



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλονίκης  
**ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ**

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Φυσικής  
Τομέας Ηλεκτρονικής και Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

## Σύστημα συλλογής φωτεινής ενέργειας εσωτερικού χώρου

Πτυχιακή Εργασία  
της  
Παναγιώτας Φασιλή  
Α.Ε.Μ.: 15375

**Επιβλέπων:** Βασίλειος Κωνσταντάκος  
Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη 2024

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει ένα σύστημα συλλογής φωτεινής ενέργειας (solar harvesting) σε εσωτερικούς χώρους, με στόχο τη διαχείριση και μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας σε μορφές που καλύπτουν τις απαραίτητες ενεργειακές ανάγκες, προκειμένου να επιτευχθεί η αυτονομία του συστήματος.

Στο πλαίσιο της σύγχρονης πραγματικότητας, η αντιμετώπιση των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής αναδεικνύεται ως προτεραιότητα, με τη χρήση καινοτόμων λύσεων που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υιοθετούν ηλεκτρονικά κυκλώματα ως πυρήνα της τεχνολογίας. Η εισαγωγή του όρου "harvesting" στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει κρίσιμη σημασία για την αποτελεσματική χρήση των φυσικών πόρων, παρακινώντας σε απομάκρυνση από παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN), που χρησιμοποιούν την τεχνική της ηλιακής συγκομιδής, αναδεικνύοντας τα ως πρωτοποριακή λύση για την εξασφάλιση ενέργειας. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών κυκλωμάτων επιτρέπει στα WSN να συλλέγουν και αποθηκεύουν ενέργεια από τον ηλιακό φωτισμό, προσφέροντας αυτονομία και μακροβιότητα. Η εργασία προχωρά στην ανάλυση των πλεονεκτημάτων της συλλογής φωτεινής ενέργειας στα WSN, επισημαίνοντας την αυτόνομη λειτουργία και την περιβαλλοντική φιλικότητα.

Στη συνέχεια, επικεντρώνεται στη σημασία των φωτοβολταϊκών συστημάτων και την εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Επεξηγεί πώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν βασικό μέσο μετατροπής ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και πώς η τεχνολογία MPPT απαιτείται για την αποτελεσματική αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

Τέλος, παρουσιάζεται το αναπτυγμένο σύστημα συλλογής φωτεινής ενέργειας, χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο bq25505. Η κατασκευή προσαρμόζεται στις ανάγκες της εφαρμογής, διαχειρίζεται αποτελεσματικά τη συλλεγόμενη ενέργεια και παρουσιάζει αξιοσημείωτα αποτελέσματα υπό διάφορες συνθήκες φωτισμού. Η ανάλυση αυτή παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη σχεδίαση και ανάπτυξη φωτοευαίσθητων συστημάτων συλλογής ενέργειας, με πολλαπλές πρακτικές εφαρμογές σε επαγγελματικούς και οικιακούς χώρους.

**Λέξεις Κλειδιά :** Συλλογή φωτεινής ενέργειας (Solar Harvesting), Διαχείριση ενέργειας, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN), Φωτοβολταϊκά συστήματα, Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPPT), Ολοκληρωμένο bq25505

## Abstract

The present study examines a system of collecting solar energy indoors, aiming at managing and converting the energy into forms that meet energy needs to achieve the autonomy of the system.

In the context of the current reality, addressing the challenges of climate change emerges as a priority, using innovative solutions that harness renewable energy sources and adopt electronic circuits as the core of technology. The introduction of the term "harvesting" in the field of renewable energy sources is crucial for the efficient use of natural resources, encouraging a departure from traditional methods of energy production.

The analysis focuses on Wireless Sensor Networks (WSN) that utilize the technique of solar harvesting, highlighting them as a pioneering solution for energy provision. The integration of photovoltaic circuits allows WSN to collect and store energy from solar illumination, providing autonomy and sustainability. The study progresses to analyze the advantages of solar harvesting in WSN, emphasizing autonomous operation and environmental friendliness.

Subsequently, the importance of photovoltaic systems is highlighted, along with the application of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) method. It explains how photovoltaic systems are a fundamental means of converting solar radiation into electrical energy and how MPPT technology is required for the effective use of the generated energy.

Finally, the developed solar energy harvesting system is presented, using the integrated bq25505. The construction is tailored to the application's needs, efficiently managing the collected energy and demonstrating remarkable results under various lighting conditions. This study provides significant information for the design and development of light-sensitive energy harvesting systems, with multiple practical applications in professional and residential spaces.

**Keywords:** Solar Harvesting, Energy Management, Renewable Energy Sources, Wireless Sensor Networks (WSN), Photovoltaic Systems, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Integrated bq25505

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να εκφράζω ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Βασίλη Κωνσταντάκο, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχατε κατά τη σύνταξη της εργασίας μου. Οι συμβουλές και οι παρατηρήσεις σας αποτελούν πηγή έμπνευσης και βοήθειας στην ανάπτυξη του θέματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και φίλους μου για την στήριξη και την συμπαράστασή τους.

# Σύστημα συλλογής φωτεινής ενέργειας εσωτερικού χώρου

Παναγιώτα Φασιλή  
pfasili@auth.gr

Θεσσαλονίκη Ιανουάριος 2024

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>2</b>
1.1	Εισαγωγή στον κόσμο και στη σημασία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων .	2
1.2	Εισαγωγή στον τομέα της συλλογής ενέργειας (energy harvesting) . . . .	3
1.2.1	Ορισμός και είδη συλλογής ενέργειας . . . . .	3
1.2.2	Οφέλη του harvesting . . . . .	3
1.3	Βασικός στόχος επίτευξης της εργασίας . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Εφαρμογές του Energy Harvesting στα Ασύρματα Αισθητήρια Δίκτυα (Wireless Sensor Networks - WSN)</b>	<b>5</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	5
2.2	Στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας . . . . .	6
2.3	Εφαρμογές της αποθήκευσης ενέργειας στα WSN . . . . .	9
2.4	Προβληματισμοί και μελλοντικές εξελίξεις . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Φωτοβολταϊκά και MPPT</b>	<b>11</b>
3.1	Σημασία φωτοβολταϊκών και του MPPT για την μέγιστη παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας . . . . .	11
3.2	Φωτοβολταϊκά και φωτοβολταϊκό φαινόμενο . . . . .	11
3.3	MPPT . . . . .	15
3.3.1	Ανάγκη για MPPT . . . . .	15
3.3.2	Αρχή λειτουργίας MPPT . . . . .	17
3.3.3	Βασικές Τεχνικές MPPT (P&O - IC) . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση του κυκλώματος συλλογής φωτεινής ακτινοβολίας</b>	<b>21</b>
4.1	Περιγραφή εργαλείων και κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν . . . . .	21
4.2	Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα . . . . .	31
4.2.1	Έλεγχο ακρίβειας και αντοχής του κυκλώματος . . . . .	31
4.2.2	Πειραματική αξιολόγηση φόρτισης μπαταρίας . . . . .	36
4.2.3	Ενεργειακή συμπεριφορά τυπικού συστήματος WSN με χρήση συλλογής ενέργειας . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα και Τελική Αξιολόγηση Θέματος</b>	<b>40</b>
	<b>Α΄ Ακρωνύμια και συντομογραφίες</b>	<b>42</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>43</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή στον κόσμο και στη σημασία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα αποτελούν το θεμέλιο της σύγχρονης τεχνολογίας που περιβάλλει τον κόσμο γύρω μας. Αν και συχνά περνούν απαρατήρητα από την καθημερινότητά μας, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα αποτελούν τον κρίσιμο παράγοντα που καθορίζει τη λειτουργία των συσκευών μας, από τα κινητά τηλέφωνα και τους υπολογιστές, μέχρι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τις οικιακές συσκευές.

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα υλοποιούνται με τη χρήση των βασικών δομικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική βιομηχανία, όπως οι δίοδοι, τα διπολικά τρανζίστορ, τα τρανζίστορ επαφής, τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, οι τελεστικοί ενισχυτές και δομικά ψηφιακά κυκλώματα, με σκοπό τη δημιουργία νέων και πιο πολύπλοκων λειτουργιών [1]. Στις περισσότερες των περιπτώσεων συνδυάζονται με μικροεπεξεργαστικές μονάδες, ικανές να εκτελέσουν ποικιλία λειτουργιών.

Τα κυκλώματα αυτά είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή και τη μετάδοση ηλεκτρικών σημάτων, επιτρέποντάς μας να αλληλεπιδρούμε με τις σύγχρονες τεχνολογίες που εξελίσσονται συνεχώς γύρω μας και διαμορφώνουν ένα νέο τρόπο ζωής.

Η κατανόηση και η βαθύτερη μελέτη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι αναγκαία και καθοριστική σε πολλούς τομείς της σύγχρονης πραγματικότητας. Από τον τομέα της επικοινωνίας και της ιατρικής, μέχρι τον τομέα της ενέργειας, τα κυκλώματα συμβάλλουν στην αποδοτικότητα και στον έλεγχο των συστημάτων παραγωγής, αποθήκευσης και αξιοποίησης απαραίτητης πληροφορίας, ανταποκρινόμενα στις σύγχρονες ανθρώπινες απαιτήσεις.

Ταυτόχρονα, στον αιώνα που ζούμε μια από τις πιο σημαντικές ανθρώπινες απαιτήσεις είναι η μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Αυτό δημιουργεί παράλληλα την ανάγκη για καινοτόμες λύσεις που θα στηρίζονται στην αξιοποίηση της ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική. Τα εργαλεία για την αντιμετώπιση του προβλήματος ορίζονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ως ο πυρήνας της απαραίτητης τεχνολογίας.



Σχήμα 1.1: Τα ηλεκτρονικά στον κόσμο γύρω μας

## 1.2 Εισαγωγή στον τομέα της συλλογής ενέργειας (energy harvesting)

### 1.2.1 Ορισμός και είδη συλλογής ενέργειας

Η εισαγωγή του τομέα "harvesting" στον ευρύτερο τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναδεικνύεται ως ένα καίριο και πρωτοποριακό βήμα προς την ορθή εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και την απεξάρτηση από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Ο όρος "harvesting" αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής - συγκομιδής και αξιοποίησης ενέργειας κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική, αλλά και από άλλες πηγές όπως η θερμοηλεκτρική ισχύς, η μηχανική κίνηση και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Όπως γίνεται φανερό και από τον ορισμό της, η συγκομιδή ενέργειας δύναται να χωριστεί σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, αυτήν της μεγάλης και μικρής κλίμακας. Η συγκομιδή μεγάλης κλίμακας επικεντρώνεται στη χρήση υψηλής τεχνολογίας και εκτεταμένης κλίμακας συστημάτων για τη συλλογή ενέργειας σε ευρύ βαθμό. Αντίθετα, η συγκομιδή μικρής κλίμακας επικεντρώνεται σε συστήματα συνήθως μικρά σε μέγεθος, φορητά, ανεξάρτητα σε λειτουργία, που κάνουν χρήση αισθητήρων και ασύρματων μονάδων επικοινωνίας, ενώ παράλληλα είναι ενεργειακά ανεξάρτητα, λειτουργώντας με μπαταρία και με βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την ευέλικτη χρήση τους σε περιοχές όπου υπάρχει δύσκολη πρόσβαση σε κεντρικά δίκτυα ενέργειας. Η αντίθεση αυτή στα είδη συγκομιδής ενέργειας, αναδεικνύει τις διαφορετικές τεχνολογίες και εφαρμογές που παρέχει ο τομέας της συγκομιδής ενέργειας.

### 1.2.2 Οφέλη του harvesting

Η συλλογή ενέργειας από πηγές του περιβάλλοντος μπορεί ενδεχομένως να μειώσει την εξάρτηση παροχής ενέργειας από ενσύρματες πηγές (για παράδειγμα μη-επαχρησιμοποιούμενες μπαταρίες), παρέχοντας πολλά ελκυστικά οφέλη για το περιβάλλον. Η συγκομιδή ενέργειας παρέχει πολλά υποσχόμενα πλεονεκτήματα και μοναδικά χαρακτηριστικά για



μελλοντικές δραστηριότητες που δεν θα μπορούσαν να προσφέρονται από τους συμβατικούς πόρους ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αυτοσυντηρούμενης ικανότητας, της μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα στην ατμόσφαιρα και της εύκολης και γρήγορης ανάπτυξης σε οποιοδήποτε τοξικό, εχθρικό ή απρόσιτο περιβάλλον. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη συμβατική σταθερή ενέργεια, η συχνά διακοπτόμενη και μη συνεχόμενα εξασφαλισμένη ενεργειακή φύση των ανανεώσιμων πηγών γεννά προκλήσεις για την υλοποίηση αξιόλογων συστημάτων μεταφοράς και άντλησης ενέργειας, με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να έχουν διεξαχθεί εκτενείς ερευνητικές μελέτες για την αντιμετώπιση αυτής της εγγενούς πρόκλησης.

### **1.3 Βασικός στόχος επίτευξης της εργασίας**

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ηλιακή συλλογή (solar harvesting) ως τη διαδικασία συγκομιδής της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την αποθήκευση και τη μετατροπή της σε μορφές που μπορούν να καλύψουν τις απαραίτητες ενεργειακές μας ανάγκες από μοντέρνα φορητά μικροεπεξεργαστικά συστήματα που λειτουργούν με μπαταρία. Μια άμεση και αποτελεσματική υλοποίηση συστημάτων "solar harvesting" πραγματοποιείται με την συμβολή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η συγκομιδή της ηλιακής ενέργειας επιτρέπει στις ενσωματωμένες συσκευές κυκλωμάτων χαμηλής κατανάλωσης να τροφοδοτούνται από τη διαθέσιμη στο χώρο περιβαλλοντική ενέργεια (π.χ. φως), μέσω ειδικών φωτοβολταϊκών κυττάρων (πάνελ), με σκοπό την παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα στοιχεία του κυκλώματος.

Η ανάλυση που απορρέει από την προκείμενη εργασία αποσκοπεί στην δημιουργία μιας νέας διευρυμένης εικόνας πάνω στη συγκομιδή ενέργειας που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εσωτερικούς χώρους, κυρίως αναφερόμενοι σε μικρές διαθέσιμες φωτεινότητες και ενέργειες. Η ακόλουθη πειραματική θεμελίωση κυκλωμάτων "harvesting", που αναπτύσσεται ενδελεχώς στο Κεφάλαιο 4, αποτελεί ένα πρώτο στάδιο βαθύτερης κατανόησης του ευρύτερου τομέα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας ως βιώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας λύσεις επαναφόρτισης των μπαταριών σε συστήματα ποικίλων αυτόνομων εφαρμογών που μπορεί να συναντήσει κανείς σε εσωτερικούς χώρους.

## **Κεφάλαιο 2**

# **Εφαρμογές του Energy Harvesting στα Ασύρματα Αισθητήρια Δίκτυα (Wireless Sensor Networks - WSN)**

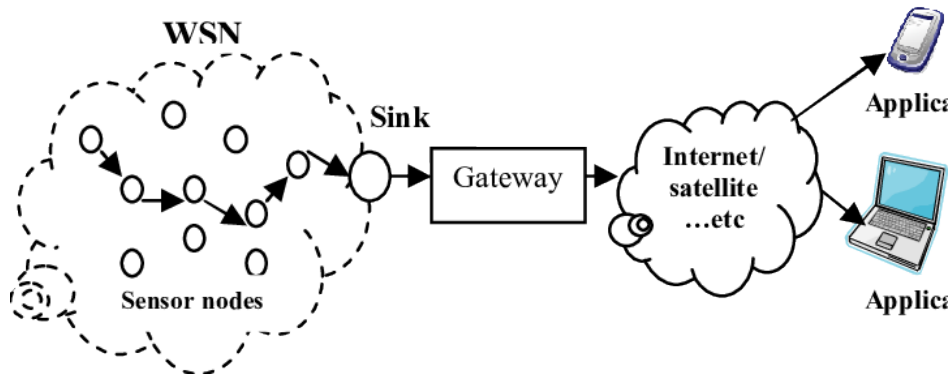
### **2.1 Εισαγωγή**

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things (IoT)) αναφέρεται στην ασύρματη σύνδεση και επικοινωνία μεταξύ φυσικών συσκευών και αντικειμένων που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή. Τα αντικείμενα αυτά συνδέονται μέσω του Διαδικτύου και είναι εφοδιασμένα με διάφορους αισθητήρες και επεξεργαστές που τους επιτρέπουν να επικοινωνούν μεταξύ τους ενώ συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα. Ο στόχος του IoT είναι να επιτύχει υψηλό επίπεδο αυτοματισμού και ευφυΐας, με την ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση, σε όλους τους τομείς της σύγχρονης ζωής προσφέροντας άνεση στους χρήστες [2]. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks (WSN)) καθίστανται ο πυρήνας του IoT ως συσκευές που αλληλεπιδρούν με τον φυσικό κόσμο και επιβάλλουν τις αλλαγές.

Τα δίκτυα αισθητήρων με ασύρματη μετάδοση (WSN) είναι ένα είδος δικτύου αποτελούμενο από ένα μεγάλο αριθμό μικρών και οικονομικών αισθητήρων που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με ασύρματο τρόπο. Τα WSN έχουν ευρεία εφαρμογή σε πολλούς διάφορους τομείς, καλύπτοντας εκτεταμένο φάσμα πεδίων και τύπων εφαρμογών. Αυτοί οι τομείς περιλαμβάνουν την υγεία και τον τρόπο της ζωής, την αυτοκινητοβιομηχανία, τα έξυπνα κτίρια, την προληπτική συντήρηση (για παραδείγματα η παρακολούθηση μηχανημάτων και υποδομών), καθώς και τις ενεργές ετικέτες RFID [3].

Ένα από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα WSN είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών που χρησιμοποιούν, λόγω της υψηλής απαιτούμενης ισχύς λειτουργίας, η οποία δεν συνάδει αποτελεσματικά με την διαθέσιμη τεχνολογία. Τα αισθητήρια WSN λειτουργούν συνήθως με μικρές μπαταρίες που οφείλουν να αντικατασταθούν τακτικά, γεγονός που μπορεί να είναι δαπανηρό και χρονοβόρο. Δυστυχώς, δεν προβλέπεται ότι σύντομα θα υπάρξουν βελτιωμένες μπαταρίες που θα συμβάλλουν στην βελτιστοποίηση του προβλήματος. Συνεπώς, η ενεργειακή συλλογή μπορεί να αποτελέσει μια πρακτική λύση για την αυτονομία των WSN, επιτρέποντας ταυτόχρονα την ευρεία χρήση αυτών των συστημάτων σε πολλές εφαρμογές. Τέτοια WSN θα

είναι σε θέση να εκτελούν λειτουργίες ανίχνευσης και ασύρματης επικοινωνίας χωρίς την ανάγκη για επίβλεψη, ρύθμιση ή συντήρηση. Αυτό το κεφάλαιο θα εξερευνήσει την έννοια της αποθήκευσης ενέργειας και τον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζει στη διατήρηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των WSN.



