

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Αριθμός 1093

ΘΕΜΑ:

Μελέτη Αυτόνομης Οικιακής Εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος (11,6KW)



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ(ΕΣ):

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ Καρέλης Δημήτριος

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

Χρήστος Μπαστήρας

Κωνσταντίνος Μπακαλάρης

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Είναι αποτέλεσμα εκτεταμένης βιβλιογραφικής έρευνας σε θέματα όπως η ηλιακή ενέργεια, η φωτοβολταϊκή μετατροπή, η αυτόνομη οικιακή εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος κ.α..

Ελπίζω να είναι έστω και μια ελάχιστη συμβολή στην ενίσχυση και εξάπλωση των ΑΠΕ, ζήτημα πλέον καθοριστικής σημασίας για τη σχέση του ανθρώπου με το περιβάλλον.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1° – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
Κεφάλαιο 2°- Ηλιακή ενέργεια	9
2.1 Ο Ήλιος	9
2.1.1 Ιστορική αναδρομή στην ηλιακή ενέργεια.....	10
2.1.2 Η Ηλιακή ακτινοβολία.....	11
Κεφάλαιο 3°- Φωτοβολταϊκά Συστήματα	15
3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	16
3.2 Υλικά-τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων	18
3.2.1 Μονοκρυσταλικό Πυρίτιο.....	19
3.2.2 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	20
3.2.3 Λεπτής μεμβράνης (άμορφο πυρίτιο)	20
3.2.4 Υβριδικά.....	21
3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	22
3.3.1 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο.....	22
3.3.2 Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	23
3.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β στοιχείων.....	23
3.5 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου	25
3.5.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση.....	25
3.5.2 Επίδραση της ρύπανσης στην απόδοση.....	26
3.5.3 Γήρανση Φ/Β πλαισίου	27
3.5.4 Δίοδος αντεπιστροφής	27
Κεφάλαιο 4° - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	28
4.1 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό σύστημα	28
4.2 Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό σύστημα	30

4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (DC/DC CONVERTER).....	30
4.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ – MAXIMUM POWER POINT TRACKERS (MPPT).....	39
4.5 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ (DC/AC INVERTER)	45
4.5.1 Μονοφασικός αντιστροφέας.....	45
4.5.2 Τριφασικός αντιστροφέας.....	52
4.5.3 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος.....	55
4.6 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	57
Κεφάλαιο 5° - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ.....	69
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	69
5.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ.....	76
5.2.1. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	76
5.2.2.ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	79
5.2.3. ΕΜΒΑΔΟΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	81
5.3 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ	81
5.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ.....	82
5.5 ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ.....	84
5.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ.....	86
Κεφάλαιο 6° - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	90
Κεφάλαιο 7° - Βιβλιογραφία	101

Κεφάλαιο 1° – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ελλείψεις καυσίμων και οι διακοπές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτές του Αυγούστου του 2003 στις ΗΠΑ και τον Καναδά καθώς και οι συχνές διακοπές ρεύματος στην Ελλάδα, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω υπερφόρτωσης του δικτύου της ΔΕΗ, κατά τις οποίες εκατομμύρια κόσμου έμειναν χωρίς ρεύμα, μολονότι σπάνιες, δεν παύουν ωστόσο να μας υπενθυμίζουν ότι είμαστε εξαρτημένοι από την ενέργεια για τις μεταφορές, τη θέρμανση των σπιτιών τον χειμώνα, τον κλιματισμό τους το καλοκαίρι και την κίνηση των εργοστασίων, τη λειτουργία των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και των γραφείων. Πολλές όμως από τις ενεργειακές πηγές είναι πεπερασμένες (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και υδρογονάνθρακες εν γένει). Όμως, η χρήση της ενέργειας υδρογονανθράκων αποτελεί συχνά πηγή ρύπανσης. Βιώσιμη ανάπτυξη σημαίνει λιγότερη και οικονομικότερη χρήση ορυκτών καυσίμων.

Οι εισαγωγές καυσίμων θα είναι σημαντικές για το προσεχές μέλλον. Η Ευρωπαϊκή Ένωση διατηρεί κάποια στρατηγικά αποθέματα καυσίμων, ώστε να είναι λιγότερο ευάλωτη σε περίπτωση προβλημάτων στις παγκόσμιες αγορές, πλην όμως η μακροπρόθεσμη ασφάλεια του εφοδιασμού της προϋποθέτει ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν πρέπει να είναι υπέρ το δέον εξαρτημένη από λίγες χώρες για τον εφοδιασμό της ή ότι η εξάρτησή της αντισταθμίζεται από στενή συνεργασία με τις παραγωγούς χώρες. Ως εκ τούτου, αναπτύσσεται συνεργασία επί ενεργειακών θεμάτων με τη Ρωσία, που αποτελεί σημαντική πηγή ορυκτών καυσίμων, και ενδεχομένως ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεργασία με εμπορικούς εταίρους στον τομέα της ενέργειας, και συγκεκριμένα με αναπτυσσόμενες οικονομίες, περιλαμβάνει επενδύσεις και μεταφορά τεχνογνωσίας για την παραγωγή και τη μεταφορά, καθώς η συνεργασία για την ελεύθερη ροή φυσικού αερίου, πετρελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποβεί αμοιβαία επωφελής.

Η ΕΕ έχει σχέδια για τη μετάβαση προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παρ' όλα ταύτα, προκειμένου να μειωθεί η εξάρτηση από τις εισαγωγές και να ελαττωθεί η ρύπανση, παραμένει θέμα ζωτικής σημασίας ο περιορισμός της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, μέσω της αποδοτικότερης χρήσης της ενέργειας στη βιομηχανία, στις μεταφορές και στις κατοικίες, όπως και με τη

χρησιμοποίηση ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση ή τον κλιματισμό των κτιρίων και την κίνηση των μέσων μεταφοράς, ιδίως των αυτοκινήτων. Αυτό προϋποθέτει μια φιλόδοξη μεταστροφή προς τη χρήση αιολικής ενέργειας, βιομάζας, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας, καθώς και βιοκαυσίμων. Ο απώτερος στόχος είναι να βασίζεται η οικονομία της ΕΕ στο υδρογόνο, και όχι στα αποθέματα ορυκτών καυσίμων που λιγοστεύουν. Η Ευρωπαϊκή Τεχνολογική Πλατφόρμα για το Υδρογόνο και τα Στοιχεία Καυσίμου επεξεργάζεται ένα σχέδιο για την μετάβαση αυτή.

Η αλλαγή στα ποσοστά κατανάλωσης πρωτογενών μορφών ενέργειας έχει επιπτώσεις και στο περιβάλλον. Από το 2005, ισχύουν ανώτατα όρια διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που μπορούν να εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα οι ευρωπαϊκές βιομηχανίες. Οι επιχειρήσεις που υπερβαίνουν τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών τους θα πρέπει να έρθουν σε συναλλαγές με άλλες, που δεν έχουν εξαντλήσει όλες τις διαθέσιμες ποσότητες εκπομπών τους. Αυτό το μέτρο θα προωθήσει την αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας και, προπάντων, θα ελαττώσει τη ρύπανση και θα εξασφαλίσει την τήρηση των δεσμεύσεων που ανέλαβε η Ευρωπαϊκή Ένωση στο Πρωτόκολλο του Κιότο για την αλλαγή του κλίματος και την αντιστροφή της τάσης προς αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Περίπου το 80% της ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ως πηγή τα ορυκτά καύσιμα. Ένα σημαντικό και αυξανόμενο ποσοστό των ορυκτών καυσίμων προέρχεται από τρίτες χώρες. Υπολογίζεται ότι, έως το 2020, το 70% των ενεργειακών αναγκών της ΕΕ, όπου συμπεριλαμβάνεται το 90% των αναγκών της σε πετρέλαιο, θα καλύπτεται από εισαγωγές. Επομένως, η ΕΕ είναι ευάλωτη σε περίπτωση περιορισμών του εφοδιασμού ή αυξήσεων των τιμών, που μπορεί να προκύψουν από διεθνείς κρίσεις (βλέπε πολέμους). Χρειάζεται επίσης να καίει λιγότερα ορυκτά καύσιμα ώστε να αντιστρέψει την τάση για αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, επιβάλλεται να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας, καλύτερη χρήση της, να αναπτυχθούν οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας και να ενισχυθεί η διεθνής συνεργασία. Παρόμοια είναι η κατάσταση και με τις άλλες αναπτυσσόμενες χώρες.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη θέσει ως στόχο να παράγει το 40% της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες μορφές ενέργειας μέχρι το 2015, αν και δεν φαίνεται πιθανό ότι θα τον επιτύχει. Εξετάζει τώρα τον στόχο να εξοικονομεί κάθε χρόνο τουλάχιστον 1% περισσότερη ενέργεια από ό,τι κατά την τελευταία πενταετία.

Μια από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο είναι και η ηλιακή ενέργεια. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 50. Κατά την δεκαετία του 60 χρησιμοποιήθηκαν βασικά για την παραγωγή ενέργειας σε δορυφόρους. Αργότερα στα μέσα του 70 βελτιώσεις στον τρόπο παραγωγής τους, στην απόδοση και στην ποιότητα τους, οδήγησαν στην πτώση του κόστους τους με αποτέλεσμα να βρουν εφαρμογή σε συστήματα χαμηλής ισχύος κυρίως στην φόρτιση μπαταριών στην ναυσιπλοΐα και σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Στη δεκαετία του 80 έγιναν πηγή ενέργειας για διάφορες ηλεκτρικές συσκευές όπως είναι οι υπολογιστές τσέπης, ρολόγια, ραδιόφωνα κ.τ.λ. Μετά την ενεργειακή κρίση του 70, έγιναν αξιοσημείωτες προσπάθειες για την παραγωγή φωτοβολταϊκών για οικιακή και εμπορική χρήση και για τους δύο τύπους συστημάτων τα απομονωμένα και τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο. Σήμερα υπάρχει μια ανάπτυξη στην παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων της τάξης 25% ετησίως με εφαρμογές στην άντληση νερού, τις τηλεπικοινωνίες, στην τροφοδοσία απομονωμένων οικισμών κ.α.

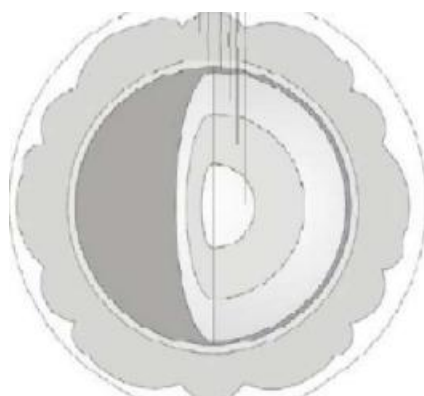
Στην Ελλάδα, που σύμφωνα με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) το νότιο τμήμα της χώρας έχει κατά μέσο όρο 8 ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα, δηλαδή αξιόλογη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, η εγκατεστημένη ισχύς είναι μόλις 4544 kWp. Πιλοτικά προγράμματα ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων χρηματοδοτούνται από τις αρχές της δεκαετίας του 90. Τα σημαντικότερα έργα είναι οι μονάδες παραγωγής της Αγίας Ρούμελης στην Κρήτη και της Κύθνου. Επίσης, φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται στη ναυσιπλοΐα (τροφοδοσία περίπου 900 φάρων με Φ/Β συστήματα) και στις τηλεπικοινωνίες (απομακρυσμένες κεραιές κινητής τηλεφωνίας). Για το προσεχές μέλλον σχεδιάζεται η κατασκευή φωτοβολταϊκών συστημάτων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του Προεδρικού Μεγάρου, του Μαξίμου και της Βουλής.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εξομοίωση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος μη συνδεδεμένο με το δίκτυο.

Κεφάλαιο 2°- Ηλιακή ενέργεια

2.1 Ο Ήλιος

Ο Ήλιος αποτελείται από 80% υδρογόνο (H₂), 19% ήλιο (He) και το υπόλοιπο 1 % είναι μείγμα περισσοτέρων από 100 χημικών στοιχείων. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εκτιμάται ότι είναι της τάξεως των 10⁷ βαθμών Kelvin. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια από την επιφάνειά του προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που είναι εξώθερμες και γίνονται στο εσωτερικό του. Στις αντιδράσεις αυτές γίνεται μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο και παραγωγή ενέργειας με ρυθμό 4 εκατομμύρια τόνους το δευτερόλεπτο. Η σύσταση του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1: Σύσταση του Ήλιου

Δεδομένης της διαμέτρου d και της φαινόμενης θερμοκρασίας του T , η ισχύς P που ακτινοβολείται από την επιφάνειά του μπορεί να εκτιμηθεί ότι είναι:

$$P=nd^2\sigma T^4=3,8 \times 10^{23} \text{ kW}$$

Όπου σ είναι η σταθερά Boltzman. Από την ισχύ αυτή η γη μπορεί να θεωρηθεί ότι δέχεται, σε ένα μέγιστο κύκλο της, περίπου $1,7 * 10^{14}$ kW. Για να αντιληφθούμε το τεράστιο μέγεθος αυτής της ισχύος αρκεί να αναλογισθούμε ότι η ενέργεια που θα δεχθεί για μια ώρα η γη, θα μπορούσε θεωρητικά να καλύψει όλες τις ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις των κατοίκων του πλανήτη.

2.1.1 Ιστορική αναδρομή στην ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια, είναι η ενέργεια που μεταδίδεται στη γη από τον ήλιο. Έχει δημιουργήσει άμεσα ή έμμεσα όλα τα ενεργειακά αποθέματα στη γη, από την εποχή του σχηματισμού του πλανήτη. Η ανάλυση έχει δείξει, ότι οι περισσότερες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα, προέρχονται από τον ήλιο, εκτός από την πυρηνική ενέργεια και την γεωθερμία. Η σημασία του ήλιου στις ανθρώπινες προσπάθειες, δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Μία μελέτη των Δυτικών ή Ανατολικών φιλοσοφιών αποκαλύπτει πολλούς μύθους και θρύλους που αποδεικνύουν την υποχρέωση του ανθρώπου στον ήλιο, ο οποίος παρέχει χρήσιμη θερμότητα και τον απαιτούμενο μηχανισμό παραγωγής των καλλιεργειών. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται επί χιλιάδες χρόνια για την αποξήρανση της τροφής, ως καύσιμο και για την εξαγωγή του αλατιού. Με το χρόνο, αναπτύχθηκε η αρχιτεκτονική έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται τον ήλιο για θέρμανση ή να τον αποφεύγει για ψύξη.

Τα πρώτα πειράματα με την ηλιακή ενέργεια

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας δεν περιορίστηκε μόνο στη θέρμανση και στην ψύξη των κτηρίων. Τα πρώτα πειράματα με την ενέργεια αυτή, βοήθησαν σε πολλές επιστημονικές ανακαλύψεις και εφευρέσεις. Για παράδειγμα, το 1774, ο Βρετανός χημικός Joseph Priestley ανακάλυψε ότι συγκεντρωμένες ηλιακές ακτίνες πάνω σε οξείδιο του υδραργύρου, προκαλούσαν την απελευθέρωση κάποιου αερίου. Ο Priestley διαπίστωσε, ότι η φλόγα των κεριών ήταν λαμπρότερη όταν περιβαλλόταν από το αέριο αυτό. Γι' αυτό, νόμισε ότι το αέριο αυτό ήταν αέρας μεγαλύτερης τελειότητας. Με παρόμοια πειράματα συγκεντρωμένου ηλιακού φωτός από οπτικούς φακούς, ο Γάλλος χημικός Antoine Lavoisier ανακάλυψε ορθά, ότι το αέριο αυτό ήταν το οξυγόνο.

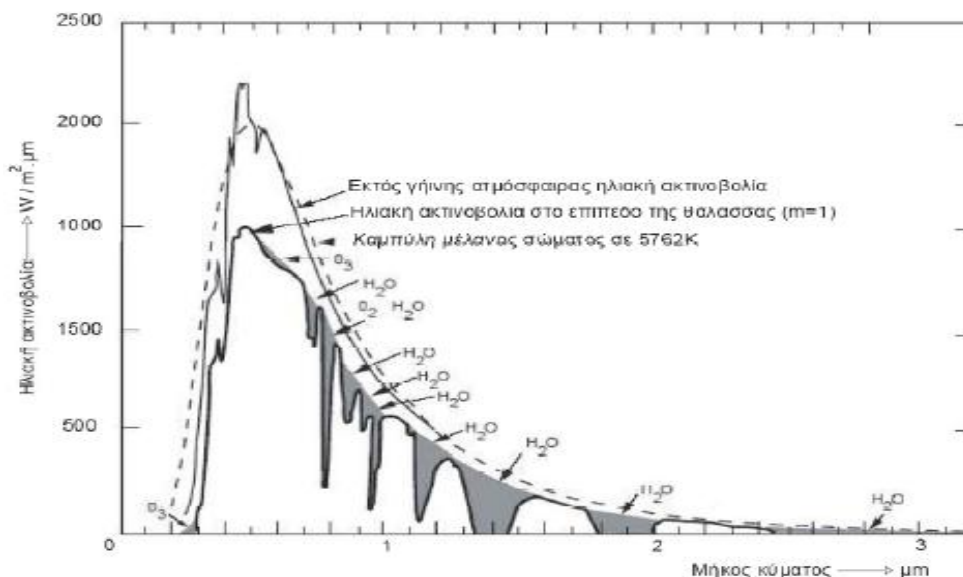
Το 1872, κατασκευάστηκε στη Χιλή ένα αποστακτήριο, για την παραγωγή ποσίου ύδατος από αλμυρό νερό. Κατά το πείραμα αυτό, τοποθετήθηκαν πάνω από το αλμυρό νερό κεκλιμένες γυάλινες οροφές. Η ηλιακή ενέργεια διαπερνούσε το γυαλί και ανέβαζε τη θερμοκρασία του αλμυρού νερού. Αυτό, προκαλούσε την εξάτμιση του νερού και τη συμπύκνωση των

παραγόμενων υδρατμών κάτω από το γυαλί. Το συμπυκνωμένο αυτό νερό, έρεε με τη βοήθεια καναλιών προς κάποιες συλλεκτικές λεκάνες. Η εγκατάσταση αυτή, μπορούσε να παρέχει στον πληθυσμό της περιοχής, περί τα 6.000 γαλόνια πόσιμου νερού ημερησίως.

2.1.2 Η Ηλιακή ακτινοβολία

2.1.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας

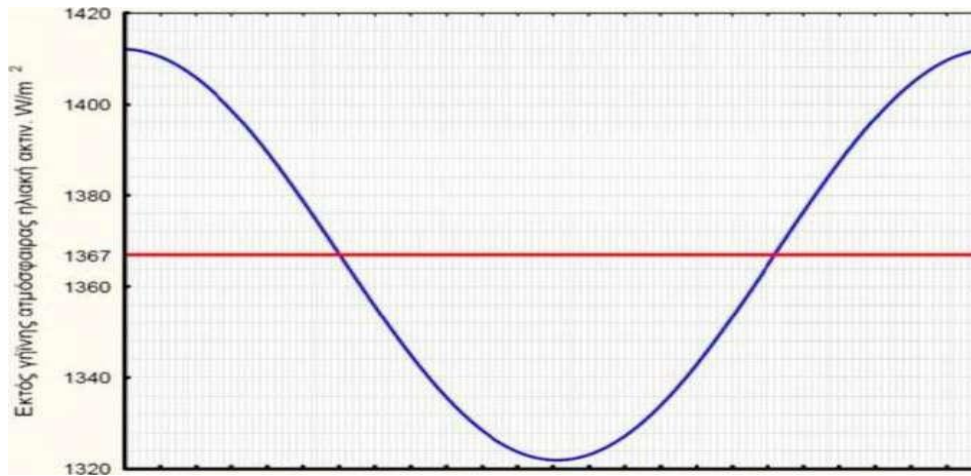
Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός γήινης ατμόσφαιρας μοιάζει αρκετά με εκείνη του μέλανος σώματος στην θερμοκρασία των 5762K, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, ενώ η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο επίπεδο της θάλασσας είναι αρκετά μειωμένη.



Σχήμα 2.2 Φασματική κατανομή της εκτός γήινης ατμόσφαιρας, ηλιακή ακτινοβολία

Η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι W/m^2 . Δηλαδή είναι ισχύς ανά μονάδα επιφανείας και η τιμή της είναι το μέτρο της έντασής της. Επειδή η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική, η ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες, μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2.3 Ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας

2.1.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους

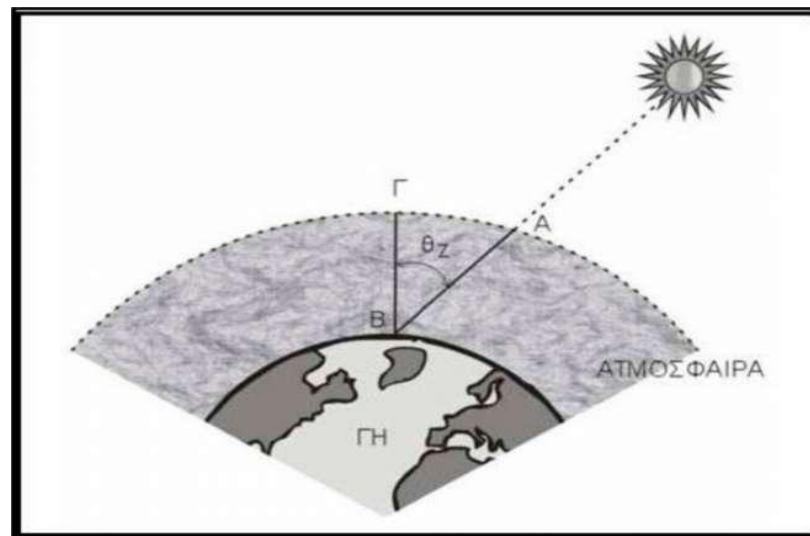
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος επηρεάζεται από το μήκος της ατμόσφαιρας που το διαπερνά. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαδρομή των ηλιακών ακτινών στην ατμόσφαιρα τόσο μειωμένη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μεγαλύτερη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας για να φθάσει στην επιφάνεια της γης είναι νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα.

Για την μείωση αυτή της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο όρος της σχετικής μάζας του αέρα ή απλά όπως συνηθίζεται μάζα του αέρα.

Μάζα του αέρα (m)*, ορίζεται ο λόγος της μάζας της αερίου στήλης της διαδρομής των ηλιακών ακτινών, για ανέφελο ουρανό, προς την αντίστοιχη μάζα για κατακόρυφο ήλιο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όταν η ζενίθια γωνία του ήλιου δε έχει μεγάλες τιμές και αν δεν ληφθεί υπ' όψιν η καμπυλότητα της γης και η διάθλαση, που επηρεάζει ελαφρά το μήκος της πλάγιας διαδρομής AB, τότε το τόξο AB μπορεί να θεωρηθεί ευθύγραμμο τμήμα και κατά συνέπεια το τρίγωνο ABΓ ορθογώνιο. Οπότε ο λόγος των αντίστοιχων μαζών θα είναι και ο λόγος των διαδρομών AB προς BΓ και

κατά συνέπεια η μάζα του αέρα (m) θα εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία του ήλιου θ_z , οπότε:

$$m=1/\cos\theta_z$$



Σχήμα 2.4 Μάζα του αέρα

2.1.2.3 Γεωγραφικό πλάτος - γεωγραφικό μήκος

Οι κύκλοι που είναι παράλληλοι στον ισημερινό ονομάζονται παράλληλοι κύκλοι. (σχήμα 2.5). Τα ημικύκλια που διέρχονται από τους πόλους ονομάζονται μεσημβρινοί. Από κάθε σημείο της επιφάνειας της γης περνάει ένας παράλληλος κύκλος και ένας μεσημβρινός. Βασικός μεσημβρινός θεωρείται αυτός που περνάει από το αστροσκοπείο του Greenwich(G). Προκειμένου να καθορισθεί η θέση ενός τόπου (Τ) στην επιφάνεια της γης απαιτείται να ορισθεί το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος.

Γεωγραφικό πλάτος (φ) ενός τόπου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με τον τόπο και του ισημερινού επιπέδου. Το γεωγραφικό πλάτος παίρνει τιμές από 0° μέχρι 90° για το βόρειο ημισφαίριο και από 0° μέχρι -90° για το νότιο ημισφαίριο.

Γεωγραφικό μήκος (L) ενός τόπου είναι η γωνία που σχηματίζεται από το μεσημβρινό του Greenwich και το μεσημβρινό επίπεδο του τόπου. Το γεωγραφικό μήκος παίρνει τιμές από 0° μέχρι -180° για τόπους ανατολικά του Greenwich και από 0° μέχρι 180° για τόπους δυτικά του Greenwich.

