβολταϊκή Ενέργεια. Η δυνατότητα της εύκολης, άμεσης καθώς και αποδοτικής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική διαπιστώθηκε όταν ανακαλύφθηκε το 1839 από τον **Ανρί Μπεκερέλ (Becquerel)** το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (**Φ/Β φαινόμενο**). Παρακάτω γίνεται πλήρης περιγραφή του Φ/Β φαινομένου αλλά περιληπτικά, πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την «απόδραση» των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

Η μέθοδος αυτή της μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει πολλά **πλεονεκτήματα**. Τα κυριότερα αναφέρονται παρακάτω:

- Είναι φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και είναι δεν κοστίζει τίποτα.
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι αθόρυβη.

- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας.
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα της μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών.
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου κλπ.

Ως βασικό **μειονέκτημα** στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι το αρχικό κόστος εγκατάστασης, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Μια γενική μέση ενδεικτική τιμή είναι 4000 ευρώ ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (kW) ηλεκτρικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 1,5 έως 3,5 κιλοβάτ, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Το ποσό αυτό, ωστόσο, μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το Φ/Β σύστημα θα συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25 χρόνια [1].

Στο κεφάλαιο αυτό τέλος θα ασχοληθούμε με την τεχνολογία του φωτοβολταϊκού κυττάρου, την ηλεκτρική συμπεριφορά του πάνελ καθώς και την χαρακτηριστική **καμπύλη I – V** σύμφωνα με την οποία μεταβάλλεται η τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ακόμη, θα αναφερθούμε στον μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης τύπου Buck καθώς και στον **ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)**. Τέλος θα γίνει σύντομη περιγραφή στις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούν την φωτοβολταϊκή ενέργεια και στην κατάσταση που επικρατεί στην χώρα μας όσον αφορά την ανάπτυξη και την επέκταση την φωτοβολταϊκής ενέργειας.

## 2.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

Το Φ/Β στοιχείο κατασκευάζεται κυρίως από ημιαγώγιμα υλικά και ανάλογα με το είδος της πρόσμιξης που θα χρησιμοποιηθεί οι ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται είτε τύπου – n είτε ως τύπου – p. Οι ημιαγωγοί τύπου – p διαθέτουν περίσσια θετικών φορτίων ή οπών, ενώ στους ημιαγωγούς τύπου – n τα αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια) υπερισχύουν. Όταν αυτά τα δύο στρώματα των ημιαγωγών έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, στο σημείο που ενώνονται δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο λόγω της διαφορετικότητας του φορτίου που περιέχουν οι δύο τύποι ημιαγωγών. Εάν με κάποιον τρόπο οι δύο αυτές επιφάνειες συνδεθούν μέσω κάποιον ακροδεκτών και ανάμεσά τους παρεμβληθεί μια αντίσταση φορτίου, τότε τα ηλεκτρόνια τύπου – p θα κινηθούν προς τον ημιαγωγό τύπου – n και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος [2].

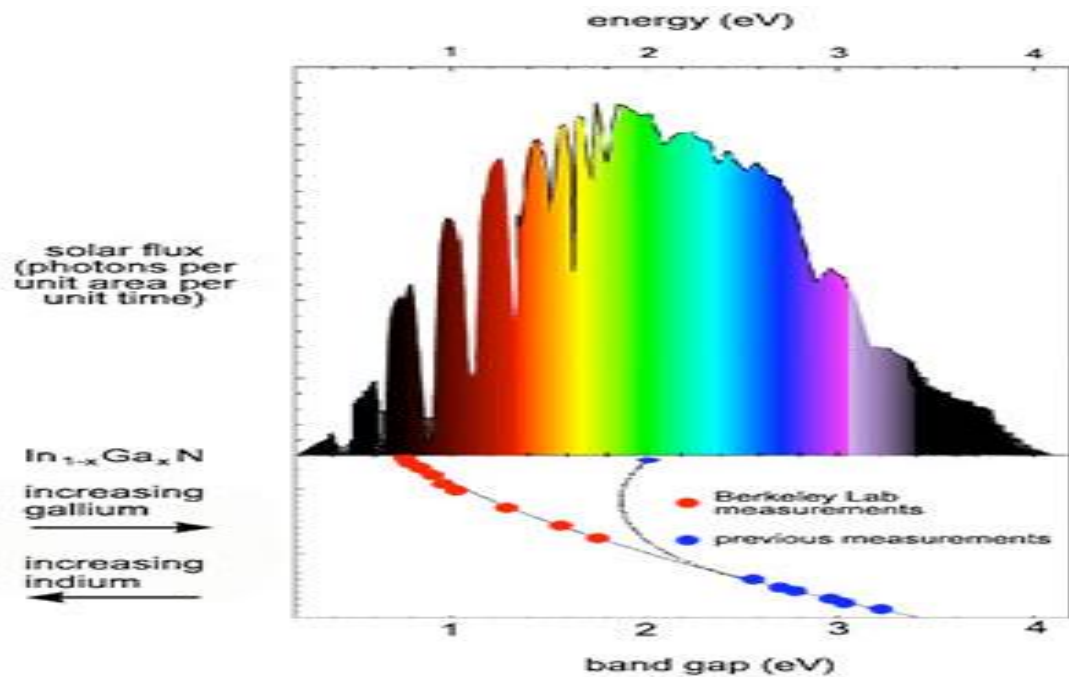
Ως **συντελεστής απόδοσης** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του:

$$n = \frac{P_{out_{max}}}{P_{in}} \quad (2.1)$$

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 ενέργειάς 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 προσπάθειες ερευνητικών εργαστηρίων οδηγούν στην αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Συγκεκριμένα στο ARC Photovoltaic Centre of Excellence του Πανεπιστημίου New South Wales της Αυστραλίας επετεύχθη ένα νέο παγκόσμιο ρεκόρ με φωτοβολταϊκά στοιχεία που αγγίζουν το θεωρητικό 29%. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αναφερόμαστε σε στοιχεία πυριτίου πρώτης γενιάς [3].

Αυτή η διάκριση γίνεται γιατί έρευνες στην Αριζόνα των ΗΠΑ [4] απέδειξαν ότι αν κατασκευαστεί Φ/Β στοιχείο από στρώσεις διάφορων ημιαγωγίμων 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 Ritsumeikan University της Ιαπωνίας, ανακάλυψαν ότι το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού indium nitride δεν είναι 2 eV όπως είχε καταγραφεί, αλλά 0.7 eV [5]. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα για μετατροπή όλου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, από το υπέρυθρο μέχρι και το υπεριώδες. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 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.

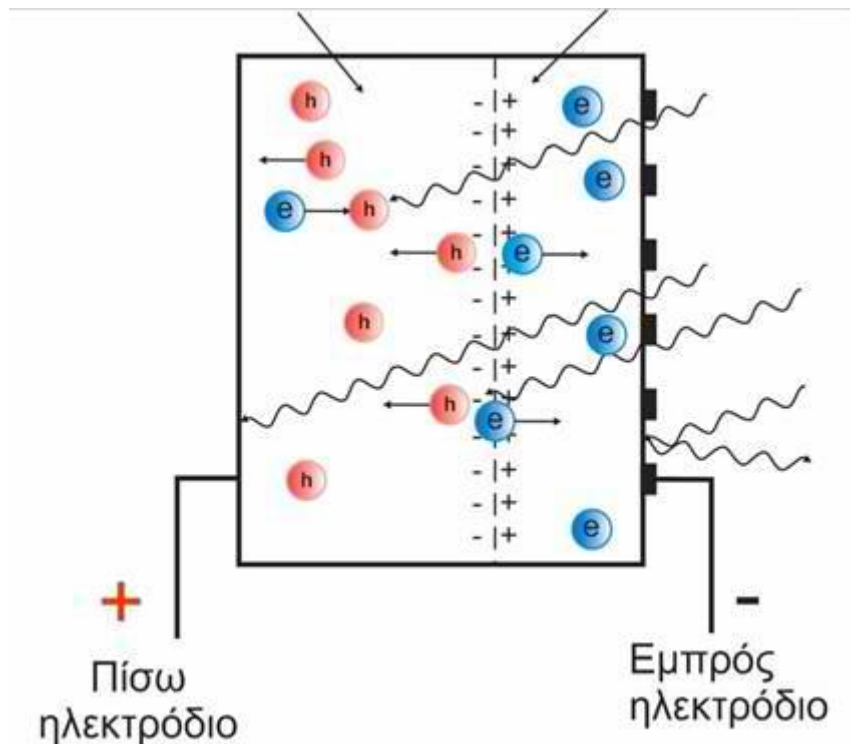


**Σχήμα 2.1** Με την κατασκευή φ/β στοιχείων από στρώσεις υλικών μπορεί να αξιοποιηθεί πολύ μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος [5].

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

### 2.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και οι ημιαγωγοί

Όπως είναι γνωστό τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανααυθενθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου (Σχήμα 2.2).



**Σχήμα 2.2** Το φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.

Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια,  $e^-$ ) ή προς τα πίσω (οι οπές,  $h^+$ ), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλος μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

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. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία **πηγή ηλεκτρικού ρεύματος** που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικό ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ένας ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε

φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται και από διόδους άλλων. Π.χ. από διόδους schottky που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο [6].

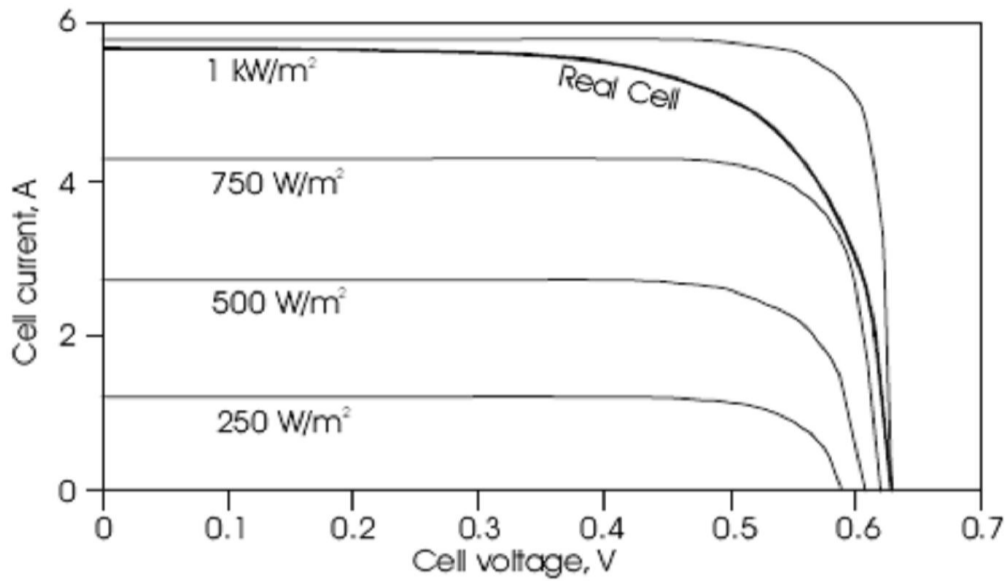
## 2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι μια **ηλεκτρική πηγή**, η οποία, στην ιδανική της συμπεριφορά, έχει την ιδιότητα να κρατάει σταθερή την τιμή του ρεύματος σε ένα φορτίο (μια αντίσταση), ανεξάρτητα από την τιμή της. Αυτό πραγματοποιείται προσαρμόζοντας την τάση στα άκρα του φορτίου ώστε το ρεύμα να μένει σταθερό.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο δεν βρίσκεται υπό την επίδραση φωτός μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια από τη χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου. Όταν το στοιχείο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργούνται ζεύγη οπών - ηλεκτρονίων υπό την επίδραση των ατόμων του στοιχείου με τα φωτόνια της ηλιακής δέσμης. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται προκαλεί το διαχωρισμό των οπών από τα ηλεκτρόνια, οδηγώντας τα ηλεκτρόνια στην περιοχή  $n$  της επαφής και τις οπές στην περιοχή  $p$  της επαφής. Το σχήμα 2.3 δείχνει την χαρακτηριστική τάσης ρεύματος (καμπύλη I-V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ρεύμα καθώς και η τάση του στοιχείου εξαρτώνται από το επίπεδο της ακτινοβολίας. Στην ιδανική περίπτωση, η εξίσωση που συνδέει την τάση με το ρεύμα είναι η εξής:

$$I = I_1 - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Όπου  $I_1$  είναι η συνιστώσα του ρεύματος στο στοιχείο λόγω των φωτονίων,  $q = 1.6 \times 10^{-9} \text{ Cb}$ ,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ j/K}$  και  $T$  είναι η θερμοκρασία του στοιχείου σε βαθμούς κέλβιν (K). Η εξίσωση (2.2) μας δίνει μια προσέγγιση της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου [7].



**Σχήμα 2.3** Καμπύλες I-V για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ).

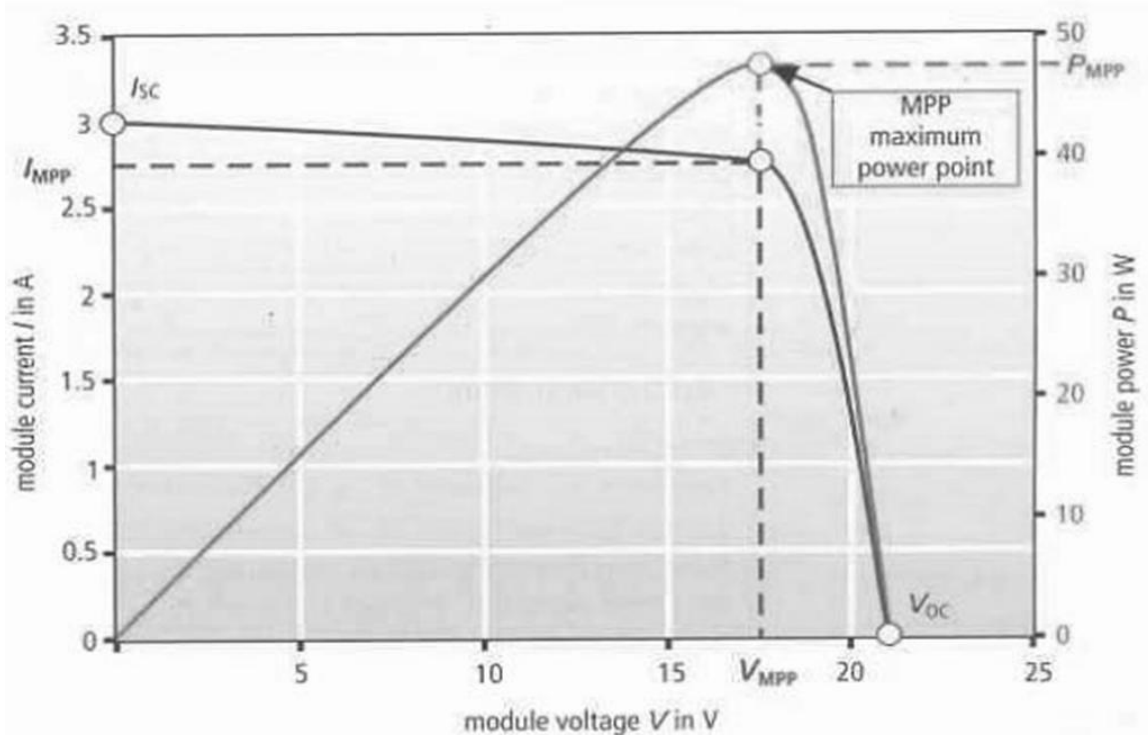
Όπως παρατηρούμε και από το παραπάνω σχήμα, όσο η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται τόσο το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος του Φ/Β στοιχείου μειώνονται άρα και η παραγόμενη ισχύς που αποδίδει το Φ/Β στοιχείο θα μειωθεί.

## 2.5 Καμπύλη I-V

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το Φ/Β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που παρέχουν στο κύκλωμα, ακόμα και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Επίσης ένας παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται 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 τάσης ανοιχτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ) και όλο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του Φ/Β στοιχείου.

Για σταθερές λοιπόν συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό στοιχείο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του στοιχείου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες τιμές που

αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (μέγιστη τιμή ρεύματος  $I_{sc}$  και μηδενική τάση – κατάσταση βραχυκυκλώματος) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση - με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης  $V_{oc}$ ), όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.4** Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η ισχύς που αποδίδει το Φ/Β στοιχείο, η οποία μεγιστοποιείται για τάση και ρεύμα που αντιστοιχούν στο σημείο του «γονάτου» [8]:

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (2.3)$$

Παρατηρούμε ότι το Φ/Β στοιχείο παράγει μηδενική ισχύ για μηδενική τάση και ένταση, ενώ παράγει μέγιστη ισχύ για τάση που αντιστοιχεί στο σημείο γονάτου της I-V χαρακτηριστικής [9]. Για το λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά συστήματα σχεδιάζονται να λειτουργούν κοντά στο σημείο γονάτου και με ειδικά κυκλώματα ελέγχου (MPPT) «αναγκάζουν» το Φ/Β στοιχείο να δουλεύει στο σημείο αυτό.



## 2.6 Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών

Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων είναι πολύ μικρή και γι' αυτό έχει μεγάλη σημασία να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που θα τοποθετηθεί. Γι' αυτόν τον σκοπό ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα τα οποία εξασφαλίζουν την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ήλιου και τη βέλτιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού.

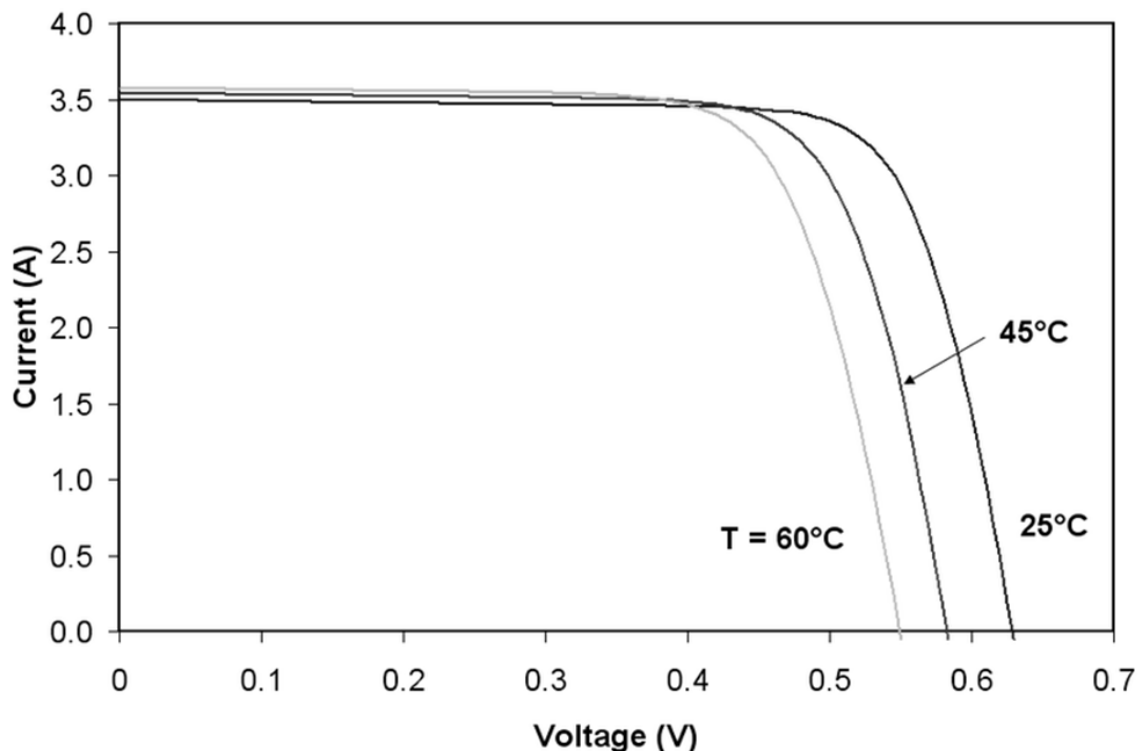
Τέσσερις είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων [10]:

1. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους
  2. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
  3. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και
  4. Το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη I-V
- **Θερμοκρασία.** Σημαντικός παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών είναι η θερμοκρασία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων όπως αναφέραμε και παραπάνω. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, και αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ) και του συντελεστή πλήρωσης (FF).
  - **Ηλιακή ακτινοβολία:** Ο ήλιος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τη γη, και ανάλογα με το που βρίσκεται το σημείο που θα τοποθετηθεί το Φ/Β πλαίσιο, προσδιορίζεται κατάλληλα και ο προσανατολισμός του. 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 να έχουμε 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 το Ηράκλειο της Κρήτης π.χ. είναι ίση με  $35,34^{\circ}$ . Για μεγαλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι καλύτερο η κλίση των συλλεκτών να μη

μένει σταθερή όλο το χρόνο, αλλά να προσαρμόζεται κατάλληλα, τουλάχιστον δύο φορές το χρόνο (θερινή και χειμερινή περίοδο).

- **Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας:** Το ρεύμα που προκαλείται στο Φ/Β στοιχείο από τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης. Η γωνία πρόσπτωσης μπορεί να ελεγχθεί με τη βοήθεια των συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου (solar trackers) ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος.
- **Το σημείο λειτουργίας στην I – V:** Για να είναι μέγιστη η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου αυτό θα πρέπει να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης I-V κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Το σημείο αυτό είναι το σημείο του γονάτου της χαρακτηριστικής I – V, εκεί δηλαδή όπου το εμβαδόν κάτω από την χαρακτηριστική καμπύλη (βλέπε Σχήμα 2.4) είναι μέγιστο.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε επίσης την μεταβολή των **καμπυλών I-V** με την θερμοκρασία. Όπως φαίνεται, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του πλαισίου, η τάση μειώνεται και το ρεύμα αυξάνεται ελάχιστα:



**Σχήμα 2.5** Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε καθαρά την διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν έχουμε αλλαγή της θερμοκρασίας [11].

Η αξιολόγηση των φ/β πλαισίων γίνεται στις **Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής** (Standard Test Conditions-STC) οι οποίες επιτυγχάνονται σε θερμοκρασία 25°C, ακτινοβολούμενο ηλιακό επίπεδο 1000 W/m<sup>2</sup> και μάζα αέρα AM 1,5 φασματικής διανομής. Δεδομένου ότι αυτές οι συνθήκες είναι όχι πάντα χαρακτηριστικές για το πώς τα πλαίσια λειτουργούν στο πεδίο εγκατάστασης, η πραγματική απόδοση εκτιμάται ότι είναι συνήθως 85 έως 90 τοις εκατό της πρότυπης δοκιμαστικής κατάστασης (STC) [7].

## 2.7 DC – DC Μετατροπείς

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τους **μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση** (DC – DC converter). Ονομάζονται έτσι διότι μετατρέπουν μια συνεχή τάση στην είσοδο σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής και κάποιες φορές διαφορετικής πολικότητας στην έξοδο. Αποκαλούνται επίσης και αλλιώς **τροφοδοτικά** διότι η πιο συνήθης εφαρμογή είναι η τροφοδοσία αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων. Άλλη σημαντική εφαρμογή των μετατροπέων αυτών είναι η **φόρτιση συσσωρευτών** και γι αυτό το λόγο οι διατάξεις αυτές περιέχουν πάντα έναν (τουλάχιστον) ημιαγωγικό διακόπτη (δίοδο, Mosfet κλπ) για να είναι η δυνατή η μετατροπή της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα.

Υπάρχουν 2 τεχνικές για την κατασκευή και τον έλεγχο των μετατροπέων (τροφοδοτικών) αυτών:

- **Η τεχνική των γραμμικών μετατροπέων (τροφοδοτικών)**, όπου το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα συμπεριφέρεται σαν μια ρυθμιζόμενη αντίσταση διότι λειτουργεί στην γραμμική περιοχή και
- **Η τεχνική των διακοπτικών μετατροπέων (τροφοδοτικών)**, όπου εδώ το ημιαγωγικό στοιχείο λειτουργεί σαν διακόπτης.

Στους DC – DC μετατροπείς ο έλεγχός τους πραγματοποιείται με τις δύο παρακάτω τεχνικές:

- **Η τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών** (Pulse Width Modulation – PWM). Με την τεχνική αυτή διατηρούμε σταθερή την συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων και μεταβάλλουμε τον χρόνο αγωγής τους ενώ με την
- **Τεχνική της διαμόρφωσης της συχνότητας των παλμών** (Pulse Frequency Modulation – PFM) διατηρούμε σταθερό τον χρόνο αγωγής και μεταβάλλουμε την συχνότητα λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων.

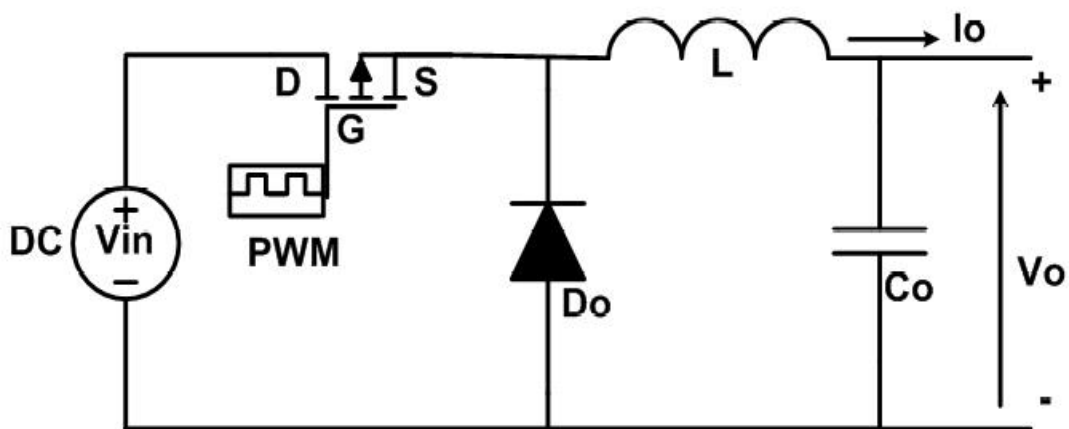
Οι βασικότερες **τοπολογίες των μετατροπέων** αυτών είναι:

1. Ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης εξόδου (Buck Converter), ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω,

2. Ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης εξόδου (Boost Converter) και
3. Ο μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης της τάσης εξόδου (Buck – Boost ή αλλιώς CUK).

### Ο DC – DC μετατροπέας Buck

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τύπου Buck, υποβιβάζει την τάση εισόδου και στην έξοδο βγάζει μια τάση χαμηλότερης τιμής και ανάλογα με τον χρόνο αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου, αυτή η τάση μπορεί να μεταβληθεί. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα αυτού:



Σχήμα 2.6 Κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα Buck.

Ο μετατροπέας αυτός, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ελέγχεται με την τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (PWM) και μπορεί να δουλέψει είτε σε **συνεχή αγωγή**, εάν το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης είναι μεγαλύτερο του μηδενός, είτε σε **ασυνεχή αγωγή**, εάν το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης παρουσιάζει διαστήματα όπου μηδενίζεται.

Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο (MOSFET) είναι σε κατάσταση αγωγής (διακόπτης κλειστός), η διόδος του σχήματος 2.9 πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο τόσο και στο πηνίο το οποίο φορτίζεται γραμμικά. Όσο το ημιαγωγικό στοιχείο είναι σε κατάσταση αποκοπής η αποθηκευμένη ενέργεια ρέει δια μέσου της διόδου [12].

Τέλος, για την ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα αυτού ορίζεται ο **λόγος κατάτμησης D** ως το πηλίκο του χρόνου αγωγής ( $t_{on}$ ) του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου προς της περίοδο ( $T_s$ ):

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.5)$$

## Ο μετατροπέας Buck και ο αλγόριθμος MPPT

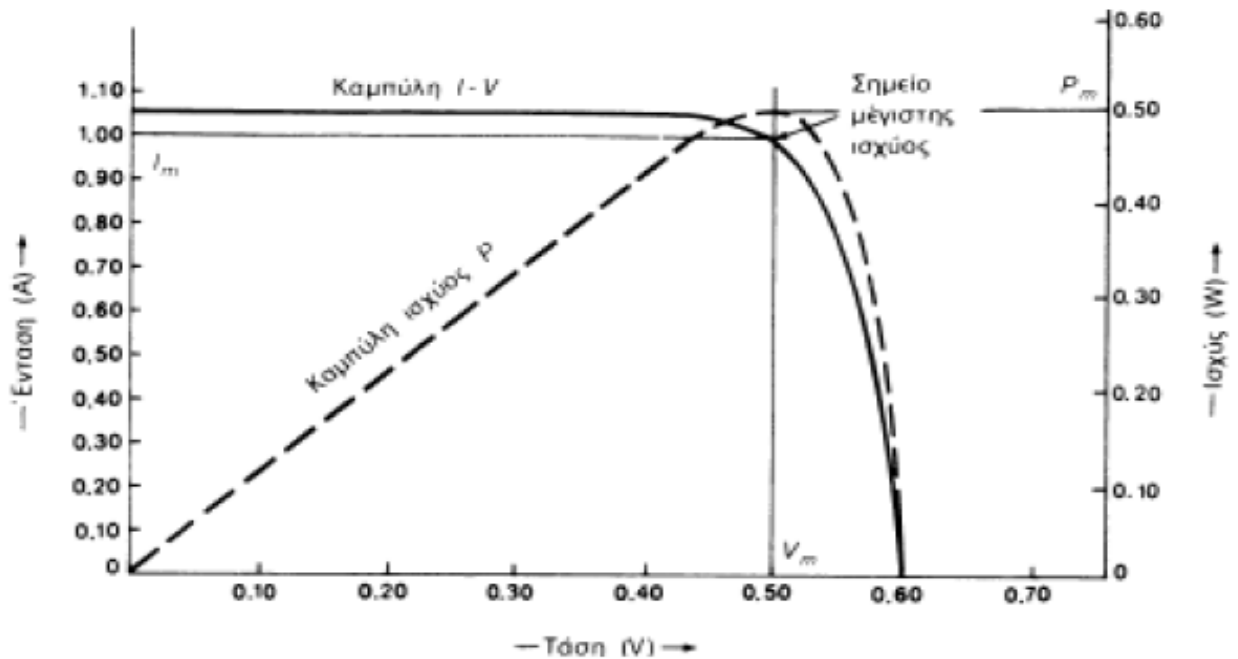
Κατά την διάρκεια της μεταβολής τόσο της θερμοκρασίας όσο και της ηλιακής ακτινοβολίας, η τάση που παράγεται από το πάνελ πρέπει να εφαρμοστεί σε μετατροπείς ισχύος οι οποίοι παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες που απαιτούνται ανάλογα με το είδος του φορτίου. Για να αυξήσουμε την απόδοση του Φ/Β συστήματος, είναι απαραίτητο ο έλεγχος του μετατροπέα να γίνεται με τρόπο που να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα δίνει την μέγιστη δυνατή ισχύ σε κάθε χρονική στιγμή, ανεξάρτητα από τις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας ή / και της θερμοκρασίας.

Στην παρούσα πτυχιακή για τον έλεγχο του μετατροπέα (μέσω του P – Mosfet) και επομένως και τις παραγόμενης ισχύος χρησιμοποιούμε τον μικροελεγκτή ATmega16. Μέσω του PWM σήματος που παράγει ο μικροελεγκτής και τον αλγόριθμο MPPT που υλοποιούμε, γίνεται ο πλήρης έλεγχος του μετατροπέα προκειμένου να αποδίδεται στην έξοδο η μέγιστη παραγόμενη ισχύς του πάνελ [13].