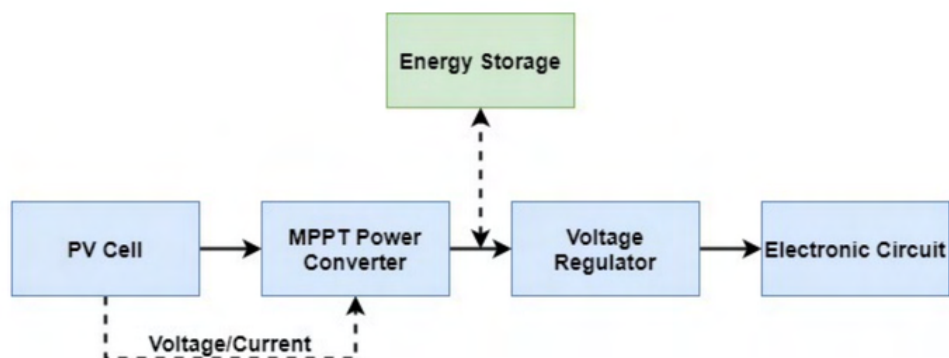
Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική Wireless Sensor Networks

## 2.2 Στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στη σύγχρονη τεχνολογία αξιοποίησης ενέργειας, ενώ το ενδιαφέρον έχει στραφεί όλο και περισσότερο στην ανάπτυξη ενεργειακών συστημάτων που μπορούν να αποθηκεύουν και να επαναχρησιμοποιούν ενέργεια με αποδοτικό τρόπο. Η ανάπτυξη του τομέα κρίνεται απαραίτητη για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντικρίζει το ενεργειακό σύστημα σήμερα. Η λύση συχνά επικεντρώνεται στον συνδυασμό χρήσης στοιχείων αποθήκευσης ενέργειας και εξαγωγής ενέργειας μέσω energy harvesting (EH), με σκοπό τη δυνατότητα παροχής μιας αξιόπιστης και βιώσιμης πηγής ενέργειας για το μέλλον, εξισορροπώντας την προσφορά και τη ζήτηση.

Μια διάσημη αρχιτεκτονική θεμελίωση EH που αποθηκεύει και επαναχρησιμοποιεί ενέργεια είναι η ηλιακή συγκομιδή ενέργειας (Solar EH). Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής η ηλιακή ενέργεια του περιβάλλοντος συλλέγεται για μελλοντική χρήση. Η εν λόγω αρχιτεκτονική του Σχήματος 2.2 αποτελείται από έναν μηχανισμό ανίχνευσης μέγιστης ισχύος (MPPT), έναν ρυθμιστή τάσης (Voltage Regulator) και ένα φωτοβολταϊκό (PV) κύτταρο που συλλέγει την περιβάλλουσα ενέργεια [4]. Καθώς η ενέργεια συλλέγεται από την ηλιακή ακτινοβολία, διάφορα στοιχεία αποθήκευσης (energy storage elements) όπως οι υπερκεραμικοί πυκνωτές (Super Capacitors) και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες οφείλονται να επιλέγονται ανάλογα των ενεργειακών απαιτήσεων της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι υπερκεραμικοί πυκνωτές, γνωστοί και ως Super Capacitors (SC) ή ultracapacitors, είναι ένα σημαντικό στοιχείο αποθήκευσης που χρησιμοποιείται ευρέως στις SEH εφαρμογές και προσελκύει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον ως συσκευή αποθήκευσης ενέργειας υψηλής απόδοσης που μπορεί να συμβάλει στην ταχεία ανάπτυξη ηλεκτρονικών ειδών χαμηλής κατανάλωσης (π.χ. φορητές ηλεκτρονικές συσκευές). Οι SC είναι σε θέση να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε σύγκριση με άλλα στοιχεία αποθήκευσης, όπως οι συμβατικές μπαταρίες, και να την αποδίδουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα με υψηλές τάσεις εξόδου. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για εφαρ-



Σχήμα 2.2: Η αρχιτεκτονική συσκευών συγκομιδής ηλιακής ενέργειας για ενεργειακή αποθήκευση

μογές που απαιτούν απότομη αποδέσμευση ενέργειας ή υψηλή ισχύς, όπως η εκκίνηση κινητήρων ή η αποθήκευση ενέργειας από πηγές όπως οι ηλιακοί συλλέκτες κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ηλιοφάνειας. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα ανθεκτικότητας σε κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης.

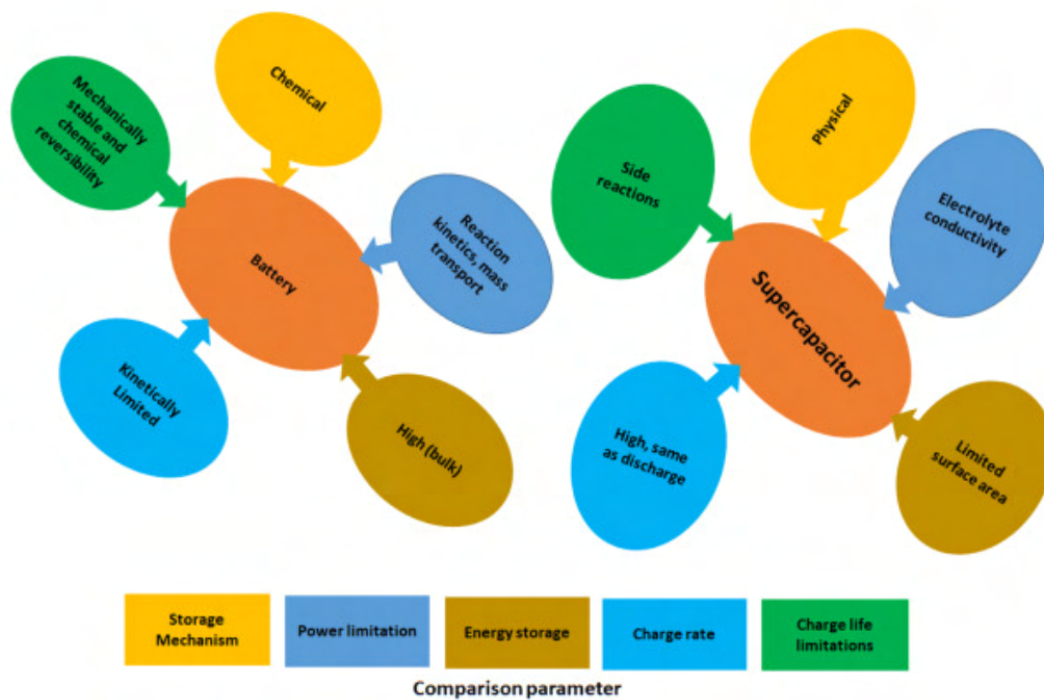
Η ταχεία εξέλιξη των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών (Portable electronic devices (PEDs)) είναι αδιαχώριστα συνδεδεμένη και με τη σταδιακή πρόοδο των τεχνολογιών επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Οι πρωτογενείς μπαταρίες έχουν λειτουργήσει ως την κύρια πηγή ενέργειας για τα PED για αρκετές δεκαετίες τώρα. Ωστόσο η σημαντική πρόοδος στον τομέα των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, με υψηλότερη ενέργεια και πυκνότητα ισχύος, έχει αλλάξει εντυπωσιακά την κατάσταση από τις αρχές του 21ου αιώνα. Σήμερα, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν ήδη εφαρμοστεί στα περισσότερα PED, τα οποία ενσωμάτωσαν αρκετούς διαφορετικούς τύπους μπαταριών, συμπεριλαμβανομένων των μολύβδου-οξέος, Ni-Cd (Νικελίου Καδμίου), Ni-MH (Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου) και Li-ion (Ιόντων Λιθίου).

Οι τελευταίες έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση εφαρμογών με PED, ήδη από το 1991 όταν η Sony Corporation [5] κυκλοφόρησε στο εμπόριο την πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου. Η εμφάνισή της δημιούργησε ποικίλες προκλήσεις για τους άλλους τύπους μπαταριών, που θα μπορούσαν να αποδοθούν σε μια σειρά πλεονεκτημάτων, όπως η υψηλή ειδική ενέργεια (συνήθως διπλάσια από τις τυπικές μπαταρίες Ni-Cd), ο χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης, η υψηλή τάση περίπου 3,6 V (τριπλάσια από αυτή της τυπικής μπαταρίας Ni-based), η μηδαμινή συντήρηση, το λιγοστό βάρος, η καλή ασφάλεια και η εξαιρετική κυκλική απόδοση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τις μπαταρίες ιόντων λιθίου την καλύτερη επιλογή αποθήκευσης ενέργειας για μικρού μεγέθους PED, όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, ψηφιακές κάμερες και άλλα, που κάποτε ήταν κυρίαρχες οι μπαταρίες Ni-MH και Ni-Cd [6].

Βέβαια, σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί πως οι μπαταρίες συχνά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις πρωτεύουσες (ή πρωτογενείς, κύριες, πρωταρχικές) (primary) και τις δευτερεύουσες (secondary). Οι μη-επαναφορτιζόμενες μπαταρίες αποτελούν τις πρωτεύουσες-κύριες μπαταρίες, έναντι των επαναφορτιζόμενων, για τις ΕΗ εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν τη σταθερότητα θερμοκρασίας και την υψηλή χωρητικότητα, με τα βασικά τους μειονεκτήματα να είναι η άμεση αντικατάστασή τους μετά την λήξη της ζωής τους και η περιοδική-τακτική συντήρησή τους. Η απόδοση αποθήκευσης των κλασικών μπαταριών εκτιμάται ότι είναι της τάξης του 60 – 80%, γεγονός

που εξαρτάται από την ηλεκτροχημεία και τον λειτουργικό τους κύκλο, ενώ παράλληλα τις καθιστά ιδανικές για πρωτογενή πηγή ενέργειας. Σε αντίθεση, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι δευτερεύουσες μπαταρίες που περιορίζονται λόγω της χωρητικότητας τους παρά τη διαθεσιμότητα πολλών διαφορετικών κύκλων φόρτισης-επαναφόρτισης. Και οι δύο τύποι μπαταριών είναι εξίσου σημαντικοί για την ορθή λειτουργία και αποδοτική χρήση των διάφορων ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων.

Οι κύριες διακρίσεις μεταξύ μπαταριών και SC στον μηχανισμό αποθήκευσης, στους περιορισμούς ισχύος, στην αποθήκευση ενέργειας, στον ρυθμό φόρτισης και στους περιορισμούς διάρκειας φόρτισης απεικονίζονται στο επόμενο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Σύγκριση μεταξύ μπαταριών και SC μέσω διαφορετικών λειτουργικών παραμέτρων

Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάκρισης μεταξύ μπαταριών και SC έγκεινται στην διάρκεια ζωής των κύκλων φόρτισης-επαναφόρτισης. Στους SC ο κύκλος ζωής είναι εξαιρετικά υψηλότερος (1 εκατομμύριο ώρες έως  $30.000 \cdot h$ ) από αυτόν των μπαταριών ( $\approx 500 \cdot h$ ), ενώ προσφέρουν και ιδιαίτερα χαμηλούς χρόνους επαναφόρτισης (SC:  $1 - 10 \cdot s$ ) έναντι (μπαταριών:  $10 - 60 \cdot min$ ). Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά (ειδική ενέργεια, διάρκεια ζωής κύκλου, χρόνος φόρτισης-εκφόρτισης και μηχανισμός αποθήκευσης φόρτισης) των SC και των μπαταριών συνοψίζονται και συγκρίνονται στον Πίνακα 2.1 [7].

Order	Characteristics	Capacitor	Supercapacitor	Battery
1	Specific energy (Wh kg <sup>-1</sup> )	<0.1	Up to 1091	Up to 1606
2	Specific power (W kg <sup>-1</sup> )	>10,000	Up to 19,6000	<1000
3	Discharge time	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-3</sup> S	s to min	0.03-3h
4	Charge time	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-3</sup> S	s to min	1-5h
5	Coulombic efficiency (%)	About 100	Up to 99	70-85
6	Cycle life	Almost infinite	>500,000	About 1000
7	Charge storage determinants	Electrode area and dielectric	Microstructure of electrode and electrolyte	Thermodynamics and active mass

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των βασικών μετρήσεων απόδοσης μεταξύ διαφορετικών ηλεκτροχημικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

## 2.3 Εφαρμογές της αποθήκευσης ενέργειας στα WSN

Τα WSN αναδεικνύουν τον αναγκαίο ρόλο της αποθήκευσης ενέργειας σε πολλούς τομείς εφαρμογών [8]. Οι διάφορες εφαρμογές όπου η αποθηκευμένη ενέργεια αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την λειτουργία των WSN είναι οι εξής:

- **Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος:** Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των WSN εφαρμογών και εξελίσσεται ευρέως μαζί με την ανάπτυξη της πρόσφατης τεχνολογίας. Κατά γενικότητα, το σύστημα παρακολούθησης του περιβάλλοντος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την παρακολούθηση παραμέτρων περιβαλλοντικής σημασίας, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η φωτεινότητα και η ατμοσφαιρική πίεση.
- **Υγεία και Ιατρική:** Στον ιατρικό τομέα, τα WSN χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ασθενών και την συλλογή δεδομένων υγείας. Η αποθήκευση ενέργειας διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία των αισθητήρων, ακόμη και σε κινητικές εφαρμογές, προσφέροντας άνεση για τον ασθενή, ενώ ταυτόχρονα παρέχει ισοδύναμη ή ακόμα και καλύτερη απόδοση στη συλλογή και μετάδοση των ιατρικών δεδομένων.
- **Βιομηχανία και Προγνωστική Συντήρηση:** Στον τομέα της βιομηχανίας, τα WSN χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση μηχανημάτων και υποδομών, επιδιώκοντας την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους. Ακόμη και σε επικίνδυνες περιοχές, τα αυτόνομα WSN λειτουργούν με στόχο την άμεση ανίχνευση απροσδόκητων βλαβών μέσω της μέτρησης της θερμοκρασίας και της παρακολούθησης δονήσεων, προσφέροντας τη δυνατότητα για προληπτική συντήρηση, η οποία εξοικονομεί χρόνο και πόρους. Συνεπώς, η αποθήκευση ενέργειας συντελεί άμεσα στην εκτεταμένη χρήση των αισθητήρων.

- **Ενεργειακή Αυτονομία:** Σε εφαρμογές όπου οι πόροι ενέργειας είναι περιορισμένοι, όπως στα "έξυπνα" κτίρια και τα αυτοκίνητα, η αποθήκευση ενέργειας διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία των WSN. Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην ανάπτυξη έξυπνων αισθητήρων που διακριτικά παρακολουθούν τη χρήση της ενέργειας και παρέχουν ανατροφοδότηση στον χρήστη.

## 2.4 Προβληματισμοί και μελλοντικές εξελίξεις

Ο εξαιρετικά σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει η αποθήκευση ενέργειας στις εφαρμογές των WSN δεν θα μπορούσε να μην συμβαδίζει με ορισμένες προκλήσεις που ταλανίζουν την επιστημονική κοινότητα. Οι προκλήσεις αφορούν κυρίως την κατανάλωση επιπλέον ενέργειας για τη μετάδοση και την επεξεργασία δεδομένων, την έκθεση των αισθητήρων σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τον ακριβή εντοπισμό των αισθητήρων, τη επίτευξη μικρότερης χρονικής καθυστέρησης και το χαμηλότερο κατασκευαστικό και επιδιορθωτικό κόστος. Οι προαναφερόμενες δυσκολίες μπορούν εν δυνάμει να ελαχιστοποιήσουν την απόδοση των WSN μέσω της σταδιακής εξασθένησης των αποθηκευτικών τους δυνατοτήτων. Για το σκοπό αυτό, η προοπτική για εξέλιξη και έρευνα πάνω στον τομέα διαγράφει σημαντική πορεία.

Η εξέταση των πρόσφατων εξελίξεων στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί κρίσιμη πτυχή για την πρόοδο των (WSN). Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αναμένεται να οδηγήσει σε πρωτοποριακές εφαρμογές, ενισχύοντας την αυτονομία και την αποτελεσματικότητα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η συλλογή ηλιακής ενέργειας παρέχει μια εναλλακτική πηγή ενέργειας για τα WSN, με αρκετές ανεπτυγμένες χώρες όπως η Φινλανδία, το Μεξικό, η Κίνα και οι ΗΠΑ να καταβάλλουν ερευνητικές προσπάθειες για την παροχή σχεδιαστικών λύσεων στις προκλήσεις που εμφανίζουν οι εφαρμογές συλλογής ενέργειας. Τα μικρού μεγέθους ηλιακά πάνελ κατάλληλα συνδεδεμένα με κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας χαμηλής κατανάλωσης και με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες αποτελούν εργαλείο για την πλήρη αυτοτροφοδότηση των WSN, με σκοπό την απεριόριστη διάρκεια ζωής του δικτύου [9].

Οι προβλέψεις για το μέλλον δείχνουν ότι η αποθήκευση και η αυτόνομη παραγωγή ενέργειας θα διαδραματίσουν ακόμη πιο σημαντικό ρόλο στους ήδη υπάρχοντες τομείς, επεκτείνοντας το φάσμα τους σε νέες εφαρμογές, με κέντρο την υγεία και την ασύρματη επικοινωνία. Πρόσφατα πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση, η οποία ανέδειξε ότι η εκτιμώμενη αξία της αγοράς των αισθητήρων δικτύων (WSN) ανήλθε στο ποσό των 34,26 δισεκατομμυρίων δολαρίων το 2017 και αναμένεται να αυξηθεί στα 93,86 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2023. Αυτό υποδηλώνει μια αισθητή ετήσια ανάπτυξη της τάξης του 18,55% μέχρι το έτος 2023. Η προβλεπόμενη αξία της αγοράς στην πενταετία 2018 με 2023 αναδεικνύει φωτεινές προοπτικές για την αγορά των WSN [10].