Κεφάλαιο 3^ο- Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα σήμερα προσφέρουν μια ελκυστική λύση για έναν διαρκώς αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών που απαιτούν οικονομική και αξιόπιστη παροχή ενέργειας, ακόμη και κάτω από εξαιρετικά δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Με την τεχνολογία αυτή μπορούμε να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να καταναλώνουμε συμβατικά καύσιμα. Εκμεταλλευόμαστε μόνο την ανανεώσιμη, ηλιακή ακτινοβολία που άφθονα και δωρεάν μας παρέχεται.

Το βασικό χαρακτηριστικό των Φ/Β συστημάτων, είναι η αυτόνομη λειτουργία τους χωρίς την χρήση οποιασδήποτε καύσιμης ύλης, η υψηλή ανθεκτικότητα και αξιοπιστία, καθώς και η ικανότητα να λειτουργούν για μακρύ χρονικό διάστημα χωρίς συντήρηση, τα καθιστά ενδεδειγμένη οικονομικά λύση για όλους τους τύπους εφαρμογών που είναι απομακρυσμένες από το δίκτυο ηλεκτρισμού και όχι μόνο.

Τα φωτοβολταϊκά παρέχουν τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή και την άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια. Τον καθιστούν έτσι πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια και συμβάλλουν μ' αυτό τον τρόπο στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας. Δεδομένου ότι η παραγωγή και κατανάλωση του ηλιακού ηλεκτρισμού γίνονται τοπικά, αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού και κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου.

Η βαθμιαία αύξηση των μικρών ηλεκτροπαραγωγών μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά τη διαρκή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να καλυφθεί με μεγάλες επενδύσεις για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από μικρούς παραγωγούς μπορεί να περιορίσει επίσης την ανάγκη επενδύσεων σε νέες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος μιας νέας γραμμής μεταφοράς είναι πολύ υψηλό, αν λάβουμε υπόψη μας πέρα από τον τεχνολογικό εξοπλισμό και θέματα που

σχετίζονται με την εξάντληση των φυσικών πόρων και τις αλλαγές στις χρήσεις γης.

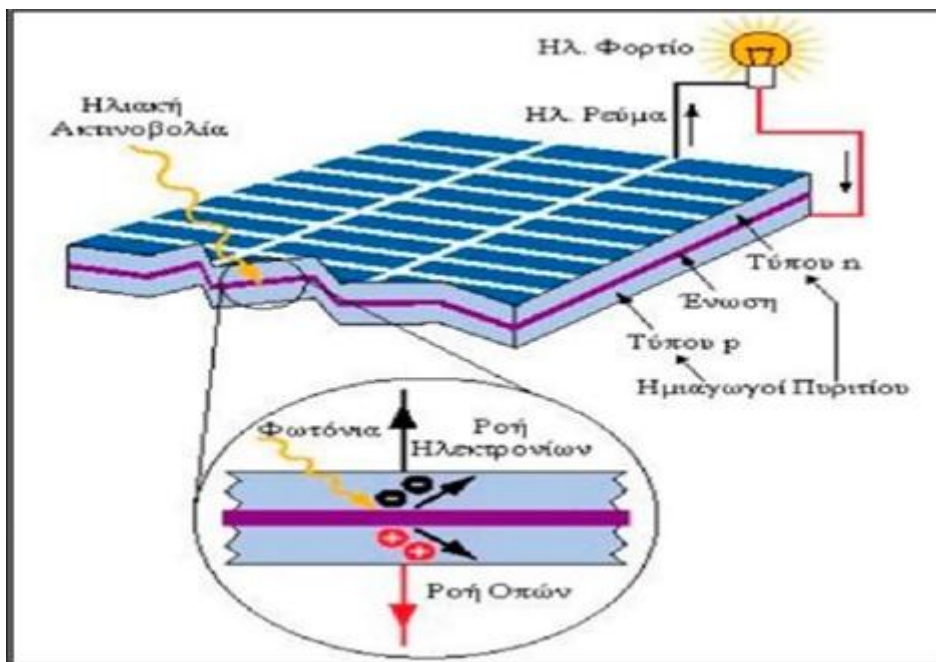
Η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες), βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου, στην αποφυγή black - out και στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Σημειωτέον ότι, κάθε ώρα black - out κοστίζει στην εθνική οικονομία 25-40 Εκατομμύρια Ευρώ.

3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ένα Φ/Β στοιχείο αποτελείται από συνδυασμό δύο λεπτών στρωμάτων από διαφορετικούς ημιαγωγούς, γνωστούς ως p-type ημιαγωγός και n-type ημιαγωγός. Οι ημιαγωγοί κατασκευάζονται συνήθως από πυρίτιο. Οι n-type ημιαγωγοί κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο με ελάχιστες ποσότητες προσμίξεων (συνήθως φωσφόρου) έτσι ώστε να υπάρχει περίσσεια ελευθέρων ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο. Οι p-type ημιαγωγοί κατασκευάζονται και αυτοί από κρυσταλλικό πυρίτιο στο οποίο όμως εισάγονται διαφορετικού τύπου προσμίξεις (συνήθως βόριο) οπότε το υλικό παρουσιάζει έλλειμμα ελευθέρων ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια που λείπουν ονομάζονται «οπές».

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η θεμελιώδης φυσική διαδικασία με την οποία ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα Φ/Β στοιχείο, μπορεί να ανακλαστεί, απορροφηθεί ή να διέλθει δια μέσου αυτού. Μόνο όμως το μέρος της ακτινοβολίας που απορροφάται παράγει ηλεκτρισμό. Η ενέργεια του απορροφημένου φωτός μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου. Χρησιμοποιώντας αυτή την ενέργεια τα ηλεκτρόνια διαφεύγουν από τις κανονικές τους θέσεις στα άτομα του ημιαγωγού του Φ/Β στοιχείου και σχηματίζουν μια ροή ηλεκτρονίων ή ρεύμα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Μια χαρακτηριστική ιδιότητα του Φ/Β στοιχείου, αυτή που χαρακτηρίζεται σαν ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο παρέχει τη δύναμη ή διαφορά δυναμικού που απαιτείται για να οδηγήσει το ρεύμα σε ένα εξωτερικό φορτίο όπως π.χ. ένας λαμπτήρας. Για την δημιουργία

του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του Φ/Β στοιχείου, δύο στρώματα διαφορετικών ημιαγωγίμων υλικών έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Το ένα στρώμα είναι ο ημιαγωγός τύπου-n με πλεόνασμα ηλεκτρονίων τα οποία έχουν αρνητικό φορτίο. Το άλλο στρώμα είναι ένας ημιαγωγός τύπου-p με πλεόνασμα «οπών» οι οποίες έχουν θετικό φορτίο. Παρόλο που τα δύο στρώματα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, ο ημιαγωγός τύπου-n με πλεόνασμα ηλεκτρονίων και ο τύπου-p με πλεόνασμα «οπών», φέρνοντας τα σε επαφή δημιουργείτε μια επαφή p/n δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο. Όταν τύπου-n και -p πυρίτιο έρθει σε επαφή, ηλεκτρόνια από το ημιαγωγό τύπου-n μετακινούνται στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου-p. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία θετικού φορτίου στη πλευρά του ημιαγωγού τύπου-n και αρνητικού φορτίου στην πλευρά του τύπου-p. Εξαιτίας της ροής ηλεκτρονίων και οπών, οι δύο ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σαν μια μπαταρία, δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια επαφής η οποία καλείται επαφή p/n. Το ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινούνται από τον ημιαγωγό προς την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, όπου και γίνονται διαθέσιμα στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ταυτόχρονα οι οπές κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση, προς τη θετική επιφάνεια όπου και «αναμένουν» εισερχόμενα ηλεκτρόνια.



Σχήμα 3.1 φωτοβολταϊκό φαινόμενο

3.2 Υλικά-τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή Φ/Β στοιχείων είναι:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
- Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge film fed growth και μέθοδος String Process).

Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μια μορφής ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία κατασκευής και το κόστος κατασκευής.

Το πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1 eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητές του, δηλαδή έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή ενεργειακού διακένου δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι η ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής Φ/Β στοιχείων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής για πολλές δεκαετίες.

Επομένως, οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με την χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία. Επιπλέον τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απόλυτα ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές.

Εκτός του οξυγόνου, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στην επιφάνεια του εδάφους. Σχεδόν πάντα, όμως απαντάται με τη μορφή οξειδίου στο περιβάλλον, συγκεκριμένα ως διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Για την αξιοποίησή του, επομένως, απαιτείται επεξεργασία έτσι ώστε να αποκτήσει υψηλή καθαρότητα.

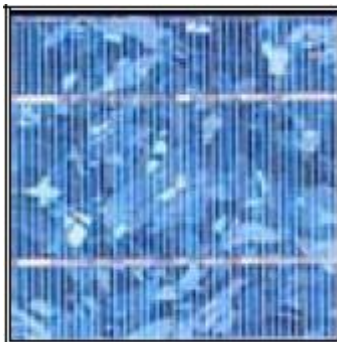
3.2.1 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Συγκρινόμενο με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (δηλαδή την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ). Η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων του εμπορίου κυμαίνεται από 14-18%.



3.2.2 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα στοιχεία που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Ο βαθμός απόδοσης για μια βαθμίδα εμπορίου κυμαίνεται μεταξύ 10-14 %.



3.2.3 Λεπτής μεμβράνης (άμορφο πυρίτιο)

Η τεχνολογία των λεπτών μεμβρανών χρησιμοποιεί πολύ λεπτά στρώματα (πάχους λίγων μικρών) του ημιαγωγού και με τον τρόπο αυτό μειώνεται το κόστος.



Τα πιο γνωστά υλικά που χρησιμοποιούνται στις κυψέλες αυτές είναι:

- Άμορφο πυρίτιο (a-Si).
- Copper indium diselenide (CIS)
- Cadmium telluride (CdTe)
- Gallium arsenide (GaAs)

Με τα δύο πρώτα να είναι τα σημαντικότερα.

Το άμορφο πυρίτιο διαφέρει από το κρυσταλλικό στο ότι τα άτομα δεν είναι τοποθετημένα σε ακριβής αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των δεσμών τους δεν είναι συγκεκριμένες. Σήμερα ένα εμπορικό Φ/Β πλαίσιο με κυψέλες άμορφου πυριτίου έχει απόδοση 6-8%, ενώ οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται στο 11-14%.

Λεπτό στρώμα άμορφου πυριτίου τοποθετείται σε φύλλο γυαλιού το οποίο έχει καλυφθεί από διάφανο οξειδίο του κασσιτέρου. Στην πίσω επιφάνεια τοποθετείται μεταλλικός αγωγός και στην συνέχεια όλη η διάταξη κόβεται με laser για την παραγωγή μιας σειράς ηλεκτρικά συνδεδεμένων αλλά ξεχωριστών στοιχείων και στο τέλος γίνεται η ενσωμάτωσή τους σε μια Φ/Β μονάδα.

3.2.4 Υβριδικά

Για να επιτευχθεί ουσιώδης βελτίωση της απόδοσης των Φ/Β κυψελών έπρεπε να γίνει κάποια σημαντική αλλαγή. Σε μια προσπάθεια να γίνει αυτό έγινε μελέτη στην χρήση υβριδικών δομών, στις οποίες κυψέλες με διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης φωτός συνδέονται μαζί. Αυτό επιτρέπει να πετύχουμε καλύτερα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα υλικά και διαδικασίες.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μιας δομής με πολλά στρώματα είναι τα εξής:

- Είναι δυνατόν να απορροφηθεί το φως σε μια πιο πλατιά φασματική περιοχή.
- Είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλότερες τάσεις ανοιχτού κυκλώματος.
- Είναι δυνατό να πέσει σε κάποιο βαθμό ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης των κυψελών, ο οποίος οφείλεται σε φαινόμενα οπτικής υποβάθμισης που παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται υλικά άμορφου πυριτίου.

3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Το βασικό χαρακτηριστικό συστατικό κάθε Φ/Β εγκατάστασης είναι η Φ/Β γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα Φ/Β ηλιακά στοιχεία. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια «μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας» κατά αναλογία με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής από θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Μια Φ/Β γεννήτρια αποτελείται από Φ/Β πλαίσια που ενώνονται και συγκροτούν συστοιχίες.

3.3.1 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Η τάση και η ισχύς ενός Φ/Β στοιχείου είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Για αυτό το λόγο τα Φ/Β στοιχεία τοποθετούνται σε ένα ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο αυτό, τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά, σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση επιθυμητής τάσης.

Τα πλαίσια είναι προκατασκευασμένα στο εργοστάσιο. Τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το Φ/Β πλαίσιο (module), που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών.

Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος προκύπτει μεγαλύτερο από τα Φ/Β στοιχεία που περιέχουν.

Συνώνυμο σχεδόν με το Φ/Β πλαίσιο είναι το Φ/Β πανέλο (panel). Όπως και το πλαίσιο, έχει συναρμολογηθεί και προκατασκευαστεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση σε Φ/Β εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πανέλο μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο) που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Τα τελευταία χρόνια σχεδόν όλες οι εταιρίες που κατασκευάζουν Φ/Β στοιχεία, δεν διαχωρίζουν τα πλαίσια από τα πανέλα. Το προϊόν που παράγεται ονομάζεται φ/β πλαίσιο (module) και διατίθεται σε ποικιλία, όσον αφορά την ισχύ που παράγει, την τάση και τελικά τις διαστάσεις του. Για αυτό το λόγο παρακάτω θα γίνεται αναφορά μόνο σε Φ/Β πλαίσια.

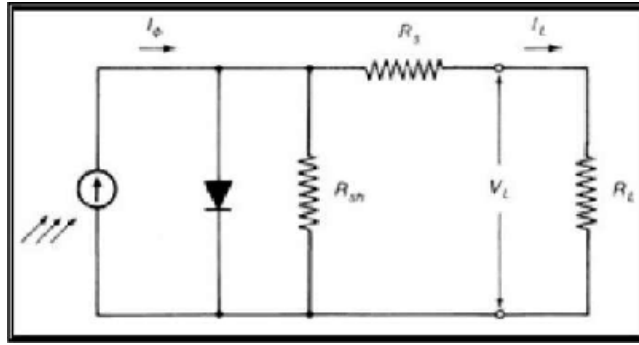
3.3.2 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Σε μια Φ/Β εγκατάσταση που έχει σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή λειτουργεί ως σταθμός παραγωγής, μπορεί να χρησιμοποιηθούν εκατοντάδες ή και χιλιάδες Φ/Β πλαίσια. Όπως είναι αναμενόμενο τα Φ/Β πλαίσια πρέπει να ομαδοποιηθούν και να συνδεθούν κατάλληλα. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και ανάμεσα στα πλαίσια να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Με αυτόν τον τρόπο, αν ένα Φ/Β στοιχείο σκιαστεί ή αν πάθει βλάβη δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα.

Έτσι τα Φ/Β πλαίσια ομαδοποιούνται σε Φ/Β συστοιχίες και τοποθετούνται σε κοινή βάση στήριξης, η οποία είναι συνήθως μεταλλική. Η σύνδεση των πλαισίων στη σειρά ή παράλληλα γίνεται έτσι ώστε η τάση εξόδου της γεννήτριας να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή.

3.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β στοιχείων

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 3.2 Ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Παρατηρούμε ότι το Φ/Β αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο. Το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει ακόμα την αντίσταση σειράς R_s , η οποία εμποδίζει την κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} , η οποία εμφανίζεται λόγω διαρροών ρεύματος κάνοντας την αντίσταση διαμέσου της διόδου μη άπειρη.

Το παραγόμενο φωτόρευμα από το στοιχείο δίνεται από την σχέση:

$$I_{\phi} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$

Όπου: I_0 : το ανάστροφο ρεύμα κόρου,

V : η τάση που δημιουργείται στα άκρα της διόδου,

γ : ο συντελεστής ποιότητας της διόδου (μεταξύ 1 και 2),

k : η σταθερά Boltzmann,

T : η απόλυτη θερμοκρασία.

3.5 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο συντελεστής απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο, προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια. Επειδή όμως η επιφάνεια ενός Φ/Β πλαισίου δεν είναι καλυμμένη εξολοκλήρου από Φ/Β στοιχεία η απόδοση διαφέρει από την απόδοση των στοιχείων που αποτελείται. Ορίζεται ο συντελεστής κάλυψης (σ_c) ενός Φ/Β πλαισίου ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Στις παρακάτω σχέσεις οι δείκτες που χρησιμοποιούνται παραπέμπουν στο αν το μέγεθος αφορά το πλαίσιο (m- >module) ή το στοιχείο (c->cell).

3.5.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση

Ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος μπορεί να μεταβάλλει αξιοσημείωτα την απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου είναι η θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων του.

Έχει μετρηθεί ότι κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα Φ/Β στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος.

Η θερμοκρασία ακόμα επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου και γίνεται καλύτερη απαγωγή θερμότητας όσο η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Ως γενικός κανόνας στους υπολογισμούς Φ/Β εγκαταστάσεων, λαμβάνεται συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β πλαισίου κατά 30°C από αυτή του περιβάλλοντος. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούμε τον συντελεστή θερμοκρασίας σ_θ .

$$\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,004 [-]$$

όπου:

t_a [°C]: μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (πίνακας)

ΠΟΛΗ	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑΪΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΘΕΡΜΩ- ΣΙΑΣ	ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΙΟΦΑ- ΝΕΙΑ
Αθήνα	10,5	11,6	12,9	17,1	21,9	26,6	29,3	29,2	25,3	20,0	16,3	12,5	19,4	2818
Αλιάρτας	7,1	9,7	11,4	15,8	21,3	25,8	27,3	26,3	23,2	17,9	13,3	9,3	17,4	2526
Άρδεος	11,4	11,8	13,3	16,7	21,2	25,5	28,1	28,5	25,2	20,5	16,3	13,0	19,3	2886
Αργασσόλι	12,4	12,6	14,1	17,0	21,0	25,2	27,8	27,8	24,9	21,1	17,3	14,1	19,6	2766
Άρτα	10,3	11,4	13,7	17,3	21,8	26,3	29,3	28,9	25,2	20,7	15,9	11,6	19,4	2858
Ηράκλειο	13,4	13,6	14,9	17,8	21,4	25,3	27,3	27,2	24,5	21,4	18,3	16,4	20,1	2816
Θεσσαλονίκη	6,7	8,3	11,3	16,1	21,2	25,7	28,4	28,3	23,8	18,3	13,3	8,6	17,5	2429
Ιεράπετρα	14,0	14,3	15,7	18,3	22,1	26,9	29,5	29,3	26,2	22,8	19,4	15,8	21,2	3108
Ιωάννινα	6,5	7,6	10,4	14,5	19,1	23,9	27,2	26,9	22,5	17,0	11,8	7,9	15,3	2252
Καλαμάτα	12,8	13,2	14,6	17,5	21,3	25,6	28,4	28,5	25,7	21,8	18,1	14,4	20,1	2827
Κέρκυρα	11,2	11,6	13,2	16,5	20,9	25,2	27,9	27,9	24,4	20,1	16,2	12,4	18,9	2642
Κομοτηνή	6,4	7,3	9,5	14,6	20,0	24,5	27,5	27,3	22,8	17,2	12,4	8,5	16,5	2372
Κόνιτσα	6,5	7,7	10,3	14,4	15,6	23,1	26,4	26,4	22,3	17,1	12,5	8,3	15,9	2315
Κόρινθος	11,1	11,9	13,2	17,0	21,8	26,2	29,0	29,1	25,5	20,5	16,3	12,9	19,5	2861
Κύθηρα	12,0	12,1	12,9	15,7	19,7	24,2	27,0	27,0	24,0	20,3	17,1	13,6	18,8	2831
Λαμία	8,9	10,1	12,5	17,2	22,1	26,7	29,3	29,0	24,5	19,4	15,0	10,4	18,8	2532
Λάρισα	6,6	6,7	11,1	16,2	21,7	27,0	29,7	29,3	24,5	18,6	13,2	8,2	17,9	2463
Λήμνος	9,2	10,0	11,4	16,3	20,3	24,7	27,3	27,3	23,6	18,7	14,9	11,3	18,1	2697
Μεθώνη	12,7	13,1	14,1	17,0	20,5	24,1	26,3	27,3	25,2	21,4	17,7	14,9	19,5	2921
Μήλος	11,8	12,1	13,2	16,5	20,7	24,6	26,4	26,4	23,6	20,2	16,9	13,5	18,8	2732
Μυτιλήνη	10,4	11,2	12,6	16,8	21,5	26,0	28,3	27,8	24,2	19,8	15,6	12,1	18,8	2630
Νάξος	13,1	13,3	14,2	17,1	20,4	24,0	25,5	25,6	23,4	20,6	17,7	14,8	19,1	2841
Πάρος	12,5	13,2	14,2	17,5	21,4	25,1	26,4	26,6	24,0	20,3	17,7	14,4	19,4	2539
Πάτρα	11,2	11,8	13,5	17,0	21,1	25,0	27,6	28,0	24,9	20,6	16,3	12,7	19,1	2857
Πύργος	11,9	12,5	14,1	17,3	21,5	25,7	28,6	28,9	25,8	21,4	17,1	13,4	18,8	2694
Ρέθυμνο	13,7	14,0	15,3	18,0	21,8	25,9	27,7	27,9	25,3	21,8	18,9	15,7	20,5	3041
Ρόδος	12,6	13,1	14,5	17,7	21,9	26,3	28,6	28,9	26,2	21,8	17,6	14,2	20,3	2680
Σάμος	11,7	12,1	13,8	17,3	21,5	25,4	27,6	27,5	24,8	20,6	17,1	13,6	19,4	2396
Σέρρες	5,4	7,8	11,0	16,2	21,4	25,8	28,7	27,0	23,8	18,2	12,2	7,0	17,0	2806
Σητεία	13,8	14,1	15,1	18,2	22,0	25,5	27,2	27,4	25,1	22,0	18,9	15,6	20,4	2534
Σκύρος	10,6	11,1	12,2	15,8	20,2	24,2	26,3	26,0	22,7	19,2	15,7	12,3	18,0	2791
Σούδα Κρήτ.	11,9	12,3	13,9	17,0	21,4	25,6	27,5	27,3	24,2	20,3	17,3	14,0	19,4	2895
Σύρος	12,2	12,7	13,6	16,8	20,6	25,1	27,3	27,0	24,2	20,8	17,2	13,9	19,3	3029
Τυμπάκι	13,2	13,5	15,0	17,8	21,8	26,2	28,8	28,6	25,7	21,5	18,1	14,8	20,4	2809
Χανιά	13,0	13,3	14,6	17,6	21,6	25,8	27,9	27,8	24,7	21,2	18,0	14,6	20,0	2854
Χίος	11,4	11,6	13,1	17,0	21,8	26,5	28,3	28,1	24,3	19,9	16,4	12,9	19,3	2566

Πίνακας 3.1 Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα t_a [°C] και ετήσια ηλιοφάνεια [h] σε διάφορες πόλεις της Ελλάδας

3.5.2 Επίδραση της ρύπανσης στην απόδοση

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας τους από τη επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού κ.ά. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή εύκολα να τα ξεπλύνει.

Επομένως είναι σημαντικό όταν η Φ/Β γεννήτρια πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια περιοχή, που εκτιμάται ότι η ρύπανση της θα είναι σημαντική να προβλεφθεί στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρησιμοποίηση ενός συντελεστή ρύπανσης (σ_p).

όπου:

$\sigma_p = 0,95$ για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά
0,90 για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα
0.80 για πλαίσια οριζόντια και ακάθαρτα

3.5.3 Γήρανση Φ/Β πλαισίου

Αφορά στη μείωση της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων στο χρόνο της ζωής τους και εκφράζεται, συνήθως, με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσης του Φ/Β, άρα και της ισχύος αιχμής του.

Στο κρυσταλλικό πυρίτιο εμφανίζονται αλλοιώσεις στη δομή του υλικού των κρυσταλλικών Φ/Β στοιχείων του πλαισίου, που οφείλονται σε διάφορα αίτια, κυρίως σε υπερθέρμανση. Μετρήσεις μακράς διάρκειας μας δίδουν μείωση της αποδοτικότητας του κάτω από πρότυπες συνθήκες STC, ~1 % κατ' έτος χρήσης (ρυθμός γήρανσης και εκφράζεται με τον συντελεστή γήρανσης σ_γ).

3.5.4 Δίοδος αντεπιστροφής

Η δίοδος αντεπιστροφής ΔA , που εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του ΦΒ πλαισίου, όταν αυτό δεν φωτίζεται, προσκαλεί απώλειες ενέργειας της τάξεως του 1%. Οι απώλειες αυτές λαμβάνονται υπ' όψη με τον συντελεστή απωλειών διόδου $\sigma_\delta = 0,99$.