### **2.8 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)**

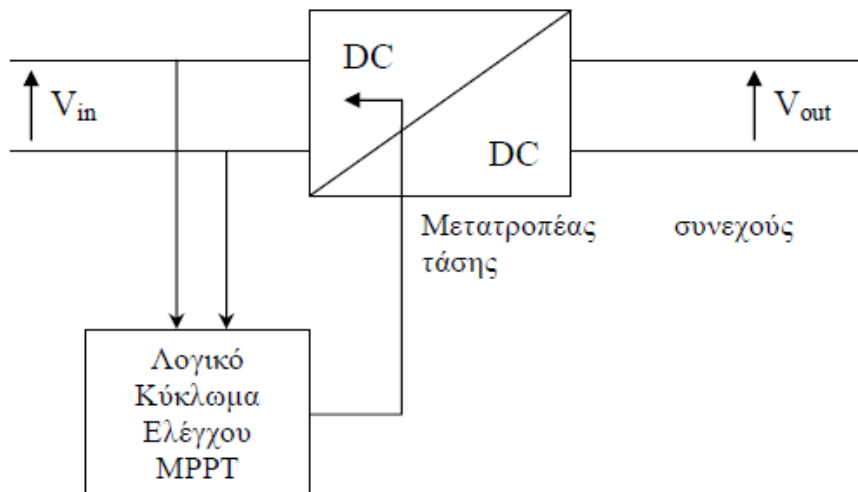
Η λειτουργία των **ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)** βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης λειτουργίας, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει το πάνελ τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό θα είναι και το σημείο μέγιστης απόδοσης του Φ/Β στοιχείου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εάν με την αύξηση της τάσης επέλθει μείωση της παραγόμενης ισχύος, τότε γίνεται μείωση της τάσης του πάνελ προς τα κάτω.

Η ένταση που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο όμως ζεύγος τάσης – έντασης, το Φ/Β στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό **κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του**. Στο σχήμα 2.10 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



**Σχήμα 2.7** Η συνεχής καμπύλη δείχνει την χαρακτηριστική I-V , σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ενώ η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται.

Για να επιτευχθεί λοιπόν η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται, όπως αναφέραμε και παραπάνω ένα κύκλωμα **DC/DC μετατροπέα**, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης όπου με την βοήθεια ενός κυκλώματος ελέγχου επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργία. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ο Buck μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης εξόδου. Ένα σχηματικό διάγραμμα της χρήσης του DC/DC μετατροπέα για την ανίχνευση και παρακολούθηση της μέγιστης ισχύς του Φ/Β πάνελ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.8** Απλοποιημένη διάταξη ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).

Όπως γνωρίζουμε, ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (2.6)$$

Εάν λόγω μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας ή της μεταβολή του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας πάνω στη καμπύλη I-V, τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και της έντασης κατά dV και dI αντίστοιχα. Η ισχύς επομένως στο καινούργιο σημείο λειτουργίας θα είναι τώρα:

$$P' = (V + dV) \cdot (I + dI) = V \cdot I + V \cdot dI + IdV \quad (2.7)$$

όπου αγνοήθηκαν οι όροι δεύτερης τάξης. Άρα η μεταβολή στην ισχύ προκύπτει τώρα:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + IdV \quad (2.8)$$

Στο σημείο της μέγιστης ισχύος η κλίση της καμπύλης ισχύος του Φ/Β στοιχείου μηδενίζεται, όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.10. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Rightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (2.9)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής (Zd) ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση (Zs).

Με βάση αυτή την παραπάνω εξίσωση υπάρχουν λοιπόν δυο διαφορετικοί τρόποι για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος:

- Μία μεταβολή του ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ παράλληλα 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, όπου:

$$Z_d = -Z_s \quad (2.10)$$

- Σύμφωνα με μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου, η τάση αυξάνεται όσο ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (2.11)$$

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν η τάση σταθεροποιείται. Εφαρμόζοντας μία από τις 2 παραπάνω μεθόδους, η λειτουργία του DC/DC μετατροπέα ρυθμίζεται ώστε η τάση να μεταβληθεί κατάλληλα προκειμένου να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος [14].

Εναλλακτικές μορφές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούν κυκλώματα με μνήμη ώστε να συγκρίνουν τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος, τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε προσαρμόζουν ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφέας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας **μικροελεγκτής** (συγκεκριμένα ο ATmega16 της εταιρείας Atmel) για την υλοποίηση ενός συστήματος MPPT, τα επιμέρους στοιχεία του οποίου αναλύονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

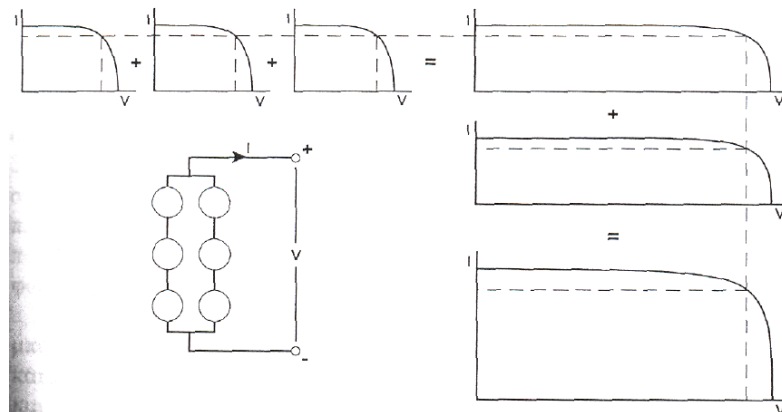
## 2.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η τάση και η ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις 0.5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μέχρι μόλις 0.4W περίπου.

Επίσης, είναι γνωστό ότι υπό ιδανικές συνθήκες δύο ή περισσότερες ίδιες πηγές τάσης σε σειρά προστίθενται όπως προστίθενται και δύο ή περισσότερες πηγές ρεύματος που συνδέονται παράλληλα. Για τον λόγο αυτό τα **φωτοβολταϊκά στοιχεία** που προορίζονται για τη συγκρότηση φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και



τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο ώστε να τροφοδοτούν στην έξοδο τους με την επιθυμητή από τον κατασκευαστή τάση και ισχύ.



**Σχήμα 2.9** I-V χαρακτηριστική φωτοβολταϊκού πλαισίου με στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα.

Όταν τα ηλιακά κύτταρα έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, η μέγιστη ισχύς που παίρνουμε από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει κάθε στοιχείο ξεχωριστά, επί τον αριθμό των στοιχείων. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου προσδιορίζεται από τον αριθμό συγκεκριμένων ηλιακών στοιχείων που συνδέονται σε σειρά και το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο (για κανονικά επίπεδα ηλιοφάνειας) προσδιορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων (ή ομάδα εν σειρά στοιχείων) που συνδέονται παράλληλα. Η χαρακτηριστική I-V καμπύλη ενός συνόλου ίδιων ηλιακών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα, προκύπτει με αντίστοιχο συνδυασμό των χαρακτηριστικών των επιμέρους στοιχείων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που κυκλοφορούν στο εμπόριο, αποτελούνται από τα στοιχεία τα οποία προστατεύονται από πάνω με φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού και από κάτω με φύλλο ανθεκτικού υλικού, συνήθως μετάλλου ή ενισχυμένου πλαστικού. Το πάνω και κάτω προστατευτικό φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους στεγανά και μόνιμα. Στο εμπόριο συνήθως τα πλαίσια παρουσιάζουν τάσεις από 4V ως 22V, ρεύμα 0.5A ως 2.5A, ισχύς αιχμής (παραγόμενη μέγιστη ισχύς όταν το πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος  $1\text{ kW/m}^2$ )  $2W_p$  ως  $60W_p$  και συντελεστή απόδοσης 6% ως 12%. Η εξέλιξη όμως στον τομέα αυτό δεν σταματά και τόσο η παραγόμενη ισχύς όσο και η απόδοση των φ/β πλαισίων μέρα με την μέρα αυξάνεται (με πρόσφατη νέα απόδοση των πλαισίων στα 21.5 % [30]). Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται στα πλαίσια δίοδοι για την προστασία (δίοδοι απομόνωσης, blocking diodes) και την βελτίωση της απόδοσης τους (δίοδοι παράκαμψης, bypass diodes). Πολύ σημαντικός είναι ο προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας σε

σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφεται με την κλίση και την αζιμούθια γωνία των πλαισίων.

Προφανώς η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε ένα συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις τα πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία πρόσπτωσης να είναι όσο το δυνατό μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Στο βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^\circ$  (προς νότο). Βέβαια η βέλτιστη κλίση, λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, είναι διαφορετική για κάθε εποχή οπότε και επιλέγεται ανάλογα την εφαρμογή, κάποια διαφοροποίηση στην κλίση από την παράλληλο.

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες βέβαια, είναι δυνατό εκτός από τα πάνελ να περιλαμβάνουν και επιπλέον εξοπλισμό και με βάση αυτόν κατατάσσονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες. Τις **απλές διατάξεις**, όπου τα πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερό σημείο και η συστοιχία δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία με τη φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας. Τις **διατάξεις με κινητά πλαίσια** που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά στοιχεία να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της μέρας. Τις **διατάξεις που με τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων** συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά στοιχεία. Για την αποφυγή υπερθέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνική ψύξη των στοιχείων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών [8].

## 2.10 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων

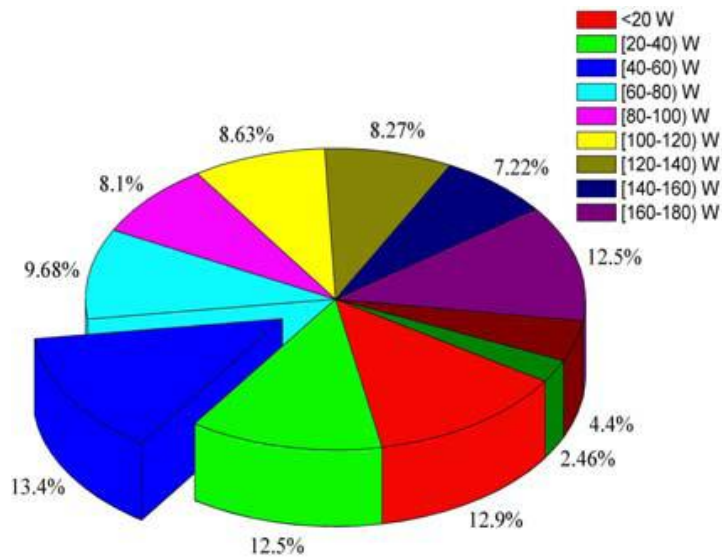
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αναπτυχθεί τόσο για μικρής, όσο και για μέσης και μεγάλης κλίμακας εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι θεωρητικά απεριόριστες δυνατότητες σύνδεσης στοιχείων και πλαισίων σε συνδυασμό με το μικρό πάχος και βάρος των τελευταίων διευρύνουν τα πεδία εφαρμογών και εμπλουτίζουν τους τρόπους εγκατάστασης των συστημάτων.

Γενικά για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της απόστασης από την κατανάλωση, χωρίς να επηρεάζεται συνήθως από ιδιομορφίες της θέσης που επιλέγεται. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τα πλαίσια είναι δυνατό είτε

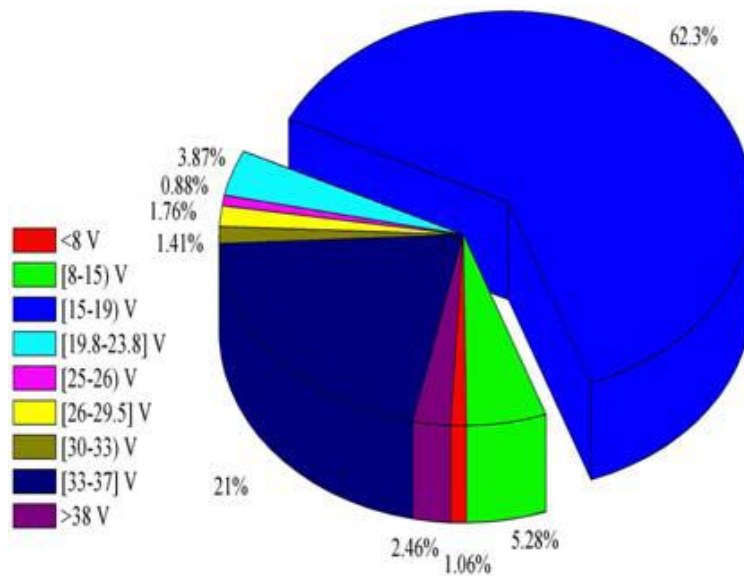
να τοποθετηθούν ελεύθερα στο έδαφος ή επάνω σε κτήρια ή σε άλλες κατασκευές είτε να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία ή υλικά επικάλυψης στεγών ή επένδυσης όψεων.

Δυο βασικές παράμετροι επηρεάζουν τον τρόπο τοποθέτησης σε σχέση με την απόδοση: η κλίση της επιφάνειας του πλαισίου και η θερμοκρασία του. Η άμεση κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια απορρόφησης μεγιστοποιεί την απόδοση του πλαισίου, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του την ελαττώνει. Η πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου πρέπει να αερίζεται επαρκώς, ώστε να αποφεύγεται αύξηση της θερμοκρασίας της.

Ακόμη, η διαφοροποίηση των Φ/Β πλαισίων πέρα από το υλικό κατασκευής τους, συντελείται βάσει των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα όλοι οι κατασκευαστές δίνουν για κάθε Φ/Β πλαίσιο ένα πίνακα στον οποίο αναφέρονται οι τιμές της μέγιστης δυνατής αποδιδόμενης ισχύος  $P_{MP}$ , της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$ , του ρεύματος βραχυκυκλώματος  $I_{SC}$  καθώς επίσης και οι τιμές της τάσης  $V_{MP}$  και του ρεύματος  $I_{MP}$  στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Τα μεγέθη αυτά μετρούνται για συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (θερμοκρασία  $25^{\circ}C$  και ακτινοβολία  $1000/m^2$ ). Από αυτά, εκείνα που θεωρούνται ιδιαίτερης σημασίας προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη Φ/Β γεννήτρια για την εκάστοτε εφαρμογή είναι η μέγιστη δυνατή αποδιδόμενη ισχύς και η τιμή της τάσης εξόδου αυτής στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Για την κατηγοριοποίηση των Φ/Β πλαισίων με γνώμονα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη, διεξήχθη έρευνα αγοράς μεταξύ 36 κατασκευαστικών οίκων και σε σύνολο 568 πλαισίων. Στο Σχήμα 2.13 πραγματοποιείται ομαδοποίηση των πλαισίων βάσει της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος αυτών  $P_{MP}$ . Από τη μελέτη του σχήματος συμπεραίνουμε πως δεν υφίσταται σαφές προβάδισμα καμίας υποκατηγορίας ισχύος μολονότι οι υποκατηγορίες των (20-40), (40-60) και (160-180)W δείχνουν να υπερέχουν ελαφρώς. Όσο αφορά τη κατηγοριοποίηση των πλαισίων βάσει της τιμής της τάσης στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, τα συμπεράσματα της έρευνας είναι περισσότερο ενδεικτικά για τις τάσεις που ακολουθεί η βιομηχανία των Φ/Β πλαισίων [15]. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εξεταζόμενων πλαισίων παρουσιάζει τιμή τάσης  $V_{MP}$  (15-19)V όπως επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 2.14.



**Σχήμα 2.10** Κατηγοριοποίηση των Φ/Β πλαισίων βάσει της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος ( $P_{MP}$ ).



**Σχήμα 2.11** Κατηγοριοποίηση των Φ/Β πλαισίων βάσει της τάσης στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος ( $V_{MP}$ ).

## 2.11 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες βάση της απαιτούμενης ισχύος και ανάλογα με τις εκάστοτε εφαρμογές:

### 1) Καταναλωτικά προϊόντα ( 1mW –100 Wp).

Τα συστήματα της κατηγορία αυτής χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας ισχύος όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, εξωτερικός φωτισμός κήπων, ψύξη και προϊόντα όπως μικροί φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα κ.ά.

Τα συστήματα μικρής ισχύος εγκαθίστανται συνήθως σε κτίρια που διαθέτουν ενεργητικά ή παθητικά ηλιακά συστήματα. Χρησιμοποιούνται συχνά για τη λειτουργία αντλιών ή ανεμιστήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του αέρα ή του νερού στους ηλιακούς συλλέκτες. Έχουν ενσωματωμένο ρυθμιστή ισχύος ο οποίος διακόπτει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί, και δεν απαιτούν την χρήση των συσσωρευτών για την αποθήκευση της ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αποτελούνται από ένα μόνο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο τροφοδοτεί έναν μικρό ανεμιστήρα που τον χειμώνα χρησιμεύει για την κυκλοφορία του θερμού αέρα από ένα θερμοκήπιο στο υπόλοιπο δίκτυο ή τον αερισμό των υπερθερμαινόμενων χώρων το καλοκαίρι.

### 2) Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100 Wp –200 Wp)

Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για :

- Ηλεκτροδότηση Ιερών Μονών.
- Αφαλάτωση, άντληση, καθαρισμός νερού.
- Συστήματα εξωτερικού φωτισμού δρόμων, πάρκων, αεροδρομίων κτλ.
- Συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού.
- Συστήματα σηματοδότησης οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας κτλ.
- Αγροτικές εφαρμογές όπως άντλησης νερού, ιχθυοκαλλιέργειες, ψύξη αγροτικών προϊόντων, φαρμάκων κτλ.

### **3) Μεγάλα Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα στο Δίκτυο.**

Η κατηγορία αυτή αφορά Φ/Β συστήματα τυπικού μεγέθους 1,5 kWp έως 20 kWp έως μερικά MWp, στους οποίους η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

### **4) Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα – Οικιακός Τομέας.**

Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν Φ/Β συστήματα τυπικού μεγέθους 1,5kWp έως 20 kW, τα οποία έχουν εγκατασταθεί σε στέγες ή προσόψεις κατοικιών και τροφοδοτούν άμεσα τις καταναλώσεις του κτιρίου, ή δε πλεονάζουσα ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, η κατηγορία αυτή αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς Φ/Β συστημάτων [6].

## **2.12 Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα**

Με την ψήφιση του νόμου για τις ανανεώσιμες πηγές και πιο συγκεκριμένα για τα φωτοβολταϊκά τον Μάιο του 2010 (**N. 3851/2010, ΦΕΚ 85Α, 4-6-2010**) υπήρξαν σημαντικές αλλαγές σε ότι αφορά στην αδειοδότηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Συγκεκριμένα ως στόχος σε ότι αφορά τα Φ/Β συστήματα είναι η κάλυψη του 40% τουλάχιστον της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ως το 2020 από ΑΠΕ – Φ/Β Πάρκα - Ανεμογεννήτριες.

Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά, ο νέος νόμος δίνει στους επαγγελματίες αγρότες τη δυνατότητα να υποβάλουν σχετικές αιτήσεις στη ΔΕΗ Α.Ε. για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων ισχύος έως 100 kW, εξασφαλίζοντας έτσι ένα επιπλέον σημαντικό εισόδημα στους δύσκολους οικονομικά καιρούς που διανύουμε. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργοποίηση του νέου νόμου δίνει τη δυνατότητα άμεσης υποβολής αιτήσεων για φωτοβολταϊκά συστήματα από τους κατ' επάγγελμα αγρότες για έργα έως 100 kW , καθώς και για έργα ανεξαρτήτως ισχύος σε επαγγελματικές ή και βιομηχανικές στέγες.

Για τους μη επαγγελματίες αγρότες και γενικά όλους τους ενδιαφερόμενους, η εγκατάσταση φ/β συστημάτων ξεκίνησε από τις 04-09-2010 και η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εγκατάστασης θα είναι τα 500 kW (σε περίπτωση βιομηχανικών περιοχών η ισχύς αυτή αυξάνεται στα 1MW).

Για την οικιακή χρήση (π.χ. σε στέγες κατοικιών) από τις 01-07-2009 ισχύει ένα πρόγραμμα σύμφωνα με το οποίο δίνονται κίνητρα με την μορφή ενίσχυσης της παραγόμενης κιλοβατώρας, για να μπορεί ο καταναλωτής να κάνει απόσβεση της εγκατάστασης και να έχει και κάποιο κέρδος. Το πρόγραμμα αυτό αφορά στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ισχύος μέχρι 10kWp και για να ενσωματωθεί κάποιος στο πρόγραμμα αυτό θα πρέπει να διαθέτει τον χώρο εγκατάστασης του φ/β συστήματος. Όλη η ενέργεια από την παραγωγή διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ και ο οικιακός καταναλωτής πληρώνεται για αυτή με 55 λεπτά την κιλοβατώρα για 25 χρόνια. Σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος αυτού είναι η μη φορολόγηση των εσόδων [16].

### 2.13 Σύνοψη

Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που χρόνο με το χρόνο κερδίζει έδαφος τόσο στην χώρα μας όσο και στον υπόλοιπο κόσμο. Αυτό συμβαίνει για πολλούς λόγους, όπως το ότι είναι μια **πράσινη μορφή ενέργειας**, φιλική προς το περιβάλλον και προς τον άνθρωπο. Επίσης είναι αναγκαίο και αποδοτικό να παίρνουμε από το φωτοβολταϊκό στοιχείο την μέγιστη δυνατή ισχύ που παράγει και αυτό πραγματοποιείται με τους λεγόμενους **ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)** τους οποίους θα αναλύσουμε εκτενέστερα σε επόμενα κεφάλαια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην ανάγκη για την **αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας** που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά. Όπως γνωρίζουμε, οι **ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες)** μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική μορφή, για να την αποδώσει στην αρχική της μορφή ξανά όταν υπάρξει ζήτηση. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα η αποθήκευση της ενέργειας είναι καθοριστικός παράγοντας για την λειτουργία του συστήματος διότι η ηλιοφάνεια ενός τόπου χαρακτηρίζεται από έντονες και συχνά γρήγορες μεταβολές, τόσο κατά τη διάρκεια του έτους όσο και κατά τη διάρκεια της μέρας, και οι μεταβολές αυτές θα περιόριζαν τρομερά το εύρος των δυνατών εφαρμογών της φωτοβολταϊκής ενέργειας χωρίς τη δυνατότητα της αποταμίευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Θα αναλύσουμε εν συντομία λοιπόν την αρχή λειτουργίας των συσσωρευτών καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφουν ένα συσσωρευτή (χωρητικότητα κλπ).

Ακόμη, θα περιγράψουμε τους **ελεγκτές φόρτισης** των μπαταριών, εξηγώντας την βασική τους αρχή, τα όρια λειτουργίας και τους διάφορους τύπους ρυθμιστών φόρτισης με κύριο τύπο αυτό του **ελεγκτή (ρυθμιστή) φόρτισης τύπου MPPT**.

### 3.2 Αρχή λειτουργίας και είδη συσσωρευτών

Οι **ηλεκτρικοί συσσωρευτές** είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και, συνήθως, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Η δυνατότητα που έχουν να αποταμιεύουν ενέργεια ανά πάσα στιγμή ή όχι είναι αυτή που χωρίζει τους συσσωρευτές σε δύο κατηγορίες.

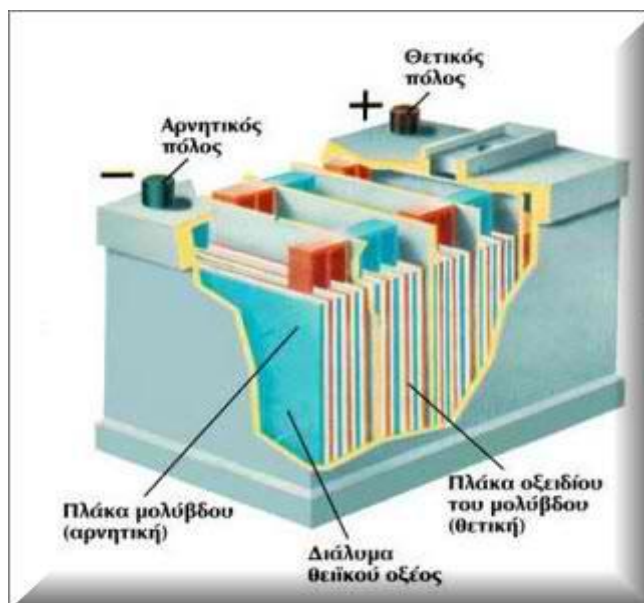
Στην κατηγορία των **πρωτευόντων (primary)** συσσωρευτών ανήκουν αυτοί που έχουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια την οποία και μπορούν να την αποδώσουν ως ηλεκτρική, δεν μπορούν όμως να επαναφορτιστούν. Οι τυπικές μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και επειδή δεν μπορούν να επαναφορτιστούν δεν είναι λειτουργικές στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε Φ/Β συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των **δευτερευόντων (secondary)** συσσωρευτών. Η δυνατότητα τους να επαναφορτίζονται είναι αυτή που τους κάνει κατάλληλους για φωτοβολταϊκά συστήματα και ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι **μπαταρίες μολύβδου-οξειδίου** [14].

### 3.2.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή

Τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τις δυνατότητες ενός συσσωρευτή είναι η ονομαστική τάση ή αλλιώς **ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ) [Volt]** στα άκρα της μπαταρίας και η ονομαστική **χωρητικότητά τους C [VA]**.

Ένα στοιχείο **ηλεκτρικού συσσωρευτή** αποτελείται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, συνήθως, με την μορφή επίπεδων πλακών, τα οποία βρίσκονται μέσα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη, ο οποίος αντιδρά επιφανειακά με τις πλάκες (Σχήμα 3.1). Κατά το στάδιο της φόρτισής του, μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσης συνδέεται στα άκρα του και δημιουργεί στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο το οποίο κινεί ευκίνητα ιόντα του ηλεκτρολύτη προς τις αντίθετα πολωμένες πλάκες του συσσωρευτή(+/-), όπου αποδίδουν το φορτίο τους.



**Σχήμα 3.1** Κατασκευαστική δομή του ηλεκτρικού συσσωρευτή.

Αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στα μεταλλικά ηλεκτρόδια, είναι η αλλοίωση της δομής τους, σε βάθος μερικών μικρών, μετατρέπόμενα σε νέα, διαφορετικά μεταξύ τους σώματα. Τα αλλοιωμένα ηλεκτρόδια εμφανίζουν διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά ως προς το διάλυμα το οποίο ισούται με την ΗΕΔ του συσσωρευτή [14].

### 3.2.2 Τύποι συσσωρευτών

Οι πιο γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι οι συσσωρευτές μολύβδου-θειικού οξέος, μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb), οι συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca), οι υβριδικό συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου/ μολύβδου-ασβεστίου, οι μολύβδου με δεσμευμένο καταλύτη που μπορεί να είναι gelled ή absorbed glass material (AGM).

Οι συσσωρευτές μολύβδου-θειικού οξέος είναι ίσως ο δημοφιλέστερος τύπος και ο οποίος χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε υποβρύχια. Έχουν υψηλή μηχανική αντοχή, αυξημένη δυνατότητα για βαθιές εκφορτίσεις, με δυνατότητα μεγάλων ρευμάτων σε αντίθεση με τους κοινούς συσσωρευτές μολύβδου. Στις περισσότερες εφαρμογές φωτοβολαϊκών και γενικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), χρησιμοποιούνται οι συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb) και οι συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca) βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος, λόγω του ότι είναι πιο φθηνά στην αρχική τους αγορά.

Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου οι ανάγκες κατανάλωσης πολύ σπάνια συμβαδίζουν με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας,

περισσότερο κατάλληλοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν τη δυνατότητα να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς να αλλοιώνεται η χωρητικότητά τους και να μειώνεται η διάρκεια ζωής. Αναλόγως του φορτίου, άλλοτε είναι απαραίτητη η δυνατότητα παροχής εντόνου ρεύματος για μικρά χρονικά διαστήματα και άλλοτε η παροχή μίας κανονικής τιμής ρεύματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Συχνά οι απαιτήσεις του φορτίου σε κατανάλωση δεν είναι τόσο μεγάλες όσο η ανάγκη η κατανάλωση να παρέχεται με αξιοπιστία και για μεγάλες χρονικές περιόδους και άλλες φορές ο τύπος της εγκατάστασης είναι τόσο δυσπρόσιτος που προτιμώνται συσσωρευτές με μικρές ανάγκες συντήρησης και επίβλεψης. Άρα η σωστή επιλογή του τύπου συσσωρευτών είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και θέλει σωστή μελέτη [14].

### **3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη, όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών**

Η δυνατότητα αποταμίευσης της ενέργειας, οι περιορισμοί στο ρεύμα που μπορεί να παρασχεθεί προς κατανάλωση από έναν συσσωρευτή, η συμπεριφορά του σε σχέση με τη θερμοκρασία και τα όρια γενικότερα της λειτουργίας του θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

#### **3.3.1 Χωρητικότητα**

Η ονομαστική **χωρητικότητα της μπαταρίας** είναι το μέτρο της ποσότητας του ηλεκτρικού φορτίου το οποίο μπορεί να προσφερθεί από μία μπαταρία όταν αυτή εκφορτιστεί από κατάσταση πλήρους φορτίσεως στην ελάχιστη επιτρεπτή τάση (1,8 V ανά στοιχείο ή 10,8 V για μια 12V μπαταρία). Η χωρητικότητα που αναγράφεται στην μπαταρία είναι συνήθως για φόρτιση σε 10 ώρες και σε θερμοκρασία 25<sup>0</sup>C. Αν ο ρυθμός εκφόρτισης είναι ταχύτερος τότε η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται [17].

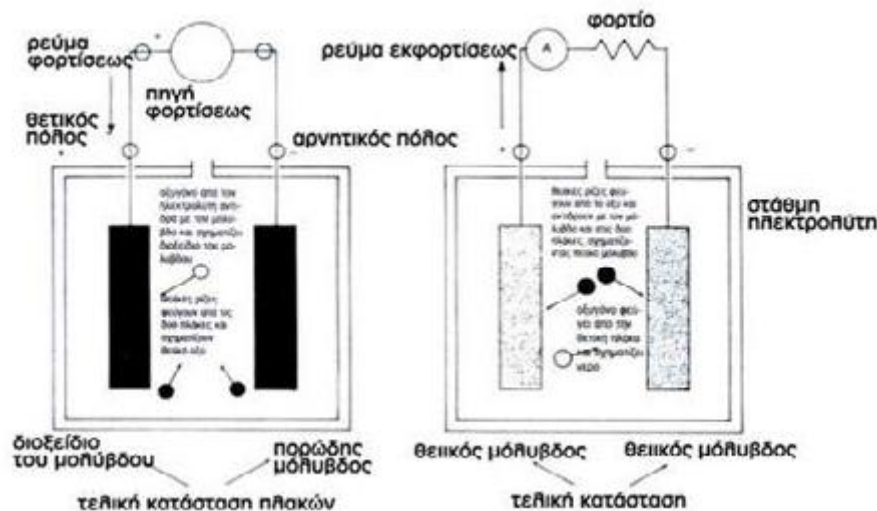
Η χωρητικότητα δεν είναι μια σταθερή παράμετρος, όπως φάνηκε παραπάνω αλλά εξαρτάται μεταξύ άλλων, από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Το ρεύμα εκφόρτισης.
- Ειδικό βάρος και θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη.
- Πορεία εκφόρτισης ως λειτουργία του χρόνου (η χωρητικότητα είναι μεγαλύτερη όταν γίνεται μια μικρή διακοπή κατά την διάρκεια εκφόρτισης από όταν η εκφόρτιση είναι συνεχής)

- Ηλικία της μπαταρίας (λόγω της απώλειας ενεργού υλικού των πόλων, η χωρητικότητα μειώνεται καθώς φτάνει «στο τέλος της ζωής της»)
- Εάν κινείται στην διάρκεια της χρήσης της ή παραμένει σταθερή

### 3.3.2 Φόρτιση - Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης

Η μπαταρία έχει σταθερή πολικότητα και για να την φορτίσουμε χρειάζεται ρεύμα σταθερής πολικότητας επίσης. Μπορεί να μην είναι συνεχές αλλά διακοπτόμενο, ποτέ όμως δεν πρέπει να δώσουμε εναλλασσόμενο ρεύμα. Αν η ηλεκτρεγερτική δύναμη (δηλαδή η τάση χωρίς φορτίο) της μπαταρίας είναι 12V τότε για να την φορτίσουμε χρειαζόμαστε ρεύμα της τάξεως των 14 - 16 V ανάλογα με τον ρυθμό φόρτισης που θέλουμε αλλά και με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας (δηλαδή η τάση στα άκρα του φορτιστή πρέπει να ξεπερνά την ηλεκτρεγερτική δύναμη της μπαταρίας αλλά και την πτώση τάσεως στο εσωτερικό της μπαταρίας λόγω της εσωτερικής της αντιστάσεως). Στο σχήμα 3.3 παρατηρούμε ότι κατά την φόρτισή της μπαταρίας, το ρεύμα διασπά τον ηλεκτρολύτη και το οξυγόνο που παράγεται κινείται προς την θετική πλάκα, όπου όσο προχωράει η φόρτιση σχηματίζει διοξείδιο του μολύβδου [17].



