



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία
Σχεδίαση φωτοβολταϊκού συστήματος με εκτίμηση
και μέτρηση της παραγωγής.



Του φοιτητή
Αλέξανδρου Ευστάθιου Κιουτσίκη
Αρ. Μητρώου: 164678

Επιβλέπων Καθηγητής
Κιοσκερίδης Ιορδάνης
Βαθμίδα Καθηγητής

30 Μαΐου 2024

Σχεδίαση φωτοβολταϊκού συστήματος με εκτίμηση και μέτρηση της παραγωγής
Κωδικός Διπλωματικής Εργασίας 22269
Ονοματεπώνυμο φοιτητή Αλέξανδρος Ευστάθιος Κιουτσίκης
Ονοματεπώνυμο εισηγητή Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε 18-10-2022
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. ?

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αλέξανδρου Ευστάθιου Κιουτσίκη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Abstract

Solar energy is a rapidly growing sector and the fastest-growing among renewable energy sources. Economies of scale and technological breakthroughs have contributed to making solar panel production inexpensive, reliable, and scalable. As a result, solar systems are installed in a wide variety of locations, including industrial buildings, residential homes, parking lots, and open land. This widespread adoption presents the challenge of managing the diverse and distributed energy production effectively. A significant disadvantage of solar energy production is its irregularity, as it is dependent on natural phenomena and cannot be controlled.

Accurate energy production forecasting is crucial for optimizing the use and management of solar energy. Forecasting allows for better planning and utilization of energy, enhancing the reliability and efficiency of both grid-tied and off-grid systems. In grid-tied systems, the produced energy is exported to the grid, thereby reducing the reliance on non-renewable energy sources. Accurate forecasts of solar energy production are vital for electricity grid operators to manage and balance the overall energy supply effectively. In off-grid systems, the produced energy is stored and then consumed on-site. Forecasting energy production in these systems is essential for optimizing the use of stored energy and ensuring a consistent energy supply.

This thesis presents the design and implementation of an off-grid photovoltaic system with integrated production recording and forecasting capabilities. A web server and user-friendly web interface provide real-time access to the system's energy production data, enabling users to monitor historical output and receive forecasts of future production. Additionally, a device for measuring power output, capable of direct connection to solar panels or communication with existing system components, ensures accurate and reliable monitoring of system performance. Overall, it demonstrates the advantages of implementing the long-term and short-term energy production forecasting when designing and operating a solar energy production system.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	7
1.1	Στόχοι	7
1.2	Μεθοδολογία	7
2	Φωτοβολταϊκά Πλαίσια	7
2.1	Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	8
2.1.1	Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Πυριτίου	9
2.2	Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	11
2.2.1	Δομή	11
2.2.2	Απόδοση	12
2.2.3	Επιδόσεις	13
2.2.4	Καμπύλη I-V και Maximum Power Point	15
3	Φωτοβολταϊκά Συστήματα	16
3.1	Αυτόνομα	17
3.1.1	Σχεδιασμός	17
3.1.2	Ρυθμιστές Φόρτισης	18
3.1.3	Μπαταρίες	21
3.1.4	Συστοιχίες Μπαταριών	23
3.1.5	Χαρακτηριστικά Μπαταριών	25
3.1.6	Φόρτιση Μπαταριών	28
3.1.7	Εκφόρτιση Μπαταριών	30
3.1.8	Inverter	30
3.1.9	Συστοιχίες Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	32
3.1.10	Παράδειγμα Σχεδιασμού Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος	33
3.2	Διασυνδεδεμένα	36
3.2.1	Σχεδιασμός	36
3.2.2	Inverter	37
3.2.3	Συστοιχίες Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	37
4	Μοντέλα Εκτίμησης της Παραγωγής	38
4.1	Εκτίμηση Ακτινοβολίας	39
4.1.1	Μοντέλα Εκτίμησης Ακτινοβολίας	40
4.1.2	Μέτρηση Ακτινοβολίας DNI, DHI, GHI, GTI	41
4.2	Μοντέλα Θερμοκρασίας των Κυψελών	42
4.3	Ημερήσια Πρόβλεψη	43
4.4	Ετήσια Πρόβλεψη	43
5	Σύστημα Καταγραφής	44
5.1	Καταγραφικό Μηχάνημα	45
5.1.1	Σχηματικό	45
5.1.2	Πλακέτα	46
5.1.3	Μικροελεγκτής	47
5.1.4	Κύκλωμα Τροφοδοσίας	49
5.1.5	Κύκλωμα Μετρήσεων	52
5.1.6	Κύκλωμα Επικοινωνίας RS485	54
5.1.7	Κύκλωμα Προγραμματισμού	54
5.1.8	Κέλυφος και Εγκατάσταση σε Πίνακα	55
5.2	Λογισμικό	58

5.2.1	Firmware Μικροελεγκτή	58
5.2.2	Επικοινωνία με Εξυπηρετητή	60
5.2.3	Λογισμικό Εξυπηρετητή	61
5.2.4	Βάση Δεδομένων	62
5.2.5	Ιστοσελίδα	64
5.2.6	Αλληλεπίδραση Χρήστη	64

Σχήματα

2.1	Απόδοση Διαφορετικών Τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών Κυψελών	8
2.2	Φωτοβολταϊκή Κυψέλη Πυριτίου	10
2.3	Φασματική Απόκριση Φωτοβολταϊκής Κυψέλης	10
2.4	Δομή Φωτοβολταϊκού Πάνελ	11
2.5	Απόδοση Φωτοβολταϊκών Κυψελών	12
2.6	Sharp NU-JD450 Electrical Data (STC)	13
2.7	Sharp NU-JD450 Electrical Data (NMOT)	14
2.8	Sharp NU-JD450 Temperature Coefficient	15
2.9	Ισοδύναμο Κύκλωμα Φωτοβολταϊκής Κυψέλης	15
2.10	Καμπύλη I - V	16
2.11	Καμπύλη I - V - radiation	16
3.1	Victron BlueSolar Specs [7]	21
3.2	Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μπαταριών	22
3.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων LF280K [10]	26
3.4	Μεταβολή Χωρητικότητας Μπαταριών Μολύβδου	27
3.5	Φόρτιση Μπαταρίας LiFePO4	28
3.6	Φόρτιση Μπαταρίας Μολύβδου	29
3.7	Σύγκριση μεταξύ Τροποποιημένου και Καθαρού Ημιτόνου	31
3.8	Push-Pull Inverter	31
3.9	Τυπική τοπολογία αντιστροφέα με μετασχηματιστή	32
3.10	Αντιστροφείς με και δίχως Μετασχηματιστή	32
3.11	Συνδεσμολογία Σε Σειρά, Παράλληλα και Συνδυασμός των δύο	33
3.12	Κύρια μέρη του Αντιστροφέα Δικτύου	37
3.13	Παραλληλισμός Συστοιχιών σε Διασυνδεδεμένα Συστήματα	38
4.1	Επίγεια Ηλιακή Ακτινοβολία	40
4.2	DNI - DHI	41
4.3	Συνολική Κεκλιμένη Ακτινοβολία	42
4.4	Εκτίμηση ετήσιας παραγωγής	44
5.1	Σχηματικό	45
5.2	Σχέδιο Πλακέτας	46
5.3	Συναρμολογημένη Πλακέτα	46
5.4	ESP32-WROOM-32	47
5.5	Κύκλωμα Τροφοδοσίας	49
5.6	Κύκλωμα Μετρήσεων	52
5.7	ACS723 Τυπική Εφαρμογή	54
5.8	MAX3485 Τυπική Διάταξη	54
5.9	Κύκλωμα Προγραμματισμού	55
5.10	Διαστάσεις Ράγας και Εξαρτημάτων	56
5.11	Σχέδιο Κελύφους σε CAD	56
5.12	Ηλεκτρολογικό Σχέδιο Πίνακα, Ανεξάρτητες Συστοιχίες	57
5.13	Ηλεκτρολογικό Σχέδιο Πίνακα, Παράλληλες Συστοιχίες	57
5.14	Υλοποίηση Λογισμικού	58
5.15	Διάγραμμα Ροής WiFi Manager	60
5.16	Σχήμα Βάσης Δεδομένων	63
5.17	Σύνδεση/Εγγραφή Χρήστη	65
5.18	Προσθήκη Νέας Συστοιχίας	65
5.19	Κεντρική Σελίδα	66

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Στόχοι

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει τη διαστασιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και έπειτα να δημιουργήσει το κατάλληλο σύστημα για την παρακολούθηση και εκτίμηση της παραγωγής του. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν πλέον το πιο οικονομικό μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αφθονία της ηλιακής ενέργειας στη φύση. Το ελάττωμά τους είναι η μεταβαλλόμενη ισχύς τους και το γεγονός πως αυτή δεν μπορεί να ρυθμιστεί. Έτσι για τη βέλτιστη χρήση ενός συστήματος η καταμέτρηση και πρόβλεψη της παραγωγής προσφέρει σημαντική πληροφορία για τη καλύτερη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και το σωστό σχεδιασμό συστήματος.

1.2 Μεθοδολογία

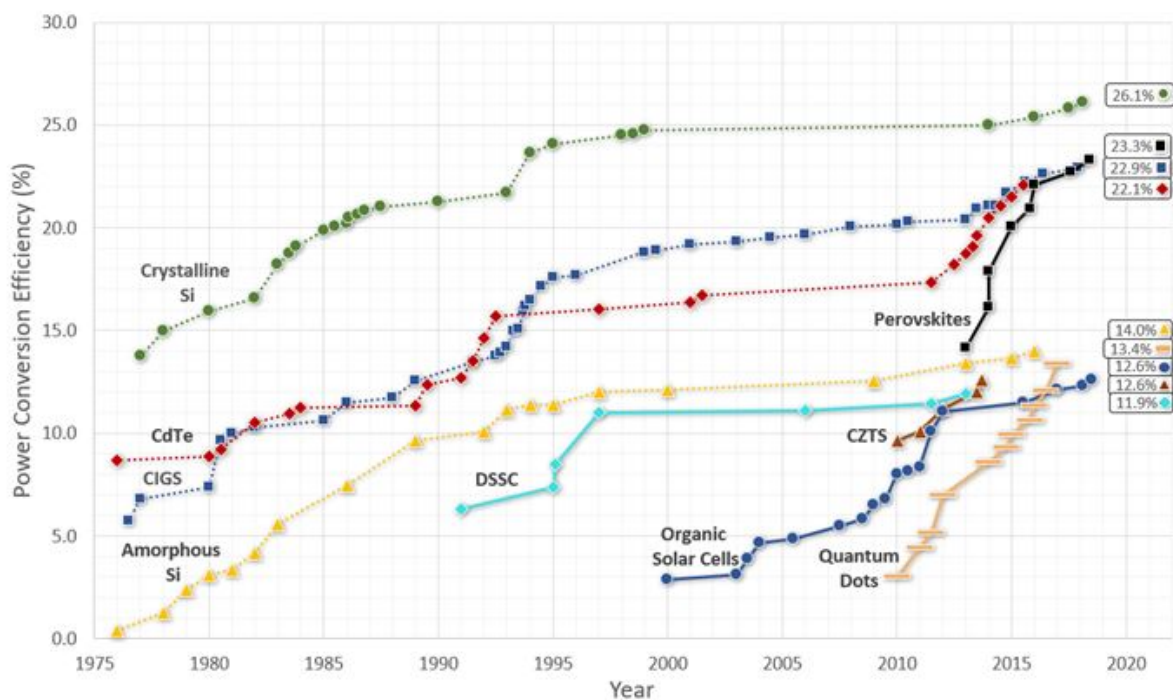
Πρωτίστως αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι προδιαγραφές των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αναλύεται η σημασία του εκάστοτε μεγέθους που χαρακτηρίζει τα εξαρτήματα και πως αυτό επηρεάζει την συνολική απόδοση ενός συστήματος. Δίδεται ένα παράδειγμα εγκατάστασης αυτόνομου συστήματος, όπου μελετούνται οι ανάγκες της εγκατάστασης και επιλέγονται τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια κατασκευάζεται μία ηλεκτρονική συσκευή ικανή να μετρά την παραγωγή των πλαισίων η οποία συνδέεται σε έναν web server για την αποθήκευση και παρουσίαση της πληροφορίας. Ταυτόχρονα, δεδομένου του συστήματος, παράλληλα με το ιστορικό της παραγωγής υπολογίζεται και παρουσιάζεται πρόβλεψη παραγωγής για τα επόμενα 24ωρα. Για την πρόβλεψη της παραγωγής μελετώνται τα μεγέθη που δίδονται από τις μετεωρολογικές προβλέψεις, ώστε να υπολογισθεί η ακτινοβολία στην επιφάνεια των πάνελ και η θερμοκρασία των κυψελών. Δεδομένων αυτών και των προδιαγραφών των πάνελ προκύπτει η εκτίμηση της παραγωγής.

Κεφάλαιο 2: Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Η στοιχειώδης μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, με χρήση του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι η φωτοβολταϊκή κυψέλη. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η διαδικασία με την οποία τα υλικά ημιαγωγών μετατρέπουν το φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν τα φωτόνια του ηλιακού φωτός απορροφώνται από το υλικό ημιαγωγών, προκαλώντας την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από την αρχική τους θέση. Η κίνηση αυτών των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ηλεκτρικές συσκευές.

2.1 Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η κυρίαρχη τεχνολογία στις φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι οι κυψέλες πυριτίου, ενώ πολλές άλλες τεχνολογίες αναπτύσσονται, με σκοπό να αυξήσουν την απόδοση, τη μακροζωία και να μειώσουν το κόστος. Η απόδοση μετριέται σε ποσοστό της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Μία πιο ακριβής αναπαράσταση της απόδοσης της φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι η φασματική απόκριση, δηλαδή η απόδοση της φωτοβολταϊκής κυψέλης σε σύγκριση με το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια του ηλίου στην επιφάνεια της Γης κατανέμεται σε ποσοστό 7-8% στην υπεριώδη ακτινοβολία, και η υπόλοιπη περίπου εξ ημισείας στο ορατό και το υπέρυθρο φάσμα. Όσον αφορά την μακροζωία, οι κυψέλες πυριτίου μπορούν και διατηρούν το 80% ή και παραπάνω της αρχικής τους απόδοσης μετά από 25 χρόνια, όταν άλλες τεχνολογίες με υποσχόμενη απόδοση φθείρονται πολύ ταχύτερα. Ταυτόχρονα, διαθέτουν επαρκή μηχανική αντοχή, ώστε σε συνδυασμό με την υπόλοιπη κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου να μην καταστρέφονται από τυχόν στρεβλώσεις και δονήσεις που προκαλούνται.



Σχήμα 2.1: Απόδοση Διαφορετικών Τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Το όριο Shockley-Queisser[4] αντιπροσωπεύει έναν θεμελιώδη θεωρητικό περιορισμό για τη μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτύχει μία φωτοβολταϊκή κυψέλη. Η απόδοση καθορίζεται από το ενεργειακό διάκενο και το ηλιακό φάσμα. Για τις κυψέλες πυριτίου που έχουν ενεργειακό διάκενο περίπου 1,1 ηλεκτρονιοβόλτ (eV), το όριο Shockley-Queisser θέτει ένα ανώτατο όριο απόδοσης περίπου 33,7% για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Το όριο αυτό προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της απορρόφησης φωτονίων με ενέργειες πάνω από το χάσμα ζώνης και της ελαχιστοποίησης των απωλειών θερμικής μετατροπής της πλεονάζουσας ενέργειας. Πέρα από το πυρίτιο, άλλα φωτοβολταϊκά υλικά όπως οι περοβσκίτες και ορισμένες τεχνολογίες thin-film παρουσιάζουν διαφορετικό ενεργειακό διάκενο, οδηγώντας σε διαφορετικά όρια Shockley-Queisser. Τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη, με χάσματα ζώνης που κυμαίνονται συνήθως από 1,5 έως 1,7 eV, έχουν θεωρητικό όριο απόδοσης 31% έως 33%, αναδεικνύοντας τη δυνατότητά τους να ανταγωνιστούν το πυρίτιο από άποψη απόδοσης. Η επίτευξη αποδόσεων κοντά σε αυτά τα όρια αντιμετωπίζει τεχνικές προκλήσεις, οι εξελίξεις στις κυψέλες multi-junction και τα νέα υλικά υπόσχονται να διευρύνουν τα θεωρητικά όρια και να ξεκλειδώσουν υψηλότερες αποδόσεις στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας.

2.1.1 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Πυριτίου

Μια ηλιακή κυψέλη πυριτίου αποτελείται από δύο τύπους ημιαγωγών, που ονομάζονται πυρίτιο τύπου p και πυρίτιο τύπου n. Το πυρίτιο τύπου p παράγεται με την προσθήκη ατόμων (όπως το βόριο ή το γάλλιο) που έχουν ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στο εξωτερικό τους ενεργειακό επίπεδο από ό,τι το πυρίτιο. Επειδή το βόριο έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο από αυτό που απαιτείται για να σχηματίσει τους δεσμούς με τα περιβάλλοντα άτομα πυριτίου, δημιουργείται ένα κενό ηλεκτρονίων ή μια "τρύπα".

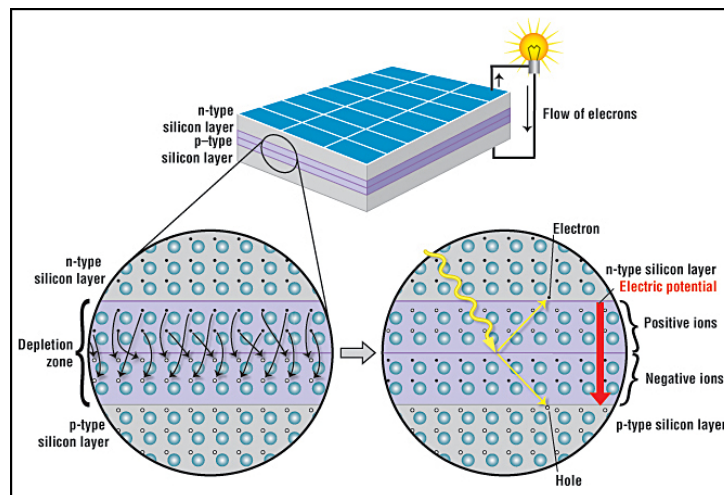
Το πυρίτιο τύπου n κατασκευάζεται με την προσθήκη ατόμων που έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο στην εξωτερική τους στάθμη από ό,τι το πυρίτιο, όπως ο φώσφορος. Ο φώσφορος έχει πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική του ενεργειακή στάθμη, όχι τέσσερα. Δεσμεύεται με τα γειτονικά του άτομα πυριτίου, αλλά ένα ηλεκτρόνιο δεν συμμετέχει στο δεσμό. Αντίθετα, είναι ελεύθερο να κινηθεί μέσα στη δομή του πυριτίου.

Μια ηλιακή κυψέλη αποτελείται από ένα στρώμα πυριτίου τύπου p που τοποθετείται δίπλα σε ένα στρώμα πυριτίου τύπου n. Στο στρώμα τύπου n υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων και στο στρώμα τύπου p υπάρχει περίσσεια θετικά φορτισμένων οπών (οι οποίες είναι κενές θέσεις λόγω έλλειψης ηλεκτρονίων σθένους). Κοντά στη διασταύρωση των δύο στρωμάτων, τα ηλεκτρόνια στη μία πλευρά της διασταύρωσης (στρώμα τύπου n) μετακινούνται στις οπές στην άλλη πλευρά της διασταύρωσης (στρώμα τύπου p). Έτσι δημιουργείται μια περιοχή γύρω από τη διασταύρωση, που ονομάζεται ζώνη εξάντλησης, στην οποία τα ηλεκτρόνια γεμίζουν τις οπές (Σχ. 1, κοντινό πλάνο).

Όταν όλες οι οπές γεμίσουν με ηλεκτρόνια στη ζώνη εξάντλησης, η πλευρά p-τύπου της ζώνης εξάντλησης (όπου αρχικά υπήρχαν οπές) περιέχει τώρα αρνητικά φορτισμένα ιόντα και η πλευρά n-τύπου της ζώνης εξάντλησης (όπου υπήρχαν ηλεκτρόνια) περιέχει τώρα θετικά φορτισμένα ιόντα. Η παρουσία αυτών των αντίθετα φορτισμένων ιόντων δημιουργεί ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εμποδίζει τα ηλεκτρόνια στο στρώμα τύπου n να γεμίσουν τις οπές στο στρώμα τύπου p.

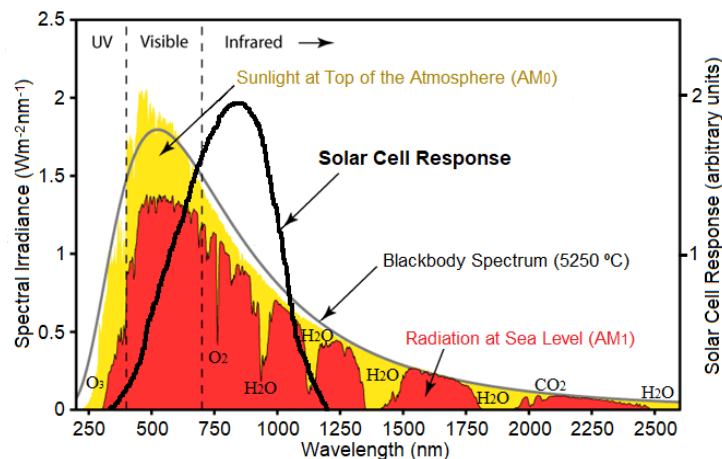
Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει σε μια ηλιακή κυψέλη, τα ηλεκτρόνια στο πυρίτιο εκτοξεύονται, με αποτέλεσμα το σχηματισμό "οπών", δηλαδή των κενών θέσεων που αφήνουν πίσω τους τα ηλεκτρόνια

που διαφεύγουν. Εάν αυτό συμβεί στο ηλεκτρικό πεδίο, το πεδίο θα μετακινήσει τα ηλεκτρόνια προς το στρώμα τύπου n και τις οπές προς το στρώμα τύπου p. Εάν συνδεθούν τα στρώματα τύπου n και p με ένα αγωγό, τα ηλεκτρόνια θα ταξιδέψουν από το στρώμα τύπου n στο στρώμα τύπου p διασχίζοντας τη ζώνη εξάντλησης και στη συνέχεια θα περάσουν μέσω του αγωγού πίσω από το στρώμα τύπου n, δημιουργώντας μια ροή ηλεκτρισμού. Στη θέση αυτού του αγωγού τοποθετείται το εκάστοτε ηλεκτρονικό κύκλωμα όπου διαχειρίζεται το παραγόμενο ρεύμα του φωτοβολταϊκού. [3]



Σχήμα 2.2: Φωτοβολταϊκή Κυψέλη Πυριτίου

Οι ηλιακές κυψέλες πυριτίου απορροφούν κυρίως φως σε ένα συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος, συνήθως μεταξύ 300 και 1100 νανομέτρων, καλύπτοντας ένα σημαντικό τμήμα του ηλιακού φάσματος. Ωστόσο, η απόδοση της απορρόφησης ποικίλλει σε όλο αυτό το φάσμα, με υψηλότερη απόδοση να παρατηρείται στο ορατό φάσμα (400-700 νανομέτρα) σε σύγκριση με τις υπεριώδεις και υπέρυθρες περιοχές. Αυτή η διακύμανση αποδίδεται στο ενεργειακό διάκενο του πυριτίου, η οποία καθορίζει την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση ηλεκτρονίων.

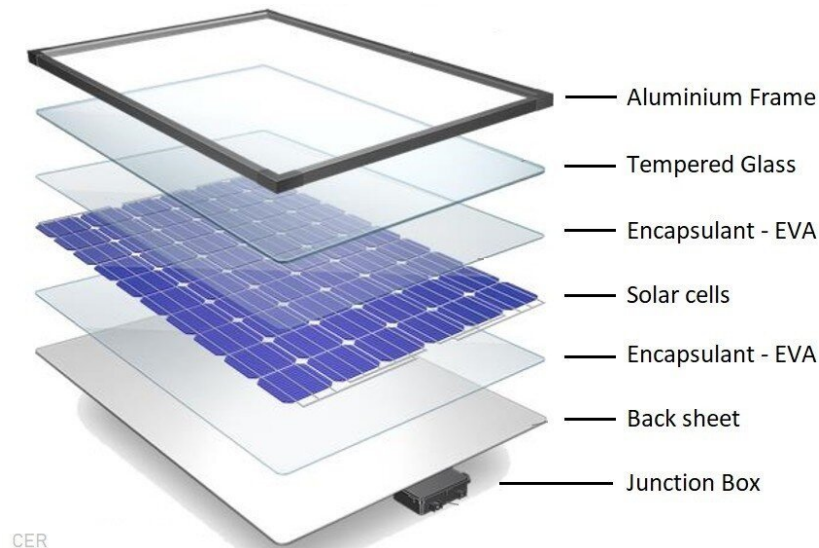


Σχήμα 2.3: Φασματική Απόκριση Φωτοβολταϊκής Κυψέλης

2.2 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

2.2.1 Δομή

Με τον όρο “φωτοβολταϊκά πάνελ” ή αλλιώς “φωτοβολταϊκά πλαίσια” εννοούμε την διάταξη πολλαπλών φωτοβολταϊκών κυψελών, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο.



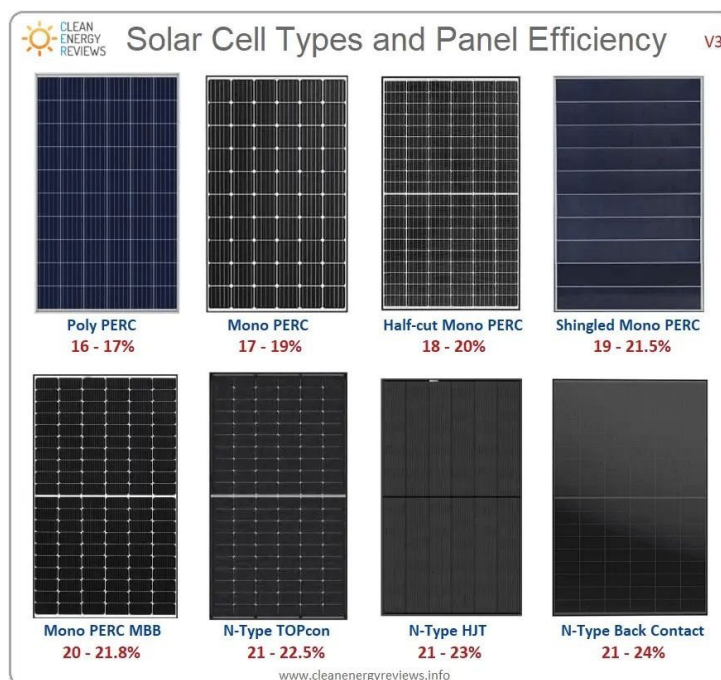
Σχήμα 2.4: Δομή Φωτοβολταϊκού Πάνελ

Το πλαίσιο αυτό αποτελείται από ένα περίγραμμα αλουμινίου, όπου προσδίδει την απαραίτητη αντοχή στις στρεβλώσεις και τις πιέσεις που θα δεχθεί το πλαίσιο από τα καιρικά φαινόμενα, καθώς και αποτελεί ένα συμπαγές σημείο για την στερέωση αυτών στις βάσεις. Επίσης η χρήση αλουμινίου ευνοεί το χαμηλό σχετικά βάρος του πλαισίου και την αντοχή του ενάντια στη ρύπανση. Στο μέσο του πλαισίου, υπάρχουν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, το κύριο μέρος του πλαισίου, μαζί με τους αγωγούς που τις συνδέουν μεταξύ τους. Αυτές οι κυψέλες όμως, λόγω της μηχανικής και χημικής ευαισθησίας τους, πρέπει να καλύπτονται για να προστατεύονται. Έτσι περιβάλλονται από κάποιου είδους πολυμερές πλαστικό, το οποίο τοποθετείται σε υγρή μορφή κατά την κατασκευή, για να εισχωρήσει παντού, και να εκτοπίσει τυχόν αέρα ή υγρασία γύρω από τις κυψέλες. Στην κορυφή τοποθετείται σκληρυμένο γυαλί ώστε να προστατέψει το πλαίσιο από τυχόν χτυπήματα, καθώς θα εκτίθεται για τα επόμενα 25 χρόνια στα στοιχεία, και είναι πιθανό να χτυπηθεί από χαλάζι, κλαδιά, πτηνά κ.α. Στο κάτω μέρος των κυψελών τοποθετείται ένα λευκό φύλλο, για να καλύπτει τους αγωγούς και το πίσω μέρος των κυψελών. Βέβαια η σύγχρονη τάση είναι τα παραγόμενα πλαίσια να είναι της τεχνολογίας “bifacial”, δηλαδή διπλής όψεως, όπου παράγουν ηλεκτρισμό και από τις δύο όψεις τους, αξιοποιώντας τυχόν ανακλάσεις του ηλιακού φωτός. Αυτά τα πλαίσια στο πίσω μέρος τους έχουν διαφανή μεμβράνη αντί για λευκή. Τέλος, το τελευταίο εξάρτημα είναι το κουτί διασύνδεσης, όπου οι σειρές των φωτοβολταϊκών κυψελών συνδέονται μεταξύ τους με διόδους, και τα καλώδια του πλαισίου συνδέονται στον θετικό και αρνητικό πόλο της συστοιχίας των κυψελών. Στα άκρα των καλωδίων τοποθετούνται οι ακροδέκτες, όπου τα τελευταία 10 περίπου χρόνια έχει καθιερωθεί να είναι του τύπου MC4.

2.2.2 Απόδοση

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες εκμεταλλεύονται το “φωτοβολταϊκό φαινόμενο” για την παραγωγή ενέργειας, την πόλωση δηλαδή των ηλεκτρικών φορτίων του υλικού όταν αυτό εκτίθεται σε φωτεινή ακτινοβολία. Η κάθε κυψέλη, όταν εκτεθεί στην ηλιακή ακτινοβολία παράγει περίπου 0.5V τάσης, και ρεύμα της τάξης των Amperes, συνήθως 6-14A. Οι κυψέλες αυτές συνδέονται σε σειρά, ώστε το κάθε πλαίσιο να παράγει τάση της τάξης των μερικών δεκάδων Volt, ικανή για να φορτίσει μπαταρίες. Το πρόβλημα με την εν σειρά σύνδεση των κυψελών είναι πως η σκίαση μίας κυψέλης μπορεί να μειώσει αισθητά την απόδοση του πλαισίου ή και ολόκληρης της συστοιχίας. Αυτό το πρόβλημα προσπαθεί να επιλύσει η νέα τεχνολογία των “half-cell” πλαισίων. Σε αυτά οι κυψέλες είναι χωρισμένες σε δύο παραλληλισμένες συστοιχίες, ώστε η σκίαση του μισού πλαισίου να μην επηρεάζει την λειτουργία του υπόλοιπου.