## Κεφάλαιο 3

### Φωτοβολταϊκά και MPPT

#### 3.1 Σημασία φωτοβολταϊκών και του MPPT για την μέγιστη παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας

Η εισαγωγή στη συγκομιδή της ηλιακής ενέργειας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αναφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στις μεθόδους ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ειδικότερα η ηλιακή ενέργεια, αποτελούν ένα σημαντικό μέσο για την παραγωγή καθαρής ενέργειας. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες (ή αλλιώς πάνελ) χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ για την αποτελεσματική αξιοποίηση της παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας, η μέθοδος MPPT κρίνεται απαραίτητη. Πολλές τεχνικές παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να μεγιστοποιούν την παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, με αρκετές από αυτές να είναι καλά καθιερωμένες στη βιβλιογραφία [11]. Αυτές οι τεχνικές ποικίλλουν σε πτυχές αναλόγως με τη βασική δομική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

#### 3.2 Φωτοβολταϊκά και φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ή οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες (PV cells) λαμβάνουν ιδιαίτερη προσοχή λόγω της εγγενούς τους ικανότητας να μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο (Σχήμα 3.1), γνωστό και ως ηλιακό κύτταρο, είναι μια συσκευή που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία, το φως του ήλιου, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια [12].

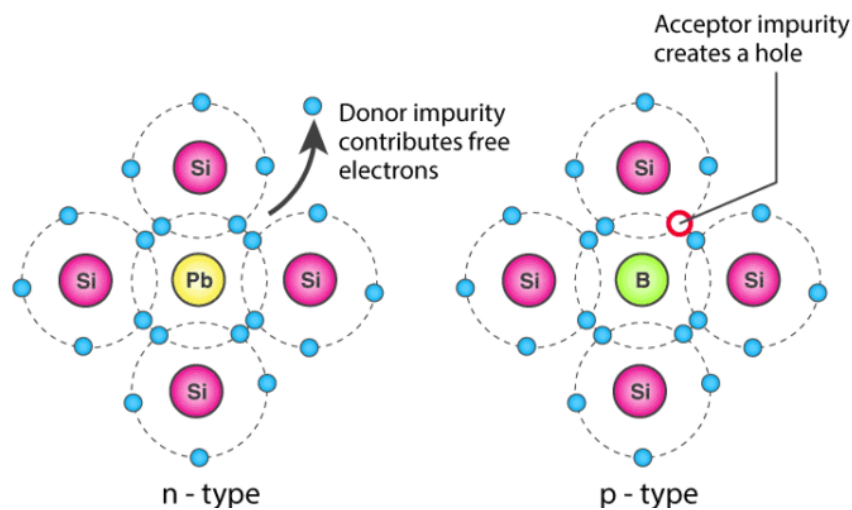


Σχήμα 3.1: Φωτοβολταϊκό κύτταρο



Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, ως τα βασικά δομικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι συσκευές κατασκευασμένες από διατάξεις ημιαγωγών. Οι ημιαγωγοί (semiconductors) είναι υλικά τα οποία παρουσιάζουν την ιδιότητα, όταν απορροφούν φως (φωτόνια), μέσω συγκεκριμένων διαδικασιών να προσφέρουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, η συλλογή των οποίων μας προσφέρει το ζητούμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών εξαρτώνται δραστικά από την χημική τους σύσταση. Ένα από τα πιο δημοφιλή ημιαγωγίμα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικό κατασκευής των ηλιακών κυττάρων είναι το πυρίτιο (Silicon – Si). Φτηνό σε κόστος, άφθονο στην φύση και σε μεγάλο βαθμό καλά μελετημένο, προσφέρεται σε διάφορες εκδοχές του, όπως το μονοκρυσταλλικό και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, για το σκοπό αυτό.

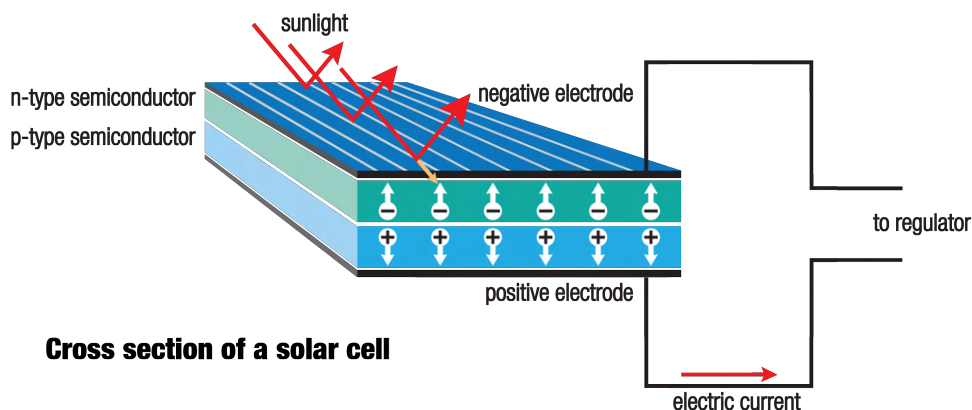
Μια τυπική διάταξη ενός ηλιακού κυττάρου αποτελείται συνήθως από μια ημιαγωγίμη επαφή τύπου p – n. Πρόκειται για επαφές οι οποίες έχουν προέλθει από την άμεση εναπόθεση ενός n – τύπου ημιαγωγού σε ένα p – τύπου ημιαγωγό. Οι ημιαγωγοί τύπου - n (Σχήμα 3.2) δημιουργούνται όταν σε έναν ημιαγωγό, όπως το πυρίτιο που έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, προστεθεί πολύ μικρή ποσότητα ενός στοιχείου της πέμπτης ομάδας του περιοδικού πίνακα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πλέον περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια και ελάχιστες οπές (απώλεια ηλεκτρονίων) στον ημιαγωγό. Συνεπώς, το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από ένα είδος φορτίου, τα ηλεκτρόνια, τα οποία ονομάζονται και φορείς πλειονότητας. Αντίθετα, οι ημιαγωγοί τύπου - p (Σχήμα 3.2) δημιουργούνται όταν στον ημιαγωγό προστεθεί μια μικρή ποσότητα ενός στοιχείου της τρίτης ομάδας του περιοδικού πίνακα, όπου μετά την πρόσμιξη οι φορείς πλειονότητας είναι πλέον οι οπές [13].



Σχήμα 3.2: Ημιαγωγοί τύπου - n και - p

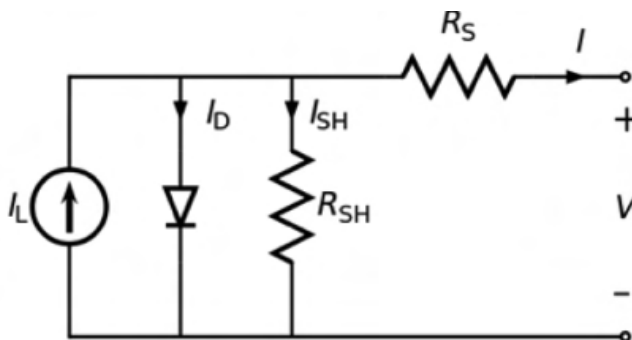
Ενώνοντας με κατάλληλο αγωγό τις δύο πλάκες του ημιαγωγίμου στοιχείου δημιουργείται μια επαφή p – n, ενώ παράλληλα εκθειάζοντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο στην ηλιακή ακτινοβολία σχηματίζεται κλειστό κύκλωμα που οδηγεί στην ανάπτυξη κυκλοφορίας των ηλεκτρονίων διαμέσου της επιφάνειας επαφής τους (Σχήμα 3.3). Στο κλειστό αυτό κύκλωμα (πρακτικά χωρίς φορτίο) η ένταση του ρεύματος είναι σταθερή και ονομάζεται ένταση βραχυκυκλώσεως. Η ένταση βραχυκυκλώσεως μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες του κυττάρου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου του, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στην πρακτική εκμετάλ-

λευση αυτού του φαινομένου στηρίζεται η λειτουργία του συνόλου των φωτοβολταϊκών διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.3: Βασική δομή ηλιακού κυττάρου

Για να γίνει κατανοητή η ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι χρήσιμο να δημιουργηθεί ένα πρότυπο ηλεκτρικά ισοδύναμο σύστημα που να βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι ήδη γνωστή (Σχήμα 3.4). Σκοπός τους είναι να περιγράψουν με επαρκή ακρίβεια την καμπύλη Έντασης - Τάσης ( $I-V$ ), δηλαδή τη σχέση που συνδέει το παραγόμενο ρεύμα σε σχέση με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι εκτιμήσεις προβλέπουν πως δεν επρόκειτο για ηλεκτρικό στοιχείο με ωμική συμπεριφορά, που πρακτικά σημαίνει ότι η παραγόμενη ισχύς δεν είναι σταθερή. Επόμενος, γεννάται ο προβληματισμός εύρεσης ενός σημείου μέγιστης ισχύος ανάλογα τις συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ακτινοβολίας που επικρατούν κατά την λειτουργία του φωτοβολταϊκού.

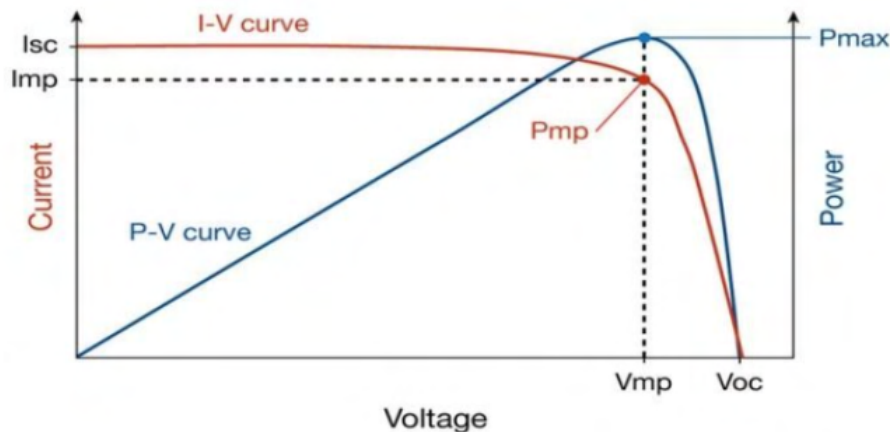


Σχήμα 3.4: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε ομαλές συνθήκες λειτουργίας οι χαρακτηριστικές καμπύλες ( $V-I$  και  $V-P$ ) ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι οι επόμενες (Σχήμα 3.5), ενώ πάνω στο διάγραμμα βρίσκονται και τα κύρια σημεία λειτουργίας του.

Πιο αναλυτικά αυτά είναι:

- Το σημείο μέγιστης ισχύος - MPP ( $I_{mp}$  και  $V_{mp}$ )
- Το σημείο μέγιστης τάσης ανοικτού κυκλώματος - Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )
- Το σημείο μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης - Short Circuit Current ( $I_{sc}$ )



Σχήμα 3.5: Καμπύλη ισχύος - τάσης και ρεύματος - τάσης

Υπάρχουν διάφοροι τύποι τεχνολογίας φωτοβολταϊκών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των κρυσταλλικών σιλικόνης. Τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούν κρυσταλλικό πυρίτιο σιλικόνης και αυτά με τη σειρά τους χωρίζονται σε υποκατηγορίες:

- Μονοκρυσταλλικά: Χρησιμοποιούν μονοκρυσταλλικό πυρίτιο σιλικόνης και είναι πιο αποδοτικά.
- Πολυκρυσταλλικά: Είναι πιο οικονομικά από τα μονοκρυσταλλικά, αλλά λιγότερο αποδοτικά.
- Άμορφα: Χρησιμοποιούν αμορφώδες πυρίτιο σιλικόνης και είναι ευέλικτα στον σχεδιασμό και τη χρήση.

Συμπληρωματικά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να διαφοροποιηθούν αναλόγως της μεθόδου διαχείρισης της τάσης εισόδου τους. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν τα φωτοβολταϊκά που λειτουργούν με τη λογική:

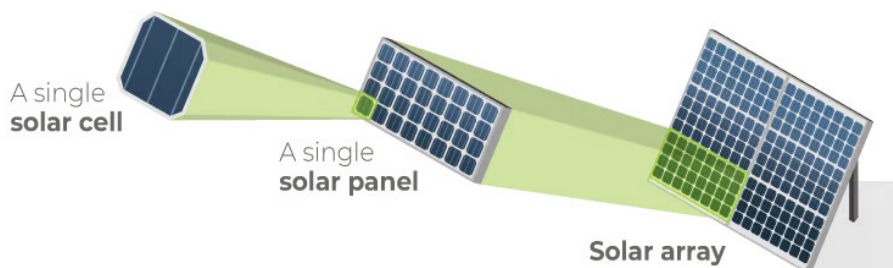
- Step down: Γνωστά και ως buck converters, μειώνουν την τάση DC από μια πηγή (π.χ. μπαταρία, τροφοδοτικό) σε μια χαμηλότερη τάση. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως τα ηλεκτρονικά κυκλώματα.
- Step Up: Γνωστά και ως boost converters, αυξάνουν την τάση DC από μια πηγή σε μια υψηλότερη τάση. Τα συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που αφορούν κυρίως βιομηχανικά συστήματα.

Η επιλογή του τύπου φωτοβολταϊκού πάνελ οφείλει να συμβαδίζει με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, καθώς κάθε μέθοδος παρέχει ξεχωριστές δυνατότητες και χαρακτηριστικά [14].

Η ορθή αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και η εφαρμογή τους σε κυκλωματικές διατάξεις προϋποθέτουν κάποιες βασικές γνώσεις γύρω από τη κατανόηση του υπολογισμού της απόδοσης ισχύος τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σε εξωτερικούς χώρους, αποτελούν προφανή πηγή ενέργειας για αυτοτροφοδοτούμενα συστήματα, αξιοποιώντας τη ροή ηλιακής ενέργειας  $0,1 \text{ W/cm}^2$ . Η απόδοση κυμαίνεται από 5 – 30%, ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται. Σε εσωτερικούς χώρους, όπου τα επίπεδα φωτισμού είναι πολύ χαμηλότερα ( $10 - 100 \mu\text{W/cm}^2$ ), τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενδέχεται να παράγουν ποσοστό απόδοσης κάτω από το 10% της απόδοσης υπό

φυσικό ηλιακό φωτισμό. Η απόδοση για τη χρήση σε εσωτερικούς χώρους θα εξαρτηθεί από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος των φωτοβολταϊκών κυττάρων που χρησιμοποιούνται, η ποιότητα του φωτισμού, η θερμοκρασία, κ.α., ενώ για εξωτερικούς χώρους από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, τη σκίαση, τους ανέμους, τη θερμοκρασία, καθώς και από την ατμοσφαιρική ρύπανση [15].

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο δύναται να παράγει γύρω στα 2 – 4 Watt κατά τη διάρκεια ιδανικών συνθηκών φωτισμού, γεγονός που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την τεχνολογία της κυψέλης. Πολλές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις συνδυάζουν πολλαπλά κύτταρα σε πάνελ για να επιτύχουν διαφορετική τάση λειτουργίας και κατά επέκταση παραγόμενης ισχύς. Η συνολική παραγωγή εξαρτάται, συνεπώς, από τον αριθμό και τη σύνδεση των κυψελών σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ.



Σχήμα 3.6: Δομή φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Φυσικά, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σπανίως είναι συγχρονισμένη με τη ζήτηση φορτίου, καθώς οι πηγές αυτές δεν προσφέρουν ενέργεια που να ανταποκρίνεται άμεσα στις ανάγκες των καταναλωτών. Για τον λόγο αυτό, έχει δοθεί σημαντική προσοχή στην αποθήκευση ενέργειας στο ίδιο το δίκτυο των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, με στόχο την προσθήκη ευελιξίας στη διαχείριση του φορτίου και την υπέρβαση ορισμένων σημαντικών προβλημάτων ποιότητας ισχύος. Πολλές τεχνικές διαχείρισης μπαταριών έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών σταθμών στο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ διάφορα μοντέλα και μέθοδοι παρακολούθησης σημείων μέγιστης ισχύος (MPPT) έχουν αναπτυχθεί για την αξιοποίηση της μέγιστης παραγόμενης ισχύος από αυτά.