Σχήμα 3.2 Φόρτιση – Εκφόρτιση μπαταρίας μολύβδου – οξέως.

Η μπαταρία **εκφορτίζεται** εφόσον έχει συνδεθεί στα άκρα της ένας καταναλωτής. Γίνονται οι απαραίτητες χημικές αντιδράσεις (οξειδωση και αναγωγή) με αποτέλεσμα κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή να ελαττώνεται η περιεκτικότητα του θειικού οξέος στο διάλυμα.

Άρα η παρακολούθηση της περιεκτικότητας του  $H_2SO_4$  στο διάλυμα, εκφραζόμενη με την μεταβολή της πυκνότητάς του ( $g/cm^3$ ) κατά τους χρόνους φόρτισης-εκφόρτισης, αποτελεί ένα πολύ απλό τρόπο ελέγχου της καταστάσεως φόρτισης του συσσωρευτή.

Όσον αφορά το **βάθος της εκφόρτισης** αυτό μπορεί να προσεγγιστεί με έναν πρακτικό κανόνα ο οποίος περιγράφει τον χρόνο ζωής του συσσωρευτή:

*Το γινόμενο βάθος εκφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας είναι, με πολύ καλή προσέγγιση, σταθερό και ίσο με:*

$$\beta_{εκφ} * N_k = \text{σταθερό}$$

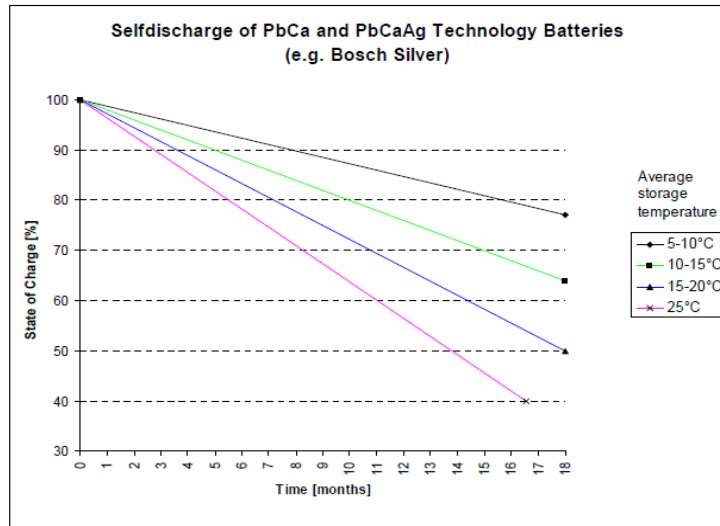
Όπου,

$N_k$ : το σύνολο των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή, όπου εδώ υπάρχει ένας εμπειρικός κανόνας: για του συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης (Opzs κατά DIN ή φωτοβολταϊκούς συσσωρευτές), το γινόμενο αυτό ισούται με 1200, ενώ για κοινούς συσσωρευτές περιορίζεται στα 120 και

$\beta_{εκφ}$ : η μέγιστη ποσότητα χωρητικότητας που μπορεί να αποδοθεί από την μπαταρία[7].

### 3.3.3 Αυτοεκφόρτιση

Ένας φορτισμένος συσσωρευτής εκφορτίζεται ακόμη και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε καμία κατανάλωση (Αυτοεκφόρτιση). Αυτό οφείλεται στην συνεχή δράση του θειικού οξέος ( $H_2SO_4$ ) στα ηλεκτρόδια. Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας [18]:



Σχήμα 3.3 Αυτοεκφόρτιση μπαταριών από ασβέστιο (Ca) και ασήμι (Ag).

### 3.4 Ελεγκτές (ρυθμιστές) φόρτισης των μπαταριών

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

Γενικά, ο **ελεγκτής (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 της 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 (thyristor, mosfet κ.λπ.). σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος, για την προστασία του συστήματος από εκφόρτιση [19].

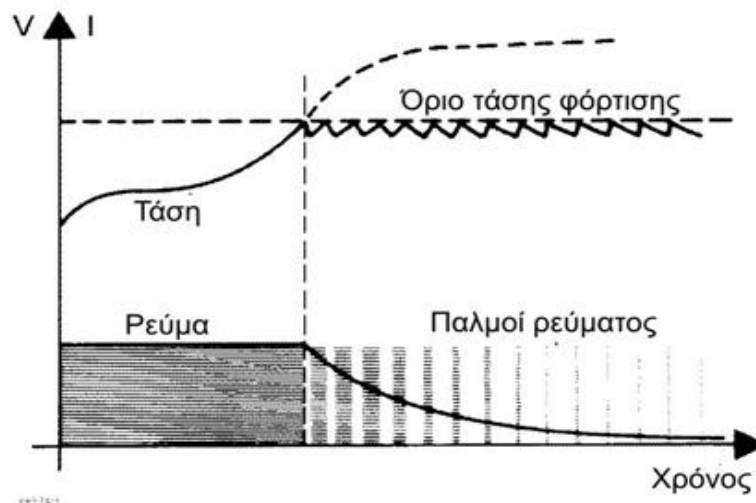
#### 3.4.1 Η βασική αρχή

Η κύρια λειτουργία του 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 (Φ/Β στην περίπτωση μας) που περιλαμβάνουν αποθήκευση μπαταριών μολύβδου-οξέος διαθέτουν ένα σύστημα ελέγχου στο οποίο έχουν καθοριστεί **κατώφλια τάσης** για την ποσότητα της μπαταρίας [20]:

- 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**.

### 3.4.2 Προστασία υπερφόρτισης

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης εκμετάλευση της ενέργειας, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος φορτίζονται σύμφωνα με το αποκαλούμενο χαρακτηριστικό I-V. Στην αρχή της διαδικασίας φόρτισης η μπαταρία λαμβάνει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, αλλά όταν η τάση φτάνει το όριο φόρτισης το ρεύμα φόρτισης μειώνεται αργά μέχρι να μηδενίσει, ενώ η τάση να διατηρείται σε ένα σταθερό επίπεδο (σχήμα 3.5). Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας.



**Σχήμα 3.4** Κατανομές της τάσης και του ρεύματος κατά την διάρκεια της φόρτισης

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 [20].

### 3.4.3 Προστασία βαθιάς εκφόρτισης

Μόλις η τάση της μπαταρίας καταστεί μικρότερη της ΑΧΤ, το φορτίο αποσυνδέεται από την μπαταρία και δεν μπορεί να επανασυνδεθεί μέχρις ότου επαναφορτιστεί αρκετά η μπαταρία. Είναι πολύ σημαντικό να επιλέγεται η σωστή τάση αποκοπής. Για να αποφεύγεται η βαθιά εκφόρτιση σε κάθε περίπτωση, η τάση αποκοπής πρέπει να προσαρμόζεται στο ρεύμα εκφόρτισης.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούμε ελεγκτές φόρτισης με σταθερό όριο πέρατος φόρτισης, η τιμή αυτή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1,9V/στοιχείο, δηλ. 11.4V για μια μπαταρία 12V, και συνίσταται το κατώφλι αυτό να είναι σταθερό για όλες τις



θερμοκρασίες. Οι ελεγκτές φόρτισης εκτίθενται σε πολλές πηγές φθοράς τόσο κατά την εγκατάσταση όσο και κατά την λειτουργία τους και, προκειμένου να λειτουργούν σωστά, πρέπει να ενσωματώνουν τις μορφές προστασίας που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους [20].

#### 3.4.4 Προστασία από τις εξωτερικές επιδράσεις

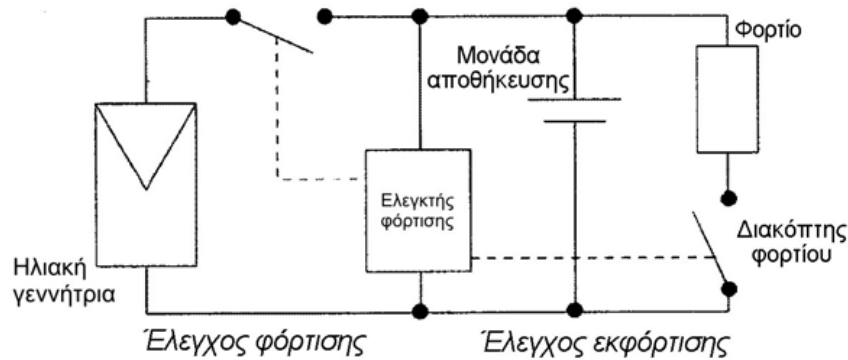
1. **Προστασία από την υγρασία:** η υγρασία μπορεί να είναι είτε άμεση ( βροχή, ψεκασμός νερού) αλλά και έμμεση λόγω της υψηλής υγρασίας του αέρα. Το περίβλημα του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι καλά σφραγισμένο για να προστατεύεται από την είσοδο νερού (κλάση προστασίας υψηλού IP, όπου είναι δυνατόν IP 65). Όπου είναι υψηλή η υγρασία του αέρα, είναι κατάλληλο ένα περίβλημα με κάποιο βαθμό κυκλοφορίας αέρα.
2. **Προστασία από λανθασμένη σύνδεση:** Το συνηθέστερο λάθος κατά την εγκατάσταση ενός ελεγκτή φόρτισης είναι η αντιστροφή της πολικότητας των συνδέσεων. Έτσι, είναι απαραίτητο να προστατεύονται οι είσοδοι στη γεννήτρια και την μπαταρία από την αντίστροφη σύνδεση των πόλων με τις λεγόμενες διόδους ελεύθερης διέλευσης και μια κατάλληλη ασφάλεια.
3. **Προστασία από υπέρταση:** τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να προστατεύονται από βραχυχρόνιες αιχμές της τάσης.
4. **Προστασία από υπερφόρτωση:** είναι πιθανό 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 θα πρέπει να παρέχεται από κάποια ασφάλεια [20].

#### 3.4.5 Κύριοι τύποι ελεγκτών φόρτισης

Δύο είναι οι κύριοι τύποι των ελεγκτών φόρτισης:

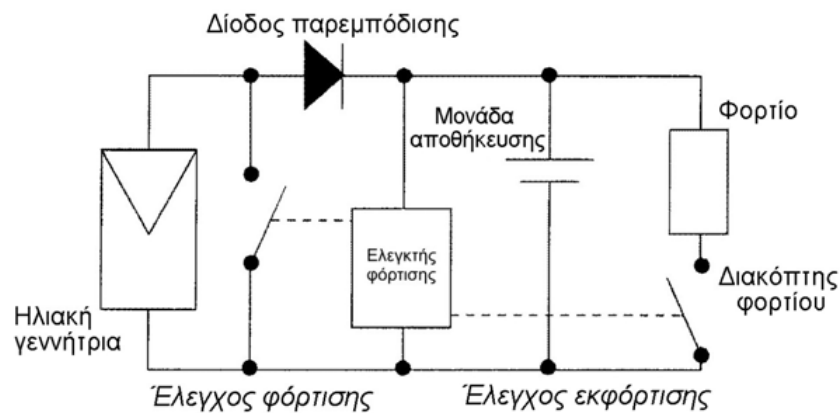
- **Ο σειριακός ελεγκτής:** με αυτόν διακόπτεται η σύνδεση μεταξύ γεννήτριας και της μονάδας αποθήκευσης της ενέργειας όταν ανακλύπτει το όριο φόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Για την αποσύνδεση μπορούν να χρησιμοποιούνται ρελέ, διπολικά τρανζίστορ ή MOSFETs. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με την εναλλακτική είναι ότι ο σειριακός ελεγκτής υπόκειται στις απώλειες που υφίστανται στο διακόπτη.

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.



Σχήμα 3.5 Ελεγκτής φόρτισης με σειριακή ρύθμιση.

- **Ο ελεγκτής διακλάδωσης (βραχυκυκλώματος):** Εδώ η γεννήτρια απλά βραχυκυκλώνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού διακόπτη όταν φορτιστεί πλήρως η μπαταρία. Η τάση κατά μήκος του διακόπτη ή του τρανζίστορ τότε σχεδόν μηδενίζεται.



Σχήμα 3.6 Ελεγκτής φόρτισης με ρύθμιση βραχυκυκλώματος

- **Ελεγκτές PWM:** Σε αυτό τον τύπο, ο ρυθμιστής ανοιγοκλείνει γρήγορα τη 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 και αυτό τον τρόπο θα

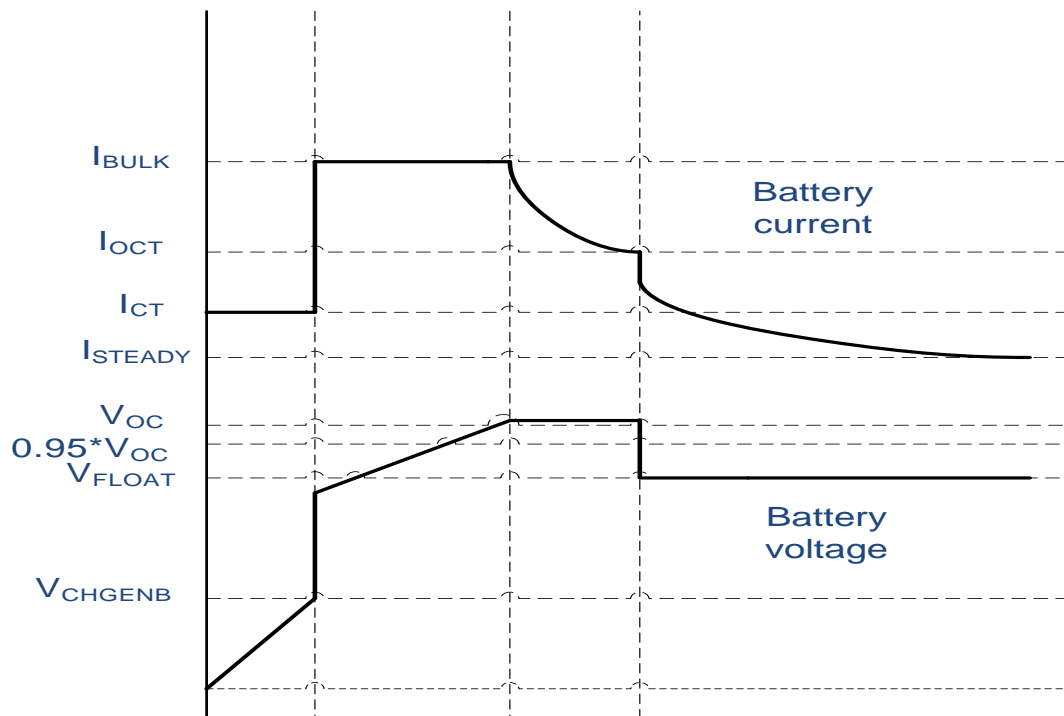
χρησιμοποιήσουμε εμείς στην υλοποίηση του ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT [20].

### 3.4.6 Ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών τύπου MPPT

Στις υλοποιήσεις των ρυθμιστών φόρτισης συσσωρευτών με κύριο μέλημά τους την προστασία του συσσωρευτή από υπέρταση (διατηρώντας την τάση της μπαταρίας κοντά σε μια προκαθορισμένη από τον σχεδιαστή στάθμη πλήρους φόρτισης), όπως και την προστασία του συσσωρευτή από υπερβολική εκφόρτιση (αποκόπτοντας το φορτίο από το φωτοβολταϊκό σύστημα όταν η τάση της μπαταρίας γίνει ίση με ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο), η ισχύς που τροφοδοτεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο σύστημα δεν είναι για όλες τις συνθήκες λειτουργίας η μέγιστη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μεταφορά ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία στη μπαταρία και το φορτίο είναι αποδοτική μόνο για ορισμένες τιμές από μια σχετικά μεγάλη περιοχή τιμών των παραμέτρων λειτουργίας, όπως το μέγεθος του φορτίου (state of charge) της μπαταρίας, τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων, την πυκνότητα ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, τον βαθμό γήρανσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων, κλπ. Έτσι παρουσιάζονται απώλειες οι οποίες κυμαίνονται από πολύ μικρές ως και 10% κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ηλιόλουστης ημέρας. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί ένα **σύστημα ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker, MPPT)** που διαπραγματεύεται η πτυχιακή αυτή.

Σε **αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα (Stand-alone Photovoltaic Power Supply System, SAPS)** [21], είναι πολύ σημαντικό να φορτίζουμε τις μπαταρίες σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή όμως η ανάγκη, της γρήγορης μεταφοράς ενέργειας στην μπαταρία, δεν πρέπει να συνοδεύεται από τυχόν βλάβη της μπαταρίας κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής. Οι κατασκευαστές των συσσωρευτών προτείνουν γι αυτό τον λόγω τέσσερα στάδια φόρτισης των μπαταριών μολύβδου-οξέος.

Αυτά είναι: η **ήπια φόρτιση (trickle charge)**, η **κυρίως φόρτιση (bulk charge)**, η **υπερφόρτιση (over-charge)** και η **φόρτιση συντήρησης (float charge)** όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8:



**Σχήμα 3.7:** Τάση και ρεύμα μπαταρίας σε ένα κύκλο φόρτισης χρησιμοποιώντας τα τέσσερα στάδια φόρτισης.

Ο ρυθμιστής μπαταριών τύπου MPPT περιλαμβάνει λοιπόν τον MPPT βρόγχο και τον ρυθμιστή μπαταρίας (βρόγχος τάσης και ρεύματος). Το πότε θα ενεργοποιηθεί ο κάθε βρόγχος εξαρτάται σε ποιο στάδιο φόρτισης της μπαταρίας είμαστε. Παρακάτω λοιπόν, περιγράφονται τα τέσσερα στάδια για την σωστή φόρτιση μιας μπαταρίας.

**Ήπια φόρτιση (*trickle charge*):** Όταν η τάση της μπαταρίας είναι κάτω από την τάση πλήρους εκφόρτισης (κατώφλι χαμηλής τάσης),  $V_{CHGENB}$ , η μπαταρία είναι πλήρως εκφορτισμένη ή αλλιώς ανοιχτοκυκλωμένη. Σ αυτό το στάδιο, η φόρτιση αρχίζει με ένα μικρό ρεύμα «εκκίνησης» ( $I_{TC}$ ) στην μπαταρία. Εάν η μπαταρία είναι ανοιχτοκυκλωμένη, η τάση της μπαταρίας θα παραμείνει μεταξύ της τάσης  $V_{CHGENB}$  παρεμποδίζοντας τον φορτιστή από να μεταβεί στην διαδικασία της κυρίως φόρτισης. Σε άλλη περίπτωση η φόρτιση θα αρχίσει και η τάση της μπαταρίας θα αυξηθεί, για να φτάσει την ονομαστική του τιμή, έως ότου φτάσει στην  $V_{CHGENB}$ . Σε αυτό το σημείο η φόρτιση θα προχωρήσει στο στάδιο της γρήγορης φόρτισης (bulk state).

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  $I_{TC}$ .

**Κυρίως φόρτιση (*bulk charge*):** 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  $I_{BULK}$ . Μόλις η τάση της μπαταρίας φτάσει το  $0.95 \cdot V_{OC}$ , αρχίζει το τρίτο στάδιο.

**Υπερφόρτιση (over-charge):** 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 αυτή 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 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  $I_{OCT}$ , μεταβαίνουμε στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της φόρτισης της μπαταρίας.

**Φόρτιση συντήρησης (float charge):** Κατά το στάδιο αυτό, η τάση της μπαταρίας διατηρείται σταθερή στην τιμή  $V_{FLOAT}$  για να διατηρήσει την χωρητικότητα της μπαταρίας έναντι της αυτό-εκφόρτισης. Ο φορτιστής θα διαθέσει όσο ρεύμα χρειάζεται για να διατηρήσει τη τάση στο επίπεδο της  $V_{FLOAT}$ . Ο βρόγχος της τάσης και του ρεύματος της μπαταρίας είναι όπως 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 σ αυτό το σημείο η διαδικασία θα επανέρθει στο στάδιο της κυρίως φόρτισης.

### 3.5 Σύνοψη

Όπως έγινε αντιληπτό από τα παραπάνω, η βελτιστοποιημένη αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ στους συσσωρευτές είναι βασική προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία μιας εγκατάστασης που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ανάλογα με την εφαρμογή που έχουμε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε και τον κατάλληλο τύπο συσσωρευτή για την αποθήκευση της ενέργειας ώστε η όλη εγκατάσταση να λειτουργεί όσο το δυνατόν αποδοτικότερα.

Οι **ελεγκτές (ρυθμιστές) φόρτισης** των συσσωρευτών είναι πολύ σημαντικό κομμάτι στην όλη εγκατάσταση γιατί βοηθούν στην σωστή φόρτιση μιας μπαταρίας καθώς την προστατεύει από την υπερφόρτιση πέρα μιας συγκεκριμένης τιμής και την υπερβολική

εκφόρτιση που μπορεί να έχει δυσάρεστες συνέπειες ακόμη και την αχρήστευση της μπαταρίας.

Τέλος, γίνεται λοιπόν επιτακτική ανάγκη να σχεδιαστεί ένας ελεγκτής φόρτισης που να ελέγχει την φόρτιση της μπαταρίας αποδίδοντας τη **μέγιστη δυνατή ισχύ** ώστε η μπαταρία να φορτιστεί γρήγορα, σωστά και ποιοτικά. Την λειτουργία αυτή αναλαμβάνουν οι **ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών τύπου MPPT** οι οποίοι ελέγχουν σε κάθε χρονική στιγμή την κατάσταση της μπαταρίας και επιλέγουν την κατάλληλη κάθε φορά στρατηγική φόρτισης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ-MAXIMUM POWER POINT TRACKERS

### 4.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός της πτυχιακής αυτής είναι να μπορούμε να «πάρουμε» και να χρησιμοποιήσουμε το μέγιστο δυνατό της ενέργειας που μας δίνει ο ήλιος κάθε στιγμή. Υπάρχουν οι παρακάτω τρόποι που μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την παραγόμενη ισχύ του Φ/Β στοιχείου [22]:

- Να χρησιμοποιήσουμε ένα κινητό σύστημα στήριξης των φωτοβολταϊκών που θα παρακολουθεί την πορεία του ήλιου. Έτσι, πετυχαίνουμε συνεχώς κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.
- Να αυξήσουμε την απαγωγή από το Φ/Β πάνελ στην ατμόσφαιρα. Με τον τρόπο αυτό κατορθώνουμε την μείωση της θερμοκρασίας του στοιχείου και αύξηση της απόδοσης.
- Να χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρονικό κύκλωμα προσαρμογής για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου λειτουργίας. Έτσι απορροφάμε από το φωτοβολταϊκό το μέγιστο δυνατό από την παραγόμενη ενέργεια.
- Βέβαια ο συνδυασμός και των τριών παραπάνω μεθόδων μεγιστοποίησης της ισχύος θα επέφερε την απόλυτη βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Αυτό όμως είναι δύσκολο στην κατασκευή του κυρίως λόγω υψηλού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης.

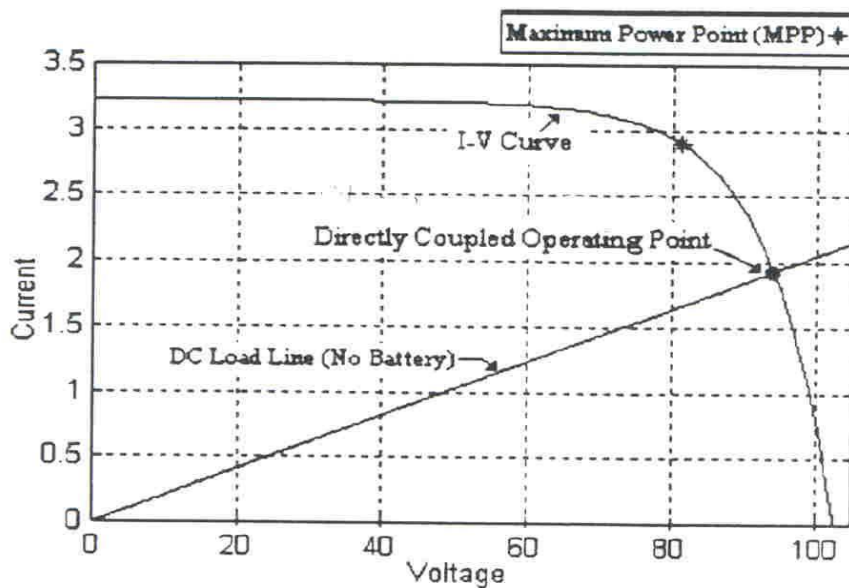
Οι δύο πρώτοι τρόποι μπορούν να μεγιστοποιήσουν την απολαβή της ενέργειας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σχέση με τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, θερμοκρασία κλπ) που επικρατούν. Έτσι παράγεται η μέγιστη δυνατή ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ανάλογα με το περιβάλλον. Δεν αποδίδει όμως απαραίτητα και το μέγιστο της παραγόμενης ενέργειας στο φορτίο. Στην κατασκευή μας υλοποιούμε ένα κύκλωμα που κάνει αυτό ακριβώς, αποδίδει την μέγιστη δυνατή ενέργεια στην μπαταρία και συνάμα στο φορτίο του συστήματος σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Τα κυκλώματα που υλοποιούν αυτή την παραπάνω λειτουργία ονομάζονται **Ανιχνευτές Σημείου Μέγιστης Λειτουργίας (Maximum Power Point Trackers – MPPT)**. Τα κυκλώματα MPPT προσαρμόζουν την σύνθετη αντίσταση εισόδου τους στην σύνθετη αντίσταση εξόδου, που κάθε στιγμή έχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Όταν επιτευχθεί αυτή η προσαρμογή έχουμε την μέγιστη μεταφορά ισχύος από το φωτοβολταϊκό προς το κύκλωμα ανίχνευσης ισχύος. Στην συνέχεια το κύκλωμα αποδίδει στην μπαταρία και στο φορτίο την ισχύ αυτή προσαρμόζοντας την αντίστασή του ώστε να έχουμε τις ελάχιστες δυνατές απώλειες.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τους διάφορους **αλγόριθμους ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος - MPPT** [23]. Όπως θα καταλάβουμε και παρακάτω, οι ανιχνευτές μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Trackers MPPTs) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα φωτοβολταϊκά συστήματα επειδή μεγιστοποιούν την παραγωγή ισχύος ενός συστήματος PV, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και επομένως μεγιστοποιούν την απόδοση της Φ/Β συστοιχίας. Γενικά ένα σύστημα φωτοβολταϊκού με έλεγχο MPPT βελτιστοποιεί την απόδοση του συστήματος και ελαχιστοποιεί το γενικό κόστος. Τέλος, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι για MPPT των οποίων οι γενικές αρχές σε 4 από αυτούς αναλύονται παρακάτω.

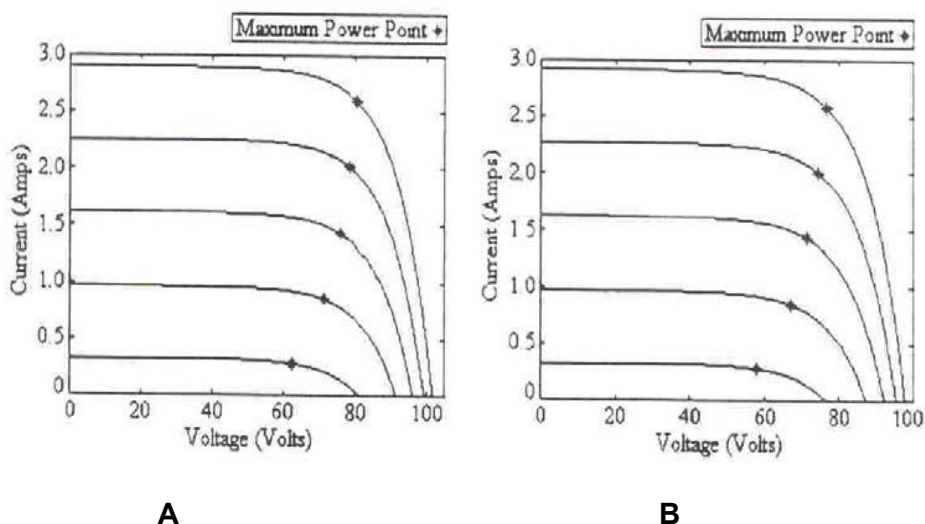
Κάθε συστοιχία φωτοβολταϊκών υπό συνθήκες σταθερής και ομοιόμορφης ακτινοβολίας έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσεως ( $I-V$ ), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο της καμπύλης το οποίο ονομάζεται **Μέγιστο Σημείο ισχύος (Maximum Power Point - MPP)**, στο οποίο η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση παράγοντας τη μέγιστη ισχύ. Όταν μια συστοιχία φωτοβολταϊκών είναι άμεσα συνδεδεμένη στο φορτίο το σημείο λειτουργίας του συστήματος θα είναι η τομή της καμπύλης  $I-V$  της συστοιχίας φωτοβολταϊκών και της γραμμής των φορτίων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Γενικά αυτό το σημείο λειτουργίας δεν είναι το σημείο μέγιστης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών.





**Σχήμα 4.1** Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V).

Το πρόβλημα αυτό, δηλαδή το σημείο λειτουργίας να μην συμπίπτει με το σημείο μέγιστης λειτουργίας, μπορεί να ξεπεραστεί χρησιμοποιώντας διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, όπως DC-DC μετατροπείς ισχύος. Με τις διατάξεις αυτές, μπορεί να διατηρηθεί το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος στο μέγιστο σημείο λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ρυθμιστή τύπου MPPT, ο οποίος ελέγχει την τάση και το ρεύμα της συστοιχίας φωτοβολταϊκών ανεξάρτητα από το φορτίο. Η θέση του μέγιστου σημείου ισχύος μπορεί να βρεθεί είτε μέσω πρότυπων υπολογισμών είτε με υπολογισμούς αλγορίθμων. Η διαδικασία για υπολογισμό κάποιων παραμέτρων για την εύρεση του MPPT είναι πολύπλοκη, επειδή το σημείο αυτό είναι μη γραμμική συνάρτηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2:



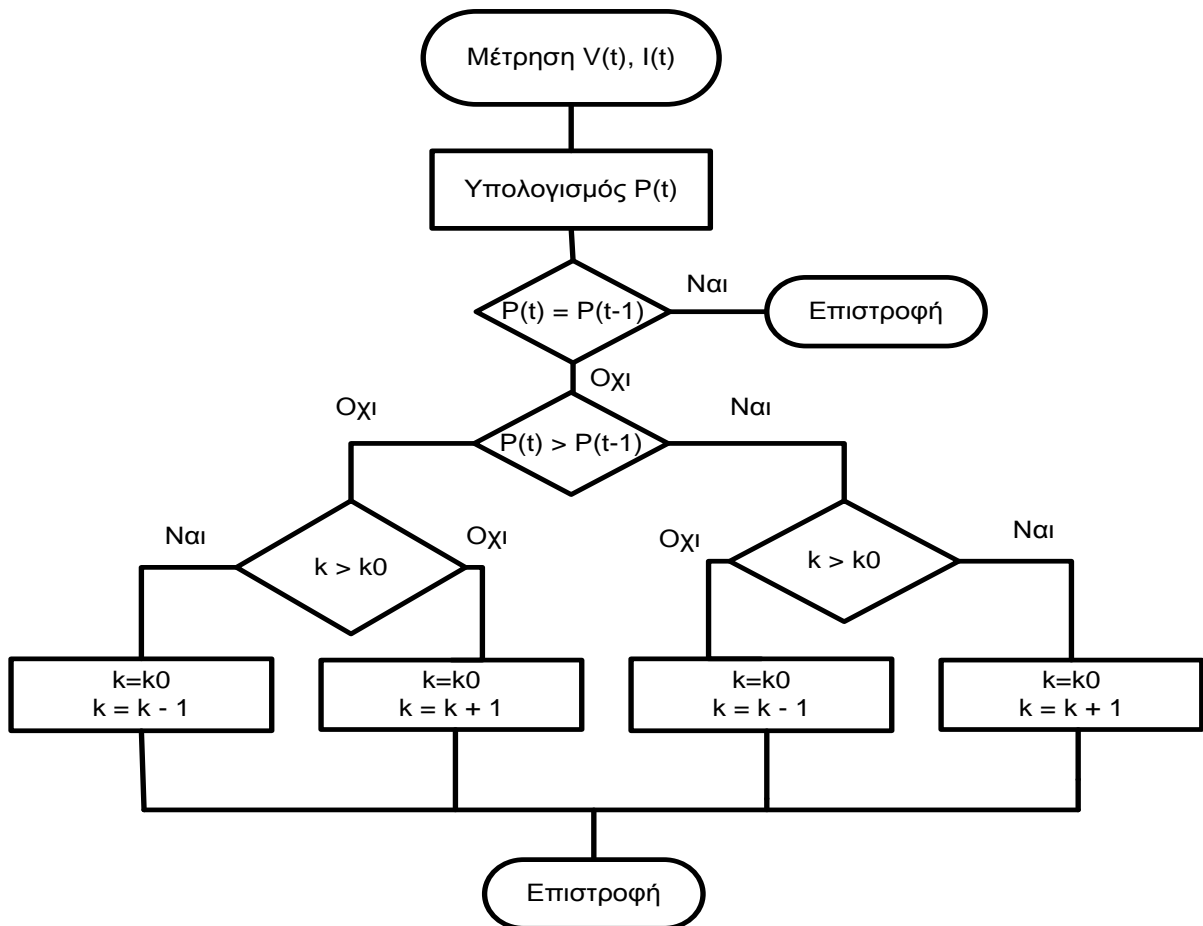
- Σχήμα 4.2** A. Καμπύλες τάσεως ρεύματος φωτοβολταϊκής συστοιχίας στους 40 C<sup>0</sup>.  
B. Καμπύλες τάσεως ρεύματος φωτοβολταϊκής συστοιχίας στους 50 C<sup>0</sup>.