Οι κυψέλες είναι φτιαγμένες, λόγω περιορισμών στην τεχνολογία υλικών, να απορροφούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας. Το φάσμα όπου απορροφούν είναι κυρίως το ορατό φως, το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά περιλαμβάνει λιγότερη από τη μισή ενέργεια. Οι σύγχρονες φωτοβολταϊκές κυψέλες έχουν μία απόδοση περίπου 20-21%, ενώ 10 χρόνια πριν βρισκόταν στο 14-15%. Η τεχνολογία των υλικών των φωτοβολταϊκών κυψελών δείχνει να προχωράει γοργά, χωρίς κάποιο αξιοσημείωτο άλμα στην πρόοδο. Ότι ανάπτυξη παρατηρούμε στον κλάδο αφορά τη σταδιακή βελτίωση των κυψελών πυριτίου. Εκεί που παρατηρείται η μεγαλύτερη πρόοδος είναι στη μείωση των τιμών. Σε τιμές λιανικής, το 2010 το κόστος ανα kWp κυμαινόταν στις μερικές χιλιάδες Ευρώ, όπου κανείς μπορούσε να αγοράσει ένα πλαίσιο των 250Wp για περίπου 800€. Το έτος 2022 με τα ίδια χρήματα κανείς αγοράζει δύο πλαίσια των 660Wp έκαστο, από επώνυμο κατασκευαστή, κόστος δηλαδή λιγότερο από 1000€/kWh. Φυσικά το σύγχρονο πλαίσιο είναι και μεγαλύτερο σε εμβαδόν.



Σχήμα 2.5: Απόδοση Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Οι διαφορετικές τεχνολογίες κατασκευής των κυψελών είναι κι αυτές λιγιστές, και δεν προσφέρουν

κάποια εντυπωσιακή διαφορά από τους προκατόχους τους. Οι επικρατέστερες κυψέλες πριν μία δεκαετία ήταν οι πολυκρυσταλλικές. Η κυψέλη δηλαδή αποτελούταν από ένα κράμα πυριτίου ανομοιογενές, όπου του έδινε και τη χαρακτηριστική όψη “παραλλαγής”. Αυτό φυσικά γινόταν λόγω κόστους μιας και η παραγωγή ενός πιο καθαρού κράματος ήταν πολύ δαπανηρή. Με το πέρασ του καιρού και όσο οι τεχνικές κατασκευής βελτιώθηκαν, η παραγωγή των μονοκρυσταλλικών κυψελών έγινε πιο βιώσιμη και οι πολυκρυσταλλικές πλέον καταλαμβάνουν ένα ελάχιστο μέρος της αγοράς. Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες, με τη χαρακτηριστική μαύρη ομοιογενή όψη τους, προσέφεραν μικρή βελτίωση στην απόδοση και μακροζωία των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αργότερα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι εν σειρά συνδεδεμένες κυψέλες χωρίστηκαν σε δύο συστοιχίες κυψελών, μισού εμβαδού από τις αρχικές, δημιουργώντας τη διαταξη “half-cut cell” όπου είναι πιο αποδοτική υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Τέλος, η τεχνολογία των “bifacial” κυψελών, δηλαδή διπλής όψης, ήρθε για να εκμεταλλευτεί το πίσω μέρος του πλαισιού, το οποίο είναι πλέον ικανό να παράξει ενέργεια από την ανάκλαση του ηλιακού φωτός στο έδαφος και τις γύρω επιφάνειες. Αυτή η τεχνολογία ευνοείται πολύ από τοποθέτηση των πλαισίων σε ανοιχτό πεδίο, είτε μπροστά από τοίχους, υψωμένα από το έδαφος. Τα φωτοβολταϊκά πάρκα και οι κατασκευές τύπου ανοιχτού γκαράζ αποτελούν καλό παράδειγμα εφαρμογής. Εάν λοιπόν συνδιάσουμε όλες τις σύγχρονες τεχνολογίες παίρνουμε ένα πλαίσιο με “half-cut monocrystalline bifacial”, τα οποία πλέον είναι τα επικρατέστερα στην αγορά.

Σημαντικό είναι να αναφερθούμε και στο μέγεθος των πλαισίων, αν και δεν αφορά την απόδοση τους. Τα πλαίσια στο κοντινό παρελθόν, περί το 2012 όπου υπήρξαν μεγάλα κίνητρα για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πάρκων, είχαν διαστάσεις κοντά στο 160*100εκ. και ισχύ 250Wp. Τα πιο σύγχρονα πλαίσια έχουν διαστάσεις 230*115 με ισχύ 540Wp, και 230*130 με ισχύ 660Wp. Έτσι γίνεται μία οικονομία στις σχετικά ακριβές βάσεις τοποθέτησης, καθώς και στην καλωδίωση, μειώνοντας και τη πιθανότητα βλάβης.

2.2.3 Επιδόσεις

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χαρακτηρίζεται από κάποιες προδιαγραφές που αφορούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του. Οι συνθήκες δοκιμών είναι ίδιες για όλη τη βιομηχανία, συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το εξής πρότυπο:

STC = Standard Test Conditions: irradiance 1,000 W/m², AM 1.5, cell temperature 25 °C

Παρακάτω φαίνεται μέρος του φύλλου προδιαγραφών ενός πλαισίου Sharp NU-JD450, και ακολουθεί η επεξήγηση του κάθε μεγέθους [5]:

Electrical data (STC)		NU-JD450	
Maximum power	P _{max}	450	W _p
Open-circuit voltage	V _{oc}	49.35	V
Short-circuit current	I _{sc}	11.61	A
Voltage at point of maximum power	V _{mpp}	41.56	V
Current at point of maximum power	I _{mp}	10.83	A
Module efficiency	η _m	20.37	%

STC = Standard Test Conditions: irradiance 1,000 W/m², AM 1.5, cell temperature 25°C.
 Rated electrical characteristics are within ±10 % of the indicated values of I_{sc}, V_{oc} and 0 to +5 % of P_{max}.
 Reduction of efficiency from an irradiance change of 1,000 W/m² to 200 W/m² (T_{module} = 25 °C) is less than 3 %.

Σχήμα 2.6: Sharp NU-JD450 Electrical Data (STC)

- **Maximum Power, P_{max} :** Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράξει το πλαίσιο, όταν το φορτίο καταναλώνει την τάση και το ρεύμα του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP).
- **Open-Circuit Voltage, V_{oc} :** Η μέγιστη τάση του πλαισίου, όταν αυτό είναι ανοιχτοκυκλωμένο.
- **Short-Circuit Current, I_{sc} :** Το μέγιστο ρεύμα του πλαισίου, όταν αυτό βραχυκυκλωθεί.
- **Voltage at point of maximum power, V_{mpp} :** Η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, παρατηρείται πως είναι λίγο χαμηλότερη από την τάση ανοιχτοκυκλώματος.
- **Current at point of maximum power, I_{mpp} :** Το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, παρατηρείται πως είναι λίγο χαμηλότερο από το ρεύμα βραχυκυκλώματος.
- **Module efficiency, n :** Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, υπολογίζεται ως:

$$n = \left(\frac{P_{max} \text{ (W)}}{\text{Εμβαδόν (m}^2\text{)} / 1000 \text{ W/m}^2} \right) \times 100\%$$

Δηλαδή εκφράζει το ποσοστό της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύς.

Ο συγκεκριμένος κατασκευαστής προσδιορίζει επίσης τις επιδόσεις του πλαισίου σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας, όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος βρίσκεται στους 20°C, με χαμηλό άνεμο 1m/s και τις κυψέλες να έχουν αναπτύξει θερμοκρασία 42.5°C. Θεωρεί επίσης πως τα πλαίσια δεν είναι ιδανικά προσανατολισμένα άρα η πυκνότητα ακτινοβολίας που δέχονται είναι 800W/m².

Electrical data (NMOT)		NU-JD450	
Maximum power	P_{max}	337.42	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	46.77	V
Short-circuit current	I_{sc}	9.41	A
Voltage at point of maximum power	V_{mpp}	38.74	V
Current at point of maximum power	I_{mpp}	8.71	A

NMOT = Nominal Module Operating Temperature: 42.5 °C, irradiance 800 W/m², air temperature of 20 °C, wind speed of 1 m/s.

Σχήμα 2.7: Sharp NU-JD450 Electrical Data (NMOT)

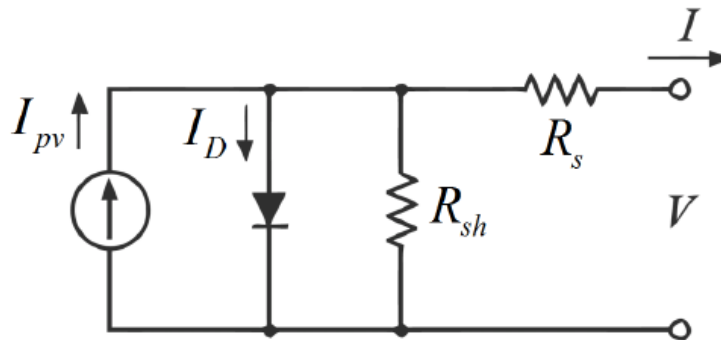
Επίσης σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι ο θερμικός συντελεστής. Καθώς τα υλικά κατασκευής είναι ημιαγωγοί, τα χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, παρατηρείται σημαντική πτώση της τάσης, μικρή αύξηση της ισχύος, άρα και πτώση της ισχύος. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην μεταβολή της ισχύος όταν πρόκειται τα πλαίσια να τοποθετηθούν σε θερμό κλίμα. Όταν αντίθετα τα πλαίσια πρόκειται να τοποθετηθούν σε πολύ ψυχρό κλίμα ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην μεταβολή της τάσης ανοιχτοκυκλώματος, καθώς η αύξηση της μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον ρυθμιστή όπου τα πλαίσια θα συνδεθούν, εάν δεν ληφθεί υπόψιν.

Temperature coefficient	
P_{max}	-0.347 %/°C
V_{oc}	-0.263 %/°C
I_{sc}	0.057 %/°C

Σχήμα 2.8: Sharp NU-JD450 Temperature Coefficient

2.2.4 Καμπύλη I-V και Maximum Power Point

Μία φωτοβολταϊκή κυψέλη μοντελοποιείται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [6]. Το μοντέλο αποτελείται από μία πηγή ρεύματος, μία ορθά πολωμένη δίοδο, και μία αντίσταση παράλληλα συνδεδεμένη στη δίοδο, καθώς και μία αντίσταση σε σειρά με την έξοδο. Η δίοδος οφείλεται για τη σχετικά σταθερή τάση στην έξοδο, ενώ η εν σειρά αντίσταση είναι αυτή που καταναλίσκει όλη την τάση στην περίπτωση βραχυκυκλώματος. Η συμπεριφορά του κυκλώματος αυτού χαρακτηρίζεται από το διάγραμμα τάσης - ρεύματος.

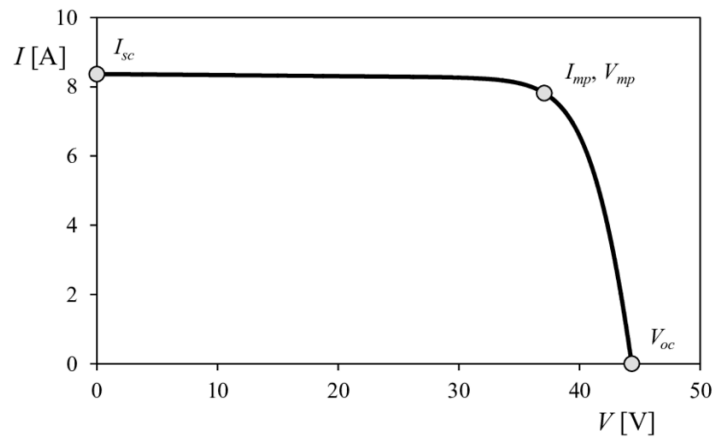


Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο Κύκλωμα Φωτοβολταϊκής Κυψέλης

Το διάγραμμα τάσης - έντασης είναι χαρακτηριστικό κάθε φωτοβολταϊκής κυψέλης, άρα και πλαισίου. Τα διαφορετικά πλαίσια μπορεί να διαφέρουν στις τιμές των μεγεθών, αλλά το σχήμα της καμπύλης είναι σε όλα παραπλήσιο. Επίσης, τα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας μετατοπίζουν τη καμπύλη, ενώ το σχήμα της πάλι παραμένει παραπλήσιο. Η σύνδεση πολλών πλαισίων σε μία συστοιχία είναι γίνεται σε όλες σχεδόν τις εγκαταστάσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, οι τάσεις της καμπύλης πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό των εν σειρά συνδεδεμένων πλαισίων και τα ρεύματα πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό των πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα. Στο διάγραμμα είναι σημειωμένα όλα τα μεγέθη όπου ο κατασκευαστής ορίζει στο φύλλο δεδομένων. Εξάγονται λοιπόν οι εξής πληροφορίες από το διάγραμμα:

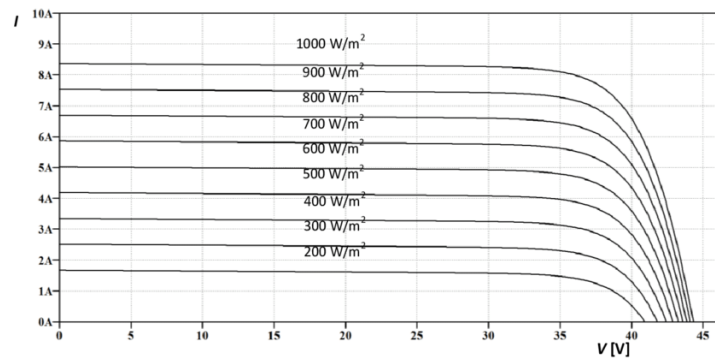
- Όταν η τάση στα άκρα του πλαισίου είναι 0V (βραχυκύκλωμα), ρέει το μέγιστο ρεύμα I_{sc} .
- Όταν δεν ρέει ρεύμα (ανοιχτοκύκλωμα), η τάση στα άκρα του πλαισίου είναι η μέγιστη δυνατή V_{oc} .
- Το ρεύμα παραμένει σχετικά σταθερό για τάσεις μεταξύ των 0V και της V_{mpp} , της τάσης σημείου μέγιστης ισχύος. Έτσι και η ισχύς αυξάνεται σχεδόν γραμμικά σε αυτό το διάστημα.
- Το ρεύμα όμως μειώνεται ραγδαία για τις τάσεις πέρα της V_{mpp} , και κατ' αντιστοιχία μειώνεται και η ισχύς.

- Η Ισχύς έχει τοπικό μέγιστο στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) και σε μειώνεται αισθητά με την απομάκρυνση από το σημείο αυτό.



Σχήμα 2.10: Καμπύλη I - V

Η μετατόπιση της καμπύλης με τη μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας γίνεται κατά κύριο λόγο στον κάθετο άξονα (ρεύμα), ενώ στο οριζόντιο (τάση) η μεταβολή είναι ελάχιστη.



Σχήμα 2.11: Καμπύλη I - V - radiation

Κεφάλαιο 3: Φωτοβολταϊκά Συστήματα

3.1 Αυτόνομα

Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι αυτά που δεν έχουν σύνδεση με το δίκτυο. Η παραγωγή, συσσώρευση και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται τοπικά. Από αυτήν την αρχή λειτουργίας προκύπτουν πολλές προκλήσεις, καθώς η παραγωγή κι η κατανάλωση είναι διαρκώς μεταβαλλόμενες και απρόβλεπτες. Τα κύρια μέρη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

- Συστοιχία Φωτοβολταϊκών Πλαισίων
- Ρυθμιστής Φόρτισης Μπαταριών
- Συσσωρευτές (Μπαταρία)
- Αντιστροφέας (Inverter)

Κατά το σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να υπολογιστούν πολλοί παράμετροι. Αρχικά υψίστης σημασίας είναι να γνωστοποιηθούν οι ανάγκες των φορτίων. Η ισχύς, η κατανάλωση, οι ώρες και οι μέρες λειτουργίας, η αναγκαιότητα χρήσης, και άλλοι παράμετροι των καταναλώσεων λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν. Ο λόγος είναι πως οι δυνατότητες συσσώρευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, με την παρούσα τεχνολογία, είναι πολύ περιορισμένες. Έτσι συνήθως η αποθηκευμένη ενέργεια αρκεί για μερικές ημέρες. Αυτός είναι και ο λόγος που η πρόβλεψη της παραγωγής, και η κατά το δυνατότερο πιο αποδοτική εκμετάλλευσή της είναι σημαντική.

3.1.1 Σχεδιασμός

Η εγκατάσταση τους γίνεται κατά κύριο λόγο σε οικίες, αυτοκινούμενα/τροχόσπιτα, αποθήκες, έως και μικρές βιοτεχνίες και εργοστάσια. Η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και των αντιστροφέων κυμαίνεται από εκατοντάδες Watt έως και δεκάδες, ίσως εκατοντάδες kilo-Watt. Οι εγκαταστάσεις μπορεί να είναι είτε μονοφασικές, είτε τριφασικές, με παραλληλισμό πολλών αντιστροφέων.

Πρωτίστως πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς των φορτίων. Ένας τέτοιος υπολογισμός είναι ιδιαίτερα σύνθετος και πολυπαραγοντικός. Σημαντικότερο μέτρο είναι η ονομαστική ισχύς των συσκευών. Αθροίζοντας την ονομαστική ισχύ όσων συσκευών θα τροφοδοτούνται από το φωτοβολταϊκό σύστημα προσδιορίζεται η μέγιστη δυνατή ισχύς που θα κληθεί ο αντιστροφέας να παρέχει. Συχνά όμως, η τιμή αυτού του υπολογισμού είναι πολύ μεγάλη καθώς υποθέτει ταυτόχρονη χρήση όλων των συσκευών. Οπότε η μέγιστη ισχύς ισούται με το άθροισμα της ονομαστικής ισχύς των συσκευών που χρησιμοποιούνται ταυτοχρόνως. Η ονομαστική ισχύς όμως δεν περιγράφει εξ ολοκλήρου τη συμπεριφορά της συσκευής. Στις προδιαγραφές του αντιστροφέα αναφέρεται η ονομαστική ισχύς σε VA, όπου αφορά την φαινόμενη ισχύ. Τα φορτία συνήθως έχουν συντελεστή ισχύος μικρότερο της μονάδας, και κατά συνέπεια η φαινόμενη ισχύς τους υπολογίζεται ως $S = \frac{P}{PF}$, όπου (S) η φαινόμενη ισχύς, (P) η ενεργός ισχύς και (PF) ο συντελεστής ισχύος. Τελικά η φαινόμενη ισχύς είναι αυτή που θα καθορίσει το μέγεθος του αντιστροφέα. Ταυτόχρονα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ισχύς εκκίνησης των

συσκευών. Οι πλείστοι αντιστροφείς αναφέρουν στις προδιαγραφές τους τη μέγιστη ισχύ τους, καθώς και τη διάρκεια όπου μπορούν να την προσφέρουν. Αυτή είναι συνήθως διπλάσια της ονομαστικής. Σε περίπτωση τροφοδοσίας μεγάλων ηλεκτροκινητήρων, όπου η ισχύς εκκίνησης είναι πολλαπλάσια της ονομαστικής, ο αντιστροφέας θα επιλεχθεί βάσει της μέγιστης ισχύς του και όχι της ονομαστικής, καθώς η ονομαστική μπορεί να φαίνεται επαρκής, αλλά η μέγιστη να μην είναι.

Η κατανάλωση των φορτίων καθορίζει το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύς των φωτοβολταϊκών καθώς και τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Μεγάλη σημασία έχει η χρονική περίοδος της κατανάλωσης. Ένα φορτίο όταν λειτουργεί την ημέρα, όπου υπάρχει παραγωγή, θα τροφοδοτηθεί χωρίς να υπάρχει ανάγκη για συσσώρευση, ενώ ένα φορτίο που τροφοδοτείται νύχτα απαιτεί τη χρήση του συσσωρευτή. Επίσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα η διαθέσιμη παραγωγή είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την εαρινή. Έτσι για την ίδια κατανάλωση, απαιτείται πολύ διαφορετική διαστασιολόγηση της εγκατάστασης. Ο υπολογισμός λοιπόν των καταναλώσεων στα αυτόνομα συστήματα γίνεται κατά ημέρα, και χωρίζεται σε χειμερινή και εαρινή περίοδο. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να καλύπτει την κατανάλωση σε περίοδο ημερών, δηλαδή η παραγωγή των ημερών με καλές καιρικές συνθήκες να καλύπτει τις ανάγκες και των ημερών με κακές καιρικές συνθήκες. Αντίστοιχα, η χωρητικότητα της μπαταρίας οφείλει να είναι τέτοια ώστε να επαρκεί για τις ημέρες με κακοκαιρία. Εάν βέβαια το σύστημα διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να υπερκαλύπτει τις ανάγκες σε περίοδο όπου η παραγωγή είναι πολύ περιορισμένη, τότε πιθανότατα παράγει ενέργεια πολλαπλάσια της ζητούμενης σε ευνοϊκές συνθήκες. Άρα το κόστος του θα είναι πολύ μεγάλο και η δεν θα γίνεται πλήρης αξιοποίηση. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν δύο λύσεις για την βέλτιστη αξιοποίηση του συστήματος. Ένας είναι η εγκατάσταση ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, ώστε να μην απαιτείται από την μπαταρία να επαρκεί για ολόκληρες μέρες με λιγοστή παραγωγή από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Και μία λύση είναι ο περιορισμός στις καταναλώσεις όταν προβλέπεται πως οι καιρικές συνθήκες δεν θα είναι ευνοϊκή.

Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη αποτελούν μία εναλλακτική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούνται από τον κινητήρα και την γεννήτρια, καθώς και συμπληρωματικά εξαρτήματα για το χειρισμό και τη προστασία του συστήματος. Οι κινητήρες είναι ως επί το πλείστον εμβολοφόροι, τετράχρονοι, βενζίνης, πετρελαίου ή αερίου κίνησης, και διατίθενται σε τεράστιο εύρος μεγεθών. Πολλοί αντιστροφείς παρέχουν και δυνατότητα φόρτισης μπαταριών από εξωτερική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και ταυτόχρονα τη δυνατότητα μεταγωγής, τροφοδοσίας δηλαδή των φορτίων απευθείας από την πηγή αυτή. Έτσι κατά την επιλογή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους πρέπει η ισχύς του να είναι επαρκής ώστε να τροφοδοτεί τα φορτία και ταυτόχρονα να φορτίζει τις μπαταρίες. Πρέπει φυσικά να ληφθεί υπόψη η απόδοση του φορτιστή καθώς και ο συντελεστής ισχύος του. Οι τιμές αυτές δεν αναγράφονται στα φύλλα προδιαγραφών και μπορούν να βρεθούν κυρίως ανεκδοτικά από δοκιμές χρηστών. Μια τυπική απόδοση για έναν φορτιστή είναι 85-90%, ενώ ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ξεκινάει από 0.7 και να ξεπερνάει το 0.9 με χρήση Διόρθωσης Συντελεστή Ισχύος (Power Factor Correction, PFC).

3.1.2 Ρυθμιστές Φόρτισης

Ρυθμιστής φόρτισης είναι η ηλεκτρονική διάταξη όπου λαμβάνει την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών και τη μετατρέπει στην τάση της μπαταρίας για φόρτιση. Για τη φόρτιση της μπαταρίας απαιτείται τα πλαίσια να παράγουν τάση μεγαλύτερη των μπαταριών ώστε η διαφορά μεταξύ των δύο να δημιουργεί ροή ρεύματος από τα πλαίσια προς τη μπαταρία. Αυτό όμως δεν μπορεί να συμβαίνει

ανεξέλεγκτα, διότι τα πλαίσια μπορεί να υπερβούν την ανώτερη τάση της μπαταρίας και να την καταστρέψουν. Επίσης, είναι βέβαιο πως η τάση της μπαταρίας δεν θα είναι ίση με τη τάση σημείου μέγιστης ισχύος (V_{mp}) των πλαισίων, άρα και η απόδοση των πλαισίων δεν θα είναι η μέγιστη δυνατή.

Η φθηνότερη και απλούστερη τεχνολογία ρυθμιστών φόρτισης είναι η PWM. Με αυτή τα πλαίσια πρέπει να έχουν τάση αντίστοιχη της μπαταρίας. Για παράδειγμα, σε ένα 12V σύστημα θα χρησιμοποιούνται πλαίσια των 36 κυψελών, με V_{mp} κοντά στα 18V, τάση ελαφρώς μεγαλύτερη από τα 14.5V μιας πλήρους φορτισμένης μπαταρίας. Αντίστοιχα για 24V συστήματα χρησιμοποιούνται πλαίσια των 72 κυψελών, και για 48V δύο πλαίσια των 72 κυψελών συνδεδεμένα εν σειρά.

Ο τρόπος λειτουργίας του PWM ρυθμιστή φόρτισης είναι ιδιαίτερα απλοϊκός. Περιλαμβάνει τρανζίστορ τύπου MOSFET τα οποία ελέγχουν τη ροή ρεύματος από τα πλαίσια προς τη μπαταρία. Όσο η μπαταρία βρίσκεται σε τάση μικρότερη από την επιθυμητή, τα τρανζίστορ άγουν συνεχώς. Έτσι το μέγιστο ρεύμα ρέει προς την μπαταρία. Όταν η μπαταρία φθάσει την επιθυμητή τάση φόρτισης τότε στα τρανζίστορ εφαρμόζεται ένας παλμός μορφής PWM, με σκοπό την σταθερή τάση εξόδου, ώστε να μην υπερφορτωθεί η μπαταρία. Τα ελαττώματα αυτής της τεχνολογίας είναι πως δεν επιτυγχάνεται η φόρτιση στο σημείο μέγιστης ισχύος, καθώς και η χαμηλής τάσης υψηλού ρεύματος τροφοδοσία από τα πάνελ. Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα να παράγουν τάση μεγαλύτερη από αυτή της μπαταρίας, κι έτσι η περίσσεια χαραμίζεται, καθώς συνδέοντας την μπαταρία με τα πλαίσια η τάση στα άκρα και των δύο είναι όμοια. Όπως φαίνεται στην καμπύλη I-V με τη χαμηλότερη τάση διατηρείται το ίδιο ρεύμα. Επίσης, με τη θέρμανση των κυψελών προκαλείται και μείωση της τάσης, όπου υπάρχει ο κίνδυνος η V_{mp} των πλαισίων να είναι πλέον μικρότερη της τάσης της μπαταρίας, και το ρεύμα να μειωθεί ραγδαία. Λαμβάνοντας υπόψη και την πτώση τάσης τα καλώδια και το ρυθμιστή φόρτισης, είναι εμφανές πως ένας ρυθμιστής PWM μπορεί να προκαλέσει μεγάλες απώλειες στην απόδοση, καθώς η τάση στα άκρα των πλαισίων δεν είναι αυτή του σημείου μέγιστης ισχύος. Σε πολύ μικρές εγκαταστάσεις βέβαια το χαμηλό κόστος των ρυθμιστών αυτών αποτελεί κριτήριο για την επιλογή τους.

Η τεχνολογία που δημιουργήθηκε για να ξεπεράσει τις αδυναμίες των PWM είναι η “Maximum Power Point Tracking”. Όπως είναι εμφανές από τον τίτλο της, στόχος της είναι η επίτευξη του σημείου μέγιστης ισχύος, άρα η μεγιστοποίηση της απόδοσης. Η τάση των πλαισίων είναι πλέον αισθητά μεγαλύτερη από αυτή των μπαταριών και μετατρέπεται στην επιθυμητή. Κυκλώματα MPPT χρησιμοποιούνται συχνά, πέρα από τους ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών, και στα inverter δικτύου. Ακόμα, η εταιρία EG4 πρόσφατα κυκλοφόρησε και αντλία θερμότητας με ενσωματωμένο MPPT. Δηλαδή μπορεί να λειτουργεί με τροφοδοσία απευθείας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, χωρίς να χρειάζεται κάποιο εξωτερικό εξάρτημα. Γενικά η τεχνολογία MPPT χρησιμοποιείται πλέον στις πλείστες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης λαμβάνει μία τάση εισόδου μεγαλύτερη από την τάση των μπαταριών. Η υψηλή αυτή τάση μετατρέπεται σε υψηλής συχνότητας AC, η οποία μετασχηματίζεται αργότερα ξανά σε DC. Η συχνότητα του AC ρεύματος έχει συχνότητα της τάξεως των δεκάδων kHz για την επίτευξη υψηλής απόδοσης με τη χρήση μικρότερων εξαρτημάτων, κατ’ αντίστοιχία με όλα τα σύγχρονα παλμοτροφοδοτικά και τους μετατροπείς τάσης. Όλοι οι σύγχρονοι MPPT ρυθμιστές φόρτισης χρησιμοποιούν μικροελεγκτές, σε αντίθεση με τους κοινούς μετατροπείς τάσης, καθώς η τα φωτοβολταϊκά πλαίσια όπου τους τροφοδοτούν, αλλά και οι μπαταρία, μεταβάλουν διαρκώς την τάση τους, Έτσι ο ρυθμιστής πρέπει διαρκώς να εντοπίζει το μεταβαλλόμενο σημείο μέγιστης ισχύος. Επίσης οι ρυθμιστές είναι κατασκευασμένοι για να λειτουργούν με μπαταρίες διαφορετικής χημείας και τάσης,

ενώ έχουν και ρυθμιζόμενη τάση φόρτισης.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης όπου αφορούν το σχεδιασμό της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι:

- Μέγιστη Τάση Εισόδου
- Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου
- Περιοχή Λειτουργίας
- Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης
- Ονομαστική Τάση Μπαταρίας

Η Μέγιστη Τάση Εισόδου είναι η μέγιστη τάση της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων όπου μπορεί να ανεχθεί ο ρυθμιστής φόρτισης. Εάν αυτή η τάση ξεπεραστεί είναι πιθανό να καταστρέψει τον ρυθμιστή, ακόμα και εάν δεν βρίσκεται σε λειτουργία, καθώς ξεπερνά την ανοχή των στοιχείων, όπως πυκνωτές, δίοδοι και τρανζίστορ από τα οποία αποτελείται. Η μέγιστη τάση της συστοιχίας υπολογίζεται από το γινόμενο της τάσης ανοιχτοκυκλώματος των πλαισίων, επί τον αριθμό των πλαισίων συνδεδεμένων εν σειρά, επί τον θερμικό συντελεστή στην ελάχιστη θερμοκρασία όπου θα εκτεθούν τα πλαίσια.