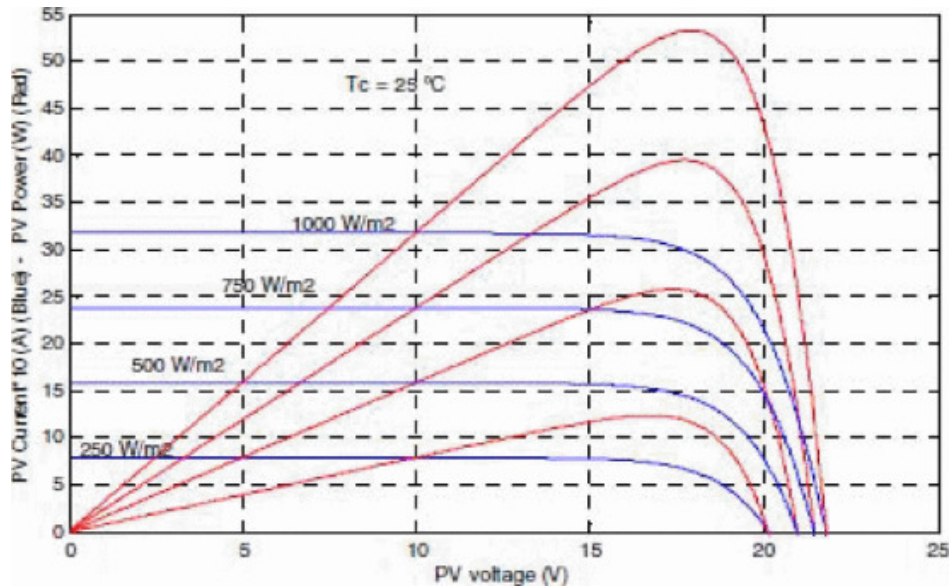
## 3.3 MPPT

### 3.3.1 Ανάγκη για MPPT

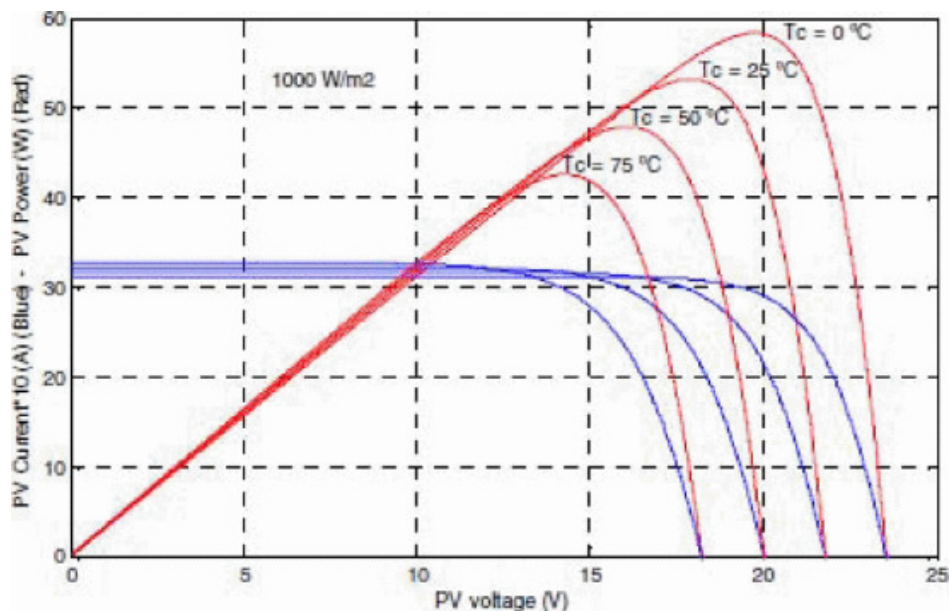
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα συστήματα παραγωγής φωτοβολταϊκών παρουσιάζουν δύο κύρια προβλήματα, την αναποτελεσματικότητα μετατροπής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, πολύ χαμηλή (9 – 17%) ειδικά υπό συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας, και την συνεχόμενη αλλαγή της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις ηλιακές συστοιχίες ανάλογα των καιρικών συνθηκών. Επιπλέον, η χαρακτηριστική V-I της ηλιακής κυψέλης είναι μη γραμμική και ποικίλλει ανάλογα με την ακτινοβολία (Σχήμα 3.7) και θερμοκρασία (Σχήμα 3.8), δημιουργώντας επιπλέον προβληματισμούς.

Αυτές οι προκλήσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν επαρκώς μέσω της εισαγωγής ενός μοναδικού σημείου στη χαρακτηριστική καμπύλη  $V - I$  και  $V - P$  του φωτοβολταϊκο-

ύ στοιχείου (Σχήμα 3.4), που ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP), στο οποίο ολόκληρο το PV σύστημα (συστοιχία, μετατροπέας κλπ...) λειτουργεί με μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ στην έξοδό του. Η θέση του MPP δεν είναι γνωστή, αλλά μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή, είτε μέσω μοντέλων υπολογισμού είτε από αλγόριθμους αναζήτησης. Επομένως, το μέγιστο σημείο ισχύος απαιτεί τεχνικές παρακολούθησης (MPPT - Maximum Power Point Tracking) για τη διατήρηση του σημείου λειτουργίας της PV γεννήτριας στο MPP της.



Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστική ισχύος - τάσης και ρεύματος - τάσης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας σε σταθερή θερμοκρασία κυτάρου



Σχήμα 3.8: Χαρακτηριστική ισχύος - τάσης και ρεύματος - τάσης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας για διαφορετική θερμοκρασία κυψέλης σε σταθερό επίπεδο ακτινοβολίας



### 3.3.2 Αρχή λειτουργίας MPPT

Η διαδικασία του MPPT βασίζεται στην παρακολούθηση των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης - ισχύος ( $V - P$ ) και τάσης - ρεύματος ( $V - I$ ) των ηλιακών κυττάρων. Η καμπύλες αυτές παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος και της παραγόμενης ισχύος ή του ρεύματος εξόδου αντίστοιχα. Καθώς οι συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας αλλάζουν, η MPP καμπύλη μετακινείται και χρήζει παρακολούθησης.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για φωτοβολταϊκά συστήματα, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή απόδοση της παραγόμενης ενέργειας. Αφού εντοπιστεί το MPP, το σύστημα διατηρεί τη λειτουργία του σε αυτό το σημείο με διάφορους τρόπους. Οι ελεγκτές MPPT προσαρμόζουν συνεχώς την τάση εισόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος, παρακολουθώντας τις αλλαγές στις συνθήκες φωτισμού. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα να διατηρεί την απόδοση στο MPP ακόμη και υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Πολλές τεχνικές MPPT έχουν καθιερωθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία και παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. Οι μέθοδοι ποικίλλουν σε αρκετές πτυχές που περιλαμβάνουν την απλότητα τους, την ταχύτητα σύγκλισης στο MPP σημείο, τη δυνατότητα ψηφιακής ή αναλογικής υλοποίησης, τον απαιτούμενο αριθμό και τον τύπο των αισθητήρων που χρησιμοποιούν, το κόστος της υλοποίησης, το εύρος της αποτελεσματικότητας και πολλές άλλες παραμέτρους. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται συχνά από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τους περιορισμούς του συστήματος φωτοβολταϊκής ενέργειας που χρησιμοποιείται.

Αρκετές είναι οι τεχνικές MPPT που έχουν αναλυθεί στον επιστημονικό χώρο. Αξιόλογα παραδείγματα ορίζονται η Perturb και Observe (P&O) μέθοδος, η μέθοδος αυξητικής αγωγιμότητας (IC), το κλασματικό ανοιχτό κύκλωμα τάσης (FVOC), το ρεύμα κλασματικού βραχυκυκλώματος (FSC), η μέθοδος τεχνητού νευρωνικού δικτύου, η μέθοδος Fuzzy Logic, κ.λ.π.

### 3.3.3 Βασικές Τεχνικές MPPT (P&O - IC)

Οι βασικές μέθοδοι MPPT που θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια είναι οι Perturb & Observe και Incremental Conductance, καθώς αποτελούν τις πιο διάσημες και διαδεδομένες τεχνικές εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) [16].

#### • Perturb & Observe (P&O):

Ο αλγόριθμος Perturb-and-Observe καθιστά την απλούστερη μεταξύ όλων των τεχνικών MPPT και βασίζεται στην απλή μαθηματική συνθήκη μεγίστου

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.1)$$

, όπου  $P$  και  $V$  η ισχύς και η τάση στην έξοδο του PV κυττάρου αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται και από τις χαρακτηριστικές καμπύλες  $V-I$  και  $V-P$  (Σχήμα 3.5) παρατηρείται ότι η αύξηση της τάσης συνεπάγεται με την αύξηση της ισχύος όταν η PV γεννήτρια λειτουργεί στα αριστερά του MPP, ενώ η ισχύς μειώνεται με την αύξηση της τάσης όταν λειτουργεί στα δεξιά του MPP. Επομένως, εάν

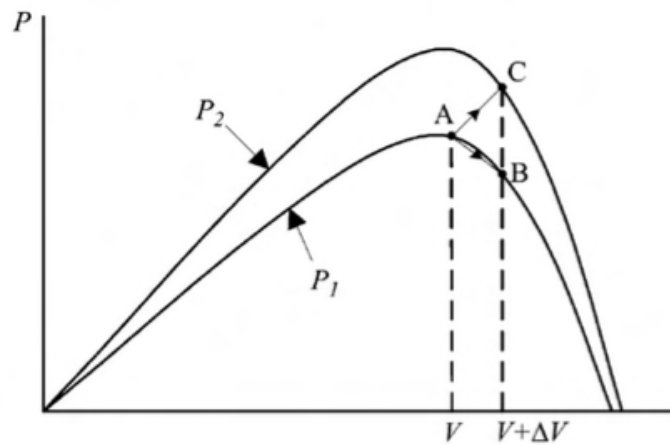
$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (3.2)$$

, η διαταραχή πρέπει να παραμένει η ίδια και εάν

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad (3.3)$$

, η διαταραχή πρέπει να αντιστραφεί. Η διαδικασία πρέπει να είναι επαναλαμβάνεται περιοδικά έως ότου επιτευχθεί η Σχέση 3.1 (maximum power point).

Κάτω από απροσδόκητες και γρήγορες αλλαγές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, φαίνεται ότι η μέθοδος "Perturb and Observe" (P&O) δεν ανταποκρίνεται αποτελεσματικά, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.9. Λόγω μικρής διαταραχής  $\Delta V$  στην τάση του φωτοβολταϊκού συστήματος υπό σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες, το σημείο λειτουργίας μετακινείται από σημείο το Α στο Β. Δεδομένου ότι η ισχύς μειώνεται στο Β, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, η διαταραχή πρέπει να αντιστραφεί. Αντίστοιχα, εάν η καμπύλη ισχύος μετατοπιστεί από  $P_1$  στο  $P_2$  λόγω αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας, το σημείο λειτουργίας θα αλλάξει από το Α στο Γ. Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει εκ νέου αύξηση της ισχύος οπότε και πάλι σύμφωνα με τον P&O αλγόριθμο η διαταραχή θα πρέπει να αντιστραφεί, με αποτέλεσμα την απόκλιση του σημείου λειτουργίας από το Μέγιστο Power Point. Επομένως, η P&O τεχνική απαιτεί τροποποιήσεις προκειμένου να εξασφαλίσει την ακριβή και αποτελεσματική παρακολούθηση του MPP, ακόμη και σε απρόβλεπτες αλλαγές στην ακτινοβολία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τροποποίησης αποτελεί ο αλγόριθμος P&O τριών σημείων [17].



Σχήμα 3.9: Απόκλιση του P&O από το MPP

- **Incremental Conductance (IC):**

Η μέθοδος της αυξητικής αγωγιμότητας ("Incremental Conductance") βασίζεται επίσης στη παρατήρηση ότι η παράγωγος της ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας είναι μηδέν στο MPP, θετικό στα αριστερά και αρνητικό στα δεξιά του Σημείου Μέγιστης Ισχύος. Η παρούσα τεχνική ασχολείται με το πρόσημο της παραγώγου  $dP/dV$ , παρακάμπτοντας τους περιορισμούς που παρουσιάζει η P&O τεχνική. Οι βασικές μαθηματικές εξισώσεις παρουσιάζονται παρακάτω.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \dots \text{at MPP} \quad (3.4)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \dots \text{at left of MPP} \quad (3.5)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \dots \text{at right of MPP} \quad (3.6)$$

Εφόσον ισχύει το επόμενο:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.7)$$

και για MPP ορίζουμε  $\frac{dP}{dV} = 0$ , προκύπτει το εξής:

$$I + \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \dots \text{at MPP} \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \dots \text{at left of MPP} \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \dots \text{at right of MPP} \quad (3.11)$$

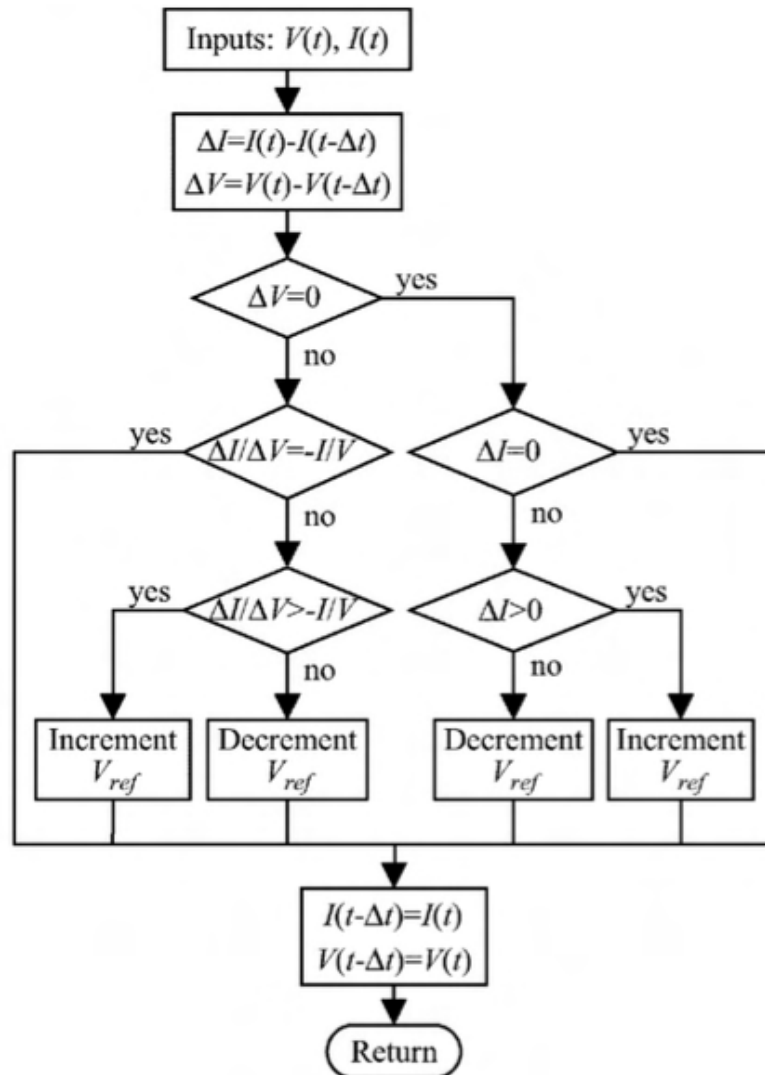
Σύμφωνα με τις προηγούμενες εξισώσεις, το Σημείο Μέγιστης Ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος δύναται να εντοπιστεί μέσω της σύγκρισης του  $\frac{I}{V}$  με το  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ , όπως φαίνεται και από το διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.10, όπου:

$\frac{I}{V}$  είναι η στιγμιαία αγωγιμότητα (instantaneous conductance) και  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  η αυξητική αγωγιμότητα (incremental conductance).

Το  $V_{ref}$  που εμφανίζεται στο παρακάτω Σχήμα 3.10 αποτελεί την τάση αναφοράς στην οποία θα λειτουργήσει η φωτοβολταϊκή (PV) γεννήτρια. Τη στιγμή που επιτυγχάνεται το Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP), το  $V_{ref}$  πρέπει να είναι ισοδύναμο με το  $V_{MPP}$ . Μόλις αυτή η συνθήκη ικανοποιείται, η λειτουργία διατηρείται στο MPP μέχρι να συμβαίνει αλλαγή στο  $\Delta I$  ή αλλαγή στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ο αλγόριθμος IC διαρκώς προσαρμόζει το  $V_{ref}$  είτε αυξάνοντάς το είτε μειώνοντάς το, προκειμένου να διατηρήσει το νέο MPP.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει οφέλη έναντι της μεθόδου P&O, καθώς είναι ικανή να αντιδρά γρήγορα στις απρόβλεπτες αλλαγές των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Επιπλέον, αυτή η τεχνική προσδιορίζει πότε έχει φτάσει στο MPP, ενώ η τεχνική P&O τείνει να ταλαντώνεται γύρω από το ίδιο σημείο. Βέβαια, ένα μειονέκτημα που παρατηρείται στον IC αλγόριθμο αφορά την πολυπλοκότητα της εφαρμογής του. Ο αναγκαστικά εκτενής υπολογιστικός χρόνος και η απαίτηση για σχετικά περισσότερο "hardware" υλικό, καθιστά τον αλγόριθμο ιδανικό για PV συστήματα μεγάλης κλίμακας, όπου η απόδοση ανταμείβει την απαιτητική φύση της διαδικασίας.





Σχήμα 3.10: Διάγραμμα ροής του IC αλγορίθμου

Υπάρχουν βέβαια και άλλοι μέθοδοι εύρεσης του MPPT, όπως: ο αλγόριθμος σύγκρισης βάρους τριών σημείων, ο αλγόριθμος σταθερής τάσης (CV), η τεχνική ανοιχτής τάσης κυκλώματος και η μέθοδος θερμοκρασίας. Αυτές οι τεχνικές εφαρμόζονται εύκολα και έχουν υιοθετηθεί ευρέως για εφαρμογές χαμηλού κόστους, ενώ αλγόριθμοι όπως η ασαφής λογική και η λειτουργία ολίσθησης είναι πιο περίπλοκοι και χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά.

## Κεφάλαιο 4

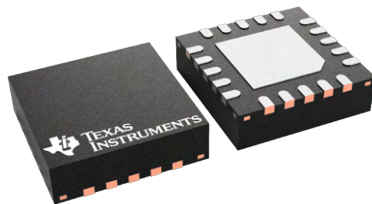
# Πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση του κυκλώματος συλλογής φωτεινής ακτινοβολίας

### 4.1 Περιγραφή εργαλείων και κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική επίτευξη της εξαγωγής μέγιστης απόδοσης ισχύος από φωτοβολταϊκές πηγές και για την ανάλυση αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας περιλαμβάνουν:

- **Το ολοκληρωμένο bq25505:**

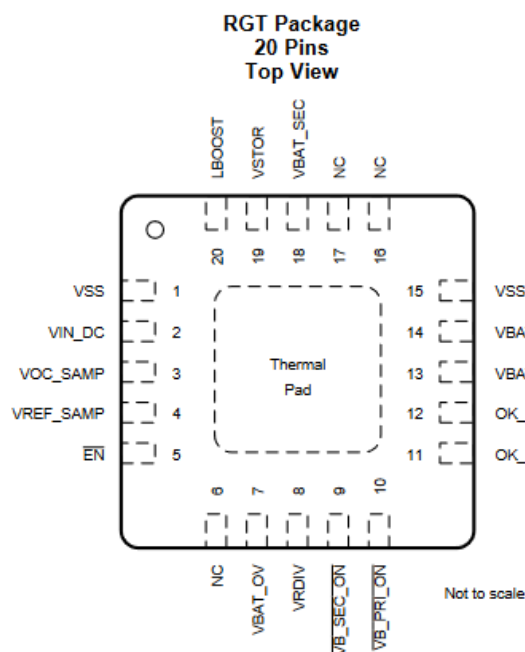
Το bq25505, σχεδιασμένο από την εταιρία TEXAS INSTRUMENTS [18], είναι το πρώτο από μια νέα οικογένεια έξυπνης ολοκληρωμένης διαχείρισης Nano-Power και ορίζεται ως ένας εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης διαχειριστής ενέργειας, σχεδιασμένος ειδικά για να αποκτά και να διαχειρίζεται αποτελεσματικά από μικροβάτ ( $\mu\text{W}$ ) έως μίλιβατ ( $\text{mW}$ ) ισχύος σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως τα ηλιακά πάνελ. Ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά του που το καθιστούν ιδανικό για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η συνεχής συγκομιδή ενέργειας από πηγές με πολύ χαμηλή τάση, όπως αυτές που κυμαίνονται στις τάξεις των  $100\text{mV}$ , καθώς και η αποθήκευση ενέργειας, η φόρτιση, η προστασία και ο συνδυασμός μπαταριών και ο ενσωματωμένος μηχανισμός παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).