Τέλος, για τον υπολογισμό και την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT) έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι. Εμείς θα αναλύσουμε τους σημαντικότερους εξ αυτών οι οποίοι είναι:

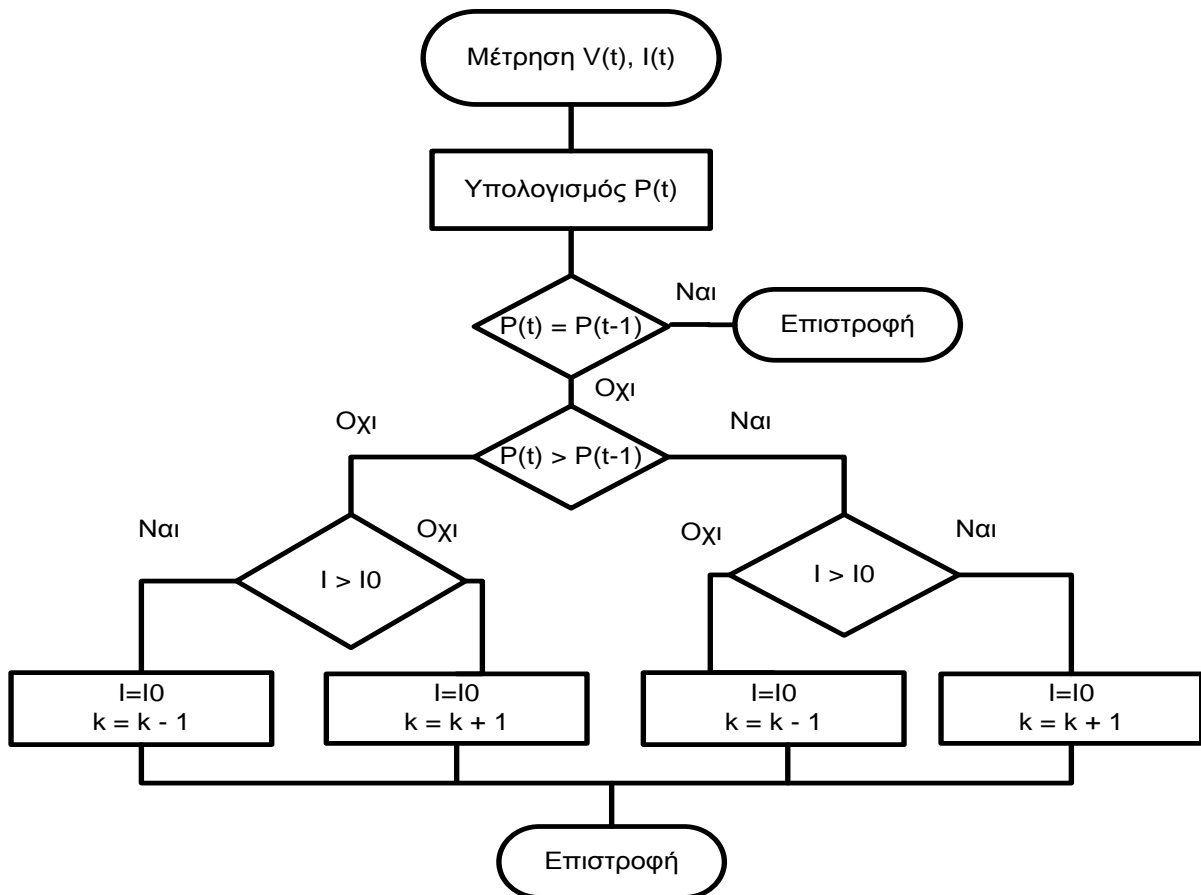
- **Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb and Observer P&O)**
- **Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental Conductance)**
- **Παρασιτικής χωρητικότητας (Parasitic Capacitance)**
- **Σταθερής τάσης (Constant Voltage)**

#### **4.2 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb and Observer P&O)**

Ο αλγόριθμος **διατάραξης και παρατήρησης** είναι ο συνηθέστερος χρησιμοποιούμενος στην πράξη λόγω της εύκολης εφαρμογής του. Βασίζεται στον υπολογισμό της ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο και η μεταβολή του πραγματοποιείται ελέγχοντας είτε την τάση είτε το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στην πτυχιακή εργασία μας θα πραγματοποιήσουμε τον συγκεκριμένο αλγόριθμο για την υλοποίηση του MPPT. Μάλιστα θα τον κατασκευάσουμε σε δύο παραλλαγές για να δούμε πιθανές διαφοροποιήσεις στην λειτουργία του P&O. Στην **πρώτη παραλλαγή** για την εύρεση της μέγιστης ισχύος κάνουμε έλεγχο του PWM (όπου στο πρόγραμμα το συμβολίζουμε με τη μεταβλητή  $k$ ) και, ανάλογα με το εάν η ισχύς του πάνελ αυξάνεται ή μειώνεται, μεταβάλλοντας αντίστοιχα το D.C. του PWM αντίστοιχα. Με την **δεύτερη παραλλαγή** του P&O ελέγχουμε το ρεύμα του πάνελ (με το σκεπτικό ότι εφόσον αυξάνεται το ρεύμα, η ισχύς αυξάνεται και αντίστροφα) για την εύρεση της μέγιστης ισχύος και ανάλογα ρυθμίζουμε το D.C. Παρακάτω φαίνονται τα λογικά διαγράμματα του αλγορίθμου P&O και για τις 2 παραλλαγές:

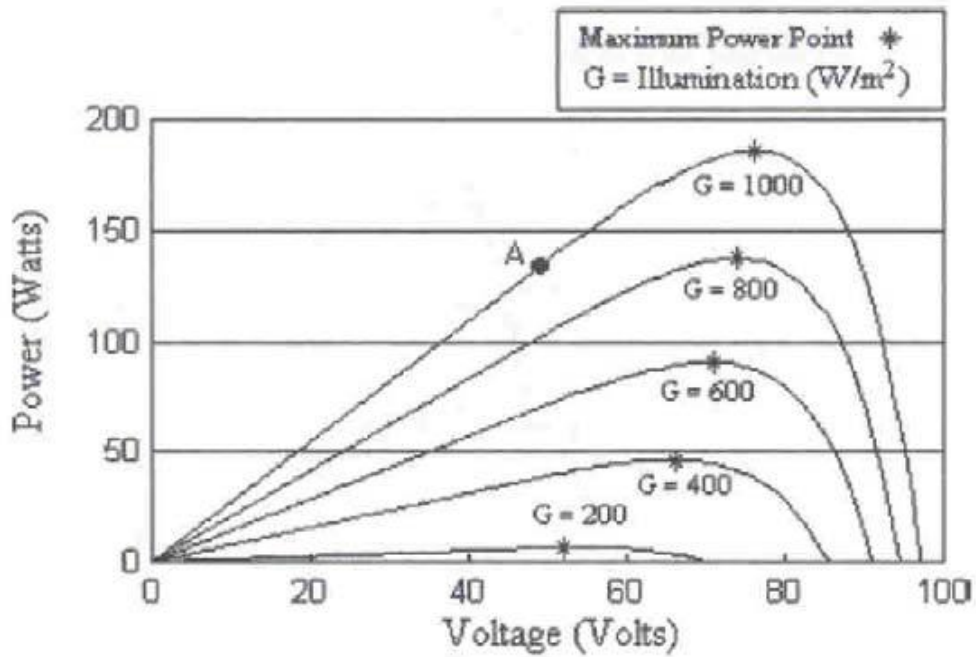


Σχήμα 4.3 Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης (P&O) με έλεγχο του D.C. του PWM.

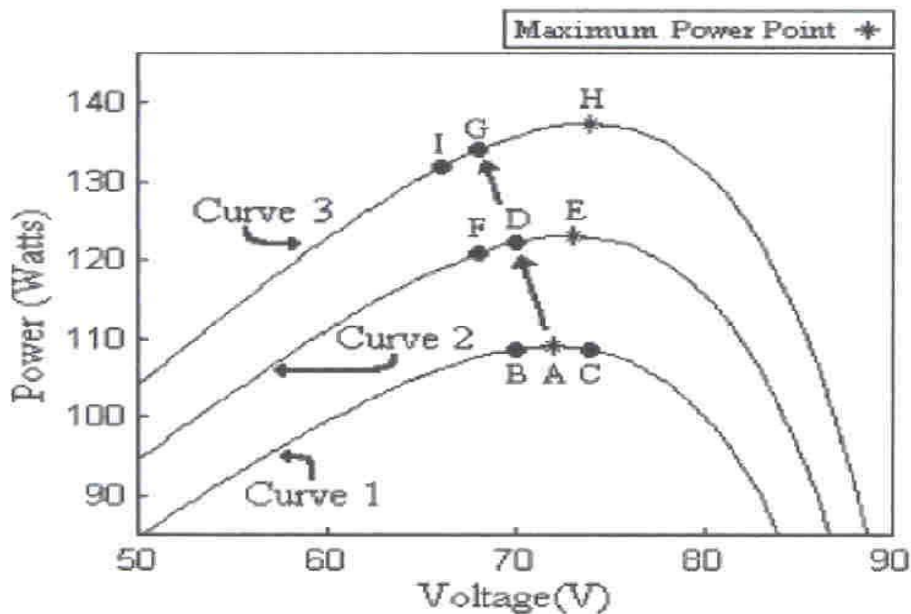


**Σχήμα 4.4** Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης (P&O) με έλεγχο ρεύματος του πάνελ.

Η πιο βασική (γενική) μορφή του αλγόριθμου P&O λειτουργεί ως εξής. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται μια οικογένεια καμπυλών ισχύος συστοιχίας φωτοβολταϊκών PV, ως συνάρτηση της τάσης σε διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας (G) για ομοιόμορφη ακτινοβολία και σταθερή θερμοκρασία. Αυτές οι καμπύλες έχουν το γενικό μέγιστο στο MPP. Αν η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί στο σημείο A του σχήματος 4.5, το οποίο είναι μακριά από MPP, η τάση (ή το ρεύμα στην περίπτωση μας) λειτουργίας του στο P&O διαταράσσεται από μια μικρή αύξηση και μετριέται η προκύπτουσα αλλαγή. Εάν το  $\Delta P$  είναι θετικό η διαταραχή της τάσης λειτουργίας οδηγεί το σημείο λειτουργίας πιο κοντά στο MPP. Κατά συνέπεια περαιτέρω διαταραχές της τάσης στην ίδια κατεύθυνση δηλαδή με το ίδιο πρόσημο θα μετακινήσουν το σημείο λειτουργίας προς το MPP. Εάν το  $\Delta P$  είναι αρνητικό το σημείο λειτουργίας του συστήματος απομακρύνεται από MPP, και το πρόσημο της διαταραχής πρέπει να αντιστραφεί για να κινηθεί προς το MPP.



Σχήμα 4.5 Καμπύλες τάσης-ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



Σχήμα 4.6 Εδώ φαίνεται η ακανόνιστη συμπεριφορά διατάραξης και παρατήρησης όταν η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται γρήγορα.

Τα **πλεονεκτήματα** αυτού του αλγορίθμου είναι η απλότητα και η ευκολία της εφαρμογής του. Ο P&O όμως έχει περιορισμούς που μειώνουν την απόδοση του MPPT. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι, ότι όσο το φως του ήλιου μειώνεται η καμπύλη P-V γίνεται επίπεδη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Το χαρακτηριστικό αυτό δυσχεραίνει την ανίχνευση του σημείου

MPP καθώς η μεταβολή στην ισχύ από την επιβαλλόμενη διαταραχή του σημείου λειτουργίας είναι μικρή. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η συμπεριφορά του αλγορίθμου ενδέχεται να είναι απρόβλεπτη στην περίπτωση απότομων μεταβολών του επιπέδου της ακτινοβολίας. Διάφορες βελτιώσεις έχουν προταθεί, όπως η προσθήκη μιας συνάρτησης καθυστέρησης που προκαλεί μια στιγμιαία διακοπή των διαταραχών εάν το πρόσημο των διαταραχής αντιστρέφεται πολλές φορές διαδοχικά δείχνοντας ότι το MPP έχει επιτευχθεί. Αυτή η κατάσταση μπορεί να εμφανιστεί τις νεφελώδεις ημέρες όπου η ανίχνευση του MPP είναι δυσκολότερη, εξαιτίας της συχνής μετακίνησής του.

### 4.3 Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental Conductance)

Ο δεύτερος αλγόριθμος είναι αυτός της αυξητικής αγωγιμότητας ο οποίος προκύπτει παραγωγίζοντας την ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ως προς την τάση και θέτοντας το αποτέλεσμα ίσο με μηδέν. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4.1)$$

Και

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (4.2)$$

Ο όρος  $-I/V$  αντιπροσωπεύει το αντίθετο της στιγμιαίας αγωγιμότητας της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών, ενώ ο όρος  $dI/dV$  αντιπροσωπεύει την αυξητική αγωγιμότητά της. Επομένως στο MPP αυτές οι δύο ποσότητες πρέπει να είναι ίσες αλλά με αντίθετο πρόσημο. Εάν το σημείο λειτουργίας είναι εκτός του MPP από τη εξίσωση 4.2 προκύπτει ένα σύνολο ανισοτήτων που δείχνει εάν η τάση λειτουργίας είναι επάνω ή κάτω από την τάση που αντιστοιχεί στο MPP.

Συγκεκριμένα ισχύουν οι παρακάτω ανισότητες :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad , \quad \frac{dP}{dV} = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad , \quad \frac{dP}{dV} > 0 \quad (4.4)$$

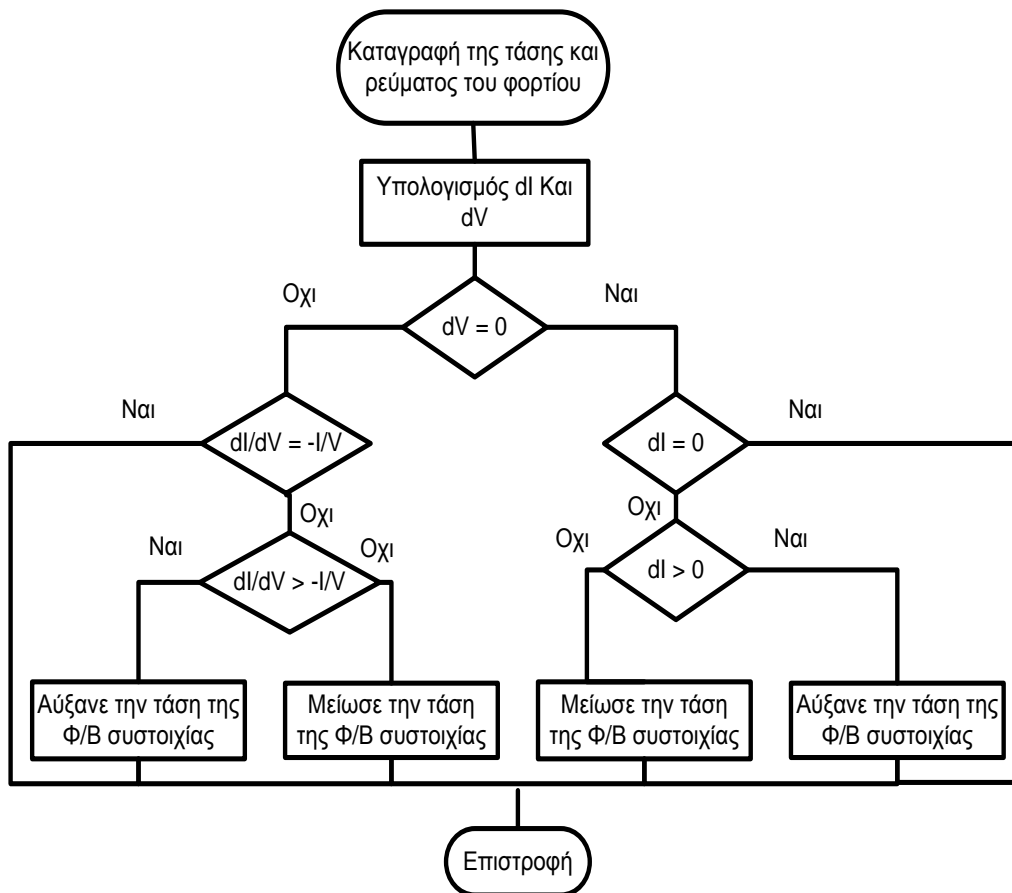
$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad , \quad \frac{dP}{dV} < 0 \quad (4.5)$$

Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την κατεύθυνση στην οποία μια διαταραχή πρέπει να εμφανιστεί για να μετατοπίσει το σημείο λειτουργίας προς το MPP. Η διαταραχή επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί η εξίσωση 4.3 δηλαδή η παράγωγος της ισχύος ως προς την τάση γίνει ίση με μηδέν. Μόλις επιτευχθεί το MPP, ο αλγόριθμος συνεχίζει να λειτουργεί στο σημείο αυτό μέχρι να εντοπιστεί μια αλλαγή στο ρεύμα. Η αλλαγή στο ρεύμα θα αντιστοιχεί σε μια αλλαγή της ακτινοβολίας στη συστοιχία των φωτοβολταϊκών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6, όσο η ακτινοβολία στη συστοιχία φωτοβολταϊκών αυξάνεται, το MPP κινείται προς τα δεξιά σε συνάρτηση με την τάση της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών. Για να αντισταθμίσει αυτήν την μετακίνηση του MPP, ο αλγόριθμος θα πρέπει να αυξήσει την τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Το αντίθετο ισχύει όταν ανιχνεύεται μια μείωση στην ακτινοβολία (μέσω μιας μείωσης στο μετρούμενο ρεύμα).

Στο σχήμα 4.7 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας. Η παρούσα και η προηγούμενη τιμή της τάσης και του ρεύματος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τιμές  $dI$  και  $dV$ .

Εάν  $dI=0$  και  $dV=0$ , οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν έχουν αλλάξει και το MPPT λειτουργεί ακόμα στο MPP. Εάν  $dV=0$  και  $dI>0$ , η ηλιακή ακτινοβολία έχει αυξηθεί, αυξάνοντας τη MPP τάση. Αυτό απαιτεί ο MPPT να αυξήσει τη τάση λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών για να ακολουθήσει το MPP. Αντιθέτως, εάν  $dI<0$ , η ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί, μειώνοντας την MPP τάση απαιτώντας από το MPPT να μειώσει τη τάση λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών. Εάν οι μεταβολές στη τάση και το ρεύμα δεν είναι μηδέν, οι σχέσεις στις εξισώσεις 4.4 και 4.5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν την κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να αλλάξει η τάση προκειμένου να επιτευχθεί το MPP.

Εάν  $dI/dV > -I/V$ , τότε  $dP/dV > 0$ , και το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών είναι αριστερά από το MPP στην καμπύλη P-V. Κατά συνέπεια η τάση της συστοιχίας φωτοβολταϊκών πρέπει να αυξηθεί και να προσεγγίσει το MPP. Ομοίως, εάν  $dI/dV < -I/V$ , τότε  $dP/dV < 0$  και το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας βρίσκεται στα δεξιά του σημείου MPP στην καμπύλη P-V που σημαίνει ότι η τάση πρέπει να μειωθεί για να φθάσει το MPP. Εδώ υπάρχει ένα **πλεονέκτημα** της αυξητικής αγωγιμότητας έναντι του αλγορίθμου "διατάραξης και παρατήρησης". Η αυξητική αγωγιμότητα μπορεί πράγματι να υπολογίσει την κατεύθυνση στην οποία πρέπει να διαταράξει το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών για να φθάσει το MPP, και μπορεί να προσδιορίσει πότε πραγματικά έχει προσεγγίσει το MPP. Κατά συνέπεια, κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες, αποφεύγεται η περίπτωση να ακολουθηθεί λανθασμένη κατεύθυνση, όπως συμβαίνει με το P&O, και να υπάρχει ταλάντευση γύρω από το σημείο MPP όταν αυτό προσεγγιστεί.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου αυξητικής αγωγιμότητας.

#### 4.4 Παρασιτικής χωρητικότητας (Parasitic Capacitance)

Ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας, με την διαφορά ότι περιλαμβάνει και την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών κυττάρων  $C_p$ , το οποίο περιλαμβάνει και την περιγραφή της συσσώρευσης φορτίου στην περιοχή p-n. Με την προσθήκη αυτής της χωρητικότητας στην εξίσωση 4.9 και παριστάνοντας την χωρητικότητα με την σχέση  $I(t) = C \frac{dV}{dt}$ , προκύπτει η σχέση:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_P + R_S I}{a} \right) - 1 \right] + C_P \frac{dV_P}{dt} = F(V_P) + C_P \frac{dV_P}{dt} \quad (4.6)$$

Ο δεξιός όρος παρουσιάζει δύο συνιστώσες του ρεύματος  $I$ . Η μία είναι συνάρτηση της τάσης  $F(V_P)$  και η άλλη του ρεύματος στην παρασιτική χωρητικότητα. Με βάση αυτή την παρατήρηση, η αυξητική αγωγιμότητα της συστοιχίας  $g_P$  μπορεί να οριστεί ως  $dF(V_P)/dV_P$  και η στιγμιαία αγωγιμότητα της συστοιχίας φωτοβολταϊκών,  $g_L$  μπορεί να οριστεί ως  $-F(V_P)/V_P$ . Το MPP βρίσκεται στο σημείο όπου  $dP/dV_P = 0$ . Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση (4.6) με τη



τάση  $V_P$  της συστοιχίας και διαφορίζοντας το αποτέλεσμα προκύπτει η εξίσωση για την ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο MPP:

$$\frac{dF(V_P)}{dV_P} + C_P \left( \frac{\dot{V}}{V} + \frac{\dot{V}}{V} \right) + \frac{F(V_P)}{V_P} = 0 \quad (4.7)$$

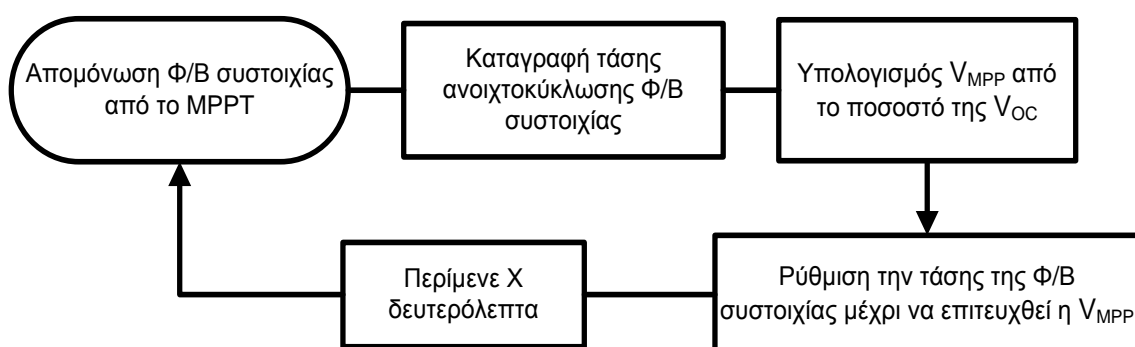
Οι τρεις όροι στην εξίσωση (4.7) αντιπροσωπεύουν τη στιγμιαία αγωγιμότητα, την αυξητική αγωγιμότητα και την επαγόμενη κυμάτωση της παρασιτικής χωρητικότητας. Η πρώτη και δεύτερη παράγωγος της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας λαμβάνουν υπόψη τις συνιστώσες κυμάτωσης του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγονται από το μετατροπέα, εφόσον έχει συνδεθεί τέτοιος στην έξοδο του ρυθμιστή MPPT. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν το  $C_P$  είναι ίσο με μηδέν, η εξίσωση απλοποιείται σε αυτή που χρησιμοποιείται για τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας.

#### 4.5 Σταθερής τάσης (Constant Voltage)

Η βάση για τον αλγόριθμο σταθερής τάσης είναι η παρατήρηση, μέσω των καμπυλών I-V όπως εκείνη του σχήματος 4.1, ότι η αναλογία της μέγιστης τάσης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών  $V_{MPP}$ , και της τάσης ανοιχτοκυκλώματος  $V_{OC}$ , είναι περίπου σταθερή:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} = K < 1 \quad (4.8)$$

Ο αλγόριθμος σταθερής τάσης μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο **σχήμα 4.8**:

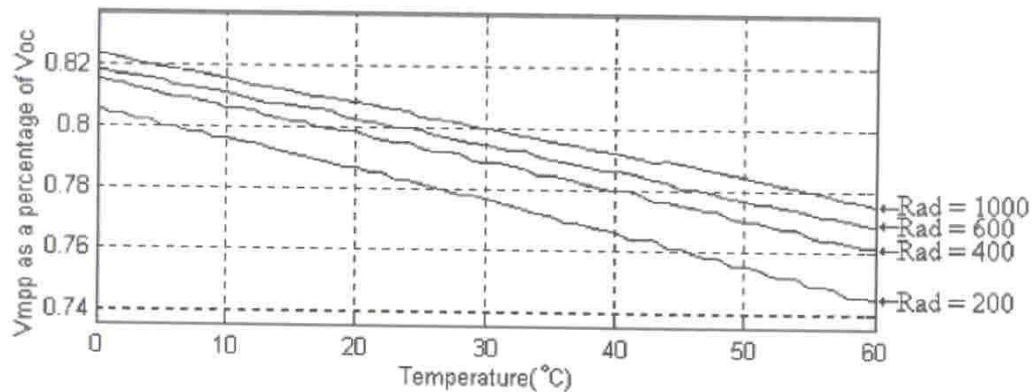


**Σχήμα 4.8** Τυπικό διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο σταθερής τάσης.

Η συστοιχία φωτοβολταϊκών απομονώνεται προσωρινά από τον MPPT και λαμβάνεται μια μέτρηση του  $V_{OC}$ . Στη συνέχεια ο αλγόριθμος υπολογίζει το σωστό σημείο λειτουργίας χρησιμοποιώντας την **εξίσωση 4.8** και την καθορισμένη τιμή του  $K$ , και ρυθμίζει την τάση της

φωτοβολταϊκής συστοιχίας μέχρι να επιτευχθεί η υπολογισμένη τιμή  $V_{MPP}$ . Αυτή η λειτουργία επαναλαμβάνεται περιοδικά για να ακολουθηθεί η θέση του MPP.

Αν και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή είναι δύσκολο να επιλεγεί η βέλτιστη τιμή της σταθεράς  $K$ . Η βιβλιογραφία αναφέρει επιτυχή αποτελέσματα για τιμές του  $K$  που κυμαίνονται από 73% έως 80%. Το σχήμα 4.9 παρουσιάζει πραγματικές τιμές  $K$  που απαιτούνται για ένα δεδομένο φωτοβολταϊκό σύστημα για ένα εύρος θερμοκρασίας 0 - 600 και ακτινοβολία από 200 σε 1000  $W/m^2$ .



**Σχήμα 4.9** Η τάση  $V_{MPP}$  σαν ποσοστό του  $V_{OC}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας.

Οι εξισώσεις ρεύματος και τάσεως για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I = I_L - I_{OS} \left[ \exp \frac{q}{Ak_B T} (V - IR) - 1 \right] \quad (4.9)$$

$$I_{OS} = I_{OR} \left( \frac{T}{T_R} \right) \exp \left[ \frac{qE_G}{Ak_B} \left( \frac{i}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.10)$$

$$I_L = \left( \frac{G}{1000} \right) [I_{SC} + K_{T1} (T - T_R)] \quad (4.11)$$

Όπου:

$I_{OS}$  : Συνάρτηση του ρεύματος κορεσμού  $I_{OR}$

$A$  : Συντελεστής των διόδων,

$Q$  : Το φορτίου του ηλεκτρονίου,

$I_L$  : Ρεύμα συναρτήσει της θερμοκρασίας,

$I_{OR}$  : Αντίστροφο ρεύμα κορεσμού,

$R$  : Αντίσταση σειράς φωτοβολταϊκού,

$K_{Ti}$ : Συντελεστής θερμοκρασίας

$T_R$ : Τυπική θερμοκρασία αναφοράς,

$T$ : Θερμοκρασία,

$G$ : Ακτινοβολία σε  $W/m^2$ ,

$I_{SC}$ : Ρεύμα βραχυκυκλώματος σε τυπικές θερμοκρασίες δοκιμών,

$k_B$ : Σταθερά Boltzman

Είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος MPPT **σταθερού ρεύματος** αντί της σταθερής τάσης ο οποίος υπολογίζει το MPP ρεύμα ως σταθερό ποσοστό του ρεύματος βραχυκυκλώματος. Για να υλοποιηθεί αυτός ο αλγόριθμος, τοποθετείται ένας διακόπτης στους ακροδέκτες εισόδου του μετατροπέα ο οποίος κλείνει στιγμιαία. Στην συνέχεια μετريέται το ρεύμα βραχυκυκλώματος και υπολογίζεται το MPP ρεύμα. Κατόπιν ρυθμίζεται το ρεύμα εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από το MPPT έως ότου επιτευχθεί το υπολογισμένο ρεύμα. Αυτή η λειτουργία επαναλαμβάνεται περιοδικά. Ο έλεγχος σταθερής τάσης όμως υπερτερεί έναντι του σταθερού ρεύματος λόγω της σχετικής ευκολίας μέτρησης των τάσεων και επειδή είναι σχετικά απλό να ανοιχτοκυκλωθεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία.

## 4.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε ξεχωριστά ορισμένους από τους πλέον χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους MPPT. Ο αλγόριθμος **διατάραξης και παρατήρησης** είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος στην πράξη λόγω της εύκολης εφαρμογής του και αυτό είναι και το πλεονέκτημά του σε σχέση με τους υπόλοιπους. Ο αλγόριθμος **αυξητικής αγωγιμότητας** έχει ένα πλεονέκτημα έναντι του αλγόριθμου "διατάραξης και παρατήρησης": κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας μπορεί να εντοπίσει τη σωστή κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος και να σταθεροποιηθεί σε αυτό και έτσι αποφεύγεται η περίπτωση να ακολουθηθεί λανθασμένη κατεύθυνση, όπως συμβαίνει με το P&O αλγόριθμο, και να υπάρχει ταλάντευση γύρω από το σημείο MPP όταν αυτό προσεγγιστεί. Ο αλγόριθμος **παρασιτικής χωρητικότητας** είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας, εκτός από το ότι περιλαμβάνει και την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών κυττάρων  $C_p$ . Τέλος, ο αλγόριθμος **σταθερής τάσης** βασίζεται στην παρατήρηση, μέσω των καμπυλών I-V, ότι η αναλογία της μέγιστης τάσης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών  $V_{MPP}$ , και της τάσης ανοιχτοκυκλώματος  $V_{OC}$ , είναι περίπου σταθερή. Λαμβάνεται υπόψη ότι πρέπει να καθοριστεί η σωστή τιμή του  $K$  για λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος αυτός. Ανάλογα λοιπόν με την κάθε εφαρμογή που εκτελείται και τις απαιτήσεις αυτής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τον εκάστοτε αλγόριθμο MPPT.