Το Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου είναι το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων όπου μπορεί να ανεχθεί ο ρυθμιστής φόρτισης. Αυτό δεν θα προκαλέσει απαραίτητα βλάβη στον ρυθμιστή, καθώς ο ίδιος ρυθμίζει πόσο ρεύμα ρέει από τα πλαίσια, είναι όμως συνετό, για την αποδοτική λειτουργία του να μην ξεπερνιέται. Το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας υπολογίζεται από το γινόμενο του ρεύματος βραχυκυκλώματος των πλαισίων, επί τον αριθμό των παράλληλα συνδεδεμένων, επί το θερμικό συντελεστή στη μέγιστη θερμοκρασία όπου θα αναπτύξουν οι κυψέλες.

Περιοχή Λειτουργίας αναφέρουν κάποιοι ρυθμιστές φόρτισης ως το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο σημείο μέγιστης ισχύος, για τη βέλτιστη απόδοση του ρυθμιστή. Αυτή τυπικά είναι μεγαλύτερη από την τάση μπαταρίας, ή την τάση εξόδου για τα inverter δικτύου, και λίγο μικρότερη από τη μέγιστη τάση εισόδου.

Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης είναι το μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορεί να ρέει προς τη μπαταρία. Αυτό είναι και το κύριο χαρακτηριστικό των ρυθμιστών φόρτισης καθώς ορίζει τη μέγιστη ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Ονομαστική Τάση Μπαταρίας είναι οι επιτρεπτές τιμές της ονομαστικής τάσης της μπαταρίας. Συνήα οι ρυθμιστές φόρτισης είναι κατασκευασμένοι ώστε να λειτουργούν με μπαταρίες όπου έχουν ονομαστική τάση 12V/24V/48V, και τα περισσότερα μοντέλα μπορούν να λειτουργήσουν σε όλες αυτές τις τάσεις.

Τέλος, στις προδιαγραφές των ρυθμιστών φόρτισης προσδιορίζονται διαφορετικές τάσεις φόρτισης. Οι ονομασίες αυτών είναι: bulk, absorption, float, equalization. Αυτές θα εξηγηθούν στο κεφάλαιο μπαταρίες.

BlueSolar Charge Controller	MPPT 150/35	MPPT 150/45
Battery voltage	12 / 24 / 48V Auto Select (software tool needed to select 36V)	
Rated charge current	35A	45A
Nominal PV power 1a, b)	35A 12V: 500W / 24V: 1000W / 36V: 1500W / 48V: 2000W 45A 12V: 650W / 24V: 1300W / 36V: 1950W / 48V: 2600W	
Max. PV short circuit current 2)	40A	50A
Maximum PV open circuit voltage	150V absolute maximum coldest conditions 145V start-up and operating maximum	
Maximum efficiency	98%	
Self-consumption	12V: 20 mA 24V: 15 mA 48V: 10mA	
Charge voltage 'absorption'	Default setting: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6V (adjustable)	
Charge voltage 'float'	Default setting: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2V (adjustable)	

Σχήμα 3.1: Victron BlueSolar Specs [7]

3.1.3 Μπαταρίες

Η μπαταρία, ή αλλιώς ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι μία συσκευή όπου αποθηκεύει χημική ενέργεια και την μετατρέπει σε ηλεκτρική κατά την εκφόρτιση. Αντίστοιχα, κατά την φόρτιση καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέποντας την σε χημική. Χρησιμοποιώντας τον όρο “μπαταρία” συχνά αναφερόμαστε σε μία συστοιχία πολλαπλών στοιχείων. Το κάθε στοιχείο αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια και ενδιάμεσα τους υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης. Αυτά τα δύο ηλεκτρόδια, ανιόν και κατιόν, τα οποία στο εξωτερικό της μπαταρίας εμφανίζονται ως δύο πόλοι δημιουργούν μία διαφορά δυναμικού. Το στοιχείο της μπαταρίας λοιπόν λειτουργεί ως μία πηγή τάσης, κι εμφανίζει μία εσωτερική αντίσταση.

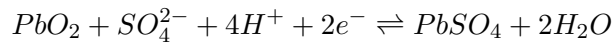
Δομικά, τα στοιχεία της μπαταρίας αποτελούνται από ένα περίβλημα, συνήθως πλαστικό, γυαλί ή μέταλλο, όπου στο εσωτερικό βρίσκονται τα δύο ηλεκτρόδια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με τους ακροδέκτες (πόλους) στο εξωτερικό του περιβλήματος. Συχνά στο περίβλημα υπάρχει και ένα καπάκι πλήρωσης για τις ανοικτού τύπου μπαταρίες ή μία βαλβίδα εκτόνωσης για τις κλειστού τύπου μπαταρίες. Σύνηθες επίσης είναι πολλά στοιχεία να συσκευάζονται σε ένα περίβλημα, όπως για παράδειγμα οι μπαταρίες αυτοκινήτου.

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για μία μπαταρία φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η μακροζωία, η μεγάλη χωρητικότητα και φυσικά το χαμηλό κόστος. Δεν δίνεται λοιπόν μεγάλη έμφαση σε χαρακτηριστικά όπως το βάρος, και ο όγκος, όπου απασχολούν τις φορητές συσκευές, ούτε και στην ισχύ όπου απασχολεί εφαρμογές που αφορούν εργαλεία, οχήματα κ.α. Οι χημείες όπου κυριαρχούν στην αγορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι από τις πιο ογκώδης, βαριές και μικρής ισχύος, αλλά παράλληλα προσφέρουν πολύ μεγάλη αριθμών κύκλων φόρτισης και είναι και από τις λιγότερο δραστικές, άρα και πιο ασφαλείς.

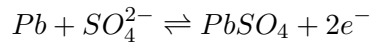
Οι χημείες μπαταριών όπου χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι Μολύβδου-Οξέος (lead-acid) καθώς και οι Λιθίου-Σιδήρου-Φωσφατίου (LiFePO₄). Στις μπαταρίες μολύβδου διακρίνουμε τρεις κατηγορίες, βάσει της μορφής του ηλεκτρολύτη, Υγρού Τύπου (Flooded) όπου ο ηλεκτρολύτης έχει υγρή μορφή και μάλιστα απαιτεί περιοδική πλήρωση υγρών, AGM (Absorbed Glass Matt) όπου ο ηλεκτρολύτης είναι εμποτισμένος σε πορώδες υλικό από ίνες γυαλιού, και οι GEL, όπου ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται σε ζελατινώδη μορφή όπως το όνομα προδίδει.

Τα στοιχεία Μολύβδου-Οξέος είναι δημοφιλή λόγω του χαμηλού κόστους τους, αποτέλεσμα της ευρείας διαθεσιμότητας του μολύβδου. Εφευρέθηκαν το 1859, και αποτέλεσαν την πρώτη επαναφορτιζόμενη

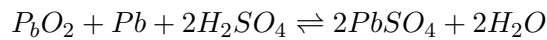
μπαταρία του εμπορίου. Από τότε χρησιμοποιούνται ευρέως και μάλιστα είναι η μοναδική χημεία μπαταρίας σήμερα όπου ανακυκλώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Σε σύγκριση με τις πιο σύγχρονες μπαταρίες λιθίου μοιάζουν παρωχημένες. Έχουν πολύ μεγάλο όγκο και βάρος, λιγότερους κύκλους ζωής, μικρότερο ρυθμό φόρτισης-εκφόρτισης, και γενικότερα το μοναδικό πλεονέκτημα τους είναι το χαμηλό κόστος και η διαθεσιμότητα. [8] Αντίδραση στο ανιόν:



Αντίδραση στο κατιόν:



Αντίδραση στο στοιχείο:



Η χημεία των Λιθίου Σιδήρου Φωσφατίου είναι πολύ πιο σύγχρονη, και αποτελεί συνέχεια των μπαταριών Ιόντων Λιθίου. Σε σχέση με τις μολύβδου-οξέος πετυχαίνει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά [9], ενώ σε σχέση με τις ιόντων λιθίου υστερεί σε πολλά χαρακτηριστικά που την καθιστούν δύσχρηστη για εφαρμογές υψηλής ισχύος ή φορητές. Τα στοιχεία LiFePO₄ είναι ιδιαίτερα ασφαλή, καθώς η χημική τους σύσταση δεν προκαλεί πυρκαγιές όπως οι υπόλοιπες μπαταρίες λιθίου, κι έχει και μεγαλύτερη ανοχή στις ακραίες θερμοκρασίες. Επίσης δεν περιλαμβάνει ή έχει μικρότερη περιεκτικότητα σε σπάνια μέταλλα, όπως Κοβάλτιο και Νικέλιο, καθιστώντας την οικονομικότερη, πιο εύκολα διαθέσιμη και λιγότερο επιβλαβή προς το περιβάλλον.

Αντίδραση:

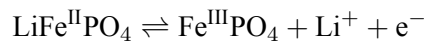


Table I The comparison between rechargeable batteries

Type	Lead-acid battery	NiCad battery	NiMH battery	LiCoO ₂ battery	LiMn ₂ O ₄ battery	LiFePO ₄ battery
Nominal Operating Voltage	2V	1.2V	1.2V	3.7V	3.7V	3.3V
Patent protection	No	No	No	No	No	Yes
Price	1	2	2.4	4	6	>10
Security	Good	Good	Good	Bad	Middle	Good
Green product	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Memory effect	No	Yes	Yes	No	No	No
Energy efficiency	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Cycle life	400	500	500	>500	>500	>2000
Charge time	8Hours	1.5 Hours	4 Hours	2-4 Hours	2-4 Hours	<2 Hours
Self discharge	20%/Month	30%/Month	35%/Month	10%/Month	10%/Month	8%/Month

Σχήμα 3.2: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μπαταριών

3.1.4 Συστοιχίες Μπαταριών

Μια μπαταρία, όπως αναφέρθηκε στην αρχή, συχνά είναι μια συστοιχία μεμονωμένων στοιχείων. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα οι επικρατέστερες τάσεις λειτουργίας των ρυθμιστών φόρτισης και των inverter είναι τα 12/24/48 Volt. Τελευταία αναπτύσσονται όλο και περισσότερα συστήματα υψηλής τάσης, όπου χρησιμοποιώντας πολλά στοιχεία λιθίου σε σειρά, κατασκευάζουν μπαταρίες με τάση περί τα 400V ή και 600V. Αυτές συνήθως αποτελούν μέρος μιας σειράς προϊόντων ενός κατασκευαστή, δηλαδή η μπαταρία είναι συμβατή μόνο με το αντίστοιχο inverter. Το πλεονέκτημα της υψηλής τάσης είναι τα χαμηλά ρεύματα, καθώς και η απλοποίηση του κυκλώματος του inverter, αφού η τάση της μπαταρίας είναι αντίστοιχη της AC τάσης εξόδου, και δεν απαιτούνται μεγάλοι μετασχηματιστές, ενώ είναι πιο εύκολη και η υλοποίηση του κυκλώματος ανάδρασης.

Η συστοιχία χαρακτηρίζεται από τα ίδια μεγέθη με τα στοιχεία, αν και συνήθως αναφέρονται η ονομαστική τάση, χωρητικότητα σε kWh, και ρυθμός φόρτισης-εκφόρτισης σε kW. Επίσης ενδιαφέρον έχουν οι τάσεις φόρτισης, ιδιαίτερα στις μολύβδου, όπου η φόρτιση γίνεται σε πολλαπλά στάδια. Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά μίας μπαταρίας υψηλής τάσης της Huawei.

Οι μπαταρίες μολύβδου είναι ιδιαίτερα απλοϊκές, καθώς αποτελούνται αποκλειστικά από όμοια στοιχεία σε σειρά, χωρίς κάποιο πρόσθετο εξάρτημα. Το πρόβλημα που γεννάται είναι πως δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να εποπτεύεται το κάθε επιμέρους στοιχείο. Καθώς η τάση είναι η καλύτερη ένδειξη για το βάθος εκφόρτισης του στοιχείου είναι σημαντικό να τη γνωρίζουμε για προστασία των στοιχείων από υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση. Το σύστημα γνωρίζει μόνο την τάση ολόκληρης της μπαταρίας, οπότε μπορεί να υπολογίσει τη τάση του κάθε επιμέρους στοιχείου μόνο όταν αυτά έχουν την ίδια τάση. Εάν κάποιο στοιχείο εμφανίσει διαφορά τάσης, τότε είναι πιθανό να καταστραφεί. Μάλιστα, η διαφορά τάσης μεταξύ των στοιχείων είναι μια σαφής ένδειξη κακής υγείας της μπαταρίας. Για να επιτευχθεί η ομοιογένεια αυτή πρέπει πρωτίστως τα στοιχεία να είναι όσο το δυνατόν όμοια. Δηλαδή να είναι κατασκευασμένα μαζί και να χρησιμοποιούνται πάντα μαζί, υπό τις ίδιες συνθήκες (π.χ. να μην βρίσκεται κάποιο στοιχείο σε πιο θερμό περιβάλλον). Επειδή όμως τυχόν μικρές διαφορές προκαλούνται με το πέρασ του χρόνου, χρησιμοποιείται η μέθοδος “equalization”. Τα στοιχεία μολύβδου θεωρούνται πλήρως φορτισμένα στα 2.4V περίπου. Μπορούν όμως, ανά αραιά χρονικά διαστήματα και για μικρή διάρκεια (π.χ. μισή ώρα κάθε 1-2 μήνες) να φορτιστούν σε μεγαλύτερη τάση. Στην περίπτωση αυτή, κατά την εφαρμογή της μεγαλύτερης τάσης στα άκρα τους θα “βράσουν”, θα αρχίσουν δηλαδή να εξατμίζουν τον ηλεκτρολύτη και να παράγουν θερμότητα. Με τη λήξη της διαδικασίας, θα επανέλθουν σε κατάσταση ηρεμίας, στα 2.4V. Έτσι, σε μία συστοιχία εάν εφαρμόσουμε μία υψηλή τάση φόρτισης, τα πλήρως φορτισμένα στοιχεία θα παραμείνουν σε αυτήν την κατάσταση, ενώ αυτά με το χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης θα έχουν την ευκαιρία να φορτιστούν πλήρως.

Οι συστοιχίες των μπαταριών μολύβδου αποτελούνται από 6, 12 ή 24 στοιχεία, για να αποδώσουν 12, 24 ή 48 Volt ονομαστικής τάσης αντίστοιχα. Στο εμπόριο κυκλοφορούν μεμονωμένα στοιχεία με χωρητικότητα συνήθως πάνω από 150Ah και ξεπερνούν τις 4000Ah, κυκλοφορούν επίσης 12V μπαταρίες, όπου αποτελούνται από 6 στοιχεία σε σειρά, με χωρητικότητα από μερικά Ah έως και 300Ah. Οι 12V μπαταρίες προσφέρουν ευκολία στην εγκατάσταση, και μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να αποδώσουν 24 ή 48 Volt. Για τις μικρές τους χωρητικότητες οφείλεται το μεγάλος βάρος που αποκτούν φθάνοντας στις μεγαλύτερες χωρητικότητες. Λιγοστοί κατασκευαστές παράγουν και μπαταρίες των 6V και κανείς δεν γνωρίζει γιατί, αλλά μαγκιά τους. Η παράλληλη σύνδεση όμοιων μπαταριών είναι δυνατή,

αν και προτιμάται η χρήση μεγαλύτερης μπαταρίας, από παραλληλισμό μικρότερων.

Οι μπαταρίες λιθίου είναι πιο σύνθετες από τις μολύβδου καθώς απαιτούν σύστημα διαχείρισης (BMS, Battery Management System). Ο λόγος είναι πως οι μπαταρίες λιθίου είναι πολύ πιο ευαίσθητες στην υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση. Εάν ένα στοιχείο ξεπεράσει τις οριακές τάσεις (συνήθως 2.5V-3.6V για τις LiFePO₄) θα παραμορφωθεί και θα αλλοιωθεί μόνιμα. Ένα τυπικό σύστημα BMS συνδέεται σε κάθε στοιχείο μετρώντας την τάση του. Επίσης συνδέεται σε έναν από τους δύο πόλους της μπαταρίας, συνήθως τον αρνητικό, και μετράει το ρεύμα που ρέει από και προς την μπαταρία. Διαθέτει MOSFET με τα οποία μπορεί να αποτρέψει την φόρτιση της μπαταρίας όταν αυτή φτάσει τη μέγιστη τάση, και την εκφόρτιση όταν φτάσει στην ελάχιστη τάση. Επίσης αποτρέπει τη ροή πολύ μεγάλου ρεύματος, όπου υπερβαίνει τα όρια της μπαταρίας. Στα πιο σύγχρονα “έξυπνα” BMS όλες αυτές οι τιμές τάσεων και εντάσεων είναι ρυθμιζόμενες. Έτσι ένα BMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικά μοντέλα και διαφορετικό πλήθος στοιχείων.

Για να επιτευχθούν οι συνήθειες τάσεις χρησιμοποιούνται 4 στοιχεία των 3.2V σε σειρά για τη δημιουργία μίας 12V μπαταρίας. Αντίστοιχα χρησιμοποιούνται 8 και 16 στοιχεία για τάσεις 24V και 48V. Στην περίπτωση των μπαταριών υψηλής τάσης, ο αριθμός των στοιχείων ξεπερνάει τα 100, όπως και στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα παραλληλισμού των στοιχείων, κάτι που συμβαίνει συχνά με τα μικρότερα, κυλινδρικά στοιχεία. Τα στοιχεία παραλληλίζονται, και αυτές οι ομάδες παράλληλων στοιχείων συνδέονται σε σειρά. Βέβαια, πιο συχνά χρησιμοποιούνται τα μεγάλα πρισματικά στοιχεία για να αποφευχθεί ο παραλληλισμός. Υπάρχει και η δυνατότητα παραλληλισμού μπαταριών. Δηλαδή πολλές μπαταρίες (στοιχεία και BMS) να συνδεθούν παράλληλα. Κι αυτή η τεχνική όμως αποφεύγεται διότι δημιουργείται μια ανισορροπία στο ρεύμα που ρέει προς κάθε μπαταρία, λόγω μικρών διαφορών στις παρασιτικές αντιστάσεις.

Όσον αφορά την εξισορρόπηση των στοιχείων λιθίου χρησιμοποιείται εξωτερικό κύκλωμα “balancer”, το οποίο μπορεί και να βρίσκεται ενσωματωμένο στο BMS. Αυτό συνδέεται επίσης σε κάθε στοιχείο μετρώντας την τάση κάθε στοιχείου. Στην απλοϊκότερη μορφή του, κατά την φόρτιση της μπαταρίας, όταν ένα στοιχείο ξεπερνάει σε τάση τα υπόλοιπα, το balancer συνδέει σε αυτό ένα μικρό ωμικό φορτίο, εκφορτίζοντας αργά το συγκεκριμένο στοιχείο, ώστε να φθάσει την τάση των υπολοίπων. Με την εφαρμογή αυτού του είδους εξισορρόπησης τα στοιχεία αποκτούν την ίδια τάση όταν θα είναι πλήρως φορτισμένα, επιτυγχάνεται το λεγόμενο “top balance” δηλαδή να είναι όλα ταυτοχρόνως 100% φορτισμένα. Το πρόβλημα είναι, πως μικρές διαφορές στην χωρητικότητα θα εκδηλωθούν στην πλήρη εκφόρτιση, όπου τα στοιχεία με μικρότερη χωρητικότητα θα εκφορτιστούν πρώτα. Κάτι τέτοιο προκαλεί σύγχυση, καθώς όταν μειώνεται η τάση ενός μόνο “αδύναμου” στοιχείου, η τάση της συστοιχίας ολόκληρης μειώνεται ελάχιστα. Το BMS όμως απενεργοποιεί την εκφόρτιση για προστασία του εκφορτισμένου στοιχείου, πράγμα που μπορεί να απενεργοποιήσει το σύστημα απότομα. Η εξέλιξη ήρθε με τη μορφή του “active balancing” όπου το κύκλωμα balancer μπορεί να εκφορτίζει το μεγαλύτερο σε τάση στοιχείο για να φορτίσει το μικρότερο σε τάση στοιχείο. Έτσι η διαδικασία της εξισορρόπησης είναι διαρκής και τα στοιχεία διατηρούν όμοια τάση σε κάθε σημείο της φόρτισης και εκφόρτισης τους.

3.1.5 Χαρακτηριστικά Μπαταριών

Οι μπαταρίες, όντας μέσα αποθήκευσης ενέργειας και πηγές τάσης χαρακτηρίζονται από διάφορα μεγέθη. Κάποια από τα κυριότερα, τα οποία φαίνονται συνήθως πρώτα στα φύλλα προδιαγραφών είναι:

- Ονομαστική Τάση
- Χωρητικότητα
- Εσωτερική Αντίσταση
- Ρυθμός Φόρτισης
- Ρυθμός Εκφόρτισης

Και υπάρχουν και άλλα μεγέθη που περιγράφουν τη χρήση της μπαταρίας:

- Βάθος Εκφόρτισης
- Διάρκεια Ζωής σε Κύκλους
- Μέγιστη/Ελάχιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας
- Τάσεις Φόρτισης
- Ρυθμός αυτο-εκφόρτισης

Και άλλα πολλά τα οποία συχνά περιγράφονται και με διαγράμματα. Επίσης συχνά κάποια μεγέθη μεταξύ τους αλληλοεξαρτώνται, όπως οι κύκλοι ζωής με το βάθος εκφόρτισης, ή η χωρητικότητα με το ρυθμό εκφόρτισης.

Ονομαστική τάση είναι η τάση που έχει το στοιχείο κατά την κατασκευή του, σε κατάσταση ηρεμίας (μηδενικό ρεύμα). Αυτή η τάση εξαρτάται αποκλειστικά από τη χημεία της μπαταρίας. Έτσι, κάθε στοιχείο μολύβδου έχει ονομαστική τάση κοντά στα 2V, ενώ κάθε στοιχείο LiFePO₄ έχει κοντά στα 3.2V. Ενδεικτικά, για άλλες δημοφιλείς χημείες συναντούμε: Αλκαλικές - 1.5V, Λιθίου (μη επαναφορτιζόμενες, τάπες) 3V, Νικελίου Καδμίου ή Νικελίου Υδρομετάλλου 1.2V, Λιθίου Ιόντων ή Λιθίου Πολυμερικές 3.6V. Η τάση αυτή, στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, συχνά υποδεικνύει επίπεδο φόρτισης κοντά στο 30-40%, και οι μπαταρίες μπορούν να φορτιστούν σε υψηλότερες τάσεις.

Η χωρητικότητα εκφράζει το φορτίο που μπορεί να αποδώσει μία μπαταρία. Μετριέται σε Ah (αμπερώρια, Ampere-hours) δηλαδή στο γινόμενο του ρεύματος εκφόρτισης επί το χρόνο εκφόρτισης. Ένα αμπερώριο ισοδυναμεί με 3600 Coulomb, αλλά πουθενά δεν χρησιμοποιούνται τα Coulomb για να εκφραστεί η χωρητικότητα των μπαταριών. Η χωρητικότητα σχετίζεται με το μέγεθος του στοιχείου της μπαταρίας. Μπορεί για παράδειγμα να κατασκευαστεί μια μπαταρία λιθίου για ένα smartwatch με χωρητικότητα 100mAh, και μια μπαταρία για φωτοβολταϊκό σύστημα με χωρητικότητα 1000Ah. Επίσης, συχνά, ιδιαίτερα στις μπαταρίες μολύβδου, η χωρητικότητα εκφράζεται σε σχέση με το ρυθμό εκφόρτισης, καθώς η εσωτερική αντίσταση των μπαταριών προκαλεί κάποια εσωτερική κατανάλωση, και όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που καταναλώνεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η εσωτερική κατανάλωση. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται η χωρητικότητα ενός στοιχείου Sunlight SOPzV 1360. Η χωρητικότητα με το πέρασ του χρόνου και με τη χρήση μειώνεται. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ποσοστό μείωσης

#	Item	Parameter	Remark	
1	Nominal Capacity	280.0 Ah	(25±2)°C, Standard charge and discharge	
2	Typical Voltage	3.2 V		
3	AC Impedance Resistance(1KHz)	≤0.25 mΩ		
4	Standard charge and discharge	Charge / discharge current	0.5 C/0.5 C	
		Cut off voltage of charge / discharge	3.65 V/2.5 V	
5	Maximum charge / discharge current	Continuous charge / discharge	1 C/1 C	According to continuous / pulse charge and discharge ammeters
		Pulse charge / discharge (30s)	2 C/2 C	
6	Recommended scope of SOC	10%~90%	N.A.	
7	Charging Temperature	0 °C~55 °C	According to continuous / pulse charge and discharge ammeters	
8	Discharging Temperature	-20 °C~-55 °C		

No.	Item	Requirements	Measuring Procedure
1	Rate discharge performance at 25°C	Discharge capacity/nominal capacity×100% A) 0.5C (A) ≥100% B) 1.0C (A) ≥98%	After standard charge and 1h rest, discharge to 2.5V cutoff with the current of 0.5 C (A), 1.0C (A), respectively. If the discharge capacity fails to meet the technical requirements, this test is allowed to be repeated three times
2	Discharge performance at different temperature	Discharge capacity/nominal capacity×100% A)55°C≥95% (Cutoff 2.5V) B)-20°C≥70% (Cutoff 2.0V)	Measure the initial capacity and state of the battery: A) after standard charge and 5h rest at 55°C, discharge to 2.5V cutoff with the current of 0.5C(A); B) after standard charge at 25±2°C and 24h rest at -20°C±2°C, discharge to 2.0V cutoff with the current of 0.5C(A).
3	The capacity retention and recovery at 25°C	Capacity Retention ≥ nominal capacity×95% Capacity Recovery ≥ nominal capacity×97%	Measure the initial capacity and state of the battery, after standard charge and stored for 28 days, discharge to 2.5V cutoff with the current of 0.5C (A), calculate the remaining capacity, the retention can be expressed as a percentage of nominal capacity. After standard charged and 30mins rest, calculate the discharging capacity (Ah), the recovery can be expressed as a percentage of nominal capacity. The recovery is measured with discharge current 0.5C (A) with 2.5V cut-off at (25±2) °C.
4	cycle life at 25°C	≥6000 cycle @0.5C/0.5C	Under the 300kgf clamp, after standard charged and 30mins rest, discharge to 2.5V cutoff with the current of 0.5C(A) at (25±2) °C, and then start the next cycle, end with the capacity decreasing to 80% of the

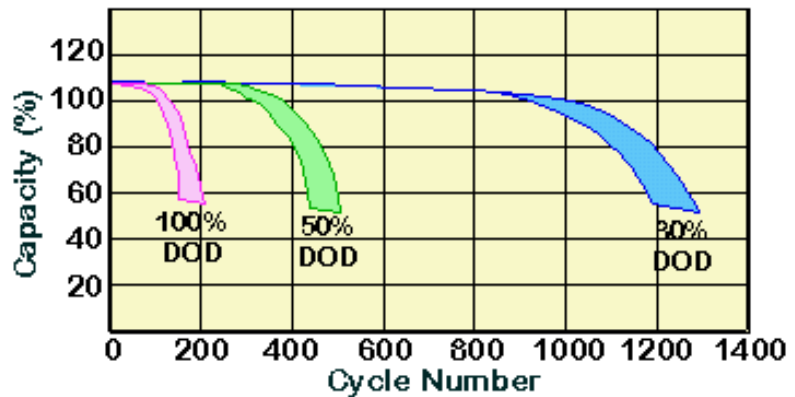
#	Item	Parameter	Remark	
9	Storage temperature	Short term (within 1 month)	-20°C~45°C	N.A.
		Long term (within 1 year)	0°C~35°C	
10	Storage humidity range	≤90%		
11	Self-discharge rate per month	≤3%/month	Temperature: (25±2)°C; Storage scope of SOC: 30%~50%SOC	
12	Dimension	Width	173.7 ±0.5 mm	Refer to Appendix I
13		Thickness (under 300±20 kgf, 30%~40% SOC)	72.0 ±1.0 mm	
		Average thickness (200 pcs, under 300±20 kgf, 30%~40% SOC)	72.0 ±0.5 mm	
14		High (total)	207.5 ±0.5 mm	
15		High (subject)	204.6 ±0.5 mm	
16		Tab Distance	123.0±0.3 mm	
17	Battery weight	5.42±0.3 kg		

5	cycle life at 45°C	≥2500 cycle @0.5C/0.5C	initial capacity. The number of cycles is defined as the cycle life of the battery. Under the 300kgf clamp, after standard charged and 30mins rest, discharge to 2.5V cutoff with the current of 0.5C(A) at (45±2) °C, and then start the next cycle, end with the capacity decreasing to 80% of the initial capacity. The number of cycles is defined as the cycle life of the battery.
6	End of life management	capacity/nominal capacity <70%	During the use of the battery, the battery shall be stopped when the end of life regulations are exceeded.

Σχήμα 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων LF280K [10]

της χωρητικότητας μίας τυχαίας μπαταρίας μολύβδου σε σχέση με το βάθος εκφόρτισης. Οι σύγχρονες GEL μπαταρίες μπορούν να φθάσουν τους 3000 κύκλους με βάθος εκφόρτισης 50%, ενώ οι λιθίου φθάνουν τους 6000 κύκλους στο 80-90% βάθος εκφόρτισης.

C120	1360Ah
C48	1338Ah
C24	1242Ah
C12	1170Ah



(a) Χωρητικότητα σε σχέση με το ρυθμό εκφόρτισης

(b) Απώλεια Χωρητικότητας Συναρτήσεως του Βάθους Εκφόρτισης

Σχήμα 3.4: Μεταβολή Χωρητικότητας Μπαταριών Μολύβδου

Η εσωτερική αντίσταση είναι η αντίσταση που φέρουν τα μέρη της μπαταρίας. Ο τρόπος με τον οποίο μετριέται δεν έχει προτυποποιηθεί, κι έτσι είναι δύσκολο να συγκριθούν μεταξύ τους διαφορετικά μοντέλα. Στις μπαταρίες μολύβδου σπάνια μετριέται η εσωτερική αντίσταση, ενώ στις λιθίου μετριέται συχνότερα, καθώς η ομοιογένεια τους σε μία συστοιχία είναι σημαντική για την εξισορρόπηση των στοιχείων. Για τις μπαταρίες φωτοβολταϊκών, όπως φαίνεται στις προδιαγραφές των στοιχείων EVE LF280K παραπάνω, η αντίσταση είναι της τάξης των mΩ ή και δέκατα των mΩ.

Ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης εκφράζει το μέγιστο συνεχόμενο ή στιγμιαίο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, συχνά συναρτήσεως της χωρητικότητας. Η μονάδα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το C-rate, δηλαδή το πολλαπλάσιο της χωρητικότητας. Για μια μπαταρία 100Ah ο ρυθμός εκφόρτισης 1C ισοδυναμεί με 100A, 5C ισοδυναμεί με 500A και ο ρυθμός C10 ισοδυναμεί με 10A. Για κάποιες μπαταρίες, ιδιαιτέρως για τις λιθίου ιόντων, ο ρυθμός εκφόρτισης εκφράζεται απευθείας σε Αμπέρ. Η διευκόλυνση που φέρνει η μέτρηση σε C-rate είναι στον υπολογισμό της ισχύος σε συστοιχίες. Για τις μπαταρίες λιθίου σιδήρου φωσφαλτίου, τυπικός ρυθμός φόρτισης είναι το 0.5C, και ρυθμός εκφόρτισης 1C. Για τις μπαταρίες μολύβδου βαθιάς εκφόρτισης αυτός ο ρυθμός είναι κοντά στα 0.2C φόρτιση και 0.4C εκφόρτιση. Όλες οι μπαταρίες μπορούν να εκφορτίσουν και σε μεγαλύτερο ρυθμό για μικρά χρονικά διαστήματα, χωρίς ιδιαίτερη φθορά. Σε μπαταρίες αυτοκινήτου παρατηρούμε ένα άλλο μέγεθος, τα Cold Cranking Amps “CCA”, δηλαδή το στιγμιαίο ρυθμό εκφόρτισης για την εκκίνηση κινητήρων.

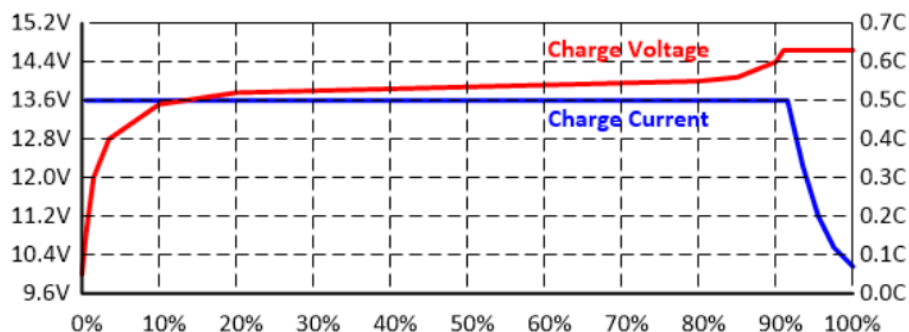
Το βάθος εκφόρτισης εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο αξιοποιείται κατά τη χρήση, ιδιαιτέρως στις μπαταρίες μολύβδου, όπου η ορθή χρήση προβλέπει η μπαταρία να φορτίζεται πλήρως πριν από κάθε χρήση. Έτσι ένα επίπεδο εκφόρτισης 40% για μια μπαταρία 1000Ah, η οποία είναι πλήρως φορτισμένη, σημαίνει την εκφόρτιση 400Ah από την μπαταρία. Το βάθος εκφόρτισης σχετίζεται άμεσα και με την τάση της μπαταρίας, αλλά και το ρυθμό εκφόρτισης όπως φαίνεται στα σχετικά διαγράμματα. Επίσης από τα διαγράμματα φαίνονται και δύο προβλήματα όπου αντιμετωπίζουν τα φωτοβολταϊκά και άλλα συστήματα στην εκτίμηση του βάθους εκφόρτισης της μπαταρίας, μέσω της τάσης της. Πρώτο, που αφορά όλες τις μπαταρίες, ο ρυθμός εκφόρτισης επηρεάζει την τάση της

μπαταρίας (λόγω εσωτερικής αντίστασης, αλλά και αντίστασης των καλωδίων, ακροδεκτών κτλ που προκαλούν πτώση τάσης). Δεύτερο, που αφορά τις μπαταρίες λιθίου σιδήρου φωσφαλτίου, η καμπύλη εκφόρτισης είναι αρκετά επίπεδη, έτσι η τάση μένει σταθερή, κοντά στα 3.2-3.3V ανά στοιχείο, μέχρις ότου φθάσει στο 90% βάθος εκφόρτισης. Για αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης μπαταριών (Battery Management System, BMS) μετρούν το ρεύμα που ρέει από και προς τις μπαταρίες, κι έτσι υπολογίζει πόσα αμπερώρια έχει εκφορτίσει η μπαταρία.

3.1.6 Φόρτιση Μπαταριών

Οι διαφορετικές χημικές συστάσεις μπαταριών έχουν και διαφορετική μεθοδολογία φόρτισης. Η τάση και το ρεύμα είναι τα μεγέθη που ελέγχονται από τον ρυθμιστή φόρτισης. Η τάση της μπαταρίας σε κατάσταση ηρεμίας είναι μικρότερη απ'ότι κατά την φόρτιση, όπως είναι λογικό λόγω των παρασιτικών αντιστάσεων, κάτι που λαμβάνεται υπόψη από τους φορτιστές. Επίσης, ιδιαίτερη σημασία έχει και η θερμοκρασία. Ιδιαίτερα στις μπαταρίες λιθίου η θερμοκρασία συχνά μετριέται από το BMS και η διαδικασία της φόρτισης δεν ξεκινά εάν η θερμοκρασία βρίσκεται εκτός των ορίων. Η θερμοκρασία δωματίου είναι κατάλληλη για όλες τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά κι έτσι συστήνεται να τοποθετούνται εντός των κτιρίων όπου γίνεται η εγκατάσταση.

Οι μπαταρίες λιθίου είναι απλές στην φόρτιση τους. Χρησιμοποιείται η μέθοδος συνεχούς ρεύματος - συνεχούς τάσης (Constant Current Constant Voltage, CCCV). Δηλαδή εφαρμόζεται ένα σταθερό ρεύμα, συνήθως έως 0.5C, ή προτιμότερα 0.2C για πιο αργή φόρτιση. Όταν η τάση της μπαταρίας φθάσει την τάση φόρτισης, 3.6V για τις LiFePO₄, τότε εφαρμόζεται σταθερή τάση. Σε αυτό το σημείο όμως η μπαταρία σε ηρεμία θα είχε μικρότερη τάση από 3.6V, έτσι η τάση διατηρείται σταθερή και η μπαταρία απορροφά φορτίο έως ότου φορτίσει πλήρως. Για αυτό και λέγεται για τις μπαταρίες λιθίου πως η φόρτιση έως το 80% της χωρητικότητας είναι πολύ ταχύτερη από τη φόρτιση μεταξύ 80-100%. Για τη μακροζωία των μπαταριών προτιμάται φόρτιση έως το 80-90% και όχι πλήρης φόρτιση. Σε αυτήν την περίπτωση η τάση φόρτισης ορίζεται λίγο χαμηλότερα (3.45V-3.50V) και η μέθοδος φόρτισης παραμένει ίδια. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων το ρεύμα δεν μπορεί να είναι σταθερό, και η πλήρης φόρτιση μπορεί να μην επιτευχθεί, λόγω καιρικών συνθηκών ή μεγάλων καταναλώσεων. Έτσι αυτές οι τιμές ρεύματος και τάσης ορίζονται ως μέγιστες.

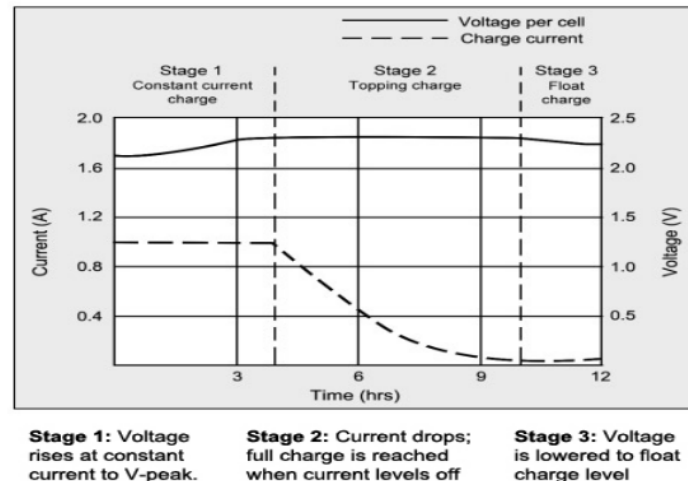


Σχήμα 3.5: Φόρτιση Μπαταρίας LiFePO₄

Οι μπαταρίες μολύβδου φορτίζονται σε στάδια. Σε αντίθεση με τις λιθίου εμφανίζουν ανοχή στην

υπερφόρτωση και ταυτόχρονα μεγαλύτερη εσωτερική αντίσταση. Επίσης οι μπαταρίες μολύβδου έχουν πολύ ταχύτερη αυτο-εκφόρτιση, οπότε ακόμα και μετά την πλήρωση τους καταναλώνουν ένα μικρό ρεύμα για την διατήρηση του φορτίου τους. Για τις μπαταρίες μολύβδου είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται η πλήρης φόρτιση, διότι όταν παραμένουν σε χαμηλό επίπεδο φόρτισης προκαλείται θειίκωση, σχηματίζονται δηλαδή μικροί θειικοί κρύσταλλοι στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα στάδια φόρτισης των μπαταριών μολύβδου είναι τα εξής:

- Bulk, το στάδιο αυτό είναι το πρώτο στάδιο και πρακτικά εφαρμόζει σταθερό ρεύμα (CC), το οποίο ιδανικά δεν ξεπερνάει το C10 για διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας.
- Absorption, το δεύτερο στάδιο με εφαρμογή σταθερής τάσης (CV). Η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από την τάση ηρεμίας της μπαταρίας, κυμαίνεται μεταξύ 2.30V-2.45V.
- Float, το τελευταίο στάδιο, όπου εφαρμόζεται πάλι σταθερή τάση, αλλά χαμηλότερη από του Absorption, στα 2.25V. Αυτή είναι η τάση ηρεμίας της μπαταρίας, η οποία καταναλώνει ένα πολύ μικρό ρεύμα λόγω αυτοεκφόρτισης.
- Equalization, το στάδιο αυτό αντικαθιστά το Absorption και όπως αναφέρθηκε παραπάνω εφαρμόζει τάση μεγαλύτερη από την τυπική 2.5V, με σκοπό την εξισορρόπηση των στοιχείων. Χρησιμοποιείται σπάνια για μικρά χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 3.6: Φόρτιση Μπαταρίας Μολύβδου

Όλες αυτές οι παράμετροι ορίζονται στον ρυθμιστή φόρτισης. Αυτές οι τάσεις μεταβάλλονται βάσει της θερμοκρασίας, καθώς και η απόδοση των μπαταριών μεταβάλλεται. Σε χαμηλή θερμοκρασία οι τάσεις μειώνονται, και η εσωτερική αντίσταση αυξάνεται, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες αυξάνεται η αυτοκατανάλωση και οι μπαταρίες κινδυνεύουν από υπερθέρμανση. Η χρήση μεταβολή των χαρακτηριστικών των μπαταριών δεν απασχολεί ιδιαίτερα την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκού συστήματος, ο εγκαταστάτης φροντίζει όμως οι μπαταρίες να βρίσκονται σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας.

3.1.7 Εκφόρτιση Μπαταριών

Η εκφόρτιση των μπαταριών χαρακτηρίζεται κυρίως από τον ρυθμό εκφόρτισης και το βάθος εκφόρτισης. Φυσικά αυτά τα μεγέθη δεν θα είναι ποτέ σταθερά, καθώς εξαρτώνται από τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης υπολογίζεται εύκολα κατά τη μελέτη της εγκατάστασης, ως η ισχύς του inverter διά την χωρητικότητα της μπαταρίας. Έτσι για ένα σύστημα με μπαταρία χωρητικότητας 10kWh και inverter ισχύος 5kW δεν μπορεί να ξεπεράσει το ρυθμό εκφόρτισης 0.5C. Το βάθος εκφόρτισης ρυθμίζεται βάσει της τάσης της μπαταρίας. Τα inverter έχουν μία ρυθμιζόμενη, ελάχιστη τάση, κάτω από την οποία απενεργοποιούνται ώστε να μην υπερεκφορτίσουν την μπαταρία. Στα πιο σύγχρονα συστήματα μάλιστα, τα inverter επικοινωνούν με το BMS των μπαταριών λιθίου, με Serial ή CAN δίαυλο, για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του βάθους εκφόρτισης των μπαταριών.

Οι μπαταρίες λιθίου αποδεικνύονται ανώτερες και απλοϊκότερες όσον αφορά την εκφόρτιση τους, καθώς μπορούν να εκφορτίζονται σχεδόν πλήρως χωρίς να εμφανίζουν αισθητή μείωση στο προσδόκιμο ζωής τους. Το βάθος εκφόρτισης ορίζεται στο 90%, και η τάση σε αυτό το σημείο είναι περίπου 2.9V-3.0V. Ο τυπικός ρυθμός εκφόρτισης είναι 0.5C, αν και το 1C μπορεί να επιτευχθεί, και σε μπαταρίες καλύτερης κατασκευής 2-3C είναι δυνατό. Υπό αυτές τις συνθήκες οι πλείστες μπαταρίες λιθίου μπορούν να διατηρήσουν το 80% της χωρητικότητας τους μετά από 3000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, ή ακόμα και περισσότερους κύκλους με λίγο πιο αυστηρά όρια.

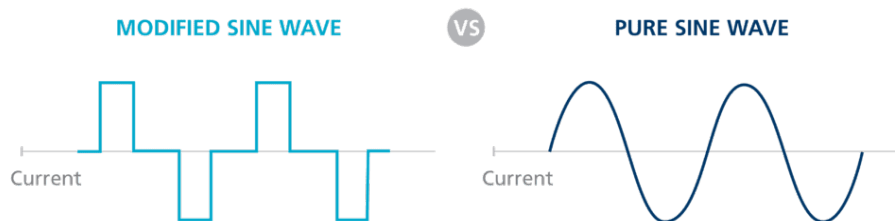
Οι μπαταρίες μολύβδου φθείρονται πιο αισθητά με την εκφόρτιση. Η πλήρης εκφόρτιση μπορεί να επιτευχθεί λίγες δεκάδες, ίσως εκατοντάδες φορές πριν την καταστροφή της μπαταρίας. Είναι σημαντικό για τη μακροζωία τους το βάθος εκφόρτισης να είναι πολύ μικρότερο. 50% βάθος εκφόρτισης θεωρείται το μέγιστο, ενώ συστήνεται να μην ξεπερνιέται το 30% για ακόμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

3.1.8 Inverter

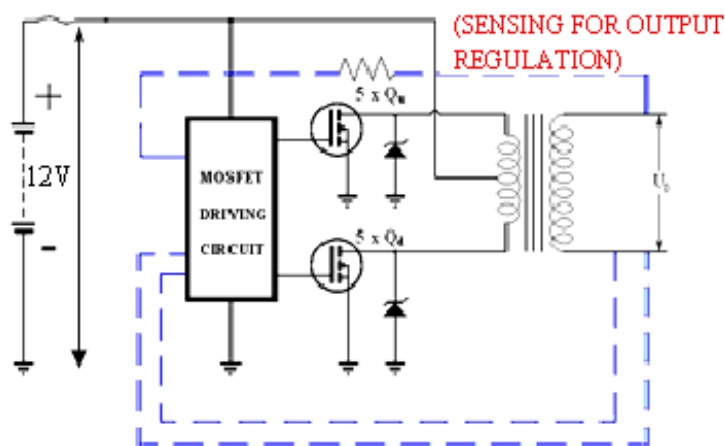
Ο αντιστροφέας (inverter) αξιοποιείται για να μετατρέψει την DC τάση της μπαταρίας σε AC τάση για χρήση από τις ηλεκτρικές συσκευές. Στόχος τους είναι η τάση εξόδου να έχει διαρκώς τη μορφή ενός απαραμόρφωτου ημιτόνου. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η ποικιλία των φορτίων. Υπάρχουν φορτία χωρητικά, επαγωγικά, ωμικά, ανορθωτές, ηλεκτροκινητήρες, και άλλα. Στις συσκευές η τροφοδοσία παρέχεται και διακόπτεται απρόβλεπτα, με αποτέλεσμα να προκαλούν παραμορφώσεις στην τάση εξόδου του αντιστροφέα, και να υπολειπώνουν ή να κινδυνεύουν οι γύρω συσκευές. Οι κατασκευαστές λοιπόν προσπαθούν να σχεδιάσουν αντιστροφείς που να είναι λυτοί και οικονομικοί αλλά ταυτόχρονα ανθεκτικοί και ισχυροί. Οι αντιστροφείς ενώ κατά κύριο λόγο χαρακτηρίζονται από την ονομαστική ισχύ εξόδου τους, διαφοροποιούνται κατά πολύ στο σχεδιασμό και τις δυνατότητες τους.

Οι απλούστεροι αντιστροφείς που διατίθενται στην αγορά είναι αυτοί με έξοδο "τροποποιημένου ημιτόνου". Με τον όρο "τροποποιημένο ημίτονο" εννοείται τετράγωνη κυματομορφή. Ένα απλό κύκλωμα με δύο τρανζίστορ σε διάταξη push-pull και έναν μετασχηματιστή είναι αρκετά για να υλοποιηθεί ένας αντιστροφέας. Ρυθμίζοντας τη συχνότητα στα 50Hz μπορεί να τροφοδοτήσει συσκευές φτιαγμένες για τα 230V AC του δικτύου. Οι οικιακές συσκευές λειτουργούν και με τροφοδοσία

τροποποιημένου ημιτόνου. Μάλιστα οι ωμικές αντιστάσεις λειτουργούν φυσιολογικά ασχέτως της κυματομορφής. Όμως άλλες συσκευές που διαθέτουν ηλεκτροκινητήρες μπορεί να αποκτήσουν ανώμαλη κίνηση λόγω των αρμονικών, ενώ οι ηλεκτρονικές συσκευές μπορεί να υπολειτουργούν καθώς το κύκλωμα ανόρθωσης τους δεν είναι ικανό να τις φιλτράρει. Οι αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου αρχίζουν να εκλείπουν όσο του καθαρού ημιτόνου γίνονται πιο προσιτοί. Άλλωστε, το μόνο πλεονέκτημα που προσφέρουν είναι το χαμηλό κόστος.

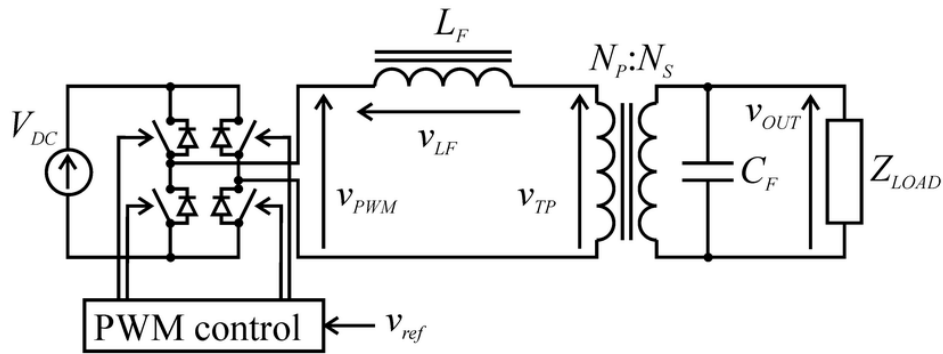


Σχήμα 3.7: Σύγκριση μεταξύ Τροποποιημένου και Καθαρού Ημιτόνου



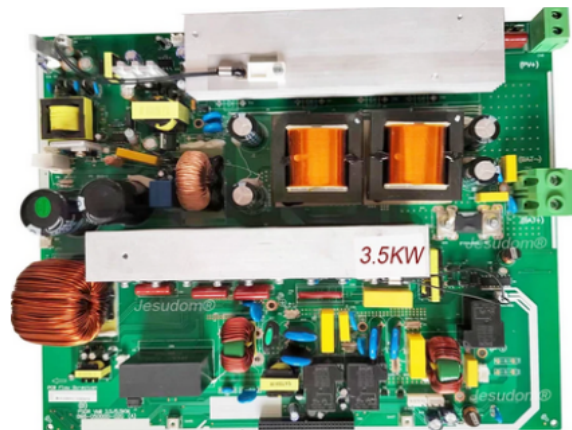
Σχήμα 3.8: Push-Pull Inverter

Μεταξύ των αντιστροφέων καθαρού ημιτόνου υπάρχουν πάλι δύο κύριες κατηγορίες. Οι αντιστροφείς με μετασχηματιστή και αυτοί χωρίς (transformerless). Οι αντιστροφείς με μετασχηματιστή συνήθως αποτελούνται από ένα κύκλωμα H-bridge, με έλεγχο PWM. Αυτό δημιουργεί μία κυματομορφή sPWM (sinusoidal Pulse Width Modulation) με μέγιστη τάση αυτή της μπαταρίας. Μεσολαβεί ένα φίλτρο που δίνει μορφή ημιτόνου σε αυτήν την τάση, κι έπειτα τροφοδοτείται το πρωτεύον πηνίο του μετασχηματιστή. Στο δευτερεύον πηνίο η τάση είναι πλέον 230V AC, και μπορούν να τοποθετηθούν επιπλέον φίλτρα. Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ο μεγάλος όγκος και το βάρος των υλικών, και η απόδοση. Η αυτοκατανάλωση του κυκλώματος είναι επίσης υψηλή λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής των εξαρτημάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα που προκύπτει από αυτόν τον σχεδιασμό είναι η αντοχή σε κρουστικά ρεύματα, όπως η εκκίνηση ηλεκτροκινητήρων και γενικότερα η αντοχή στην παραμόρφωση της εξόδου.



Σχήμα 3.9: Τυπική τοπολογία αντιστροφεία με μετασχηματιστή

Οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή χρησιμοποιούν μετατροπή τάσης, αυξάνοντας της τάση της μπαταρίας σε υψηλότερη, και έπειτα την αντιστρέφουν σε 230V AC. Μερικές φορές προτιμάται να δημιουργούν δύο αντίθετα ημιτονοειδή κύματα με τάση 115V, τα οποία μεταξύ τους δημιουργούν διαφορά 230V (Split Phase). Ένα τέτοιο κύκλωμα είναι σαφώς πιο πολύπλοκο αλλά ταυτόχρονα όλα τα εξαρτήματα του είναι οικονομικότερα, μικρότερα και ελαφρύτερα.



Σχήμα 3.10: Αντιστροφείς με και δίχως Μετασχηματιστή

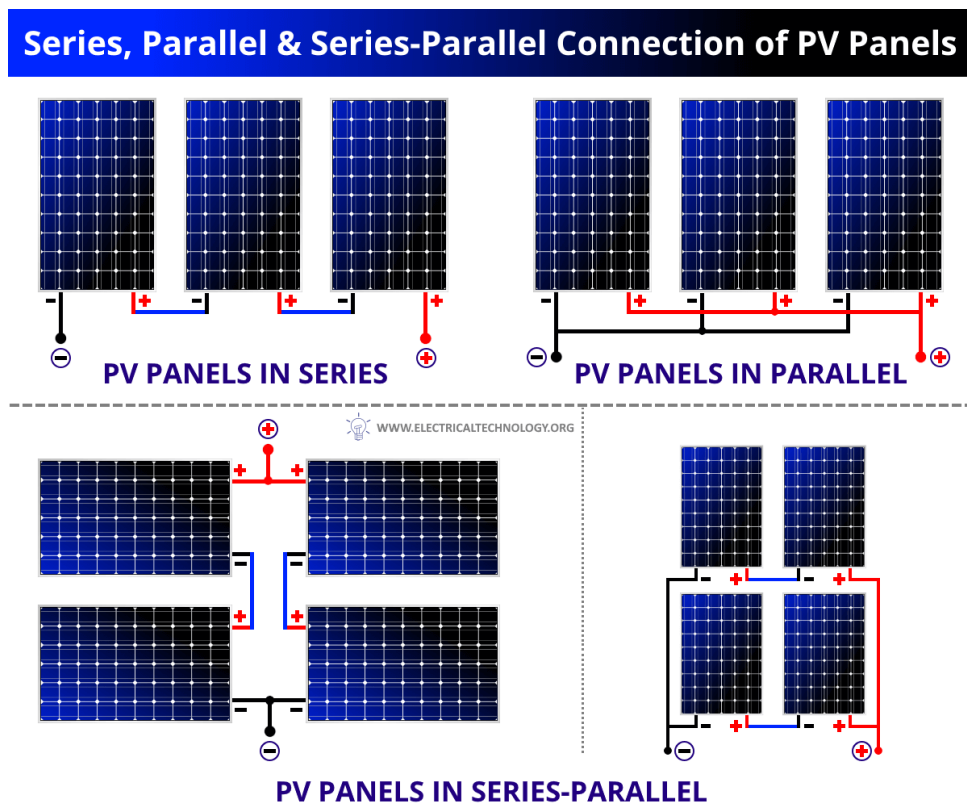
Μια νέα τάση στους αντιστροφείς είναι επίσης οι Υβριδικοί. Αυτοί συνδυάζουν την λειτουργία του αυτόνομου, καθώς μπορούν να λειτουργούν με τροφοδοσία από μπαταρία, ενώ παράλληλα μπορούν να λειτουργούν και με σύνδεση στο δίκτυο, χωρίς μπαταρία. Γενικότερα κάνουν πλήρη διαχείριση της ενέργειας ανάμεσα σε δίκτυο, μπαταρία, φωτοβολταϊκά και φορτία. Ταυτόχρονα την εμφάνιση τους έχουν κάνει οι μπαταρίες "υψηλής τάσης" για inverter δικτύου, οπότε είναι πιθανό υιοθετηθεί αυτή η τάση και από τους αντιστροφείς με σκοπό την απλοποίηση των κυκλωμάτων χωρίς μετασχηματιστή. Σε αυτό συνέβαλε και η μετανάστευση από τις μπαταρίες μολύβδου στο λιθίου.

3.1.9 Συστοιχίες Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Για τα αυτόνομα συστήματα οι συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων περιορίζονται από τις δυνατότητες των ρυθμιστών φόρτισης. Στην περίπτωση των PWM ρυθμιστών φόρτισης, τα πάνελ επιλέγονται έτσι

ώστε η τάση V_{mp} να είναι παραπλήσια της τάσης της φορτισμένης μπαταρίας. Τα πλαίσια κατά συνέπεια συνδέονται κατά κύριο λόγο παράλληλα, εκτός της περίπτωσης ονομαστικής τάσης μπαταρίας 48V όπου συνήθως απαιτούνται δύο εν σειρά πλαίσια. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή ισχύς λοιπόν τα πάνελ συνδέονται παράλληλα, είτε με σύνδεση στον ηλεκτρολογικό πίνακα, είτε με διακλαδωτές MC4. Σημασία έχει να μην ξεπερνάται το όριο των 30A στον σύνδεσμο. Το πλεονέκτημα της παράλληλης σύνδεσης είναι πως η σκίαση σε ένα πλαίσιο δεν επηρεάζει την παραγωγή των υπολοίπων πλαισίων.

Οι MPPT ρυθμιστές φόρτισης έχουν ένα ανώτερο όριο τάσης, όπου πρέπει να τηρείται αυστηρά. Πρέπει μάλιστα να λαμβάνεται υπόψη η αύξηση της τάσης των κυψελών όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη των 25°C. Οι μέγιστη αυτή τάση μπορεί να είναι 100V, 150V, 250V, 450V, 500V ή άλλη, αν και οι προαναφερθείς είναι οι πιο συνηθισμένες. Καλή τακτική είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας να προσεγγίζει την μέγιστη τάση του ρυθμιστή φόρτισης, καθώς έτσι προσεγγίζεται και η μέγιστη απόδοση του. Δεν είναι σπάνιο και σε αυτήν την περίπτωση να παραλληλιστούν τα πλαίσια. Συνδέονται πρώτα οι εν σειρά συστοιχίες και μεταξύ τους παραλληλιζονται για να πετύχουν την ζητούμενη ισχύ.



Σχήμα 3.11: Συνδεσμολογία Σε Σειρά, Παράλληλα και Συνδυασμός των δύο

3.1.10 Παράδειγμα Σχεδιασμού Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Στο παρακάτω παράδειγμα μελετάται η διαστασιολόγηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος σε οικία. Αρχικά προσδιορίζονται οι ανάγκες του νοικοκυριού. Επειδή οι ανάγκες είναι διαφορετικές για κάθε εποχή του χρόνου υπολογίζονται ξεχωριστά για την χειμερινή και εαρινή περίοδο. Τα χαρακτηριστικά των συσκευών που αναγράφονται είναι:

- Ισχύς, σε Watt(W), η ονομαστική ισχύς των συσκευών. Αυτή είναι ίση η μικρότερη με τη φαινόμενη ισχύ, οπότε η ισχύς του αντιστροφέα θα πρέπει να την ξεπερνά.
- Ισχύς Εκκίνησης, σε Watt(W), η στιγμιαία ισχύς που καταναλώνουν κατά την εκκίνηση οι συσκευές με ηλεκτροκινητήρες.
- Κατανάλωση Ημερήσια, σε Watt-hours(Wh), η κατανάλωση σε περίοδο 24ώρου.
- Κατανάλωση Νυχτερινή, σε Watt-hours(Wh), η κατανάλωση κατά τις νυχτερινές ώρες, όπου στερείται η ηλιοφάνεια άρα και η παραγωγή.
- Κρίσιμο Φορτίο, χαρακτηρίζεται η συσκευή που ο χρήστης επιθυμεί να τροφοδοτείται πάντα, η χρήση των υπολοίπων συσκευών μπορεί να αναβληθεί.