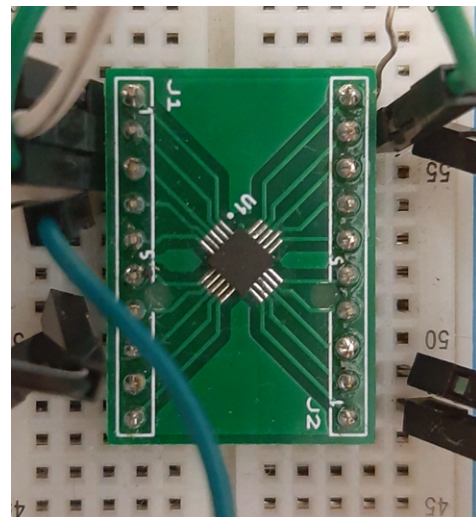
Σχήμα 4.1: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα bq25505

Ορισμένες από τις βασικές λειτουργίες του bq25505 περιλαμβάνουν:

- **Αυτόνομη Εκμετάλλευση Ενέργειας (Energy Harvesting):** Το bq25505 μπορεί να εξάγει ενέργεια από εναλλακτικές πηγές όπως ηλιακοί συλλέκτες ή από πηγές θερμότητας και να την μετατρέπει σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.
- **Φόρτιση Αποθηκευτικού Στοιχείου (Energy Storage):** Το bq25505 διαθέτει έναν ενσωματωμένο φορτιστή για τη φόρτιση ενός αποθηκευτικού στοιχείου, όπως ένα χημικό στοιχείο (π.χ. μπαταρία), με σκοπό την αποθήκευση της αντλούμενης ενέργειας.
- **Παρακολούθηση Ενέργειας (Energy Monitoring):** Παρέχει δυνατότητες παρακολούθησης της ενέργειας εισόδου και εξόδου, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του συστήματος.
- **Προστασία Μπαταρίας (Battery Protection):** Περιλαμβάνει λειτουργίες προστασίας για τη μπαταρία, όπως προστασία υπερφόρτισης και υπερεκφόρτισης.
- **Οδηγοί Πυλών:** Διαδοχική επιλογή για πρωταρχικά (μη-επαναφορτιζόμενα) και δευτερεύοντα (επαναφορτιζόμενα) στοιχεία αποθήκευσης.
- **Εξοικονόμηση Ενέργειας:** Ενσωματώνει μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική χρήση της ενέργειας που εξάγεται.



(α) λίστα ακροδεκτών



(β) σε πρωτότυπη πλακέτα για το στάδιο ανάπτυξης

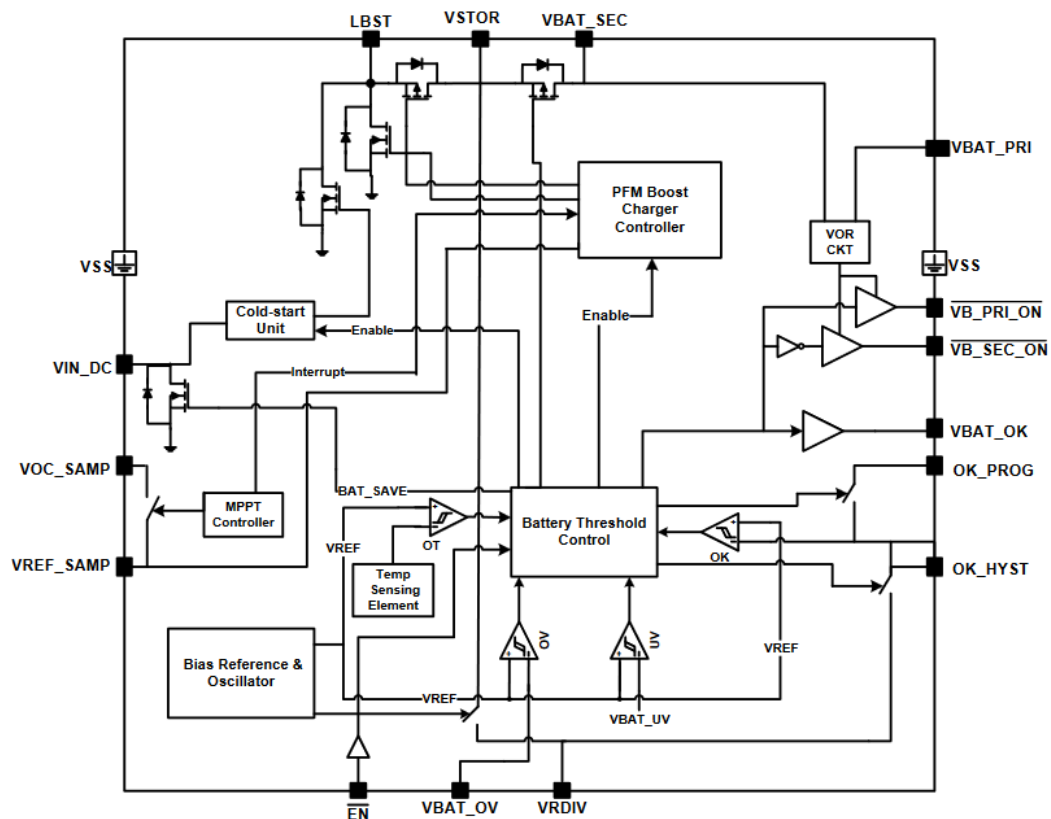
Σχήμα 4.2: Κάτοψη ολοκληρωμένου

Το ενεργειακό κύκλωμα bq25505 παρουσιάζει έναν αριθμό ακροδεκτών (pins), ο καθένας εκ των οποίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της συ-

σκευής. Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρέχονται στο datasheet [20], οι σημαντικότεροι ακροδέκτες κατά τη λειτουργία του ολοκληρωμένου εμφανίζονται στον επόμενο Πίνακα 4.1.

NO	PIN	I/O	DESCRIPTION
	NAME		
1	VSS	Input	General ground connection for the device
2	VIN_DC	Input	DC voltage input from energy harvesters
3	VOC_SAMP	Input	Sampling pin for MPPT network
4	VREF_SAMP	Input	Voltage storage to which VIN_DC will be regulated. This voltage is provided by the MPPT sample circuit
7	VBAT_OV		Setting the VSTOR = VBAT_SEC overvoltage threshold
8	VRDIV	Output	Connect high side of resistor divider networks to this biasing voltage
11	OK_HYST	Input	Setting the VBAT_OK hysteresis threshold
12	OK_PROG	Input	Setting the VBAT_OK threshold
18	VBAT_SEC	I/O	Connect a secondary (rechargeable) storage element
19	VSTOR	Output	Connection for the output of the boost charger, which is typically connected to the system load.
20	LBOOST	Input	Inductor connection for the boost charger switching node

Πίνακας 4.1: Πίνακας περιγραφής βασικών ακροδεκτών σε solar harvesting εφαρμογή



Σχήμα 4.3: Λειτουργικό διάγραμμα υψηλού επιπέδου

Το bq25505 παρουσιάζει τέσσερις λειτουργικές καταστάσεις, περιλαμβανομένου την απενεργοποίηση και ενεργοποίηση του κύριου φορτιστή ενίσχυσης (main boost charger), τη λειτουργία ψυχρής εκκίνησης (cold start), καθώς και τη θερμική απενεργοποίηση (thermal shut down). Το Σχήμα 4.2 αποτυπώνει το λειτουργικό διάγραμμα υψηλού επιπέδου, επισημαίνοντας τα κύρια λειτουργικά μπλοκ του bq25505. Το κύκλωμα ψυχρής εκκίνησης τροφοδοτείται από το VIN\_DC, ενώ το κύκλωμα του κύριου φορτιστή τροφοδοσιάζει ενέργεια από το VSTOR. Αντίστοιχα, το στάδιο τροφοδοσιάζει τροφοδοτείται από τη τάση VIN\_DC. Στη συνέχεια, παρέχονται λεπτομέρειες για συγκεκριμένες λειτουργίες για περαιτέρω κατανόηση.

Πιο συγκεκριμένα, το bq25505 παρέχει δυνατότητα χρήσης τόσο πρωτογενών (μη επαναφορτιζόμενων) όσο και δευτερευουσών (επαναφορτιζόμενων) μπαταριών, εξασφαλίζοντας έτσι ευελιξία στην επιλογή του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας. Σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, το bq25505 εξάγει ενέργεια από την εξωτερική πηγή και την αποθηκεύει σε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, που βρίσκεται συνδεδεμένη στο pin 18 - VBAT\_SEC, για μελλοντική χρήση. Στην περίπτωση όπου η δευτερογενή μπαταρία δεν μπορεί να παρέχει αρκετή ενέργεια στο φορτίο του συστήματος ή υπερφορτιστεί πάνω από ένα καθορισμένο όριο, οι οδηγοί πυλών μεταξύ του pin 18 και του pin 14 - VBAT\_PRI, όπου βρίσκεται συνδεδεμένη η πρωτογενή μπαταρία, επιτρέπουν την αυτόνομη εναλλαγή μεταξύ των δύο στοιχείων αποθήκευσης με σκοπό την παροχή ισχύος στο φορτίο εξόδου του συστήματος.

**Battery Undervoltage Protection:** Για να αποτραπεί η βαθιά εκφόρτιση και η ζημιά σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, το κύκλωμα έχει εσωτερικά ένα ορισμένο κατώτατο όριο τάσης (VBAT\_UV - VBAT\_UnderVoltage) και μια εσωτερική τάση υστέρησης (VBAT\_UV\_HYST)<sup>1</sup>. Η τάση υποκατωφλίου VBAT\_UV, όταν η μπαταρία εκφορτίζεται, ορίζεται εσωτερικά στα 1.95V. Για να λειτουργήσει σωστά η τάση VBAT\_UV, ένας πυκνωτής πρέπει να συνδεθεί στον ακροδέκτη 19 - VSTOR, ενώ το αποθηκευτικό στοιχείο πρέπει να συνδεθεί στον ακροδέκτη 18 - VBAT\_SEC. Αφού η τάση στον ακροδέκτη VSTOR υπερβεί το κατώτατο όριο VBAT\_UV + VBAT\_UV\_HYST, οι ακροδέκτες VSTOR και VBAT\_SEC συνδέονται αποτελεσματικά μέσω ενός εσωτερικού διακόπτη PMOS FET (Σχήμα 4.3) και η μπαταρία φορτίζεται μέσω του πυκνωτή στον ακροδέκτη VSTOR. Ο διακόπτης παραμένει κλειστός μέχρι η τάση στον ακροδέκτη VSTOR πέσει κάτω από το κατώτατο όριο VBAT\_UV και η μπαταρία σταματάει την φόρτιση. Το κατώτατο όριο VBAT\_UV θα πρέπει να θεωρείται ως ασφαλές όριο για το σύστημα.

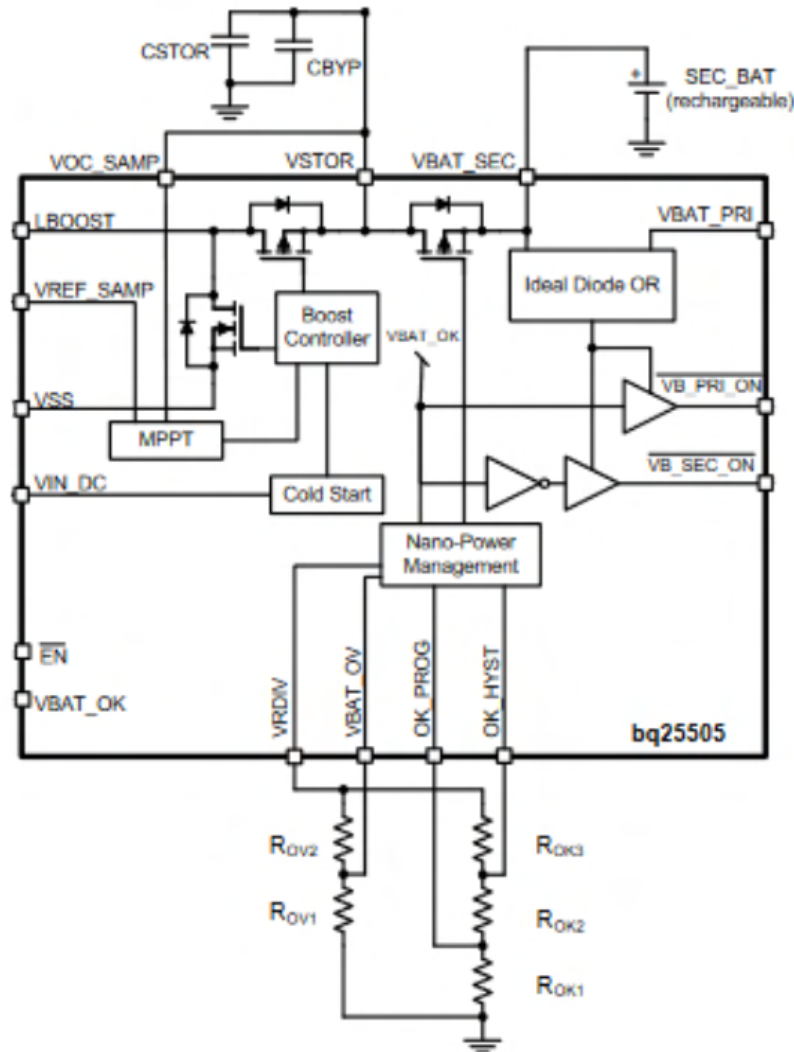
**Battery Overvoltage Protection:** Για να αποτραπεί η έκθεση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών σε υπερβολικές τάσεις φόρτισης, το κατώτατο όριο υπερτάσης (VBAT\_OV - VBAT\_OverVoltage) πρέπει να οριστεί χρησιμοποιώντας εξωτερικές αντιστάσεις. Η τιμή κατωφλίου VBAT\_OV, όταν η τάση της μπαταρίας αυξάνεται, δίνεται από την Εξίσωση 4.1.

---

<sup>1</sup> Η τάση υστέρησης προσθέτει ένα περιθώριο ασφαλείας στην ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός συστήματος, επιτρέποντας μια μικρή αλλαγή στην είσοδο χωρίς να προκαλεί αμέσως μια αντίδραση στην έξοδο. Αυτό είναι χρήσιμο για την αποφυγή ασταθών καταστάσεων και περιοδικών αλλαγών κατά την είσοδο.

$$VBAT\_OV = \frac{3}{2} VBIAS \cdot \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}}\right) \quad (4.1)$$

Αφού φτάσει η τάση στην μπαταρία το κατώφλι VBAT\_OV, ο μετατροπέας ενίσχυσης απενεργοποιείται και ο φορτιστής θα ξεκινήσει ξανά όταν η τάση της μπαταρίας πέσει κατά VBAT\_OV\_HYST. Επομένως, όταν υπάρχει υπερβολική είσοδος ενέργειας, η τάση στον ακροδέκτη VBAT\_SEC θα κυμαίνεται μεταξύ των επιπέδων VBAT\_OV και VBAT\_OV - VBAT\_OV\_HYST.



Σχήμα 4.4: Κύκλωμα κλασσικής εφαρμογής

**Maximum Power Point Tracking:** Σε συνέχεια, ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του bq25505 είναι ο ενσωματωμένος μηχανισμός παρακολούθησης του MPPT. Η παρακολούθηση του MPPT εφαρμόζεται προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ισχύς που εξάγεται από πηγές συγκομιδής ενέργειας, όπως τα ηλιακά ή θερμοηλεκτρικά συστήματα. Στην περίπτωση αυτή, ο ρυθμιστής ισχύος λειτουργεί με έναν μετατροπέα ενίσχυσης, ο οποίος ρυθμίζει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου του κυρίου φορτιστή (charger), προσαρμόζοντας έτσι την τάση στην είσοδο.

Το κύκλωμα MPPT λαμβάνει δείγματα της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{OC}$ ) της πηγής ενέργειας ανά τακτά διαστήματα (κάθε 16 s), απενεργοποιώντας την περιοδικά για μικρά χρονικά διαστήματα (256 ms). Η σύνδεση του κυκλώματος MPPT με την πηγή ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω εξωτερικών αντιστάσεων  $R_{OC1}$  και  $R_{OC2}$ , οι οποίες συνδέονται με τον πυκνωτή στο pin 4 - VREF\_SAMP. Αυτές οι αντιστάσεις επηρεάζουν το σημείο ρύθμισης MPPT, προσαρμόζοντας τη σύνθετη αντίσταση της πηγής εισόδου και κατά επέκταση δημιουργώντας ένα κλάσμα τάσης αναφοράς της  $V_{OC}$ , την VREF\_SAMP. Η τάση VIN\_DC ρυθμίζεται πλέον βάσει αυτής της νέας τάσης.

Για solar harvesting εφαρμογές, το MPPT προσαρμόζεται συνήθως στο 80% της  $V_{OC}$ , ενώ για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές, η ρύθμιση είναι περίπου στο 50% της  $V_{OC}$ . Αυτή η προσαρμογή είναι αναγκαία για να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, βελτιστοποιώντας έτσι την απόδοση της πηγής ενέργειας.

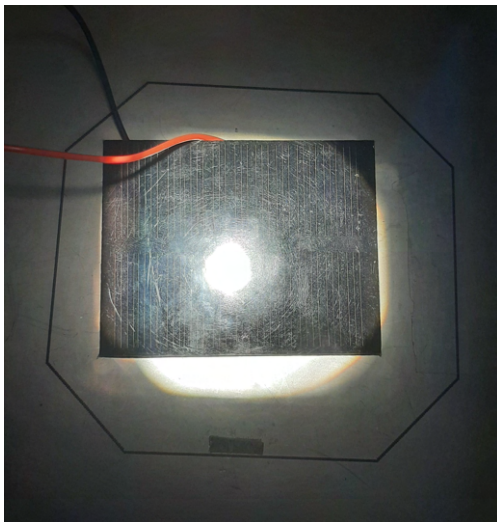
Η τάση αναφοράς βρίσκεται εύκολα από την επόμενη Εξίσωση 4.2.

$$VREF\_SAMP = VIN\_DC(OpenCircuit) \cdot \frac{R_{OC1}}{R_{OC1} + R_{OC2}} \quad (4.2)$$

Στην παρούσα solar harvesting εφαρμογή δεν χρειάζονται επιπλέον αντιστάσεις  $R_{OC1}$  και  $R_{OC2}$ , καθώς το pin 3 - VOC\_SAMP μπορεί να συνδεθεί με το pin 19 - VSTOR για να προσαρμοστεί απευθείας το MPPT στο 80% της  $V_{OC}$ .