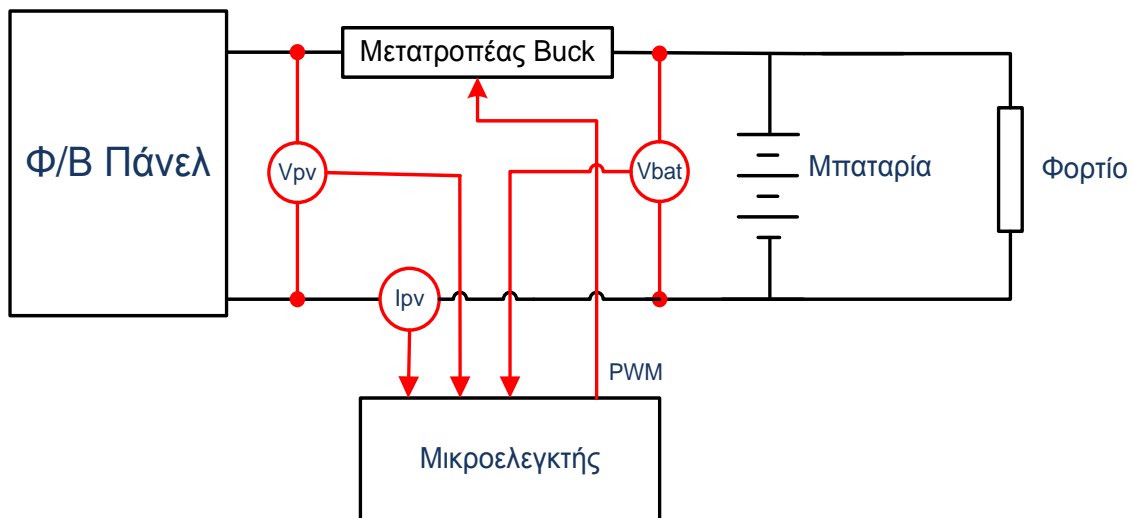
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ MPPT ΜΕ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ AVR ATmega16

### 5.1 Εισαγωγή

Σ αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος με το οποίο ανιχνεύεται η μέγιστη ισχύς του πάνελ και παρέχεται στη μπαταρία φορτίζοντάς την έτσι με την μέγιστη ισχύ. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση της διάταξης, επεξηγώντας τα επιμέρους τμήματά της.

Το γενικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1 Σχηματικό διάγραμμα του Φ/Β συστήματος.

Μέσω του μετατροπέα ADC του **μικροελεγκτή ATmega16**, λαμβάνονται συνεχώς μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του πάνελ όπως και της τάσης της μπαταρίας. Στην συνέχεια, μέσω του αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης (P&O), υπολογίζεται η διαθέσιμη ισχύς του Φ/Β πάνελ και μέσω ενός **PWM σήματος συχνότητας 15KHz** που δημιουργείται από τον μικροελεγκτή **ελέγχουμε κατάλληλα το P – Mosfet του Buck μετατροπέα** ώστε να φορτίζεται η μπαταρία με τη μέγιστη δυνατή ισχύ.

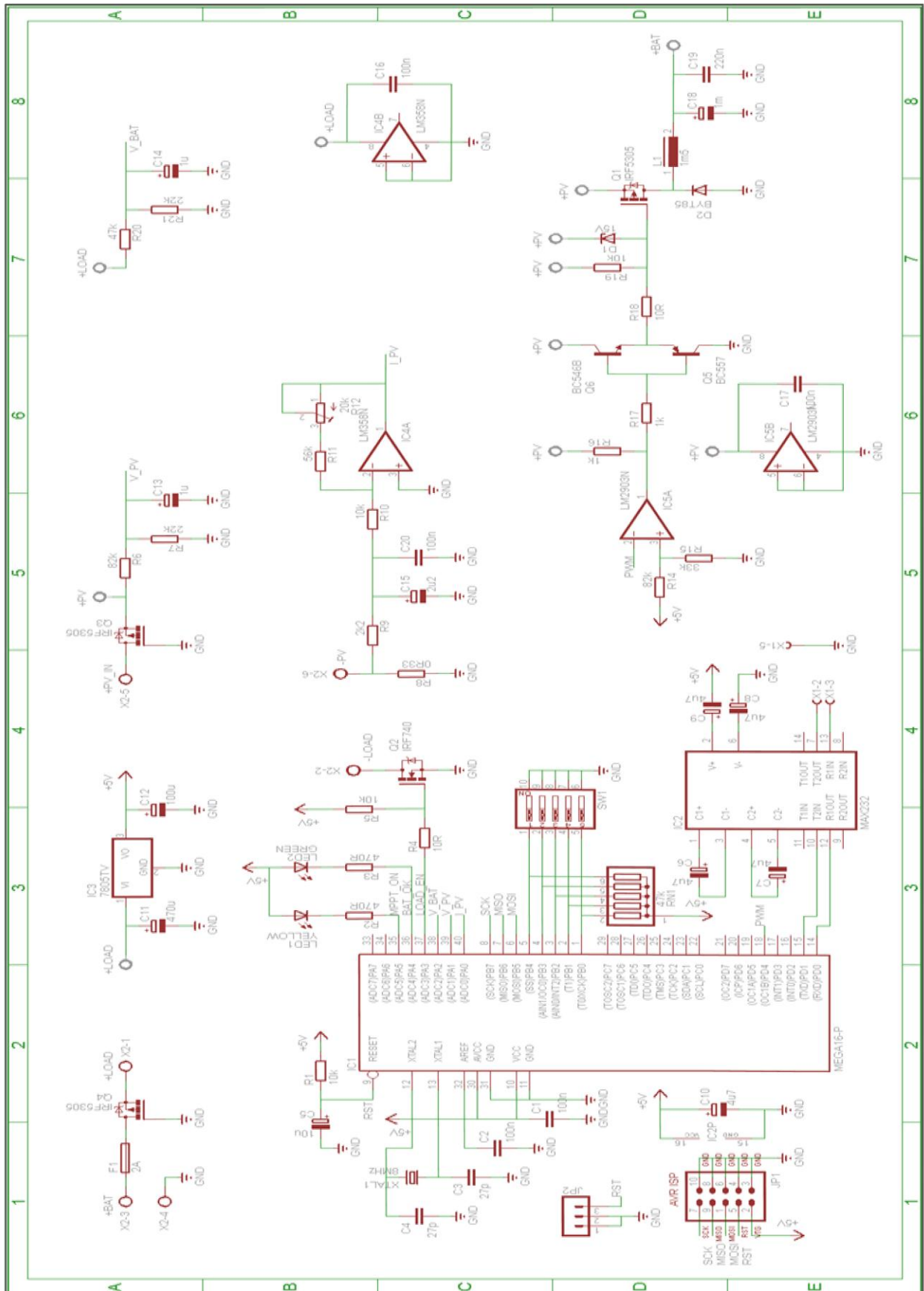
Ακόμη, θα αναφερθούμε στον **μικροελεγκτή AVR ATmega16** και τα χαρακτηριστικά στοιχεία που διέπουν την λειτουργία του. Θα αναλύσουμε επίσης το **λογισμικό προγραμματισμού CodeVision C compiler**.

Τέλος, παρουσιάζεται λεπτομερής επεξήγηση του κώδικα μέσω του οποίου υλοποιήθηκαν οι δύο **αλγόριθμοι** που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του MPPT στην παρούσα εργασία.

## **5.2 Ανάλυση και Επεξήγηση της Διάταξης**

Στο σχήμα 5.2 παρατίθεται το **σχηματικό διάγραμμα** της διάταξης που κατασκευάστηκε για την υλοποίηση του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος. Τα κύρια στοιχεία τα οποία απαρτίζουν τη διάταξη αυτή είναι τα εξής:

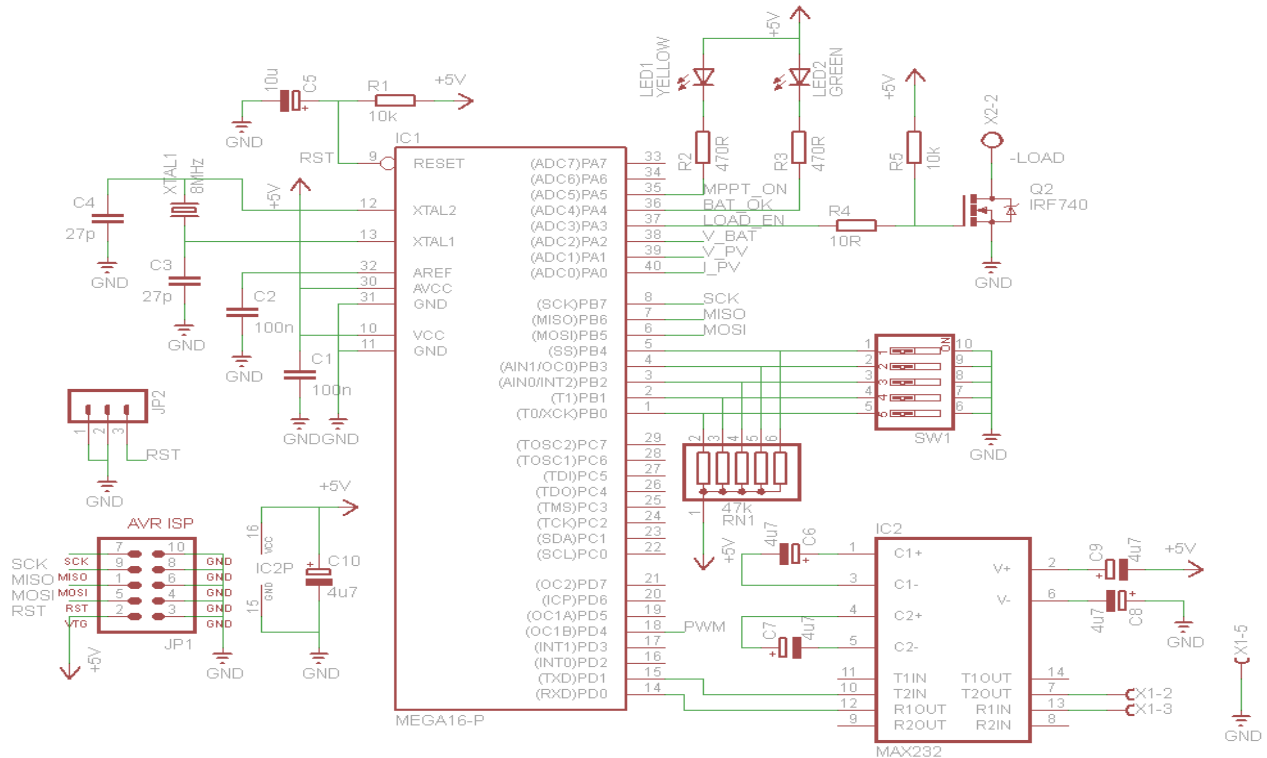
- 1) Το κύκλωμα του μικροελεγκτή
- 2) Ο Buck DC-DC μετατροπέας
- 3) Το κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος του πάνελ
- 4) Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης του πάνελ
- 5) Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας
- 6) Το κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας



Σχήμα 5.2 Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης του MPPT.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα επιμέρους τμήματα της κατασκευής:

### 1) Το κύκλωμα του μικροελεγκτή

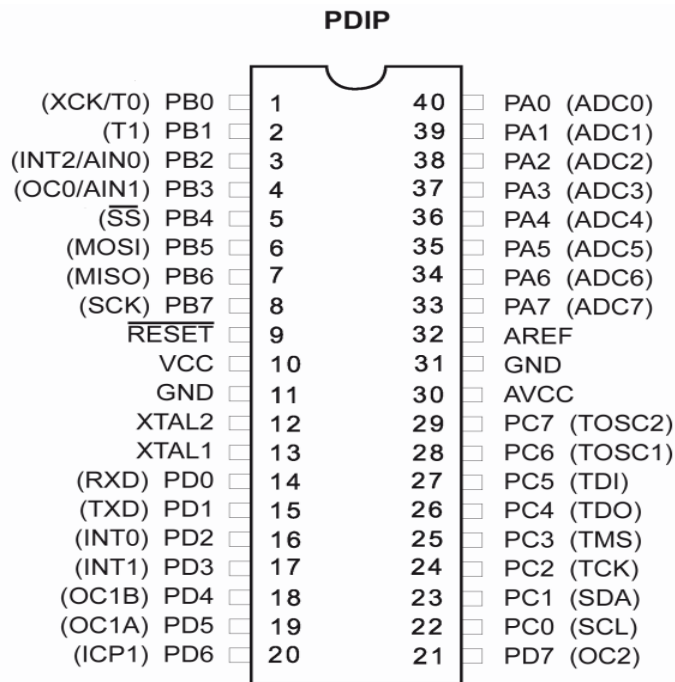


Σχήμα 5.3 Ο μικροελεγκτής και οι διάφορες συνδέσεις που πραγματοποιούνται σε αυτόν.

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή είναι ο ATmega16 της εταιρίας Atmel, με τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά [24]:

- 8-bit μικροελεγκτής με αρχιτεκτονική RISC
- 16K bytes μνήμης προγράμματος Flash
- 512 bytes μνήμης EEPROM 1K bytes μνήμης SRAM
- 32 γραμμές ψηφιακών εισόδων / εξόδων
- 2 x 8-bit χρονιστές, 1 x 16-bit χρονιστής
- Μετατροπέας ADC 10-bit για έως 8 αναλογικές εισόδους
- Μονάδα αναλογικού συγκριτή
- Προγραμματιζόμενη μονάδα USART σύγχρονης / ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας
- Υποστήριξη πρωτοκόλλων SPI, I2C
- Χρονιστής επιτήρησης (WDT) με ξεχωριστό ταλαντωτή
- 6 συνολικά καταστάσεις λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας





**Σχήμα 5.4** Οι ακροδέκτες του ATmega16 [25].

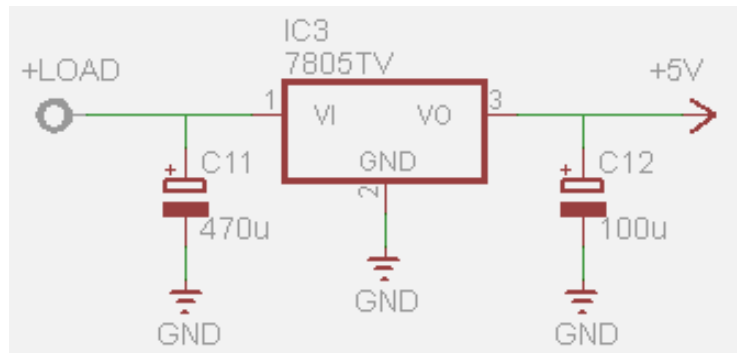
Προκειμένου να εκτελεστεί κάθε μια εντολή όπως καθορίζεται από το πρόγραμμα, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU - Central Processing Unit) εκτελεί μια σειρά από διαδοχικές λειτουργίες, ο συγχρονισμός των οποίων παρέχεται από ένα σήμα ρολογιού. Οι μικροελεγκτές γενικά υποστηρίζουν διάφορες πηγές παραγωγής σήματος ρολογιού του συστήματος. Η κατασκευή αυτή διαθέτει έναν **εξωτερικό ταλαντωτή 8MHz** για την παραγωγή του σήματος χρονισμού και η επιλογή αυτή έγινε λόγω της μεγάλης ακρίβειας, της ανθεκτικότητας σε μεταβολές της θερμοκρασίας και του αρκετά χαμηλού κόστους αγοράς [24].

Όπως παρατηρούμε και από το **σχήμα 5.3**, στην **πύρτα A** όπου βρίσκεται και ο **μετατροπέας ADC**, έχουμε συνδέσει τις 3 αναλογικές εισόδους για την μέτρηση του ρεύματος του πάνελ (PA.0), της τάσης του πάνελ (PA.1) και της τάσης της μπαταρίας (PA.2). Μέσω της PA.3 και του *Mosfet IRF740* γίνεται έλεγχος του φορτίου. Στις επόμενες δύο πύρτες έχουν συνδεθεί δύο led που θα αναβοσβήνουν ανάλογα με τις διάφορες καταστάσεις που έχουν οριστεί στο κυρίως πρόγραμμα. Ο **ADC μετατροπέας** μετατρέπει ένα αναλογικό σήμα εισόδου σε ψηφιακό σήμα των 10 bits με την μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων για να έχουμε την δυνατότητα της εμφάνισης των δεδομένων του συστήματος.

Στην **πύρτα B** έχουν συνδεθεί πέντε διακόπτες για τον χειροκίνητο έλεγχο του συστήματος.

Με την βοήθεια του **ολοκληρωμένου max232n** καθίσταται εφικτή η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή μέσω της **σειριακής RS-232** θύρας του υπολογιστή. Το ολοκληρωμένο αυτό χρησιμοποιώντας διατάξεις με πυκνωτές, παράγει την απαιτούμενη τάση που χρειάζεται η σειριακή θύρα για να είναι εφικτή η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή.

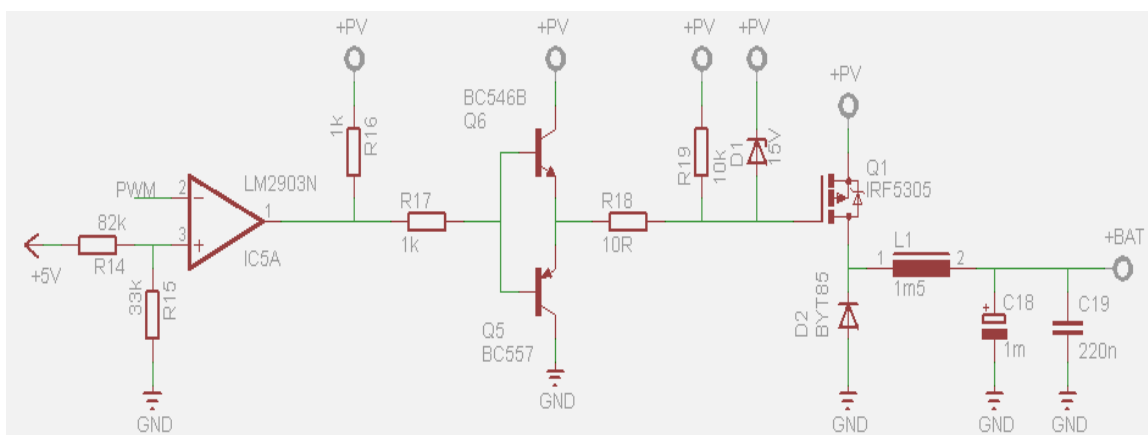
Για να μπορεί ο μικροελεγκτής να λειτουργήσει χρειάζεται τάση τροφοδοσίας 5 Volt και τα οποία παρέχονται μέσω του κυκλώματος στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 5.5** Κύκλωμα τροφοδοσίας του μικροελεγκτή.

Ο **σταθεροποιητής 7805** δέχεται στην είσοδο την τάση της μπαταρίας και στην έξοδο βγάζει 5 Volt σταθερά για την τροφοδοσία του ATmega16. Γι αυτό τον λόγο πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η μπαταρία θα είναι πάντα τοποθετημένη στο σύστημα γιατί σε άλλη περίπτωση ο μικροελεγκτής μας δεν θα δουλεύει και επομένως ούτε ο MPPT.

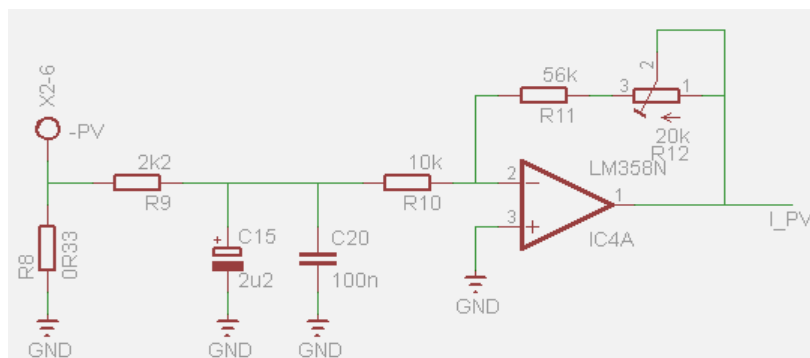
## 2) Ο Buck DC-DC μετατροπέας.



**Σχήμα 5.6** Ο Buck μετατροπέας και το κύκλωμα οδήγησής του από το PWM σήμα του μικροελεγκτή.

Το κύκλωμα προσαρμογής της ισχύος του πάνελ υλοποιεί έναν DC-DC μετατροπέα τύπου Buck, για τον έλεγχο της διακοπτικής λειτουργίας του οποίου έχει χρησιμοποιηθεί το **p-channel MOSFET IRF5305**. Καθώς η οδήγηση του mosfet αυτού δεν μπορεί να γίνει απευθείας από το PWM σήμα που παράγει ο μικροελεγκτής, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ειδικό στάδιο οδήγησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Συγκεκριμένα ο λόγος που βάζουμε τον συγκριτή LM2903N και τα δύο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία "totem pole" είναι ότι σε υψηλές συχνότητες οι παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ πύλης-πηγής και πύλης-εκροής έχουν σημαντική επίδραση στην συνολική λειτουργία του **IRF5305**. Έτσι, για να τις φορτίσουμε και να τις εκφορτίσουμε γρήγορα, ώστε η τάση της πύλης να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα τάσης γρήγορα και το MOSFET να ανοιγοκλείσει σωστά, θα πρέπει η οδήγηση να γίνει από πηγή ρεύματος. Τα 2 συμπληρωματικά (NPN-PNP) τρανζίστορ **Q5-Q6** έχουν συνδεθεί ως "totem pole" όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για να επιτύχουμε αυτό το αποτέλεσμα. Όμως για να πολωθούν σωστά οι βάσεις των Q5-Q6 η τάση που δίνει ο μικροελεγκτής δεν αρκεί, και θα πρέπει τα επίπεδα τάσης του μικροελεγκτή από 0-5V να ανυψωθούν σε 0 - (+PV) δηλαδή την τάση του πάνελ. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του **συγκριτή LM2903N**, στην μη-αναστρέφουσα είσοδο του οποίου (pin3) υπάρχει ένας διαιρέτης τάσης που εξασφαλίζει μια σταθερή τιμή σύγκρισης, ενώ στην αναστρέφουσα είσοδο (pin2) βρίσκεται το PWM σήμα που λαμβάνεται από τον ακροδέκτη PD.4 του μικροελεγκτή.

### 3) Το κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος του πάνελ.

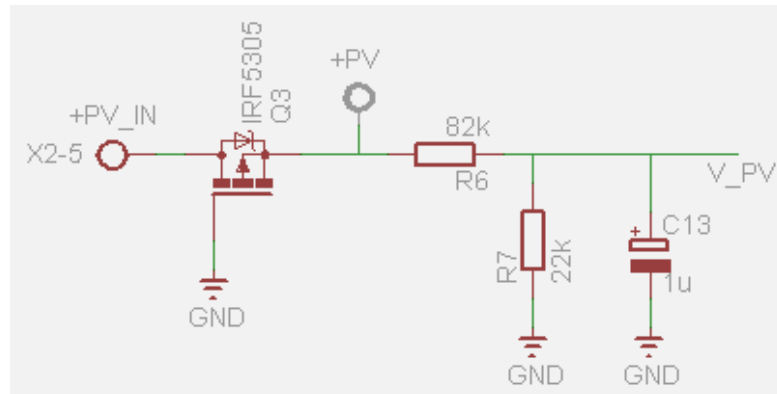


**Σχήμα 5.7** Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος του πάνελ.

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την ισχύ του πάνελ χρειάζεται να μετρήσουμε το ρεύμα και την τάση του πάνελ. Έτσι, σύμφωνα και με το παραπάνω σχήμα, τοποθετώντας μια **βατική αντίσταση** μικρής τιμής (0.39 Ωμ στην περίπτωση μας) ως προς γη παίρνουμε την πτώση τάσης πάνω σε αυτήν. Η πτώση τάσης εάν την διαιρέσουμε με την 0.39 Ωμ θα δώσει το συνολικό ρεύμα που δίνει το πάνελ για τις τρέχουσες συνθήκες ηλιοφάνειας και

θερμοκρασίας. Στην συνέχεια ενισχύουμε αυτή την πτώση τάσης με τον **ενισχυτή LM358N** ώστε να την οδηγήσουμε στον μικροελεγκτή. Η μετατροπή της μέτρησης αυτής του ADC σε Ampere, ώστε να καταγραφεί η ακριβής τιμή του ρεύματος, γίνεται στον κώδικα του προγράμματος, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά του κυκλώματος.

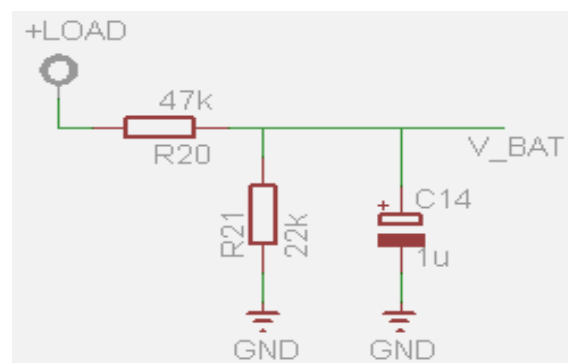
#### 4) Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης του πάνελ



**Σχήμα 5.8** Κύκλωμα μέτρησης της τάσης του πάνελ.

Η μέτρηση της τάσης του πάνελ γίνεται μέσω του **διαιρέτη τάσης**, ο οποίος υποβιβάζει την τάση περιορίζοντας το μέγιστο πλάτος στα 5Volt, προκειμένου να είναι εφικτή η ασφαλής μέτρησή της από τον ADC του μικροελεγκτή. Η μετατροπή της μέτρησης αυτής του ADC σε Volt, ώστε να καταγραφεί η ακριβής τιμή της τάσης, γίνεται στον κώδικα του προγράμματος, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά του κυκλώματος. Ο πυκνωτής που τοποθετήθηκε χρησιμεύει στην εξομάλυνση της τάσης αναφοράς ενώ το Mosfet IRF5305 στην προστασία του πάνελ από λάθος συνδεσμολογία της πολικότητας.

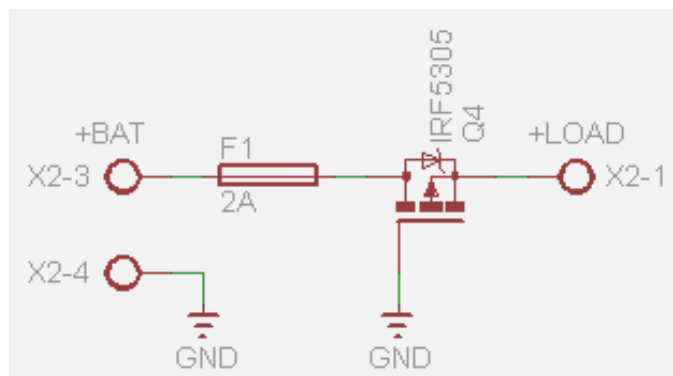
#### 5) Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας



**Σχήμα 5.9** Κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας.

Η μέτρηση της τάσης της μπαταρίας γίνεται μέσω του παραπάνω **διαιρέτη τάσης**, ο οποίος υποβιβάζει την τάση περιορίζοντας το μέγιστο πλάτος στα 5Volt, προκειμένου να είναι εφικτή η ασφαλής μέτρησή της από τον ADC του μικροελεγκτή. Η μετατροπή της μέτρησης αυτής του ADC σε Volt, ώστε να καταγραφεί η ακριβής τιμή της τάσης, γίνεται στον κώδικα του προγράμματος, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά του κυκλώματος. Ο πυκνωτής που τοποθετήθηκε χρησιμεύει στην εξομάλυνση της τάσης αναφοράς από την μπαταρία.

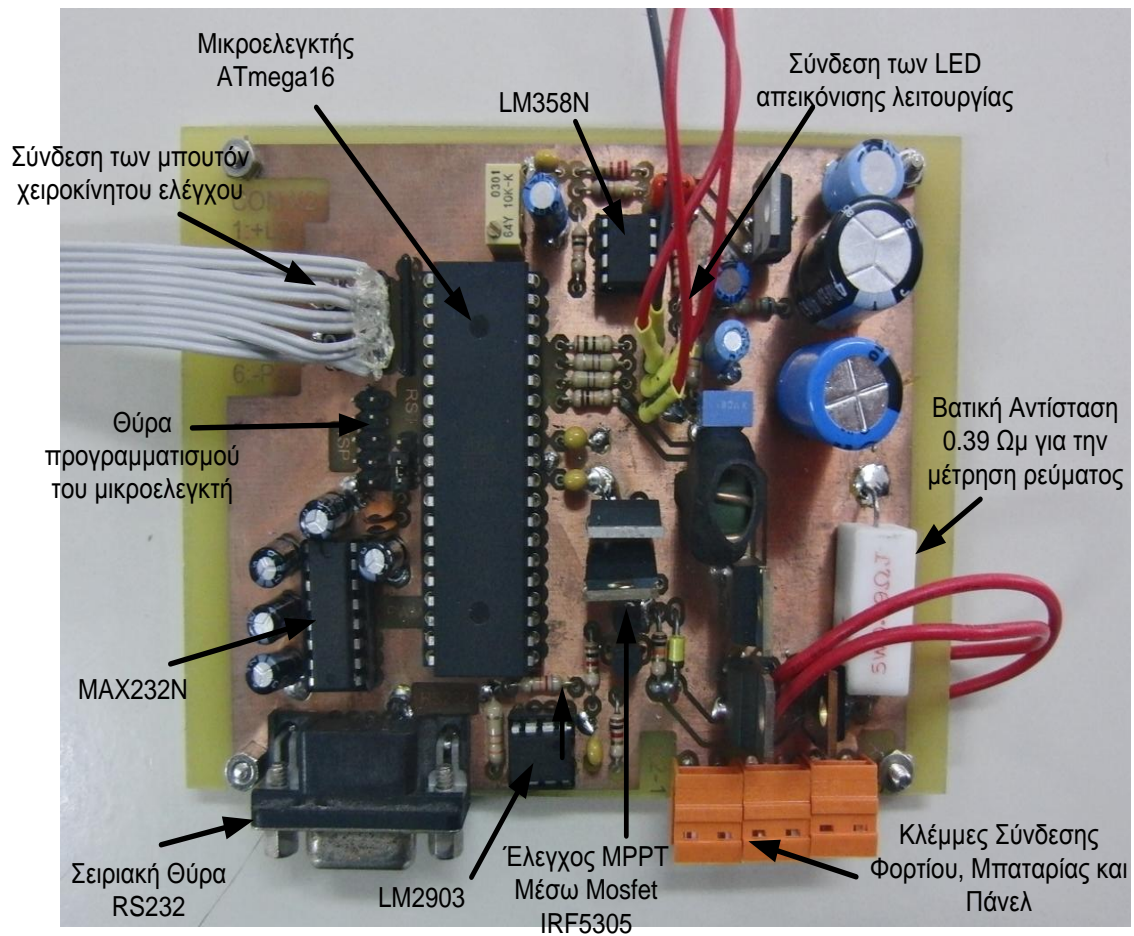
## 6) Το κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας



**Σχήμα 5.10** Κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας.

Η **ασφάλεια των 2 Ampere** τοποθετείται για την προστασία του συστήματος, ενώ με το **Mosfet IRL5305** προστατεύουμε την μπαταρία από τυχόν λάθος σύνδεση του φορτίου ώστε να μην υπάρχει η δυνατότητα αντίθετης ροής ρεύματος προς την μπαταρία.