Εαρινή Περίοδος					
Φορτία	Ισχύς	Ισχύς εκκίνησης	Κατανάλωση ημερήσια	Κατανάλωση Νυχτερινή	Κρίσιμο
Φωτισμός	80	80	400	400	X
Φωτισμός Κήπου	150	150	900	900	-
Ηλεκτρονικές Συσκευές	150	150	700	400	-
Πλυντήριο	2000	2000	1000	0	-
Ψυγείο + Καταψύκτης	250	1000	4000	2000	X
Κουζίνα	3000	3000	3000	1000	-
Λοιπές Οικιακές	2000	2000	1000	0	-
Εργαλεία Ρεύματος	1500	4000	1000	0	-
Κλιματισμός	1000	3000	5000	2000	-
Σύνολα	10000	8000	17000	6700	4400Wh

Table 1: Φορτία Εαρινής Περιόδου

- Η επιλογή αντιστροφέα γίνεται με βασικό κριτήριο την ισχύ. Βάσει των παραπάνω υπολογισμών απαιτείται ονομαστική ισχύς 10.000W, και ισχύς εκκίνησης 18.000W. Ένα τέτοιο μηχάνημα όμως έχει δύο μειονεκτήματα: μεγάλο κόστος και μεγάλη αυτοκατανάλωση. Επειδή όλες οι συσκευές δεν θα χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα μπορεί να επιλεγεί μικρότερος αντιστροφέας. Επίσης είναι απίθανο όλες οι συσκευές να κάνουν ταυτόχρονη εκκίνηση, οπότε κι η ισχύς εκκίνησης δεν θα είναι ποτέ τόσο υψηλή.
- Έστω πως ο χρήστης δεν θα χρησιμοποιήσει ποτέ ταυτόχρονα τις συσκευές: κουζίνα, πλυντήριο, εργαλεία, λοιπές οικιακές. Τότε από τις υπόλοιπες συσκευές προκύπτει η ισχύς: κλιματισμός + ψυγεία + φωτισμός + ηλεκτρονικά = 1.600W, με 3.600W ισχύ εκκίνησης.
- Εάν σε αυτά προστεθεί η κουζίνα, όντας η πιο ενεργοβόρα συσκευή, προκύπτει ισχύς 4.600W, με 6.600W ισχύ εκκίνησης.

Χειμερινή Περίοδος					
Φορτία	Ισχύς	Ισχύς εκκίνησης	Κατανάλωση ημερήσια	Κατανάλωση Νυχτερινή	Κρίσιμο
Φωτισμός	80	80	600	600	X
Φωτισμός Κήπου	150	150	1200	1200	-
Ηλεκτρονικές Συσκευές	150	150	700	400	-
Πλυντήριο	2000	2000	1000	0	-
Ψυγείο + Καταψύκτης	250	1000	3000	2000	X
Κουζίνα	3000	3000	1000	0	-
Λοιπές Οικιακές	2000	2000	1000	0	-
Εργαλεία Ρεύματος	1500	4000	1000	0	-
Λέβητας Πετρελαίου	100	300	1000	500	-
Σύνολα	9000	14000	10500	4700	4600Wh

Table 2: Φορτία Χειμερινής Περιόδου

- Εάν λειτουργούν τα εργαλεία αντί της κουζίνας προκύπτει η μέγιστη ισχύς εκκίνησης των 7600W.
- Τελικά προκύπτει πως επαρκεί ένας αντιστροφέας με ισχύ 4.600W και ισχύ εκκίνησης 7600W. Η αμέσως μεγαλύτερη ονομαστική ισχύς που συναντάται σε inverter του εμπορίου είναι τα 5000W με εκκίνηση 10000W. Η ονομαστική τάση λειτουργίας για τέτοιους αντιστροφείς μπορεί να είναι 24V ή 48V. Καλύτερη επιλογή αποτελούν τα 48V, ώστε να μειωθεί το ρεύμα που απαιτείται για τη δεδομένη ισχύ.
- Η ελάχιστη παραγωγή που θα πρέπει να προσφέρει η εγκατάσταση είναι 315kWh μηνιαίως για το χειμώνα και 510kWh για το καλοκαίρι. Η εγκατάσταση θα γίνει στον νομό Χαλκιδικής, και εκτιμάται πως για τη ζητούμενη παραγόμενη ενέργεια μία φωτοβολταϊκή συστοιχία των 4kWp με προσανατολισμό στο Νότο και κλίση 40° είναι επαρκής.
- Η επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης προκύπτει από τη διαίρεση της ισχύος των φωτοβολταϊκών με την τάση της μπαταρίας. Στην προκειμένη περίπτωση απαιτείται ένας ρυθμιστής φόρτισης 80A 4000W / 51.2V.
- Η επιλογή της μπαταρίας θα γίνει ανάλογα με τις επιθυμητές μέρες αυτονομίας. Αρχικά πρέπει να έχει μέγεθος μεγαλύτερο των 7kWh ώστε να υπερκαλύπτει τις ανάγκες του σπιτιού κατά τη νύχτα. Με 15kWh εξασφαλίζεται η νυχτερινή κατανάλωση, και επαρκεί για 3 μέρες αυτονομίας με τις αναγκαίες συσκευές, ενώ με 20kWh εξασφαλίζεται αυτονομία 2 ημερών με όλες τις συσκευές, ή 4 μέρες με τις απαραίτητες.
- Με σκοπό να μην τοποθετηθεί μία πολύ μεγάλη και πολύ ακριβή μπαταρία, μπορεί να τοποθετηθεί και μία γεννήτρια της τάξεως 8-10kVA, ικανή να φορτίσει την μπαταρία με 5kW (10kWh σε δύο ώρες), τροφοδοτώντας παράλληλα το σπίτι.

3.2 Διασυνδεδεμένα

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι αυτά που τροφοδοτούν το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι μετατρέπουν την DC τάση των φωτοβολταϊκών απευθείας στα 400V του δικτύου, 230V για τα μονοφασικά συστήματα. Η διάταξη των εξαρτημάτων λοιπόν είναι διαφορετική, καθώς δεν υπάρχει μπαταρία, άρα ούτε και ρυθμιστής φόρτισης. Το κύκλωμα MPPT βρίσκεται εντός του αντιστροφέα. Η κλίμακα των συστημάτων είναι επίσης πολύ μεγαλύτερη. Μάλιστα για ισχύ έως τα 100kW οι αντιστροφείς συνδέονται στην χαμηλή τάση του δικτύου, ενώ για μεγαλύτερη ισχύ απαιτείται μετασχηματιστής, και σύνδεση στη μέση τάση (20kV). Οι αντιστροφείς κατά τη διάρκεια της συγγραφής φτάνουν την ισχύ των 330kW, με τάση εξόδου 800V έναντι των 400V όπου είναι η ονομαστική, και χρήση του κατάλληλου μετασχηματιστή. Είναι πλέον συχνό να δομούνται συστήματα, σε φωτοβολταϊκά πάρκα με ισχύ 1MW, με τη χρήση μόλις τριών ή πέντε αντιστροφέων.

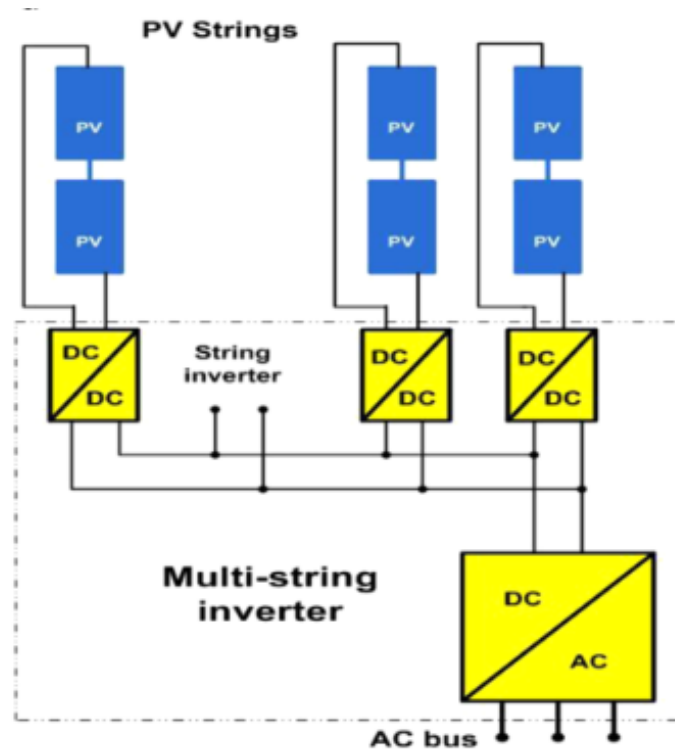
3.2.1 Σχεδιασμός

Ο σχεδιασμός ενός διασυνδεδεμένου συστήματος είναι πολύ απλός, καθώς το μόνο σημαντικό μέγεθος είναι η ισχύς των φωτοβολταϊκών. Κατά συνέπεια κρίνεται και η ισχύς του αντιστροφέα. Ο σχεδιασμός της κατασκευής είναι αυτός που θα απασχολήσει τους μηχανικούς, καθώς η υπηρεσία διαχείρισης του δικτύου θέτει σαφείς και αυστηρούς περιορισμούς για την υλοποίηση ενός συστήματος. Περιορισμοί που αφορούν της ηλεκτρικές ιδιότητες των εξαρτημάτων, αλλά και πολεοδομικούς κανόνες. Ο πελάτης λοιπόν προσδιορίζει την ισχύ της εγκατάστασης, σε συμφωνία με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας,

και μετά οι εξειδικευμένοι μηχανικοί θα σχεδιάσουν και θα υλοποιήσουν την κατασκευή, καθώς και τα απαραίτητα συνοδευτικά έγγραφα και σχέδια. Για τη βέλτιστη απόδοση, ο προσανατολισμός των πλαισίων θα είναι προς το Νότο, και με κλίση από το έδαφος λίγο μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους. Μπορεί επίσης να τοποθετηθεί ιχνηλάτης (tracker), δηλαδή κινητή βάση όπου προσανατολίζει τη συστοιχία των πλαισίων προς τον ήλιο, για μεγαλύτερη παραγωγή.

3.2.2 Inverter

Στα inverter δικτύου έχει καθιερωθεί η τοπολογία χωρίς μετασχηματιστή. Εκεί πολλές συστοιχίες παραλληλίζονται σε ομάδες ώστε να συνδεθούν στον MPPT. Μετά ένας οι πολλοί παράλληλα συνδεδεμένοι MPPT παρέχουν DC τάση, μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου στο κύκλωμα αντιστροφής. Ο αντιστροφέας στην απλούστερη μορφή είναι της τοπολογίας H-Bridge, αλλά υπάρχουν και άλλες λίγο πιο σύνθετες τοπολογίες[11]. Οι επιδόσεις των αντιστροφέων δικτύου για αυτό το λόγο πετυχαίνουν αποδόσεις πολύ μεγαλύτερες του 95%, κατασκευάζονται σε πολύ μεγάλες ισχύς και πολύ φθηνότερα σε σχέση με αυτούς των αυτόνομων συστημάτων. Όταν οι αντιστροφέες είναι τριφασικοί διαθέτουν τριπλό το κύκλωμα αντιστροφής.



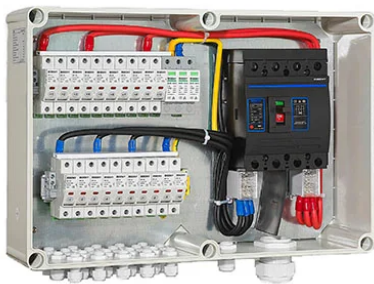
Σχήμα 3.12: Κύρια μέρη του Αντιστροφέα Δικτύου

3.2.3 Συστοιχίες Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

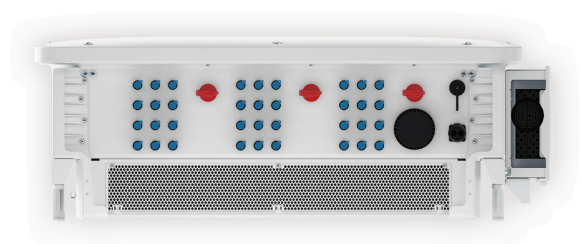
Οι τάση των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνήθως είναι 600V για τους μονοφασικούς αντιστροφέες, 1000V για τους τριφασικούς και 1500V για τους τριφασικούς με ονομαστική τάση 800VAC. Οι συστοιχίες των πλαισίων χρησιμοποιούν μόνο εν σειρά συνδέσεις, αν και στη συνέχεια

γίνεται παραλληλισμός τους. Όπως και στα αυτόνομα, η τάση ανοιχτού κυκλώματος της συστοιχίας οφείλει να πλησιάζει την τάση ανοιχτού κυκλώματος, για μείωση του ρεύματος, αλλά και για μεγαλύτερη απόδοση του αντιστροφέα. Οι αντιστροφέες επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση σε τάση εισόδου περίπου 60% της μέγιστης.

Οι παλαιότεροι αντιστροφέες δικτύου απαιτούσαν παραλληλισμό πολλών συστοιχιών, με τη χρήση ενός ηλεκτρολογικού πίνακα "combiner box". Η τάση στους πιο σύγχρονους αντιστροφέες είναι ο παραλληλισμός αυτός να γίνεται εντός του μηχανήματος, αφαιρώντας την ανάγκη για επιπλέον ηλεκτρολογικό υλικό.



(a) Combiner Box



(b) Ακροδέκτες Σύγχρονου Inverter

Σχήμα 3.13: Παραλληλισμός Συστοιχιών σε Διασυνδεδεμένα Συστήματα

Κεφάλαιο 4: Μοντέλα Εκτίμησης της Παραγωγής

Η εκτίμηση της παραγωγής είναι υψίστης σημασίας για τη μελέτη και τη χρήση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Βοηθά αρχικά στο σχεδιασμό, όπου η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων οφείλει να είναι τέτοια ώστε να βελτιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας. Βοηθά επίσης στη χρήση και τη συντήρηση.

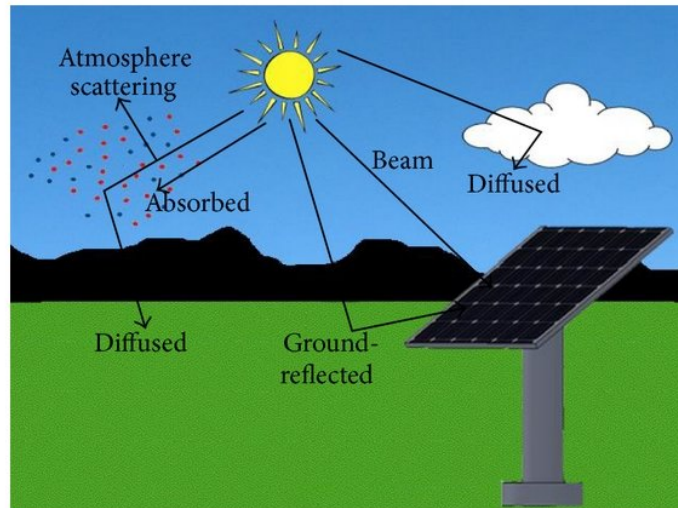
Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της παραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποφάσεις για τη διαχείριση του συστήματος. Όσο τα φωτοβολταϊκά αυξάνουν το μερίδιο τους στην παραγόμενη ενέργεια για το δίκτυο ηλεκτροδότησης, η πρόβλεψη της παραγωγής θα είναι κρίσιμη για τη διαχείριση του δικτύου και τον συντονισμό των υπόλοιπων μέσων. Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της παραγωγής βοηθά στις αποφάσεις για την κατανάλωση της ενέργειας, είτε χειροκίνητα, είτε μέσω λογισμικού. Η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της παραγωγής παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το σχεδιασμό. Το τοπικό κλίμα της εκάστοτε περιοχής μεταβάλλει αισθητά την παραγωγή, σε συνδυασμό πάντα με το γεωγραφικό πλάτος.

4.1 Εκτίμηση Ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην κορυφή της ατμόσφαιρας μετρημένη σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες, γνωστή ως ηλιακή σταθερά, έχει μέση τιμή 1361-1362 W/m² η οποία ποικίλλει κάπως ανάλογα με τη θέση της Γης στην ελλειπτική τροχιά της.

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από την ατμόσφαιρα, υφίσταται διάφορες διαδικασίες απορρόφησης, διασποράς ή σκέδασης που έχουν ως αποτέλεσμα τη λήψη χαμηλότερων επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης. Αυτές οφείλονται στα συστατικά της ατμόσφαιρας, όπως το όζον ή το διοξείδιο του άνθρακα, και στα στερεά και υγρά σωματίδια σε αιώρηση, όπως η σκόνη ή οι υδρατμοί. Ωστόσο, η κύρια πηγή εξασθένησης είναι η νεφοκάλυψη. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν διαφορετικά το κάθε μέρος του φάσματος της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης να έχει διαφορετική φασματική κατανομή από αυτήν εκτός της ατμόσφαιρας.

Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται στο επίπεδο του εδάφους είναι άθροισμα τριών συνιστωσών. Η πρώτη, που ονομάζεται δέσμη ή άμεση ακτινοβολία, είναι η ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο με κάποια εξασθένηση από την ατμόσφαιρα. Η δεύτερη συνιστώσα, η διάχυτη ακτινοβολία, είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στο έδαφος αφού ανακλαστεί ή σκεδαστεί από την ατμόσφαιρα και θεωρείται ότι φθάνει από ολόκληρο τον ουράνιο θόλο. Η τρίτη συνιστώσα, που δεν λαμβάνεται πάντα υπόψη, είναι η ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια του εδάφους ή από κοντινά εμπόδια. Η συνιστώσα δέσμης είναι διαθέσιμη μόνο όταν ο ηλιακός δίσκος δεν εμποδίζεται από σύννεφα, ενώ η διάχυτη συνιστώσα είναι πάντα διαθέσιμη, καθώς είναι η μόνη διαθέσιμη ακτινοβολία όταν τα σύννεφα εμποδίζουν τον ηλιακό δίσκο.



Σχήμα 4.1: Επίγεια Ηλιακή Ακτινοβολία

4.1.1 Μοντέλα Εκτίμησης Ακτινοβολίας

Βασικός παράγοντας για την εκτίμηση της ακτινοβολίας που απορροφούν τα πλαίσια είναι η εξακρίβωση της θέσης του ηλίου σε σχέση με τη Γη. Υπήρξαν διάφοροι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της θέσης του ηλίου, με ακρίβεια στα δέκατα ή εκατοστά της, και εφαρμογή για τις επόμενες δεκαετίες έως και αιώνα. Το 2003 η NASA (National Aeronautics and Space Administration) σε συνεργασία με το NREL (National Renewable Energy Laboratory) διατύπωσαν τον αλγόριθμο SPA[12] (Solar Position Algorithm) ικανό να προβλέψει τη θέση του ηλίου με ακρίβεια $\pm 0.0003^\circ$, και εφαρμογή για τις χρονολογίες 2.000π.Χ. έως 6.000μ.Χ. Η ακρίβεια αυτή είναι αρκετή, έως και υπερβολική για την εφαρμογή στα φωτοβολταϊκά συστήματα, αλλά ο αλγόριθμος δεν είναι ιδιαίτερα επεξεργαστικά απαιτητικός, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Από τον αλγόριθμο διαπιστώνεται η θέση του ηλίου, εκφρασμένη σε "γωνία υψομέτρου" και "αζιμούθιο", δηλαδή η απόσταση σε μοίρες από τον ορίζοντα και από τον Νότο. Έπειτα με απλή τριγωνομετρία προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ηλίου με την επιφάνεια των πλαισίων.

Το επόμενο βήμα στην εκτίμηση της ακτινοβολίας είναι ο υπολογισμός της μεταβολής λόγω της ατμόσφαιρας. Έχουν διατυπωθεί πάρα πολλά μοντέλα "Καθαρού Ουρανού" για την απλούστευση της εκτίμησης χωρίς να απαιτούνται υπολογιστικά απαιτητικοί μηχανισμοί[13]. Η ακρίβεια των πιο αποτελεσματικών μοντέλων φθάνει τιμές $nRMSE < 5\%$ (normalized Root Mean Square Error). Μία απόκλιση αυτής της τάξης είναι υποφερτή για τις ανάγκες των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση της ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας περιλαμβάνουν το υψόμετρο, την σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία του αέρα, την ατμοσφαιρική πίεση και άλλα.

Η νεφοκάλυψη παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, καθώς επηρεάζει άμεσα την ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Τα σύννεφα μπορούν τόσο να σκεδάζουν όσο και να απορροφούν το ηλιακό φως, οδηγώντας σε μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο βαθμός αυτής της μείωσης ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο, το πάχος και την έκταση της νεφοκάλυψης[15].

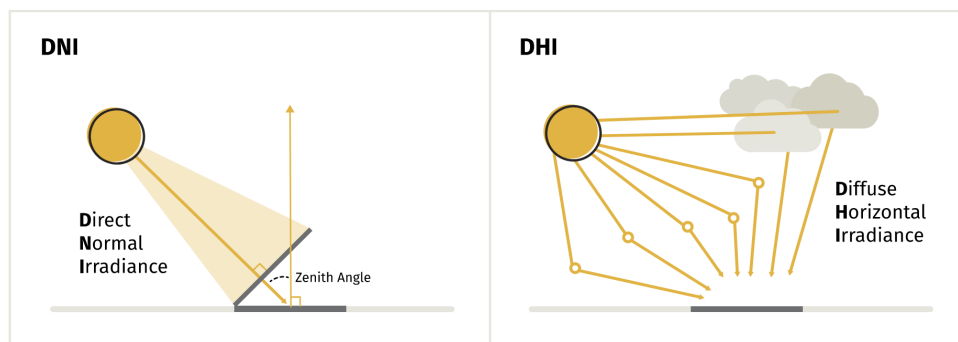
Ένα κύριο χαρακτηριστικό ενός νέφους είναι το πάχος του, η απόσταση δηλαδή από την κορυφή έως τη βάση του, μετρημένο σε μέτρα. Τα παχύτερα σύννεφα έχουν γενικά υψηλότερη λευκαύγεια, που σημαίνει ότι αντανακλούν μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι περιέχουν περισσότερα σταγονίδια νερού ή σωματίδια πάγου, τα οποία διασκορπίζουν το ηλιακό φως πιο αποτελεσματικά. Το υψόμετρο επίσης επηρεάζει την συμπεριφορά των νεφών, με τα νέφη σε μεγάλο υψόμετρο να επιτρέπουν μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας να περνά, απορροφώντας όμως την υπέρυθρη, ενώ τα χαμηλά νέφη ανακλούν μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας. Φυσικά υπάρχουν και πολλά άλλα χαρακτηριστικά των νεφών όπου λαμβάνονται υπόψη, όπως το ποσοστό νερού-πάγου στη σύνθεση του, το μέγεθος των σωματιδίων-σταγόνων, η έκταση τους κ.α.

4.1.2 Μέτρηση Ακτινοβολίας DNI, DHI, GHI, GTI

Για τον υπολογισμό του συνόλου της ακτινοβολίας που φθάνει σε μία επιφάνεια υπάρχουν πολλαπλές συνιστώσες, οι οποίες για απλοποίηση χωρίζονται στην άμεση και την διάχυτη ακτινοβολία, όπου το άθροισμα τους είναι η συνολική[16].

Η μέτρηση της Άμεσης Κάθετης Ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiance, DNI) αφορά την ακτινοβολία που προκύπτει από την ευθεία διάδοση, σε μία επιφάνεια κάθετη προς τη θέση του ηλίου. Είναι δηλαδή ακτινοβολία που δεν έχει υποστεί σκέδαση ή αντανάκλαση, παρά μόνο κάποια απορρόφηση λόγω της ατμόσφαιρας. Όταν δεν υπάρχει νεφοκάλυψη, η άμεση ακτινοβολία προσφέρει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Από την Άμεση Κάθετη Ακτινοβολία εύκολα προκύπτει και η ακτινοβολία στην επιφάνεια των κεκλιμένων πλαισίων, απλά πολλαπλασιάζοντας με το ημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης.

Η Διάχυτη Οριζόντια Ακτινοβολία (Diffuse Horizontal Irradiance, DHI), είναι η ακτινοβολία που φθάνει στο οριζόντιο επίπεδο (συνήθως στο έδαφος), ως αποτέλεσμα σκεδάσεων και ανακλάσεων. Μικρό μέρος αυτής της ακτινοβολίας προκύπτει από την ατμόσφαιρα, ενώ το μεγαλύτερο μέρος προκύπτει από τα νέφη. Έτσι, σε συνθήκες υψηλής νεφοκάλυψης η διάχυτη ακτινοβολία προσφέρει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Από την Διάχυτη Οριζόντια Ακτινοβολία δεν προκύπτει εύκολα η ακτινοβολία στην επιφάνεια των κεκλιμένων πλαισίων, καθώς θα πρέπει να υπολογιστούν και να αθροιστούν εκ νέου οι πολλαπλές οδεύσεις της ακτινοβολίας.



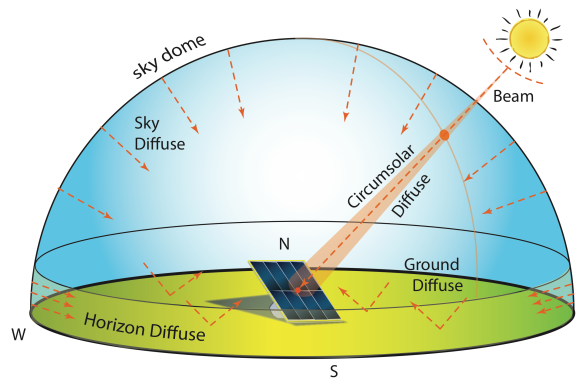
© 2021 Clean Power Research, L.L.C.

Σχήμα 4.2: DNI - DHI

Η Συνολική Οριζόντια Ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance, GHI) αποτελεί το άθροισμα της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και της διάχυτης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Δεδομένων των DNI και DHI, η ακτινοβολία προκύπτει ως:

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos(\alpha_{\text{zenith}})$$

Η Συνολική Κεκλιμένη Ακτινοβολία (Global Tilted Irradiance, GTI) είναι η συνολική ακτινοβολία που μετρείται στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτή προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης, καθώς και της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας. Ο υπολογισμός της, ιδιαίτερος σε συνθήκες υψηλής νεφοκάλυψης, είναι δύσκολος, και γίνεται κυρίως εμπειρικά.



Σχήμα 4.3: Συνολική Κεκλιμένη Ακτινοβολία

4.2 Μοντέλα Θερμοκρασίας των Κυψελών

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας των κυψελών ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι απαραίτητος για την εκτίμηση της απόδοσης άρα και της παραγωγής του. Από την ακτινοβολία που δέχεται το πλαίσιο, ένα μέρος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ένα μέρος ανακλάται, και ένα σημαντικό ποσοστό μετατρέπεται σε θερμότητα. Μάλιστα μία από τις εξελίξεις στο χώρο της ηλιακής ενέργειας είναι η παραγωγή πλαισίων που αξιοποιούν την απορροφούμενη ενέργεια για τη θέρμανση νερού, μειώνοντας τη θερμοκρασία, άρα και αυξάνοντας την απόδοση του φωτοβολταϊκού, αποκομίζοντας διπλό όφελος[3]. Το μέσο που ψύχει τα πλαίσια είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας.

Η συνάρτηση για τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυψελών όπως διατυπώνεται από την PVsyst είναι[17]:

$$T_c = T_a + E_{\text{POA}} \frac{\alpha(1 - \eta_m)}{U_0 + U_1 \times \text{WS}}$$

Όπου:

- T_c είναι η θερμοκρασία των κυψελών ($^{\circ}\text{C}$),
- T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^{\circ}\text{C}$),
- E_{POA} η πυκνότητα ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πλαισίου W/m^2 ,

- α ο συντελεστής απορρόφησης της κυψέλης (τυπική τιμή 0.9),
- η_m Η απόδοση της φωτοβολταϊκής κυψέλης (τυπική τιμή 0.1),
- U_0 η σταθερά θερμικής αγωγιμότητας W/m^2K
- U_1 η σταθερά επαγωγικής μεταφοράς θερμότητας W/m^3sK ,
- WS η ταχύτητα ανέμου (m/s).

Οι τιμές των U_0 και U_1 αφορούν τα υλικά κατασκευής και την τοποθέτηση των πλαισίων. Κάποιες εκτιμώμενες τιμές είναι:

- Για πλαίσια τοποθετημένα σε ανοιχτό χώρο: $U_0 = 29 W/m^2K$, $U_1 = 0 W/m^3sK$
- Για πλαίσια τοποθετημένα κοντά σε στέγη: $U_0 = 15 W/m^2K$, $U_1 = 0 W/m^3sK$

4.3 Ημερήσια Πρόβλεψη

Για να εκτιμηθεί η ημερήσια παραγωγή θα πρέπει να ληφθεί η εκτίμηση της πυκνότητας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η στιγμιαία ισχύς του πλαισίου και της συστοιχίας ολόκληρης προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

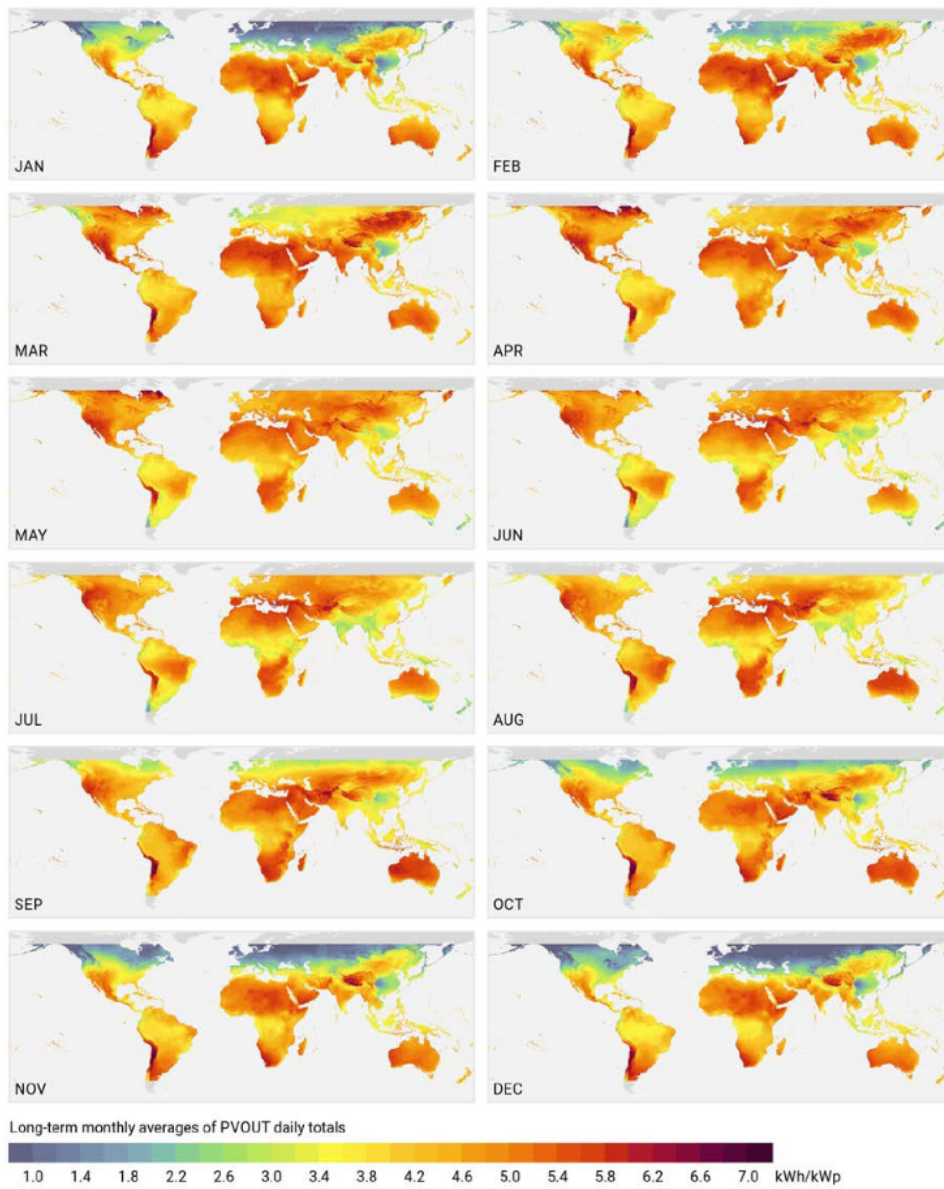
$$P = P_{\text{ref}} \times \left(\frac{E_{\text{POA}}}{E_{\text{ref}}} \right) \times [1 + \beta_P \times (T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}})]$$

Όπου:

- P η Παραγώμενη Ισχύς,
- P_{ref} η Ονομαστική Ισχύς (W),
- E_{POA} η πυκνότητα ακτινοβολίας στην επιφάνεια των πλαισίων (W),
- E_{ref} η πυκνότητα ακτινοβολίας κατά τις δοκιμές ($1000W/m^2$ κατά STC),
- β_P ο θερμικός συντελεστής ισχύος ($\%/^{\circ}C$),
- T_{cell} η Θερμοκρασία των κυψελών ($^{\circ}C$),
- T_{ref} η θερμοκρασία κατά τις δοκιμές ($25^{\circ}C$ κατά STC).

4.4 Ετήσια Πρόβλεψη

Για την ετήσια πρόβλεψη παραγωγής υπάρχουν εμπειρικά δεδομένα που παρέχουν μια αρκετά ακριβή πρόβλεψη. Η Solargis σε συνεργασία με τη World Bank έχουν δημιουργήσει την εφαρμογή Global Solar Atlas 2.0[18], όπου έχουν συλλέξει μετεωρολογικά δεδομένα πολλών ετών, για ολόκληρο τον πλανήτη, και έχουν εξάγει προβλέψεις βάσει αυτών.



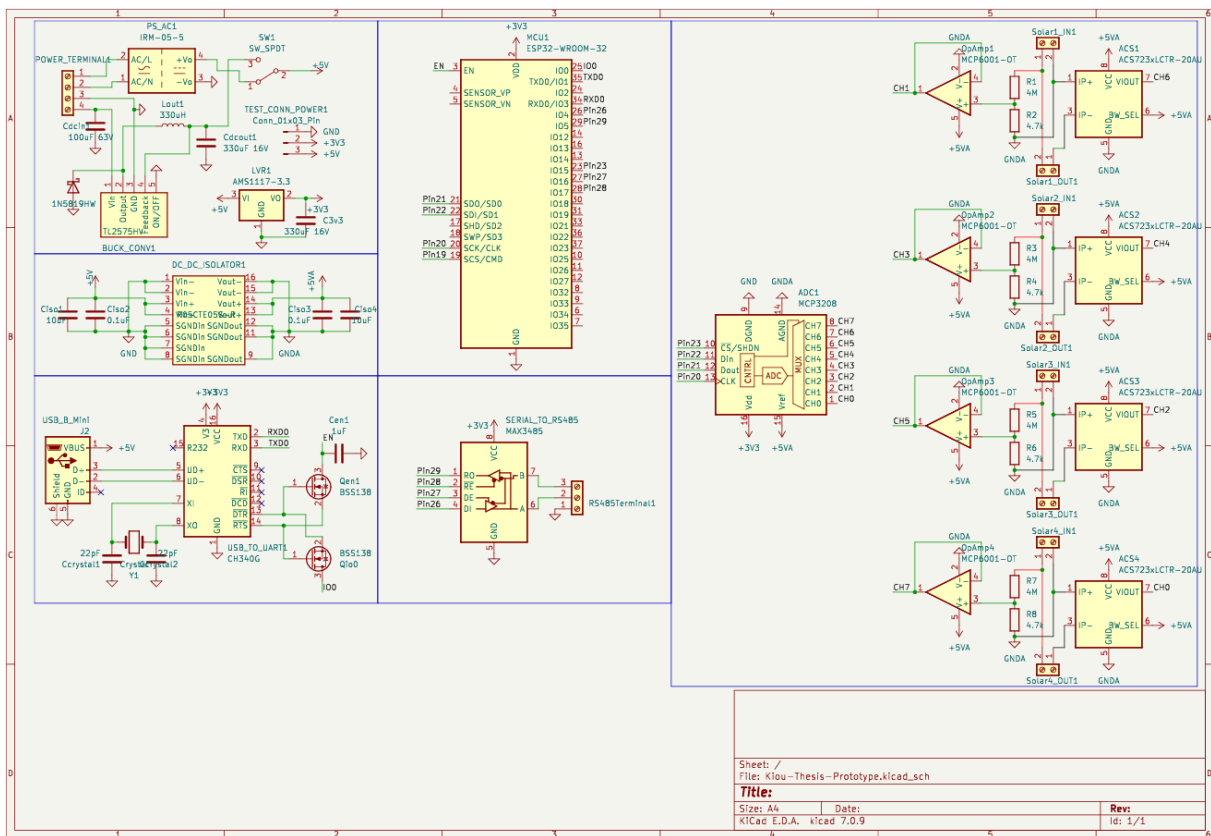
Σχήμα 4.4: Εκτίμηση ετήσιας παραγωγής

Κεφάλαιο 5: Σύστημα Καταγραφής

5.1 Καταγραφικό Μηχάνημα

Στόχος της καταγραφικής συσκευής είναι να μπορεί να καταγράφει την παραγωγή πολλαπλών ξεχωριστών συστοιχιών καθώς και να επικοινωνεί με τον εγκατεστημένο εξοπλισμό. Στην πρώτη περίπτωση, η συσκευή θα μετρά την τάση και την ένταση που παρέχουν οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Στην δεύτερη περίπτωση, οι σύγχρονοι αντιστροφείς ή ρυθμιστές φόρτισης συχνά παρέχουν καταγραφή της παραγωγής και λοιπών χρήσιμων πληροφοριών, όπως η κατάσταση των μπαταριών, του δικτύου και των φορτίων. Το πιο διαδεδομένο σύστημα επικοινωνίας είναι το RS-485 για αυτήν την εφαρμογή, ενώ οι κατασκευαστές παρέχουν συχνά και αντάπτορες για WiFi ή Ethernet, ώστε οι συσκευές να επικοινωνούν με τον παγκόσμιο ιστό.

5.1.1 Σχηματικό

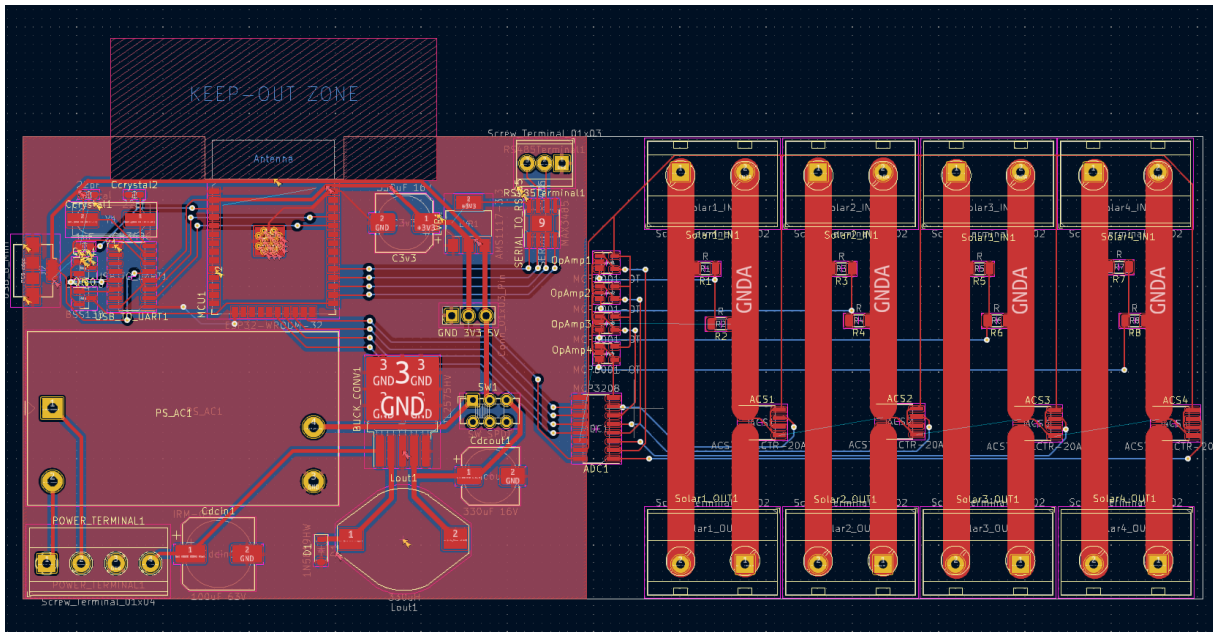


Σχήμα 5.1: Σχηματικό

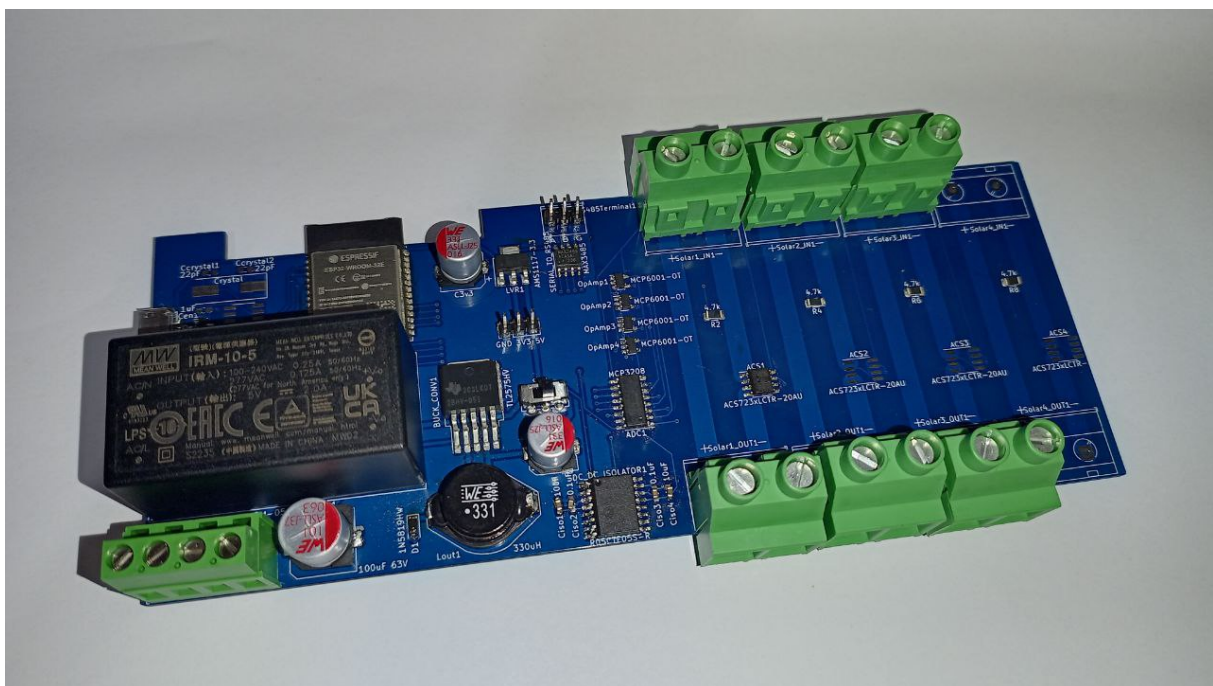
Το σχηματικό έχει χωριστεί σε μέρη ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν. Το κύκλωμα τροφοδοσίας, όπου παρέχει την απαραίτητη τάση λειτουργίας του μικροελεγκτή και των λοιπών κυκλωμάτων. Το κύκλωμα απομόνωσης τροφοδοσίας, όπου φροντίζει να απομονώνει την τροφοδοσία του κυκλώματος μετρήσεων από τα λοιπά κυκλώματα. Ο μικροελεγκτής είναι το κεντρικό εξάρτημα, και σκοπό έχει να

λαμβάνει πληροφορίες από το κύκλωμα μετρήσεων και τις εξωτερικές συσκευές ώστε να τις επικοινωνεί με τον server. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή γίνεται με το κύκλωμα προγραμματισμού και σύνδεση με υπολογιστή μέσω USB. Τέλος, το κύκλωμα μετρήσεων μπορεί να μετρά την τάση και την ένταση από τέσσερις συστοιχίες, ενώ για επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές υπάρχει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που προσφέρει RS-485 επικοινωνία.

5.1.2 Πλακέτα



Σχήμα 5.2: Σχέδιο Πλακέτας



Σχήμα 5.3: Συναρμολογημένη Πλακέτα

Η υλοποίηση του κυκλώματος έγινε με τη βοήθεια τυπωμένης πλακέτας, σχεδιασμένη με το λογισμικό KiCAD και κατασκευασμένη από JLCPCB. Το πλάτος της πλακέτας σχεδιάστηκε στα 68 χιλιοστά. Το συνολικό πλάτος της συσκευής οφείλει να μην ξεπερνάει τα 80 χιλιοστά, τυπικό πλάτος για εξαρτήματα ράγας με προδιαγραφές DIN. Ταυτόχρονα οφείλει να τηρεί το μέγιστο ύψος των 45 χιλιοστών όπως συνηθίζεται στα εξαρτήματα που αφορούν οικιακές (και όχι μόνο) εγκαταστάσεις, καθώς και το πλάτος των 45 χιλιοστών για το μέρος που είναι εμφανές αφότου τοποθετηθεί καπάκι στον πίνακα.

Για την κάλυψη των αναγκών χρησιμοποιήθηκε πλακέτα δύο επιπέδων. Οι πλακέτες δύο επιπέδων, ή ακόμα και τεσσάρων αποτελούν πλέον τις οικονομικότερες λύσεις τις αγορές, και δεν υπάρχει λόγος ο σχεδιασμός να γίνει σε ένα επίπεδο. Περισσότερα επίπεδα επίσης δεν είναι απαραίτητα εάν δεν υπάρχει η αντίστοιχη πολυπλοκότητα ή η ανάγκη για διαχωρισμό των σημάτων. Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων μπορεί να γίνει και από τις δύο πλευρές της πλακέτας. Για την ευκολότερη όμως συναρμολόγηση, είτε με ανθρώπινο χέρι, είτε με ρομποτικά μηχανήματα, ευνοϊκότερο είναι τα εξαρτήματα να τοποθετούνται όλα τα εξαρτήματα επιφανείας στην μία πλευρά. Έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν όλα ταυτόχρονα με τη χρήση πάστας συγκόλλησης και η πλακέτα να θερμανθεί ομοιόμορφα με χρήση θερμής πλάκας ή υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση όπου ισχυρά ρεύματα διαρρέουν τους αγωγούς της πλακέτας τότε το πάχος του χαλκού πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Ένας αξιόπιστος οδηγός είναι οι προδιαγραφές IPC-2221A[20]. Ο υπολογισμός του εμβαδού διατομής του αγωγού προκύπτει από τις εξής εξισώσεις:

- $Area[mils^2] = \left(\frac{Current[Amps]}{k \times (Temp_Rise[deg. C])^b} \right)^{\frac{1}{c}}$
- For IPC-2221 external layers: $k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725$
- $Width[mils] = \frac{Area[mils^2]}{Thickness[oz] \times 1.378[mils/oz]}$

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης πλακέτας, για πάχος χαλκού 2 ουγγιές/πόδια² και πλάτος γραμμών 4 χιλιοστών, η μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας με 16Α ρεύμα να διαρρέουν υπολογίζεται στους 25°C, ενώ για το μήκος των 50 χιλιοστών η πτώση τάσης ανέρχεται στα 1,37mV ανά γραμμή και οι απώλειες ενέργειας στα 22mW.

5.1.3 Μικροελεγκτής



Σχήμα 5.4: ESP32-WROOM-32

Οι απαιτήσεις για την επιλογή του μικροελεγκτή είναι ελάχιστες, καθώς η εφαρμογή δεν απαιτεί ιδιαίτερη επεξεργαστική ισχύ, ούτε πληθώρα εισόδων-εξόδων. Απαιτείται ένας δίαυλος επικοινωνίας SPI για επικοινωνία με τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό, τέσσερις θήρες εισόδου-εξόδου για την επικοινωνία με το RS485, και ένα μέσο για σύνδεση στον παγκόσμιο ιστό. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί είτε με σύνδεση σε κάποιο τοπικό δίκτυο, ενσύρματα ή ασύρματα, είτε μέσω του δικτύου κινητών τηλεπικοινωνιών GSM/LTE. Θα μπορούσαν βεβαίως να χρησιμοποιηθούν κι άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως LoRa, αλλά σε κάθε περίπτωση θα απαιτούσαν κι έναν ενδιάμεσο δρομολογητή, περιπλέκοντας την εγκατάσταση.

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε είναι ο ESP32 της Espressif. Κυριότερος λόγος της επιλογής αυτής είναι η ο ενσωματωμένος πομποδέκτης WiFi, καθώς και η ενσωματωμένη κεραία. Οποιοσδήποτε μικροελεγκτής δεν συμπεριλαμβάνει WiFi θα είχε μεγαλύτερο κόστος για την τοποθέτηση εξωτερικού πομποδέκτη. Όσον αφορά τις λοιπές απαιτήσεις ο ESP32 τις υπερκαλύπτει καθώς διαθέτει [21]:

- 2πύρινο 32-bit επεξεργαστή
- 520kiB RAM, 448kiB ROM
- 34 GPIOs
- 4 διαύλους SPI
- 3 διαύλους UART
- Wi-Fi: 802.11 b/g/n
- Wi-Fi Protected Access (WPA)
- Flash encryption

Η παραπάνω λίστα δεν είναι εξαντλητική, αλλά αφορά τις δυνατότητες που, εν μέρει, αξιοποιεί η παρούσα εφαρμογή.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές εκδόσεις του μικροελεγκτή, καθώς και πολλά διαφορετικά πακέτα και έτοιμες πλακέτες. Η πλακέτα ESP32-WROOM-32 είναι η πρώτη πλακέτα που διέθεσε στο εμπόριο η Espressif και μία από τις πιο διαδεδομένες. Διαθέτει ενσωματωμένη, τυπωμένη κεραία WiFi, και ένα κέλυφος για μερική προστασία από ραδιοκύματα και λοιπές παρεμβολές. Για εφαρμογές που το μικρό μέγεθος δεν αποτελεί άμεση προτεραιότητα, αποτελεί μία εύχρηστη λύση, καθώς απαιτείται μόνο εξωτερική τροφοδοσία 3.3V και εξωτερικός προγραμματισμός για να λειτουργήσει.

την ασφάλεια της συσκευής.

Για την αξιοποίηση της DC τροφοδοσίας υπάρχουν δύο τεχνικές όπου θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν: ο γραμμικός σταθεροποιητής τάσης και ο μετατροπέας τάσης. Το εύρος λειτουργίας των μπαταριών στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί να κυμαίνεται από τα 10V για μία πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία ονομαστικής τάσης 12V, έως και 60V για μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία ονομαστικής τάσης 48V. Η μέγιστη αυτή τάση είναι απαγορευτική για τον γραμμικό σταθεροποιητή τάσης, καθώς οι απώλεια ενέργειας θα είναι μεγάλη και η απόδοση μικρότερη του 10% σε κάποιες περιπτώσεις.

$$\bullet P_{\text{loss}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) \times I_{\text{load}}$$

$$\bullet \eta = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \times 100\%$$

Το ολοκληρωμένο που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή τάσης είναι το Texas Instruments TL2575HV-05[23]. Κριτήριο επιλογής ήταν η σταθερή τάση εξόδου των 5V, ενώ και η δυνατότητα εισόδου έως και 60V. Η μεγαλύτερη πρόκληση βρίσκεται στη διαστασιολόγηση των περιφερειακών παθητικών στοιχείων. Η τάση εισόδου μπορεί όπως αναφέρθηκε να έχει μεγάλη διακύμανση, ενώ ταυτόχρονα και η ένταση στην έξοδο μπορεί να βρίσκεται στην τάξη των mA σε κατάσταση αναμονής της συσκευής, ή στην τάξη των εκατοντάδων mA κατά την εκπομπή σήματος. Γενικότερα για την διαστασιολόγηση των στοιχείων ισχύει [19]:

- Μεγαλύτερη συχνότητα διακοπής επιφέρει μικρότερη κυμμάτωση στην έξοδο, άρα δυνατότητα επιλογής μικρότερων παθητικών στοιχείων. Αυξάνει όμως τις θερμικές απώλειες, άρα και την απόδοση, και συνεπώς περιορίζει την μέγιστη ένταση του ρεύματος.
- Η μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού μεταξύ εισόδου και εξόδου επιφέρει μεγαλύτερη κυμμάτωση στην έξοδο, άρα ανάγκη για μεγαλύτερα φίλτρα, ή συχνότητα διακοπής.
- Η επιλογή του πηνίου γίνεται βάσει των παραπάνω στοιχείων, καθώς και της επιθυμητής κυμμάτωσης στο ρεύμα (συνήθως 20-40%). Πέρα από την αυτεπαγωγή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και το μέγιστο ρεύμα όπου μπορεί να διαρρέει το πηνίο να μην ξεπερνάει το ρεύμα που θα καταναλώνει το φορτίο.
- Για τους πυκνωτές μεγάλης σημασίας είναι η χαμηλή τιμή ESR (ισοδύναμη εν-σειρά αντίσταση), καθώς μια μεγάλη τιμή προκαλεί μεγαλύτερη από την υπολογισμένη κυμμάτωση.

$$L = \frac{V_{\text{OUT}} \times (V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}})}{\Delta I_L \times f_S \times V_{\text{IN}}}$$

$$C_{\text{OUT}(\text{min})} = \frac{\Delta L}{8 \times f_S \times \Delta V_{\text{OUT}}}$$

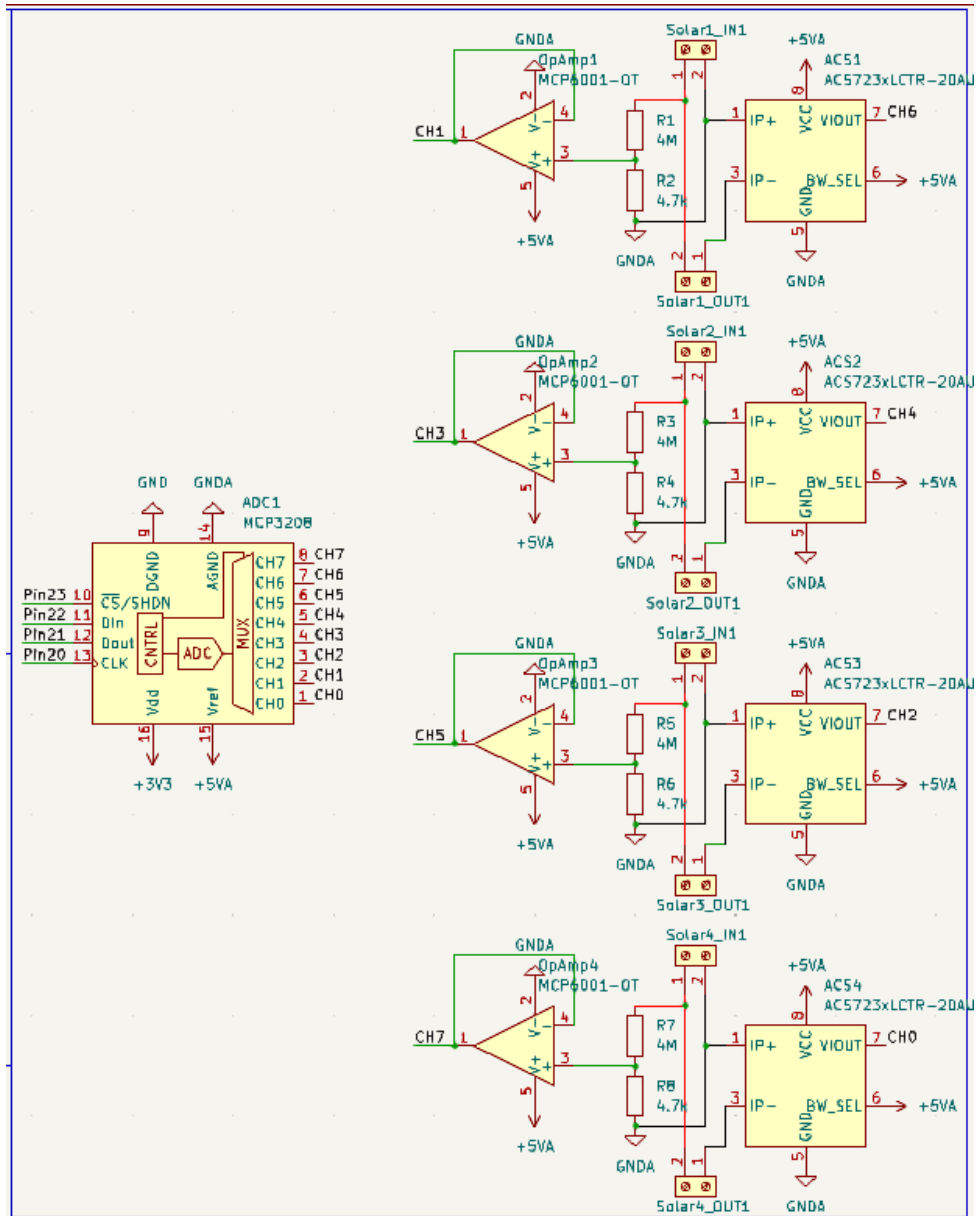
- V_{IN} = typical input voltage
 V_{OUT} = desired output voltage
 f_S = minimum switching frequency of the converter
 ΔI_L = estimated inductor ripple current, $\Delta I = (0.2 \text{ to } 0.4) \times I_{OUT(max)}$
 $C_{OUT(min)}$ = minimum output capacitance

Τελικώς, η τιμές του πηνίου και του πυκνωτή εξόδου που επιλέχθηκαν είναι 330uH και 330uF αντίστοιχα, όπως προστάζει η τυπική εφαρμογή του ολοκληρωμένου κατά τον κατασκευαστή. Υπολογίζεται πως στην περίπτωση όπου η τάση εισόδου είναι 48V ονομαστική, και το φορτίο μικρότερο των 100mA η κυμμάτωση της τάσης μπορεί να ξεπεράσει τα 100mA. Δύο ξεχωριστές τροφοδοσίες προκύπτουν από την παροχή των 5V. Μία των 3.3V για τροφοδοσία του μικροελεγκτή και μία απομονωμένη των 5V για τροφοδοσία του κυκλώματος μετρήσεων.

Για τη μετατροπή των 5V σε 3.3V χρησιμοποιήθηκε ο πολύ δημοφιλής γραμμικός σταθεροποιητής τάσης AMS1117-3.3. Με μέγιστο ρεύμα 800mA και μέγιστη απόκλιση 15mV εξασφαλίζει την κατάλληλη τροφοδοσία του ESP32.

Για το κύκλωμα μετρήσεων προτιμήθηκε απομονωμένη τροφοδοσία 5V, πρωτίστως για τη διαθεσιμότητα των ολοκληρωμένων με ονομαστική τάση λειτουργίας τα 5V. Το ολοκληρωμένο R05CTE05S[24] που χρησιμοποιήθηκε εξασφαλίζει την απομόνωση των λοιπών κυκλωμάτων, άρα και της κεντρικής τροφοδοσίας από την υψηλή DC τάση που προέρχεται από τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών πάνελ. Το ίδιο το ολοκληρωμένο μπορεί να παρέχει απομόνωση για 1 λεπτό με διαφορά δυναμικού 3000V, και 1 δευτερόλεπτο στα 3600kV, τάση πολύ μεγαλύτερη των 1000V που μπορεί να φθάσει η φωτοβολταϊκή συστοιχία, καθώς και μεγαλύτερη της μέγιστης τάσης που εξασφαλίζουν πολλά προστατευτικά κρουστικών υπερτάσεων του εμπορίου. Ταυτόχρονα προσφέρει σταθεροποίηση της τάσης, όπου για είσοδο 4.5-5.5V η τυπική κυμμάτωση στην έξοδο βρίσκεται στα 50mVp-p. Το ολοκληρωμένο συνοδεύουν δύο ζευγάρια πυκνωτών, ένα στην είσοδο κι ένα στην έξοδο, 0,1uF και 10uF.

5.1.5 Κύκλωμα Μετρήσεων



Σχήμα 5.6: Κύκλωμα Μετρήσεων

Στο επίκεντρο του Κυκλώματος Μετρήσεων βρίσκεται το ολοκληρωμένο MCP3208, ένας μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό (Analog-to-Digital Converter, ADC). Διαθέτει 8 κανάλια, δηλαδή μπορεί να παίρνει 8 ταυτόχρονες μετρήσεις, και ανάλυση 12-bit, δηλαδή 4096 διακριτές τιμές. Η αρχή λειτουργίας των εν λόγω μετατροπέων είναι η εξής: Δειγματοληπτείται η τάση στην είσοδο, και συγκρίνεται με την τάση αναφοράς. Η έξοδος του μετατροπέα, σε ψηφιακή μορφή είναι ένας αριθμός, όπου προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Digital Output (Code)} = \text{round} \left(\frac{V_{in}}{\frac{V_{ref}-0}{2^N}} \right)$$

όπου:

V_{in} είναι η τάση προς μέτρηση,

V_{ref} είναι η τάση αναφοράς του ADC,

N είναι ανάλυση σε bit,

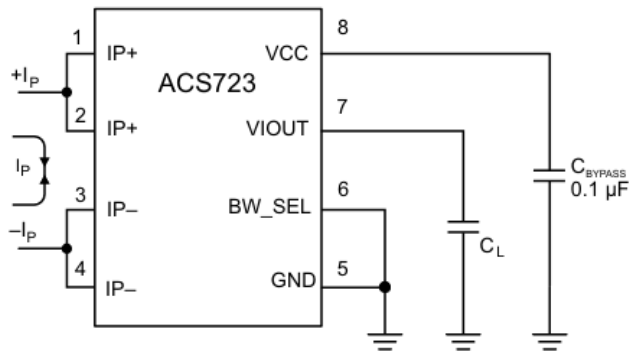
round είναι η συνάρτηση που στρογγυλοποιεί μια τιμή στον κοντινότερο ακέραιο.

Στην πλακέτα υπάρχουν 8 διπλές κλέμες. 4 εισόδου στο πάνω μέρος και 4 εξόδου στο κάτω μέρος. Η κάθε κλέμα έχει αρνητικό και θετικό πόλο. Σε αυτές συνδέονται οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες, με μέγιστη τάση τα 1000V και μέγιστη ένταση τα 16A. Η τάση των 1000V μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό τόξο εάν οι δύο αγωγοί βρεθούν σε μικρή απόσταση, τυπικά 1mm, αλλά αυτή μπορεί να μεταβληθεί λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι κλέμες που επιλέχθηκαν είναι οι Phoenix Contact MKDSV 5 HV/ 2-9,52[25]. Η ονομαστική τους τάση ανέρχεται στα 1000V, και η ονομαστική τους ένταση στα 32A, ενώ μπορούν να ανεχθούν και κρουστική υπέρταση έως 8kV. Μπορούν να υποδεχθούν καλώδια εύκαμπτα με ακροχιτώνια εμβαδού διατομής έως 4 mm². Η απόσταση μεταξύ των δύο επαφών τους είναι 9.52mm.

Για τη μέτρηση της τάσης χρησιμοποιείται ένας απλός διαιρέτης τάσης, ώστε να τη μειώσει σε επίπεδα όπου ο ADC είναι ικανός να μετρήσει. Ο διαιρέτης τάσης χρησιμοποιεί έναν αντιστάτη των 4MΩ, κι έναν των 10kΩ, έτσι ώστε η τάση των 1000V να μετατρέπεται σε 2.5V. Το ρεύμα που θα διαρρέει τους αντιστάτες στην μέγιστη τάση των 1000V είναι 0.25mA, και η ισχύς στον αντιστάτη των 4MΩ 250mW. Έχει επιλεγθεί λοιπόν αντιστάτης με αντοχή στα 2000V τάση και 750mW ισχύ[26].

Για περαιτέρω προστασία του κυκλώματος από τυχόν υπέρταση, η τάση που προκύπτει από τον διαιρέτη τάσης περνά από έναν κύκλωμα ακόλουθου τάσης, υλοποιημένο με τον τελεστικό ενισχυτή MCP6001[27]. Βασικό κριτήριο για την επιλογή του τελεστικού ενισχυτή είναι η μονοπολική τροφοδοσία στα 3.3V ή 5V. Τα λοιπά χαρακτηριστικά του τελεστικού δεν έχουν καμία σημασία καθώς η τάση εισόδου είναι σταθερή.

Για τον υπολογισμό του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο ACS723, στην έκδοση ACS723LLCTR-20AU-T[28]. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο χρησιμοποιεί το φαινόμενο Χολ για τη μέτρηση του ρεύματος. Η εναλλακτική θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένας αντιστάτης διακλάδωσης, δηλαδή ένας αντιστάτης με πολύ μικρή τιμή αντίστασης, όπου όταν διαρρέεται από ρεύμα προκαλεί μια μικρή πτώση τάσης η οποία, με τη χρήση του νόμου του Ωμ βοηθά στον υπολογισμό του ρεύματος. Το πρόβλημα που δημιουργείται με αυτήν την προσέγγιση είναι η παρασιτική κατανάλωση, καθώς και η θερμότητα που παράγει ο αντιστάτης. Μία τεχνική για την επίλυση του προβλήματος είναι να χρησιμοποιηθεί αντιστάτης πολύ μικρής αντίστασης, έτσι ώστε να προκαλεί πολύ μικρή πτώση τάσης, άρα και απώλειες, και στη συνέχεια η τάση του να ενισχύεται και ώστε να μετρηθεί. Σε αυτήν την περίπτωση έχει χαθεί το πλεονέκτημα της απλότητας, και το αποτύπωμα του κυκλώματος είναι αρκετά μεγάλο. Το ACS723 είναι ικανό να μετρήσει έως και 20A συνεχούς ρεύματος, χωρίς παρασιτική κατανάλωση.



The ACS723 outputs an analog signal, V_{IOUT} , that changes, proportionally, with the bidirectional AC or DC primary sensed current, I_P , within the specified measurement range. The BW_SEL pin can be used to select one of the two bandwidths to optimize the noise performance. Grounding the BW_SEL pin puts the part in the high bandwidth, 80 kHz, mode.

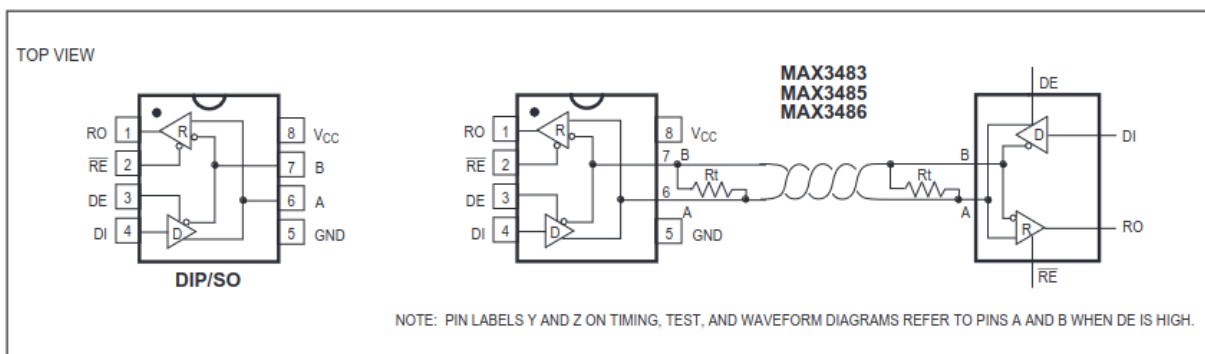
Typical Application

Σχήμα 5.7: ACS723 Τυπική Εφαρμογή

5.1.6 Κύκλωμα Επικοινωνίας RS485

Για την επικοινωνία με χρήση του πρωτοκόλλου RS-485 χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο MAX3485[29]. Η ενσωμάτωση του είναι απλούστατη, καθώς απαιτείται απλώς τροφοδοσία 3.3V, την οποία μετατρέπει εσωτερικά στα -7V / +12V που προβλέπει το RS-485 πρωτόκολλο. Για τη σύνδεση με τον μικροελεγκτή απαιτούνται τέσσερις επαφές:

- DE: Driver output Enable, ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την έξοδο του οδηγού
- RE: Receiver output Enable, ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την έξοδο του δέκτη
- DI: Driver Input, καθορίζει το λογικό επίπεδο του μεταδιδόμενου σήματος στο διάλυο
- RO: Receiver Output, παρέχει τα ληφθέντα δεδομένα από το διάλυο

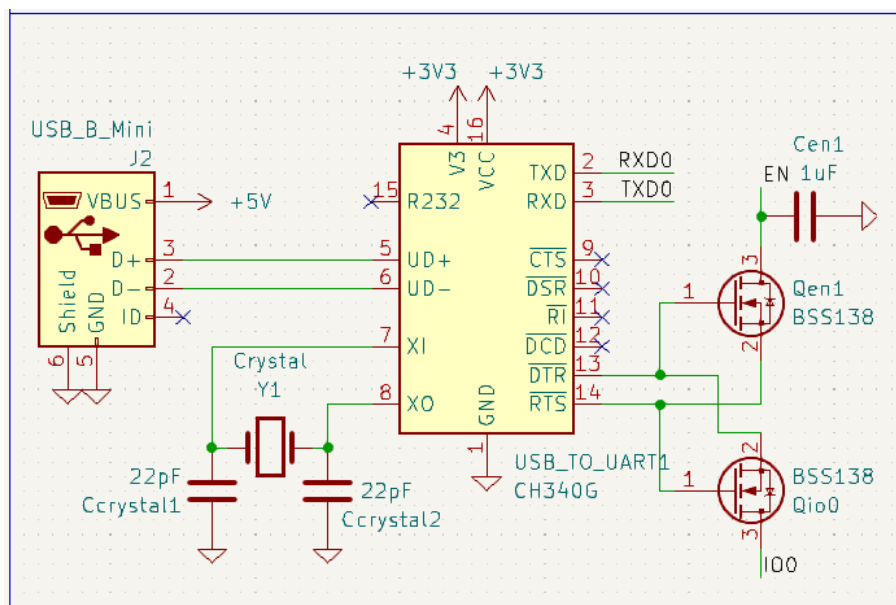


Σχήμα 5.8: MAX3485 Τυπική Διάταξη

5.1.7 Κύκλωμα Προγραμματισμού

Στο κέντρο του κυκλώματος προγραμματισμού βρίσκεται το ολοκληρωμένο CH340G/C[30]. Η διαφορά μεταξύ των CH340G και CH340C είναι πως το δεύτερο δεν απαιτεί εξωτερικό κρύσταλλο για το χρονισμό του. Το ολοκληρωμένο προσφέρει σειριακή επικοινωνία με τον μικροελεγκτή μέσω του διαύλου USB. Χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, καθώς και για αμφίδρομη

επικοινωνία μετέπειτα. Μπορεί να λειτουργεί είτε στα 3.3V είτε στα 5V, ανάλογα την παροχή στην επαφή VCC. Στην παρούσα υλοποίηση η θύρα USB παρέχει τροφοδοσία στην γραμμή των 5V και ακολουθεί η μετατροπή στα 3.3V από το AMS1117-3.3 όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το CH340 συνδέεται με τη θύρα USB, πέρα από την τροφοδοσία στα δύο Data Pins, και πληρεί τις προδιαγραφές του USB 2.0. Με τον μικροελεγκτή συνδέεται με τις δύο επαφές για τη σειριακή επικοινωνία, RXDO/IO3/Pin34 και TXDO/IO1/Pin35. Το ESP32 επικοινωνεί με ταχύτητα 115200 baud για τον προγραμματισμό του, αλλά μπορεί να υποστηρίξει και μεγαλύτερες ταχύτητες, ανάλογα την έκδοση του chip, με τα 921600 baud να υποστηρίζονται από όλα τα chip. Το CH340 υποστηρίζει ταχύτητες έως και 2000000 baud. Τέλος οι επαφές DTR (Data Terminal Ready) και RTS (Request To Send). Κατά τον προγραμματισμό το DTR τοποθετεί τον μικροελεγκτή σε bootloader mode, και το RTS τον επανεκκινεί.

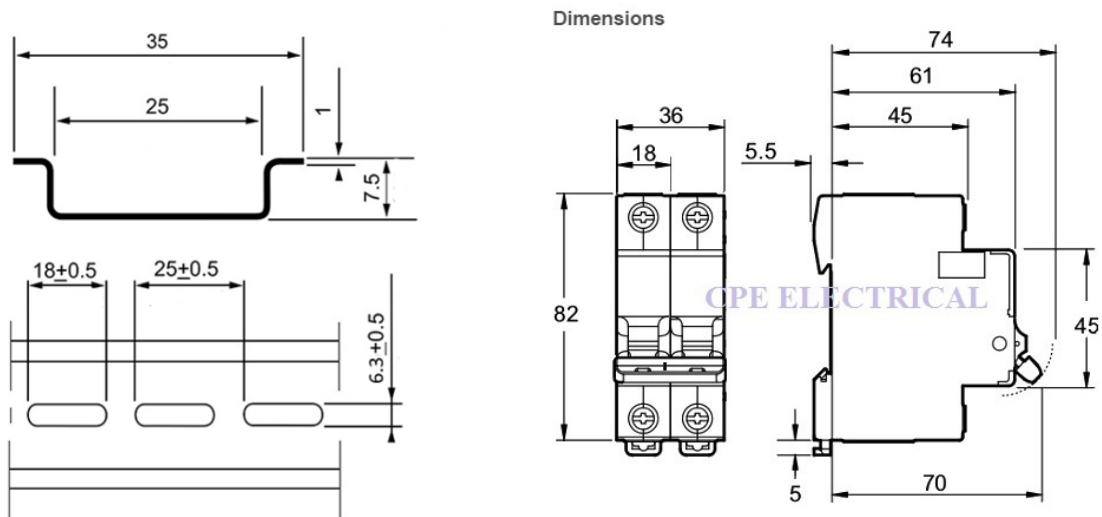


Σχήμα 5.9: Κύκλωμα Προγραμματισμού

5.1.8 Κέλυφος και Εγκατάσταση σε Πίνακα

Για την εγκατάσταση της συσκευής σε οικιακό ηλεκτρολογικό πίνακα, το κέλυφος οφείλει να υπακούει στις προδιαγραφές IEC 60715. Η ράγα όπου θα στερεωθεί έχει ακριβείς διαστάσεις και πάχος. Συγκεκριμένα το πάχος της είναι 1χιλ, και έχει ένα επίπεδο μέρος 25χιλ, όπου υψώνεται κατά 7.5χιλ και μετά το πλάτος επεκτείνεται στα 35χιλ. Τα εξαρτήματα δεν έχουν όλα όμοιες διαστάσεις. Βασική υποχρέωση είναι μετά τα 45χιλ από τη ράγα το φάρδος να μην ξεπερνά τα 45χιλ, έτσι ώστε να εφαρμόζει σωστά στο κάλυμμα το ηλεκτρολογικό πίνακα.

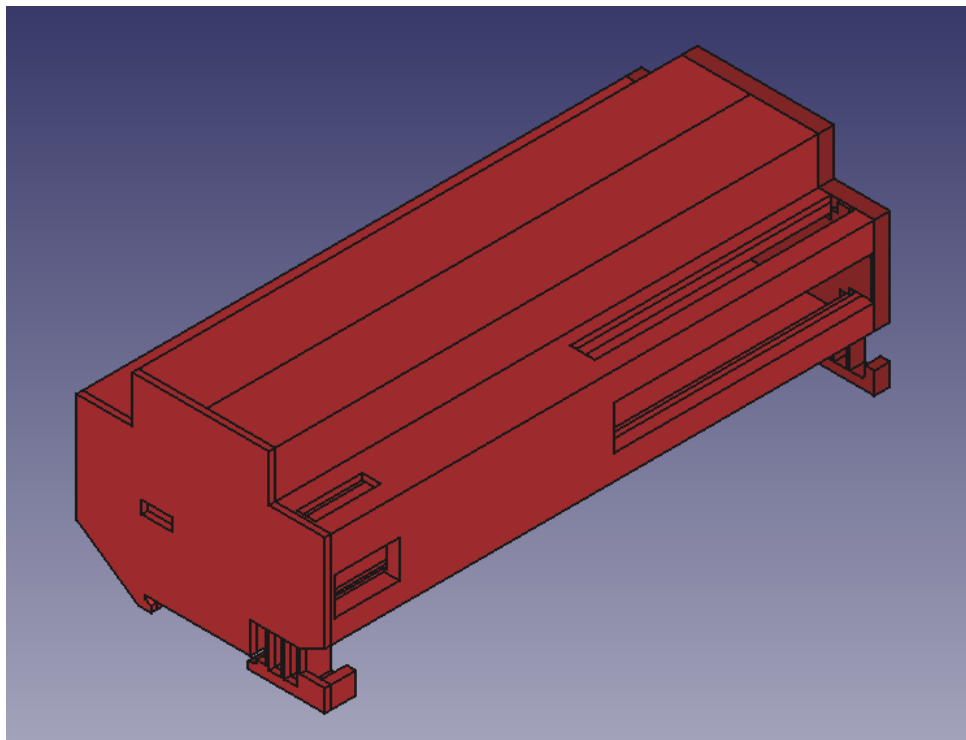
Ο σχεδιασμός έγινε στο FreeCAD, ένα Open-Source πρόγραμμα παραμετρικού σχεδιασμού CAD. Το κέλυφος σχεδιάστηκε με σκοπό να μπορεί εύκολα να εκτυπωθεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή FDM. Η δεξιά πλευρά, όντας επίπεδη, χρησιμοποιήθηκε ως βάση κατά την εκτύπωση, με τις υπόλοιπες στρώσεις να προστίθενται προς τα αριστερά. Για το αριστερό άκρο σχεδιάστηκε ένα δεύτερο μέλος, ώστε να μπορέσει να εκτυπωθεί τοποθετημένο επίπεδα, καθώς και να επιτρέπει την τοποθέτηση της πλακέτας εντός τους κελύφους. Για την τοποθέτηση στη ράγα, υπάρχει μία σταθερή προεξοχή, όπου τοποθετείται στο πάνω μέρος της ράγας, και μία ελαστική στο κάτω μέρος.



(a) Ράγα κατά το πρότυπο

(b) Τυπικές Διαστάσεις Αυτόματης Ασφάλειας

Σχήμα 5.10: Διαστάσεις Ράγας και Εξαρτημάτων

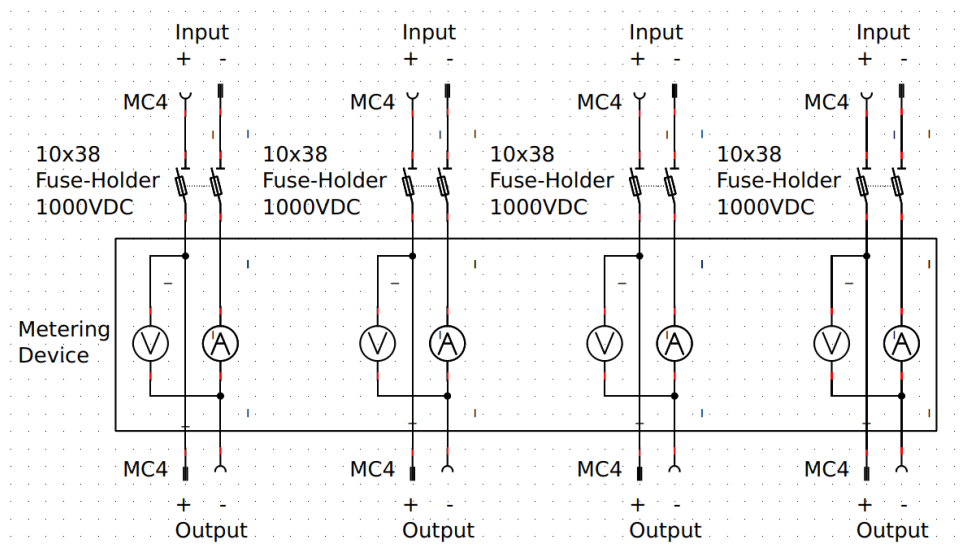


Σχήμα 5.11: Σχέδιο Κελύφους σε CAD

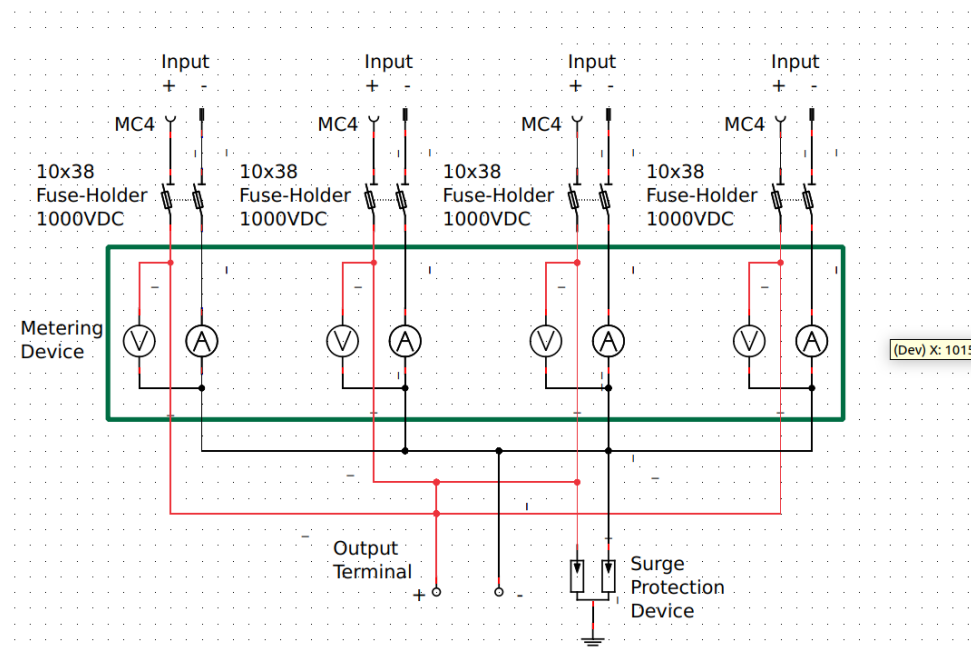
Το μήκος της πλακέτας είναι 174χιλ και το πλάτος 68χιλ. Μία θέση στη ράγα καταλαμβάνει 18χιλ, οπότε η συσκευή καταλαμβάνει 10 θέσεις. Το πλάτος δεν ξεπερνάει τα 80χιλ, όπου είναι το τυπικό για τις μικροαντόμενες ασφάλειες. Έτσι η συσκευή τοποθετείται εύκολα σε οποιονδήποτε ηλεκτρολογικό πίνακα.

Κατά την εγκατάσταση στον ηλεκτρολογικό πίνακα η κάθε συστοιχία ασφαρίζεται ξεχωριστά με

διπολικούς ασφαλειοαποζεύκτες και ασφάλειες τήξεως, μέγιστης τάσης 1000VDC και μέγιστου ρεύματος 16A. Τυπική διάσταση των φυσιγγίων είναι 10x38 για αυτήν την εφαρμογή. Η είσοδος μπορεί να γίνεται από καλώδια συνδεδεμένα στις κλέμες των ασφαλειοαποζευκτών, ή με συνδέσμους MC4, όπου χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Η διατομή του καλωδίου που χρησιμοποιείται για τις εσωτερικές συνδέσεις οφείλει να είναι 4mm², όπου είναι η μέγιστη διατομή για τις κλέμες του μετρητή και ικανή για να φέρει 20A ρεύματος με ασφάλεια. Στην έξοδο οι συστοιχίες μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα, ή και να παραλληλίζονται. Μπορούν επίσης να τοποθετηθούν Απαγωγί Κρουστικών Υπερτάσεων (Surge Protection Device, SPD), κοινώς αντικεραυνικά, σε κάθε μία από τις εξόδους. Αυτά διαθέτουν δύο φυσίγγια, ένα για κάθε πόλο (θετικό και αρνητικό), με το κάτω άκρο τους να συνδέεται στη γείωση.



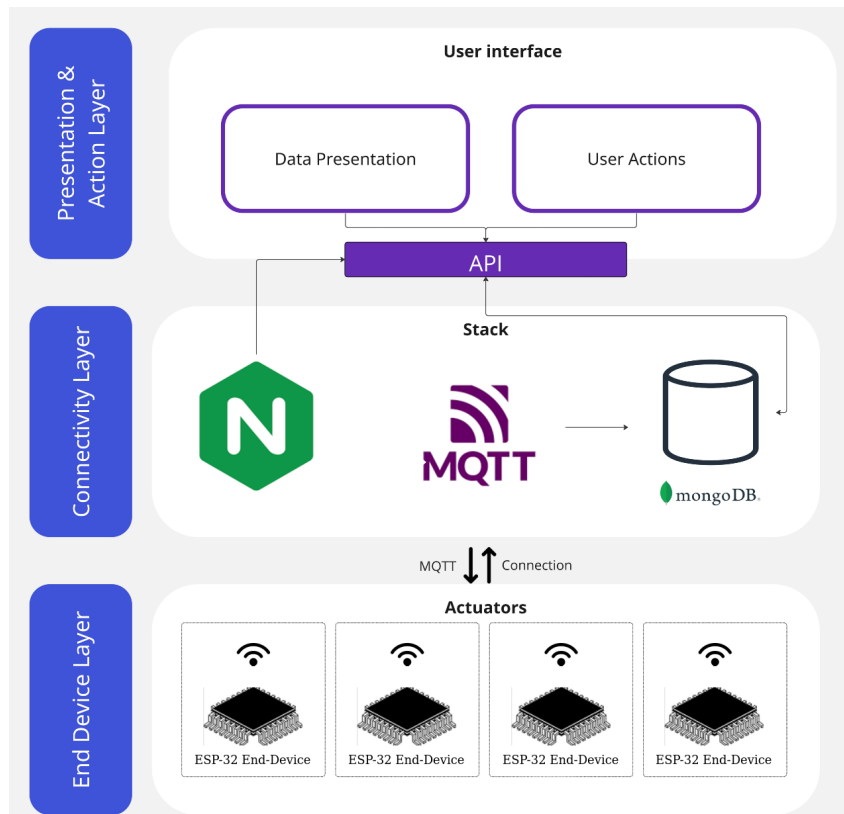
Σχήμα 5.12: Ηλεκτρολογικό Σχέδιο Πίνακα, Ανεξάρτητες Συστοιχίες



Σχήμα 5.13: Ηλεκτρολογικό Σχέδιο Πίνακα, Παράλληλες Συστοιχίες

5.2 Λογισμικό

Για τις ανάγκες της εφαρμογής αναπτύχθηκε λογισμικό για τον μικροελεγκτή, και την διαδικτυακή υπηρεσία. Το λογισμικό του μικροελεγκτή είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση στο διαδίκτυο και την αποστολή των μετρήσεων στον εξυπηρετητή. Εκεί τα δεδομένα λαμβάνονται από τον "μεσίτη" όπου τα προωθεί στην βάση δεδομένων. Για την παρουσίαση της πληροφορίας, καθώς και τη διαχείριση των χρηστών και των συστημάτων, αναπτύχθηκε μία διεπαφή χρήστη με τη μορφή ιστοσελίδας. Οι ξεχωριστές υπηρεσίες (back-end, front-end, DB, Broker) εκτελούνται ανεξάρτητα, παρέχοντας ευελιξία, καθώς μπορούν να εκτελούνται σε διαφορετικά μηχανήματα ή να τροποποιούνται μεμονωμένα. [33]



Σχήμα 5.14: Υλοποίηση Λογισμικού

5.2.1 Firmware Μικροελεγκτή

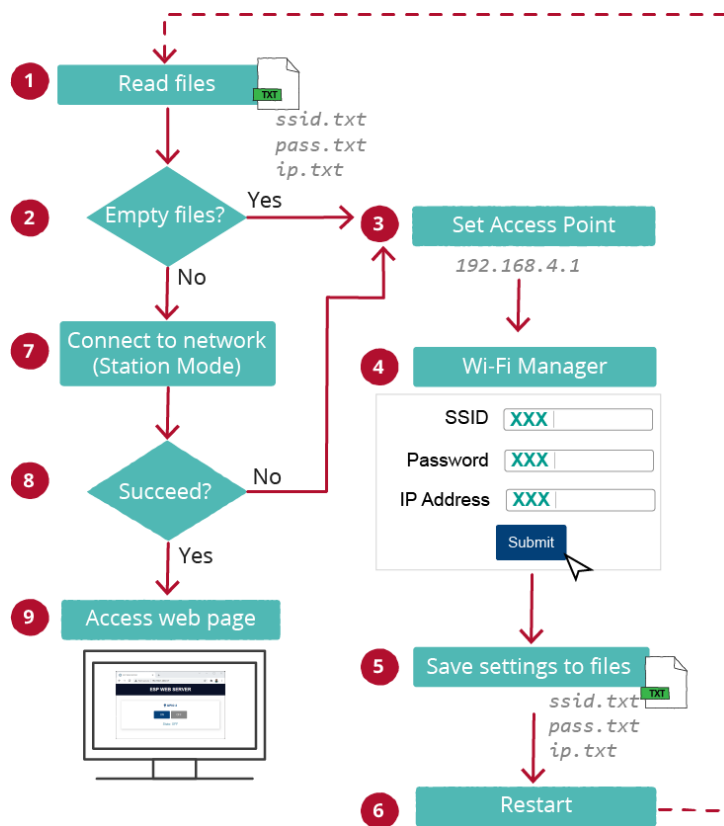
Για τον προγραμματισμό του ESP32 υπάρχουν δύο πλατφόρμες. Η πρώτη είναι η μητρική του, ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), και η δεύτερη το Arduino Framework. Παράλληλα, στα δύο αυτά περιβάλλοντα υποστηρίζονται και δύο διαφορετικές γλώσσες. Η C++ και η Micropython. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το Arduino Framework με τη γλώσσα C++. Οι βιβλιοθήκες του Arduino Framework είναι εκτενείς, και υποστηρίζουν τεράστιο πλήθος υποστηριζόμενων περιφερειακών. Είναι επίσης εύκολο ο κώδικας που γράφεται στο Arduino Framework να αξιοποιηθεί και σε διαφορετικούς μικροελεγκτές, ακόμα και διαφορετικού κατασκευαστή. Το μοναδικό μειονέκτημα στη χρήση του Arduino Framework είναι η χειρότερη διαχείριση της μνήμης και του αποθηκευτικού χώρου σε σύγκριση με το ESP-IDF. Η MicroPython, προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα στην ανάπτυξη, αλλά στερείται σε υποστήριξη από βιβλιοθήκες, ενώ η C++ έχει καθιερωθεί

ως η συνηθέστερη και πιο αξιόπιστη για την ανάπτυξη εφαρμογών σε ενσωματωμένα συστήματα.

Ο κώδικας στο Arduino Framework οφείλει να περιλαμβάνει δύο κύριες μεθόδους, την `setup()` και την `loop()`. Η πρώτη εκτελείται κατά την εκκίνηση του μικροελεγκτή και με το πέρας της η δεύτερη εκτελείται επαναλαμβανόμενα για όσο παραμένει ο μικροελεγκτής σε λειτουργία. Η `setup()` λοιπόν χρησιμοποιείται για αρχικοποίηση μεταβλητών και περιφερειακών, ενώ η κυρίως λογική του προγράμματος υλοποιείται στην `loop()`.

Ο μικροελεγκτής ESP32 διαθέτει δύο πυρήνες. Σε πολλές εφαρμογές η επεξεργαστική ισχύς και των δύο δεν απαιτείται. Προσφέρεται όμως η δυνατότητα παραλληλισμού των διεργασιών όταν κάποια δεσμεύει τη CPU για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στη παρούσα εφαρμογή, ο δεύτερος πυρήνας χρησιμοποιείται για να λαμβάνει τις μετρήσεις, δεσμεύοντας το διάλυλο SPI, ενώ ο πρώτος πυρήνας αξιοποιείται για την επικοινωνία με το Server, δεσμεύοντας το διάλυλο WiFi.

Για τη σύνδεση σε δίκτυο χρησιμοποιείται το ενσωματωμένο WiFi του ESP32. Έχει υλοποιηθεί ένας διαχειριστής WiFi με σκοπό την καταχώρηση των στοιχείων (SSID, Password) σημείου πρόσβασης. Κατά την εκκίνηση ο μικροελεγκτής ελέγχει τη flash μνήμη του για αποθηκευμένα στοιχεία. Εφόσον υπάρχουν αποθηκευμένα στοιχεία, κάνει προσπάθεια σύνδεσης. Στην περίπτωση ανυπαρξίας στοιχείων σύνδεσης, ο μικροελεγκτής δημιουργεί δικό του σημείο πρόσβασης, όπου ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί για να καταχωρήσει στοιχεία. Εάν υπήρχαν καταχωρημένα στοιχεία, αλλά ταυτόχρονα η σύνδεση ήταν ανεπιτυχής, δημιουργείται πάλι σημείο πρόσβασης, το οποίο όμως περιοδικά απενεργοποιείται για μικρό χρονικό διάστημα για νέα προσπάθεια σύνδεσης. Όταν υπάρξει επιτυχής σύνδεση ξεκινάει η επικοινωνία με τον server. Έτσι η συσκευή προβλέπει κάθε περίπτωση, δηλαδή την πρώτη εγκατάσταση, την μετεγκατάσταση, την προσωρινή απώλεια σύνδεσης, και την επιτυχή σύνδεση.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα Ροής WiFi Manager

Κατά την τυπική λειτουργία του συστήματος, όπου έχει συνδεθεί επιτυχώς με τον Server, ο μικροελεγκτής διατηρεί τη σύνδεση με περιοδική επικοινωνία (ανά 1 λεπτό, μπορεί να μεταβληθεί), όπου ενημερώνει για την κατάσταση του ίδιου του συστήματος, καθώς και για τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις μπορούν να λαμβάνονται πιο τακτικά, με ρυθμό της τάξης των kHz, αν και στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών η μεταβολές είναι αργές, και μετρήσεις ανά περιόδους λεπτών αποτυπώνουν την πληροφορία με ικανοποιητική ακρίβεια. Τα δεδομένα μεταφέρονται σε μορφή json.

5.2.2 Επικοινωνία με Εξυπηρετητή

Από τα τέσσερα επίπεδα δικτύου του TCP/IP μοντέλου, τα τρία κατώτερα (Network Access, Internet, Transport) είναι εξ αρχής υλοποιημένα από τη βιβλιοθήκη του WiFi. Συγκεκριμένα για το επίπεδο πρόσβασης χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο 802.11b/g/n, για το επίπεδο διαδικτύου το IPv4, και για το επίπεδο μεταφοράς το TCP. Στο ανώτερο επίπεδο, το επίπεδο εφαρμογής, υπάρχουν διάφορες επιλογές, όπως HTTP, MQTT, CoAP, AMQP, DDS[31]. Λόγω της απλούστερης υλοποίησης και των καλύτερων επιδόσεων επιλέγεται, το πλέον διαδεδομένο για χρήση σε IOT εφαρμογές, MQTT.

Για το επίπεδο Πρόσβασης Δικτύου υπάρχουν και εναλλακτικά πρωτόκολλα που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν. Σε οικιακές εγκαταστάσεις όπου η πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω επίγειας γραμμής θεωρείται δεδομένη, το WiFi θεωρείται διαθέσιμο και προτιμάται καθώς δεν έχει επιπλέον κόστος. Σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως φωτοβολταϊκά πάρκα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το GSM/LTE, το οποίο όμως απαιτεί επιπλέον υλικό κατά την υλοποίηση της συσκευής, και συνδρομή στο δίκτυο

κινητής τηλεφωνίας. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το LoRa, όπου απαιτεί επίσης επιπλέον υλικό, αλλά και διαθέσιμο σημείο πρόσβασης σε κοντινή απόσταση για τη σύνδεση με το διαδίκτυο. Επειδή όμως στα φωτοβολταϊκά πάρκα τοποθετείται GSM/LTE Router για τη χρήση καμερών και για τη τηλεμετρία, είναι σύνηθες κι εκεί να υπάρχει σημείο πρόσβασης WiFi.

Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) είναι ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων για επικοινωνία μεταξύ συσκευών (M2M). Το MQTT προτιμάται σε εφαρμογές IOT, καθώς χρησιμοποιεί εξαιρετικά μικρό μέγεθος πακέτων, με την κεφαλίδα να μπορεί να είναι μόλις 2 byte σε μέγεθος. Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπου πολλές συσκευές IOT εξυπηρετούνται από έναν κεντρικό κόμβο, το MQTT αποδεικνύεται πολύ ταχύτερο από πρωτόκολλα όπως το HTTP. Χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική "publish/subscribe", όπου κάποιοι πελάτες "publishers" αποστέλνουν μηνύματα σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή "Broker", τα οποία μηνύματα λαμβάνονται από άλλους πελάτες "subscribers" με αναγνωριστικό το θέμα "topic".

Χρησιμοποιείται επίσης ένας μηχανισμός Quality of Service (QoS) τριών επιπέδων. Στο επίπεδο 0 το μήνυμα αποστέλλεται χωρίς επιβεβαίωση. Στο επίπεδο 1 αποστέλλεται το μήνυμα και ο Broker το προωθεί ακόμα κι αν ο publisher δεν λάβει την επιβεβαίωση λόγω σφάλματος με αποτέλεσμα την αποστολή διπλότυπου. Στο επίπεδο 2 αποστέλλεται το μήνυμα και δεν προωθείται στους subscribers έως ότου ολοκληρωθεί μία 4πλη χειραγία.

Όσον αφορά την ασφάλεια, το πρωτόκολλο WiFi και η υλοποίηση του στον μικροελεγκτή και το σημείο πρόσβασης χρησιμοποιεί το WPA/WPA2/WPA3, όπου χρησιμοποιείται κλειδί (Pre-Shared Key, PSK) για την κρυπτογράφηση των μηνυμάτων, καθώς και άλλοι μηχανισμοί για την ασφάλεια των δεδομένων. Το MQTT αξιοποιεί το (Transport Layer Security, TLS) όπου εξασφαλίζει την κρυπτογράφηση, την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των δεδομένων κατά την μεταφορά τους από τον πελάτη στον εξυπηρετητή.

5.2.3 Λογισμικό Εξυπηρετητή

Ως Back-End ορίζεται το λογισμικό που εκτελείται εντός του εξυπηρετητή (Server). Υποχρέωση του είναι να διαχειρίζεται όλες τις διαφορετικές υπηρεσίες που εκτελούνται, όπως η βάση δεδομένων, η επικοινωνία με τις συσκευές και η παρουσίαση της πληροφορίας στον χρήστη. Για την παρούσα υλοποίηση, η βάση δεδομένων, ο MQTT "μεσίτης" (broker) και η ιστοσελίδα αποτελούν ανεξάρτητες υπηρεσίες. Συνδεδειγμένος κρίκος μεταξύ αυτών αποτελεί η υπηρεσία που υλοποιήθηκε για την ομαλή επικοινωνία μεταξύ αυτών.

Για την ανάπτυξη του back-end, και τη δημιουργία ενός API (Application Programmin Interface) χρησιμοποιήθηκε το NodeJS. Το NodeJS είναι ένα περιβάλλον εκτέλεσης javascript ανοικτού κώδικα που μπορεί να λειτουργήσει σε όλες τις πλατφόρμες. Η αρχιτεκτονική του είναι event-driven επιτρέποντας ασύγχρονες εισόδους και εξόδους. Επί του NodeJS χρησιμοποιήθηκε το Express, ένα πλαίσιο (application framework), το δημοφιλέστερο για την ανάπτυξη λογισμικού back-end με τη χρήση του NodeJS.

Το back-end λαμβάνει τα δεδομένα από τον broker και το αρχειοθετεί στη βάση δεδομένων, αφού πρώτα διενεργήσει την ταυτοποίηση της συσκευής, και προσθέσει την ημερομηνία και ώρα όπου παρέλαβε το μήνυμα. Αυτή είναι μία διαδικασία που διενεργείται χωρίς τη συμμετοχή του χρήστη.

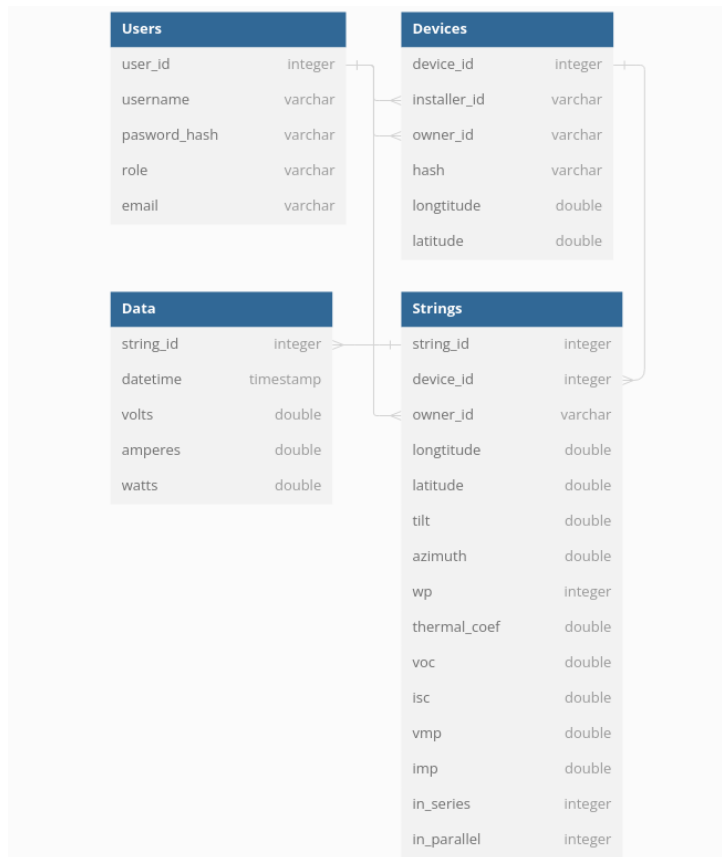
Για την επικοινωνία με το front-end έχουν δημιουργηθεί διαφορετικά "endpoints", δηλαδή URL διευθύνσεις τις οποίες "καλεί" το front-end ζητώντας την αντίστοιχη διεργασία. Παραδείγματα αυτών είναι η δημιουργία χρήστη, η σύνδεση και η εγγραφή, η ανάκτηση των μετρήσεων, η πρόβλεψη της παραγωγής. Για την επικοινωνία αυτή χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο HTTP, και τα αιτήματα HTTP GET και POST.

Η διαδικασία της πρόβλεψης παραγωγής εκτελείται στο back-end όταν ζητηθεί από το front-end. Για την πρόγνωση καιρού καλείται το αντίστοιχο API της μετεωρολογικής υπηρεσίας[32], και λαμβάνεται η πρόγνωση βάσει της τοποθεσίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Έπειτα υπολογίζεται η ισχύς για της διαφορετικές χρονικές στιγμές και το σύνολο αυτών αποστέλλεται στο front-end για να παρουσιαστεί.

5.2.4 Βάση Δεδομένων

Για τη βάση δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η MongoDB, όπου ανήκει στην κατηγορία των NoSQL και είναι ανοιχτού κώδικα. Το μεγάλο προτέρημα της χρήσης της Mongo έναντι άλλων, ιδιαίτερα των SQL βάσεων δεδομένων, είναι πως τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μορφή json, οπότε απαιτείται λιγιστή, ή και καθόλου, τροποποίηση των δεδομένων που καταφθάνουν από τις συσκευές. Ταυτόχρονα οι Συλλογές (Collections), δεν διαθέτουν συγκεκριμένη δομή, οπότε μπορούν να αποθηκεύσουν δεδομένα με διαφορετικά πεδία. Αυτό ωφελεί την εφαρμογή, καθώς σε διαφορετικές εγκαταστάσεις είναι διαφορετικό το πλήθος των μετρήσεων που λαμβάνονται.

Η Mongo δεν χρησιμοποιεί σχήμα, δηλαδή προκαθορισμένη δομή. Για την ανάπτυξη όμως της εφαρμογής ακολουθείται μία τυπική δομή δεδομένων, που χωρίζεται στις τέσσερις παρακάτω Συλλογές, με τα βασικά πεδία. Επιπλέον πεδία μπορούν να προστεθούν με την ανάπτυξη της εφαρμογής.



Σχήμα 5.16: Σχήμα Βάσης Δεδομένων

- Πρώτα είναι η Συλλογή "Users" με τις πληροφορίες των χρηστών. Κύριο πεδίο είναι το "user_id", ένας αριθμός που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση του χρήστη εντός της εφαρμογής. "username" και "password_hash" είναι τα στοιχεία για τη σύνδεση του στην εφαρμογή, με τον κωδικό να αποθηκεύεται κατακερματισμένος. Το πεδίο "role" μπορεί να πάρει την τιμή "installer" για τους τεχνικούς-εγκαταστάτες συστημάτων, ενώ η τιμή "customer" παραπέμπει σε ιδιοκτήτη φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μετά ακολουθούν στοιχεία επικοινωνίας με το "e-mail" να είναι υποχρεωτικό.
- Η Συλλογή "Devices" αφορά όλα τα καταγραφικά μηχανήματα που έχουν εγκατασταθεί. Το πεδίο "device_id" τα ταυτοποιεί εντός της εφαρμογής. Τα πεδία "owner_id" και "installer_id" παραπέμπουν στους εγκαταστάτες και τους ιδιοκτήτες. Τα πεδία "longitude" και "latitude" εκφράζουν τον τόπο όπου είναι τοποθετημένο το μηχάνημα. Τέλος ο κωδικός "hash" είναι μια σειρά τυχαίων χαρακτήρων, μοναδικά για το κάθε καταγραφικό, που δημιουργούνται τυχαία από την εφαρμογή και αποθηκεύονται στη μνήμη του μικροελεγκτή κατά την εγκατάσταση του μηχανήματος. Το hash αποστέλλεται μαζί με τις μετρήσεις για ταυτοποίηση της συσκευής κατά την αποστολή δεδομένων.
- Η Συλλογή "Strings" περιέχει όλα τα στοιχεία για την εκάστοτε συστοιχία φωτοβολταϊκών. Η ταυτοποίηση γίνεται με το πεδίο "string_id", ενώ τα πεδία "owner_id" και "installer_id" παραπέμπουν στον εγκαταστάτη και τον ιδιοκτήτη.
- Στη Συλλογή Data αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα μετρήσεων, από κάθε εγκατεστημένο μηχάνημα. Η καταγραφή γίνεται για κάθε String ξεχωριστά, και η κάθε καταχώρηση περιέχει την

ημερομηνία, και τη μέτρηση τάσης, ρεύματος και ισχύος της συστοιχίας. Κι άλλα πεδία μπορούν να μετρηθούν, όπως θερμοκρασία, ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου, μετρήσεις για AC τροφοδοσία, τάση μπαταρίας και πολλά άλλα, εφόσον είναι διαθέσιμα.

5.2.5 Ιστοσελίδα

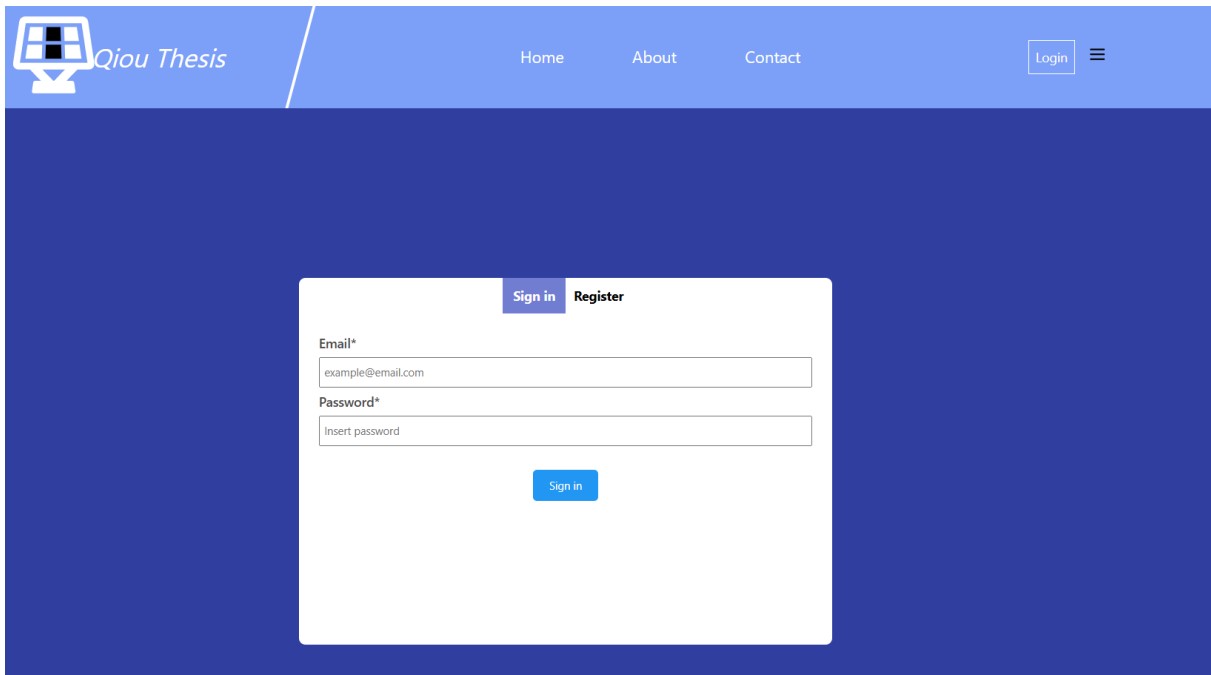
Το Frontend η User Interface είναι το σημείο διεπαφής του χρήστη με την μηχανή και τις υπηρεσίες. Εκεί μπορούν να προβληθούν τα συλλεχθέντα δεδομένα με σκοπό την απεικόνιση και την επικοινωνία της πληροφορίας κατανοητά στον χρήστη. Τυπικές συλλογές δεδομένων και πληροφορίας μπορεί να είναι πίνακες σχεδιαγράμματα, κείμενα ακόμα και γραφήματα. Στην ιστοσελίδα επιλέχθηκαν ως προς απεικόνισή τόσο κείμενα όσο και γραφήματα.

Για την υλοποίησή μιας εύχρηστης εφαρμογής έχουν αναπτυχθεί frameworks όπως της reactJs τα οποία παρέχουν εύκολη απεικόνιση των δεδομένων μας υπο την μορφή διεπαφής. Η react είναι άλλο ένα framework της javascript και λειτουργεί με την έννοια των components. Components είναι επαναχρησιμοποιούμενα κομμάτια διεπαφής τα οποία δίνουν την έννοιά της απόσπασης στην ιστοσελίδα. Με αυτή την αρχιτεκτονική οι ιστοσελίδες αποκτάνε περισσότερη δύναμή σε επέκτασή και αλλαγές.

Η ιστοσελίδα χρησιμοποιεί πολλαπλά components για να ομαδοποιήσει την πληροφορία και να την παρουσιάσει υπό μορφή διαφορετικών παραθύρων. Το καθένα από αυτά λειτουργεί και ενημερώνεται ανεξάρτητα, κι έτσι δεν χρειάζεται η ανανέωση ολόκληρης της σελίδας για κάθε νέα ενημέρωση.

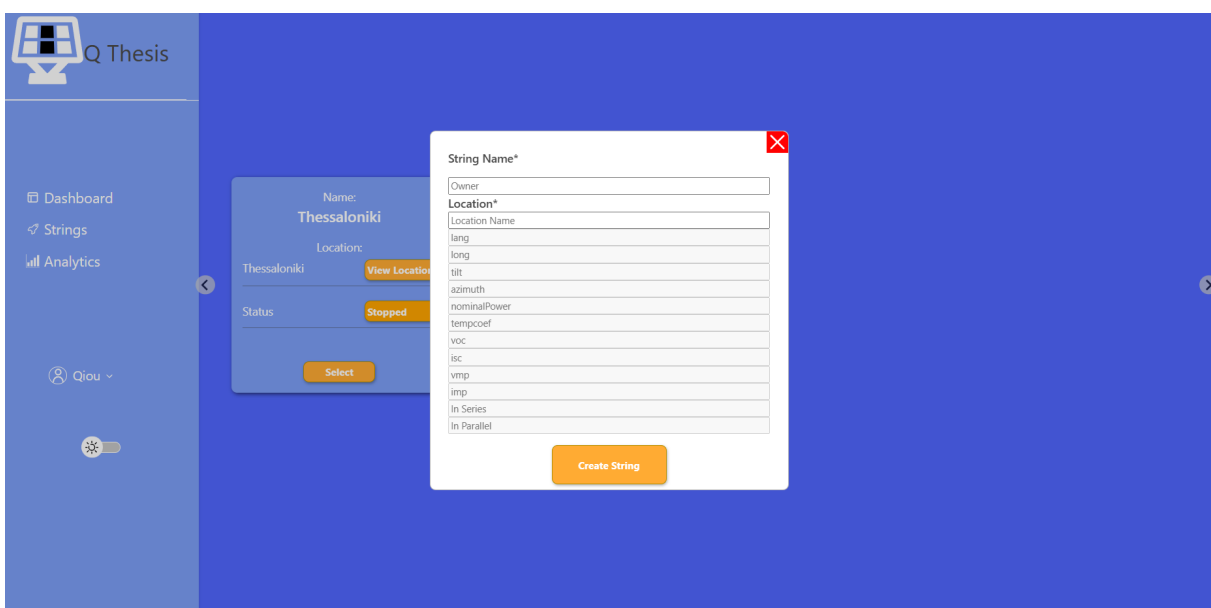
5.2.6 Αλληλεπίδραση Χρήστη

Με την είσοδο στην ιστοσελίδα, ο χρήστης συνδέεται με τη χρήση των αναγνωριστικών στοιχείων του (username, password). Μπορεί επίσης να δημιουργήσει νέο λογαριασμό όπου θα κλιθεί να εκχωρήσει τα στοιχεία του. Πρωτίστως εισάγει τα προσωπικά του στοιχεία, username και password για την ταυτοποίηση του λογαριασμού του και e-mail για την επικοινωνία, καθώς και επιπρόσθετα προαιρετικά πεδία. Σημαντικό ρόλο έχει το υποχρεωτικό πεδίο "Role" όπου υπάρχουν δύο επιλογές, "Installer" και "Customer". Ένας χρήστης όπου πραγματοποιεί εγκαταστάσεις χρησιμοποιεί το ρόλο Installer, και μπορεί να καταχωρεί νέες εγκαταστάσεις στο σύστημα, ή να τροποποιεί υπάρχουσες. Αυτές οι εγκαταστάσεις μετά είναι προσβάσιμες, για προβολή μόνο, από κάποιον χρήστη Customer όπου είναι ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης, και έχει οριστεί από τον εγκαταστάτη. Φυσικά ένας εγκαταστάτης μπορεί να ορίσει ως ιδιοκτήτη τον ίδιο ή κάποιον άλλον εγκαταστάτη.



Σχήμα 5.17: Σύνδεση/Εγγραφή Χρήστη

Για την καταχώρηση μίας νέας συστοιχίας ο εγκαταστάτης συμπληρώνει μία φόρμα με όλα τα απαραίτητα πεδία. Τα σημαντικότερα πεδία είναι η ισχύς, η τοποθεσία, ο προσανατολισμός και ο θερμικός συντελεστής, καθώς αυτά είναι τα κυριότερα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της παραγωγής. Επίσης απαραίτητο είναι το username του ιδιοκτήτη. Αφού τα στοιχεία συμπληρωθούν η συστοιχία καταχωρείται στη βάση δεδομένων. Για την αντιστοίχιση με το καταγραφικό μηχάνημα δημιουργείται ένα μοναδικό κλειδί, όπου ο εγκαταστάτης θα πρέπει να καταχωρήσει κατά την εγκατάσταση, για την ταυτοποίηση του καταγραφικού.



Σχήμα 5.18: Προσθήκη Νέας Συστοιχίας

Εφόσον ένας χρήστης διαθέτει κάποιο σύστημα όπου επιβλέπει, μπορεί να το επιλέξει από το αντίστοιχο μενού. Έπειτα θα του παρουσιαστούν τα διαφορετικά παράθυρα, για την κατάσταση της συσκευής, την πρόβλεψη καιρού για την τοποθεσία του συστήματος, καθώς και τα γραφήματα για την καταμέτρηση της παραγωγής και την πρόβλεψη. Τα γραφήματα μπορούν να προσαρμοστούν για διαφορετικά χρονικά διαστήματα, ενώ υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης δεδομένων και σε μορφή αρχείου.



Σχήμα 5.19: Κεντρική Σελίδα

References

- [1] How a Solar Cell Works, <https://www.acs.org/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>
- [2] Εισαγωγή στις ηλιακές κυψέλες Perovskites και Perovskite, <https://gr.dsnsolar.com/info/an-introduction-to-perovskites-and-perovskite-36022181.html>
- [3] C. A. Figueiredo Ramos, Aderito Alcaso, and A. J. M. Cardoso, *Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 354, p. 012048, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012048>.
- [4] Theoretical limit for efficiency of silicon solar cells, <https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/1126037345799695/SQ%2520limit.pdf&ved=2ahUKEwitq-aF14iGAXWoVPEDHcnABNQQFnoFCLABEAE&usg=A0vVaw3tEzXN1UWJ7oaupNRHLugw>
- [5] Sharp NU-JD450 Datasheet, https://docs.aws.sharp.eu/Marketing/Datasheet/2112_NUJD_450_HC-Mono_Datasheet_EN.pdf.
- [6] Santiago Pindado, Javier Cubas, Carlos Manuel, *Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function*, *Energies*, vol. 7, pp. 4098-4115, June 2014, doi: 10.3390/en7074098.
- [7] Victron BlueSolar Charge Controller MPPT Datasheet, <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-BlueSolar-charge-controller-MPPT-150-35-&-150-45-EN-.pdf>
- [8] Lead Acid Battery Operation, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/lead-acid-batteries/operation-of-lead-acid-batteries>
- [9] A. C. -C. Hua and B. Z. -W. Syue, *Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery*, in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, Sapporo, Japan, 2010, pp. 1478–1483, doi: 10.1109/IPEC.2010.5544506.
- [10] EVE LF280K Datasheet, <https://www.battery-germany.de/wp-content/uploads/2022/02/LF280K-280Ah-Product-Specification-Version-B.pdf>
- [11] M. Islam, S. Mekhilef, M. Hasan, *Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review*, Power Electronics and Renewable Energy Research Laboratory (PEARL), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia, Received 10 October 2013, Received in revised form 12 December 2014, Accepted 4 January 2015, Available online 31 January 2015.
- [12] I. Reda and A. Andreas, *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*, Technical Report TN-6-21235, National Renewable Energy Laboratory (NREL), January 2003. Available online: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>.

- [13] F. Antonanzas-Torres, R. Urraca, J. Polo, O. Perpiñán-Lamigueiro, R. Escobar, *Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models*, Centro de Energía, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile, 2019.
- [14] Bird, Richard E., and Hulstrom, R. L. (1981). "A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces." *Solar Energy Research Institute*, 27(5), 642-761. Available online: <https://instesre.org/Solar/BirdModelTR-642-761.pdf>.
- [15] Abbood, Zainab M., and Al-Taai, Osama T. (2018). "Calculation of Absorption and Emission of Thermal Radiation by Clouds Cover." *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(24), 9446. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Zainab-Abbood-2/publication/330353157_Calculation_of_absorption_and_emission_of_thermal_radiation_by_clouds_cover/links/5dac9fc9a6fdccc99d925b4e/Calculation-of-absorption-and-emission-of-thermal-radiation-by-clouds-cover.pdf.
- [16] Solar Irradiance Concepts: DNI, DHI, GHI & GTI, <https://yellowhaze.in/solar-irradiance/>
- [17] PVsyst Cell Temperature Model, <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/cell-temperature/pvsyst-cell-temperature-model/>
- [18] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Global Solar Atlas 2.0 Technical Report*, Technical Report, 2019. Available online: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/529431592893043403/pdf/Global-Solar-Atlas-2-0-Technical-Report.pdf>.
- [19] Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage, <https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>
- [20] IPC-2221A, <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221A.pdf>,
- [21] ESP32 Datasheet, https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf,
- [22] IRM-10-5 Datasheet, <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/IRM-10-spec.pdf>,
- [23] TL2575HV-05 Datasheet, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl2575hv-05.pdf>,
- [24] R05CTE05S Datasheet, <https://g.recomcdn.com/media/Datasheet/pdf/.fc1rC8jY/.t138d12ed72264b8dfdd1/Datasheet-515/RxxCTExxS.pdf>
- [25] Phoenix Contact MKDSV 5 HV Datasheet, <https://www.phoenixcontact.com/en-us/products/printed-circuit-board-terminal-mkdsv-5-hv-2-952-1904147?type=pdf>
- [26] Vishay Thin-Film Resistors Datasheet, <https://www.vishay.com/docs/20054/rcve3.pdf>
- [27] MCP6001 Datasheet, <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>
- [28] ACS723 Datasheet, <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs723-datasheet.pdf>

- [29] MAX3485 Datasheet, <https://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/1079.pdf>
- [30] CH340G Datasheet, <https://static.efetividade.net/img/ch340g-datasheet-34852.pdf>
- [31] P. Cui, *Comparison of IoT Application Layer Protocols*, Master's thesis, Auburn University, Auburn, Alabama, 2017. <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-IoT-Application-Layer-Protocols-Cui/67ccb74a3889b13cf43e661cee78a886f5c8eb30>.
- [32] Meteo API, <https://open-meteo.com/en/docs>
- [33] Software Repository, <https://gitlab.com/al.kiou/thesis>