- **Φωτοβολταϊκά στοιχεία:**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είναι τα επόμενα.



(α)



(β)

Σχήμα 4.5: Φωτοβολταϊκά στοιχεία ακτινοβολούμενα με lux max



Η επιλογή πάνελ διαφορετικών μεγεθών στο πλαίσιο ενός συστήματος συγκομιδής ενέργειας συμβάλλει στη βέλτιστη αξιοποίηση του φωτισμού, διασφαλίζοντας την μέγιστη δυνατή εξαγωγή παραγόμενης ενέργειας, ιδίως όταν υπάρχουν παρόμοιες συνθήκες φωτισμού.

Πιο συγκεκριμένα, σε κατάσταση μέγιστης φωτεινότητας (125200 lux) τα πάνελ δίνουν τάση και ένταση ανοιχτού κυκλώματος (Open Circuit) με βάση τον επόμενο Πίνακα 4.2.

	Τάση $V_{OC}$ (V)	Ένταση $I_{OC}$ (mA)	Ονομαστική Ισχύς (mW)
<b>Πάνελ Μικρό (α')</b>	6,54	22,97	150,305
<b>Πάνελ Μεγάλο (β')</b>	2,98	37,11	110,725

Πίνακας 4.2: Τιμές τάσης, έντασης και ονομαστική ισχύς ανοιχτού κυκλώματος

Όπως γίνεται αντιληπτό, το μικρότερο πάνελ (α') είναι μεγαλύτερης ρευματικής ικανότητας. Η μεγάλη ρευματική ικανότητα είναι σημαντική για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός ηλιακού συστήματος, καθώς δείχνει πόσο αποτελεσματικά το πάνελ μπορεί να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, όταν αυτό λειτουργεί με λογική step down, δηλαδή είναι υψηλότερης τάσης από αυτή της μπαταρίας που προσπαθούν να φορτίσουν.

#### • **Luxmeter - Λουξόμετρο UT383:**

Το λουξόμετρο είναι ένα όργανο μέτρησης που χρησιμοποιείται για να μετρήσει τη φωτεινότητα σε έναν χώρο. Η μονάδα μέτρησης της φωτεινότητας είναι το λουξ (lux), και αντιπροσωπεύει το φως που πέφτει σε ένα τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας.

Το λουξόμετρο που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος είναι το παρακάτω (Σχήμα 4.5), ενώ οι πειραματικές τιμές που μετρήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.6: Λουξόμετρο UT383

Στον επόμενο Πίνακα 4.4 παρατίθενται μερικά φυσικά παραδείγματα φωτεινότητας [19].

Η ένταση του φωτός μεταβλήθηκε με τη συμβολή της παρακάτω συσκευής, Σχήμα 4.6.



	lux
<b>Μέγιστη Φωτεινότητα</b>	125200
<b>Ελάχιστη Φωτεινότητα</b>	337

Πίνακας 4.3: Πειραματικές τιμές lux

Φωτεινότητα	Παραδείγματα
100 lux	Πολύ σκοτεινή συνεφιασμένη μέρα
320 – 500 lux	Φωτισμός γραφείου
1000 lux	Μερικώς νεφελώδης ημέρα
32000 – 130000 lux	Άμεσο ηλιακό φως

Πίνακας 4.4: Παραδείγματα φωτεινότητας



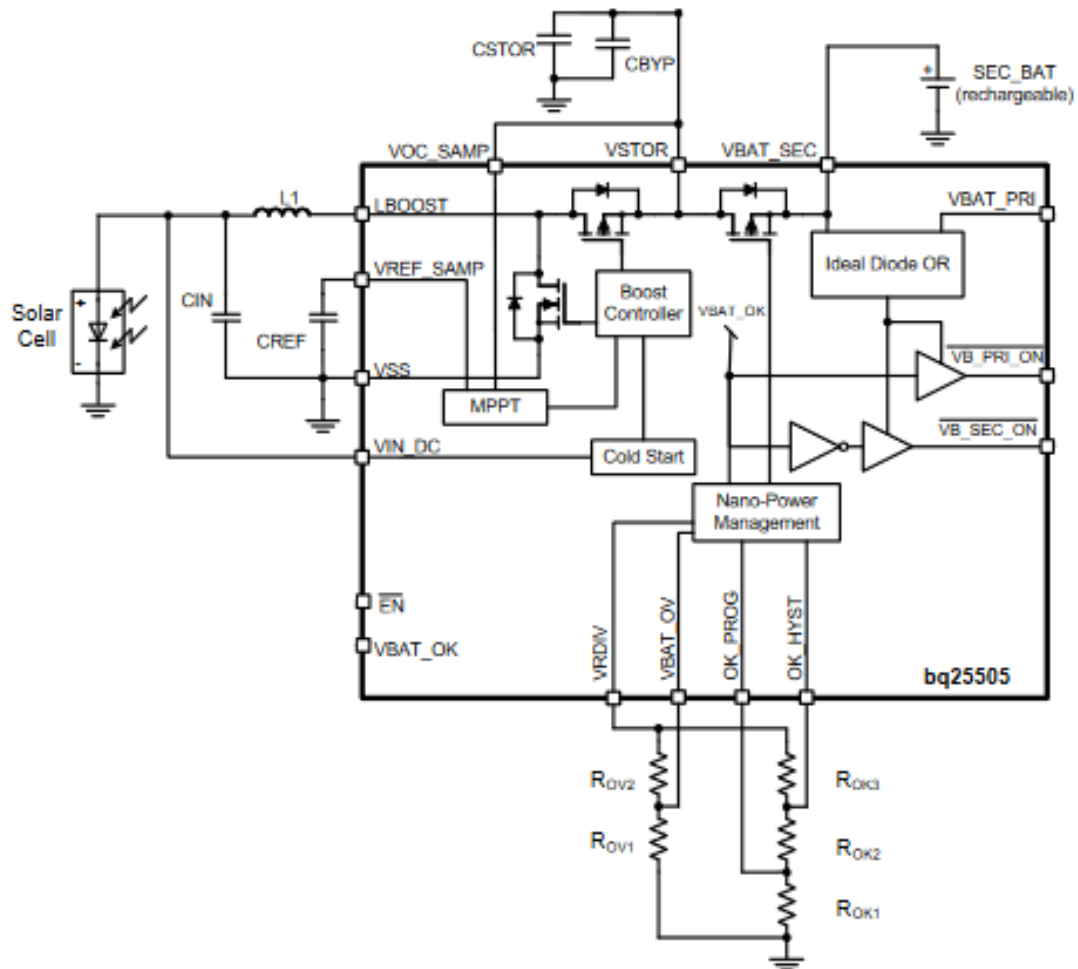
Σχήμα 4.7: Συσκευή μεταβολής της έντασης του φωτός

#### • **Solar Harvesting κύκλωμα :**

Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της εξαγωγής ηλιακής ενέργειας προέκυψε από το datasheet [20], υποστηριζόμενο από ορισμένες τροποποιήσεις, με σκοπό την επίτευξη ενός πιο κατανοητού περιγραφικού πλαισίου της βασικής λειτουργίας του, όπως φαίνεται και στο επόμενο Σχήμα 4.8.

Το κύκλωμα κατασκευάστηκε αρχικά στο ράστερ. Οι τιμές των παθητικών στοιχείων<sup>2</sup> παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 4.5. Στον ακροδέκτη 18 - VBAT\_SEC συνδέεται αρχικά ένα φορτίο εξόδου (αντίσταση) και έπειτα μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, με σκοπό αφενός την μέτρηση της απόδοσης ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος και αφετέρου τη δυνατότητα φόρτισης ενός στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας σε εργαστηριακές συνθήκες.

<sup>2</sup>Παθητικά στοιχεία ονομάζονται στην ηλεκτρονική εκείνα τα εξαρτήματα που καταναλώνουν (αλλά δεν παράγουν) ενέργεια, όπως είναι η αντίσταση, το πηνίο, ο πυκνωτής και η διόδος.



Σχήμα 4.8: Κύκλωμα κλασικής εφαρμογής συλλογής ηλιακής ενέργειας με δευτερεύουσα μπαταρία

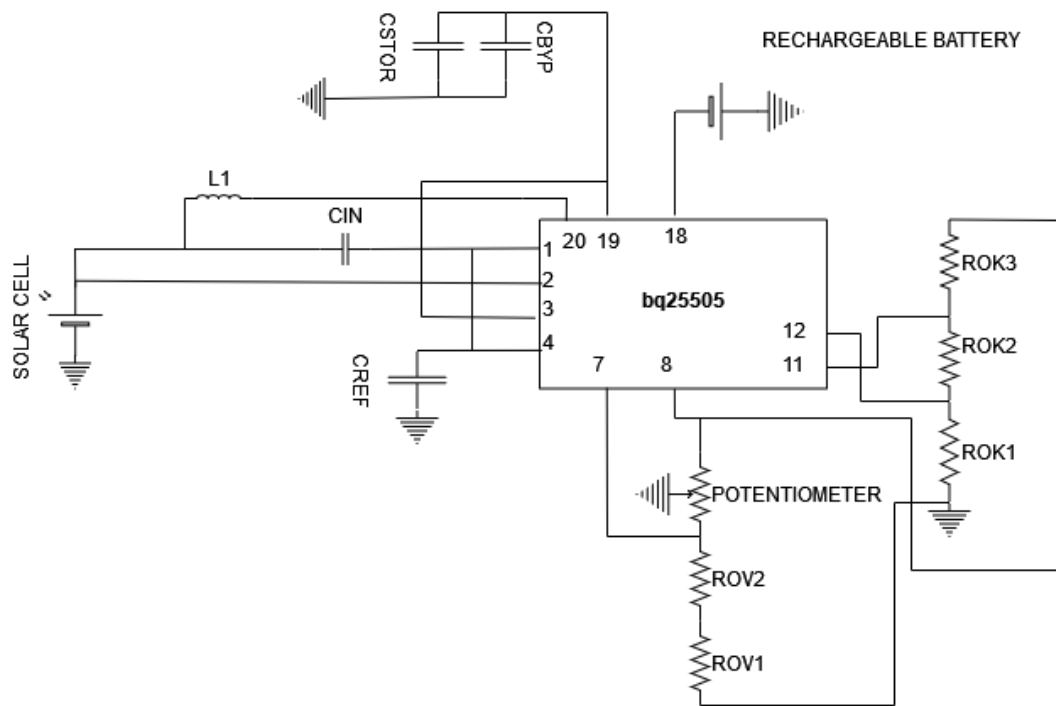
$R_{OK1}$	$R_{OK2}$	$R_{OK3}$	$L1$	$CREF$	$CBYP$
$5.6M\Omega$	$5.6M\Omega$	$1.8M\Omega$	$22\mu H$	$10nF$	$10nF$
$CSTOR$	$CIN$	$R_{OV1}$	$R_{OV2}$	<i>Potentiometer</i>	
$4.7\mu F$	$4.7\mu F$	$5.6M\Omega$	$6.8M\Omega$	$0.51M\Omega$	

Πίνακας 4.5: Πίνακας παθητικών στοιχείων

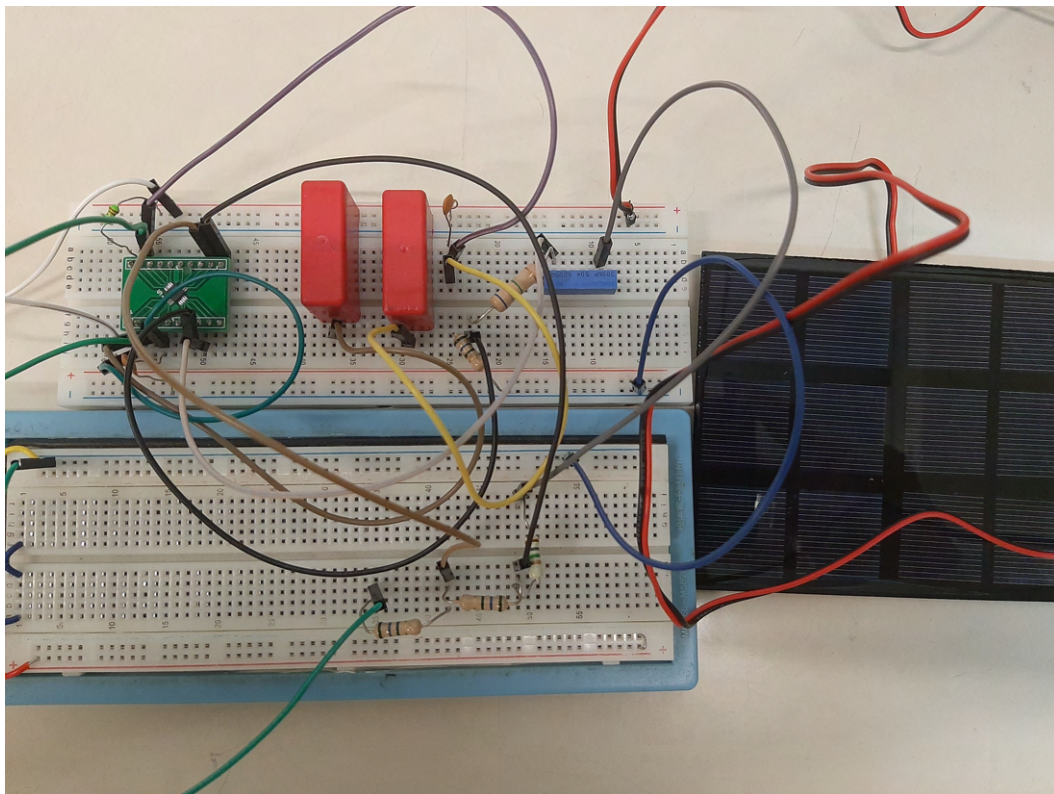
Οι τιμές των παθητικών στοιχείων δεν είναι ακριβώς ίδιες με αυτές που προτείνει ο κατασκευαστής, αλλά δεν επηρεάζουν τις παραμέτρους που τίθενται για ανάλυση στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το κύκλωμα κατασκευάστηκε με κύριο οδηγό το επόμενο σχεδιάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

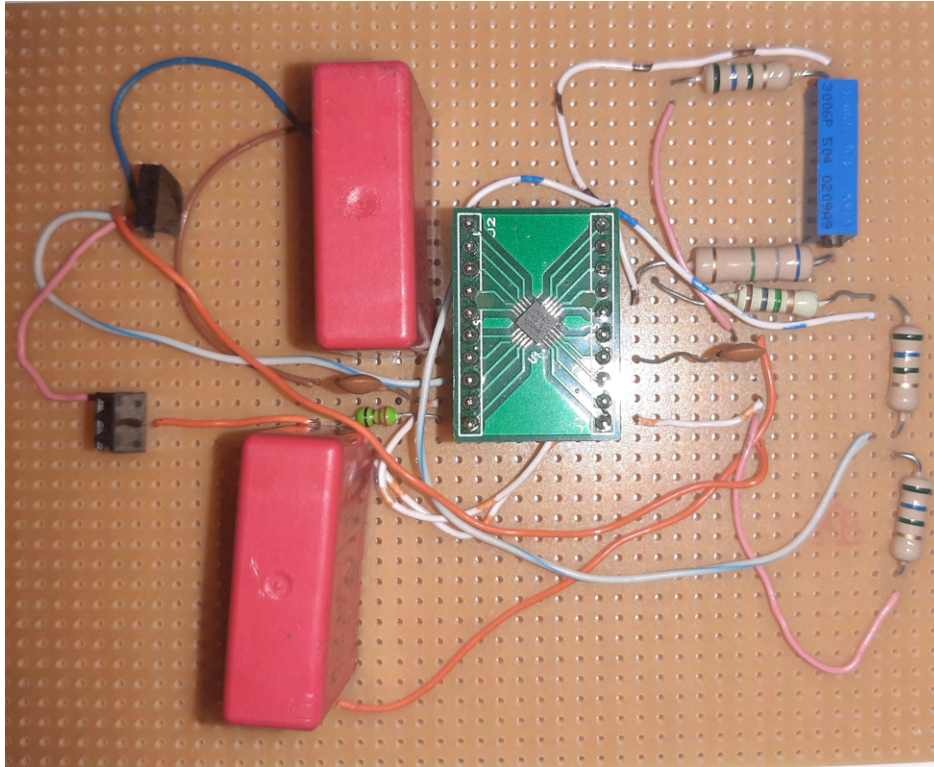
Το κύκλωμα κατασκευασμένο στο ράστερ φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.10, ενώ στο Σχήμα 4.11 το κύκλωμα παρουσιάζεται το κύκλωμα τοποθετημένο σε μια διάτρητη πλακέτα.



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση κυκλώματος solar harvesting



Σχήμα 4.10: Κύκλωμα στο ράστερ



Σχήμα 4.11: Κύκλωμα σε διάτρητη

## 4.2 Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα

### 4.2.1 Έλεγχος ακρίβειας και αντοχής του κυκλώματος

Αρχικά, προκειμένου να διασφαλίσουμε την ομαλή και ορθή λειτουργία του συστήματος harvesting, προβαίνουμε στην παρακολούθηση των τιμών των τάσεων σε διάφορα σημεία του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπόψη κάθε πάνελ ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιούμε μετρήσεις που αποσκοπούν στον έλεγχο της ακρίβειας και της αντοχής του συστήματος σε σχέση με τις ιδανικές του προδιαγραφές.

- **Πάνελ Μικρό (α'):**

Σε συνθήκες μέγιστης φωτεινότητας (lux max) οι τιμές τάσεις που λήφθηκαν αναγράφονται στον επόμενο Πίνακα 4.6.

Πάνελ Μικρό (α')			
Pin	Όνομα	Τάση (V)	Κατάσταση
2	VIN_DC	6,329	δεκτή
7	VBAT_OV	4,81	δεκτή
14	VBAT_PRI	4,991	δεκτή
18	VBAT_SEC	5,817	δεκτή
19	VSTOR	5,936	δεκτή

Πίνακας 4.6: Μετρήσεις με μικρό πάνελ (α')

Οι σημαντικές προϋποθέσεις που συμβάλλουν στην αξιολόγηση των προηγούμενων τιμών δίνονται από το datasheet και ορίζονται ως εξής:

$$V_{STOR} > V_{BAT\_OV} \quad (4.3)$$

$$V_{IN\_DC} > V_{STOR} \quad (4.4)$$

$$V_{BAT\_OV} \leq 5.5V \quad (4.5)$$

$$2 \leq V_{BA\_PRI} \leq 5.5V \quad (4.6)$$

• **Πάνελ Μεγάλο (β'):**

Σε συνθήκες μέγιστης φωτεινότητας (lux max) οι τιμές τάσεις που λήφθηκαν αναγράφονται στον επόμενο Πίνακα 4.7.

<b>Πάνελ Μεγάλο (β')</b>			
<b>Pin</b>	<b>Όνομα</b>	<b>Τάση (V)</b>	<b>Κατάσταση</b>
2	VIN_DC	2,978	δεκτή
7	VBAT_OV	2,038	δεκτή
14	VBAT_PRI	2,08	δεκτή
18	VBAT_SEC	2,53	δεκτή
19	VSTOR	2,824	δεκτή

Πίνακας 4.7: Μετρήσεις με μεγάλο πάνελ (β')

Οι συνθήκες αξιολόγησης παραμένουν ίδιες.

Όπως μπορεί να αντιληφθεί κανείς, το μικρό πάνελ είναι μεγαλύτερης εμβέλειας φωτοβολταϊκό σε σχέση με το μεγάλο. Όταν αναφερόμαστε σε ένα πάνελ μεγάλης εμβέλειας, εννοούμε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ που έχει πολύ καλή ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η "εμβέλεια" εδώ αναφέρεται στην ικανότητα του πάνελ να παράγει ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή αναφέρεται στην ονομαστική ισχύς του. Με άλλα λόγια, ένα πάνελ μεγάλης εμβέλειας έχει κατ' επέκταση μεγάλη ονομαστική ισχύς.

Τα πάνελ μεγάλης εμβέλειας συνήθως διαθέτουν μεγαλύτερη επιφάνεια σε σύγκριση με τα μικρότερα πάνελ, αυτό όμως δεν συμβαίνει σε αυτή τη περίπτωση. Αντίθετα, σε αυτήν την περίπτωση, το μικρότερο πάνελ επιτυγχάνει τη συλλογή περισσότερου φωτός, καθώς φωτίζεται ολοκληρωτικά σε σύγκριση με το μεγαλύτερο και, ως εκ τούτου, διαχειρίζεται και παράγει μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας.

Έπειτα, καλούμαστε να υπολογίσουμε την ισχύ του κάθε πάνελ σε κατάσταση lux max. Τα πειραματικά δεδομένα τα λαμβάνουμε από τον προηγούμενο Πίνακα 4.2 και με την βοήθεια τις εξίσωσης 4.7 υπολογίζουμε τα εξής δεδομένα.

$$P_{pvcell} = V_{OC} \cdot I_{OC} \quad (4.7)$$

<b>Πάνελ</b>	<b>Ισχύς (mW)</b>
Μικρό (α')	150,305796
Μεγάλο (β')	110,7259076

Πίνακας 4.8: Τιμές ισχύος για τα δύο πάνελ

Η ισχύς που παράγεται από κάθε πάνελ αντιστοιχεί στην ισχύ εισόδου του συστήματος harvesting.

Για την πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση του κυκλώματος solar harvesting για την απόδοση ενέργειας σε φορτίο εξόδου (π.χ. επαναφορτιζόμενη μπαταρία), χρησιμοποιήσαμε διάφορες αντιστάσεις στην έξοδο Pin 18 - VBAT\_SEC.

Οι τιμές των αντιστάσεων είναι:

<b>Αντιστάσεις Rout</b>
100 Ω
680 Ω
1 kΩ
22 kΩ
100 kΩ
1 MΩ

Πίνακας 4.9: Τιμές αντιστάσεων εξόδου

Οι πίνακες των μετρήσεων είναι οι επόμενοι:

Να σημειωθεί πως για τον υπολογισμό της έντασης του ρεύματος  $I_{out}$  χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Ohm, Σχέση 4.8, ενώ για την ισχύ εξόδου  $P_{out}$ , η Σχέση 4.7 με μεταβλητές τα  $V_{out}$  και  $I_{out}$ .

$$R_{out} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \iff I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{out}} \quad (4.8)$$

<b>Μικρό Πάνελ με Ppvcell = 150,305 mW σε lux max</b>				
<b>Rout</b>	<b>Vout (V)</b>	<b>Iout (mA)</b>	<b>Pout (mW)</b>	<b>Απόδοση Ισχύος (%)</b>
100 Ω	2,16	21,64	46,82	31,15
680 Ω	5,21	7,66	39,91	26,55
1 kΩ	5,28	5,28	27,91	18,57
22 kΩ	5,46	0,25	1,35	0,9
100 kΩ	5,5	0,05	0,3	0,2
1 MΩ	5,6	0,005	0,031	0,02

Πίνακας 4.10

<b>Μικρό Πάνελ με Ppvcell = 0,3864 mW σε lux min</b>				
<b>Rout</b>	<b>Vout (V)</b>	<b>Iout (mA)</b>	<b>Pout (mW)</b>	<b>Απόδοση Ισχύος (%)</b>
100 Ω	0,02	0,19	0,003	0,97
680 Ω	0,31	0,45	0,14	36,5
1 kΩ	0,52	0,52	0,27	71,32
22 kΩ	2,45	0,11	0,27	70,38
100 kΩ	2,92	0,03	0,08	22,05
1 MΩ	3,19	0,003	0,01	2,63

Πίνακας 4.11

Για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας απόδοσης ισχύος χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 4.9.



<b>Μεγάλο Πάνελ με <math>P_{pvcell} = 110,7259076 \text{ mW}</math> σε lux max</b>				
<b>Rout</b>	<b>Vout (V)</b>	<b>Iout (mA)</b>	<b>Pout (mW)</b>	<b>Απόδοση Ισχύος (%)</b>
100 Ω	1,75	17,5	30,62	27,65
680 Ω	2,06	3,02	6,23	5,62
1 kΩ	2,1	2,1	4,44	4,01
22 kΩ	2,27	0,1	0,23	0,21
100 kΩ	2,35	0,02	0,055	0,05
1 MΩ	2,47	0,002	0,006	0,005

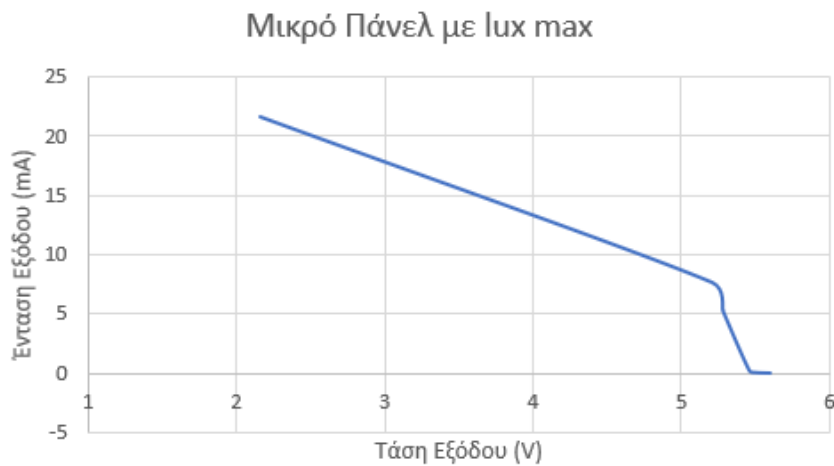
Πίνακας 4.12

<b>Μεγάλο Πάνελ με <math>P_{pvcell} = 0,56729 \text{ mW}</math> σε lux min</b>				
<b>Rout</b>	<b>Vout (V)</b>	<b>Iout (mA)</b>	<b>Pout (mW)</b>	<b>Απόδοση Ισχύος (%)</b>
100 Ω	0,03	0,36	0,01	2,34
680 Ω	0,21	0,31	0,06	11,53
1 kΩ	0,27	0,27	0,07	13,62
22 kΩ	0,79	0,03	0,02	4,98
100 kΩ	0,91	0,009	0,008	1,45
1 MΩ	1,05	0,001	0,001	0,19

Πίνακας 4.13

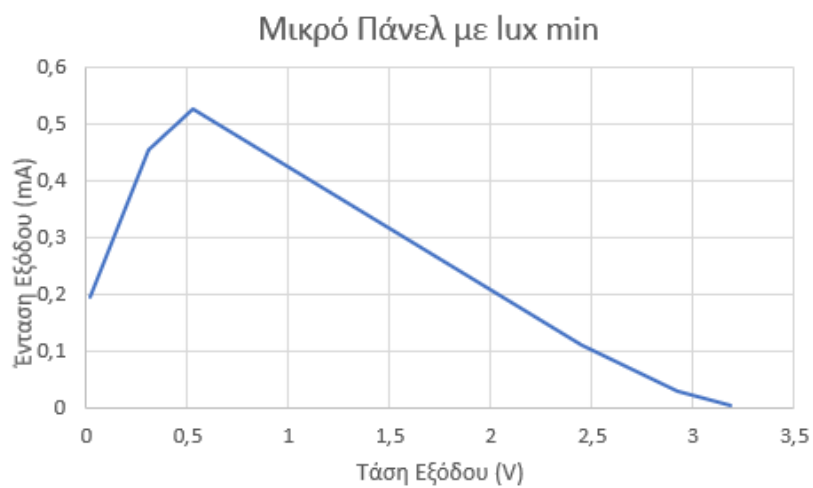
$$^3AI = \frac{P_{out}}{P_{pvcell}} \cdot 100 \quad (4.9)$$

Επιπλέον, σχεδιάσαμε στο Excel την μεταβολή της έντασης ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου για την κάθε διαφορετική περίπτωση.

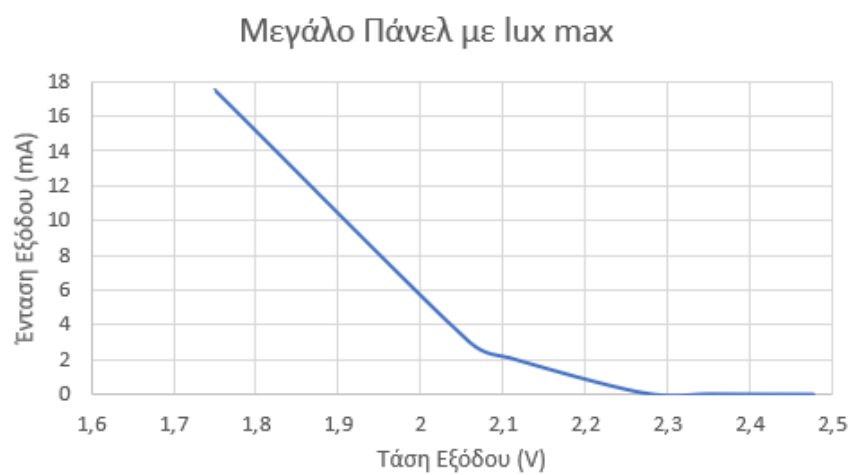


Σχήμα 4.12

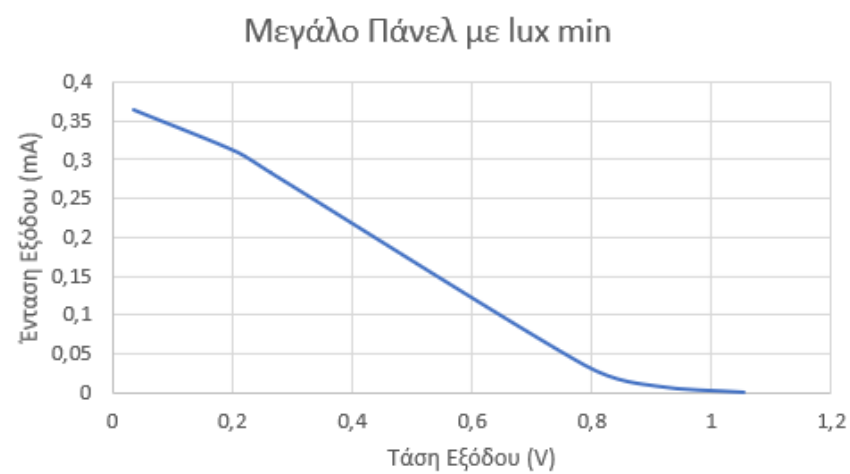
<sup>3</sup>AI αντιστοιχεί για Απόδοση Ισχύος



Σχήμα 4.13



Σχήμα 4.14



Σχήμα 4.15



Από τα Σχήματα 4.12 και 4.14 μπορούμε να λάβουμε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την αντοχή του συστήματος στην περίπτωση σύνδεσης του μικρού και μεγάλου πάνελ αντίστοιχα.

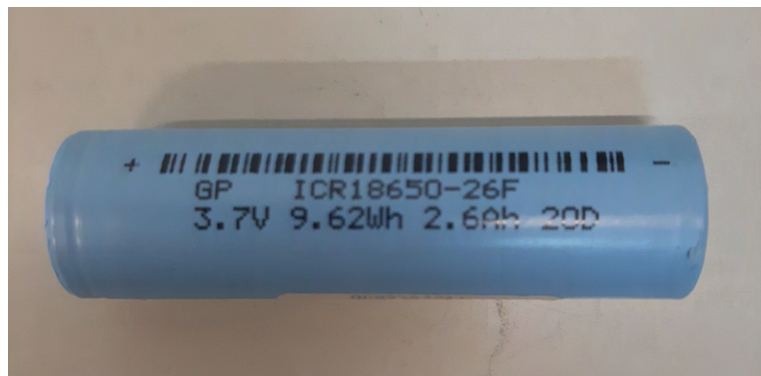
Στην περίπτωση του μικρού πάνελ με lux max βλέπουμε την έντονη κάμψη της χαρακτηριστικής για φορτίο εξόδου  $22k\Omega$  με ένταση  $250\mu A$ . Η έντονη μετάβαση οφείλεται στο γεγονός ότι η διαθέσιμη ισχύς του συστήματος αρχίζει να γίνεται μικρή και συγκρίσιμη με τη μέση τιμή κατανάλωσης του ολοκληρωμένου, οπότε και “ζορίζεται” περισσότερο να αποδώσει ενέργεια στην έξοδό του (μείωση της συνολικής απόδοσης ισχύος). Όσο αυξάνεται το φορτίο παρατηρείται και περαιτέρω μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Παρόμοια και στο μεγάλο πάνελ με ίδιο lux, η τιμή στην οποία το σύστημα λυγίζει είναι για φορτίο εξόδου  $22k\Omega$  με ένταση  $100\mu A$ , όπου πλέον η παραγόμενη ενέργεια οριακά επαρκεί για την ορθή λειτουργία του ολοκληρωμένου και το σύστημα σταματά να αποδίδει με βέλτιστο τρόπο.

Η κατανάλωση του ολοκληρωμένου και στις δύο περιπτώσεις είναι συγκρίσιμη με αυτή που παράγει το σύστημα για φορτίο εξόδου  $1M\Omega$ , βάσει τις προδιαγραφές του κυκλώματος.

#### 4.2.2 Πειραματική αξιολόγηση φόρτισης μπαταρίας

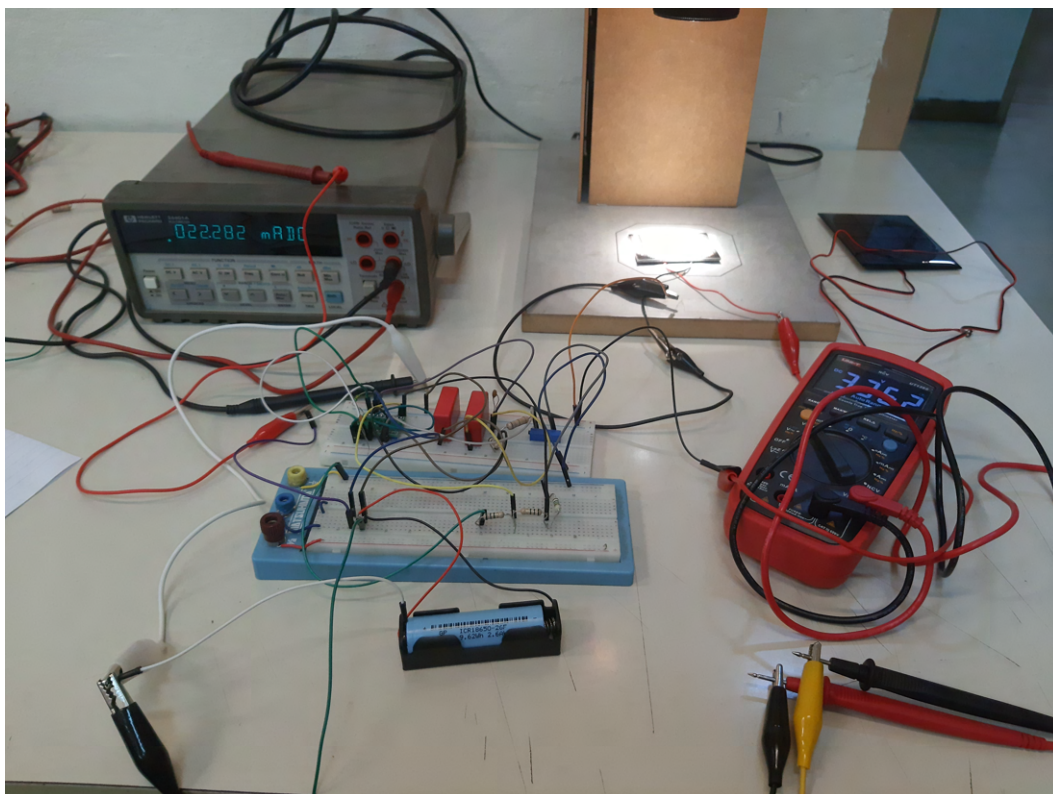
Σε δεύτερη φάση αξιολόγησης του συστήματος harvesting, συνδέεται στο κύκλωμα μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Σχήμα 4.16) ως φορτίο εξόδου, όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.16: Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία 3.7V και 2.6Ah

Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-Ion) διαστάσεων  $18.3 \times 65.4mm$ , με τάση λειτουργίας 3.7V και χωρητικότητα  $2550mAh$ , ενώ επίσης μπορεί να διαχειριστεί μέχρι 5.2A ρεύματος. Η μπαταρία συνδέθηκε μερικώς φορτισμένη στο κύκλωμα με σκοπό την φόρτιση της από το σύστημα.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειώσουμε πως η μπαταρία φορτίζεται μέσω της σύνδεσης του κυκλώματος με το μικρό πάνελ (α') ( $V_{OC} \approx 6.5V$ ), καθώς το μεγάλο πάνελ (β') δεν έχει επαρκή τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{OC} \approx 3V$ ) για την αποτελεσματική εναπόθεση ποσών ενέργειας στην μπαταρία. Αυτό αποτελεί και μια επιπλέον παράμετρο του κυκλώματος.



Σχήμα 4.17: Το κύκλωμα με συνδεδεμένη την επαναφορτιζόμενη μπαταρία

Το κύκλωμα με συνδεδεμένο το μικρό πάνελ (α') είναι της λογικής "step down". Τα κυκλώματα αυτής της λογικής χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η τάση πρέπει να μειωθεί από ένα υψηλότερο επίπεδο σε ένα χαμηλότερο, όπως σε περιπτώσεις τροφοδοσίας τάσης για ηλεκτρονικές συσκευές, όταν η τάση που απαιτείται είναι χαμηλότερη από τη διαθέσιμη τάση πηγής. Ο τύπος αυτού του κυκλώματος είναι αντίθετος με το "step up" που αυξάνει την τάση. Κατά τη λειτουργία του, το κύκλωμα step down μειώνει την τάση εισόδου σε μια επιλεγμένη τάση εξόδου [21]. Στην προκειμένη περίπτωση, η αρχή τιμή τάσης εισόδου  $V_{IN\_DC} = 6.329V$  μειώνεται σε  $V_{OUT} = 3.36V$  στα άκρα της μπαταρίας.

Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της μετρούμενης τάσης και έντασης εξόδου στην μπαταρία σε διάστημα  $1min$ .

Vout (V)	Iout (mA)
3,36	22,466
3,362	22,421
3,364	22,398
3,367	22,282
3,369	21,976

Πίνακας 4.14

Η τάση εξόδου αυξάνεται, άρα η μπαταρία φορτίζει.

Η καίρια ερώτηση που πρέπει να απαντηθεί σε αυτήν την περίπτωση είναι: Ποια είναι η απαιτούμενη διάρκεια σύνδεσης της μπαταρίας στο κύκλωμα harvesting προκειμένου

να επιτευχθεί πλήρης φόρτιση;

Η τιμή έντασης ρεύματος με την οποία κάνουμε harvesting είναι  $\approx 22mA$ . Η τιμή αυτή δείχνει το ρεύμα που το σύστημα μπορεί να συλλέξει ή να παράγει από την πηγή ενέργειας κατά τη διαδικασία harvesting. Αυτό το ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει την επαναφορτιζόμενη μπαταρία.

Εφόσον η μπαταρία μας έχει συνολική χωρητικότητα  $2550mAh$ , και τη θεωρούμε αρχικά αφόρτιστη, για την πλήρης φόρτιση υπό κατάσταση lux max θα χρειαστεί:

$$\frac{2550mAh}{22mA} = 115.9hr \text{ or } 4.83days \quad (4.10)$$

Το σύστημα harvesting διακρίνεται για την εξαιρετικά χαμηλή του κατανάλωση, η οποία είναι έως έξι τάξεις μεγέθους μικρότερη από την παραγόμενη ένταση. Αυτό καθιστά την εφαρμογή ανεξάρτητη και εξαιρετικά αποδοτική στη χρήση ενέργειας.

#### 4.2.3 Ενεργειακή συμπεριφορά τυπικού συστήματος WSN με χρήση συλλογής ενέργειας

Συνολικά, η αξιολόγηση του προαναφερόμενου συστήματος solar harvesting μπορεί να επιτευχθεί μέσω διάφορων υποθέσεων που στοχεύουν κυρίως στην αξιολόγηση της απόδοσής του σε τυπικούς κύκλους λειτουργίας<sup>4</sup>, καθώς και σε περιπτώσεις έκθεσής του σε πλήρη ή μερική φωταγώγηση, για τη μελλοντική χρήση του σε τυπικά σενάρια λειτουργίας σε δίκτυα αισθητήρων και μικροεπεξεργαστών.

Θεωρούμε ένα τυπικό σύστημα στα πλαίσια ενός δικτύου αισθητήρων που χαρακτηρίζεται από δύο βασικές καταστάσεις λειτουργίας, τη φυσιολογική λειτουργία του και τη λειτουργία του σε χαμηλή κατανάλωση. Έστω ότι ένα τέτοιο σύστημα παραμένει σε φυσιολογική λειτουργία για 1 λεπτό και καταναλώνει  $10mA$  μέσο ρεύμα λειτουργίας, και παραμένει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης για 9 λεπτά με μέσο ρεύμα  $1mA$ . Οι χρονικές διάρκειες και καταναλώσεις είναι καθαρά ενδεικτικές και παραμετροποιήσιμες στο εκάστοτε σύστημα. Έτσι έχουμε τα εξής:

$$\begin{aligned} 1min &\Rightarrow 10mA \\ 9min &\Rightarrow 1mA \end{aligned} \quad (4.11)$$

Άρα, η μέση κατανάλωση του συστήματος είναι:

$$Weighted\_Average = \frac{(1 \cdot 10 + 9 \cdot 1)}{10min} = \frac{19mAmin}{10min} = 1.9mA \quad (4.12)$$

Οπότε, μέσα στη μέρα χρειαζόμαστε:

$$1.9mA \cdot 24hr = 45.6mAh \quad (4.13)$$

<sup>4</sup>Ο κύκλος λειτουργίας ενός solar harvester περιγράφει την διαδικασία λειτουργίας του και αποτελείται κυρίως από τρεις φάσεις: την φόρτιση του συστήματος που περιλαμβάνει την αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρία, την εκφόρτιση ή χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας και την αδράνεια όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια.

Άρα κάνω harvest με  $\approx 22mA$ , οι ώρες που θα χρειαστώ να καλύψω το ενεργειακό κενό θα είναι:

$$\frac{45.6mAh}{22mA} = 2.072hr \quad (4.14)$$

Σε περίπτωση όπου το σύστημα παρέμενε για μισή μέρα υπό την επίδραση της μέγιστης φωτεινότητας ( $lux_{max}$ ) και την υπόλοιπη μέρα υπό την επίδραση της ελάχιστης φωτεινότητας ( $lux_{min}$ ), τα δεδομένα υποβάλλονται σε αλλαγές και έχουμε:

Για μισή μέρα ( $12hr$ ) με μέγιστη φωτεινότητα, κάνω harvest με  $22mA$ , άρα μέσα σε αυτό το διάστημα χρειάζομαι:

$$1.9mA \cdot 12hr = 22.8mAh \quad (4.15)$$

Επομένως, οι ώρες που χρειάζομαι:

$$\frac{22.8mAh}{22mA} = 1.036hr \quad (4.16)$$

Για την υπόλοιπη μέρα (άλλες  $12hr$ ) με ελάχιστη φωτεινότητα, κάνω harvest με  $4mA$ , άρα μέσα σε αυτό το διάστημα χρειάζομαι:

$$1.9mA \cdot 12hr = 22.8mAh \quad (4.17)$$

Επομένως, οι ώρες που χρειάζομαι:

$$\frac{22.8mAh}{4mA} = 5.7hr \quad (4.18)$$

Σε γενικές γραμμές, τα σενάρια που πραγματευόμαστε αφορούν εφαρμογές σε εσωτερικό χώρο, καθώς η τεχνολογία που χρησιμοποιείται επιτρέπει την λειτουργία του συστήματος ακόμα και με έμμεσο ηλιακό φως, ενώ αυτά στοχεύουν στη συλλογή μικρών ποσών ενέργειας που καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες μικροεπεξεργαστών στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN), με σκοπό την αυτόνομη και βέλτιστη λειτουργία τους.

## Κεφάλαιο 5

# Συμπεράσματα και Τελική Αξιολόγηση Θέματος

Η παρούσα εργασία αναλύει ένα σύστημα συλλογής φωτεινής ενέργειας (solar harvesting) εσωτερικού χώρου, με στόχο τη διαχείριση και τη μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας σε μορφές που μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες, προκειμένου να καταστεί το σύστημα ανεξάρτητο.

Στον 21ο αιώνα, η ανάγκη για μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής αναδεικνύεται ως μία από τις κύριες ανθρώπινες προτεραιότητες. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτεί καινοτόμες λύσεις που εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, ενώ τα ηλεκτρονικά κυκλώματα καθορίζονται ως ο πυρήνας της απαραίτητης τεχνολογίας για την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων στον τομέα αυτόν. Η εισαγωγή του όρου "harvesting" στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναδεικνύεται ως κρίσιμο βήμα για την αποδοτική χρήση των φυσικών πόρων και την απομάκρυνση από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, η συγκομιδή ενέργειας διαιρείται σε δύο κατηγορίες: μεγάλης και μικρής κλίμακας. Η πρώτη επικεντρώνεται στη χρήση υψηλής τεχνολογίας και εκτενών συστημάτων, ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται σε φορητά και ευέλικτα συστήματα με μπαταρίες, παρέχοντας αυτονομία ενέργειας και ευελιξία σε περιοχές με δύσκολη πρόσβαση σε κεντρικά δίκτυα ενέργειας. Η αντίθεση στις δύο κατηγορίες αναδεικνύει τις διάφορες τεχνολογίες και εφαρμογές που προσφέρει ο τομέας της συγκομιδής ενέργειας.

Συνεχίζοντας, η εργασία επικεντρώνεται στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN) που χρησιμοποιούν την τεχνική του ηλιακού harvesting αναδεικνύοντας το ως πρωτοποριακή λύση για την εξασφάλιση ενέργειας. Με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυκλωμάτων, τα WSN μπορούν να συλλέγουν και αποθηκεύουν ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία. Τα πλεονεκτήματα του solar harvesting στα WSN είναι πολλαπλά. Πρώτον, επιτρέπει την αυτόνομη λειτουργία των αισθητήρων, αφού η συλλογή ενέργειας από τον ήλιο μειώνει την εξάρτησή τους από εξωτερικές πηγές. Δεύτερον, παρέχει βιώσιμη ενέργεια, καθιστώντας τα WSN πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Τέλος, η αποθήκευση ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά κυκλώματα επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία των αισθητήρων, ακόμα και κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η συνδυασμένη τεχνολογία επιτρέπει τη δημιουργία ευφυών συστημάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης ή άλλων εφαρμογών IoT, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη βιωσιμότητα και την αποτελεσματικότητά τους.

Έπειτα, στην προσπάθεια να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται ένα solar harvesting κύκλωμα, αναλύεται η σημασία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς και η εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν κύριο μέσο μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση της παραγόμενης ενέργειας, η μέθοδος MPPT κρίνεται απαραίτητη. Πολλές τεχνικές MPPT έχουν αναπτυχθεί, με κάποιες από αυτές να έχουν καθιερωθεί καλά στη βιβλιογραφία. Αυτές οι τεχνικές ποικίλλουν σε λειτουργία ανάλογα με τη δομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναζητώντας συνεχώς βελτιώσεις στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Η συνδυασμένη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων και της τεχνολογίας MPPT αντιπροσωπεύει μια προηγμένη και καινοτόμα προσέγγιση για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας με μέγιστη αποδοτικότητα.

Τελικώς, αναπτύχθηκε και ερευνήθηκε ένα σύστημα συλλογής φωτεινής ενέργειας εσωτερικού χώρου, χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο bq25505. Η κατασκευή του κυκλώματος προσαρμόστηκε σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής, που περιλαμβάνουν την αποθήκευση και τη χρησιμοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από μια φωτεινή πηγή εσωτερικού χώρου και χαμηλής ενεργειακής απόδοσης, με σκοπό την αποτελεσματική φόρτιση ενός φορτίου εξόδου. Βάσει περιγραφής και ανάλυσης του κυκλώματος τα αποτελέσματα που μπορούν να συναχθούν είναι τα εξής:

- Διαχείριση Ενέργειας: Η αποτελεσματική διαχείριση της συλλεγόμενης ενέργειας φαίνεται να είναι κρίσιμη. Το σύστημα προσαρμόζεται αποδοτικά στις αλλαγές φωτεινότητας, ενώ παράλληλα αξιοποιεί την ενέργεια βάσει των αναγκών μέσω της ενσωματωμένης μεθόδου MPPT και την αποθηκεύει με τη χρήση εξωτερικών πυκνωτών.
- Ευαισθησία στη Φωτεινότητα: Η απόδοση του συστήματος φαίνεται να εξαρτάται σημαντικά από τις αλλαγές στη φωτεινότητα του περιβάλλοντος. Η ευαισθησία επηρεάζει τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Ενεργειακές Απαιτήσεις: Η εφαρμογή του συστήματος μπορεί να έχει μικρή έως μηδαμινή εσωτερική ενεργειακή κατανάλωση και με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η αυτονομία του συστήματος.

Σημαντικό είναι να εξεταστούν επίσης διάφορα σενάρια χρήσης, όπως η λειτουργία σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και συνθήκες φωτισμού. Το κύκλωμα φαίνεται πως λειτουργεί αξιόλογα υπό την επίδραση μέγιστης φωτεινότητας και ικανοποιητικά υπό ελάχιστης, γεγονός που το καθιστά αξιόλογο σε ποικίλες εφαρμογές, είτε αυτές είναι σε επαγγελματικούς χώρους είτε σε οικιακό περιβάλλον. Η μελέτη αυτού του κυκλώματος προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη φωτοευαίσθητων συστημάτων συλλογής ενέργειας σε εσωτερικούς χώρους, με δυνατότητα ευρείας εφαρμογής σε ποικίλους τομείς, όπως δίκτυα αισθητήρων.

# Παράρτημα Α΄

## Ακρωνύμια και συντομογραφίες

**IoT** Internet of Things

**EH** Energy Harvesting

**SC** Super Capacitors

**PEDs** Portable Electronic Devices

**WSN** Wireless Sensor Networks

**MPPT** Maximum Power Point Tracking

**MPP** Maximum Power Point

**PV** Photovoltaic

**P&O** Perturb and Observe

**IC** Incremental Conductance

**CV** Constant Voltage

**V<sub>OC</sub>** Voltage Open Circuit

**I<sub>OC</sub>** Current Open Circuit

# Bibliography

- [1] Γ. ΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ, Κ. ΚΟΣΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ, Θ. ΛΑΟΠΟΥΛΟΣ, Σ. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ, Κ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ, Σ. ΣΙΣΚΟΣ, *ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ. ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΠΑΙΔΕΙΑ*, 2009.
- [2] K. Bajaj, B. Sharma, and R. Singh, "Integration of wsn with iot applications: a vision, architecture, and future challenges," *Integration of WSN and IoT for Smart Cities*, pp. 79–102, 2020.
- [3] R. J. Vullers, R. Van Schaijk, H. J. Visser, J. Penders, and C. Van Hoof, "Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks," *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 29–38, 2010.
- [4] H. Elahi, K. Munir, M. Eugeni, S. Atek, and P. Gaudenzi, "Energy harvesting towards self-powered iot devices," *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5528, 2020.
- [5] "Sony." [Online]. Available: <https://www.sony.net/>
- [6] Y. Liang, C.-Z. Zhao, H. Yuan, Y. Chen, W. Zhang, J.-Q. Huang, D. Yu, Y. Liu, M.-M. Titirici, Y.-L. Chueh *et al.*, "A review of rechargeable batteries for portable electronic devices," *InfoMat*, vol. 1, no. 1, pp. 6–32, 2019.
- [7] W. Raza, F. Ali, N. Raza, Y. Luo, K.-H. Kim, J. Yang, S. Kumar, A. Mehmood, and E. E. Kwon, "Recent advancements in supercapacitor technology," *Nano Energy*, vol. 52, pp. 441–473, 2018.
- [8] M. F. Othman and K. Shazali, "Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1204–1210, 2012.
- [9] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, "Solar energy harvesting wireless sensor network nodes: A survey," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 2, 2018.
- [10] N. R. Patel and S. Kumar, "Wireless sensor networks' challenges and future prospects," in *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*. IEEE, 2018, pp. 60–65.
- [11] C. Lupangu and R. Bansal, "A review of technical issues on the development of solar photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 950–965, 2017.



- [12] “ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.” [Online]. Available: [https://imegsevee.gr/wp-content/uploads/2018/01/fotovoltaika\\_systimata.pdf](https://imegsevee.gr/wp-content/uploads/2018/01/fotovoltaika_systimata.pdf)
- [13] Τ. Μακρής, “Κατασκευή και χαρακτηρισμός διάφανων ηλιακών κυττάρων υψηλής απόδοσης,” 2014.
- [14] M. Forouzes, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman, “Step-up dc-dc converters: a comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178, 2017.
- [15] M.-L. Ku, W. Li, Y. Chen, and K. R. Liu, “Advances in energy harvesting communications: Past, present, and future challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1384–1412, 2015.
- [16] A. K. Gupta and R. Saxena, “Review on widely-used mppt techniques for pv applications,” in *2016 international conference on innovation and challenges in cyber security (ICICCS-INBUSH)*. IEEE, 2016, pp. 270–273.
- [17] F. Roberto and L. Sonia, “Energy comparison of mppt techniques for pv systems,” *WSEAS Transactions Power Syst*, vol. 3, pp. 446–455, 2008.
- [18] “Texas instruments.” [Online]. Available: <https://www.ti.com/>
- [19] “Τι είναι η φωτομετρία. Τι ονομάζεται lux, lumen candela που βλέπουμε πάνω στις λάμπες? — leditnow.gr,” <https://www.leditnow.gr/ti-einai-i-fotometria-ti-onomazetai-lux-lumen-kai-candela-pou-vlepoume-pano-stis-lampes.html>, 2017.
- [20] “Datasheet.” [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf>
- [21] J. Wang, “Step-Up Vs. Step-Down Transformers & How They Work | MPS Industries, Inc. — mpsind.com,” <https://www.mpsind.com/blog/step-up-vs-step-down-transformers-how-they-work/>, [Accessed 31-01-2024].