Τέλος, στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η **πλακέτα που κατασκευάσαμε για την υλοποίηση του MPPT** και μια μικρή αναφορά των κυριότερων υλικών της:



**Σχήμα 5.11** Πραγματική πλακέτα υλοποίησης του MPPT.

### 5.3 Ανάπτυξη του προγράμματος της εφαρμογής

Ο μικροελεγκτής από μόνος του αποτελεί το υλικό μέρος (hardware), όπως και οι Η/Υ, αλλά δεν θα είχε καμία ιδιαίτερη αξία αν δεν ήταν εφικτός ο προγραμματισμός του, ώστε να ανταποκρίνεται στην εκάστοτε περίπτωση. Έτσι ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή, δηλαδή το λογισμικό (software), όχι μόνο έχει ιδιαίτερη σημασία, αλλά σχεδόν πάντα και μεγαλύτερη αξία από το υλικό μέρος αφού αυτό δίνει «ζωή» στον μικροελεγκτή. Κάθε μικροελεγκτής μπορεί να προγραμματιστεί με γλώσσα χαμηλού επιπέδου assembly.

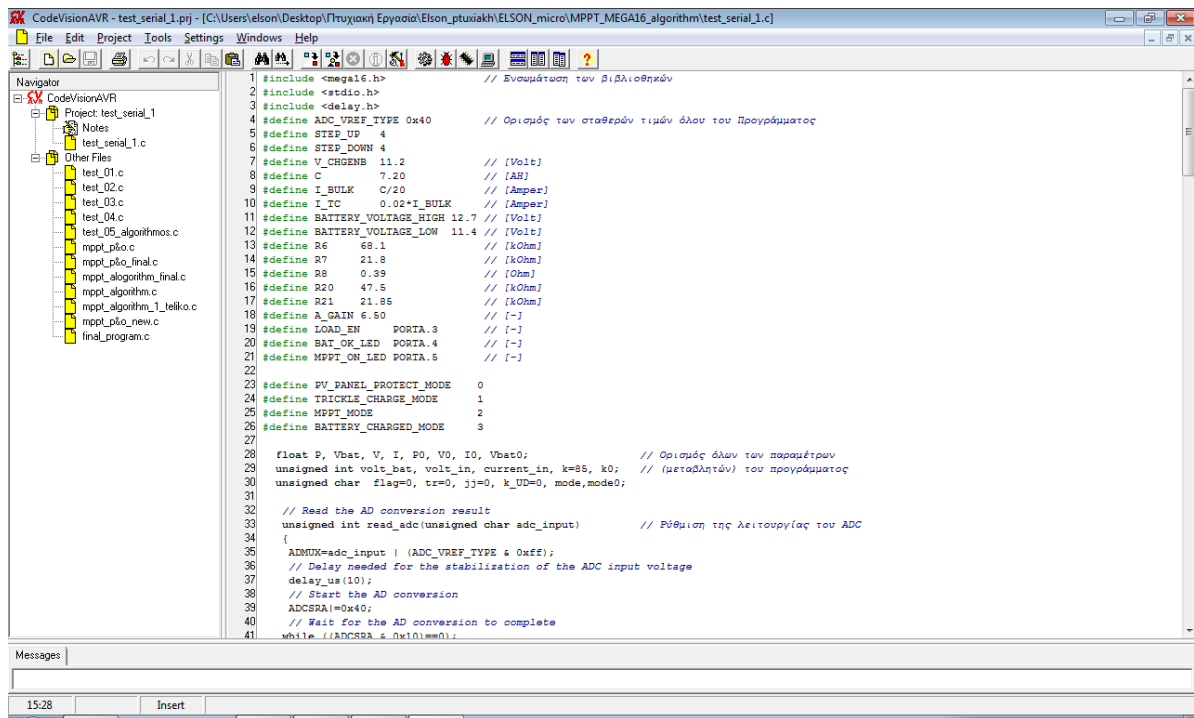
Ο προγραμματισμός με την γλώσσα assembly προσφέρει σημαντικά μειωμένο μέγεθος κώδικα και αυξημένη ταχύτητα, όμως έχει όλες τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει ένας προγραμματιστής με μία γλώσσα χαμηλού επιπέδου και ειδικά στην συντήρηση μεγάλου κώδικα.

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα και να γίνει ευκολότερος ο προγραμματισμός του, ο μικροελεγκτής μπορεί να προγραμματιστεί και με γλώσσες υψηλού επιπέδου όπως C, Basic, Pascal κλπ, έχοντας βέβαια ως πλεονέκτημα την ευκολότερη ανάπτυξη και συντήρηση του κώδικα.

Για να μεταφερθεί ένα πρόγραμμα στον μικροελεγκτή, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μεσολάβηση του μεταγλωττιστή (compiler), ώστε να μετατραπεί το πρόγραμμα σε γλώσσα μηχανής αλλά και ένας «προγραμματιστής» που ουσιαστικά αναλαμβάνει να «φορτώσει» το πρόγραμμα στη μνήμη του μικροελεγκτή. Συνήθως η γλώσσα προγραμματισμού εξαρτάται από την οικογένεια του μικροελεγκτή, πχ οι AVR έχει επικρατήσει να προγραμματίζονται κυρίως με C και κατά δεύτερο με assembly και ελάχιστα με κάποια άλλη γλώσσα. Ο κώδικας μας για την υλοποίηση του MPPT έχει γραφεί σε γλώσσα C στο περιβάλλον του μεταγλωττιστή CodeVision AVR.

#### 5.3.1 CodeVision AVR

Ο μεταγλωττιστής που χρησιμοποιούμε είναι το πρόγραμμα CodeVision AVR ( σχήμα 5.11) και είναι της εταιρίας HP Info Tech. Υποστηρίζει όλους τους μικροελεγκτές της οικογένειας AVR και έχει δυνατότητα ανάπτυξης κώδικα σε C και βέβαια σε assembly, ενώ διαθέτει επίσης λειτουργία για τη μεταφορά του προγράμματος στον μικροελεγκτή.



Σχήμα 5.12 Το περιβάλλον προγραμματισμού της CodeVision AVR.

## 5.4 Υλοποίηση του αλγόριθμου ανίχνευσης του MPP

Για την υλοποίηση του αλγόριθμου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος και γενικά για την φόρτιση των μπαταριών, πραγματοποιήθηκε ένα πρόγραμμα στην **CodeVision** όπου περιλαμβάνει όλα τα στάδια για την σωστή και «ποιοτική» φόρτιση των μπαταριών σε κάθε φάση ανάλογα με την διαθέσιμη χωρητικότητά τους.

Για την **εύρεση του MPP** έχουν υλοποιηθεί δύο παραλλαγές του αλγόριθμου **διατάραξης και παρατήρησης (Perturb and Observation - P&O)**: Στην **πρώτη παραλλαγή** η αυξομείωση της τιμής του D.C. του PWM (μέσω του οποίου ρυθμίζεται η ισχύς του πάνελ) υπολογίζεται στη βάση της μεταβολής της αποδιδόμενης ισχύος συναρτήσει της προηγούμενης μεταβολής του D.C. του PWM. Στη **δεύτερη παραλλαγή** η αυξομείωση του D.C. του PWM σήματος υπολογίζεται από την μεταβολή της αποδιδόμενης ισχύος συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος του πάνελ [26]. Τα διαγράμματα ροής των αλγορίθμων αυτών βρίσκονται στο κεφάλαιο 4 και στην ενότητα που αναφέρεται στον P&O αλγόριθμο.



Για την επιτήρηση της διαδικασίας φόρτισης της μπαταρίας, στην εφαρμογή έχουν προγραμματιστεί **4 καταστάσεις (modes) λειτουργίας**, η κάθε μία από τις οποίες υλοποιεί τις ενδεδειγμένες ενέργειες για το εύρος τιμών της τάσης της μπαταρίας στο οποίο αντιστοιχίζεται.

Όλα τα δεδομένα από την λειτουργία του συστήματος (μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του πάνελ, μέτρηση της μπαταρίας, υπολογισμός της ισχύος, τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας και τρέχουσα τιμή του D.C.) αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο μέσω της σειριακής θύρας του μικροελεγκτή. Χρησιμοποιώντας επομένως ένα κατάλληλο πρόγραμμα σειριακής επικοινωνίας (π.χ. HyperTerminal) μπορούμε εύκολα να παρακολουθούμε σε πραγματικό χρόνο τη λειτουργία του συστήματος, καθώς επίσης και να καταγράψουμε τα δεδομένα αυτά για περαιτέρω ανάλυση, για την εξαγωγή γραφικών παραστάσεων κλπ.

Για τον αυστηρό χρονισμό των παραπάνω ενεργειών του προγράμματος, έχει χρησιμοποιηθεί χρονικό interrupt των 64 msec μέσω του χρονιστή **Timer0** του ATmega16, στη βάση του οποίου εξασφαλίζεται σταθερός χρόνος εκτέλεσης για τον κάθε κύκλο ελέγχου (συλλογή μετρήσεων από τον ADC, εκτέλεση του κατάλληλου mode, αποστολή δεδομένων μέσω σειριακής θύρας) της εφαρμογής.

Τέλος, για την **δημιουργία του PWM σήματος** του μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε ο 16-bit χρονιστής **Timer1**. Η συχνότητα του PWM είναι ίση με 15.686KHz και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [24]:

$$f_{PWM} = \frac{F_{CK}}{(2 \cdot N \cdot TOP)}$$

Όπου,

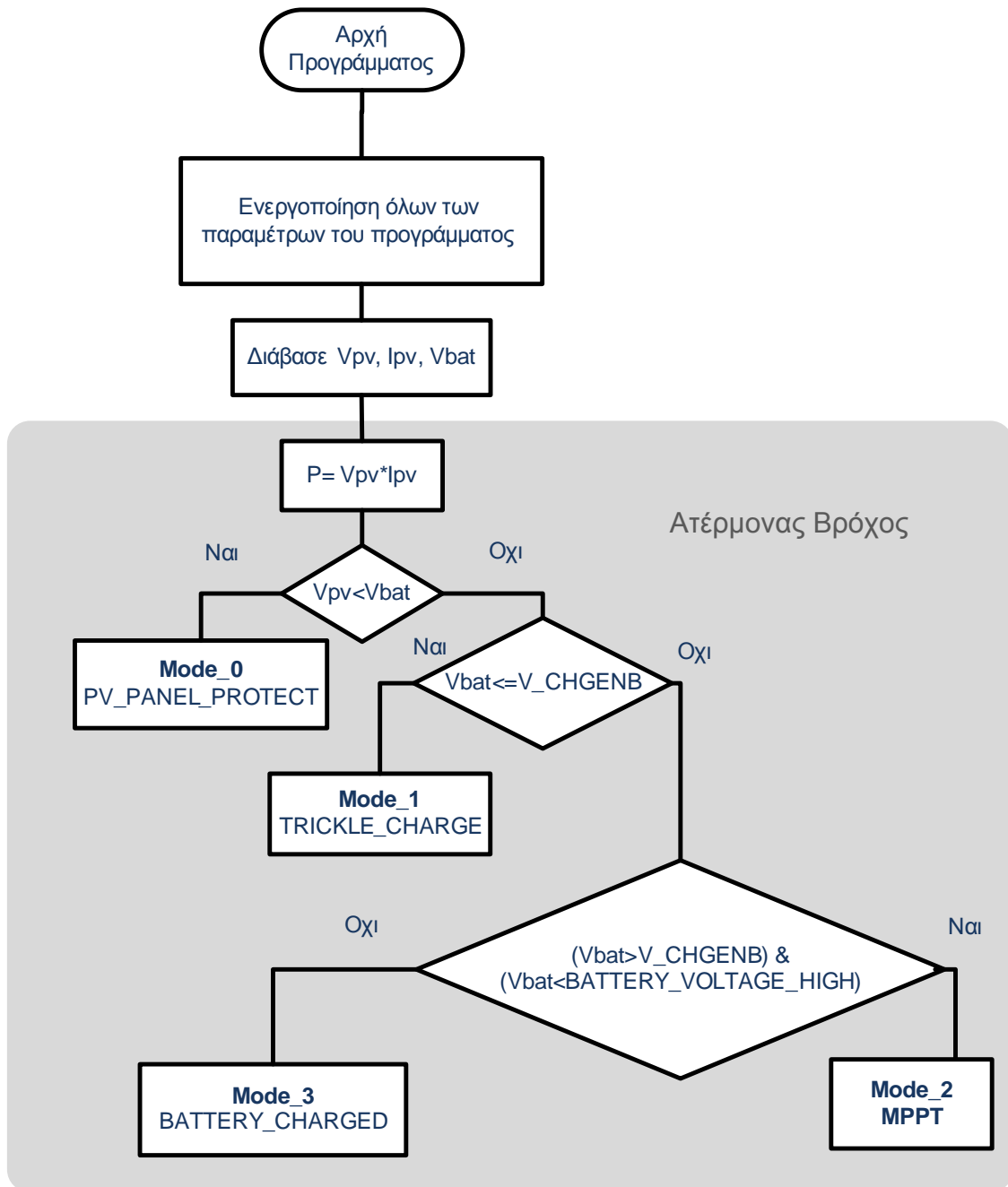
$F_{CK}$ : Συχνότητα ρολογιού του συστήματος (8MHz στην περίπτωση μας),

$N$ : Ο συντελεστής του prescaler ( $N=1$ ) και

$TOP$ : Για 8-bit μέτρηση είναι ίση με το  $2^8=255$

Οι ρυθμίσεις των καταχωρητών τόσο για την δημιουργία του PWM σήματος με τον Timer1 όσο και για τον χρόνο των 64msec με τον Timer0 βρίσκονται στο παρακάτω πρόγραμμα.

Για την καλύτερη κατανόηση της συνολικής λειτουργίας του προγράμματος φόρτισης παρουσιάζεται παρακάτω το σχετικό **διάγραμμα ροής**:



**Σχήμα 5.13** Διάγραμμα ροής της συνολικής λειτουργίας του προγράμματος.

Το παραπάνω διάγραμμα ροής αναφέρεται σε όλο το πρόγραμμα που πραγματοποιήσαμε και περιλαμβάνει όλα στάδια που απαιτούνται για την σωστή φόρτιση μια μπαταρίας. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, έχουμε 4 λειτουργίες (modes) ανάλογα με τα επίπεδα την διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας, όπου στην κάθε μια ξεχωριστά γίνονται διαφορετικές λειτουργίες. Οι σταθερές V\_CHGENB και BATTERY\_VOLTAGE\_HIGH αντιπροσωπεύουν τα κατώφλια τάσης της μπαταρίας, με βάση τα οποία επιλέγεται το κατάλληλο mode, οι ακριβείς τιμές των οποίων καθορίζονται μέσω των αντίστοιχών δηλώσεων #define στο κώδικα του προγράμματος. Στους ελέγχους μετάβασης στο κατάλληλο έχουν χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετες ζώνες υστέρησης για να αποφεύγονται οι συνεχείς εναλλαγές των modes λόγω θορύβου ή άλλων παραγόντων.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο **συνολικός κώδικας του προγράμματος**, με αναλυτική επεξήγηση της κάθε λειτουργίας:

Ενσωμάτωση των βιβλιοθηκών της CodeVision AVR που χρησιμοποιήσουμε για την δημιουργία του κώδικα.

```
#include <mega16.h>
#include <stdio.h>
#include <delay.h>
```

Ορισμός των σταθερών τιμών όλου του προγράμματος.

```
#define ADC_VREF_TYPE 0x40
#define STEP_UP      4
#define STEP_DOWN    4
#define V_CHGENB     11.2 // [Volt]
#define C             7.20 // [AH]
#define I_BULK       C/20 // [Amper]
#define I_TC         0.02*I_BULK // [Amper]
#define BATTERY_VOLTAGE_HIGH 12.7 // [Volt]
#define BATTERY_VOLTAGE_LOW  11.4 // [Volt]
#define R6           68.1 // [kOhm]
#define R7           21.8 // [kOhm]
#define R8           0.39 // [Ohm]
#define R20          47.5 // [kOhm]
#define R21          21.85 // [kOhm]
#define A_GAIN      6.50 // [-]
#define LOAD_EN     PORTA.3 // [-]
#define BAT_OK_LED  PORTA.4 // [-]
#define MPPT_ON_LED PORTA.5 // [-]
#define PV_PANEL_PROTECT_MODE 0
#define TRICKLE_CHARGE_MODE 1
#define MPPT_MODE   2
#define BATTERY_CHARGED_MODE 3
```

Δήλωση όλων των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών.

```
float P, Vbat, V, I, P0, V0, I0, Vbat0;
unsigned int volt_bat, volt_in, current_in, k=85, k0;
unsigned char flag=0, tr=0, jj=0, k_UD=0, mode, mode0;
```

Γενική συνάρτηση λήψης μέτρησης από τον *ADC*. Το όρισμα κλήσης της συνάρτησης αντιπροσωπεύει το κανάλι (0-7) της μέτρησης.

```
// Συνάρτηση λήψης των μετρήσεων του ADC
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{ ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
```

```

    delay_us(10);
    // Ενεργοποίηση ADC
    ADCSRA|=0x40;
    // Αναμονή μέχρι την ολοκλήρωση του ADC
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCW;
}

```

Υλοποίηση του χρόνου των *64msec* μέσω του χρονικού interrupt του timer0. Χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση σταθερού χρόνου εκτέλεσης του κύκλου ελέγχου.

```

interrupt [TIM0_COMP] void timer0_compare_isr(void)
{ tr++;
  if (tr==2)
  { flag=1;
    tr=0; }
}

```

**MODE\_0 - Προστασία Πάνελ:** Αποσύνδεση του πάνελ σε περίπτωση που η τάση της μπαταρίας υπερβεί την τάση του πάνελ ( $V_{bat} > V_{panel}$ ). Αυτό γίνεται για την προστασία του πάνελ από την εκφόρτιση σε αυτό της μπαταρίας.

```

void do_pn_panel_protect(void)
{ // Το φορτίο είναι απενεργοποιημένο σε αυτή την λειτουργία
  LOAD_EN=0;
  k=50;
}

```

**MODE\_1 – Λειτουργία Ήπιας Φόρτισης:** Σε αυτή την λειτουργία η τάση της μπαταρίας βρίσκεται σε πολύ χαμηλό επίπεδο και για να μην την καταπονήσουμε δίνοντας άμεσα όλη την ισχύ πάνω της, δίνουμε μια σταθερή χαμηλή τιμή ρεύματος (trickle charge current) στην μπαταρία μέχρι κάποιο όριο τάσης ώστε αυτή να "ζωντανέψει" από την βαθιά εκφόρτιση στην οποία βρίσκεται και στην συνέχεια αφού περάσει το συγκεκριμένο όριο την φορτίζουμε με όλη την διαθέσιμη ισχύ. Όσο η μπαταρία βρίσκεται σε αυτό το συγκεκριμένο στάδιο, το φορτίο πάνω στην μπαταρία είναι απενεργοποιημένο.

```

void do_trickle_charge(void)
{ LOAD_EN=0; // Το φορτίο είναι απενεργοποιημένο σε
              // αυτή την λειτουργία
  BAT_OK_LED=1; // Το Led την ένδειξης της μπαταρίας είναι
                // σβηστό
  if (I < I_TC) // Δίνουμε μια σταθερή χαμηλή τιμή ρεύματος
    k++; // στην μπαταρία για να "ζωντανέψει"
  else if (I > I_TC)
    k--;
}

```

**MODE\_2 - Λειτουργία MPPT:** Σε αυτό το mode πραγματοποιείται η λειτουργία των δύο αλγορίθμων MPPT που έχουμε κατασκευάσει.

Τα Led της μπαταρίας και των MPPT αναβοσβήνουν με σταθερή συχνότητα διότι η μπαταρία φορτίζει και ο ένας κάθε φορά αλγόριθμος MPPT βρίσκεται σε λειτουργία.

Το φορτίο έχει ενεργοποιηθεί όταν η τάση της μπαταρίας γίνει μεγαλύτερη ή ίση με την προκαθορισμένη χαμηλή τιμή της μπαταρίας (**BATTERY\_VOLTAGE\_LOW + 0.05**).

Πατώντας τον διακόπτη *PB.4* που είναι συνδεδεμένος στην πόρτα *B* του μικροελεγκτή πραγματοποιείται εναλλαγή της λειτουργίας των δύο παραλλαγών του P&O αλγορίθμου με την αυξομείωση του *D.C.* του *PWM* από 0-100%.

Πατώντας τον διακόπτη *PB.3* της πόρτας *B* γίνεται εναλλαγή μεταξύ των δύο παραλλαγών του αλγορίθμου P&O.

```
void do_mppt(void)
{ if (jj<2)
  { BAT_OK_LED=0;
    MPPT_ON_LED=0; }
  else
  { BAT_OK_LED=1;
    MPPT_ON_LED=1; }
  if (Vbat>=BATTERY_VOLTAGE_LOW + 0.05)
    LOAD_EN=1;
  if (!PINB.4)
    { if (!PINB.3)
```

Ο παρακάτω κώδικας υλοποιεί την **παραλλαγή – A** του αλγορίθμου P&O:

```
{ if (P>P0)
  { if ((k>=k0) && (k<255-STEP_UP))
    { k0=k;
      k = k + STEP_UP; }
    else if ((k<k0) && (k>STEP_DOWN))
    { k0=k;
      k = k - STEP_DOWN; } }
  if (P<P0)
  { if ((k>=k0) && (k>STEP_DOWN))
    { k0=k;
      k = k - STEP_DOWN; }
    else if ((k<k0) && (k<255-STEP_UP))
    { k0=k;
      k = k + STEP_UP; } } }
```

Ο παρακάτω κώδικας υλοποιεί την **παραλλαγή – Β** του αλγόριθμου P&O:

```
else
{ if(P>P0)
  { if ((I>=I0)&& (k<255-STEP_UP))
    { I0=I;
      k = k + STEP_UP; }
    else if ((I<I0)&& (k>STEP_DOWN))
    { I0=I;
      k = k - STEP_DOWN; } }
if(P<P0)
{ if ((I>=I0)&& (k>STEP_DOWN))
  { I0=I;
    k = k - STEP_DOWN; }
  else if ((I<I0)&& (k<255-STEP_UP))
  { I0=I;
    k = k + STEP_UP; } } } }
```

Ο παρακάτω κώδικας εκτελείται εάν ο διακόπτης που είναι συνδεδεμένος στον ακροδέκτη *PB.4* του μικροελεγκτή είναι λογικό 1, και υλοποιεί μια ειδική διαγνωστική λειτουργία του συστήματος, κατά την οποία υπάρχει μια διαρκής **αυξομείωση του D.C. του PWM** από 0 έως το 100%, χωρίς να επιχειρείται ανίχνευση του MPP. Με τη λειτουργία αυτή ουσιαστικά λαμβάνονται μετρήσεις για ολόκληρο το φάσμα της τάσης του πάνελ, επιτρέποντας την επαλήθευση του σημείου MPP που ανιχνεύεται από τον αλγόριθμο P&O.

```
else
{ if (k<255 && k_UD==0) k++;
  else if (k>0 && k_UD==1) k--;
  else if (k==255)
  {k--;
    k_UD=1;
  }
  else if (k==0)
  {k++;
    k_UD=0;
  } }
}
```

**MODE\_3 - Λειτουργία πλήρως φορτισμένης μπαταρίας.** Στο mode αυτό ο αλγόριθμος MPPT είναι ανενεργός, ενώ αποδίδεται μία σχετικά μικρή σταθερή τιμή του *D.C.* του παραγόμενου *PWM* προκειμένου να συντηρείται η φορτισμένη μπαταρία. Το *Led* ένδειξης

της μπαταρίας δεν αναβοσβήνει αλλά ανάβει συνεχώς ενώ το *Led* της λειτουργίας του MPPT είναι σβηστό.

```
void do_battery_charged(void)
{
    BAT_OK_LED=0;
    MPPT_ON_LED=1;
    LOAD_EN=1;
    k=100;
}
```

Στο κυρίως πρόγραμμα αρχικά ορίζονται οι παράμετροι του προγράμματος. Ενεργοποιούνται οι θύρες του μικροελεγκτή (ως είσοδοι ή έξοδοι), και αρχικοποιούνται κατάλληλα οι καταχωρητές και τα interrupts των ενσωματωμένων περιφερειακών του μικροελεγκτή που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα (μετατροπέας *ADC*, χρονιστές, σειριακή επικοινωνία κλπ).

```
void main (void)
{
    UCSRA=0x00;
    UCSRB=0x08;
    UCSRC=0x86;
    UBRRH=0x00;
    UBRRL=0x08;
    ACSR=0x80;
    SFIOR=0x00;
    ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
    ADCSRA=0x87;
    SFIOR&=0x1F;
    DDRA=0b11111000;
    PORTA=0b11111000; // Πόρτα A: 0-2 Δεν ενεργοποιούμε τις
                    // αντιστάσεις Pull-up
    DDRD=0b00010000; // Πόρτα D: 0-3 Είσοδος, 4 Έξοδος
                    // (PWM) (OCR1B)
    PORTD=0b11111111; // Πόρτα D: 0-3 Pull Up ενεργοποιημένα
    DDRB=0b00000000; // Πόρτα B: είσοδος - μπουτόν
    PORTB=0b11111111;
    TCCR1A=0b00100001; // Ενεργός ο ακροδέκτης OCR10, 8-bit
                    // fast PWM mode με συχνότητα 15.686kHz
    TCCR1B=0b00001001;
    OCR1B= 0; // Εκκινώντας η τιμή του OCR1B είναι
            // μηδέν
    OCR0= 249; // Ο καταχωρητής αυτός περιέχει την τιμή
            // σύγκρισης
    TCCR0 = 0x0D; // Χρόνος 32 msec με N=1023 με τον
            // timer0
    TIMSK = 0x02; // Ενεργοποίηση του timer0
    #asm ("sei") // Ενεργοποίηση του interrupt
}
```



```
P=0;
OCR1B=k;
```

Ο κώδικας εντός του ατέρμονα βρόχου της “while(1)”, εκτελεί όλες τις λειτουργίες του κύκλου ελέγχου. Αρχικά λαμβάνονται οι μετρήσεις του ρεύματος του πάνελ, της τάσης του πάνελ και της τάσης της μπαταρίας από τον *ADC*.

```
while (1)                                // Ατέρμονας βρόχος
{
  jj++;
  if (jj==10) jj=0;
  // Μέτρηση του ρεύματος στο κανάλι 0
  current_in = read_adc(0);
  // Μέτρηση της τάσης του πάνελ στο κανάλι 1
  volt_in = read_adc(1);
  // Μέτρηση της τάσης της μπαταρίας στο κανάλι 2
  volt_bat = read_adc(2);
```

Υπολογισμός του ρεύματος του πάνελ σε [Ampere] από την τιμή που επιστρέφει ο *ADC*.

```
I=(((float)current_in)*(5.0/1024)/(R8*A_GAIN));
```

Υπολογισμός της τάσης του πάνελ σε [Volt] από την τιμή που επιστρέφει ο *ADC*.

```
V=(((float)volt_in)*(5.0/1024)*((R6+R7))/R7);
```

Υπολογισμός της τάσης της μπαταρίας σε [Volt] από την τιμή που επιστρέφει ο *ADC*.

```
Vbat=(((float)volt_bat)*(5.0/1024)*((R20+R21))/R21);
```

Υπολογισμός της ισχύος του πάνελ.

```
P=V*I;
```

Ακολουθούν οι συνθήκες ελέγχου για την επιλογή του κατάλληλου mode:

- Αποσύνδεση του πάνελ σε περίπτωση που  $V_{bat} > V_{panel}$

```
if (V<(Vbat))
    mode = PV_PANEL_PROTECT_MODE;
```

- Συνθήκη ελέγχου για την επιλογή της λειτουργίας ήπιας φόρτισης

```
if (Vbat<=V_CHGENB)
    mode = TRICKLE_CHARGE_MODE;
```

- Συνθήκη ελέγχου για την επιλογή της λειτουργίας φόρτισης της μπαταρίας μέσω του MPPT

```
if ((Vbat>V_CHGENB + 0.02) && (Vbat<BATTERY_VOLTAGE_HIGH -
0.2))
    mode = MPPT_MODE;
```

- Συνθήκη ελέγχου για την επιλογή της λειτουργίας πλήρως φορτισμένης μπαταρίας

```

if (Vbat>BATTERY_VOLTAGE_HIGH + 0.2)
    mode = BATTERY_CHARGED_MODE;

```

Κλήση της κατάλληλης συνάρτησης που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο mode.

```

switch (mode)
{
case (PV_PANEL_PROTECT_MODE): do_pv_panel_protect(); break;
case (TRICKLE_CHARGE_MODE): do_trickle_charge(); break;
case (MPPT_MODE): do_mppt(); break;
case (BATTERY_CHARGED_MODE): do_battery_charged(); break;
}

```

Ενημέρωση της τιμής του *D.C.* του παραγόμενου σήματος *PWM* και αποθήκευση των μετρήσεων σε προσωρινές μεταβλητές για την αξιοποίησή τους στον επόμενο κύκλο ελέγχου.

```

OCR1B=k; // Ανανέωση του duty cycle [0..255]
P0 = P;
V0 = V;
Vbat0 = Vbat;
I0 = I;
mode0 = mode;

```

Αποστολή των δεδομένων λειτουργίας μέσω σειριακής θύρας

```

printf("v=%02.3f vb=%02.3f i=%02.3f P=%02.3f k=%03i
mode=%d\r",V,Vbat,I,P,k,mode);
// Αναμονή
flag=0;
while(flag==0);
} // Τέλος ατέρμονα βρόχου
}

```

## 5.5 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε αναλυτικά το σύστημα (hardware και software) που αναπτύχθηκε για την πρακτική υλοποίηση του MPPT. Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω, η κατασκευή της πλακέτας δεν παρουσιάζει καμία ιδιαίτερη δυσκολία, ενώ οι διαστάσεις της είναι πολύ μικρές και μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο, αρκεί να είναι επαρκώς προστατευμένο από αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Το πρόγραμμα που γράψαμε μέσω του **μικροελεγκτή ATmega16** ελέγχει την ισχύ του αποδίδει το πάνελ και φορτίζει πλήρως και σωστά μια μπαταρία με την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ κάθε χρονική στιγμή μεταβάλλοντας το Duty Cycle του *PWM*. Για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος υλοποιήθηκαν δύο παραλλαγές του **αλγόριθμου Διατάραξης και Παρατήρησης (P&O)** (έλεγχος του *PWM* και έλεγχος του ρεύματος του πάνελ), η απόδοση των οποίων αποτιμάται στο κεφάλαιο που ακολουθεί με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν σε διάφορες συνθήκες από το σύστημά μας, το οποίο απαρτίζεται από τα εξής μέρη:

- **Φωτοβολταϊκό πάνελ** με μέγιστη τάση τα  $20Wp$ , ονομαστική τάση λειτουργίας τα  $17.5V$  και ονομαστικό ρεύμα  $1.15A$ ,
- **Μια μπαταρία μολύβδου – οξέος**  $12Volt – 7.2Ah$  και
- **Το ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT**

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα του Φ/Β συστήματος που μελετάμε όπου στον ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT έχουμε συνδέσει το Φ/Β πάνελ και την μπαταρία. Από την έξοδο της μπαταρίας υπάρχει η δυνατότητα άμεσης τροφοδότησης ενός DC φορτίου:



**Σχήμα 6.1** Τυπικό διάγραμμα του Φ/Β συστήματος.

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, στο μικροελεγκτή του συστήματος έχει υλοποιηθεί ο αλγόριθμος **διατάραξης και παρατήρησης** ( Perturb & Observe – P&O) για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος της διάταξης, σε συνδυασμό με σύστημα που επιτηρεί και ρυθμίζει τη διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων με ένα **ελεγχόμενο σύστημα χωρίς μπαταρία** όπου ο μικροελεγκτής τροφοδοτείται από εξωτερικό DC τροφοδοτικό, ενώ στη θέση της μπαταρίας τοποθετείται μια βατική αντίσταση (10Ωμ / 5Watt). Αυτό γίνεται προκειμένου να διευκολυνθεί η αποτίμηση της ορθής λειτουργίας του MPPT για τη μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ισχύος στη μπαταρία από το Φ/Β πάνελ, για διάφορες συνθήκες ηλιοφάνειας.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις με το συνολικό σύστημα, διαχωρισμένα σε δύο κατηγορίες, που αντιστοιχούν σε συνθήκες μέτριας και υψηλής ηλιοφάνειας. Και για τις 2 κατηγορίες θα πρέπει το σύστημα να ανιχνεύει τη μέγιστη ισχύ από το πάνελ και να την αποδίδει στην μπαταρία. Σε όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιείται πρώτα αυξομείωση του *D.C.* του *PWM* όπου λαμβάνεται όλο το εύρος της ισχύος και στη συνέχεια επιλέγεται χειροκίνητα (μέσω διακόπτη συνδεδεμένου στον μικροελεγκτή) η MPPT λειτουργία, προκειμένου να εξακριβωθεί η ορθή υλοποίησή της.