Κεφάλαιο 4° - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα
- Τα αυτόνομα συστήματα

Και στις δυο έχουμε πολλές ομοιότητες μεταξύ τους. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι στα πρώτα υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο της Δ. Ε. Η. και η ενέργεια που παράγεται περνάει σε αυτό, ενώ στα δεύτερα δεν υπάρχει τέτοια σύνδεση και η ενέργεια που παράγεται χρησιμοποιείται για ίδια κατανάλωση.

4.1 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό σύστημα

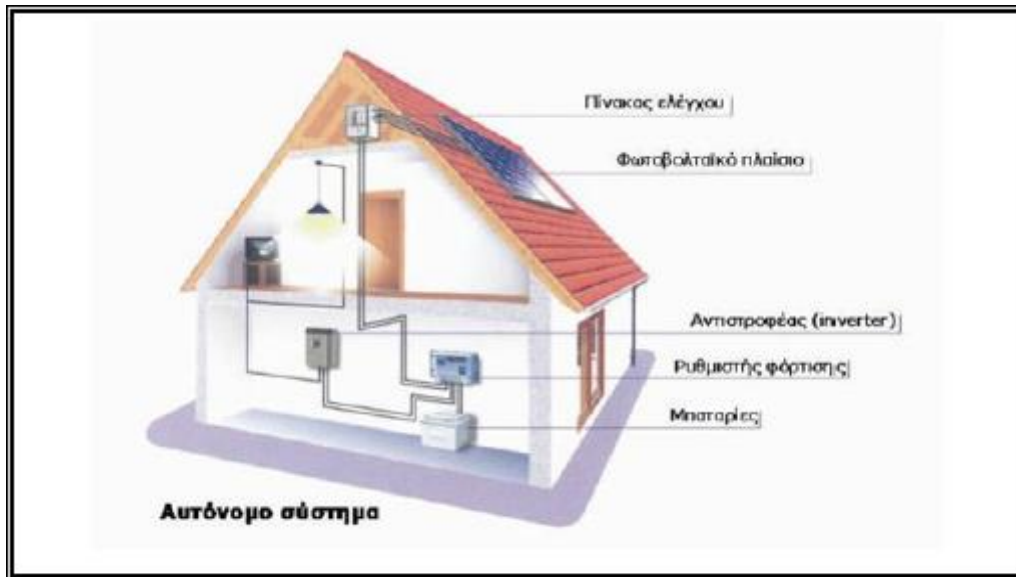
Το αυτόνομο σύστημα (ή σύστημα εκτός δικτύου) αποσκοπεί στο να προσφέρει ενεργειακή αυτονομία σε μια εγκατάσταση. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες απομονωμένων από το δίκτυο συστημάτων.

Κάποιες από αυτές είναι:

- Οικίες απομακρυσμένες από το δίκτυο σε τέτοια απόσταση που το κόστος διασύνδεσης με το δίκτυο της ΔΕΗ είναι απαγορευτικά υψηλό
- Οικίες που για κάποιους λόγους δεν δύναται να ηλεκτροδοτηθούν
- Κτηνοτροφικές ή γεωργικές μονάδες απομακρυσμένες από το δίκτυο της ΔΕΗ
- Τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις
- Αντλητικά συστήματα υδροδότησης
- Κινητές εγκαταστάσεις (τροχόσπιτα, πλωτά κ.α)

Εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλή διαθεσιμότητα (αμυντικές εφαρμογές διαστημικές εφαρμογές).

Η μεθοδολογία για την ηλεκτροδότηση μιας αυτόνομης εγκατάστασης είναι η ακόλουθη:



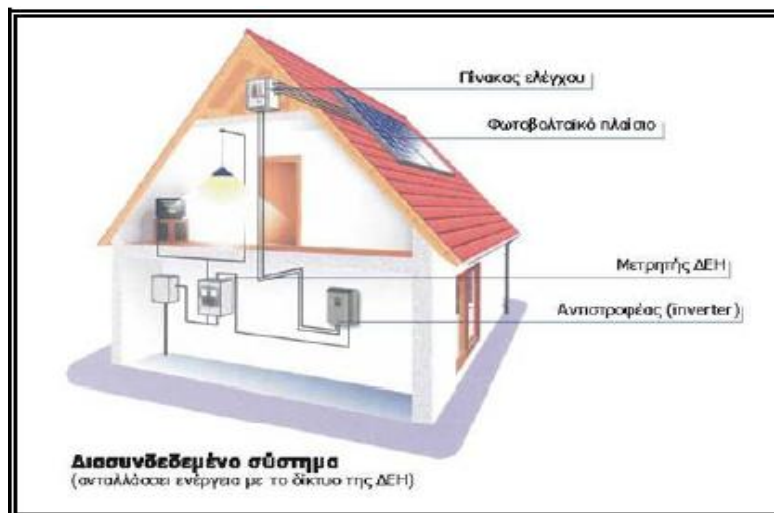
Σχήμα 4.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Σε αυτό το Φ/Β σύστημα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες. Το σύστημα μπορεί και λειτουργεί ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο.

Το ηλεκτρικό ρεύμα (DC) που παράγεται από τα φ/β πλαίσιο, φορτίζει τις μπαταρίες, με τη βοήθεια του ρυθμιστή φόρτισης. Ο μετατροπέας αλλάζει το ρεύμα των συσσωρευτών από συνεχές DC, σε εναλλασσόμενο AC 220V.

4.2 Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό σύστημα

Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ. Στην περίπτωση αυτή, πουλάει κανείς το ηλιακό ρεύμα στη ΔΕΗ έναντι μιας ορισμένης από το νόμο τιμής και συνεχίζει να αγοράζει ρεύμα από τη ΔΕΗ όπως και σήμερα. Έχει δηλαδή ένα διπλό μετρητή για την καταμέτρηση της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εφεδρείας (δηλαδή ως συστήματα αδιάλειπτης παροχής - UPS). Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα είναι μεν διασυνδεδεμένο με τη ΔΕΗ, αλλά διαθέτει και μπαταρίες (συν όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά) για να αναλαμβάνει την κάλυψη των αναγκών σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος και για όσο διαρκεί αυτή.



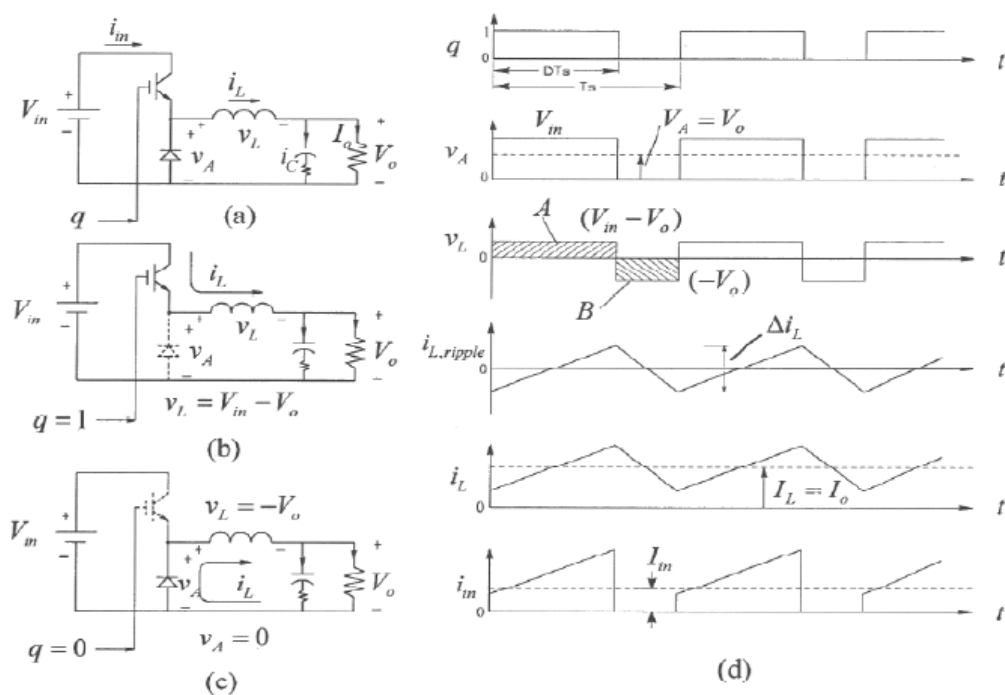
Σχήμα 4.2 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα

4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (DC/DC CONVERTER)

Σε ένα φ/β σύστημα η παραγόμενη τάση από τα φ/β στοιχεία δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή. Για να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας και να καταστεί κατάλληλη για την είσοδό της στον αντιστροφέα χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς

ρεύματος. Οι μετατροπείς μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το αν η τάση εξόδου που βγάζουν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου και ακόμα ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά τη μόνιμη κατάσταση των μετατροπέων και τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά.

Μετατροπέας Υποβιβασμού (Step-Down Converter ή Buck Converter)



Σχήμα 4.3 (a) Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού, (b) Διακόπτης κλειστός, (c) Διακόπτης ανοιχτός, (d) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 4.3(a). Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο (Σχήμα 4.3(b)). Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό(Σχήμα 4.3(c)).Ο μετατροπέας αυτός δέχεται στην είσοδό του μια συνεχή

τάση V_o και δίνει στην έξοδο του συνεχή τάση μικρότερης τιμής V_o . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = V_a = D V_{in} \quad (4.1)$$

όπου το D δείχνει τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη και δίνεται από τη σχέση:

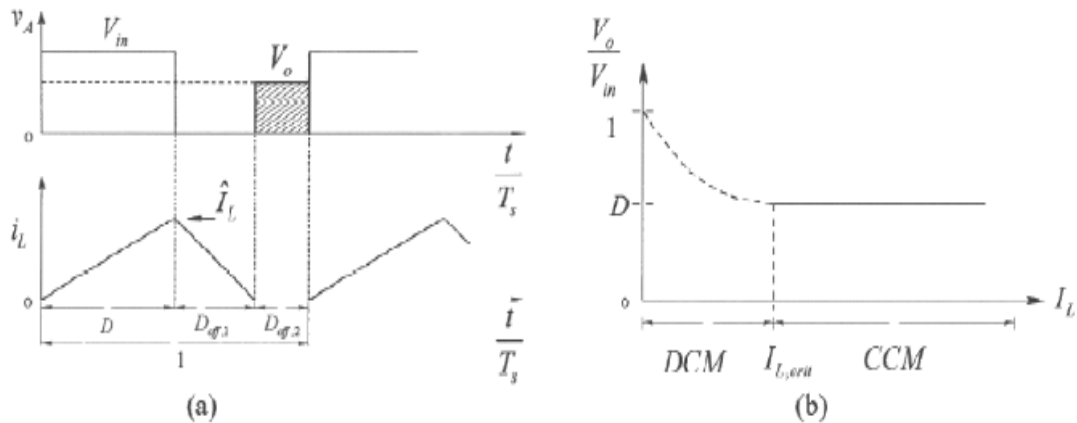
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (4.2)$$

όπου t_{on} η διάρκεια κατά την οποία άγει ο διακόπτης για μια περίοδο, t_{off} η διάρκεια κατά την οποία δεν άγει και T_s η περίοδος. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_o προκύπτει ίση με την τάση στα άκρα της διόδου V_a , καθώς η μέση τιμή της τάσης του πηνίου για χρόνο μιας περιόδου είναι μηδέν.

Το ρεύμα εξόδου μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε διακοπτόμενο, γεγονός που εξαρτάται από το φορτίο και τη χρονική διάρκεια t_{on} . Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (Continuous Conduction Mode - CCM) φαίνονται στο σχήμα 4.3(d), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου φαίνεται στο σχήμα 4.4 (Discontinuous Conduction Mode - DCM). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.4(b), υπάρχει μια κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου, κάτω από την οποία το ρεύμα γίνεται ασυνεχές. Η μέση τιμή αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L,crit,Buck} = \frac{V_{in}}{2L f_s} D(1-D) \quad (4.3)$$

Τέλος επειδή τόσο η τάση όσο και το ρεύμα είναι θετικά κατά τη λειτουργία του μετατροπέα, γι' αυτό και ονομάζεται μετατροπέας πρώτου τεταρτημορίου.



Σχήμα 4.4 Μετατροπέας υποβιβασμού στη κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος (DCM).

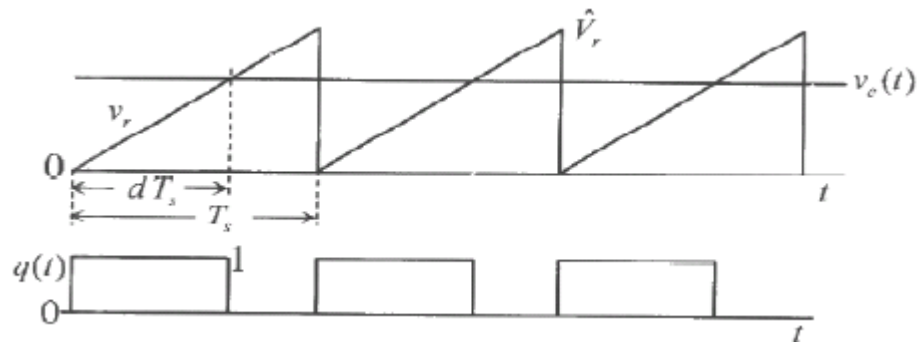
Έλεγχος με την τεχνική PWM

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης πλάτους (PWM). Όπως φαίνεται και από τη σχέση 4.1, η τάση αυτή εξαρτάται από το χρόνο τον οποίο άγει ο διακόπτης σε χρόνο μιας περιόδου. Σύμφωνα με την τεχνική της PWM, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται ρυθμίζοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακοπτικού στοιχείου. Η περίοδος καθώς και η συχνότητα μετάβασης του διακόπτη είναι σταθερά, ενώ αυτό που μεταβάλλεται είναι η σχετική διάρκεια αγωγής αυτού, δηλαδή ο λόγος D .

Η τάση εξόδου του μετατροπέα μετράται και συγκρίνεται με την επιθυμητή τάση και έπειτα το σήμα λάθους ενισχύεται από έναν ενισχυτή, του οποίου η έξοδος είναι το σήμα ελέγχου $V_c(t)$. Έπειτα το σήμα ελέγχου $V_c(t)$ συγκρίνεται με μια προιονωτήταση $V_r(t)$, η οποία έχει πλάτος V_r και σταθερή συχνότητα f_s . Παράγεται έτσι το διακοπτικό σήμα το οποίο έχει τιμή 1 όταν $V_c(t) > V_r(t)$ και 0 όταν $V_c(t) < V_r(t)$ (Σχήμα 4.5). Έτσι η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δύο αυτών τάσεων ως εξής:

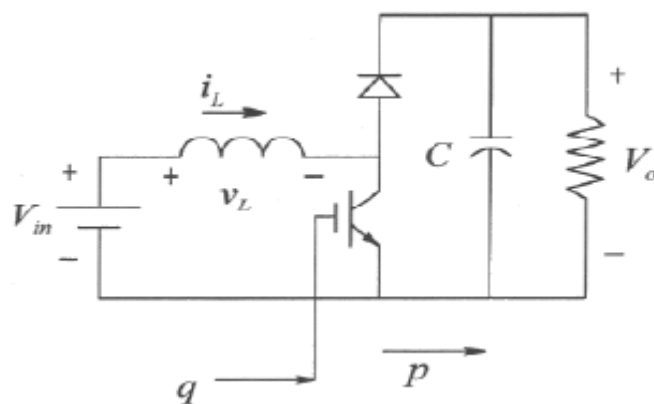
$$D = \frac{V_c}{V_r} \quad (4.4)$$

Με αυτόν τον τρόπο το σήμα ελέγχου που μπορεί να κυμαίνεται από 0 μέχρι V_r , και να ελέγχει γραμμικά και δυναμικά τον λόγο D.



Σχήμα 4.5 Έλεγχος της τάσης εξόδου με την τεχνική PWM

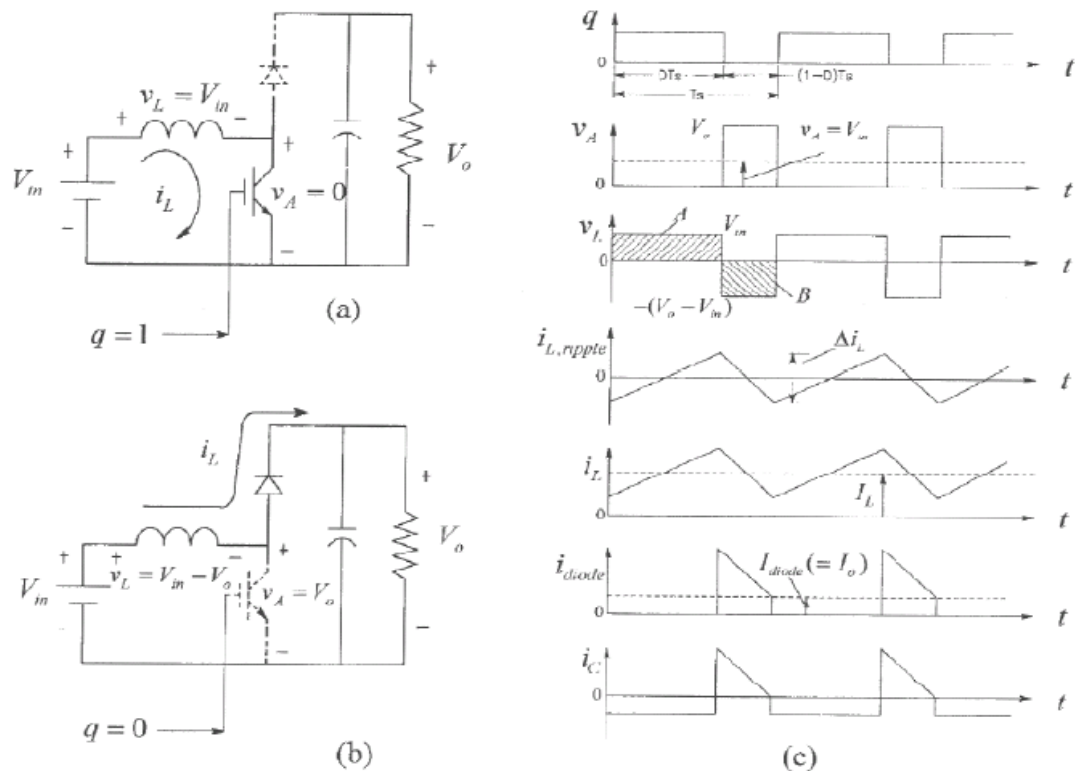
Μετατροπέας Ανύψωσης (Step-Up Converter ή Boost Converter)



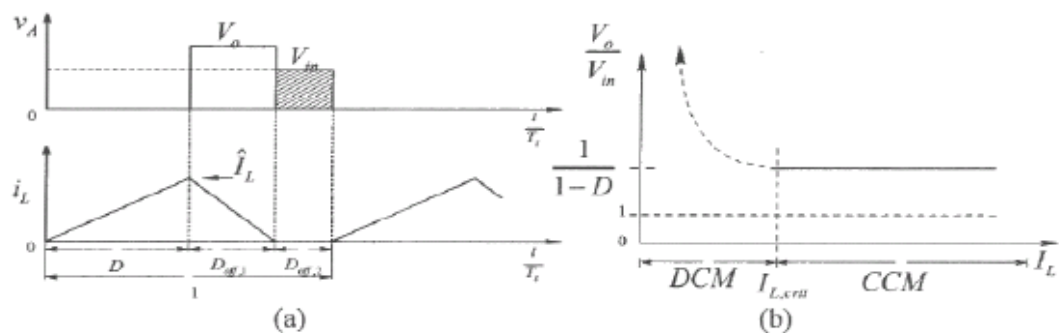
Σχήμα 4.6 Μετατροπέας ανύψωσης.

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα ανύψωσης φαίνεται στο σχήμα 4.6. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται και αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτό, ενώ η δίοδος είναι σε κατάσταση αποκοπής, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σύνδεση μεταξύ εισόδου και εξόδου (Σχήμα 4.7(a)). Όταν ο διακόπτης ανοίξει, ρεύμα περνάει από τη δίοδο και φτάνει στην έξοδο, με

αποτέλεσμα η έξοδος να δέχεται ενέργεια τόσο από την πηγή όσο και από το πηνίο (Σχήμα 4.7(b)).



Σχήμα 4.7 Μετατροπέας ανύψωσης. (a) Διακόπτης κλειστός, (b) Διακόπτης ανοιχτός, (c) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.



Σχήμα 4.8 Μετατροπέας ανύψωσης στη κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος.

Ο μετατροπέας αυτός δέχεται στην είσοδό του μια συνεχή τάση v_{in} και δίνει στην έξοδό του συνεχή τάση μεγαλύτερης τιμής v_o . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

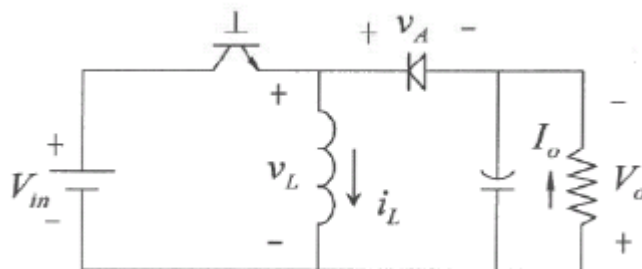
$$V_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} V_{in} = \frac{T_s}{T_s - t_{on}} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (4.5)$$

Και σε αυτή τη περίπτωση το ρεύμα εξόδου μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε διακοπτόμενο. Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (CCM) φαίνονται στο σχήμα 4.7(c), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου στο σχήμα 4.8 (DCM). Η κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου, δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L,crit,Boost} = \frac{V_{in}}{2Lf_s} D \quad (4.6)$$

Τέλος επειδή τόσο η τάση όσο και το ρεύμα είναι θετικά κατά τη λειτουργία του μετατροπέα είναι και αυτός ο μετατροπέας πρώτου τεταρτημορίου.

Μετατροπέας Ανύψωσης - Υποβιβασμού (Buck-Boost Converter)



Σχήμα 4.9 Μετατροπέας ανύψωσης - υποβιβασμού

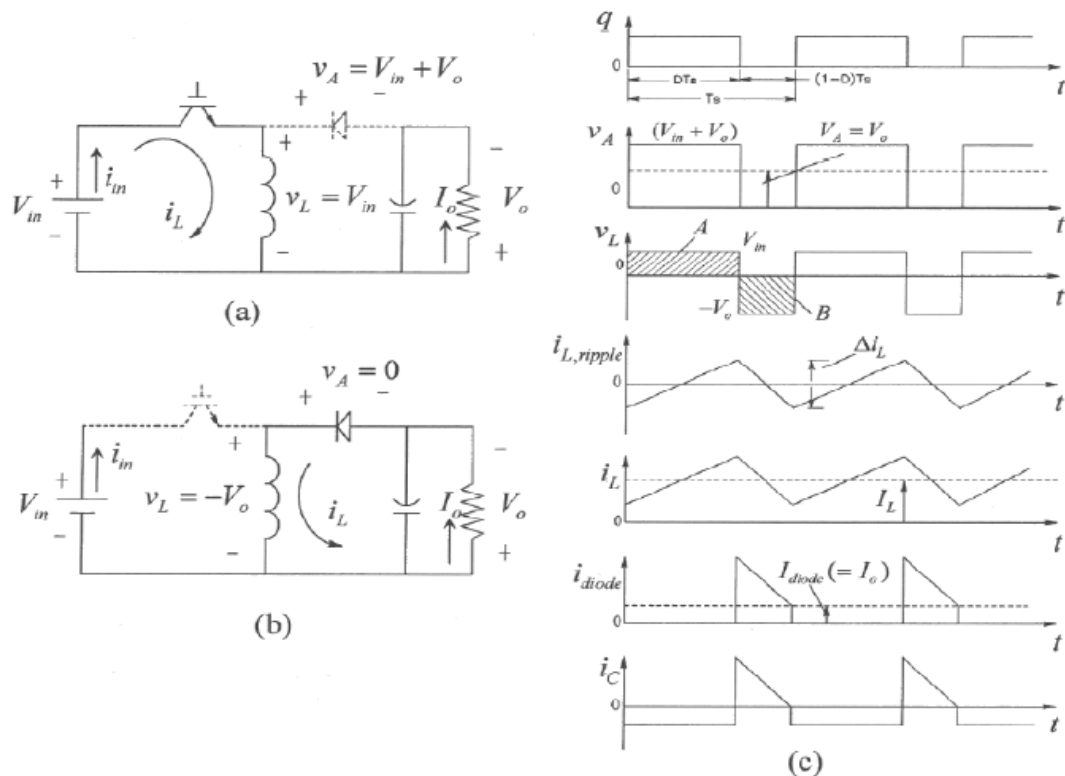
Το κύκλωμα ενός μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 4.9. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται και αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτό ενώ η διόδος πολώνεται ανάστροφα (Σχήμα 4.10(a)). Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό (Σχήμα 4.10(b)).