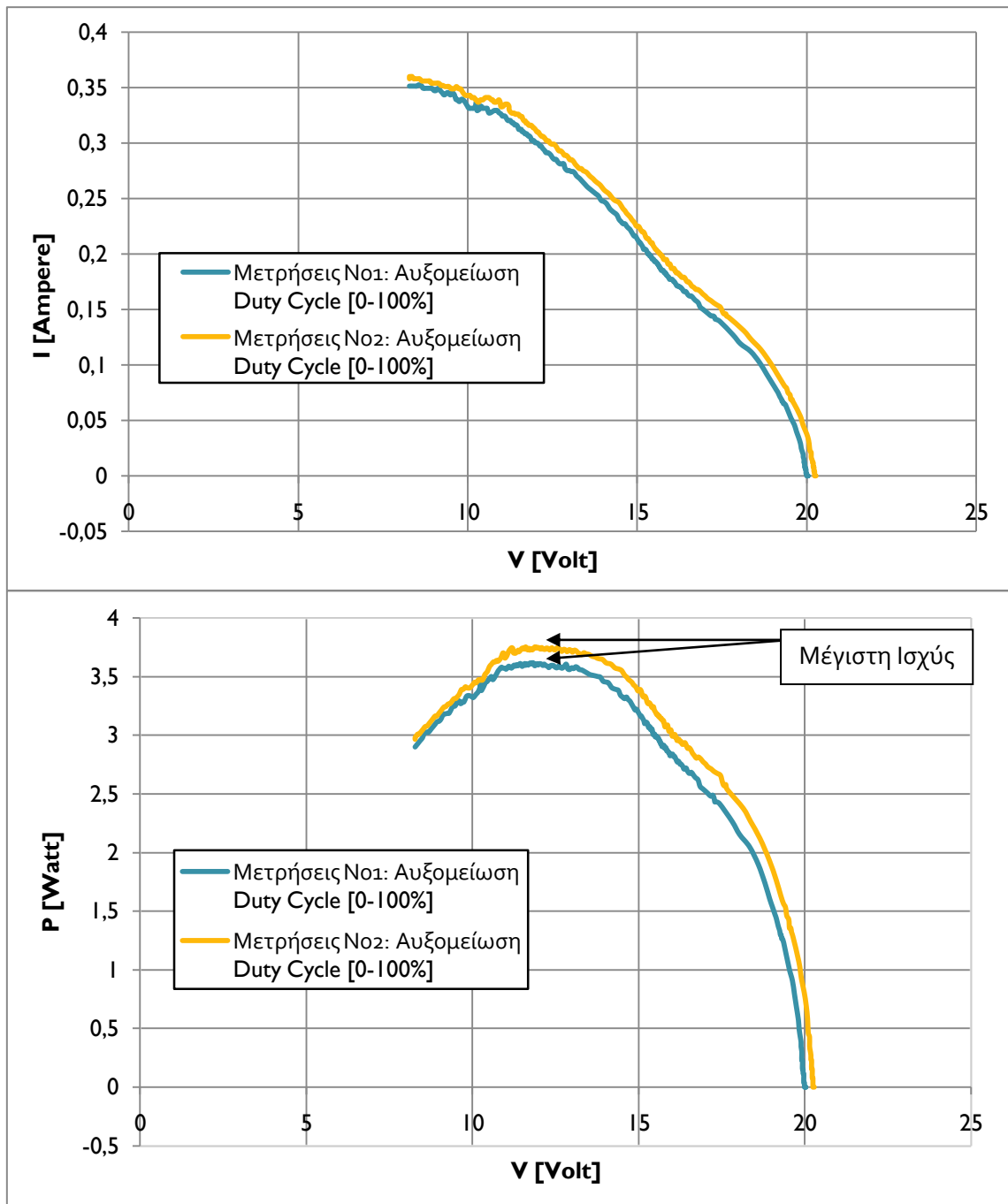
Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι ο μετατροπέας που έχουμε κατασκευάσει για τον έλεγχο του *PWM* είναι τύπου Buck και επομένως στην έξοδο θα έχουμε πάντα μικρότερη τάση σε σχέση με την είσοδο. Επίσης δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής τροφοδοτείται από τη μπαταρία και όχι από ανεξάρτητη πηγή, δεν μπορούμε να πάρουμε ολόκληρο το φάσμα των μετρήσεων από 0V μέχρι την τάση του πάνελ αλλά μόνο από τα 12V μέχρι και την μέγιστη τάση του πάνελ, δηλαδή η τάση του πάνελ δεν είναι δυνατόν να τεθεί σε επίπεδα χαμηλότερα της τάσης της μπαταρίας, όπως φαίνεται και από τις παρατιθέμενες γραφικές παραστάσεις.

## 6.2 Μετρήσεις για την εξακρίβωση της λειτουργίας του MPPT

Παρακάτω παρουσιάζονται μια σειρά από χαρακτηριστικές καμπύλες όπου θα παρουσιαστεί αρχικά η συμπεριφορά του MPPT κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Οι μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν θα είναι σε χαμηλή και πλήρη ηλιοφάνεια:

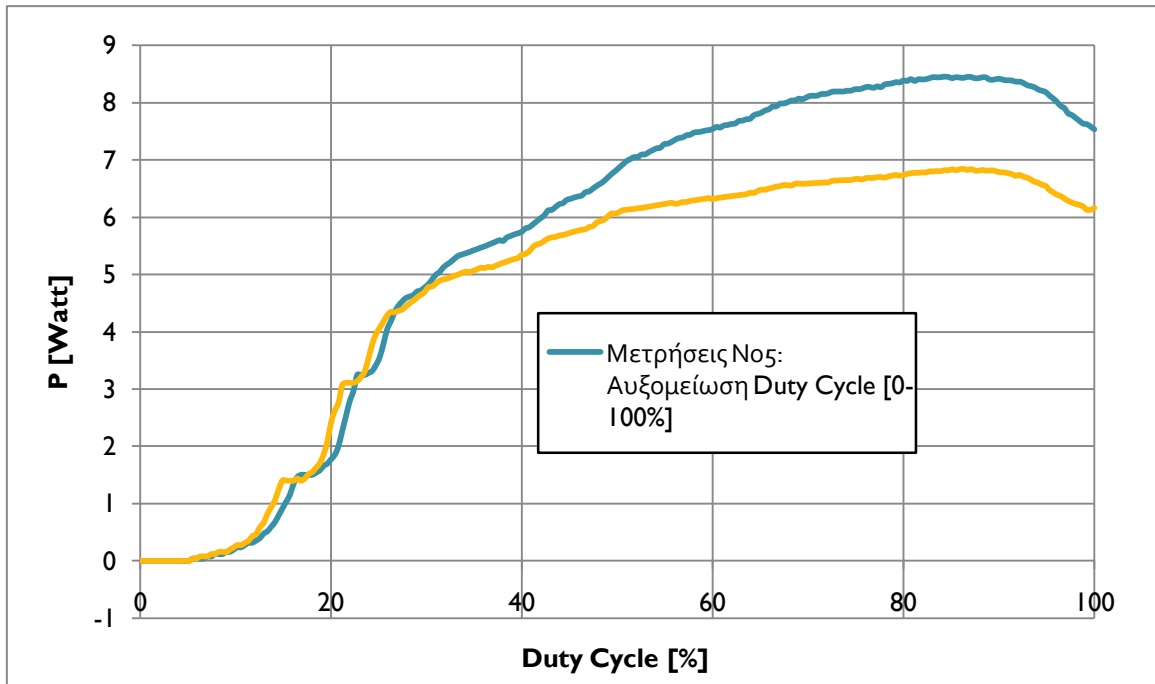
### 1. Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/Β πάνελ σε χαμηλή ηλιοφάνεια:

Παρακάτω παρατίθενται οι **χαρακτηριστικές καμπύλες  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$**  του Φ/Β πάνελ σε χαμηλή ηλιοφάνεια, οι οποίες λήφθηκαν με τη λειτουργία αυξομείωσης του D.C. από το 0 – 100%. Όπως παρατηρείται από τις γραφικές παραστάσεις, η μέγιστη ισχύς, σ' αυτό το χρονικό διάστημα και υπό την συγκεκριμένη ηλιοφάνεια είναι 3.6 Watt για την μέτρηση No1 και 3.8 Watt για την μέτρηση No2:



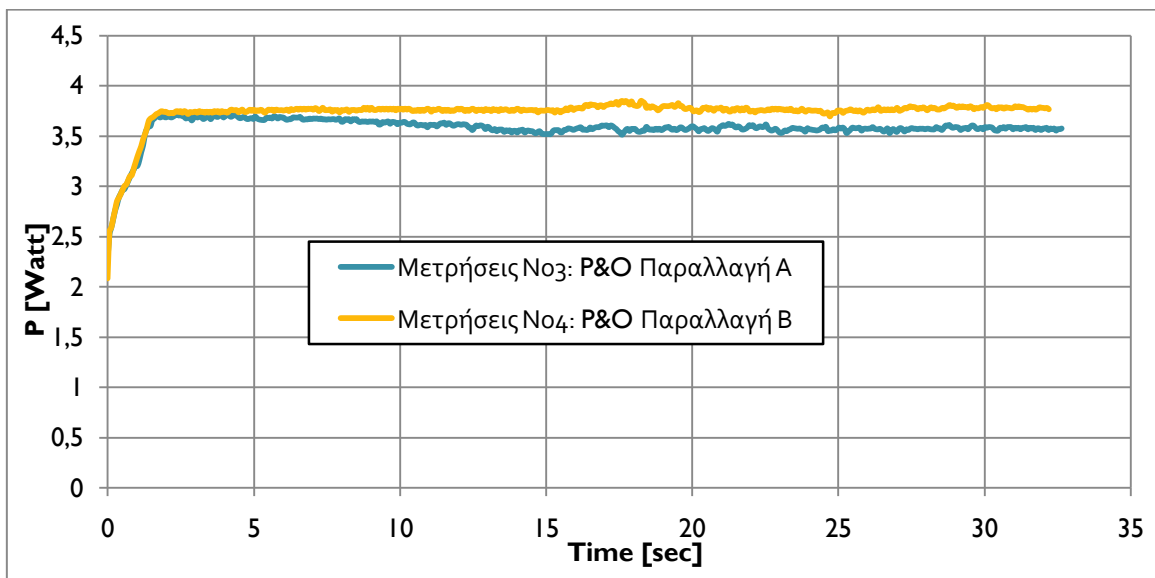
**Σχήμα 6.2** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$  Φ/Β πάνελ με χαμηλή ηλιοφάνεια.

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος με το Duty Cycle του PWM. Παρατηρείται παρακάτω ότι η μέγιστη ισχύς εμφανίζεται στο 70% περίπου του D.C. (όπου 0-100% αντιστοιχεί σε αύξηση του D.C. του PWM από 0-255):



**Σχήμα 6.3** Μεταβολή της παραγόμενης ισχύος του Φ/Β πάνελ με το Duty Cycle του PWM με χαμηλή ηλιοφάνεια.

Όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα, στο οποίο παρουσιάζονται οι μετρήσεις με ενεργοποιημένη την MPPT λειτουργία (παρατίθενται αποτελέσματα και για τις δύο παραλλαγές του P&O αλγορίθμου), ο MPPT ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος. Διευκρινίζεται ότι η μέτρηση Νο1 αντιστοιχεί στην μέτρηση Νο3 του P&O παραλλαγή A, και η μέτρηση Νο2 αντιστοιχεί στην μέτρηση Νο4 του P&O παραλλαγή B :

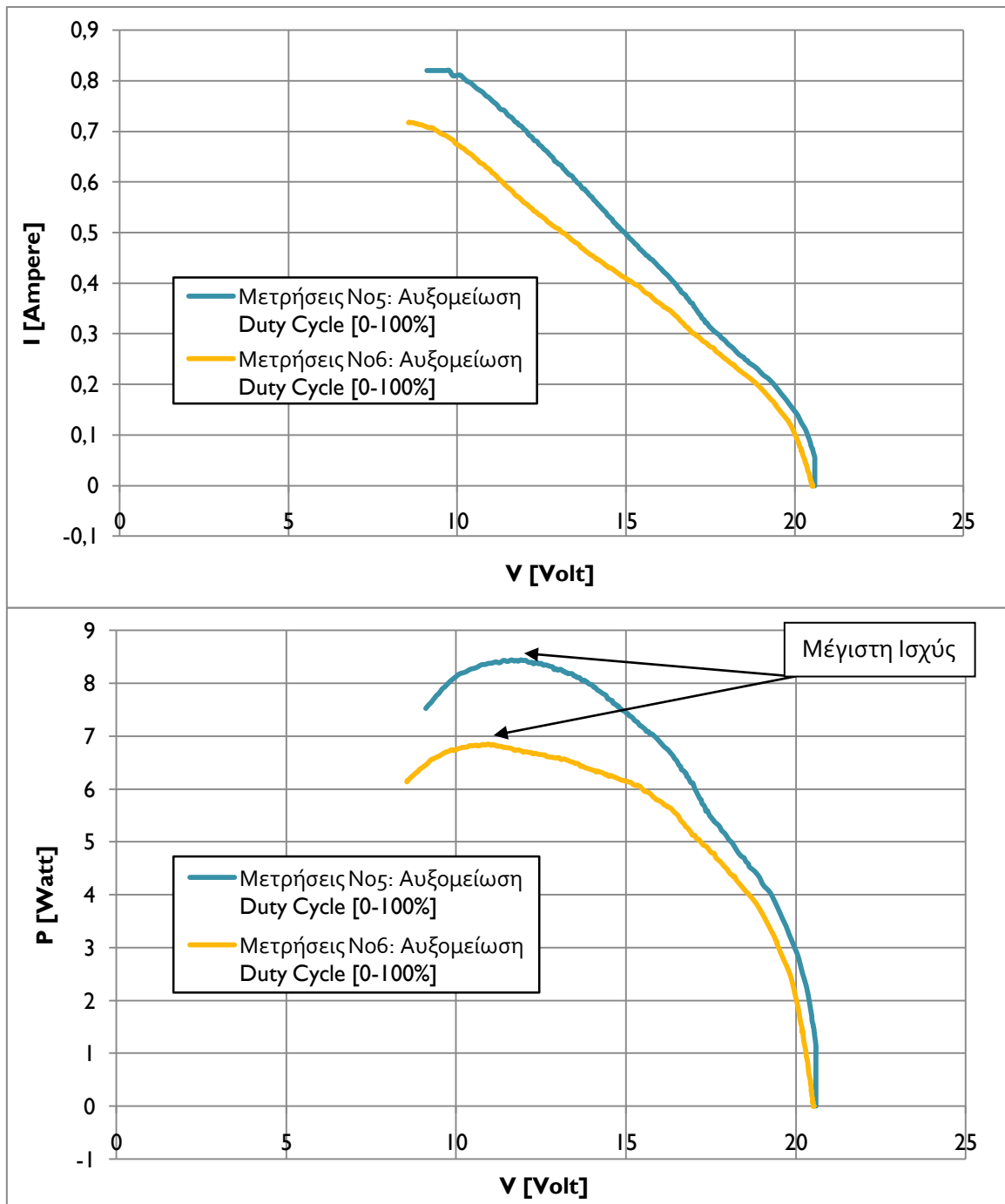


**Σχήμα 6.4** Η αποδιδόμενη ισχύς του Φ/Β πάνελ για την MPPT λειτουργία, σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας.



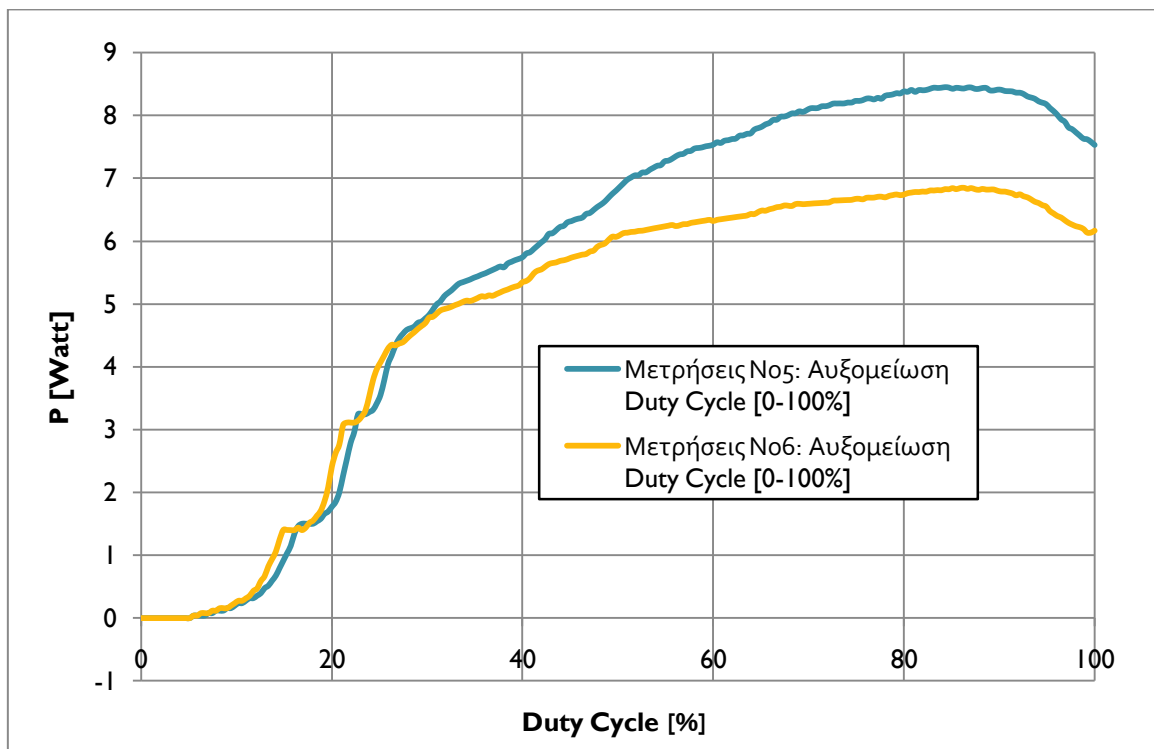
## 2. Χαρακτηριστές καμπύλες Φ/Β πάνελ σε υψηλή ηλιοφάνεια:

Οι χαρακτηριστικές  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$  του Φ/Β πάνελ με συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας έχοντας αυξομειώσει το D.C. από το 0 – 100% είναι οι παρακάτω όπου και εδώ φαίνεται καθαρά το σημείο μέγιστης ισχύος:



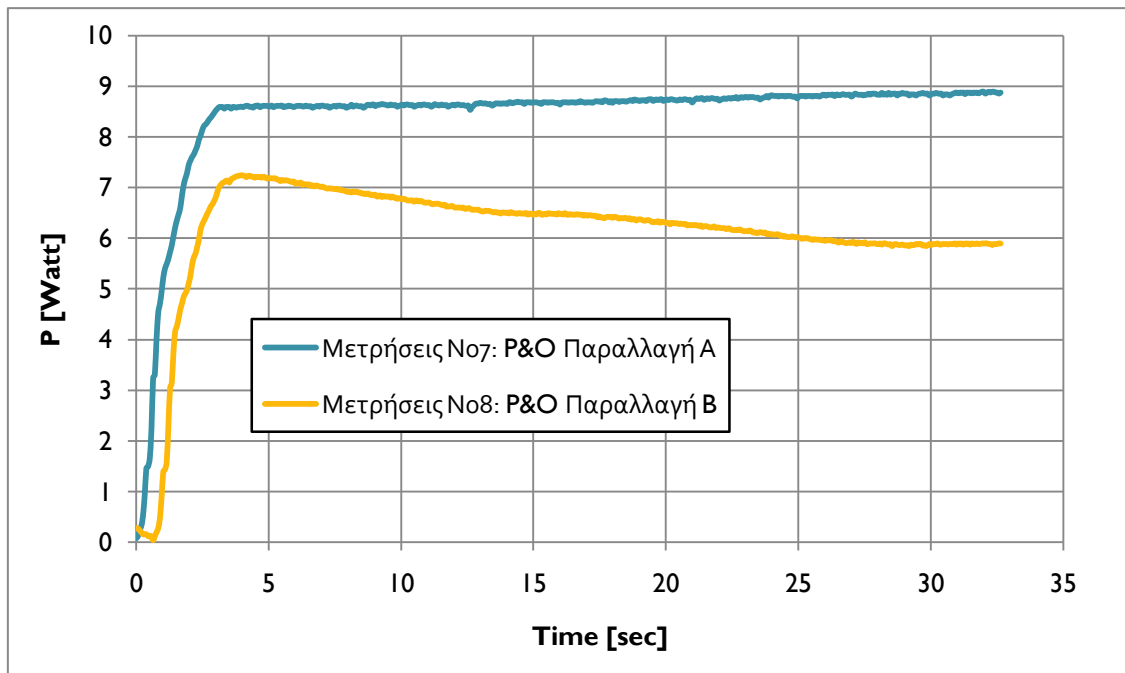
**Σχήμα 6.5** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$  του Φ/Β πάνελ σε συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας.

Στο σχήμα 6.6 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος με το Duty Cycle του PWM:



**Σχήμα 6.6** Μεταβολή της παραγόμενης ισχύος του Φ/Β πάνελ με το Duty Cycle του PWM με υψηλή ηλιοφάνεια.

Στο παρακάτω σχήμα και έχοντας αρκετή ηλιοφάνεια φαίνεται η **χαρακτηριστική  $P = f(t)$**  όπου και εδώ παρατηρείται ότι ο MPPT και για τις δύο παραλλαγές του P&O ανιχνεύει σωστά το σημείο μέγιστης ισχύος. Διευκρινίζεται ότι η μείωση που παρατηρείται στην ισχύ του πάνελ για την καμπύλη που αντιστοιχεί στις μετρήσεις Νο8 (Παραλλαγή Β του P&O) οφείλεται σε μεταβολή της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και δεν πρέπει να αποδοθεί σε μη ορθή λειτουργία του αλγόριθμου ανίχνευσης του MPP.



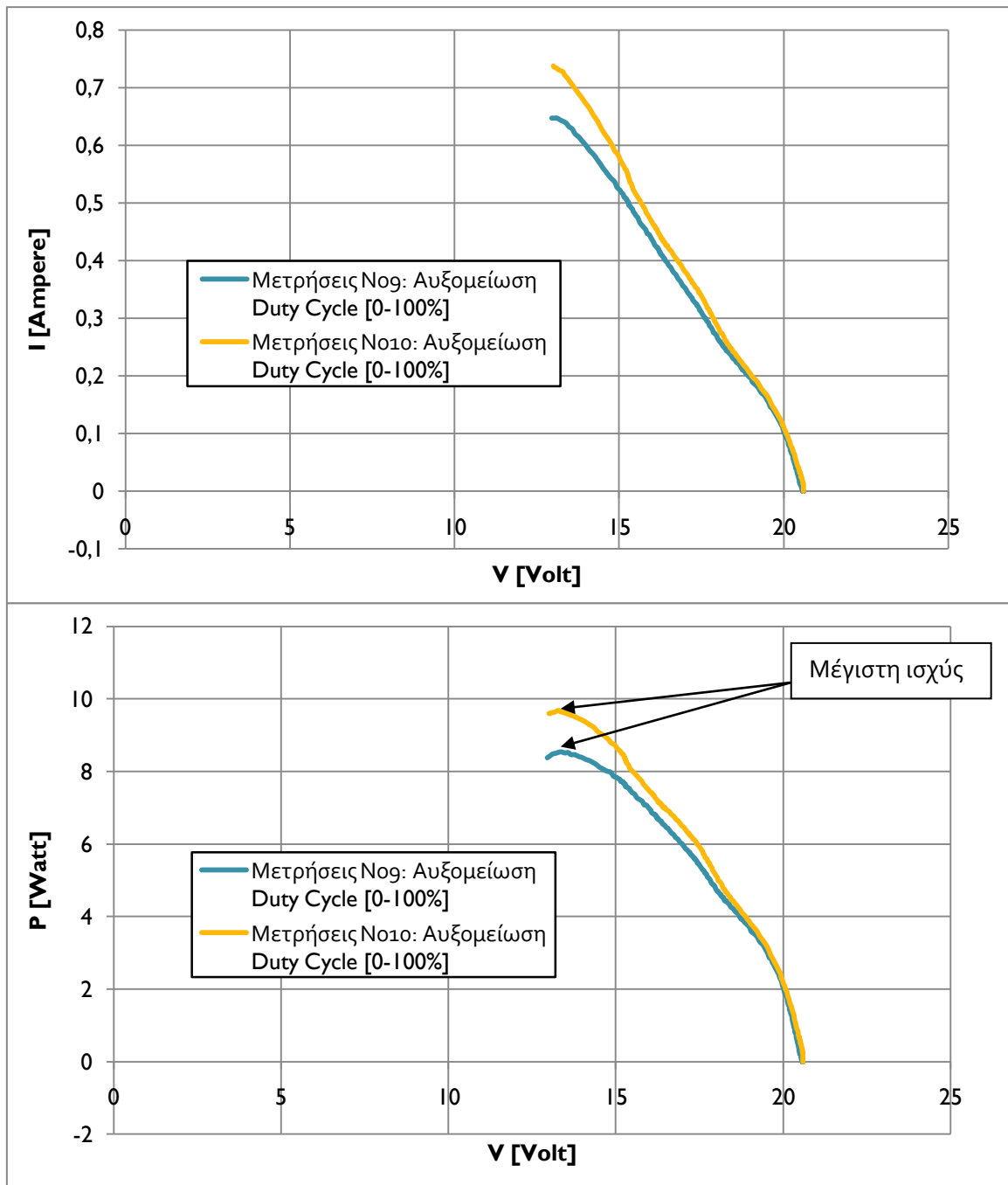
**Σχήμα 6.7** Η αποδιδόμενη ισχύς του Φ/Β πάνελ για την MPPT λειτουργία σε συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας.

### 6.3 Μετρήσεις του συνολικού συστήματος

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων από το συνολικό σύστημα, όπου το κύκλωμα του μικροελεγκτή τροφοδοτείται από τη μπαταρία, η φόρτιση της οποίας από το Φ/Β πάνελ γίνεται μέσω του ρυθμιστή MPPT. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, οι χαρακτηριστικές θα χωριστούν σε 2 κατηγορίες (με χαμηλή και υψηλή ηλιοφάνεια):

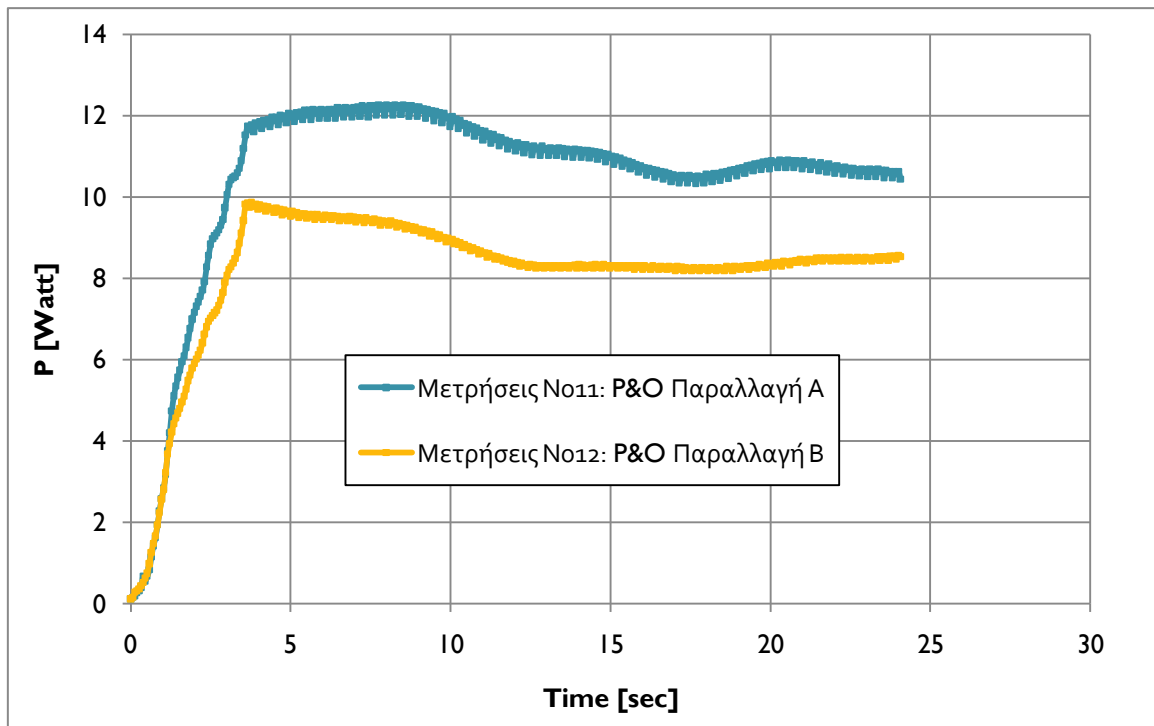
#### 1<sup>η</sup> κατηγορία (συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας)

Για τις μετρήσεις σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας, παρατίθενται αρχικά στο σχήμα 6.8 οι χαρακτηριστικές I-V και P-V Φ/Β του πάνελ, οι οποίες δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των μετρήσεων από τη λειτουργία αυξομείωσης (0-100%) του *D.C.*



**Σχήμα 6.8** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$  του Φ/Β πάνελ σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας.