Η σχέση που συνδέει την μέση τιμή της τάσης εισόδου με την τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει:

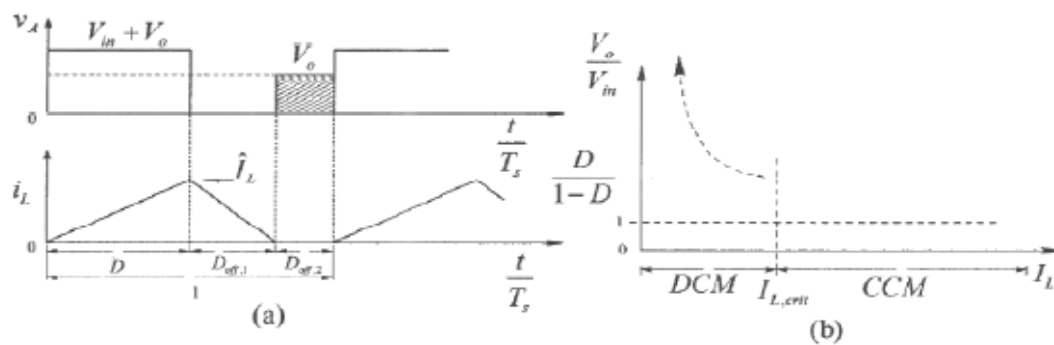
$$V_o = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (4.7)$$

όπου παρατηρούμαι ότι η τάση εξόδου μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από την τάση εισόδου ανάλογα με την τιμή του συντελεστή D. Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (CCM) φαίνονται στο σχήμα 4.10(c), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου στο σχήμα 4.11 (DCM). Η κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου είναι ίδια με την περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L,crit,Buck-Boost} = \frac{V_{in}}{2Lf_s} D \quad (4.8)$$



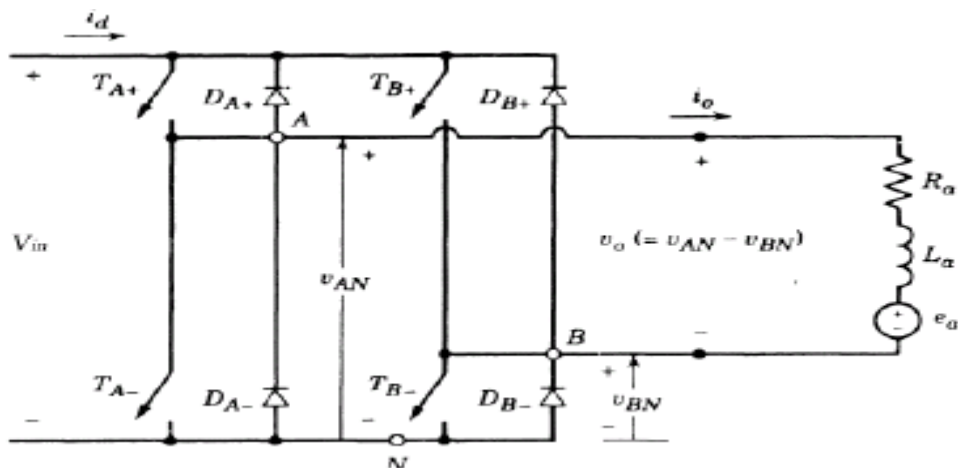
Σχήμα 4.10 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού. (a) Διακόπτης κλειστός, (b) Διακόπτης ανοιχτός, (c) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.



Σχήμα 4.11 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού στη κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος (DCM).

Μετατροπέας πλήρους γέφυρας

Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 4.12 χρησιμοποιεί συνολικά τέσσερις διακόπτες και τέσσερις διόδους τοποθετημένες αντιπαράλληλα. Κάθε σκέλος αποτελείται από δύο ζεύγη διακοπών – διόδων και λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε ποτέ την ίδια στιγμή οι διακόπτες του να μην είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί ή κλειστοί. Έτσι για κάθε σκέλος κάθε στιγμή ο ένας διακόπτης είναι ανοιχτός ενώ ο άλλος κλειστός. Στον μετατροπέα αυτόν η τάση εισόδου έχει καθορισμένη τιμή V_{in} ενώ η τάση εξόδου V_o , μπορεί να αλλάζει τόσο πλάτος όσο και πολικότητα. Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου, χρησιμοποιείται η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών, όπου η τάση ελέγχου V_c συγκρίνεται αυτή τη φορά με μία τριγωνική κυματομορφή.



Σχήμα 4.12 Μετατροπέας πλήρους γέφυρας.

Αντίθετα από τα παραπάνω είδη μετατροπέων, ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα έχει την ικανότητα να μεταφέρει ενέργεια αμφίδρομα, καθώς έχει την δυνατότητα να αντιστρέφει την πολικότητα τόσο στην τάση εξόδου V_o , όσο και στο ρεύμα εξόδου I_o . Γι αυτό και ονομάζεται μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων.

4.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ – MAXIMUM POWER POINT TRACKERS (MPPT)

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πολυάριθμες τεχνικές και αλγόριθμοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όλες αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες.

Έμμεσοι ανιχνευτές MPP

Αυτοί οι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Σύμφωνα με μία μέθοδο η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες

τιμές τάσης στο σημείομέγιστης λειτουργίας αναμένονται τον χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές της τάσης είναι σαφώς μικρότερες. Μια άλλη μέθοδοςρυθμίζει την τάση ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο. Τέλοςμια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ολόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή:

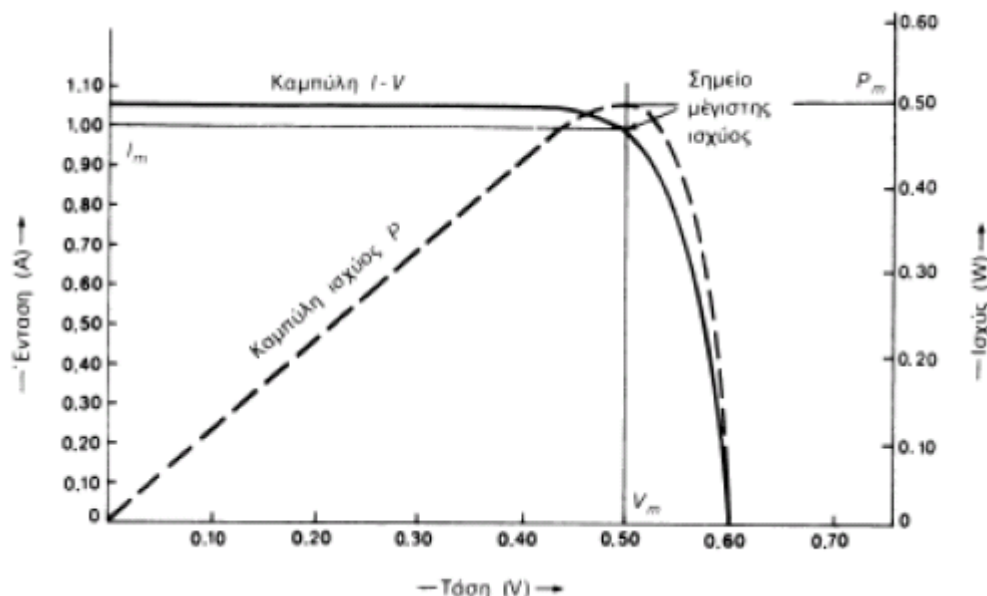
$$\frac{V_m}{V_{oc}} = K = \text{σταθ.} \quad (4.9)$$

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάσηανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot V_{oc}$, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Άμεσοι ανιχνευτές MPP

Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας. Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης –

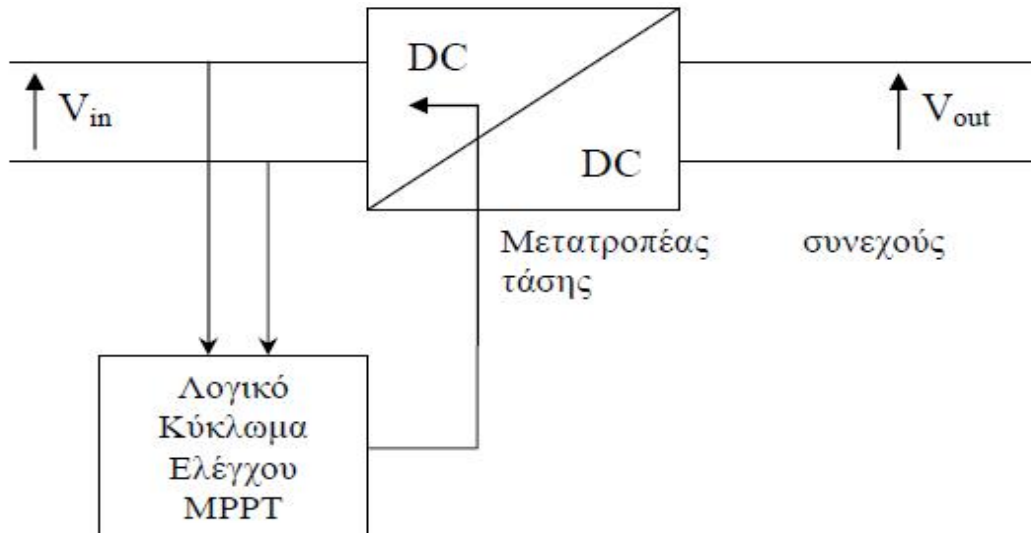
έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Στο σχήμα 4.13 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 4.13 Η συνεχής καμπύλη δείχνει την μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση

με την ένταση του ρεύματος ενός φ/β στοιχείου πυριτίου, σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται.

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα DC/DC αντιστροφέα, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Ένα απλοϊκό σχεδιάγραμμα dc/dc converter που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της μέγιστης ισχύς εξόδου της φ/β γεννήτριας φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.14 Απλοποιημένη διάταξη MPPT

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$P = V \cdot I \quad (4.10)$$

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

$$P' = (V + dV) \cdot (I + dI) = V \cdot I + V \cdot dI + IdV \quad (4.11)$$

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

$$dP = P' - P = V \cdot dI + IdV \quad (4.12)$$

Στο σημείο της μέγιστης ισχύος η κλίση της καμπύλης ισχύος του φ/β στοιχείου μηδενίζεται, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.13. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Rightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (4.13)$$

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

Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

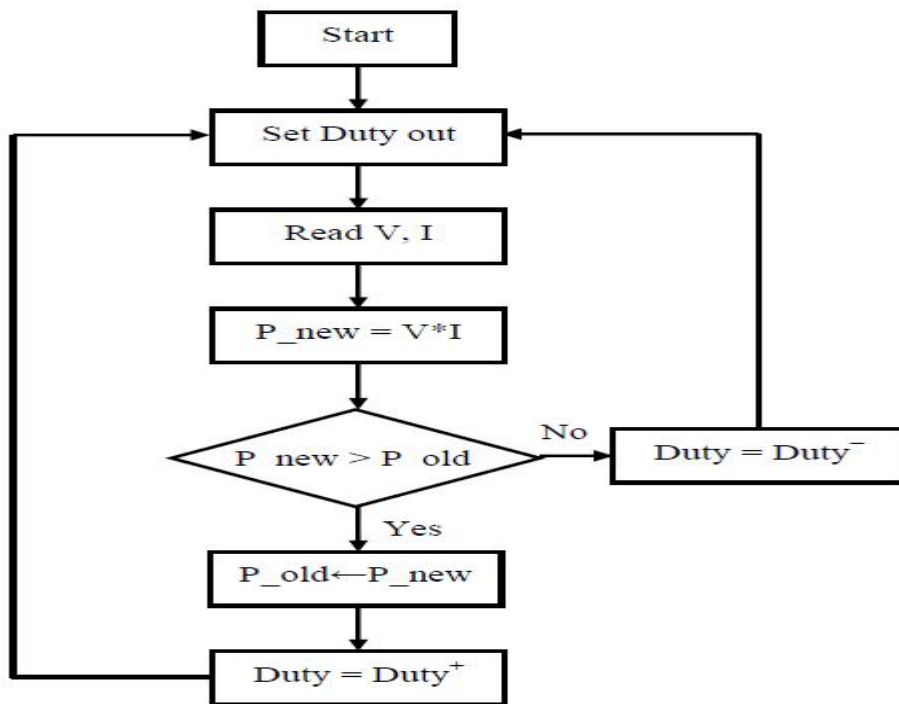
- Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής Z_d και η στατική αντίσταση Z_s . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή:

$$Z_d = -Z_s \quad (4.14)$$

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

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (4.15)$$

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν η τάση σταθεροποιείται. Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ροής ενός απλού αλγορίθμου εύρεσης P_{\max} .

Εναλλακτικές μορφές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούν κυκλώματα με μνήμη ώστε να συγκρίνουν τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος, τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε προσαρμόζουν ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφέας. Το διάγραμμα ροής ενός απλού αλγορίθμου που συγκρίνει δύο διαδοχικές μετρήσεις της ισχύος φαίνεται στο σχήμα 4.15. Σύμφωνα με αυτό εισάγεται μια περιοδική διαταραχή της τάσης και ελέγχεται αν αυτή προκαλεί αύξηση ή μείωση της παραγόμενης ισχύος. Αν το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ισχύος τότε εισάγεται εκ νέου η ίδια διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται και πάλι αύξηση και το αντίστοιχο αν είχε εισαχθεί μείωση) ενώ αν το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ισχύος τότε εισάγεται η αντίθετη διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται μείωση και το αντίστοιχο αν είχε εισαχθεί μείωση της τάσης). Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο σημεία της καμπύλης ισχύος και ταλαντεύεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι εμφανίζει απώλειες ισχύος ιδίως στη περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει απότομα. Μια καλύτερη υλοποίηση μπορεί να προσφέρει ένας αλγόριθμος που εκμεταλλεύεται τρία σημεία της καμπύλης ισχύος.

4.5 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ (DC/AC INVERTER)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τάση που παράγεται από τη φ/β γεννήτρια είναι ακατάλληλη για την άμεση σύνδεση του φ/β σταθμού στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος του αντιστροφέα είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης που παράγεται από τα φ/β στοιχεία σε εναλλασσόμενη, κατάλληλης τιμής και συχνότητας για διασύνδεση στο δίκτυο.

Οι αντιστροφείς DC/AC μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Όταν η είσοδος είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI). Ο χαρακτηρισμός του αντιστροφέα δεν έχει να κάνει απαραίτητα με την ενεργειακή πηγή του συστήματος, αλλά με την τοπολογία. Έτσι είναι δυνατόν να αλλάξει η μορφή της πηγής χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν μια χωρητικότητα παράλληλα συνδεδεμένη με την πηγή, ενώ οι αντιστροφείς πηγής έντασης ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή.

4.5.1 Μονοφασικός αντιστροφέας

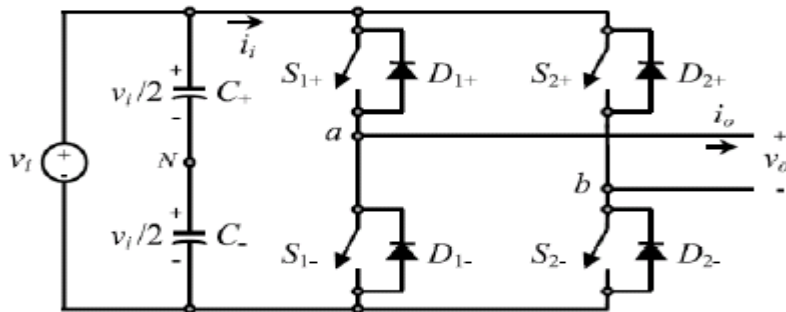
Οι μονοφασικοί αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την τοπολογία τους σε αντιστροφείς ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας. Οι πρώτοι υστερούν σαφώς για αυτό και σε εφαρμογές ΑΠΕ χρησιμοποιούνται οι αντιστροφείς πλήρους γέφυρας (Σχήμα 4.16).

Διάφορες τεχνικές ελέγχου, υλοποιούν διαφορετικές κυματομορφές εξόδου της εναλλασσόμενης τάσης, στην εργασία όμως αυτή θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον στους μονοφασικούς αντιστροφείς με έλεγχο SPWM.

Διαμόρφωση με την τεχνική SPWM

Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς

κυματομορφής έξοδος, η οποία μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα, καθώς και να μειωθεί η επίδραση των αρμονικών στην έξοδο. Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα σύνδεσης πηγών ΑΠΕ και δικτύου χαμηλής τάσης.



Σχήμα 4.16 Τοπολογία μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ελεγχόμενου από πηγή τάσης.

Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την τεχνική SPWM, δημιουργούνται δύο κυματομορφές. Μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους V_{Δ} , η οποία έχει το ρόλο του φορέα και μια κυματομορφή αναφοράς πλάτους V_c , η οποία έχει ημιτονοειδή μορφή. Οι κυματομορφές αυτές, οι οποίες δημιουργούνται στο κύκλωμα ελέγχου, είναι συγχρονισμένες και παράγονται από γεννήτριες κυματομορφών. Τα δύο αυτά σήματα συγκρίνονται και καθορίζουν ποιοι διακόπτες θα άγουν και για ποιο χρονικό διάστημα. Η συχνότητα f_{Δ} της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται φέρουσα συχνότητα (ή συχνότητα μετάβασης), και είναι αυτή που καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα. Το σήμα αναφοράς V_c χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπών και έχει συχνότητα f_c . Αυτή ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης και είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Η παραγόμενη αυτή τάση, δεν είναι τέλεια ημιτονοειδής, αλλά περιέχει και αρμονικές συνιστώσες της συχνότητας διαμόρφωσης f_c .

Ορίζεται ο **συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας** m_{ω} ως ο λόγος της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης:

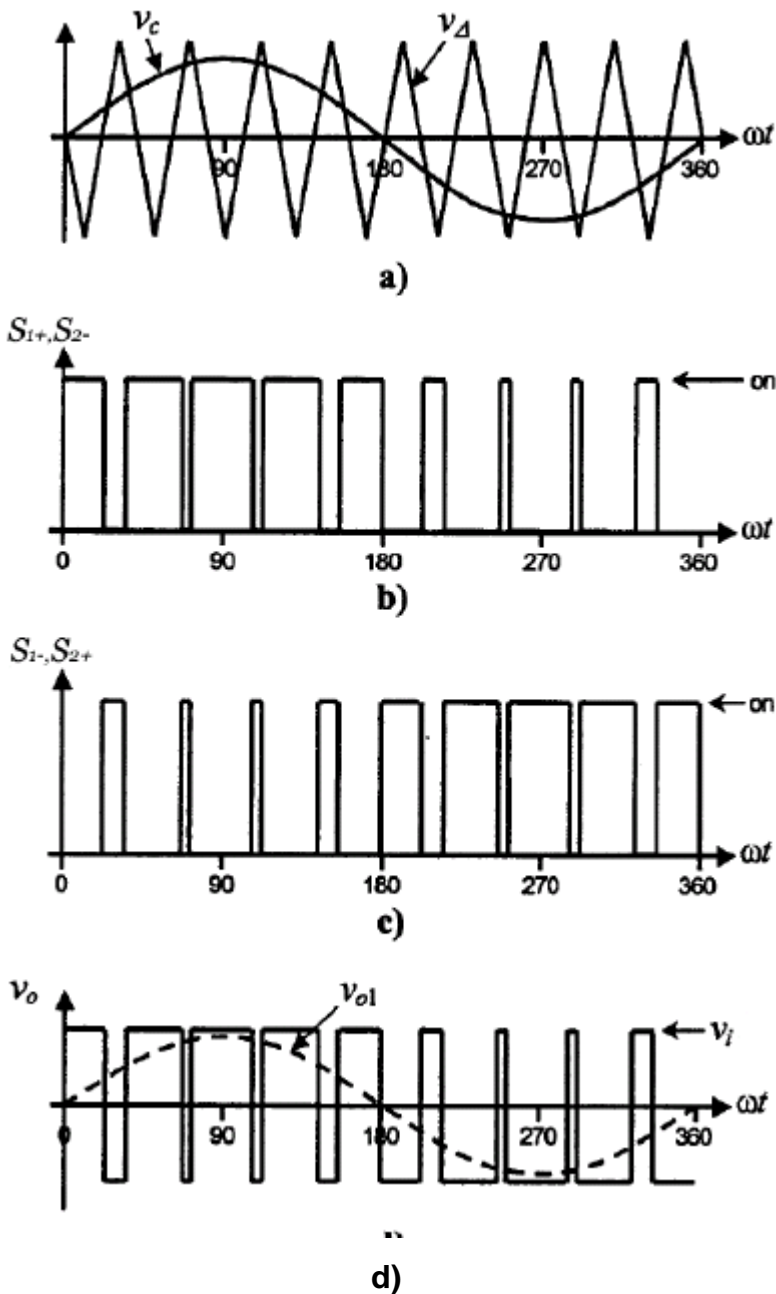
$$m_f = \frac{f_\Delta}{f_c} \quad (4.16)$$

Ομοίως ορίζεται και ο **συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους** ως ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής:

$$m_a = \frac{v_c}{v_\Delta} \quad (4.17)$$

Πίνακας 4.1 Διακοπτικές καταστάσεις για αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

a/a	Κατάσταση	v_a	v_b	v_o
1	S_{1+}, S_{2-} ON S_{1-}, S_{2+} OFF	$v/2$	$-v/2$	v
2	S_{1-}, S_{2+} ON S_{1+}, S_{2-} OFF	$-v/2$	$v/2$	$-v$
3	S_{1+}, S_{2+} ON S_{1-}, S_{2-} OFF	$v/2$	$v/2$	0
4	S_{1-}, S_{2-} ON S_{1+}, S_{2+} OFF	$-v/2$	$-v/2$	0



Σχήμα 4.17 Διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου a) Σήμα φορέα και σήμα αναφοράς, b) Καταστάσεις διακοπών S_{1+}, S_{2-} c) Καταστάσεις διακοπών S_{1-}, S_{2+} d) Εναλλασσόμενη τάση εξόδου.

Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας του σχήματος 4.16 δεν πρέπει να είναι ταυτόχρονα κλειστοί οι διακόπτες του ίδιου κλάδου, γιατί τότε προκύπτει

βραχυκύκλωμα στη πλευρά DC. Δηλαδή πρέπει να αποφευχθεί η κατάσταση στην οποία οι S_{1+} και S_{1-} είναι κλειστοί ταυτόχρονα και αντίστοιχα η \ κατάσταση στην οποία οι S_{2+} και S_{2-} είναι κλειστοί. Υπάρχουν τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί για τους διακόπτες, οι οποίοι περιγράφονται στον πίνακα 4.1.

Η διαμόρφωση μπορεί να γίνει είτε με διπολική τάση εξόδου είτε με μονοπολική.

A. Διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου

Κατά την περίπτωση ελέγχου αυτή, τα ζευγάρια των διακοπών S_{1+} , S_{2-} και S_{1-} , S_{2+} , αλλάζουν καταστάσεις μαζί. Δηλαδή είναι πιθανές μόνο οι καταστάσεις 1 και 2 του πίνακα 4.1 και τα προηγούμενα ζευγάρια θα έχουν τους ίδιους παλμούς έναυσης (Σχήμα 4.17). Τα δύο ζεύγη διακοπών αυτά ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των κυματομορφών V_c και V_Δ , και ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος εξόδου I_o , προκύπτει τάση εξόδου:

- $V_o = V_i$ όταν $V_c > V_\Delta$ και οι διακόπτες S_{1+} , S_{2-} άγουν,
- $V_o = -V_i$ όταν $V_c < V_\Delta$ και οι διακόπτες S_{1-} , S_{2+} άγουν.

Στη γραμμική περιοχή της διαμόρφωσης ($m_a < 1$), η κυματομορφή εξόδου που προκύπτει είναι ημιτονοειδούς μορφής, η οποία περιέχει μια θεμελιώδη συνιστώσα με πλάτος V_{o1} , που δίνεται από τη σχέση:

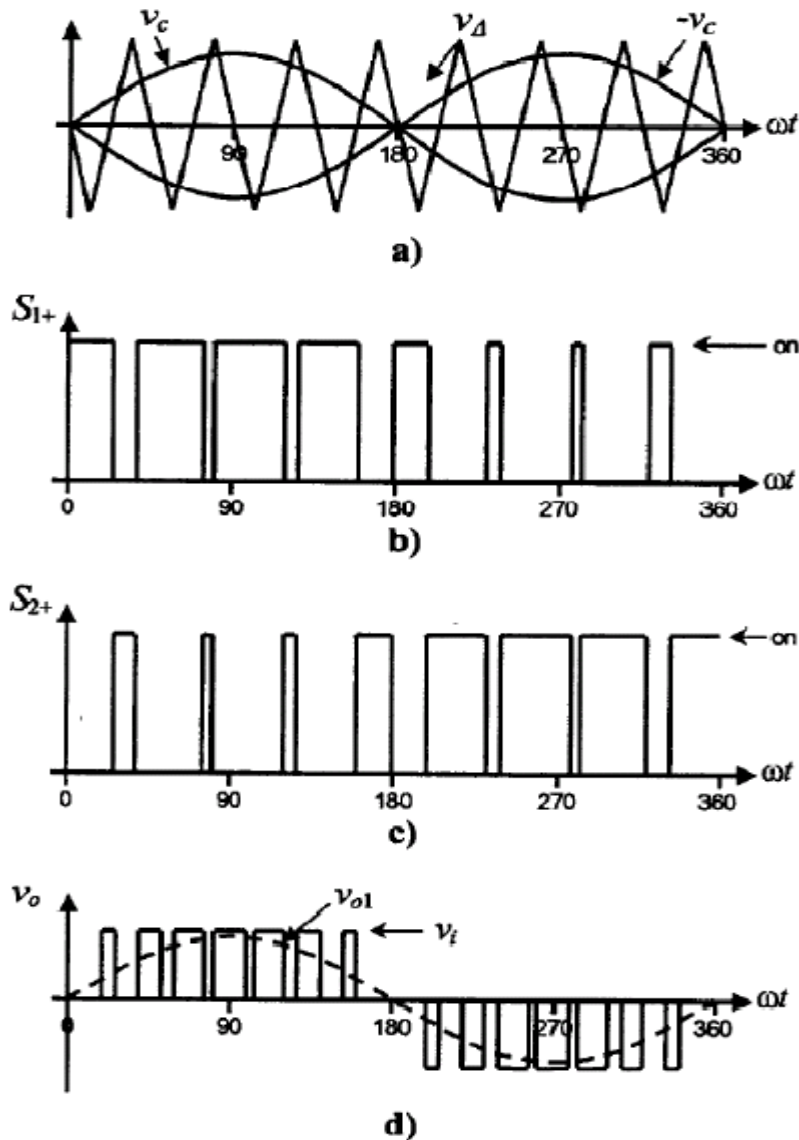
$$V_{o1} = V_{ab} = m_a \cdot v_i \quad (4.18)$$

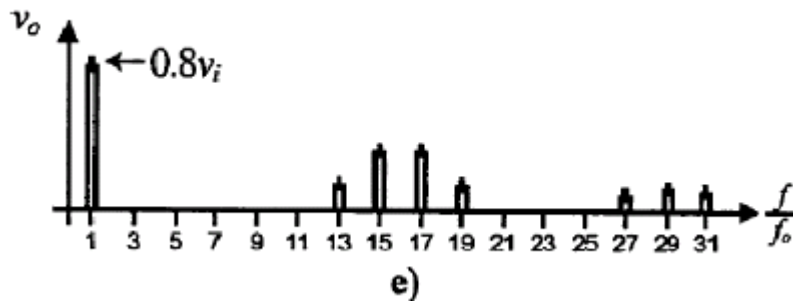
Όταν ο συντελεστής m_a είναι μεγαλύτερος της μονάδας έχουμε υπερδιαμόρφωση, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου V_o να περιέχει περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες σε σύγκριση με τη γραμμική περιοχή. Για μεγάλες τιμές του λόγου m_a , η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα εκφυλίζεται σε τετραγωνική. Τότε η τάση εξόδου λαμβάνει τιμές:

$$V_i < V_{01} = V_{ab} < \frac{4}{\pi} * V_i \quad (4.19)$$

B. Διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου

Σε αντίθεση με την διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου, η μονοπολική χρησιμοποιεί και τις τέσσερις διακοπτικές καταστάσεις του πίνακα 4.1. Με αυτό τον τρόπο η εναλλασσόμενη τάση εξόδου μπορεί να πάρει τις τρεις τιμές που φαίνονται στον ίδιο πίνακα, δηλαδή v , $-v$, 0 . Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται εκτός από το σήμα αναφοράς C_n και άλλο ένα με αντίθετο πρόσημο $-V_c$ (Σχήμα 4.18).





Σχήμα 4.18 Διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου α) Σήμα φορέα και σήματα αναφοράς, β) Κατάσταση διακόπτη S_{1+} , γ) Κατάσταση διακόπτη S_{2+} , δ) Εναλλασσόμενη τάση εξόδου, ε) Κατανομή συχνοτήτων τάσης εξόδου.

Στον κλάδο 1 του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας του σχήματος 4.16 συγκρίνεται το σήμα αναφοράς V_C με το V_Δ , ενώ στον κλάδο 2 γίνεται σύγκριση μεταξύ του $-V_C$ και του V_Δ . Έτσι για το σκέλος 1 προκύπτει:

- $V_{aN} = V_i$ όταν $V_C > V_\Delta$ και ο διακόπτης S_{1+} άγει,
- $V_{aN} = 0$ όταν $V_C < V_\Delta$ και ο διακόπτης S_{1-} άγει,

Ενώ για το σκέλος 2:

- $V_{bN} = V_i$ όταν $-V_C > V_\Delta$ και ο διακόπτης S_{2+} άγει,
- $V_{bN} = 0$ όταν $-V_C < V_\Delta$ και ο διακόπτης S_{2-} άγει.

Παρόμοια συμπεράσματα με την περίπτωση της διπολικής διαμόρφωσης μπορούν να εξαχθούν και σε αυτή την περίπτωση όσον αφορά το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου και όσον αφορά τη λειτουργία για μικρές και μεγάλες τιμές της παραμέτρου m_f και για την περίπτωση της υπερδιαμόρφωσης. Όμως επειδή οι τάσεις V_{aN} και V_{bN} αν και έχουν το ίδιο πλάτος, εμφανίζουν διαφορά φάσης 180° , η τάση εξόδου δεν θα περιέχει άρτιες αρμονικές. Έτσι αν επιλεγεί το m_f να είναι περιττό, τότε οι αρμονικές στην έξοδο του αντιστροφέα εμφανίζονται σε κανονικοποιημένες

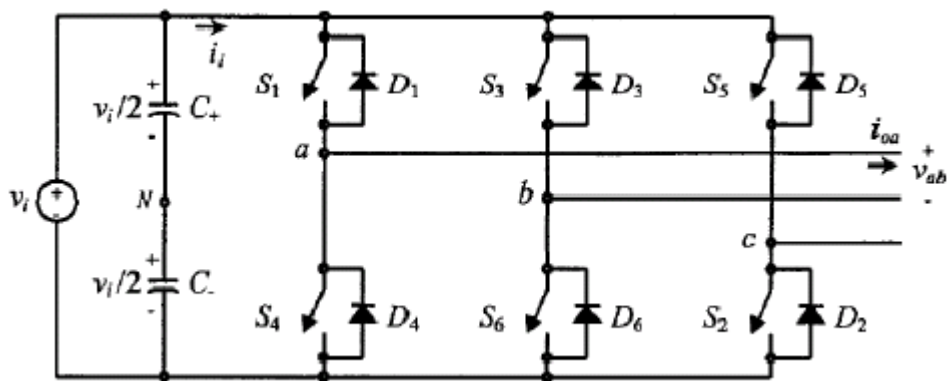
περιπτές συχνότητες f_h γύρω από το διπλάσιο της κανονικοποιημένης συχνότητας m_f και των πολλαπλασίων της (Σχήμα 4.18e). Συγκεκριμένα έχουμε:

$$h = l * m_f \pm kl = 2, 4 \dots \quad (4.20)$$

όπου $k = 1, 3, 5, \dots$ Το γεγονός αυτό προσδίδει ένα πλεονέκτημα στη τεχνική της διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου, έναντι της διαμόρφωσης με διπολική τάση, καθώς οι αρμονικές στην έξοδο εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερο και φθηνότερο φίλτρο.

4.5.2 Τριφασικός αντιστροφείας

Οι τριφασικοί αντιστροφεείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος. Σκοπός τους είναι να παρέχουν μια τριφασική πηγή τάσης ή έντασης, όπου το πλάτος, η φάση και η συχνότητα να είναι ανά πάσα στιγμή ελεγχόμενα. Η τοπολογία ενός τριφασικού αντιστροφέα ελεγχόμενου από πηγή τάσης φαίνεται στο σχήμα 4.19, ενώ οι επιτρεπόμενοι συνδυασμοί των καταστάσεων των διακοπών δίνονται στον πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.19 Τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα ελεγχόμενου από πηγή τάσης.

Παρατηρούμαι ότι υπάρχουν οκτώ επιτρεπόμενες διακοπτικές καταστάσεις. Όπως και στον μονοφασικό αντιστροφέα, έτσι και εδώ, δεν γίνεται οι διακόπτες του ίδιου κλάδου να είναι ταυτόχρονα κλειστοί, καθώς

τότε δημιουργείται βραχυκύκλωμα στη πλευρά DC. Ακόμα σε περίπτωση που οι διακόπτες αυτοί είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί τότε καταλήγουμε σε απροσδιόριστες καταστάσεις, για αυτό και οι καταστάσεις αυτές είναι μη επιτρεπόμενες. Τέλος υπάρχουν δύο καταστάσεις, που η τάση στη πλευρά AC μηδενίζεται.

Πίνακας 4.2 Διακοπτικές καταστάσεις για τριφασικό αντιστροφέα.

a/a	Κατάσταση		v_a	v_b	v_{ab}
1	S_1, S_2, S_6 ON	S_4, S_5, S_3 OFF	$-v$	0	v
2	S_2, S_3, S_1 ON	S_5, S_6, S_4 OFF	$-v$	v	0
3	S_3, S_4, S_2 ON	S_6, S_1, S_5 OFF	0	v	$-v$
4	S_4, S_5, S_3 ON	S_1, S_2, S_6 OFF	v	0	$-v$
5	S_5, S_6, S_4 ON	S_2, S_3, S_1 OFF	v	$-v$	0
6	S_6, S_1, S_5 ON	S_3, S_4, S_2 OFF	0	$-v$	v
7	S_1, S_3, S_5 ON	S_4, S_6, S_2 OFF	0	0	0
8	S_4, S_6, S_2 ON	S_1, S_3, S_5 OFF	0	0	0

Διαμόρφωση με την τεχνική SPWM

Η τεχνική αυτή είναι μια επέκταση αυτής που παρουσιάστηκε στους μονοφασικούς αντιστροφείς. Για τον τριφασικό αντιστροφέα χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς με διαφορά φάσης 120° και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα, το οποίο παραμένει σταθερό. Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ενός ιδανικού τριφασικού αντιστροφέα. Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας επιλέγεται να είναι περιττό πολλαπλάσιο του 3. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φασικές τάσεις να μην έχουν άρτιες αρμονικές και επιπλέον οι αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες του 3, κάθε φάσης, να είναι ίδιες τόσο σε πλάτος όσο και σε φάση. Άρα, επιπλέον οι φασικές τάσεις δεν περιέχουν αρμονικές

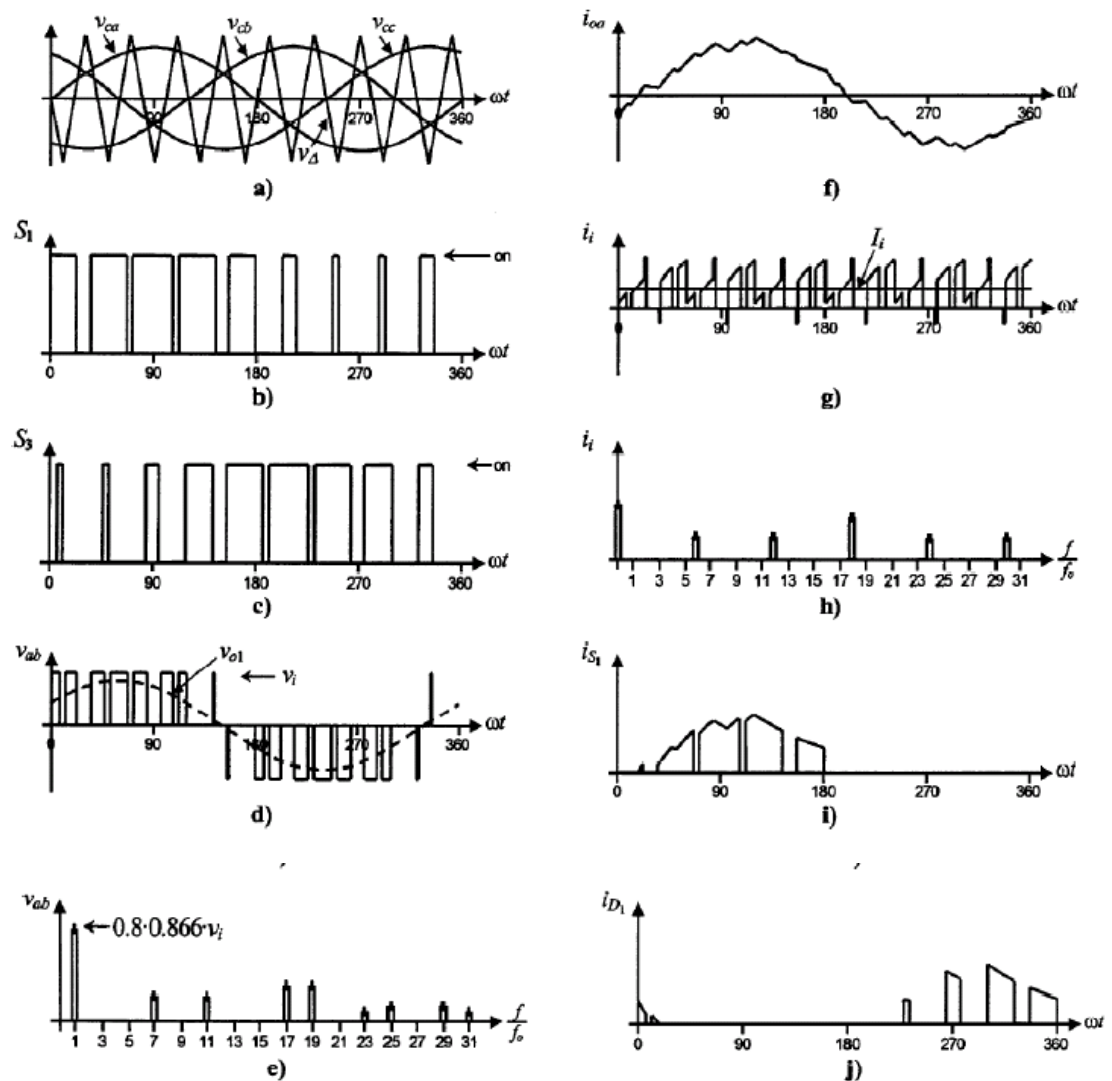
σε συχνότητες πολλαπλάσιες του 3. Τότε οι αρμονικές στην έξοδο του αντιστροφέα εμφανίζονται σε κανονικοποιημένες συχνότητες f_h γύρω από την κανονικοποιημένη συχνότητα m_f και τα πολλαπλάσιά της (Σχήμα 4.18e).

Συγκεκριμένα:

$$h = l * m_f * k \quad l = 1, 2, 3 \dots \quad (4.21)$$

Όπου $l = 1, 3, 5, \dots$ για $k = 2, 4, 6, \dots$ και $l = 2, 4, 6, \dots$ για $k = 1, 5, 7, \dots$, έτσι ώστε το h να μην είναι πολλαπλάσιο του 3. Δηλαδή οι αρμονικές θα εμφανιστούν σε συχνότητες:

$$m_f \pm 2, m_f \pm 4 \dots 2m_f \pm 1, 2m_f \pm 5 \dots 3m_f \pm 5, 3m_f \pm 4 \dots \text{ κτλ. (4.22)}$$



Σχήμα 4.20 Τριφασικός αντιστροφέας VSI, διαμόρφωση SPWMa) Σήμα φορέα και σήμα αναφοράς, b), c) Καταστάσεις διακοπών S1, S3 ,

d) Εναλλασσόμενη τάση εξόδου, e) Κατανομή συχνοτήτων τάσης εξόδου, f) Ρεύμα εξόδου g) Συνεχές ρεύμα, h) Κατανομή συχνοτήτων συνεχούς ρεύματος, i) Ρεύμα διακόπτη S_1 , j) Ρεύμα διόδου D_1 .

Στη γραμμική περιοχή διαμόρφωσης ($m_a < 1$), το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$V_{ab, 1} = \frac{\sqrt{3}}{2} m(a) V(i) \quad (4.23)$$

Ενώ στην περίπτωση της υπερδιαμόρφωση προκύπτει:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} V(i) < V_{ab, 1} < \frac{4\sqrt{3}}{\pi} V(i) \quad (4.24)$$

Όπου το άνω όριο περιγράφει την περίπτωση του εκφυλλισμού.

4.5.3 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος

Πιο πάνω περιγράφηκαν οι βασικές θεωρητικές τοπολογίες με τις οποίες γίνεται η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης εισόδου σε ημιτονική τάση εξόδου, ελεγχόμενη κατά πλάτος και συχνότητα. Διάφορες εφαρμογές απαιτούν είτε την ύπαρξη μόνο μιας γέφυρας DC/AC, για την μετατροπή της εισερχόμενης τάσης κατευθείαν σε εναλλασσόμενη, είτε την μετατροπή της (μη σταθερής) DC εισερχόμενης τάσης σε μια στάθμη σταθερής τιμής και στη συνέχεια την μετατροπή αυτής σε εναλλασσόμενη. Ένας αντιστροφέας ωστόσο δεν περιλαμβάνει μόνο τις διατάξεις που επιτυγχάνουν αυτή τη μετατροπή, αλλά και σειρά άλλων που αφορούν τον έλεγχο, την προστασία και την βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης τάσης.

Ασφάλειες, αυτόματοι διακόπτες, και κυκλώματα εντοπισμού υπερτάσεων αποτελούν διατάξεις προστασίας του αντιστροφέα. Φίλτρα πηνίων και πυκνωτών χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των ρευμάτων εισόδου και εξόδου.

Πολύ σημαντική είναι και η παρεμβολή ενός μετασχηματιστή, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης ηλεκτρική απομόνωση της πλευράς εισόδου από την έξοδο. Ένας μετασχηματιστής απομόνωσης χαμηλής συχνότητας μπορεί να τοποθετείται κατευθείαν στο στάδιο εξόδου, οπότε η παραγόμενη ημιτονική

κυματομορφή οδηγείται μέσω αυτού στο κύκλωμα της εναλλασσόμενης τάσης (π.χ. ηλεκτρικό δίκτυο πόλης). Μεγάλη συζήτηση διεξάγεται σχετικά με το αν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μετασχηματιστή απομόνωσης, σε αντιστροφείς που συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο. Κανονισμοί μερικών χωρών καθιστούν υποχρεωτική την ύπαρξη αυτού στους αντιστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο τους. Είναι πολύ πιθανό όταν δεν υπάρχει μετασχηματιστής απομόνωσης, είτε σε κανονική λειτουργία, είτε πολύ περισσότερο σε περιπτώσεις σφάλματος, ο αντιστροφέας να εισάγει μια DC συνιστώσα ρεύματος στην ημιτονική κυματομορφή εξόδου του, κάτι εντελώς ανεπιθύμητο για το ηλεκτρικό δίκτυο και τις συσκευές που βρίσκονται κοντά, προκαλώντας υπερθέρμανση στα τυλίγματα κινητήρων και μετασχηματιστών ή παρεμβολές σε άλλες συσκευές. Η παρεμβολή αυτού του μετασχηματιστή λειτουργεί ως ένα αδιαπέραστο φίλτρο τυχόν DC ρευμάτων. Η ύπαρξη μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας, επιτρέπει απόδοση του αντιστροφέα μέχρι 92%.

Μια διαφορετική τοπολογία που επιτρέπει την γαλβανική απομόνωση της DC από την AC πλευρά, είναι η τοποθέτηση μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας πριν τη γέφυρα παραγωγής της ημιτονοειδούς τάσης. Κατά τη διάταξη αυτή, η εισερχόμενη DC τάση εισέρχεται σε μια διάταξη DC/DC μετατροπέα η οποία και λειτουργεί με υψηλή διακοπτική συχνότητα. Η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται με γέφυρα διακοπών σε τάση υψηλής συχνότητας και έπειτα ανορθώνεται ώστε να μετατραπεί σε DC τάση ελεγχόμενου πλάτους. Στο ενδιάμεσο στάδιο του μετατροπέα αυτού, είναι δυνατόν να παρεμβληθεί ο υψίσυχνος μετασχηματιστής. Έτσι πάλι επιτυγχάνεται απομόνωση της εισόδου από την έξοδο του αντιστροφέα, η οποία ωστόσο πάλι είναι πιθανό να μην αποκλείει την ενδεχόμενη έγχυση DC ρεύματος, από το μετέπειτα στάδιο της PWM γέφυρας DC/AC, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο με την τοπολογία αυτή επιτυγχάνονται αποδόσεις λίγο μεγαλύτερες (της τάξης του 94%), καθώς ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας, λόγω της ισχυρής μαγνητικής του σύζευξης, έχει μικρότερες απώλειες απ' ό,τι ένας που λειτουργεί στα 50Hz. Παράλληλα μειώνονται ο όγκος, το βάρος και το κόστος του μετασχηματιστή εν συγκρίσει με αυτά ενός χαμηλής συχνότητας.

4.6 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Οι συσσωρευτές παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου αποτελούν και ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της οικονομικής επιβάρυνσης. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα δεν υπάρχει λόγος χρησιμοποίησης συσσωρευτών, εκτός και αν το διασυνδεδεμένο σύστημα τροφοδοτεί άμεσα κάποια φορτία (τα φορτία δηλαδή αυτά τροφοδοτούνται κατευθείαν από το φ/β σύστημα και όχι μέσω του κεντρικού δικτύου) και τα οποία θεωρούνται ότι δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να μείνουν εκτός λειτουργίας σε μια ενδεχόμενη βλάβη.

Τα αυτόνομα φ/β συστήματα επομένως χρειάζεται να αποθηκεύουν μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής τους παραγωγής, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της φ/β γεννήτριας. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις και κυρίως από το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχόμενων ημερών συννεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και τον βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών.

Φόρτιση – Εκφόρτιση

Υπάρχουν διάφορων τύπων ηλεκτρικοί συσσωρευτές, ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους. Έχει όμως διαπιστωθεί ότι οικονομικότεροι για χρησιμοποίηση σε φ/β συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου. Τα ηλεκτρόδιά τους είναι πλάκες από κράματα μολύβδου βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, που περιγράφεται από την αμφίδρομη αντίδραση.



Συγκεκριμένα οι συσσωρευτές αποτελούνται από κυψελίδες, δηλαδή ζεύγη μονωμένων μεταξύ τους πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος. Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μόλυβδο (PbSO_4). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός

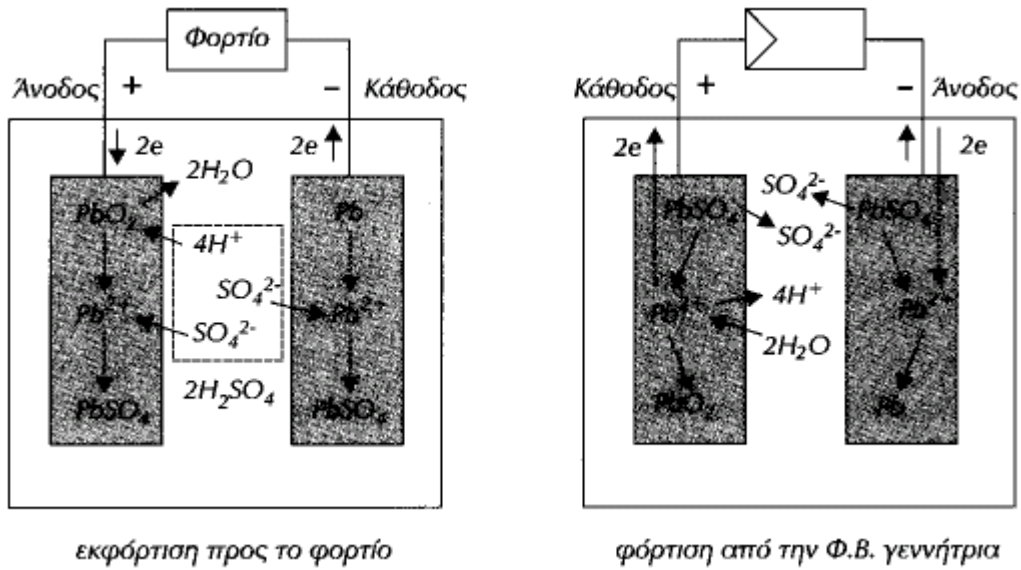
μόλυβδος και σχηματίζεται οξειδίο του μολύβδου (PbO_2) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός (Pb) στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο μόλυβδος οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb^{2+} και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα:



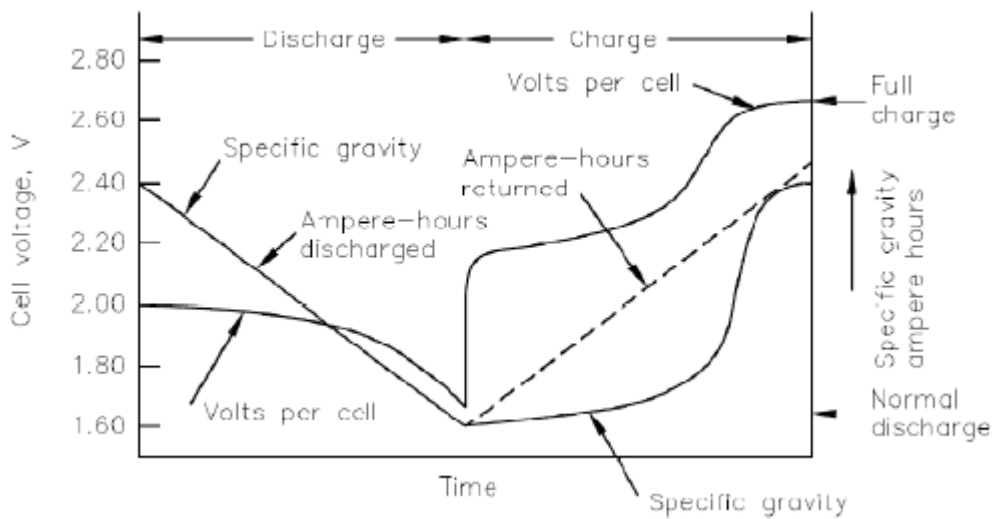
Ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων ο Pb^{4+} ανάγεται προς Pb^{2+} , παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα:



Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα Pb^{2+} , ενώνονται με θειικά ιόντα (SO_4^{2-}) από το διάλυμα και ξανασχηματίζουν τον θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Έτσι καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με την φόρτιση όμως που ακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα, όπως δείχνει η αμφίδρομη αντίδραση και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.



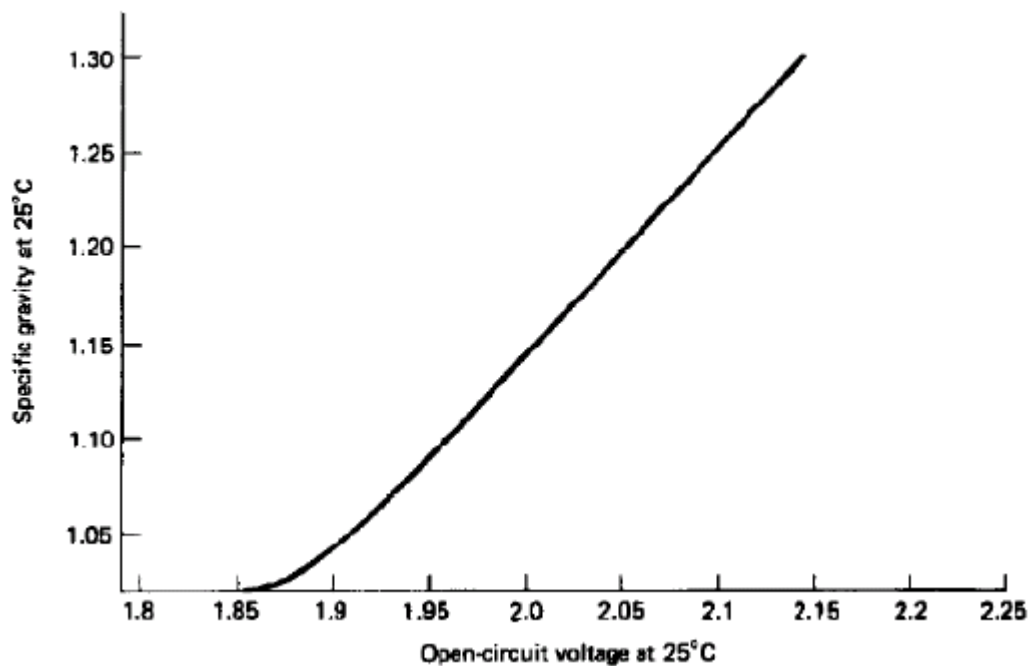
Σχήμα 4.21 Λειτουργία συσσωρευτή μολύβδου-οξέος.



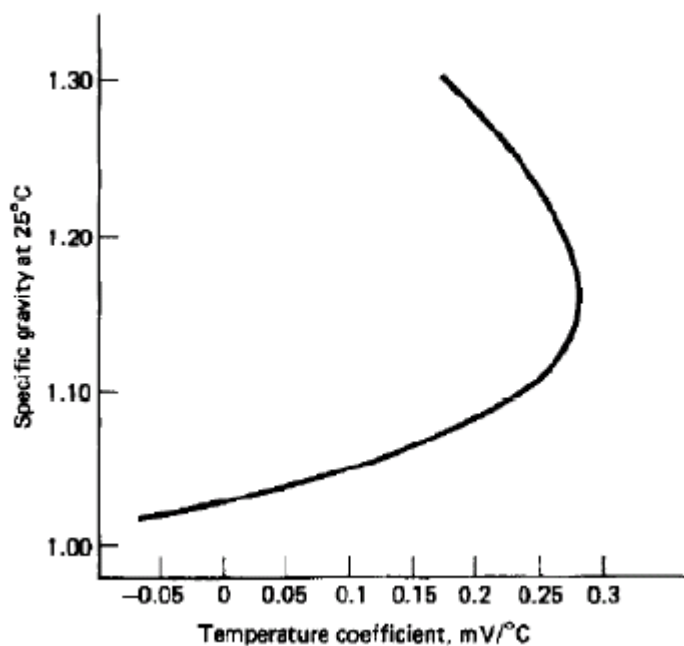
Σχήμα 4.22 Τυπικές χαρακτηριστικές τάσης και ειδικού βάρους στη συνεχόμενη φόρτιση και εκφόρτιση.

Χαρακτηριστικές ανοιχτού κυκλώματος

Από τις παραπάνω αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στον συσσωρευτή, η μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια κυψέλη μολύβδου είναι 2,041V.



Σχήμα 4.23 Ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη ενός συσσωρευτή μολύβδου σε συνάρτηση με τη τάση ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 4.24 Ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη ενός συσσωρευτή μολύβδου σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, σε σχέση με το θερμοκρασιακό συντελεστή.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την λειτουργία μιας μπαταρίας είναι το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη. Χρησιμοποιείται ως ένας δείκτης της κατάστασης φόρτισης, στην οποία βρίσκεται μια κυψελίδα ή μια μπαταρία. Η τάση ανοιχτοκυκλώματος για ένα συσσωρευτή είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση:

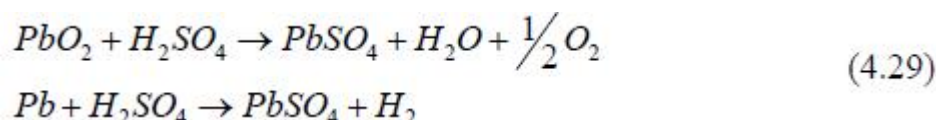
$$V_{oc} = 2,047 + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}}\right) \quad (4.28)$$

Όπου R η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή, T η θερμοκρασία και F η σταθερά του Faraday (96,487 Coulomb). Στο σχήμα 4.23 φαίνεται το διάγραμμα της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία 25°C, το οποίο εμφανίζει μια γραμμική συμπεριφορά για τιμές του ειδικού βάρους μεγαλύτερες από 1,10, ενώ για μικρότερες τιμές εμφανίζει έντονη απόκλιση από τη γραμμικότητα. Ενώ η επίδραση της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη παρουσιάζεται στο σχήμα 4.24.

Αυτό-εκφόρτιση

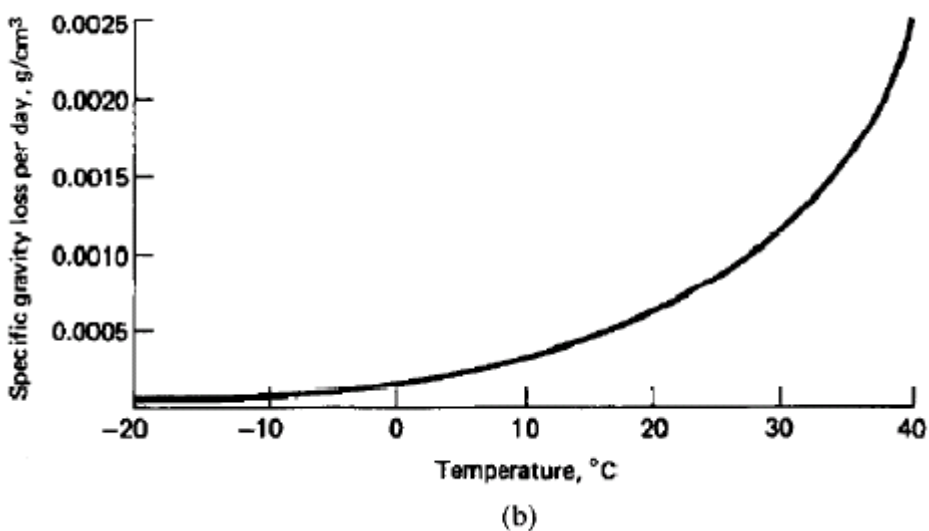
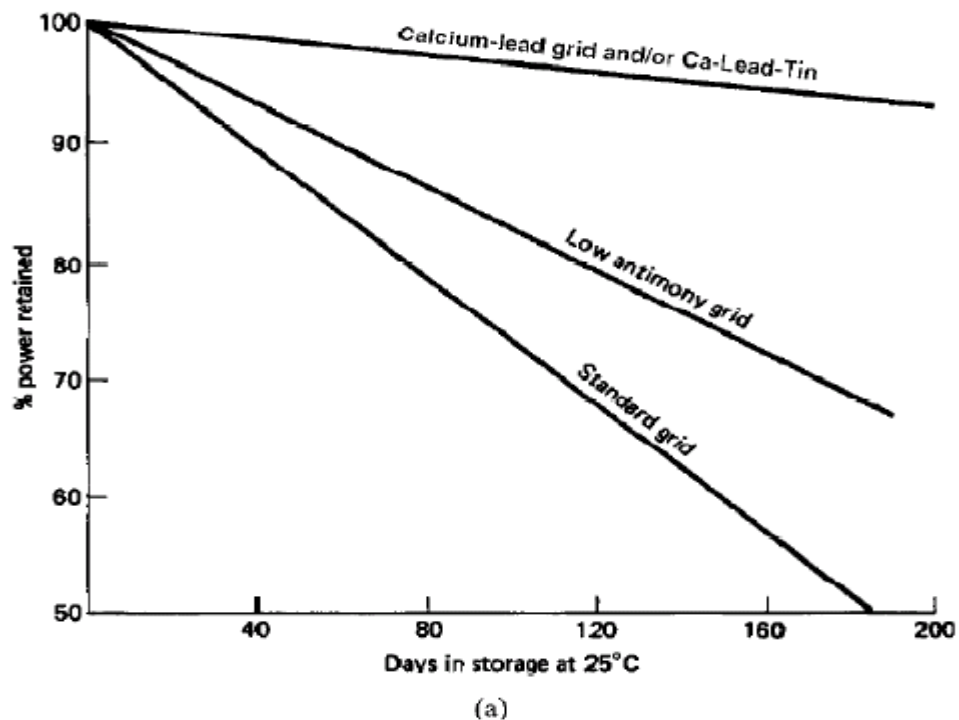
Ακόμα και αν ένας φορτισμένος συσσωρευτής παραμείνει μη συνδεδεμένος με κάποιο εξωτερικό φορτίο για ένα χρονικό διάστημα, εμφανίζει μείωση της στάθμης φόρτισής του. Ο ρυθμός αυτός της αυτό εκφόρτισης σε μια κυψελίδα μολύβδου είναι αρκετά μεγάλος, αλλά μπορεί να μειωθεί αρκετά με κατάλληλες σχεδιαστικές παρεμβάσεις.

Ο μολύβδος και το διοξείδιο του μολύβδου είναι θερμοδυναμικά ασταθή και αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη. Στο θετικό ηλεκτρόδιο παράγεται οξυγόνο και στο αρνητικό υδρογόνο, με ρυθμό που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση, σύμφωνα με τα παρακάτω:



Η πρώτη αντίδραση συμβαίνει στο θετικό ηλεκτρόδιο και ο μηχανισμός αυτό-εκφόρτισης είναι εν γένει μικρός (μικρότερος από 0,5% την ημέρα στους 25°C). Αντίθετα η δεύτερη αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο έχει ταχύτερο ρυθμό, ειδικά σε κυψελίδες με καταλυτικά μεταλλικά ιόντα. Για έναν καινούργιο συσσωρευτή με μείγμα μολύβδου-αντιμονίου οι απώλειες φόρτισης ανέρχονται περίπου στο 1% την ημέρα, αλλά οι απώλειες αυτές αυξάνονται κατά ένα παράγοντα που κυμαίνεται μεταξύ του 2 και του 5 καθώς ο συσσωρευτής παλιώνει. Συσσωρευτές χωρίς αντιμόνιο εμφανίζουν μικρότερες απώλειες 0,5% την ημέρα, χωρίς να αυξάνεται ο ρυθμός αυτός με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα 4.25α). Επειδή όμως το αντιμόνιο εμφανίζει και θετικά αποτελέσματα, η πλήρης απουσία του δεν είναι επιθυμητή και για αυτό ένας χρήσιμος συμβιβασμός προκύπτει αν χρησιμοποιηθούν μείγματα με χαμηλή περιεκτικότητα αντιμονίου.

Ο ρυθμός αυτό-εκφόρτισης εξαρτάται ακόμα από την θερμοκρασία όπως φαίνεται στο σχήμα 4.25β. Παρατηρείται απότομη αύξηση των απωλειών για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°C και για αυτό συνίσταται η διατήρηση των συσσωρευτών σε μέρη με θερμοκρασία μικρότερη από αυτή, όχι όμως μικρότερη των 5°C, καθώς μετά δημιουργούνται προβλήματα κατά την κανονική λειτουργία τους.

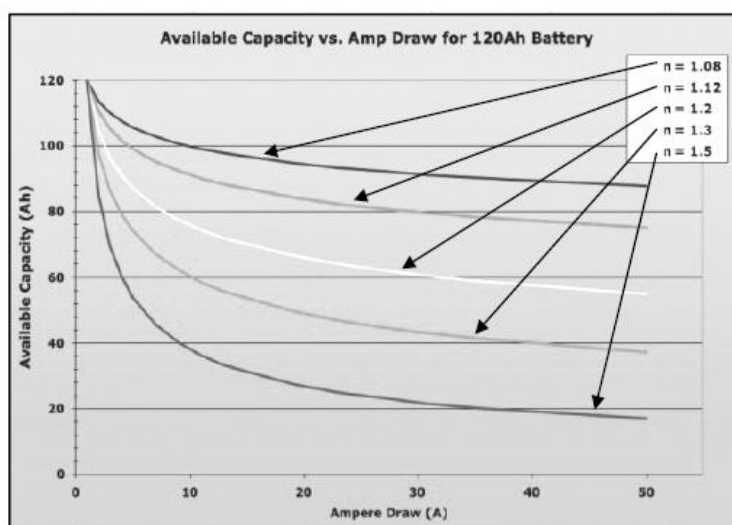


Σχήμα 4.25 Φαινόμενο αυτό-εκφόρτισης (α) Εναπομένουσα ενέργεια σε συνάρτηση με τον χρόνο σε θερμοκρασία 25°C και για 3 διαφορετικά μείγματα συσσωρευτών μολύβδου, (β) Απώλειες ειδικού βάρους ανά μέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Χωρητικότητα συσσωρευτών

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μετράται συνήθως σε αμπερώρια (Ah), που είναι σε ιδανικές συνθήκες το γινόμενο της μέσης έντασης του

ρεύματος, που δίνει ο συσσωρευτής, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλείθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση. Αντίθετα η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής εξαρτάται από την τάση του. Οι κατασκευαστές αναφέρουν συνήθως τη χωρητικότητα σε αμπερωρια (Ah) για έναν συγκεκριμένο αριθμό εκφόρτισης. Για παράδειγμα, αν η χωρητικότητα μιας μπαταρίας είναι 200 Ah για χρόνο εκφόρτισης 10 ωρών, αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία για αυτό το χρονικό διάστημα θα δίνει 20 A ρεύματος σε ιδανικές συνθήκες 25°C.



Σχήμα 4.26 Φαινόμενο Peukert. Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της σταθεράς n.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η χωρητικότητα μιας μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτισής της. Εξήγηση για αυτή τη σχέση χωρητικότητας - ρυθμού εκφόρτισης δίνει το φαινόμενο Peukert. Σύμφωνα με το φαινόμενο Peukert, ο χρόνος για την εκφόρτιση ενός συσσωρευτή μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα με το οποίο γίνεται αυτή η εκφόρτιση. Μια εμπειρική σχέση για το φαινόμενο Peukert είναι η εξής:

$$I^{n*} t = K \quad (4.30)$$

όπου I το ρεύμα εκφόρτισης σε Ampere, t ο χρόνος εκφόρτισης σε sec, και K,n σταθερές που εξαρτώνται από το είδος του συσσωρευτή. Επειδή η σταθερά K κάθε συσσωρευτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη

συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, εισάγοντας διόρθωση θερμοκρασίας θα έχουμε:

$$K = K_0(1 + \alpha * T) \quad (4.31)$$

όπου K_0 , α σταθερές και T η θερμοκρασία.

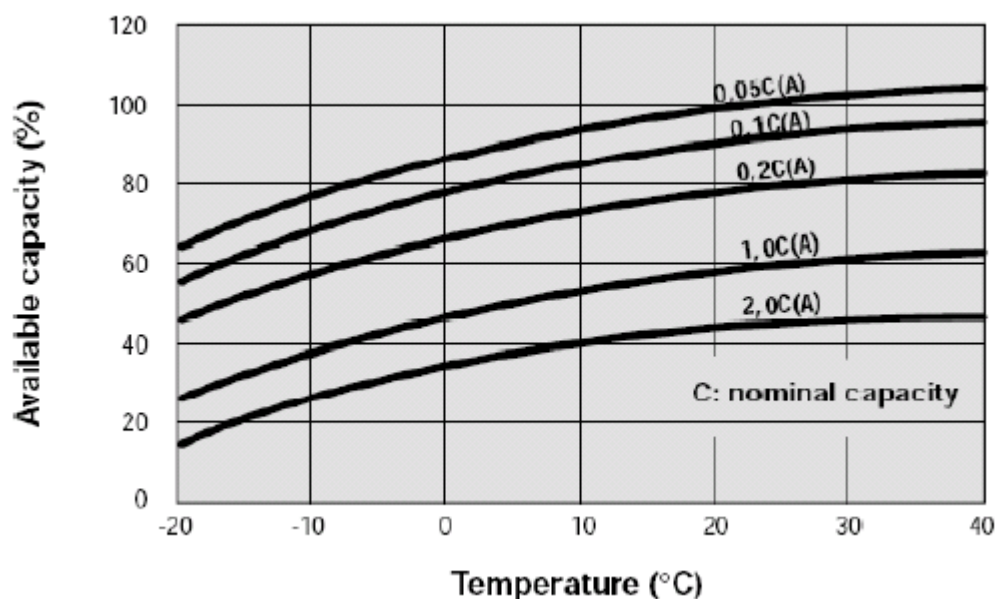
Στην εξίσωση Peukert μπορεί επιπρόσθετα να εισαχθεί και ένας παράγοντας ώστε να ληφθεί υπ' όψιν και το πάχος των ηλεκτροδίων, οπότε γίνεται:

$$\ln\left(\frac{t}{d^{2-n}}\right) = K_0 (1 + \alpha * T) \quad (4.32)$$

όπου d το πάχος των πλακών του συσσωρευτή. Από τη σχέση αυτή είναι φανερή η αλληλεπίδραση μεταξύ ρεύματος εκφόρτισης, χρόνου εκφόρτισης και θερμοκρασίας. Γι' αυτό το λόγο η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή αναφέρεται πάντα συναρτήσει των ωρών που διαρκεί αυτή ή του ρεύματος εκφόρτισης, μετρημένες σε μια θερμοκρασία αναφοράς, συνήθως τους 25 °C.

Η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητά του σε Ah επί την ονομαστική τάση αυτού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ονομαστική αυτή χωρητικότητα δεν είναι ποτέ και η πραγματική. Λόγω της εσωτερικής αντίστασης των συσσωρευτών, συνήθως ένα 80% αυτής της ενέργειας μπορεί να εξαχθεί από ένα συσσωρευτή. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος.

Ακόμα από την εξίσωση Peukert φαίνεται ότι χωρητικότητα αυξάνει με την θερμοκρασία του συσσωρευτή. Συγχρόνως όμως επιταχύνονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και μειώνεται η διάρκεια ζωής του (Σχήμα 4.27).

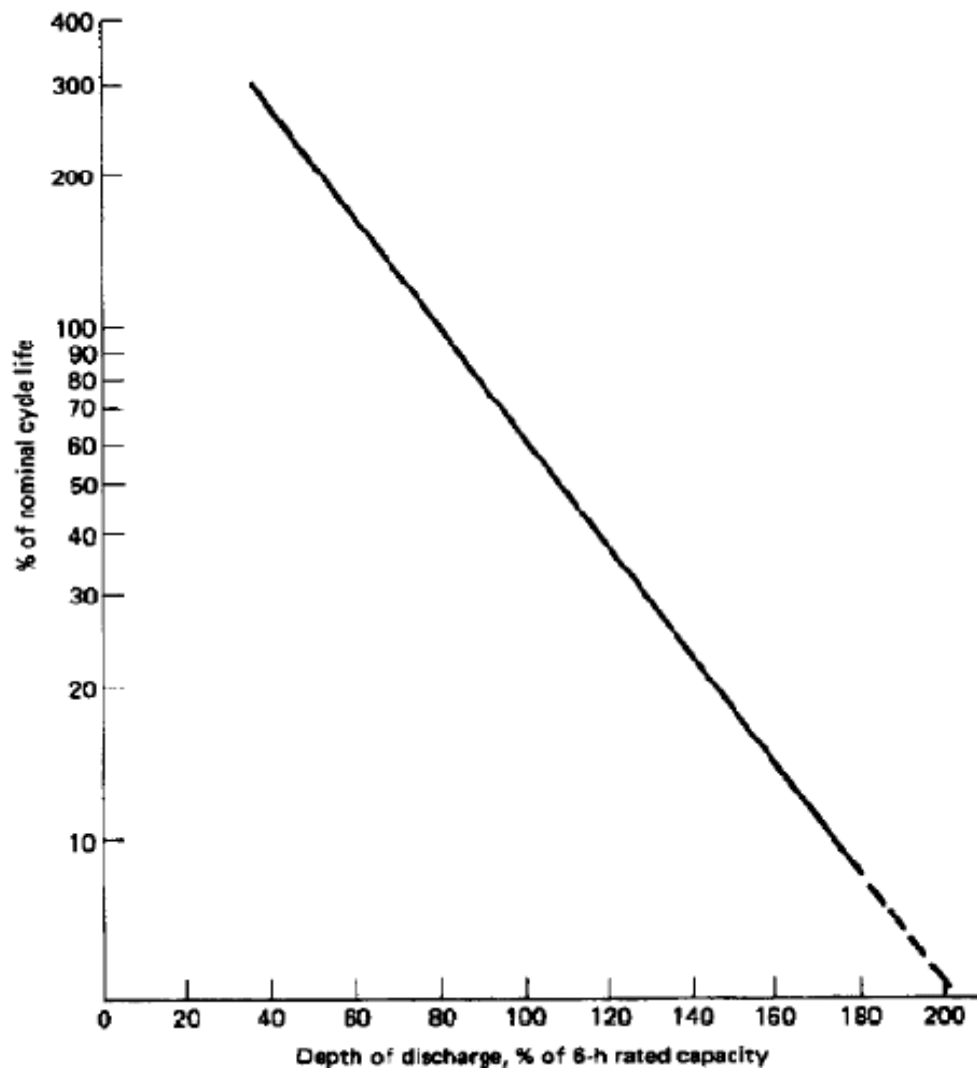


Σχήμα 4.27 Διαθέσιμη χωρητικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορες τιμές ρεύματος.

Διάρκεια ζωής

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή είναι:

- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.
- Το βάθος εκφόρτισης (Σχήμα 4.28). Η εκφόρτιση των συσσωρευτών πέρα από την επιτρεπόμενη από τον κατασκευαστή τιμή του, μειώνει δραστικά τόσο τη διάρκεια ζωής όσο και τη χωρητικότητα. Αν το βάθος εκφόρτισης υπερβεί το 80% τότε ο συσσωρευτής αποκλίνει από την ονομαστική διάρκεια ζωής του.
- Το ποσοστό υπερφόρτισης. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχει η φόρτιση του συσσωρευτή πάνω από τα επιτρεπτά όρια.
- Η τάση και το ρεύμα φόρτισης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης ένα αρχικό ρεύμα μεγάλης τιμής μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες. Το ίδιο συμβαίνει και με μια πιθανή υπέρταση.



Σχήμα 4.28 Διάρκεια ζωής ως ποσοστό της ονομαστικής, σε συνάρτηση με το βάθος εκφόρτισης.

Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτή

$$C = \frac{(n+b) \cdot m \cdot Ek}{\sigma\gamma\beta \cdot \sigma\epsilon\kappa \cdot B\epsilon\kappa \cdot V\beta} \text{ [Ah]}$$

Όπου: n: αριθμός μη ηλιοφανών ημερών

b: ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας $b = E_{KE} / E_K$

E_{KE} [Wh/ημ.]: ηλεκτρική ενέργεια που καλύπτεται από τον συσσωρευτή

E_K [Wh/ημ.]: ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης

m: συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων για να καλύψουμε μια πιθανή υποτίμηση των αναγκών της κατανάλωσης, $m=1,2$

σ_{VB} : συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή $\sigma_{VB} = 0,8$

σ_{EK} : συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης
χωρίς μετατροπέα τάσεως DC-AC (inverter) $\sigma_{EK} = 0,97$
με μετατροπέα τάσεως DC-AC (inverter) $\sigma_{EK} = 0,91$

β_{EK} : βάθος εκφόρτισης συσσωρευτή

$\beta_{EK} = 0,4$ για 1-3 μέρες αυτονομίας

= 0,6 για 4-6 μέρες αυτονομίας

=0,8 για 7-10 μέρες αυτονομίας

=0,2-0,3 για θερμοκρασία περιβάλλοντος $t_a < 0^\circ$

V_B : Ονομαστική τάση συσσωρευτή (παρακάτω πίνακας)

ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ $P_{p\beta}$ [kW _p]	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ V_B [V]
0 - 0,5	12
0,5 - 3	24
3 - 10	48
> 10	> 48

Κεφάλαιο 5° - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τρόποι στήριξης των συλλεκτών

Διακρίνουμε τρεις διαφορετικούς τρόπους στήριξης συλλεκτών:

- Σταθερής στήριξης,
- Εποχιακά ρυθμιζόμενης στήριξης
- Συνεχούς παρακολούθησης της θέσης του ηλίου, με διάταξη που ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Tracker).

Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης

Με την απουσία κινητών μερών στη στήριξη της συστοιχίας με σταθερή κλίση, προσδίδουμε στη διάταξη περισσότερη μηχανική αντοχή, χαρακτηριστικό που συμβάλλει στην αναξιόπιστη συμπεριφορά της, ιδιαίτερα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Χρησιμοποιούνται επίσης στατικές συλλεκτικές επιφάνειες, ενσωματωμένες σε κτίρια.



συλλέκτης με σταθερή γωνία κλίσης

Την πιο απλή περίπτωση την έχουμε όταν ο χώρος εγκατάστασης της συστοιχίας των συλλεκτών δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όλο το έτος.

Κατά κανόνα επιλέγουμε νότιο αζιμουθιακό προσανατολισμό για τη συστοιχία και κλίση κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης.

Όταν η κλίση ισούται ακριβώς με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, οι ακτίνες του ηλίου πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη δύο φορές το χρόνο. Σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της βέλτιστης γωνίας συλλέκτη με σταθερή κλίση, παίζουν οι επικρατούσες στην περιοχή μετεωρολογικές συνθήκες και η ανακλαστικότητα του εδάφους. Έτσι για να βρούμε τη βέλτιστη γωνία του συλλέκτη, χρειάζεται να συλλέξουμε στοιχεία σχετικά με τους παράγοντες αυτούς και ιδιαίτερα μετρήσεις της ολικής ακτινοβολίας, τουλάχιστον σε οριζόντια προσανατολισμένο αισθητήρα, για μια σειρά ετών για αυτή την περιοχή. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί στην πλησιέστερη προς αυτή περιοχή, εμπλουτισμένες με πρόσφατες μετρήσεις στην περιοχή αυτή.

Με βάση τώρα τις μετρήσεις αυτές αλλά και με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων, προσδιορίζουμε την ολική ακτινοβολία σε κάθε γωνία κλίσης ενός συλλέκτη, απ' όπου προκύπτει η βέλτιστη γωνία κλίσης του συλλέκτη για συγκεκριμένη περιοχή.

Τέλος, αν τώρα υπάρχουν φυσικά εμπόδια που σκιάζουν το συλλέκτη ορισμένη περίοδο της ημέρας, για παράδειγμα από το μεσημέρι και μετά, τότε προσανατολίζουμε το συλλέκτη αζιμουθιακά, μετά από σχετική μελέτη του κλίματος και των στοιχείων ηλιοφάνειας της περιοχής, σε ορισμένη νοτιοανατολική κατεύθυνση. Αν τώρα η σκίαση γίνεται το πρωί και από το μεσημέρι και μετά δεν υπάρχει πρόβλημα σκίασης, τότε η συστοιχία προσανατολίζεται νοτιοδυτικά.

Στήριξη με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης κλίσης του συλλέκτη

Υπάρχει μια διάταξη συλλεκτών με νότιο προσανατολισμό, η οποία εκ κατασκευής έχει τη δυνατότητα εποχιακής ρύθμισης της κλίσης της. Προσδιορίζονται οι κατάλληλες κλίσεις και ο χρόνος αλλαγών. Οι θέσεις του συλλέκτη είναι δύο :

- μια για το θερινό εξάμηνο,
- και μια για το χειμερινό.

Όπως και στην περίπτωση συλλέκτη σταθερής κλίσης όλο το έτος, έτσι και στην περίπτωση επιλογής χειμερινής και θερινής θέσης, η επιλογή της βέλτιστης γωνίας για το συλλέκτη σε κάθε περίοδο απαιτεί γνώση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών και της μορφολογίας και κάλυψης του εδάφους, που καθορίζει την ανακλαστικότητά του.

Στήριξη σε κινητές βάσεις

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες τοποθετούνται σε κινητές βάσεις. Στόχος της κατασκευής είναι η βελτιστοποίηση του αποτελέσματος όπως προκύπτει από την συνεχή παρακολούθηση του ηλίου με περιστροφή κατά το επίπεδο που ορίζεται από τους άξονες X και Ψ (οριζόντια), στον άξονα Z η κλίση της κατασκευής είναι 30° . Η περιστροφή γίνεται πάνω σε σιδηροτροχιά η οποία εδράζεται σε κυκλικό θεμέλιο από σπλισμένο σκυρόδεμα πλάτους 0,40 m και βάθους 0,80 m.



Στην κατασκευή αυτή τοποθετείται σκελετός από γαλβανισμένο εν θερμό χάλυβα. Η κίνηση του μηχανισμού γίνεται με την βοήθεια ενός κινητήρα ισχύος 0,37 kW. Ο μηχανισμός παρακολουθεί την κίνηση του ηλίου με βάση τα στοιχεία που είναι καταχωρημένα στο λογισμικό που συνοδεύει την συσκευή, ή δεν γίνεται χρήση αισθητήρων έντασης φωτός αλλά χρήση αστρονομικών δεδομένων.

Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κτήρια

Οι κατασκευές στήριξης πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια, όπως αντοχή στα φορτία που προέρχονται απ' το βάρος των πλαισίων και τους τοπικούς ανέμους, να μην προκαλούν σκiasμό στα πλαίσια, να επιτρέπουν την προσέγγιση στα πλαίσια, αλλά ταυτόχρονα να διασφαλίζουν την ασφάλειά τους. Η ενσωμάτωση των Φ/Β πλαισίων στην οροφή ή στην πρόσοψη ενός κτιρίου γίνεται με πολλούς τρόπους. Στις καινοτόμες λύσεις που έχουν υιοθετηθεί κατά καιρούς περιλαμβάνεται και η χρήση Φ/Β στοιχείων στη θέση άλλων δομικών στοιχείων στο κέλυφος του κτιρίου ή στα σκίαστρα.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι για την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων σε ένα κτήριο:

- **τοποθέτηση σε κεκλιμένα στηρίγματα**

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από ξύλινα ή μεταλλικά είδη στηριγμάτων και οι περισσότεροι κατασκευαστές Φ/Β συστημάτων προσφέρουν στηρίγματα που ταιριάζουν ακριβώς στα Φ/Β πλαίσια.



Φωτοβολταϊκά πλαίσια σε κτίριο σε κεκλιμένο επίπεδο

Σε μερικές περιπτώσεις, η κλίση είναι ρυθμιζόμενη. Η τοποθέτηση αυτή προσφέρει εύκολη πρόσβαση τόσο στο εμπρός όσο και στο πίσω μέρος των Φ/Β πλαισίων, όταν χρειάζεται να γίνει συντήρηση, βοηθά επίσης, στον καλό αερισμό και στο δροσισμό των στοιχείων, αυξάνοντας έτσι την απόδοσή τους. Εντούτοις, το κόστος είναι σχετικά υψηλό, γιατί απαιτείται η χρήση πρόσθετων υλικών και επιπλέον εργασία.

- **Τοποθέτηση σε ειδική βάση προσαρμοζόμενη στο εξωτερικό του κελύφους**

Η κατασκευή αυτή στηρίζεται στο εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου. Χρειάζεται, όμως, προσοχή για την καλή μόνωση των σημείων στα οποία στηρίζεται η βάση.



Φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ειδική βάση προσαρμοσμένη στο εξωτερικό του κελύφους.

Η τοποθέτηση αυτή επιτρέπει επίσης τον καλό αερισμό και την ψύξη των Φ/Β στοιχείων. Το κόστος είναι συνήθως μικρότερο σε σύγκριση με το κόστος που απαιτεί η τοποθέτηση σε κεκλιμένα στηρίγματα, αλλά μεγαλύτερο από το κόστος των μεθόδων που περιγράφονται στη συνέχεια. Αποτελεί μια καλή λύση, ειδικά σε ανακαινιζόμενα κτίρια, στα οποία δεν είναι δυνατόν να γίνουν μεγάλες αλλαγές στο εξωτερικό του κελύφους.

- **Απευθείας τοποθέτηση**

Στην περίπτωση αυτή, η εξωτερική επίστρωση του κτιρίου αντικαθίσταται από Φ/Β πλαίσια. Παραδείγματος χάριν, τα Φ/Β στοιχεία τοποθετούνται με τρόπο που το ένα να επικαλύπτει εν μέρει το άλλο, όπως ακριβώς τα κεραμίδια.



Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με απευθείας τοποθέτηση

Το φωτοβολταϊκό κάλυμμα προστατεύει το κτήριο, αλλά δεν είναι πλήρως στεγανό και απαιτούνται μέτρα για τη στεγανοποίησή του. Το κόστος όμως αυτής της μεθόδου είναι σχετικά χαμηλό, γιατί απαιτεί ελάχιστα πρόσθετα υλικά. Επίσης, η υποκατάσταση ορισμένων δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την εξωτερική κάλυψη του κελύφους του από τα Φ/Β πλαίσια μειώνει το συνολικό κόστος.

- **Ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο κέλυφος του κτηρίου**

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην υποκατάσταση ολόκληρων τμημάτων του κτιριακού κελύφους από Φ/Β πλαίσια. Η καλή εφαρμογή αυτής της τεχνικής απαιτεί τη στεγανή σύνδεση των Φ/Β πλαισίων μεταξύ τους. Παραδείγματος χάριν, Φ/Β στοιχεία χωρίς μεταλλικό σκελετό τοποθετούνται σε στηρίγματα παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη συμβατικών διαφανών οροφών ή προσόψεων.

Τα νέα τύπου ημιδιαφανή στοιχεία είναι δυνατόν να τοποθετηθούν στη θέση υαλοπινάκων ή αδιαφανών στοιχείων, παρέχοντας στο σχεδιαστή τη δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών φωτισμού και ηλιοπροστασίας παράλληλα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση των Φ/Β παρέχει δυνατότητες για σημαντική μείωση του κόστους, καθώς εξοικονομείται το κόστος των δομικών στοιχείων του κελύφους τα οποία αντικαθίστανται από τα Φ/Β στοιχεία.

5.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

5.2.1. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία.

Η ιδανική κλίση

Σε όσες περιπτώσεις η τοποθέτηση των ΦΒ πλαίσίων σε ένα κτήριο δεν καθορίζεται από την κλίση της επιφάνειας πάνω στην οποία τοποθετούνται (οροφή, τοίχοι κ.λπ.), η βέλτιστη γωνία κλίσης στο βόρειο ημισφαίριο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος ϕ του τόπου και την επιθυμητή περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Το γεωγραφικό πλάτος διαφόρων Ελληνικών πόλεων δίδεται στον Πίνακα 5.1.

ΠΟΛΗ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ ϕ [$^{\circ}$]
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεσιτιάδα	41 $^{\circ}$ 30'
Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41 $^{\circ}$
Καστοριά, Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40 $^{\circ}$ 30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	40 $^{\circ}$
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39 $^{\circ}$ 30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39 $^{\circ}$
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Άμφισσα, Λειβαδιά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38 $^{\circ}$ 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38 $^{\circ}$
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πάρος, Σύρος, Πάτμος	37 $^{\circ}$ 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37 $^{\circ}$
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36 $^{\circ}$ 30'
Κύθηρα, Καστελλόριζο	36 $^{\circ}$
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσοι, Κάρπαθος	35 $^{\circ}$ 30'
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης	35 $^{\circ}$

Πίνακας 5.1 Γεωγραφικό Πλάτος Διαφόρων Ελληνικών Πόλεων

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους.

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφική παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι 0 $^{\circ}$ (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή.

Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10 $^{\circ}$ ως 15 $^{\circ}$ μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10 $^{\circ}$ ως 15 $^{\circ}$ μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου.

- Ø Βέλτιστη γωνία κλίσης ΦΒ πλαισίων στο βόρειο ημισφαίριο

- $\beta = \varphi$ για όλη την διάρκεια του χρόνου.
- $\beta = \varphi + 15^\circ$ για καλύτερη απόδοση τον χειμώνα.
- $\beta = \varphi - 15^\circ$ σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό λόγω των σταγονιδίων νερού στην ατμόσφαιρα (το ΦΒ πλαίσιο αντικρύζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται μεγαλύτερη διάχυτη ακτινοβολία).
- $5^\circ - 10^\circ$ σε περιοχές με γεωγραφικό πλάτος $\varphi \leq 20^\circ$, δηλαδή γύρω από Ισημερινό.
- $\beta = 0^\circ$ σε περιοχές με πολύ μικρή ηλιοφάνεια για να εκμεταλλευτούμε το μέγιστο της διάχυτης ακτινοβολίας.

Αν η θέση του κτιρίου δεν επιτρέπει τον προσανατολισμό των ΦΒ πλαισίων προς τον Νότο (για το βόρειο ημισφαίριο), τα πλαίσια τοποθετούνται προς την Ανατολή ή τη Δύση αλλά ποτέ προς το Βορά, γιατί τότε έχουν πολύ χαμηλή απόδοση. Ο προσανατολισμός προς το Βορά επιτρέπεται μόνο για οριζόντια πλαίσια (γωνία κλίσης $\beta = 0^\circ$).

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ β		
	0°	30°	90°
Ανατολικός - Δυτικός	90	90	50
Νοτιοανατολικός - Νοτιοδυτικός	90	95	60
Νότιος	90	100	80
Βορειοανατολικός - Βορειοδυτικός	90	70	40
Βόρειος	90	60	30

5.2 Απόδοση ΦΒ Πλαισίων [%] σε Διάφορες Γωνίες Κλίσης Και Προσανατολισμούς

5.2.2.ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Κατά την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων μίας συστοιχίας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί δεν πρέπει η μία σειρά πλαισίων να σκιάζει αισθητά την επόμενη. Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης ϵ μεταξύ δύο γειτονικών σειρών (σχημα 5) γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης.

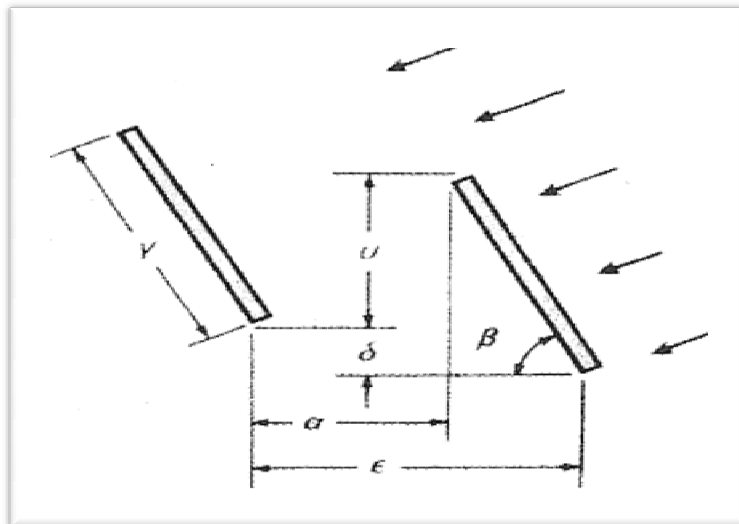
$$u = \gamma \cdot \eta \cdot \beta - \delta \quad [\text{m}]$$

όπου :

γ [m]: μήκος ΦΒ πλαισίων

β [°]: γωνία κλίσης ΦΒ πλαισίων

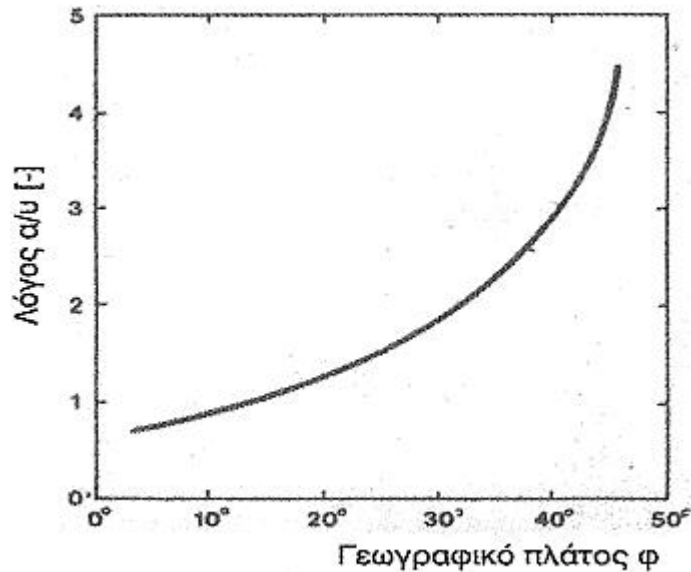
δ [m]: υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα δύο σειρών ΦΒ πλαισίων ($\delta=0$ για στήριξη στο ίδιο επίπεδο)



5.3 διάταξη ΦΒ πλαισίων σε παράλληλες σειρές

1. Υπολογισμός της ελεύθερης απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων.

Η ελεύθερη απόσταση α προκύπτει από τον λόγο α/u , τον οποίο υπολογίζουμε από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.4: καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης α μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων προς την επικάλυψη του υψους u , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ του τόπου.

3. Υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων,

$$\varepsilon = \alpha + \gamma * \text{συν}\beta \text{ [m]}$$

όπου:

α [m], γ [m], β [°] όπως προηγούμενα

5.2.3. ΕΜΒΑΔΟΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

Το εμβαδόν της οριζόντιας έκτασης $S_E = S_o * \frac{\varepsilon}{\gamma * \sigma_{\text{συνβ}}}$ [m²]

Όπου:

S_o [m²]: εμβαδόν οριζόντιας προβολής όλων των ΦΒ πλαισίων

$S_o = S_{\pi} * N * \sigma_{\text{συνβ}}$

S_{π} [m²]: εμβαδόν ΦΒ πλαισίου

N [-]: αριθμός ΦΒ πλαισίων

ε [m]: ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων

γ [m]: μήκος ΦΒ πλαισίου

β [°]: γωνία κλίσης πλαισίων

5.3 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Ο βαθμός απόδοσης η_s της ΦΒ συστοιχίας προκύπτει από το γινόμενο του βαθμού απόδοσης η_{π} ενός ΦΒ πλαισίου με δύο συντελεστές.

- Συντελεστής ανομοιογένειας $\sigma_{\alpha} = 0,98$

Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών I-V των ΦΒ πλαισίων, που απαρτίζουν τη ΦΒ συστοιχία. Αυτές οι διαφορές μπορεί να δημιουργηθούν από εξωτερικούς παράγοντες ή από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες, ή μπορεί να υπάρχουν εκ κατασκευής.

- Συντελεστής καλωδιώσεων $\sigma_{\kappa} = 0,98$

Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης των ΦΒ πλαισίων της συστοιχίας.

Βαθμός απόδοσης ΦΒ συστοιχίας:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\Pi} * \sigma_{\alpha} * \sigma_{\kappa} [-]$$

Για το βαθμό απόδοσης του ΦΒ πλαισίου χρησιμοποιείται η σχέση

$$\eta_{\Pi} = \eta_{\text{STC}} * \sigma_{\gamma} * \sigma_{\rho} * \sigma_{\theta} * \sigma_{\delta} [-]$$

σύμφωνα με προηγούμενο κεφάλαιο.

5.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Η επιφάνεια S_{Σ} της ΦΒ συστοιχίας υπολογίζεται από τη σχέση

$$S_{\Sigma} = E_{m\Sigma} / (E_{\text{HA}} * \eta_{\Sigma} * \sigma_{\mu}) \quad [\text{m}^2]$$

Όπου:

$E_{m\Sigma}$ [kWh/ημ.]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη ΦΒ συστοιχία για την κάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας κατανάλωσης E_{κ} . $E_{m\Sigma} = E_{\kappa}$ (όπου E_{κ} προκύπτει από το γινόμενο της ηλεκτρικής ισχύος της συσκευής επί τον χρόνο λειτουργίας της).

E_{HA} [kWh/m² * ημ.]: ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτονοβολίας

η_{Σ} [-]: βαθμός απόδοσης ΦΒ συστοιχίας

σ_{μ} [-]: συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις απώλειες του ΦΒ συστήματος, από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση. Όπως είναι προφανές, ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το είδος των διατάξεων που υπάρχουν στο ΦΒ σύστημα.

Έχουμε λοιπόν τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Χωρίς ηλεκτρικό συσσωρευτή

Με μετατροπείς τάσεως DC-DC (converter)

και DC-AC (inverter)

0,90

$\sigma_{\mu} = 0,85 -$

Μόνο με μετατροπέα τάσεως DC-AC(inverter)

0,98

$\sigma_{\mu} = 0,96 -$

Χωρίς μετατροπείς τάσεως

$\sigma_{\mu} = 0,99$

2. Με ηλεκτρικό συσσωρευτή

Με μετατροπείς τάσεως DC-DC (converter)

και DC-AC (inverter)

0,80

$\sigma_{\mu} = 0,75 -$

Μόνο με μετατροπέα τάσεως DC-AC(inverter)

0,9

$\sigma_{\mu} = 0,85 -$

Χωρίς μετατροπείς τάσεως

$\sigma_{\mu} = 0,92$

5.5 ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Ισχύς αιχμής $P_{ρΣ}$ μίας ΦΒ συστοιχίας ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από τη ΦΒ συστοιχία κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC.

Η ισχύς αιχμής της ΦΒ συστοιχίας για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{ρΣ} = (E_K * P_{STC} * m) / (E_{HA} * \sigma_{ΑΣ} * \sigma_{\mu}) \quad [kW_p]$$

Όπου:

E_K [kWh/ημ.]: ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης

P_{STC} [kW/m²]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC ($P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$)

m [-]: συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων για να καλύψουμε μία πιθανή υποτίμηση των αναγκών της κατανάλωσης ($m=1,2$)

E_{HA} : [kWh/m²*ημ.]: ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$\sigma_{ΑΣ}$ [-]: συντελεστής απωλειών ΦΒ συστοιχίας

σ_{μ} [-]: συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Ο συντελεστής απωλειών ΦΒ συστοιχίας περιλαμβάνει όλες τις απώλειες στα ΦΒ πλαίσια και τη ΦΒ συστοιχία, κάθε μία από τις οποίες εκφράζεται με ένα συντελεστή.

$$\sigma_{ΑΣ} = \sigma_{\gamma} * \sigma_{\rho} * \sigma_{\theta} * \sigma_{\delta} * \sigma_{\alpha} * \sigma_{\kappa} \quad [-]$$

όπου:

σ_{γ} = συντελεστής γήρανσης (λαμβάνουμε μέσο συντελεστή γήρανσης 0,90)

σ_{ρ} = συντελεστής ρύπανσης

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,004 \text{ [-]}$$

όπου:

t_a [°C]: μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (πίνακας)

σ_{δ} = συντελεστής απωλειών διόδου (0,99)

σ_{κ} = συντελεστής καλωδιώσεων (0,98)

Η ισχύς αιχμής της ΦΒ συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων η ημερών αυτονομίας, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\rho\Sigma} = (E_{\kappa} * P_{STC} * m) / (E_{HA} * \sigma_{AS} * \sigma_{\mu}) * \frac{N}{N-n} \text{ [kW}_{\rho}\text{]}$$

Όπου:

N [ημ.]: χρονική περίοδος αναφοράς

n [ημ.]: αριθμός ημερών αυτονομίας, δηλαδή, αριθμός μη ολοφανών ημερών

5.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Μία ΦΒ συστοιχία αποτελείται από N ΦΒ πλαίσια, τα οποία κατανέμονται σε N_{π} κλάδους συνδεδεμένους παράλληλα μεταξύ τους. Κάθε κλάδος περιλαμβάνει N_{σ} ΦΒ πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά(σχήμα). Όπως είναι προφανές, ο αριθμός των ΦΒ πλαισίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = N_{\pi} * N_{\sigma} [-]$$

Όπου:

$N_{\pi} [-]$: αριθμός παράλληλων κλάδων ΦΒ πλαισίων

$N_{\sigma} [-]$: αριθμός ΦΒ πλαισίων σε σειρά ανά κλάδο

Για την αποφυγή απωλειών λόγω ανομοιογένειας, όλα τα ΦΒ πλαίσια έχουν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά κάτω από τις ίδιες πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η σύνδεση των ΦΒ πλαισίων γίνεται με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε η τάση εξόδου της ΦΒ συστοιχίας να αποκτά την επιθυμητή τιμή.

Οι γνωστοί κανόνες συνδεσμολογίας των ηλεκτρικών πηγών ισχύουν και για την σύνδεση των ΦΒ πλαισίων:

1. Η τάση ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας είναι ίση με την τάση ρεύματος ενός κλάδου.
2. Η τάση ρεύματος ενός κλάδου ισούται με το γινόμενο της τάσεως ρεύματος ενός πλαισίου επί τον αριθμό των πλαισίων N_{σ} του κλάδου.

3. Η ένταση ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας ισούται με το γινόμενο της έντασης ρεύματος ενός κλάδου επί τον αριθμό των κλάδων N_{Π} .
 4. Η ένταση ρεύματος ενός κλάδου είναι ίση με την ένταση ρεύματος ενός πλαισίου.
- Μέγιστη τάση ρεύματος ΦΒ συστοιχίας

$$V_{m\Sigma} = V_{m\Pi} * N_{\sigma} \quad [V]$$

- Μέγιστη ένταση ρεύματος ΦΒ συστοιχίας

$$I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} * N_{\Pi} \quad [A]$$

Όπου:

$V_{m\Pi}$ [V]: μέγιστη τάση ρεύματος ΦΒ πλαισίου

$I_{m\Pi}$ [A]: μέγιστη ένταση ρεύματος ΦΒ πλαισίου

N_{σ} [-]: αριθμός ΦΒ πλαισίων σε σειρά ανά κλάδο

N_{Π} [-]: αριθμός παράλληλων κλάδων

Ο καθορισμός της συνδεσμολογίας των πλαισίων της ΦΒ συστοιχίας γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Υπολογισμός αριθμού ΦΒ πλαισίων

$$N = P_{p\Sigma} / P_{p\Pi} \quad [-]$$

$P_{\rho\sigma}$ [kW_p]: ισχύς αιχμής ΦΒ συστοιχίας

$P_{\rho\pi}$ [kW_p]: ισχύς αιχμής ΦΒ πλαισίου

2. Υπολογισμός αριθμού ΦΒ πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά

$$N_{\sigma} = V_{m\sigma} / V_{m\pi} [-]$$

$V_{m\sigma}$ [V]: μέγιστη τάση ρεύματος Φβ συστοιχίας (μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή 700 V)

$V_{m\pi}$ [V]: μέγιστη τάση ρεύματος ΦΒ πλαισίου

Θεωρώντας ότι η μέγιστη τάση $V_{m\sigma}$ της ΦΒ συστοιχίας πρέπει να είναι ίση με την τάση εισόδου της διάταξης που ακολουθεί, διακρίνουμε τέσσερις περιπτώσεις:

- a) Με ηλεκτρικό συσσωρευτή $V_{m\sigma} > 1,2 V_B$ [V]: ονομαστική τάση ηλεκτρικού συσσωρευτή
- b) Με ηλεκτρικό συσσωρευτή και μετατροπέα τάσεως DC-DC (converter)

$V_{m\sigma} = V_{CON} < 600V$ V_{CON} [V]: τάση στην είσοδο του converter

- c) Με ηλεκτρικό συσσωρευτή και μετατροπέα τάσεως DC-AC (inverter)

$V_{m\sigma} > 1,2V_B$ [V]: ονομαστική τάση ηλεκτρικού συσσωρευτή

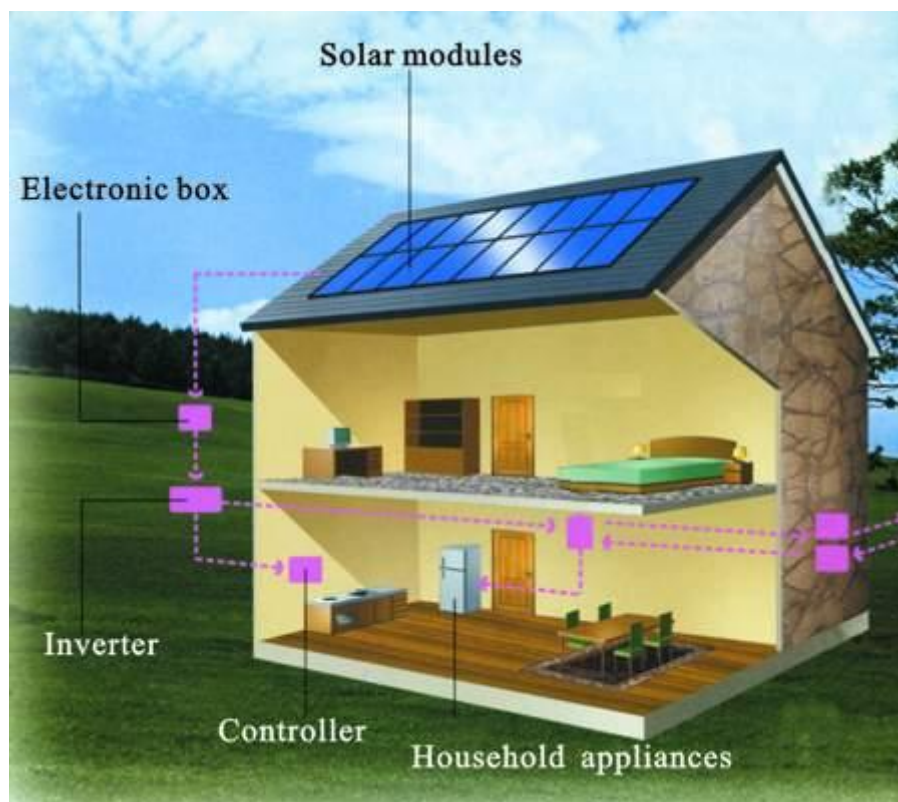
- d) Με μετατροπέα τάσεως DC-AC(inverter)

$$V_{m\sigma} = V_{INV} \quad V_{INV} [V]: \text{τάση στην είσοδο του inverter}$$

3. Υπολογισμός αριθμού παράλληλων κλάδων

$$N_{\Pi} = N / N_{\sigma}$$

Κεφάλαιο 6° - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα αυτόνομα ΦΒ συστήματα τοποθετούνται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές που δεν διαθέτουν ειδικευμένο τεχνικό προσωπικό για να τα συντηρήσει και εύκολη πρόσβαση σε οργανωμένα επισκευαστικά κέντρα με αποθέματα ανταλλακτικών. Αυτό σημαίνει ότι κατά τον σχεδιασμό θα πρέπει να εξασφαλιστούν κάποιες προϋποθέσεις όπως: α) αυτοματοποιημένη λειτουργία του συστήματος, β) εύκολος εντοπισμός της εκάστοτε βλάβης, γ) εύκολη πρόσβαση στις διατάξεις του συστήματος, δ) ανταλλακτικά μικρού μεγέθους και βάρους έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να μεταφερθούν και να τοποθετηθούν από έναν άνθρωπο, χωρίς να χρειάζονται περαιτέρω τεχνικά μέσα, και ε) ανταλλακτικά που βρίσκονται εύκολα στην αγορά.

Στη συνέχεια θα δώσουμε ένα παράδειγμα εγκατάστασης ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος σε μια εξοχική κατοικία στον Νομό Αχαΐας το

οποίο πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω ηλεκτρικές καταναλώσεις: α) φωτισμός 0,7 KW για 6 ώρες λειτουργίας, β) τηλεόραση 0,2 KW για 6 ώρες λειτουργίας, γ) ψυγείο 0,2 KW για 24 ώρες λειτουργίας, δ) πλυντήριο ρούχων 3 KW για 0,3 ώρες λειτουργίας και ε) διάφορες ηλεκτρικές συσκευές (ηλεκτρική σκούπα, στεγνωτήρας μαλλιών κλπ) 1 KW για 0,5 ώρες λειτουργίας. Το ΦΒ σύστημα θα πρέπει να έχει αυτονομία 4 ημερών και να καλύπτει την ηλεκτρική κατανάλωση τάσεως 220 V όλο τον χρόνο.



ΛΥΣΗ

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από την συστοιχία των πλαισίων, τον ελεγκτή φόρτισης, τον ηλεκτρικό συσσωρευτή και τον μετατροπέα τάσεως DC-AC (inverter).

- Καθημερινή ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης

Η καθημερινή ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης E_k προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων της ηλεκτρικής ισχύος P_k κάθε συσκευής επί τον χρόνο λειτουργίας της T .

Έστω ότι από το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας κατανάλωσης E_k ($E_k=11,6 \text{ kWh/ημ.}$) το 30% καλύπτεται κατευθείαν από τη ΦΒ συστοιχία, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ το υπόλοιπο αποταμιεύεται στον ηλεκτρικό συσσωρευτή για την κάλυψη των καταναλώσεων κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας.

ΕΙΔΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ Pk(kWh)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ T (h)	ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ Eκ (kWh/ημ.)
Φωτισμός	0,7	6	4,2
Τηλεόραση	0,2	6	1,2
Ψυγείο	0,2	24	4,8
Πλυντήριο ρούχων	3	0,3	0,9
Διάφορες συσσκευές	1	0,5	0,5
Σύνολο	5,1		11,6

Άμεση τροφοδοσία (μέσω ΦΒ συστοιχίας)

$$E_{κα} = 30\%E_{κ} \Rightarrow E_{κα} = 0,3 \cdot 11,6 = 3,48 \text{ kWh/ημ.}$$

Έμμεση τροφοδοσία (μέσω συσσωρευτή)

$$E_{κε} = 70\%E_{κ} \Rightarrow E_{κε} = 0,7 \cdot 11,6 = 8,12 \text{ kWh/ημ.}$$

Άρα, το ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας είναι $b=0.7$

- Γωνία κλίσης ΦΒ συστοιχίας

Η βέλτιστη γωνία κλίσης για όλο το χρόνο είναι $\beta = \varphi = 38,30^\circ$, όπου φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης.

- Ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας

Επειδή θέλουμε να λειτουργεί το ΦΒ σύστημα όλο το χρόνο, επιλέγουμε την μικρότερη μηνιαία ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας στον Νομό Αχαΐας από τον παρακάτω πίνακα.

ΠΟΛΗ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ φ [°]
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεσιτιάδα	41°30'
Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41°
Καστοριά, Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40°30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμιος	40°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39°30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39°
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφισσα, Λειβαδιά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38°30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πάρος, Σύρος, Πάτμος	37°30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36°30'
Κύθηρα, Καστελλόριζο	36°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσοι, Κάρπαθος	35°30'
Χώρα Σφακιών, Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης	35°

$E_{HA} = 87 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{μήνα}$ (για τον Δεκέμβριο)

- Ισχύς αιχμής ΦΒ συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων 4 ημερών αυτονομίας.

$$P_{p\sigma} = \frac{E_k \cdot P_{stc} \cdot m}{E_{ha} \cdot \sigma_{AS} \cdot \Sigma \mu} \cdot \frac{N}{N - n} \Rightarrow P_{p\sigma} = \frac{11.6 \cdot 1 \cdot 1.2}{2.8 \cdot 0.71 \cdot 0.85} \cdot \frac{31}{31 - 4}$$

$$= 9,34 \text{ kWp}$$

$P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC

$m=1,2$ συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων

$E_{HA} = \frac{87}{31} = 2,8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ ημερησια ενεργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$\sigma_{AS} = 0.77 \cdot \sigma_{\theta}$ συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα

Συντελεστής θερμοκρασίας

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,004 \Rightarrow$$

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(12,7 + 30) - 25] * 0,004 = 0,92$$

$t_a = 12,7^{\circ}\text{C}$ μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα τον μήνα Δεκέμβριο

$$\text{Τελικά } \sigma_{\Lambda\Sigma} = 0,77 * \sigma_{\theta} \Rightarrow \sigma_{\Lambda\Sigma} = 0,77 * 0,92 = 0,71$$

$\sigma_{\mu} = 0,85$ συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσωρευτή, ελεγκτή φόρτισης και μετατροπέα τάσεως DC-AC

$N = 31$ ημέρες χρονική περίοδος αναφοράς

$N = 4$ ημέρες αριθμός ημερών αυτονομίας (μη ηλιοφανείς μέρες)

- Μέγιστη τάση ΦΒ συστοιχίας

Η μέγιστη τάση ΦΒ συστοιχίας πρέπει να είναι

$$V_{m\Sigma} > 1,2 V_B$$

Όπου V_B η ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσωρευτή.

Από τον πίνακα επιλέγουμε $V_B = 48 \text{ V}$

$$V_{m\Sigma} > 1,2 V_B \Rightarrow V_{m\Sigma} > 1,2 * 48 = 57,6 \text{ V}$$

- Αριθμός πλαισίων ΦΒ συστοιχίας

$$N = \frac{P_{p\sigma}}{P_{p\pi}} \Rightarrow N = \frac{9340}{130} = 71,8 \text{ αρα θα χρησιμοποιησουμε } 72 \text{ πλαίσια}$$

Επιλέγουμε ΦΒ πλαίσια του τύπου KC130GHT-2 της εταιρίας KYO-

CERA με ισχύ αιχμής πλαισίου $P_{p\Sigma} = 130 \text{ W}_p$

Ισχύς αιχμής ΦΒ συστοιχίας $P_{p\sigma} = 9,34 \text{ kW}_p = 9340 \text{ W}_p$

- Πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά

$$N_{\sigma} = \frac{V_{m\sigma}}{V_{m\pi}} = \frac{88}{17,6} = 5 \text{ πλαίσια}$$

Επιλέγουμε μέγιστη τάση για την ΦΒ συστοιχία $V_{m\sigma} = 88 \text{ V}$

$V_{m\pi} = 17,6 \text{ V}$ μέγιστη τάση ρεύματος ΦΒ πλαισίου

- Αριθμός των παράλληλων κλάδων συστοιχίας

$$N_{\pi} = \frac{N}{N_{\sigma}} = \frac{71}{5} \approx 15 \text{ κλάδοι}$$

- Ονομαστική χωρητικότητα του ηλεκτρικού συσσωρευτή

$$C = \frac{(n+b) * m * E_k}{\Sigma_{\gamma\beta} * \Sigma_{\epsilon\kappa} * B_{\epsilon\kappa} * V_{\beta}} = \frac{(4+0,7) * 1,2 * 11600}{0,8 * 0,91 * 0,6 * 48} = 3120 \text{ Ah}$$

n, b, m, V_{β} τα γνωρίζουμε από πριν

$$E_{\kappa} = 11,6 \text{ kWh/ημ} = 11600 \text{ Wh/ημ}$$

$\Sigma_{\gamma\beta} = 0,8$ συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή

$\Sigma_{\epsilon\kappa} = 0,91$ συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης

$B_{\epsilon\kappa} = 0,6$ βάθος εκφόρτισης για 4-6 μέρες αυτονομίας

Άρα θα χρησιμοποιήσουμε 48 συσσωρευτές του τύπου PVX-2120L της εταιρίας SUN-XTENDER με τάση 12 V και χωρητικότητα $C = 253 \text{ Ah}$

($48 * 12V / 253 \text{ Ah}$). Η συστοιχία των συσσωρευτών θα είναι 12

παράλληλοι κλάδοι με 4 συσσωρευτές σε σειρά ανά κλάδο. Η σύνδεση

σε σειρά θα καθορίσει την ονομαστική τάση $V_B = 4 * 12V = 48 \text{ V}$ ενώ η

παράλληλη σύνδεση θα καθορίσει την ονομαστική χωρητικότητα

$$C = 12 * 253 = 3036 \text{ Ah.}$$

- Επιλογή του ελεγκτή φόρτισης

Θα επιλέξουμε έναν ελεγκτή φόρτισης σειράς με τα εξής χαρακτηριστικά

Ø Ονομαστική τάση

Πρέπει να έχει ονομαστική τάση ίση με αυτή του συσσωρευτή, δηλαδή 48V

Ø Ρεύμα εισόδου

Το μέγιστο ρεύμα εισόδου είναι $1,5 * I_{m\Sigma}$

Η μέγιστη ένταση ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας θα είναι

$$I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} * N_{\pi} = 7,39 * 15 = 110,85 \text{ A}$$

$I_{m\Pi} = 7,39 \text{ A}$ μέγιστη ένταση ρεύματος ΦΒ πλαισίου. Άρα το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δεχτεί στην είσοδο θα είναι:

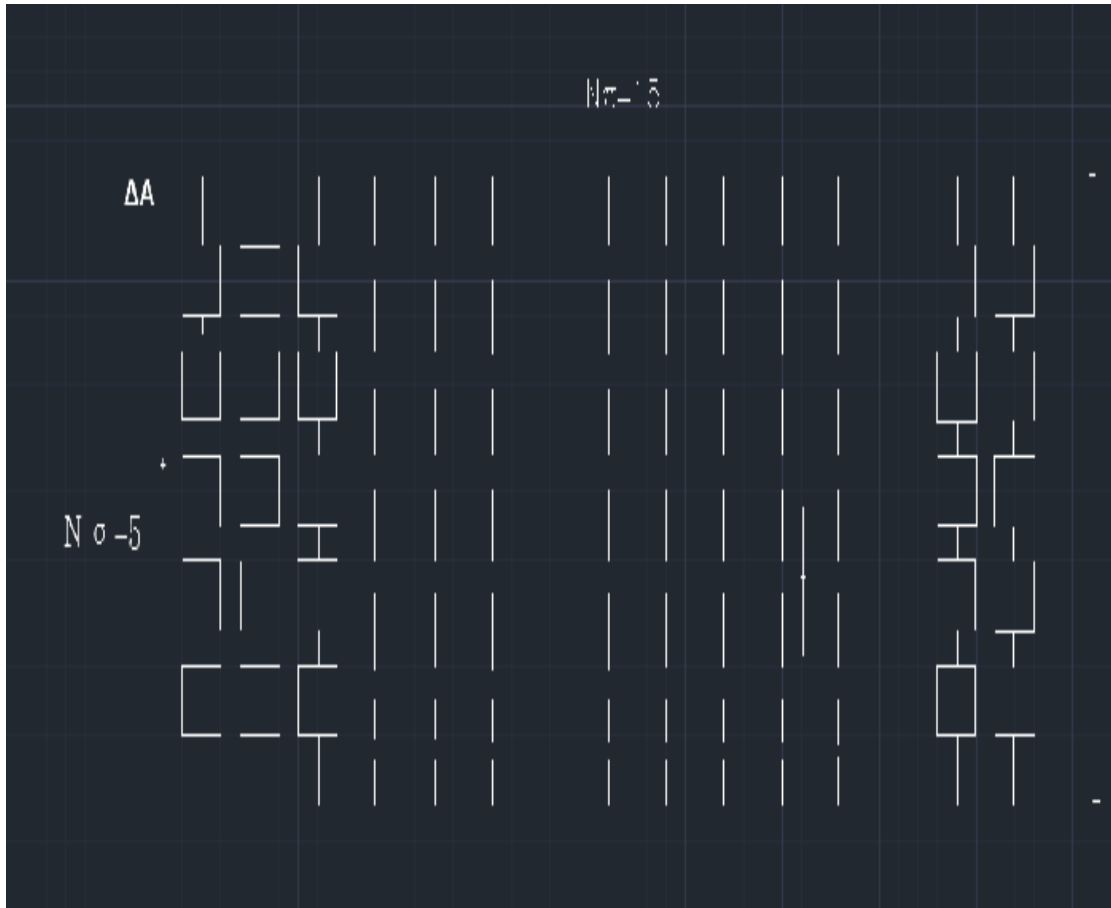
$$1,5 * I_{m\Sigma} = 1,5 * 110,85 = 166,2 \text{ A}$$

Ø Ρεύμα εξόδου

Ο ελεγκτής φόρτισης θα πρέπει να μπορεί να δώσει το μέγιστο ρεύμα στα φορτία κατανάλωσης, που λειτουργούν ταυτόχρονα. Γι αυτό θεωρούμε πως η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για την ταυτόχρονη λειτουργία συσκευών είναι $P_k = 1.5 \text{ KW} = 1500 \text{ W}$
Η τάση κατανάλωσης είναι $V_k = 220 \text{ V}$
Το ρεύμα εξόδου είναι $\frac{P_k}{V_k} = \frac{1500}{220} = 6,8 \text{ A}$
Άρα θα επιλέξουμε ελεγκτή φόρτισης 48V/170A/7A

- Η επιλογή του μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter) γίνεται ως εξής:
 - ∅ Ονομαστική τάση
Πρέπει να έχει ίση ονομαστική τάση με αυτή του συσσωρευτή, δηλαδή 48V.
 - ∅ Ισχύς εξόδου
Η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα θα πρέπει να ισούται με την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ των φορτίων, που λειτουργούν ταυτόχρονα, δηλαδή πρέπει να είναι $P_k = 1500 \text{ W}$.
 - ∅ Ισχύς αιχμής
Η ισχύς αιχμής θα πρέπει να είναι τριπλάσια από την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή $3P_k = 3 * 1500 \text{ W} = 4500 \text{ W}$
 - ∅ Τάση εξόδου
Η τάση εξόδου πρέπει να ισούται με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 220V.

Άρα θα επιλέξουμε μετατροπέα τάσεως DC-AC με τα εξής χαρακτηριστικά 48V / 1.5 KW / 4.5 KW / 220 V



Σχέδιο του παραπάνω ΦΒ συστήματος

Όπου ΔΑ: Δίοδος Αντεπιστροφής

Ακολουθούν τα υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος που δημιουργήσαμε για τον υπολογισμό ΦΒ συστημάτων

ΕΙΔΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ P _k [KW]	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ T [h]	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ Σ E _κ [Kwh/ημ.]
φωτισμός	0,7	6	4,2
τηλεόραση	0,2	6	1,2
ψυγείο	0,2	24	4,8
πλυντήριο ρούχων	3	0,3	0,9
διάφορες συσκευές	1	0,5	0,5
ΣΥΝΟΛΟ	5,1		11,6

ΜΕΡΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΝ ΜΗΝΑ	31
ΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	48
ΜΕΡΕΣ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ	4
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ	38,30°
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ανα μήνα (kWh/m ²)	87
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ανα μέρα (kWh/m ²)	2,8
ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ °C)	12,7
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ σ_{θ}	0,93
ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	0,9
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ $\sigma_{ΑΣ}$	0,72
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ σ_{μ}	0,85
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ $V_{m\zeta}$	88
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (w)	1500
ΤΑΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	220

ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ (kW _p)	9,36
ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ	110,85

ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟ	
ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ (W _p)	130
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ	72
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ (V)	17,6
ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ	5
ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΚΛΑΔΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ	15
ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ (A)	7,39

Εκα (kWh/ημ)	3,48
Εκε (kWh/ημ)	8,12
ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΟΡΤΙΩΝ ΕΜΜΕΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ b	0,7

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ	
ΒΑΘΟΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ	0,6
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ (Ah)	3120
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ	49
ΤΑΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	12
ΜΕΓΕΘΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	253
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ σεκ.	0,91

ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	48
ΜΕΓΙΣΤΟ ΡΕΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ (A)	166,3
ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ	6,8

INVERTER	
ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	1500
ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ	4500
ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	220

Κεφάλαιο 7° - Βιβλιογραφία

[1]. Διαδύκτιο.

<http://global.kyocera.com/>

<http://www.sunxtender.com/>

[2]. Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Στο Ελληνικό Δίκτυο, Στυλιανοπούλου Κωνσταντίνα, Χατζηρόδου Εμμανουέλα: Πτυχιακή εργασία Τεί Δυτικής Μακεδονίας.

[3]. Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας των 100 kW, Γεώργιος Κτενίδης: Διπλωματική Εργασία.

[4]. Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, Σταμάτης Πέρδιος.

[5]. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque and Steven Hegedus.

[6]. Βέλτιστος Σχεδιασμός Αυτόνομων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων, Σώρρας Κωνσταντίνος.