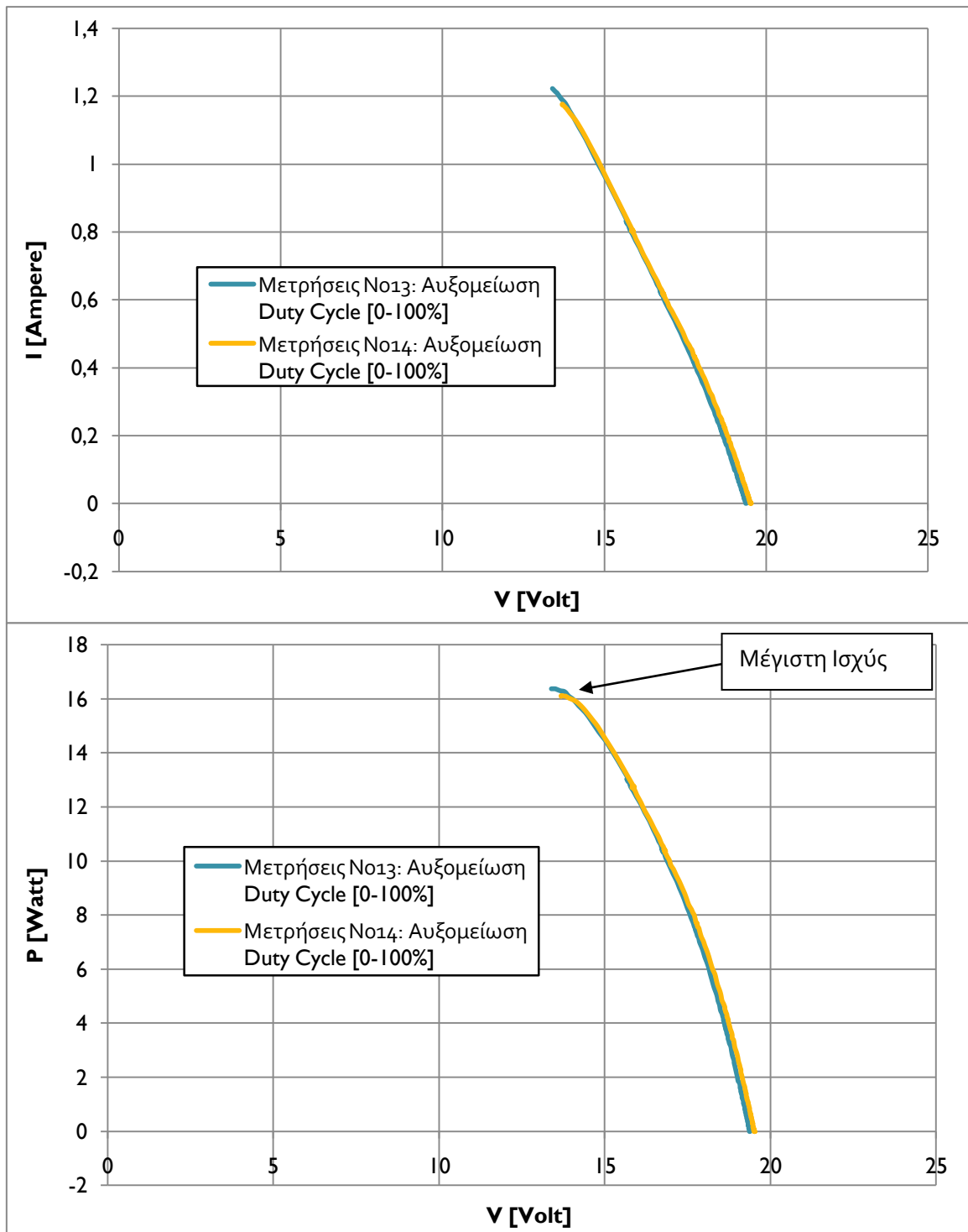
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με ενεργοποιημένη την MPPT λειτουργία παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα. Όπως παρατηρούμε, ο MPPT ανιχνεύει την μέγιστη ισχύ και στην συνέχεια την διατηρεί σε αυτό το σημείο. Σημειώνεται ότι και στην περίπτωση αυτή, κατά την διάρκεια της λήψης των μετρήσεων η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας άρχιζε να μειώνεται γι' αυτό και η τιμή της ισχύος μειώνεται με αργό ρυθμό. Σε κάθε περίπτωση όμως ο αλγόριθμος ανιχνεύει της μέγιστη ισχύ ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 6.9** Η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος με το χρόνο και με χαμηλή ηλιοφάνεια.

**2<sup>η</sup> κατηγορία (συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας)**

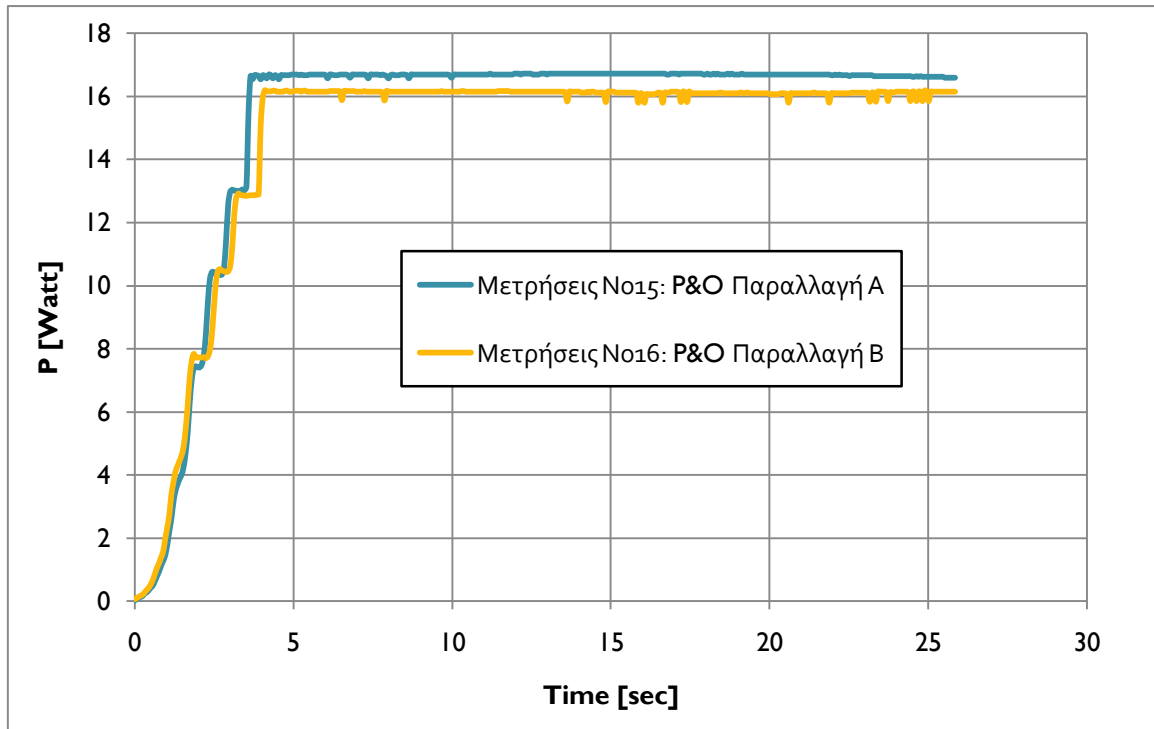
Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V του Φ/Β πάνελ που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα προέκυψαν από τα δεδομένα των μετρήσεων σε λειτουργία αυξομείωσης (0-100%) του D.C. του σήματος ελέγχου, σε συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας.



**Σχήμα 6.10** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$  Φ/Β πάνελ σε υψηλή ηλιοφάνεια.

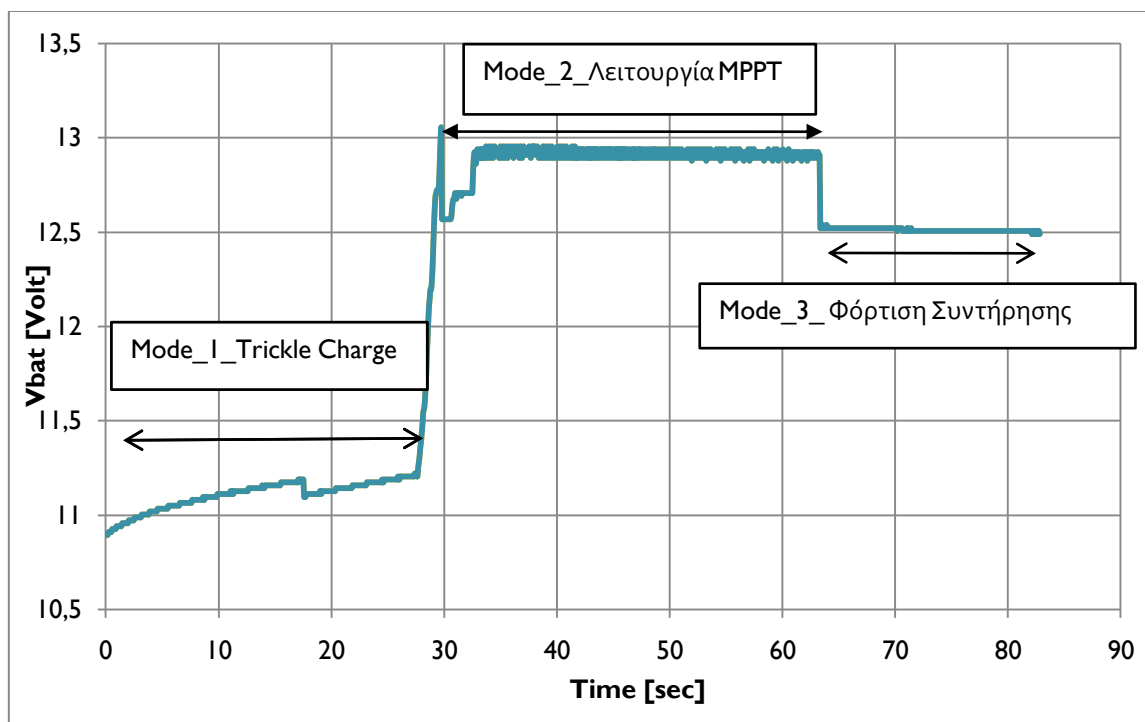
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την MPPT λειτουργία του συστήματος, σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Όπως παρατηρούμε και σε αυτή τη καμπύλη, ο MPPT ανιχνεύει και παρακολουθεί επιτυχώς το σημείο μέγιστης ισχύος. Βλέπουμε επίσης ότι στην περίπτωση που έχουμε σταθερή ηλιακή ακτινοβολία, η

συμπεριφορά και των 2 παραλλαγών του P&O είναι σχεδόν ίδια και επομένως μπορεί να εφαρμοστεί οποιαδήποτε παραλλαγή του P&O για την ανίχνευση του MPP.



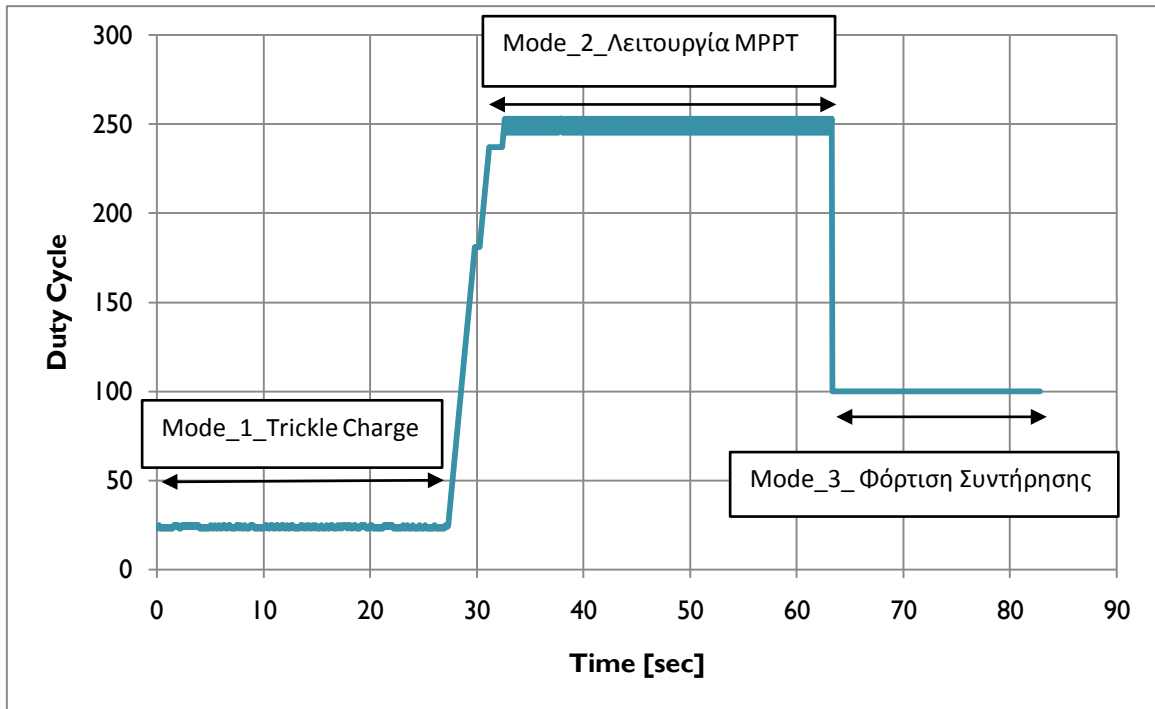
**Σχήμα 6.11** Η χρονική μεταβολή της παραγόμενης ισχύος σε συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα **στάδια (modes)** που ακολουθούνται για την σωστή φόρτιση μιας μπαταρίας όπως αυτά καθορίζονται στο πρόγραμμα υλοποίησης του ρυθμιστή MPPT. Σύμφωνα λοιπόν με το πρόγραμμα, όταν η τάση της μπαταρίας είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή ( $V_{CHGENB}$ ), τότε η φόρτιση αρχίζει με μια χαμηλή τιμή ρεύματος ( $I_{TC}$ ) μέχρις ότου η τάση της μπαταρίας φτάσει την τιμή  $V_{CHGENB}$  (**Mode\_1**). Στη συνέχεια, αφού η τάση της μπαταρίας ξεπεράσει την προκαθορισμένη τιμή  $V_{CHGENB}$ , ενεργοποιείται ο αλγόριθμος ανίχνευσης MPP με τον οποίο πλέον παρέχεται στη μπαταρία η μέγιστη δυνατή ισχύς (**Mode\_2**). Τέλος, αφού φορτιστεί η μπαταρία, μεταβαίνει στην τρίτη και τελευταία λειτουργία όπου εδώ παρέχεται σ αυτή μια χαμηλή τιμή τάσης ώστε να συντηρείται (**Mode\_3**).

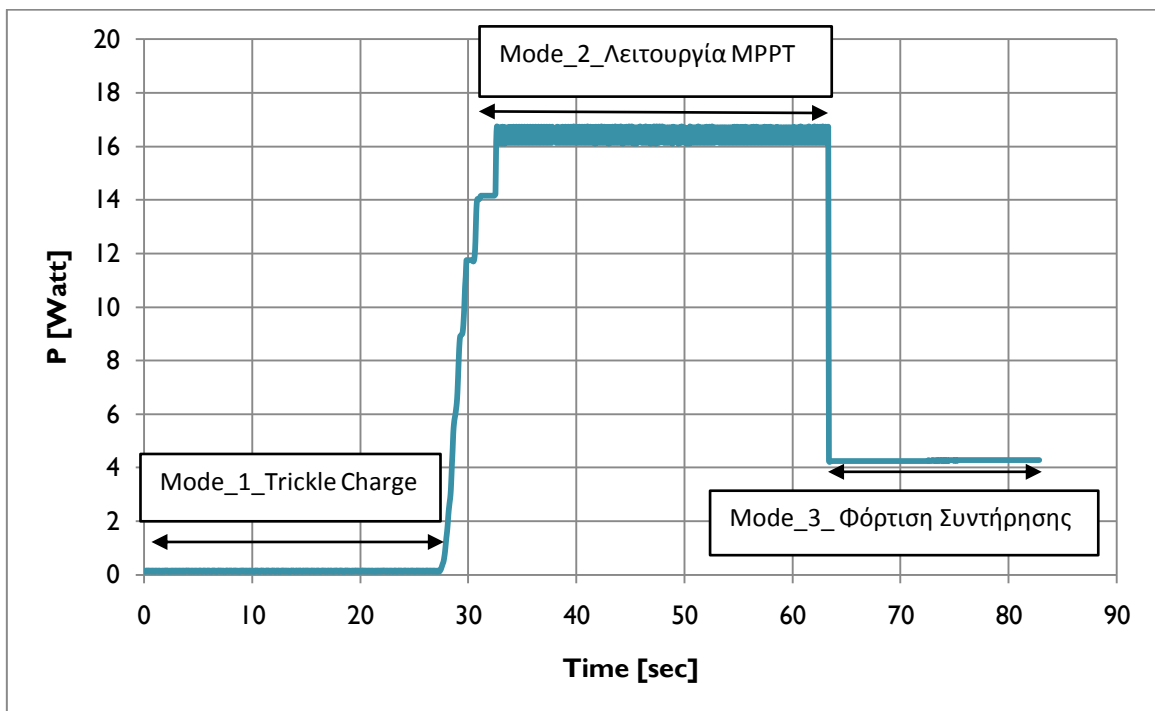


Σχήμα 6.12 Τα στάδια φόρτισης της μπαταρίας.





Σχήμα 6.13 Μεταβολή του Duty Cycle με το χρόνο.



Σχήμα 6.14 Μεταβολή της παραγόμενης ισχύος με το χρόνο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της ηλεκτρονικής διάταξης του **ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT** που κατασκευάστηκε σε αυτή την εργασία είναι να διαχειρίζεται κατάλληλα την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός Φ/Β πάνελ με στόχο τη βέλτιστη απορρόφηση της ενέργειας από αυτό.

Στη διάταξη που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται ο **μικροελεγκτής ATmega16** για την υλοποίηση του αλγόριθμου MPPT σε συνδυασμό με ένα **Buck DC-DC μετατροπέα**, η λειτουργία του οποίου ρυθμίζεται κατάλληλα μέσω της μεταβολής του Duty Cycle του PWM, το οποίο παρέχει ο μικροελεγκτής. Η υλοποίηση αυτή αυξάνει σημαντικά την ευχρηστία και την ευελιξία του συστήματος, καθότι παρέχεται η δυνατότητα της άμεσης αλλαγής ή και επέκτασης της συνολικής λειτουργίας του ρυθμιστή τύπου MPPT.

Για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος, υλοποιήθηκαν δύο παραλλαγές του **αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης (Perturb & Observe – P&O)**.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τη διάταξη ενσωματώνει επίσης πλήρη λειτουργικότητα και για την επιτήρηση της διαδικασίας φόρτισης της μπαταρίας από το Φ/Β πάνελ, στην οποία συμπεριλαμβάνονται και οι κατάλληλες στρατηγικές για τη προστασία της μπαταρίας από υπερφόρτιση και βαθιά εκφόρτιση.

Η ορθή λειτουργία της διάταξης ελέγχθηκε και πιστοποιήθηκε μέσω μιας σειράς από μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών κατέδειξαν επίσης ότι οι δύο παραλλαγές του P&O αλγορίθμου έχουν πρακτικά ισοδύναμη απόκριση.

Σχετικά με ενδεχόμενες βελτιώσεις του συστήματος, σε ότι αφορά το κατασκευαστικό κομμάτι της διάταξης, θα μπορούσε ενδεχομένως αντί για Buck μετατροπέα να χρησιμοποιηθεί ένας Buck-Boost μετατροπέας. Κάτι τέτοιο θα παρείχε τη δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης της ισχύος του Φ/Β πάνελ, καλύπτοντας και την περίπτωση συνθηκών πολύ χαμηλής ηλιοφάνειας, όπου η τάση του πάνελ θα βρίσκονταν σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτό της μπαταρίας.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] 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](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)

[2] Απόδοση Φωτοβολταϊκών στοιχείων και Φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες σκίασης και χαμηλής έντασης ακτινοβολίας - Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης - Προδρομίδης Γεώργιος - Πανεπιστήμιο Πατρών – Τμήμα φυσικής – Πάτρα 2009

[3] PV Efficiency Hits 25%

<http://photonics.com/content/news/2008/October/23/93618.aspx>

[4] RoseStreet Labs Licenses High Efficiency Solar Cell Technology

[http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2005/12/rosetstreet\\_labs.html](http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2005/12/rosetstreet_labs.html)

[5] An unexpected discovery could yield a full spectrum solar cell

<http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/MSD-full-spectrum-solar-cell.html>

[6] Φωτοβολταϊκά συστήματα

[http://greenenergia.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=35&Itemid=46](http://greenenergia.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=46)

[7] Φωτοβολταϊκά συστήματα – Ι.Ε. Φραγκιαδάκης – Εκδόσεις ΖΗΤΗ

[8] Εργαστηριακό μικροδίκτυο με φωτοβολταϊκή γεννήτρια και συσσωρευτές - Διπλωματική εργασία - Κολοβού Πολυτίμη - Χάλαρης Χρήστος - Εκδόσεις ΕΜΠ 2004

[9] Φωτοβολταϊκά συστήματα – Διπλωματική εργασία - Κυριακόπουλος Επαμεινώνδας - Εκδόσεις ΕΜΠ 2009

[10] Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων

<http://www.aenaon.net/gr/content/view/352/28/>

[11] [http://gneng.blogspot.com/p/blog-page\\_19.html](http://gneng.blogspot.com/p/blog-page_19.html)

[12] Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος - Δρ. – Μηχ. Νικόλαος Π. Πολύζος – ΤΕΙ Κρήτης – Τμήμα Ηλεκτρολογίας - Ηράκλειο 2008

[13] A High Efficient Micro-controlled Buck Converter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems - P. C. M. Bernardo1, Z. M. A. Peixoto and L.V. B. Machado Neto2

<http://www.icrepq.com/ICREPQ%2709/502-bernardo.pdf>

[14] Λειτουργία και τεχνικοοικονομική μελέτη ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος – Διπλωματική εργασία - Παπαδημητράκη Αλέξανδρου - Τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών – Πάτρα 2009

[15] Σύγχρονες εξελίξεις σε φωτοβολταϊκά

[http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC\\_WORK/EKDILOSEIS\\_P/EPISTHMONIKE\\_S\\_EVENTS/HLEKTROKINHTA%20ISXYOS/268/270/ST1%20KOMPOYGIAS%20KYRITSH\\_S.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/EKDILOSEIS_P/EPISTHMONIKE_S_EVENTS/HLEKTROKINHTA%20ISXYOS/268/270/ST1%20KOMPOYGIAS%20KYRITSH_S.pdf)

[16] <http://www.pvtech.gr/files/3851summary.pdf>

[17] <http://www.sydesys.gr/gp/catid03.aspx>

[18] <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hlk/2006/Vlaxou/attached-document/2006Vlaxou.pdf>

[19] Ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών: <http://www.paizanos.gr/index.php?cat=3&subcat=24>

[20] Οδηγός τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ

[http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS\\_TERESs.pdf](http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS_TERESs.pdf)

[21] Design and implementation of a digitally controlled stand alone photovoltaic power supply

<http://www.elkraft.ntnu.no/en/Papers2002/Design-and-impl-norpie02.pdf>

[22] Ανίχνευση μέγιστης ισχύος φωτοβολταϊκής γεννήτριας με μικροελεγκτή – Περδικάκης Οδ. Μανόλης - Πτυχιακή εργασία - ΤΕΙ Κρήτης – Τμήμα Ηλεκτρονικής – Χανιά 2010

[23] Progress in Photovoltaics: Research and Applications Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms D.P. Hohm and M.E. Ropp

[24] Μικροϋπολογιστές - Εφαρμογές Μικροελεγκτών – Σφακιωτάκης Μιχάλης - ΤΕΙ Κρήτης – Τμήμα Ηλεκτρολογίας - Ηράκλειο 2008

[25] [www.atmel.com](http://www.atmel.com)

[26] Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for PV Systems - Ahmad Al-Diab, Constantinos Sourkounis - 2010, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010

[27] Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System - Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, Member, IEEE, and Nicholas C. Voulgaris - IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 1, JANUARY 2001

[28] Design and Application Guide for High Speed MOSFET Gate Drive Circuits

<http://focus.ti.com/lit/ml/slup169/slup169.pdf>

[29] DN80 – Bipolar transistor for MOSFET gate driving applications

[http://www.diodes.com/files/design\\_note\\_pdfs/zetex/dn80.pdf](http://www.diodes.com/files/design_note_pdfs/zetex/dn80.pdf)

[30] Απόδοση Φ/Β πλαισίων

[http://www.solar-wind.co.uk/pv\\_solar\\_panels.html](http://www.solar-wind.co.uk/pv_solar_panels.html)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

➤ Το πρόγραμμα της λειτουργίας του MPPT στην CodeVision:

```
// Ενσωμάτωση βιβλιοθηκών
#include <mega16.h>
#include <stdio.h>
#include <delay.h>

// Ορισμός σταθερών
#define ADC_VREF_TYPE 0x40
#define STEP_UP      4
#define STEP_DOWN    4
#define V_CHGENB     11.2 // [Volt]
#define C             7.20 // [AH]
#define I_BULK        C/20 // [Amper]
#define I_TC          0.02*I_BULK // [Amper]
#define BATTERY_VOLTAGE_HIGH 12.7 // [Volt]
#define BATTERY_VOLTAGE_LOW  11.4 // [Volt]
#define R6            68.1 // [kOhm]
#define R7            21.8 // [kOhm]
#define R8            0.39 // [Ohm]
#define R20           47.5 // [kOhm]
#define R21           21.85 // [kOhm]
#define A_GAIN        6.50 // [-]
#define LOAD_EN       PORTA.3 // [-]
#define BAT_OK_LED    PORTA.4 // [-]
#define MPPT_ON_LED  PORTA.5 // [-]
#define PV_PANEL_PROTECT_MODE 0
#define TRICKLE_CHARGE_MODE 1
#define MPPT_MODE     2
#define BATTERY_CHARGED_MODE 3

// Δήλωση μεταβλητών
float P, Vbat, V, I, P0, V0, I0, Vbat0;
unsigned int volt_bat, volt_in, current_in, k=85, k0;
unsigned char flag=0, tr=0, jj=0, k_UD=0, mode,mode0;

// Συνάρτηση λήψης μετρήσεων μέσω του ADC
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{ ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
  delay_us(10);
  ADCSRA|=0x40;
  while ((ADCSRA & 0x10)==0);
  ADCSRA|=0x10;
  return ADCW;
}
```

```

// Μέτρηση του χρόνου των 64msec με τον timer0
interrupt [TIM0_COMP] void timer0_compare_isr(void)
{ tr++;
  if (tr==2)
  { flag=1;
    tr=0;}
}

// MODE_0 - Προστασία Πάνελ
void do_pv_panel_protect(void)
{ k=50;
}

// MODE_1 - Φόρτιση μπαταρίας με trickle_charge
void do_trickle_charge(void)
{ LOAD_EN=0; // Το φορτίο είναι απενεργοποιημένο σε αυτή την λειτουργία
  BAT_OK_LED=1; // Το Led την ένδειξης της μπαταρίας είναι σβηστό
  if (I < I_TC) // Δίνουμε μια σταθερή χαμηλή τιμή ρεύματος
    k++; // στην μπαταρία για να "ζωντανέψει"
  else if (I > I_TC)
    k--;
}

// MODE_2 - Λειτουργία MPPTs
void do_mppt(void)
{ if (jj<2) // Τα Led μπαταρίας και MPPT αναβοσβήνουν
  { BAT_OK_LED=0; // με σταθερή συχνότητα
    MPPT_ON_LED=0;
  }
  else
  { BAT_OK_LED=1;
    MPPT_ON_LED=1;
  }
  if (Vbat>=BATTERY_VOLTAGE_LOW + 0.05) // Το φορτίο έχει ενεργοποιηθεί
    LOAD_EN=1; // όταν η τάση της μπαταρίας γίνει μεγαλύτερη ή ίση
    // με την (BATTERY_VOLTAGE_LOW + 0.05)

  if(!PINB.4) // Εναλλαγή λειτουργίας MPPTs - Αυξομείωση PWM
    // με το μπουτόν 4
  { if (!PINB.3) // Εναλλαγή λειτουργίας MPPTs με το μπουτόν 3
    { if (P>P0) // Ο αλγόριθμος Διατάραξης και Παρατήρησης (P&O)_1
      { if ((k>=k0) && (k<255-STEP_UP))
        { k0=k;
          k = k + STEP_UP;
        }
        else if ((k<k0) && (k>STEP_DOWN))
        { k0=k;
          k = k - STEP_DOWN;
        }
      }
      if (P<P0)
      { if ((k>=k0) && (k>STEP_DOWN))

```



```

    { k0=k;
      k = k - STEP_DOWN;
    }
    else if ((k<k0) && (k<255-STEP_UP))
    { k0=k;
      k = k + STEP_UP;
    }
  }
  else // Ο αλγόριθμος Διατάραξης και Παρατήρησης (P&O)_2
  { if(P>P0)
    { if ((I>=I0)&& (k<255-STEP_UP))
      { I0=I;
        k = k + STEP_UP;
      }
      else if ((I<I0)&& (k>STEP_DOWN))
      { I0=I;
        k = k - STEP_DOWN;
      }
    }
    if(P<P0)
    { if ((I>=I0)&& (k>STEP_DOWN))
      { I0=I;
        k = k - STEP_DOWN;
      }
      else if ((I<I0)&& (k<255-STEP_UP))
      { I0=I;
        k = k + STEP_UP;
      }
    }
  }

  else // Αυξομείωση PWM από 0 έως 255
  { if (k<255 && k_UD==0) k++;
    else if (k>0 && k_UD==1) k--;
    else if (k==255)
    {k--;
      k_UD=1;
    }
    else if (k==0)
    {k++;
      k_UD=0;
    }
  }
}

```

*// MODE\_3 - Η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη*

**void do\_battery\_charged(void)**

```

{ BAT_OK_LED=0; // Η ένδειξη της μπαταρίας on
  MPPT_ON_LED=1; // MPPT Off
  LOAD_EN=1; // Το φορτίο είναι ON
  k=100;
}

```

*// Κυρίως πρόγραμμα*

**void main (void)**

```

{ UCSRA=0x00;
  UCSRB=0x08;
}

```

```

UCSRC=0x86;
UBRRH=0x00;
UBRRL=0x08;
ACSR=0x80;
SFIO=0x00;
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0x87;
SFIO&=0x1F;

DDRA=0b11111000;
PORTA=0b11111000; // Porta A.0-A.2 Είσοδοι χωρίς αντιστάσεις Pull-up
DDRD=0b00010000; // Porta D: 0-3 Είσοδος, 4 Έξοδος (PWM) (OCR1B)
PORTD=0b11111111; // Porta D: 0-3 Pull Up ενεργοποιημένα
DDRB=0b00000000; // Porta B: είσοδος
PORTB=0b11111111;

OCR1B= 0; // Εσκιινώντας η τιμή του OCR1B είναι μηδέν
TCCR1A=0b00100001; // Ενεργός ο ακροδέκτης OCR10, 8-bit fast PWM mode
TCCR1B=0b00001001;

OCR0= 249; // Ο καταχωρητής αυτός περιέχει την τιμή σύγκρισης
TCCR0 = 0x0D; // Χρόνος 32 msec με N=1023 με τον timer0
TIMSK = 0x02; // Ενεργοποίηση του timer0

#asm ("sei") // Ενεργοποίηση των interrupt

P=0;
OCR1B=k;

// εκτελούμενος ατέρμονας βρόχος
while (1)
{
    jj++;
    if (jj==10) jj=0;

    current_in = read_adc(0); // Μέτρηση του ρεύματος του πάνελ
    volt_in = read_adc(1); // Μέτρηση της τάσης του πάνελ
    volt_bat = read_adc(2); // Μέτρηση της τάσης της μπαταρίας

    // Ρεύμα του πάνελ (PV) σε real [Ampere]
    I=((float)current_in)*(5.0/1024)/(R8*A_GAIN);

    // Τάση του πάνελ [PV] σε real [Volt]
    V=((float)volt_in)*(5.0/1024)*((R6+R7))/R7;

    // Τάση της μπαταρίας σε real [Volt]
    Vbat=((float)volt_bat)*(5.0/1024)*((R20+R21))/R21;

    // Υπολογισμός της ισχύος [Watt]
    P=V*I;
}

```

```

// Αποσύνδεση του πάνελ σε περίπτωση που Vbat>Vpanel
if (V<(Vbat))
    mode = PV_PANEL_PROTECT_MODE;

// Το ρεύμα "εκκίνησης" για την φόρτιση της μπαταρίας
if (Vbat<=V_CHGENB)
    mode = TRICKLE_CHARGE_MODE;

// Συνθήκη λειτουργίας του MPPT - η μπαταρία φορτίζει
if ((Vbat>V_CHGENB + 0.02) && (Vbat<BATTERY_VOLTAGE_HIGH - 0.2))
    mode = MPPT_MODE;

// Συνθήκη πλήρως φορτισμένης μπαταρίας
if (Vbat>BATTERY_VOLTAGE_HIGH + 0.2)
    mode = BATTERY_CHARGED_MODE;

// Κλήση της κατάλληλης συνάρτησης για το τρέχων mode
switch (mode)
{
    case(PV_PANEL_PROTECT_MODE): do_pv_panel_protect(); break;
    case(TRICKLE_CHARGE_MODE): do_trickle_charge(); break;
    case(MPPT_MODE): do_mppt(); break;
    case(BATTERY_CHARGED_MODE): do_battery_charged(); break;
}

OCR1B=k;           // ανανέωση του duty cycle [0..255]
P0 = P;
V0 = V;
Vbat0 = Vbat;
I0 = I;
mode0 = mode;

// Αποστολή δεδομένων στη σειριακή θύρα
printf("v=%02.3f vb=%02.3f i=%02.3f P=%02.3f k=%03i
        mode=%d\r",V,Vbat,I,P,k,mode);

// Αναμονή
flag=0;
while(flag==0);
} // τέλος ατέρμονα βρόχου
}

```

➤ Το PCB της πλακέτας:

