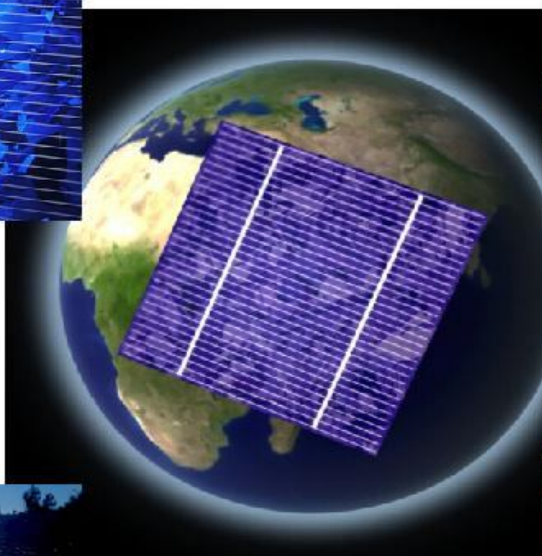
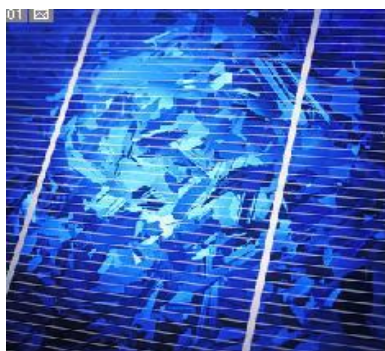




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ (Σ.Τ.Ε.Φ.)
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΜΕΝΟΥ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ Δ.Ε.Η.



Σπουδαστής : Χανιωτάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων : Κυμάκης Εμμανουήλ

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Ηράκλειο Κρήτης, Οκτώβριος 2010



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ (Σ.Τ.ΕΦ.)
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΜΕΝΟΥ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ Δ.Ε.Η.



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

Χανιωτάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων : *Κυμάκης Εμμανουήλ*

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Ηράκλειο Κρήτης, Οκτώβριος 2010

.....
Χανιωτάκης Μιχαήλ του Εμμανουήλ και της Αριάδνης
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Επιβλέπων : Κυμάκης Εμμανουήλ
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

.....

.....

Ηράκλειο Κρήτης, Οκτώβριος 2010

Copyright © Χανιωτάκης Μιχαήλ, 2010
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τ.Ε.Ι. Κρήτης του Τμήματος Ηλεκτρολογίας.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου,
Εμμανουήλ και Αριάδνη
και τα αδέρφια μου,
Ιωάννη και Αλέξανδρο.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839, από τον Γάλλο Φυσικό Becquerel, σε ηλεκτρολυτικά υγρά. Πέρασαν όμως αρκετά χρόνια από τότε, μέχρι ο άνθρωπος να καταλάβει την σημασία του φαινομένου αυτού και να την αξιοποίηση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη κατασκευή φωτοβολταϊκής κυψελίδας κρυσταλλικού πυριτίου έγινε το 1954 από τους Charin, Fuller και Pearson. Δύο χρόνια αργότερα η εταιρία Hoffman ξεκίνησε εμπορική παραγωγή ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου και έτσι το 1958 χρησιμοποιήθηκαν σε διαστημικές εφαρμογές.

Σήμερα η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων έχει φτάσει σε πολύ υψηλό επίπεδο, με κύρια χαρακτηριστικά την αέναη, αποδοτική και εξαιρετικά ήπια και φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η χώρα μας διαθέτει ένα από τα υψηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη, αλλά δυστυχώς είμαστε στις χαμηλότερες θέσεις ως προς την εγκατάσταση των ΦΒ συστημάτων. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και με τους ηλιακούς θερμοσίφωνες, όπου κατέχουμε την δεύτερη θέση στην Ευρώπη.

Μέχρι πρότινος το θεσμικό πλαίσιο για τα ΦΒ συστήματα στη χώρα μας ήταν ανεπαρκές. Τώρα όμως η θέσπιση ευνοϊκότερου νομοθετικού πλαισίου για τις Α.Π.Ε. και ιδιαιτέρως για τα φωτοβολταϊκά, στρέφει το ενδιαφέρον του κοινού, για επενδύσεις προς αυτή την κατεύθυνση, άσχετα με το υψηλό κόστος που έχουν μέχρι στιγμής. Με τον αυξανόμενο ρυθμό εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών όχι μόνο στη χώρα μας αλλά και παγκοσμίως δημιουργείται μια προοπτική ανάπτυξης νέων επαγγελματικών δραστηριοτήτων.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κυμάκη Εμμανουήλ, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης του οποίου η καθοδήγηση ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαραγκάκη Δημήτριο, Καθηγητή Εφαρμογών του Τ.Ε.Ι Κρήτης, για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση του και επειδή εκείνος ήταν που με ώθησε και με παρότρυνε, σε αρχικό στάδιο, να ασχοληθώ με το είδος του θέματος της εργασίας μου.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και που χωρίς τη πολύτιμη παρουσίας της δε θα είχα καταφέρει τίποτα από όσα έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	9
Περίληψη.....	13
Εισαγωγή	14
1 Ήλιος, Γη και ατμόσφαιρα	15
1.1 Ο Ήλιος και οι ενεργειακές του δυνατότητες.....	16
1.2 Η Γη και η ατμόσφαιρά της.....	19
1.3 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	21
1.4 Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας	21
1.5 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	22
1.6 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	23
1.7 Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα.....	28
1.7.1 Η ελληνική πραγματικότητα.....	28
1.7.2 Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα	30
2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	32
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	33
2.1.1 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	33
2.1.2 Ύπαρξη ατμόσφαιρας-ακτινοβολία ενός ήλιου	33
2.1.3 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας.....	36
2.1.4 Η ηλιακή ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη.....	40
2.2 Η ανακλαστικότητα των φωτοβολταϊκών πλακιδίων.....	45
2.3 Ύπαρξη βλάστησης κάτω από τα ΦΒ πλαίσια	50
3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	54
3.1 Ημιαγωγοί.....	56
3.1.1 Ηλεκτρική αγωγιμότητα	59
3.1.2 Ορθή και αναστροφή πόλωση της διόδου επαφής p-n.....	60
3.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	61
3.2.1 Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του ΦΒ φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο.	63
3.2.2 Η απορρόφηση ακτινοβολίας στα ΦΒ πλαίσια	63
3.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ΦΒ στοιχείων	64

3.3	Φωτοβολταϊκή κυψελίδα	64
3.4	Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	65
3.4.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ΦΒ στοιχείων	66
3.4.2	Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	68
3.4.3	Χαρακτηριστική καμπύλη ΦΒ στοιχείου	69
3.4.4	Σημείο λειτουργίας ΦΒ στοιχείου.....	70
3.4.5	Βαθμός απόδοσης ΦΒ στοιχείου	70
3.4.6	Ισχύ αιχμής ΦΒ στοιχείου	71
3.5	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	71
3.5.1	Τρόποι σύνδεσης ΦΒ πλαισίων	78
3.5.2	Προσανατολισμός ΦΒ πλαισίων.....	80
3.5.3	Τρόποι στήριξης ΦΒ πλαισίων.....	81
3.6	Φωτοβολταϊκή συστοιχία	89
3.6.1	Βαθμός απόδοσης ΦΒ συστοιχίας	90
3.6.2	Επιφάνεια ΦΒ συστοιχίας.....	91
3.6.3	Ισχύ αιχμής ΦΒ συστοιχίας.....	91
3.6.4	Σχεδιασμός ΦΒ συστοιχίας.....	92
3.6.5	Ελάχιστη απόσταση μεταξύ συστοιχιών Φωτοβολταϊκού Συγκροτήματος.....	93
3.6.6	Αποφυγή σκίασης από εμπόδια	93
3.6.7	Γενικές πληροφορίες για τα ΦΒ πλαίσια	95
3.7	Η αγορά των φωτοβολταϊκών σήμερα.....	97
3.8	Ενέργεια αποπληρωμής στα φωτοβολταϊκά.....	97
3.9	Βασικοί Ορισμοί των Φωτοβολταϊκών.....	99
4	Φωτοβολταϊκά Σύστημα.....	100
4.1	Περιγραφή ΦΒ συστήματος μίας εγκατάστασης	101
4.2	ΦΒ πλαίσιο	101
4.2.1	Η τοποθέτηση και η λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας,	101
4.3	Η Μονάδα Ελέγχου.....	106
4.3.1	Ο ρυθμιστής φόρτισης στα ΦΒ συστήματα	106
4.3.2	Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος	120
4.4	Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές (μπαταρίες)	143
4.4.1	Αρχή λειτουργίας και είδη συσσωρευτών	144
4.4.2	Τύποι συσσωρευτών	146

4.4.3	Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας συσσωρευτών	148
4.4.4	Όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών.....	149
4.4.5	Προστασία των συσσωρευτών	157
4.4.6	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών.....	157
4.4.7	Τεχνικές φόρτισης μπαταρίας	161
4.4.8	Τεχνικές σύνδεσης των συσσωρευτών	164
4.4.9	Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε φβ σύστημα	164
4.5	Ηλεκτρικοί αγωγοί.....	165
4.6	Γείωση.....	167
4.7	Ηλεκτρικές καταναλώσεις	167
5	Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση διασυνδεδεμένων φβ συστημάτων.....	168
5.1	Μέγεθος συστήματος και επιλογή μονάδων	169
5.2	Είδη συστημάτων	170
5.2.1	Είδος κεντρικού μετατροπέα	171
5.2.2	Είδος μετατροπέα ημι-συστοιχίας και γραμμής	174
5.2.3	Είδος μετατροπέα πλαισίου	175
5.3	Χώρος εγκατάστασης των μετατροπέων	177
5.4	Το μέγεθος του μετατροπέα.....	178
5.4.1	Επιλέγοντας το πλήθος και την εκτίμηση δύναμης των μετατροπέων.....	178
5.4.2	Επιλογή τάσης.....	181
5.4.3	Καθορίζοντας το πλήθος των γραμμών	184
5.4.4	Επιλογή του μεγέθους χρησιμοποιώντας πρόγραμμα προσομοίωσης	185
5.5	Επιλέγοντας είδος και μέγεθος καλωδίων για φβ συστήματα συνδεδεμένα σε πλέγμα....	186
5.5.1	Εκτιμήσεις τάσης καλωδίων	187
5.5.2	Χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος καλωδίου.....	187
5.5.3	Ελαχιστοποιώντας τις απώλειες καλωδίων/πτώσεις τάσης.....	188
5.5.4	Επιλογή του μεγέθους του πλαισίου και καλωδίωση της γραμμής.....	189
5.5.5	Επιλέγοντας το μέγεθος του κύριου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος.....	192
5.5.6	Επιλέγοντας το καλώδιο σύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος.....	193
5.6	Επιλογή είδους και μεγέθους του κουτιού διασταυρώσεις και του κύριου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος	194
5.7	Προστασία από αστραπή, γείωση και προστασία βραχυκυκλώματος	195
5.7.1	Προστασία από αστραπές-απευθείας χτυπήματα	198

5.7.2	Έμμεσες επιπτώσεις κεραυνού και εσωτερική προστασία από κεραυνούς	200
5.8	Πρόβλεψη απόδοσης	202
6	Σχέδιο και λογισμικό προσομοίωσης	206
6.1	Η χρησιμότητα του μεγέθους, το σχέδιο και τα προγράμματα προσομοίωσης	207
6.2	Ελέγχοντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης	208
6.3	Προσομοίωση σκίασης.....	209
6.4	Γενική επισκόπηση της αγοράς και ταξινόμηση.....	210
6.5	Περιγραφή συστημάτων.....	211
6.5.1	Προγράμματα υπολογισμού.....	211
6.5.2	Προγράμματα προσομοίωσης με χρονικά βήματα	212
6.5.3	Συστήματα προσομοίωσης.....	223
6.5.4	Συμπληρωματικά προγράμματα και πηγές δεδομένων	225
6.5.5	Προγράμματα σχεδιασμού και εξυπηρέτησης.....	227
6.5.6	Διαδικτυακά προγράμματα προσομοίωσης	228
7	Φωτοβολταϊκά πλαίσια σε στέγες κτιρίων.....	229
7.1	Κάλυψη αναγκών με φωτοβολταϊκά.....	230
7.2	Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών	230
7.3	Σύνδεση με τη ΔΕΗ	231
7.4	Η αυτονομία στα φωτοβολταϊκά.	232
7.5	Υβριδικά συστήματα.....	233
7.6	Ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος.....	233
7.7	Καταλληλότητα κτιρίου.	234
7.8	Δυνατότητες εφαρμογής φβ σε κτίρια.....	235
7.9	Φωτοβολταϊκά σε πρόσοψη κτιρίου.....	235
7.10	Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών.....	238
8	Βιβλιογραφία:	242

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των ΦΒ στοιχείων και κατ' επέκταση των ΦΒ συστημάτων καθώς επίσης και των ΦΒ πάρκων. Γίνεται αναφορά στις μονάδες και τις συσκευές, οι οποίες αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και στο ποιες είναι οι βασικές αρχές λειτουργίας τους.

Δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται ένα ΦΒ στοιχείο, από τι υλικά αποτελείται, τι άλλα υλικά χρειάζονται και με ποιούς τρόπους συνδέονται μεταξύ τους για να δημιουργηθεί το ΦΒ σύστημα και κατ' επέκταση ένα ΦΒ πάρκο.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικά πληροφορίες για τον ήλιο και τις ενεργειακές του ιδιότητες, για την γη και την ατμόσφαιρά της, για το φαινόμενο του Θερμοκηπίου, για τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) και για τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται αναλυτικότερα στους ημιαγωγούς, για το τι είναι ΦΒ φαινόμενο και πως δημιουργείται, τι είναι η ΦΒ κυψελίδα, τι είναι το ΦΒ στοιχείο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του, τι είναι το ΦΒ πλαίσιο από τι υλικά αποτελείται (προσανατολισμός, τρόποι στήριξης και τρόποι σύνδεσης), τι είναι η ΦΒ συστοιχία (βαθμό απόδοσης, επιφάνεια, ισχύ αιχμής, αποφυγή σκίασης), για την αγορά στα ΦΒ σήμερα και για την ενέργεια αποπληρωμής των φωτοβολταϊκών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρέχονται πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία και τις μεταβολές της λόγω της ατμόσφαιρας, επίσης δίδονται πληροφορίες και για την ανακλαστικότητα των ΦΒ πλαισίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται για την περιγραφή μίας ΦΒ εγκατάστασης (όπως ΦΒ πλαίσια, ρυθμιστής φόρτισης, μετατροπείς ισχύος, συσσωρευτές, διατομές καλωδίων, γειώσεις και φορτία κατανάλωσης).

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται το μέγεθος και οι επιλογές των μονάδων, τα είδη των συστημάτων, ο χώρος εγκατάστασης του μετατροπέα, το μέγεθος του μετατροπέα, το είδος και το μέγεθος των καλωδίων, η επιλογή του κουτιού διασταύρωσης και του κύριου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος, προστασία από αστραπή και βραχυκύκλωμα και τέλος για πρόβλεψη απόδοσης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρέχονται πληροφορίες για τη χρησιμότητα του μεγέθους, το σχέδιο και τα προγράμματα εξομοίωσης, τον έλεγχο εξομοίωσης, την εξομοίωση σκίασης, την περιγραφή ΦΒ συστημάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται αναφορά για την κάλυψη των αναγκών με ΦΒ, την σύνδεση με τη Δ.Ε.Η., την αυτονομία στα ΦΒ, τα υβριδικά συστήματα, την καταλληλότητα κτιρίου και οι δυνατότητες εφαρμογής ΦΒ πλαισίων σε στέγες, πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα ΦΒ.

Εισαγωγή

Τέσσερα από τα βασικότερα στοιχεία της φύσης είναι η δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, τα οποία παρέχονται από τη φύση απλόχερα. Ο άνθρωπος λοιπόν εξ' απ' ανάκαθεν έβρισκε τρόπους να τα εκμεταλλεύεται αυτά, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσής του. Αλλά επειδή ο άνθρωπος είναι αχόρταγος και άπληστος από την φύση του, έφτασε στα άκρα σκεπτόμενος μόνο τον εαυτό του, δίχως να λογαριάζει τη ρύπανση που προκαλεί στο περιβάλλον στο οποίο κατοικεί. Η ανεξέλεγκτη και αλόγιστη αυτή συμπεριφορά του, δημιούργησε αρκετές σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες στο οικοσύστημα. Μερικές από αυτές τις συνέπειες είναι οι ραγδαίες κλιματικές αλλαγές, τα καταστροφικά καιρικά φαινόμενα, η μόλυνση του περιβάλλοντος, του αέρα, των υδάτων, του εδάφους, τα οποία δεν απειλούν πλέον μεμονωμένες περιοχές, αλλά αρχίζουν να γίνονται ορατές ακόμη και στις ανεπτυγμένες χώρες. Επίσης ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η παγκόσμια κοινότητα είναι η αύξηση των παραγόμενων ρύπων. Οι ουσίες που εκπέμπονται κατά την παραγωγή ενέργειας και προϊόντων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, καταστρέφουν το περιβάλλον. Το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ είναι η αιτία για την άνοδος της θερμοκρασίας παγκοσμίως, όπου οφείλεται εν μέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Γίνεται πλέον συνείδηση ότι αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα που απαιτεί μακροχρόνιες στρατηγικές αντιμετώπισης και καλείται να διορθώσει αυτά που ο ίδιος ο άνθρωπος δημιούργησε. Στην προσπάθεια αυτή όμως έχει σύμμαχό του την τεχνολογία, που ο ίδιος εφηύρε, και έτσι καταφέρνει σιγά σιγά να βρει τρόπους να εκμεταλλεύεται αυτά που του προσφέρει η φύση και συγχρόνως να προστατεύει και το περιβάλλον. Επίσης το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας είναι καύσιμα που δεν θα είναι για πάντα στην διάθεση του ανθρώπου. Όπως είπε και ο Σεΐχης Γιαμανί, πρώην υπουργός πετρελαίου της Σαουδικής Αραβίας “Το τέλος της λίθινης εποχής ήρθε χωρίς να τελειώσουν οι λίθοι. Έτσι θα έρθει και το τέλος της εποχής του πετρελαίου, πριν τελειώσει το πετρέλαιο”. Πολύ πριν όμως εξαντληθούν τα αποθέματα, κινδυνεύει να εξαντληθεί η ανοχή των οικοσυστημάτων του πλανήτη από τις επικίνδυνες κλιματικές αλλαγές τις οποίες πυροδοτεί η εντεινόμενη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Για τους παραπάνω λόγους δίνεται και θα συνεχίζεται και στο μέλλον να δίνεται βαρύτητα στις λεγόμενες πηγές ενέργειας όπου διακρίνονται σε συμβατικές και ανανεώσιμες. Οι ορισμοί των εννοιών αυτών ακολουθούν:

Πηγή ενέργειας ονομάζεται κάθε ύλη, σύστημα ή διάταξη από όπου μπορεί να αποληφθεί ενέργεια, για την παραγωγή θερμότητας, φωτός ή ισχύος.

Συμβατικές πηγές ενέργειας είναι οι πηγές που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό τη γης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (όπως άνθρακας, πετρέλαιο) και η πυρηνική ενέργεια.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι πηγές που μας παρέχονται καθημερινά και αέναα σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης και ανανεώνονται συνεχώς και έχουν σαν βασική τους προέλευση τον ήλιο.

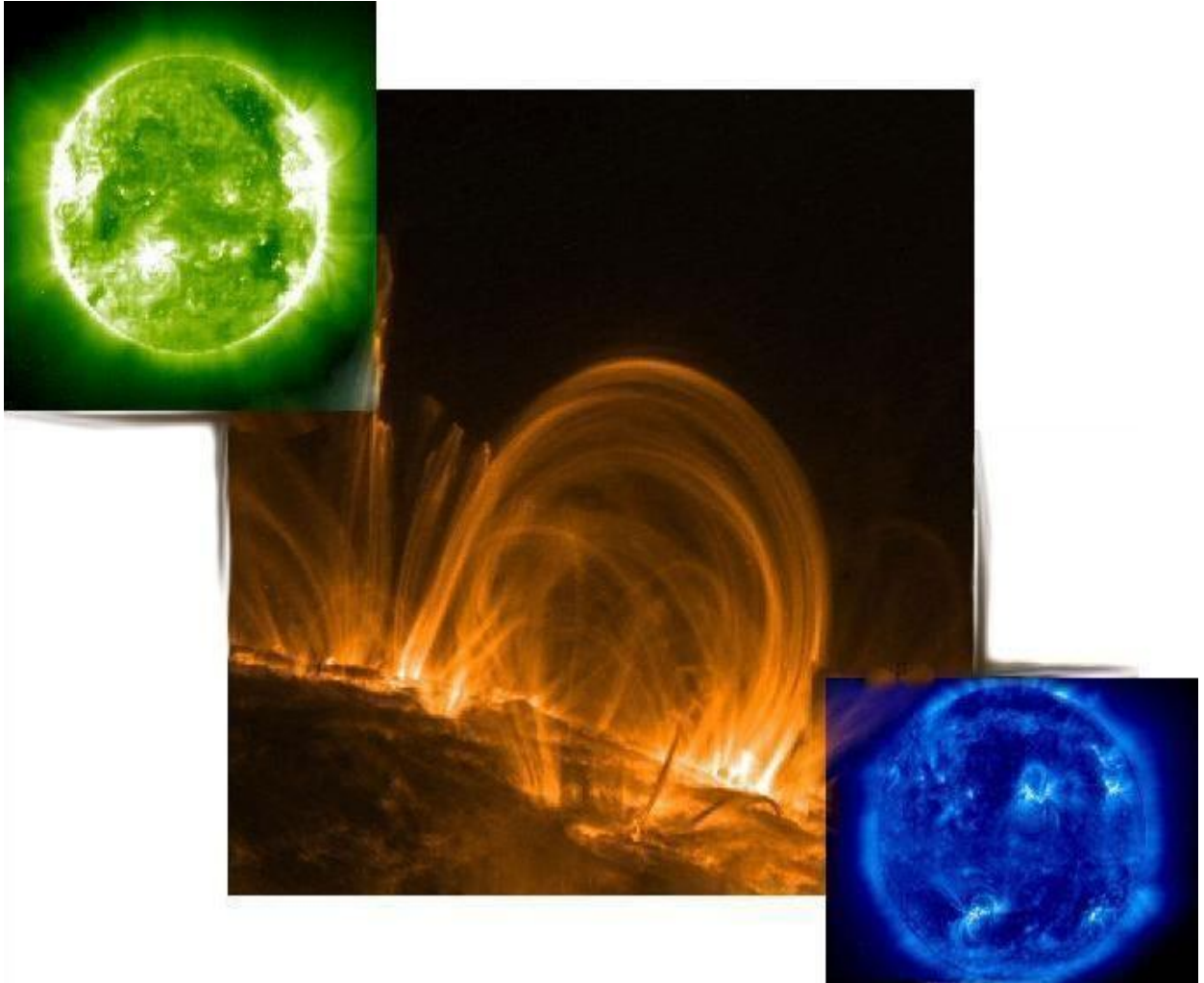
Επίσης οι πηγές ενέργειας διακρίνονται και ανάλογα με τη χρήση που θέλει ο άνθρωπος και έχει στη διάθεσή του, δηλαδή:

Πρωτογενείς είναι οι πηγές ενέργειας που προέρχονται από τη φύση πριν από οποιοδήποτε μετασχηματισμό (π.χ. αργό πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλιακή ενέργεια).

Δευτερογενείς είναι οι πηγές ενέργειας που προέρχονται από το μετασχηματισμό των πρωτογενών πηγών με μηχανικά ή χημικά (π.χ. βενζίνη, πετρέλαιο, υγραέριο).

Χρήσιμες είναι οι πηγές ενέργειας που έχουν την επιθυμητή μορφή για τον καταναλωτή (π.χ. θερμότητα, ηλεκτρισμός).

1 Ήλιος, Γη και ατμόσφαιρα



1.1 Ο Ήλιος και οι ενεργειακές του δυνατότητες

Πριν από πέντε δισεκατομμύρια χρόνια δημιουργήθηκε ο ήλιος από ένα περιστρεφόμενο αρχικό νεφέλωμα αερίου και σκόνης. Η κεντρική μεγάλη συμπύκνωση αποτέλεσε τον πρώτο-ήλιο, ενώ από κομμάτια της υπόλοιπης ύλης σχηματίστηκαν οι πρώτο-πλανήτες. Ο ήλιος λοιπόν είναι ένας αστέρας μάζας $2 \cdot 10^{30}$ kg, ακτίνα 700.000km και ο προσδόκιμος χρόνος ζωής του είναι άλλα πέντε δισεκατομμύρια χρόνια περίπου. Επίσης είναι το κέντρο του ηλιακού μας συστήματος. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι 5.800 K, ενώ η θερμοκρασία του πυρήνα του είναι περίπου 14 με 15.000.000 K. Η μέση απόσταση του ήλιου από τη γη είναι 150.000.000km και για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται περίπου 8,5min.

Ο ήλιος αποτελείται, ως επί το πλείστον, από υδρογόνο (70%), ήλιο (28%) και το υπόλοιπο 2%, από βαρέα στοιχεία. Φυσικά είναι το μόνο αστέρι αρκετά κοντά μας, ώστε να εξετάσουμε τα εξωτερικά και τα εσωτερικά στρώματά του. Ο Ήλιος είναι ένας συνηθισμένος νάνος αστέρας δεύτερης γενιάς, που παράγει ενέργεια από σύντηξη υδρογόνου στο εσωτερικό του. Πιο συγκεκριμένα με την αλυσιδωτή αντίδραση πρωτονίου-πρωτονίου, με την οποία καταναλώνει το υδρογόνο του με ένα ρυθμό 4.000.000 τόνων, ανά δευτερόλεπτο, παράγοντας ήλιο. Συγκεκριμένα για κάθε γραμμάριο υδρογόνου που μετατρέπεται σε ήλιο αποδίδεται ενέργεια $1.67 \cdot 10^5$ kWh.



Εικόνα 1.1.1: Ήλιος

Η απόσταση γης ηλίου μεταβάλλεται περιοδικά στην διάρκεια του έτους από $152 \cdot 10^6$ km (1^η Ιουλίου) ως $147 \cdot 10^6$ km (1^η Ιανουαρίου), δηλαδή από το αφήλιο ως το περιήλιο. Η μέση απόσταση των δύο αυτών ουρανίων σωμάτων είναι $150 \cdot 10^6$ km και ονομάζεται αστρονομική μονάδα (AU). Αποτελεί την μονάδα μήκους για τις διαστημικές αποστάσεις.

Ηλιακή Σταθερά ενός πλανήτη είναι η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση πλανήτη-ήλιου, ενός ηλιακού συστήματος. Για τη Γη η πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι 1367 W/m^2 . Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ ήλιου και γης, από την εμφάνιση ηλιακών κηλίδων και από την περιστροφή του ήλιου γύρω από τον άξονά του.

Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης του σημείου που μετράται.

Μονάδα της είναι το 1 W/m^2 που προκύπτει από τη σχέση:

$$J = \frac{dP}{dS}$$

Και για την περίπτωση της ομόκεντρης σφαιρικής επιφάνειας ακτίνας R και εμβαδού $S=4\pi R^2$, η σχέση γίνεται ως εξής:

$$J = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Όπου $P = H$ ολική ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκπεμπόμενη από όλη την επιφάνεια του σε όλα τα μήκη κύματος.

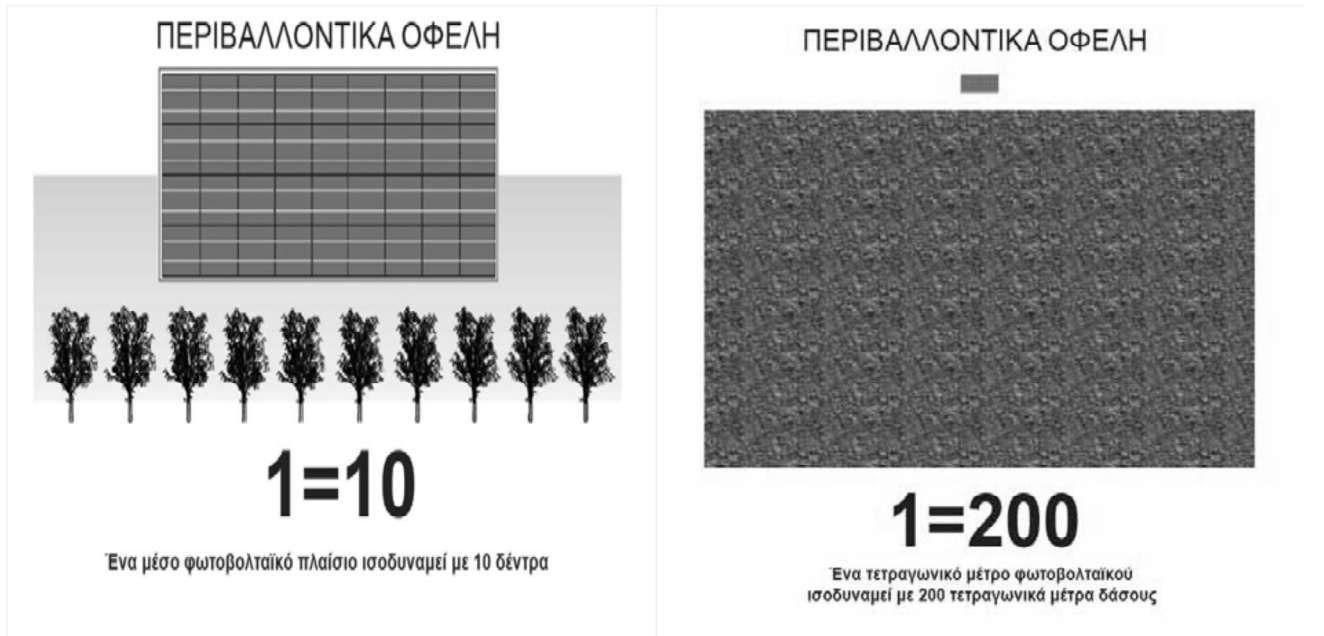
Ο κύκλος της ζωής στη γη είναι ένα φαινόμενο, που οφείλεται αποκλειστικά στον ήλιο. Ο ήλιος εκπέμπει συνεχόμενα προς την γη ενέργεια με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η γη απορροφά αυτήν την ενέργεια και την μετασχηματίζει μέσω της φωτοσύνθεσης στα φυτά για να αναπτυχθούν. Τα φυτοφάγα ζώα τρέφονται με φυτά, τα σαρκοφάγα με φυτοφάγα. Επίσης η ακτινοβολία προκαλεί θέρμανση του αέρα που προκαλεί την δημιουργία των ανέμων, την εξάτμιση των ωκεανών για την δημιουργία βροχής που με την σειρά της επιστρέφει σ' αυτούς ή δημιουργεί ποτάμια. Στην ουσία δηλαδή η ενέργεια που αντλούμε από τον άνεμο ή την βιομάζα προέρχεται έμμεσα από την ηλιακή ενέργεια, ενώ αυτή που παράγουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα αντλείται άμεσα από τον ήλιο. Δηλαδή η συντριπτική πλειοψηφία της καταναλισκόμενης ενέργειας παγκοσμίως, προέρχεται σήμερα με άμεσο ή έμμεσο τρόπο από τον ήλιο.

Η ηλιακή ενέργεια λοιπόν είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, που είναι φιλική προς το περιβάλλον, ελεύθερη και ανεπηρέαστη από τις αυξανόμενες τιμές ενέργειας και χρησιμοποιείται για θέρμανση, φωτισμό και παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανεξάντλητη αυτή πηγή ενέργειας δεν θα μπορούσε, έστω και με καθυστέρηση δεκαετιών, να παραμείνει ανεκμετάλλευτη από τον άνθρωπο. Τα τελευταία χρόνια προσφέρονται ώριμες τεχνολογικές λύσεις, οι οποίες εκμεταλλεύονται με οικονομικά σκόπιμο τρόπο την ηλιακή ενέργεια παράγοντας ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας κυρίως τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας φέρει εξαιρετικό ενδιαφέρον, καθώς είναι ανεξάντλητη και δεν προκαλεί κανέναν είδους μόλυνση ή ρύπανση στο περιβάλλον. Ενδεικτικά, η ενέργεια που στέλνει καθημερινά ο ήλιος στον πλανήτη, ισοδυναμεί με την ενέργεια που θα έπρεπε να παράγουν περισσότεροι από 150 εκατομμύρια μεγάλοι παραγωγής του ενός GW.

Τα οφέλη λοιπόν της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, είναι δύο, και είναι και τα δύο εξίσου σπουδαία:

- ❖ **Το πρώτο όφελος είναι περιβαλλοντικό** και έχει σημασία για τον κάθε άνθρωπο που ζει στον πλανήτη γη, αλλά και αυτόν που πρόκειται να γεννηθεί σ' αυτόν. Τα νούμερα είναι εκπληκτικά. Εάν στην Ελλάδα εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά πάρκα με συνολική ισχύ **1,0 GWp** (δηλαδή 1.000 MWp ή 1.000.000 kWp), με μέση διάρκεια λειτουργίας 25 έτη, θα αποτραπεί η εκπομπή περισσότερων από **437.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα**, το οποίο είναι το κύριο προϊόν καύσης που δημιουργεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το όφελος αυτό ισοδυναμεί με την ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που απορροφούν **1.000.000** περίπου δέντρα. Ενδεικτικά, η ΔΕΗ ΑΕ μόνο στην Δυτική Μακεδονία (Κοζάνη και Πτολεμαΐδα) έχει εγκατεστημένους λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγικής ισχύος **4,0 GWp**.



Εικόνα 1.1.2: Περιβαλλοντικά οφέλη

- ❖ **Το δεύτερο όφελος είναι οικονομικό και μάλιστα υψηλό**, εξαιρετικά μετρήσιμο σε παγκόσμιο επίπεδο. Το όφελος αυτό μπορεί να σχετισθεί με μακροοικονομικά στοιχεία, δηλαδή με τις θετικές του επιδράσεις στην πραγματική οικονομία, στην απασχόληση, στην εξοικονόμηση συμβατικών ενεργειακών αποθεμάτων, αλλά και στην διαπραγμάτευση των δικαιωμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πόσο μάλιστα όταν η συμβολή των φωτοβολταϊκών επενδύσεων στην ανάπτυξη είναι κατά **100% βιώσιμη**, δηλαδή γίνεται με πλήρη τήρηση των όρων αειφορίας. Το αναμενόμενο όμως όφελος μεταφέρεται και στον επενδυτή που με σοβαρότητα και ορθό σχεδιασμό, έχει την ευκαιρία να επενδύσει σε ένα νέο πεδίο, ενώ ταυτόχρονα με σχεδόν μηδενικό επιχειρηματικό κίνδυνο, να επιτύχει εγγυημένες αποδόσεις στο επενδυμένο του κεφάλαιο.



Εικόνα 1.1.3: Οικονομικά οφέλη

1.2 Η Γη και η ατμόσφαιρά της

Η Γη είναι ένας από τους 9 μεγαλύτερους πλανήτες του Ηλιακού Συστήματος. Ωστόσο με τη λέξη "Γη" εννοούμε επίσης και το έδαφος, κυρίως την ξηρά. Ακόμη εννοούμε μια χώρα, την πατρίδα, ολόκληρο τον Κόσμο.



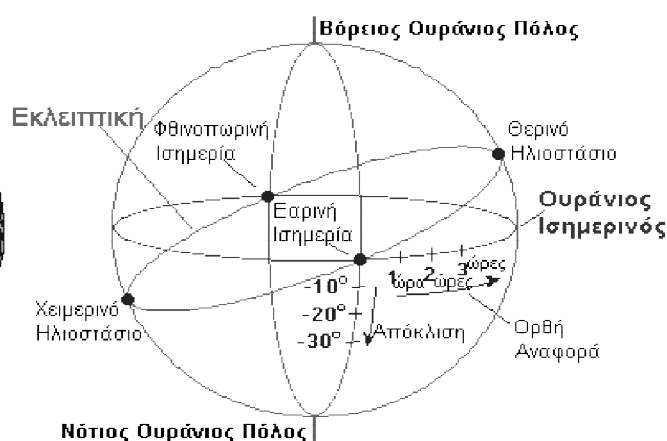
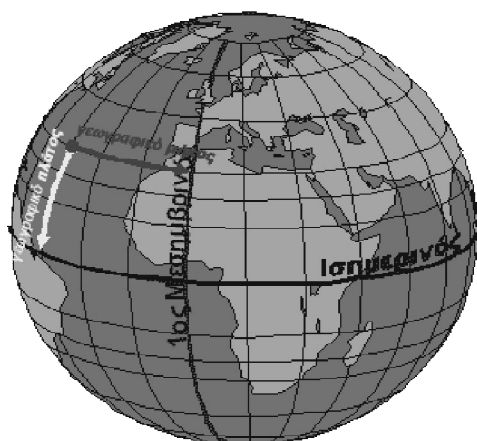
Εικόνα 1.2.4: Γη

Η γη όμως επειδή ασκούνται πάνω της ορισμένες δυνάμεις από τον ήλιο, περιστρέφεται γύρω από αυτόν σε ελλειπτική τροχιά. Επίσης περιστρέφεται και γύρω από τον άξονά της. Όπου η περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο μας καθορίζει τις διαφορετικές εποχές, ενώ η περιφορά της γύρω από τον άξονά της καθορίζει την διαδοχή ημέρας και νύχτας.

Το επίπεδο που εφάπτεται στο σημείο ενός τόπου της Γης λέγεται ορίζοντας. Κάθετη προς τον ορίζοντα του τόπου είναι η κατακόρυφη διεύθυνση ενός τόπου και τέμνει την ουράνια σφαίρα σε δύο σημεία. Πάνω από τον ορίζοντα του τόπου το σημείο που είναι πάντα ορατό λέγεται **Ζενίθ**, ενώ το σημείο που βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα είναι δηλαδή αντίθετο ονομάζεται **Ναδίρ**.

Στην επιφάνεια της Γης, για να προσδιοριστεί η θέση σημείων, χρησιμοποιούνται οι γεωγραφικές συντεταγμένες οι οποίες είναι:

- **Γεωγραφικό πλάτος (φ)** ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Η αλλιώς η απόσταση ενός τόπου από τον **ισημερινό**.
- **Γεωγραφικό μήκος (λ)** ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η στερεή γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού. Η αλλιώς η απόσταση ενός τόπου από τον **1ο μεσημβρινό**.



Εικόνες 1.2.5: Γεωγραφικές συντεταγμένες

Για τον προσδιορισμό της θέσης των ουράνιων σωμάτων χρησιμοποιούνται οι σφαιρικές συντεταγμένες, οι οποίες είναι:

- **Αζιμούθιο (α)** είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της θέσης του ουράνιου σώματος στο επίπεδο του ορίζοντα και του Βορρά.
- **Γωνία ύψους (γ)** είναι η γωνία μεταξύ του ουράνιου σώματος και του επιπέδου του ορίζοντα.
- **Μάζα αέρα (AM, Air mass)** περιγράφει τη μείωση της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη δίοδό της από την ατμόσφαιρα της γης. Αφορά στο μήκος της διαδρομής των ηλιακών ακτινών μέσα στην ατμόσφαιρα. Ο αριθμός που τη συνοδεύει, αντιστοιχεί στο μήκος της διαδρομής αυτή εκφρασμένο με μονάδα το πάχος της ατμόσφαιρας. Π.χ. AM1,5 είναι το μήκος διαδρομής μέσα στην ατμόσφαιρα, ίσο με 1,5 φορά το πάχος της.

Η Γη περιλαμβάνει την ατμόσφαιρα, η οποία αποτελείται από τα ακόλουθα στρώματα:

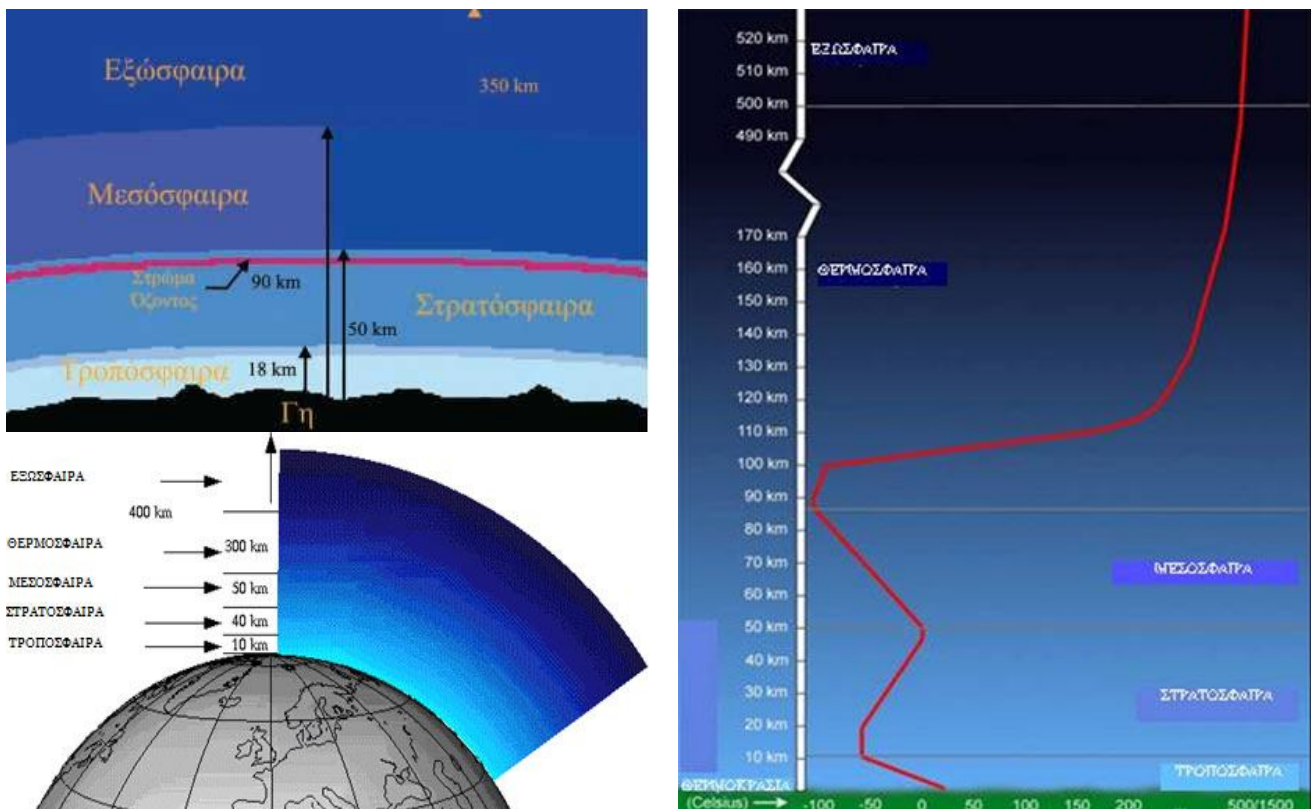
Τροπόσφαιρα: Είναι το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας, στο οποίο αναπτύσσονται τα μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως τα σύννεφα, οι άνεμοι, οι βροχές κ.λπ. Έχει πάχος 7-17 km και η θερμοκρασία μειώνεται από τους 20°C στους -60°C.

Στρατόσφαιρα: Βρίσκεται πάνω από την Τροπόσφαιρα, έχει πάχος 30km και η θερμοκρασία αυξάνεται από τους -60°C στους 0°C.

Μεσόσφαιρα: Βρίσκεται πάνω από τη Στρατόσφαιρα, έχει πάχος 30km και η θερμοκρασία μειώνεται από τους 0°C στους -90°C.

Θερμόσφαιρα: Βρίσκεται πάνω από τη Μεσόσφαιρα, έχει πάχος 210km και φτάνει σε ύψος 300km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η θερμοκρασία αυξάνεται εκθετικά από τους -90°C στους 1200°C.

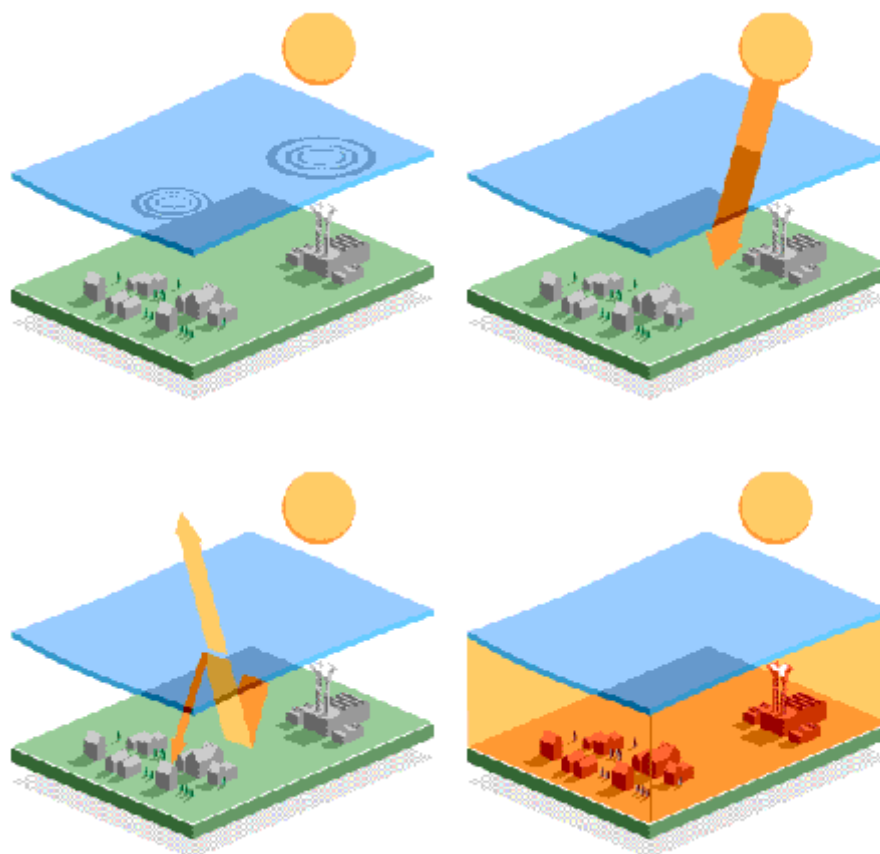
Εξώσφαιρα: Είναι το τελευταίο στρώμα πάνω από τα 300 km ύψος και η θερμοκρασία παραμένει στους 1200°C.



Εικόνες 1.2.6: Ατμόσφαιρα γης

1.3 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Από το σύνολο της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που φτάνει στη γη, ένα μέρος απορροφάται από αυτήν με προφανές αποτέλεσμα τη θέρμανσή της, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται και ξαναπερνά την ατμόσφαιρα προς το διάστημα. Μερικές όμως από τις ανθρώπινες ενέργειες (όπως παραγωγή καυσαερίων από τα εργοστάσια, τα αυτοκίνητα κ.α.) αυξάνουν την ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να εγκλωβίζονται περισσότερες ηλιακές ακτίνες και να αυξάνεται η θερμοκρασία στη Γη. Το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ γίνεται ένα «σύννεφο», που δεν αφήνει τη θερμοκρασία να διαφύγει και έτσι προκαλείται το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

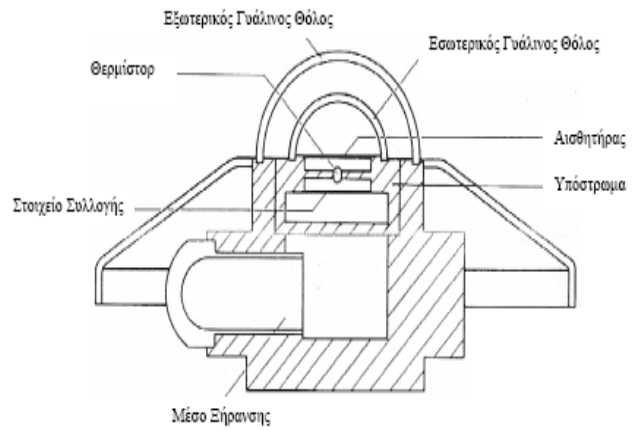


Εικόνες 1.3.7: Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου σε εικόνες

1.4 Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία μετριέται με ειδικά όργανα, για τα οποία θα γίνει μια μικρή αναφορά σε αυτήν την παράγραφο. Δηλαδή τι μετρούν και πως λειτουργούν.

- **Πυρανόμετρο** είναι όργανο μέτρησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και αποτελείται από δύο πλάκες. Όπου η πάνω πλάκα έχει μαύρη επιφάνεια και απορροφώντας την ακτινοβολία θερμαίνεται, ενώ η άλλη η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του οργάνου παραμένει στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στα άκρα των πλακών συνδέονται θερμοηλεκτρικά ζεύγη σε σειρά, όπου εμφανίζεται ηλεκτρική τάση στα άκρα των ζευγών λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.4.8: Πυρανόμετρο

- **Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος** είναι όργανο μέτρησης της απ' ευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας, καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας. Η λειτουργία του βασίζεται στην ηλεκτρίση ενός διηλεκτρικού υλικού όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του καθώς προσπίπτει η ακτινοβολία πάνω του.



Εικόνα 1.4.9: Πυρηλιόμετρο

- **Βολόμετρο** είναι όργανο μέτρησης το οποίο βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.
- **Φωτοδίοδος** είναι μια δίοδος επαφής ημιαγωγών η οποία όταν φωτίζεται στο εσωτερικό της παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

1.5 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ανάγκη παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια περιοχή καταναλώσεως καθορίζει την δημιουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Δηλαδή όπου υπάρχει ζήτηση το ΣΗΕ παρέχει ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της διαρκώς μεταβαλλόμενης με το χρόνο ζήτησης, η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ικανοποιεί τις μεταβολές αυτές καθώς και ορισμένους όρους ποιότητας. Οι τρεις παράγοντες που συνιστούν την ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι: 1) σταθερή συχνότητα, 2) σταθερή τάση, 3) υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.

Το μέγεθος του ΣΗΕ καθορίζει την δομή και την σύνθεσή του. Το ΣΗΕ διαχωρίζεται:

- στο **Σύστημα Παραγωγής** περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση.
- στο **Σύστημα Μεταφοράς** περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης που συνδέουν τους σταθμούς παραγωγής μεταξύ τους και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής.
- και στο **Σύστημα Διανομής** περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή σήμερα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΕ) με τη ροή ή την πτώση των υδάτων και τα τελευταία χρόνια με μεγαλύτερη ένταση από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.6 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι πηγές που μας παρέχονται καθημερινά και αέναα σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης και ανανεώνονται συνεχώς και έχουν σαν βασικής τους προέλευση τον ήλιο.

Στη σημερινή εποχή με τις τεράστιες προσδοκίες για ποιότητα στη ζωή του ανθρώπου η ανάγκη της κάλυψης των ενεργειακών του απαιτήσεων είναι μεγίστης σημασίας. Μία από τις σημαντικότερες μορφές ενέργειας είναι η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία καλύπτει σημαντική μερίδα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων κυρίως στις αναπτυσσόμενες και αναπτυγμένες χώρες. Για να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες προσφέρονται καθημερινά και καλύπτουν διάφορες ανάγκες του ανθρώπου, μετατρέπουν άλλες μορφές ενέργειας σε ηλεκτρική με διάφορους τρόπους όπως είναι οι εξής: η υδατόπτωση, η ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων, η βιομάζα, η γεωθερμική ενέργεια, η αιολική ενέργεια και η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια με την οποία θα ασχοληθούμε και θα αναλυθεί εκτενέστερα. Τα είδη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.), αναλύονται παρακάτω:

Η υδατόπτωση

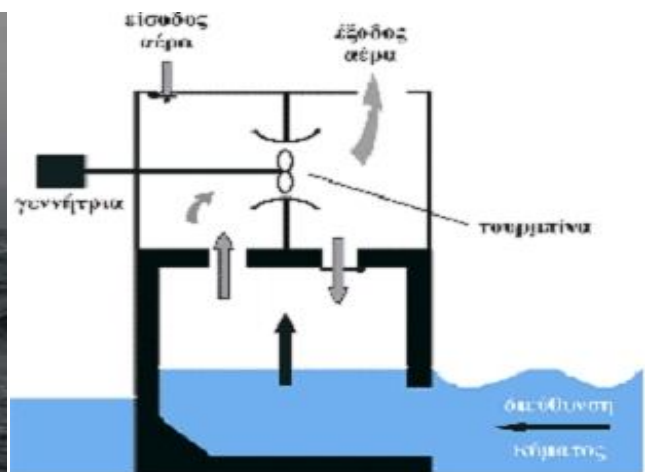
Είναι η δυναμική ενέργεια των υδάτινων πόρων στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια στα οποία κινούνται υδροστρόβιλοι που με τη σειρά τους θέτουν σε κίνηση ηλεκτρογεννήτριες, οι οποίες παράγουν ηλεκτρισμό. Τα υδροφράγματα δίνουν την δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της υδατόπτωσης.



Εικόνες 1.6.10: Υδατόπτωση

Η ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων

Μια διάταξη που μας δείχνει τον τρόπο που παράγει ηλεκτρική ενέργεια με εκμετάλλευση της ενέργειας κυμάτων αποτελείται από τέσσερις κυλίνδρους, με αρθρωτή κίνηση μεταξύ τους σε κατακόρυφο επίπεδο. Υπό την επίδραση του κυματισμού αλλάζει η γωνία μεταξύ τους με αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έμβολα τοποθετημένα πάνω και κάτω, στις πλευρές που συνδέονται μεταξύ τους.



Εικόνες 1.6.11: Ενέργεια κυμάτων

Η βιομάζα

Η θερμότητα από την καύση της βιομάζας αποτελεί ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το αποτέλεσμα της είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπολείμματα από την συλλογή βαμβακιού και καλαμποκιού χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αιθανόλης. Υπολείμματα κυτταρίνης καίγονται απ' ευθείας.



Εργοστάσιο μετατροπής της βιομάζας σε αιθανόλη.



Εικόνες 1.6.12: Βιομάζα

Η γεωθερμική ενέργεια

Αφορά την ενέργεια των θερμών νερών που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Γεωθερμικές πηγές και μονάδες που εκμεταλλεύονται την ενέργεια τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνες 1.6.13: Γεωθερμική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια

Παράγει ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών. Δηλαδή ο άνεμος κινεί τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τα οποία θέτουν σε λειτουργία μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.

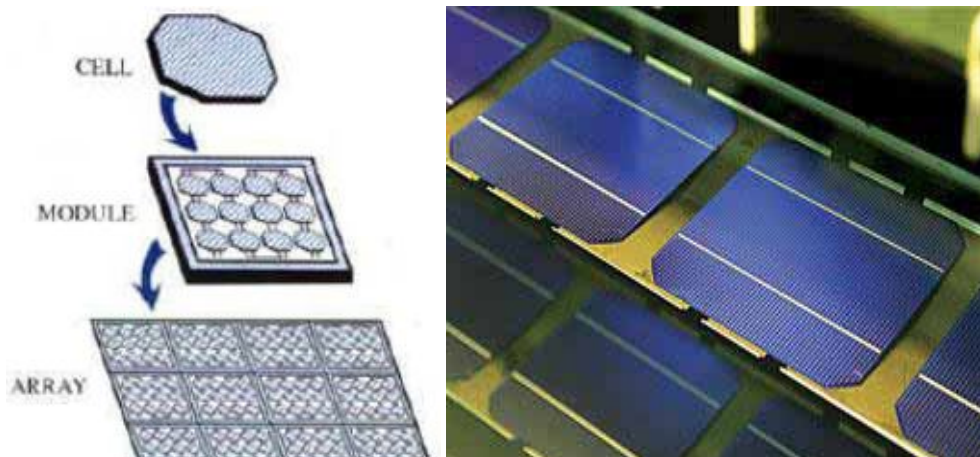




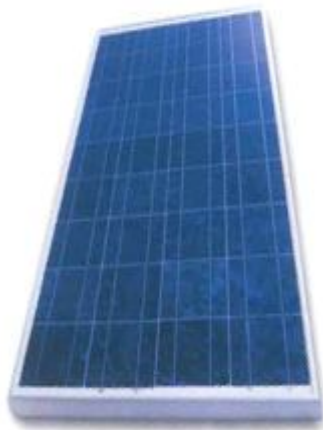
Εικόνες 1.6.14: Αιολική ενέργεια

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

Τα φβ συστήματα χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό. Αυτό γίνεται με το φβ στοιχείο το οποίο είναι ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή που όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Με αυτή την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας θα ασχοληθεί η παρούσα εργασία.



Εικόνες 1.6.15: Φωτοβολταϊκό στοιχείο



Φωτοβολταϊκό πλαίσιο



ΦΒ πλαίσιο τεχνολογίας CdTe



Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Φωτοβολταϊκά πλαίσια



Εικόνες 1.6.16: Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

1.7 Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα

1.7.1 Η ελληνική πραγματικότητα

Οι υποχρεώσεις της Ελλάδας που απορρέουν από τη δέσμευσή της στα πλαίσια της συμφωνίας για τη μείωση των εκπομπών των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως αυτά διασαφηνίστηκαν στο πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπουν συγκράτηση του ρυθμού αύξησης κατά το έτος του 2010 του διοξειδίου του άνθρακα κατά 25% σε σχέση με το έτος βάση 1990. Σ' αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η οδηγία 2001/77 της Ευρωπαϊκής Ένωσης «Για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας» η οποία προβλέπει ενδεικτικό στόχο κάλυψης από ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές ίσο με 20,1% της ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας κατά το έτος 2010 για την Ελλάδα.

Η κατασκευή σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας καθώς και η κατασκευή μικρών φραγμάτων και αιολικών πάρκων είναι από τα μέτρα που κινούνται προς την κατεύθυνση μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου, ταυτόχρονα με την προσπάθεια κάλυψης της συνεχώς αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Μια σειρά παραγόντων καθιστούν ευνοϊκότερη τη δημιουργία διεσπαρμένων μονάδων και μικροδικτύων στον ελληνικό χώρο. Πολλοί από αυτούς έχουν να κάνουν με τη μορφολογία της Ελλάδας.

Με δεδομένο ότι το 60% της ενέργειας που δαπανάται για οικιακή χρήση - καθώς και το 50% της ενέργειας για εμπορική χρήση-καταναλώνεται για την θέρμανση των κτιρίων, είναι εμφανής η σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που θα προέκυπτε με την εγκατάσταση περισσότερων μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας κοντά σε αστικά κέντρα ή επαρχιακές πόλεις. Σήμερα, σε λίγες μόνο πόλεις που βρίσκονται κοντά σε θερμικούς σταθμούς στη βόρεια Ελλάδα έχουν εγκατασταθεί δίκτυα τηλεθέρμανσης, ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις των σταθμών που απάγουν την θερμότητα σε θάλασσες ή ποτάμια, επηρεάζοντας αρνητικά τα τοπικά οικοσυστήματα (ευτροφισμός). Για το ηπειρωτικό σύστημα μια στροφή στη διανεμημένη παραγωγή θα εξομάλυνε περισσότερο την ανισορροπία μεταξύ του τόπου παραγωγής και κατανάλωσης. Ενώ δηλαδή το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται στη βόρεια Ελλάδα, το ένα τρίτο της κατανάλωσης γίνεται στην Αττική πράγμα που συμβάλλει στις μεγάλες απώλειες κατά την μεταφορά της ενέργειας μέσω γραμμών υψηλής τάσης. Για το ελληνικό σύστημα οι απώλειες αυτές ανέρχονται στο 12% της παραγόμενης ενέργειας, σημαντικό μέρος των οποίων θα μπορούσε να αποφευχθεί αν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παράγονταν πιο κοντά στους τόπους κατανάλωσης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στον τόπο κατανάλωσής της, θα μπορούσε επιπρόσθετα να συμβάλει στο μείζον θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς θα ευαισθητοποιούσε περισσότερο τους καταναλωτές.

Ο δεύτερος βασικός λόγος έχει να κάνει με το νησιωτικό χαρακτήρα της Ελλάδας, ο οποίος και καθιστά αναπόφευκτη την ύπαρξη πολλών μικρών αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων, μη διασυνδεδεμένων φυσικά με το ηπειρωτικό δίκτυο. Η παραγωγή ενέργειας στα νησιά γίνεται ως επί το πλείστο από ντίζελ (και σε ελάχιστα και από μαζούτ). Η παραγωγή αυτή αντιστοιχεί στο 7,1% της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τόσο το ντίζελ όσο και το αργό πετρέλαιο που χρησιμοποιούνται εισάγονται. Δεδομένου του μεγάλου ρυθμού αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας 5,5% για το μη διασυνδεδεμένο σύστημα, είναι αυτονόητη η ωφέλεια που θα προέκυπτε για την ενεργειακή απεξάρτηση της Ελλάδας από τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα, στο βαθμό που αυτό είναι τεχνικά επιτρεπτό.

Δεδομένη είναι εξάλλου η μειωμένη αξιοπιστία των μικρών συστημάτων που αποτελούνται μόνο από ντιζελογεννήτριες, με συνεχείς βυθίσεις της τάσης, μεταβολή της συχνότητας και διακοπές. Η δημιουργία μικροδικτύων με διεσπαρμένες μονάδες ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με μικροστροβίλους ή σφονδύλους υψηλής αδράνειας μπορεί να αποδειχθεί πιο οικονομική λύση απ' ότι με τη διασύνδεση μιας περιοχής με το υπάρχον δίκτυο.

Ωστόσο, πολλά είναι τα προβλήματα που συνδέονται με την διείσδυση των ΑΠΕ και άλλων μικρομονάδων στο εγχώριο σύστημα παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικός παράγοντας είναι η διαφορετική φιλοσοφία πάνω στην οποία χτίστηκε το ελληνικό σύστημα. Ένα σύστημα που μέχρι σήμερα βασίζεται πάνω στην συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και ακτινωτή μεταφορά προς τις καταναλώσεις με μονόδρομη ροή ισχύος, συναντά μια σειρά εμποδίων που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο, την ευστάθεια, τις προστασίες και την αξιοπιστία στην μετατροπή του σε ένα δίκτυο διανεμημένης παραγωγής.

Επιπλέον απαιτούνται σημαντικές παρεμβάσεις στο δίκτυο διανομής και ελέγχου, ώστε να μπορούν να διαχειριστούν την διανεμημένη παραγωγή τόσο από τις μονάδες ανανεώσιμων πηγών όσο και από τις άλλες μικρές μονάδες. Εκτεταμένη μελέτη για παράδειγμα θα απαιτούσε και η συμβολή των μικροδικτύων που διασυνδέονται με το κεντρικό δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης στη στάθμη βραχυκύκλωσης αυτού, καθώς και η συμπεριφορά τους σε σφάλματα ή γενικές διακοπές.

1.7.2 Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα

Σε αναντιστοιχία με τις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε καταβάλλουν μια μεγάλη προσπάθεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φβ, στην Ελλάδα αυτή παραμένει περιθωριακή. Μέχρι σήμερα η εγκατάσταση φβ συστημάτων αφορά ως επί το πλείστον σε περιπτώσεις στις οποίες είναι αδύνατη η τροφοδότηση από το κεντρικό δίκτυο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι οι πολλές περιπτώσεις αυθαιρέτων κτισμάτων που δεν δικαιούνται ρεύμα από το κεντρικό δίκτυο, η τροφοδότηση φάρων, κεραιών κινητής τηλεφωνίας και ραδιοσταθμών, και οικισμοί οι οποίοι είναι απομονωμένοι από το κεντρικό δίκτυο όπως μικρά νησιά.

Προκαλεί μεγάλη αντίφαση το γεγονός ότι ενώ το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι σχεδόν διπλάσιο από των περισσότερων βόρειων ευρωπαϊκών χωρών, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο, είναι η μικρότερη από κάθε άλλη ευρωπαϊκή χώρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Γερμανία στην οποία το μέσο ηλιακό δυναμικό είναι $2,8 \text{ kWh/m}^2/\text{ημέρα}$ έχει σήμερα εγκατεστημένα $277,3 \text{ MW}$ ηλιακών συστοιχιών. Στην Ελλάδα με μέσο δυναμικό $5 \text{ kWh/m}^2/\text{ημέρα}$, η εγκατεστημένη ισχύς είναι μόλις $2,3 \text{ MW}$. Απ' την άλλη βέβαια η Ελλάδα κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακών συλλεκτών για τη θέρμανση του ζεστού νερού, καλύπτοντας το 22% των αναγκών της σε θέρμανση του νερού, και μάλιστα είναι η πρώτη εξαγωγική χώρα σε συλλέκτες παγκοσμίως.

Ένα σενάριο αξιοσημείωτης διείσδυσης της παραγωγής ενέργειας από φβ στα μικρά νησιωτικά δίκτυα, θα συνέβαλε αφενός στη μεγαλύτερη σταθερότητα του δικτύου, δεδομένου ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φβ γεννήτρια δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις, ιδιαίτερα όταν υπάρχει συνεχής ηλιοφάνεια, αφετέρου στην μείωση της ακριβής κάλυψης των αιχμών ζήτησης που παρουσιάζονται ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες και τις μεσημεριανές ώρες λόγω της χρήσης των κλιματιστικών και της αυξημένης τουριστικής κίνησης.

Αν και οι φβ γεννήτριες δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να αντιμετωπιστούν ως σταθμοί βάσης από την ηλεκτρική εταιρία, έστω και για συγκεκριμένο διάστημα της ημέρας, σίγουρα μειώνουν κατά ορισμένο ποσοστό το συνολικό φορτίο ζήτησης στο δίκτυο διανομής. Η παραπάνω παρατήρηση αποκτά μεγάλη σημασία σε περιοχές μεγάλης τουριστικής κίνησης όπως για παράδειγμα την Κρήτη, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στη μέση κατανάλωση τους θερινούς μήνες απ' ότι τους χειμερινούς (πενταπλάσια στο συγκεκριμένο παράδειγμα). Είναι προφανές ότι η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που συναντάται τους θερινούς μήνες συνεχούς ηλιοφάνειας, θα μπορούσε να ανακουφίσει το δίκτυο από τις αιχμές, καθώς και τα σχέδια του διαχειριστή του δικτύου για τις μελλοντικές επεκτάσεις στον τομέα της παραγωγής και της διανομής, καθώς θα απαιτούνται πολύ λιγότερες εφεδρείες.

Ίσως έχει πρακτική αξία η σύγκριση του αυξημένου κόστους που θα συνεπαγόταν η εγκατάσταση χιλιάδων για παράδειγμα μικρών αυτόνομων συστημάτων με γεννήτριες ΑΠΕ σε κατοικίες ή οικισμούς, με το κόστος αθροιστικά της παραγωγής των αιχμών από το ντίζελ, της μακροπρόθεσμης εγκατάστασης νέων μεγάλων μονάδων παραγωγής από συμβατικές πηγές και της επέκτασης του εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής για την κάλυψη της επιπλέον φόρτισης.

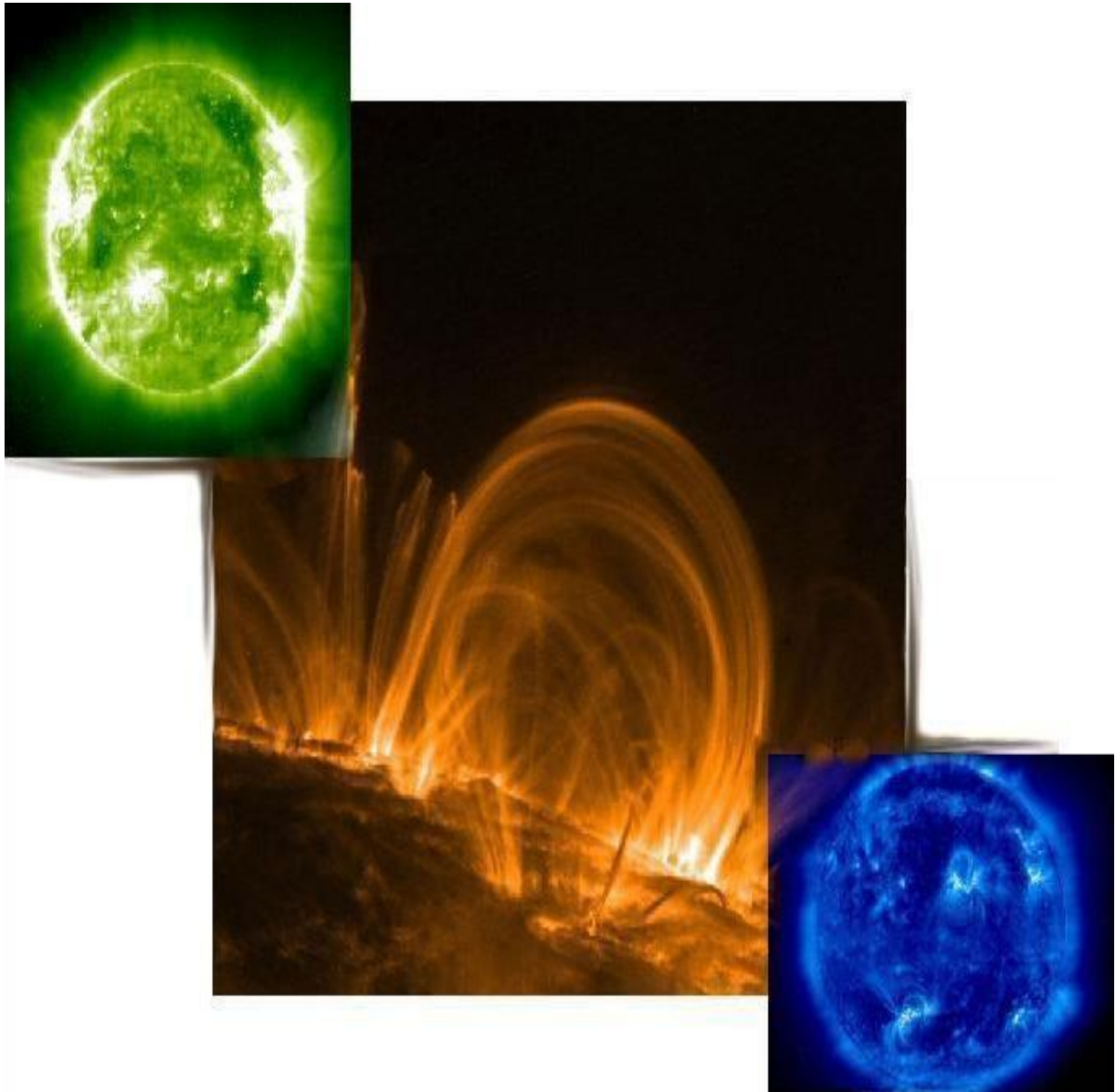
Παράλληλα θα μειωνόταν το ποσοστό των βλαβών στα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης που προκύπτουν από την υπερφόρτιση τους σε περιόδους μεγάλων αιχμών. Η διασύνδεση τέτοιων διατάξεων παραγωγής με το κεντρικό δίκτυο μέσω μικροδικτύων θα είχε ως αποτέλεσμα την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σε περίπτωση διακοπής στο κεντρικό δίκτυο. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου απαιτείται αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τυπικό παράδειγμα αποτελεί ένα νοσοκομείο, στο οποίο μεγάλο μέρος των φορτίων του είναι επείγοντα. Ένα μικροδίκτυο σε νοσοκομείο θα μπορούσε να περιλαμβάνει μια μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, έχοντας σαν καύσιμο το ντίζελ, το φυσικό αέριο ή κυψέλες καυσίμου. Η διασύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο, θα εξασφάλιζε την παροχή μέρους της ενέργειας για την κάλυψη της κατανάλωσης από το τελευταίο. Σε περίπτωση δε σφάλματος ή διακοπής στο κεντρικό δίκτυο, η αυτόματη απόζευξη από αυτό, θα εξασφάλιζε την διατήρηση της τάσης στο κτίριο. Ενώ θα ήταν λογικό λοιπόν μια χώρα σαν την Ελλάδα, με τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα να πρωτοστατεί στην προώθηση του ηλιακού ηλεκτρισμού, δυστυχώς οι στατιστικές την κατατάσσουν απ' τις τελευταίες στην εγκατεστημένη ισχύ φβ ισχύος ανά κάτοικο. Οι λόγοι που έχουν να κάνουν με αυτό το –εν πρώτοις– παράδοξο είναι πολλοί. Βασικότερος όμως είναι το γεγονός του φτηνού ηλεκτρισμού στην Ελλάδα που προέρχεται από τα μεγάλα λιγνιτικά πεδία, αλλά και τα υδροηλεκτρικά φράγματα.

Παραπέρα, η Ελλάδα κατατάσσεται στις τελευταίες χώρες όσον αφορά τα κίνητρα που παρέχονται από την πολιτεία για την εγκατάσταση φβ από ιδιώτες. Αυτό προκύπτει τόσο από τη μη ύπαρξη επιδότησης και φοροελαφρύνσεων για την αγορά του ακριβού εξοπλισμού της ηλιακής γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος, όσο και από τη μη επιδότηση της ηλιακής κιλοβατώρας, από τη στιγμή που ο παροχέας του δικτύου αγοράζει τον ηλεκτρισμό που προέρχεται από φβ στην τιμή πώλησης. Παρά ταύτα το εθνικό σχέδιο δράσης για την κλιματική αλλαγή προβλέπει την εγκατάσταση συνολικά 15MW φβ μέχρι το 2010. Για την επίτευξη αυτού του στόχου προς το παρόν κίνητρα δίνονται μόνο για εμπορικούς σκοπούς, τη δημιουργία δηλαδή μεγάλων ηλιακών πάρκων. Αναφορές υπάρχουν στο συγκεκριμένο σχέδιο για ένα μέτρο παρόμοιο με αυτό που έχουν θεσπίσει άλλα ευρωπαϊκά κράτη, για την εγκατάσταση 10.000 ηλιακών συστημάτων σε στέγες σπιτιών. Η συμβολή πάντως της ηλιακής ενέργειας για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου στην Ελλάδα, εμφανίζεται στις αναφορές των αρμόδιων φορέων πολύ υποτιμημένη. Η μελέτη αυτή ενός πρότυπου μικροδικτύου, τόσο σε απομονωμένη λειτουργία όσο και σε παράλληλη λειτουργία με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης, ελπίζουμε να συμβάλει στην προώθηση των ΑΠΕ αφενός και αφετέρου στην ανάπτυξη μεθόδων αξιόπιστης, αποδοτικής και φιλικής προς το περιβάλλον παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και σε απομονωμένες περιοχές. Οι στόχοι αυτοί με τη σειρά τους μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπλήρωση των διεθνών δεσμεύσεων για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, την προστασία του περιβάλλοντος και την ενεργειακή ανεξάρτηση από το πετρέλαιο. Από την πλευρά του ηλεκτρολόγου μηχανικού, αποκτά μεγάλη σημασία η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που αν και μικρό στην παραγωγική ικανότητα, λειτουργεί με τις βασικές αρχές των μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων, και εκμεταλλεύεται την πιο άφθονη και καθαρή ενεργειακή πηγή στον πλανήτη, τον ήλιο.

ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ: Το Ηράκλειο δέχεται 15% παραπάνω ενέργεια από τη Θεσσαλονίκη, 32% από Μόναχο, Γερμανία και 65% από Λονδίνο, Αγγλία.

2 Ηλιακή ακτινοβολία



2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Το φάσμα συχνοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνει συχνότητες με μήκος κύματος από 0.3 έως 1.7 μm , με μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο στην περιοχή των 0.5 μm . Η συνολική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου (ισχύς) που προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος (Irradiance) ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετράται σε kW/m^2 , θα συμβολίζεται με το γράμμα G. Η τιμή της σε ορισμένη ώρα και σημείο στην επιφάνεια της γης, εξαρτάται έντονα από την θέση του ήλιου στον ουρανό αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός των ΦΒ συστημάτων στην πράξη βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα μετρήσεων της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της θέσης εγκατάστασης.

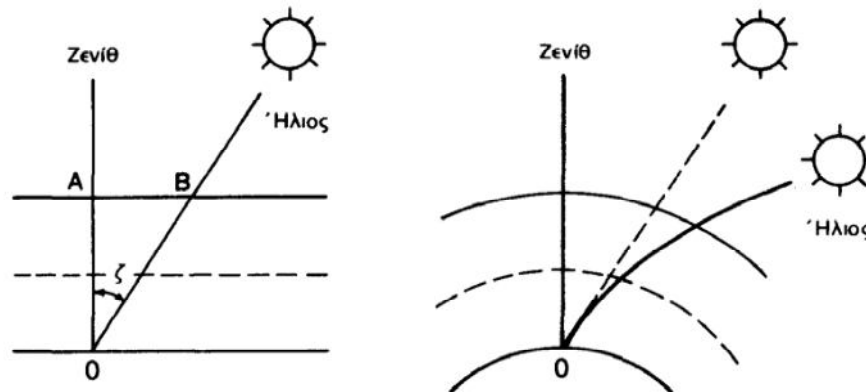
2.1.1 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης, ένα μέρος της απορροφάται από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα κλπ., ένα άλλο διαχέεται εντός της ατμόσφαιρας και ένα τρίτο προσπίπτει απευθείας στην επιφάνεια του συλλέκτη (απευθείας ή ακτινική ακτινοβολία). Η συνολική ακτινοβολία (global radiation) που φθάνει στην επιφάνεια του συλλέκτη, όταν αυτός είναι οριζόντια τοποθετημένος, είναι το άθροισμα της ακτινικής ή άμεσης ακτινοβολίας (beam ή direct radiation), που προσπίπτει στο συλλέκτη απευθείας και της διάχυτης ακτινοβολίας (diffuse radiation), που προέρχεται από αυτήν που διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Επί πλέον, όταν ο συλλέκτης εγκαθίσταται με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο, όπως και συνηθίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, προστίθεται και ένα μικρό σχετικά ποσοστό προερχόμενο από ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα (albedo radiation). Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας, ιδίως σε όχι πολύ βόρειες περιοχές, προέρχεται από την ακτινική ακτινοβολία, σημαντική όμως είναι και η συμβολή της διάχυτης.

2.1.2 Ύπαρξη ατμόσφαιρας-ακτινοβολία ενός ήλιου

Συμβατικά, ως στοιχείο χαρακτηρισμού της επίδρασης που έχει η ύπαρξη της ατμόσφαιρας, όταν δεν υπάρχουν σύννεφα, λαμβάνεται το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα, μέχρι την στάθμη της θάλασσας και ονομάζεται αέριος μάζα (air mass)-AM. Η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα κυμαίνεται σε μικρά όρια περί τη μέση τιμή $G_{sc}=1.350 \text{ kW}/\text{m}^2$, ονομάζεται ηλιακή σταθερά και σημειώνεται ως AM0. Επειδή μάλιστα η ακτινοβολία διανύει μεγαλύτερο διάστημα στην ατμόσφαιρα για να φτάσει στην επιφάνεια της γης τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, παθαίνει περισσότερη απορρόφηση και έτσι η τιμή της έντασης είναι μικρότερη του $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ κατά τις ώρες αυτές.

Το μήκος της αέριας μάζας, αν αγνοηθεί η καμπυλότητα της γης, ισούται με το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας δια του συνημίτονου της ζενιθιακής γωνίας θ_z , δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία γη-ήλιος με την κατακόρυφο (ζενίθ) στο συγκεκριμένο σημείο (Σχήμα 3.1.2.1)



Σχήμα 3.1.2.1: Εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου

Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της. Συγκεκριμένα, ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως AM1.5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία 60° κ.λπ. Το μηδέν της κλίμακας (AM0) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο.

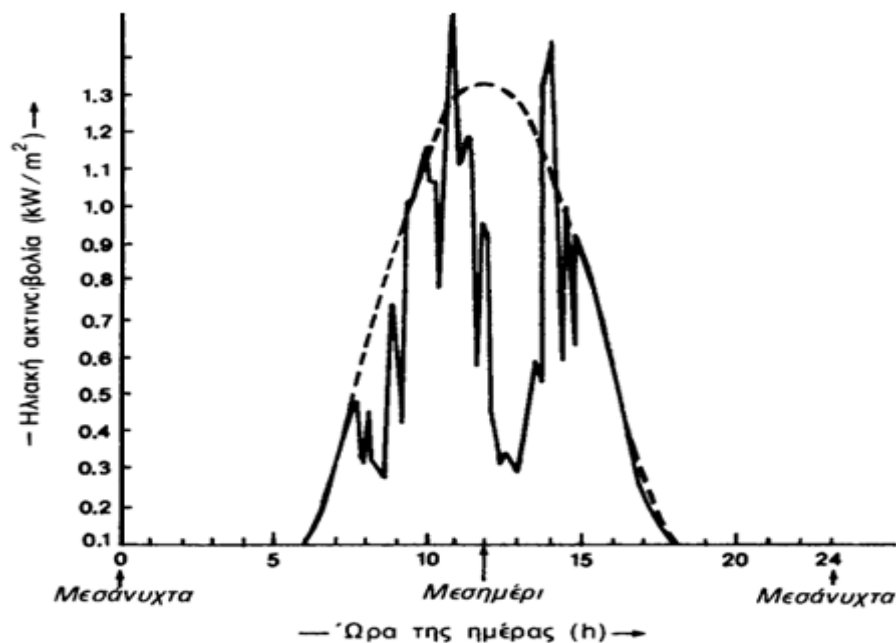
Στον πίνακα 3.1 γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα. Πάντως, η παραπάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι π.χ. εκτός από τις τιμές του πίνακα, η AM0 αναφέρεται επίσης ως 1.353 kW/m^2 ή 1.367 kW/m^2 και η AM2 ως 0.740 kW/m^2 .

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς W/m^2	Μέση ενέργεια των φωτονίων
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	1350	1,48eV
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060	1,32eV
AM2	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38eV
AM3	Απόσταση του ήλιου $70,5^{\circ}$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750	1,21eV

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass).

Η ηλιακή ακτινοβολία AM1.5 έχει πυκνότητα 935W/m^2 και αποτελεί χονδρικά μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται σε επιφάνεια κάθετη προς την ακτινοβολία και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής(καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λπ.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα 1000W/m^2 ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός ήλιου(ή ενός πλήρους ήλιου) και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής(peak) - W_p των φβ στοιχείων, η οποία και λαμβάνεται ως η ονομαστική ισχύς αναφοράς αυτών. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την αναφορά στην πυκνότητα της ακτινοβολίας στις συγκεντρωτικές φβ εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα.

Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους, δεν διαφέρει πάρα πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή 1kW/m^2 αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση. Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη, όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.1.2.2.



Σχήμα 3.1.2.2: Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των φωτεινών ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση

Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης, καταγράφεται σαν μια πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμη, εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

Ο άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας της διαμόρφωσης των μετεωρολογικών συνθηκών, δηλαδή η ατμοσφαιρική υγρασία, χαρακτηρίζεται από το ύψος της στήλης του νερού (μετρημένης σε cm), που σχηματίζεται από την υποθετική συμπύκνωση του συνόλου των υδρατμών της ατμόσφαιρας, στον συγκεκριμένο τόπο και χρόνο.

2.1.3 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά. Επίσης, επηρεάζονται σε αξιόλογο βαθμό και από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες, όπως οι ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις, η ατμοσφαιρική ρύπανση κλπ.

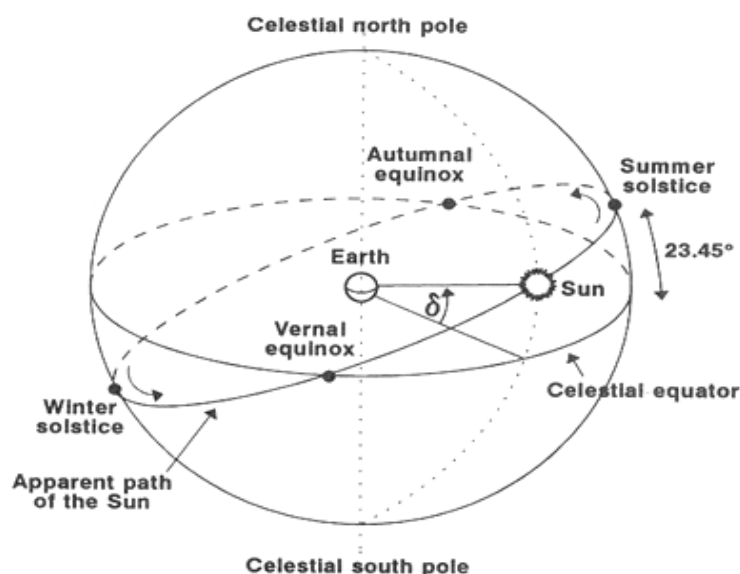
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την κίνηση της γης περί τον ήλιο, μπορεί να υπολογίζεται με ακρίβεια, με βάση γεωμετρικές σχέσεις. Αντίθετα η μείωση που υφίσταται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από την κατάστασή της.

2.1.3.1 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της θέσης του ήλιου

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η σχετική θέση του ήλιου και της γης, που περιγράφεται απλούστερα με βάση την ουράνια σφαίρα, στο κέντρο της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται η γη. Το επίπεδο του ισημερινού της γης τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας της γης στους ουράνιους πόλους. Η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού. Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο φαίνεται ως η κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα, σε ελλειπτική τροχιά, το επίπεδο της οποίας ονομάζεται εκλειπτική και σχηματίζει γωνία 23.45° με το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού (Σχήμα 3.1.3.1.3). Η γωνία δ μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης και του επιπέδου του ισημερινού, ονομάζεται ηλιακή απόκλιση (declination) και υπολογίζεται από τη σχέση:

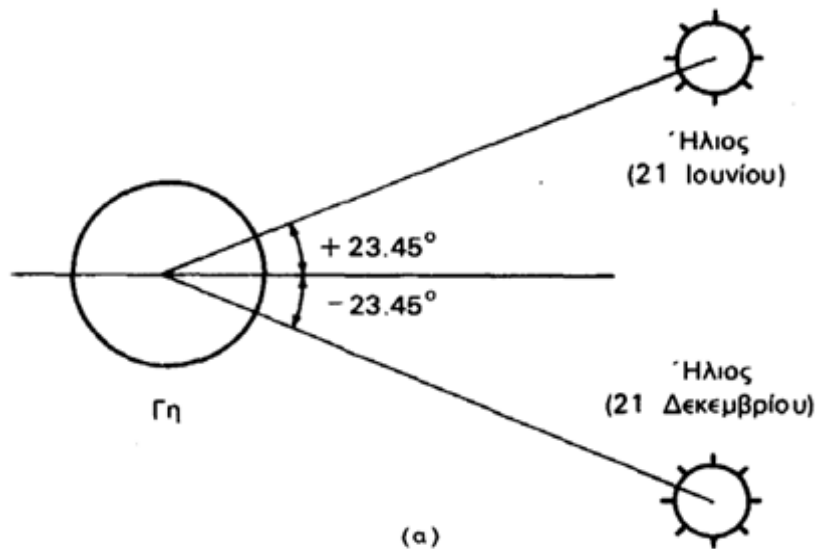
$$\delta = 23,45 * \sin \frac{360(284 + n)}{365}$$

Όπου $n=1$ (1η Ιανουαρίου) έως 365 (31η Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.



Σχήμα 3.1.3.1.3: Η ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου

Είναι $\delta=0^\circ$ κατά την εαρινή ισημερία (21 Μαρτίου) και την φθινοπωρινή ισημερία (21 Σεπτεμβρίου), οπότε ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή και δύει στη δύση. Επίσης είναι $\delta=23.45^\circ$ την 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και $\delta=-23.45^\circ$ την 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο) (Σχήμα 3.1.3.1.4).



Σχήμα 3.1.3.1.4: Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο.

Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου, κατά τη διάρκεια του έτους, είναι ότι οι κυκλικές τροχιές του διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερα ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα διαγράφονται νοτιότερα, και συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σ' έναν τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει τον μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των ηλιοφεγγών ημερών, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας. Για παράδειγμα, στον πίνακα 3.2 δίνονται οι τιμές για τα χαρακτηριστικά ορισμένων εποχών στην Αθήνα, και είναι φανερές οι μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

α) Ύψος του ήλιου, θεωρητική ηλιοφάνεια και μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας.			
Ημερομηνία	Ύψος του ήλιου το μεσημέρι	Θεωρητική ηλιοφάνεια	Μέση θερμοκρασία
21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία)	$51,08^\circ$	11,9 ώρες	13°C
21 Ιουλίου (θερινό ηλιοστάσιο)	$75,25^\circ$	14,8 ώρες	25°C
21 Σεπτεμβρίου (φθινοπωρινή ισημερία)	$51,08^\circ$	11,9 ώρες	23°C
21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο)	$28,35^\circ$	9,5 ώρες	11°C

β) Μέσος αριθμός ηλιοφεγγών και ανήλιων ημερών και οι ώρες της μέσης πραγματικής ηλιοφάνειας στους διάφορους μήνες του έτους.

Είδος ημερών	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Ηλιοφεγγείς	3,2	4,3	5,6	7,5	7,0	11,9	21,3	21,6	15,4	8,9	3,8	3,4
Ανήλιες	3,7	3,1	2,5	1,1	0,5	0,1	0,0	0,0	0,2	1,0	2,5	4,1
Ηλιοφάνεια (ώρες)	123	139	180	233	303	335	373	357	277	211	162	127

Πίνακας 3.2: Μετεωρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά στην Αθήνα.

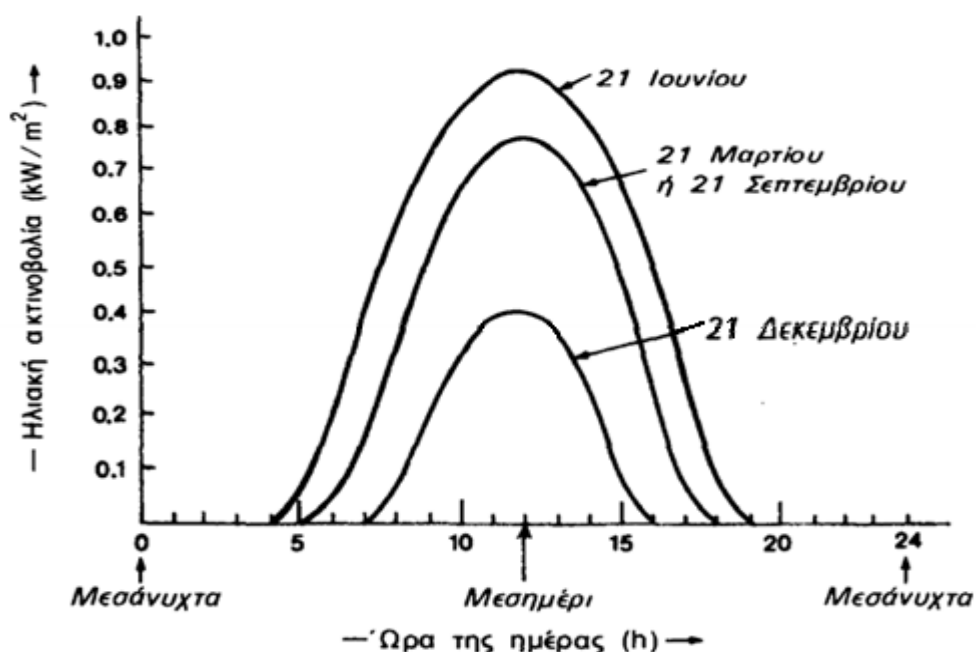
2.1.3.2 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της κίνησης της γης κατά τη διάρκεια του έτους

Όπως είναι γνωστό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του 24-ώρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της, και κατά την διάρκεια του έτους, λόγω της περιστροφής της γης στο επίπεδο της εκλειπτικής. Η μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας. Αν είναι G_{on} η ένταση της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, που εκφράζει και την ακτινική ακτινοβολία αφού εκτός της ατμόσφαιρας δεν υπάρχουν οι υπόλοιπες συνιστώσες της ακτινοβολίας, σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου και G_{sc} η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς, θα είναι:

$$G_{on} = G_{sc} * (1 + 0,033 * \cos \frac{360}{365} * n)$$

Όπου $n=1$ (1η Ιανουαρίου) έως 365 (31η Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στο Σχήμα 3.1.3.2.5 δείχνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο, χειμώνα) με συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού.



Σχήμα 3.1.3.2.5: Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια φωτεινών ωρών με εντελώς καθαρό ουρανό.

2.1.3.3 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας

Η ημερήσια κίνηση της γης απεικονίζεται με την ημερήσια περιστροφή της ουράνιας σφαίρας περί τον πολικό άξονα και η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία ω , η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περνάει από τον ήλιο και του μεσημβρινού που περνάει από την θέση της εγκατάστασης (Σχήμα 3.1.3.3.6 (α)). Είναι $\omega=0$ κατά το ηλιακό μεσημέρι και αυξάνει με ρυθμό $150/h=0,25/min$. Λαμβάνεται $\omega < 0$ για π.μ. και $\omega > 0$ για μ.μ. Η ωριαία γωνία του ήλιου ω υπολογίζεται από τη σχέση: **$\omega = (t_s - 12) * 15$**

Όπου ω : η ωριαία γωνία ήλιου σε ώρες ,
 t_s : ο ηλιακός χρόνος σε ώρες.

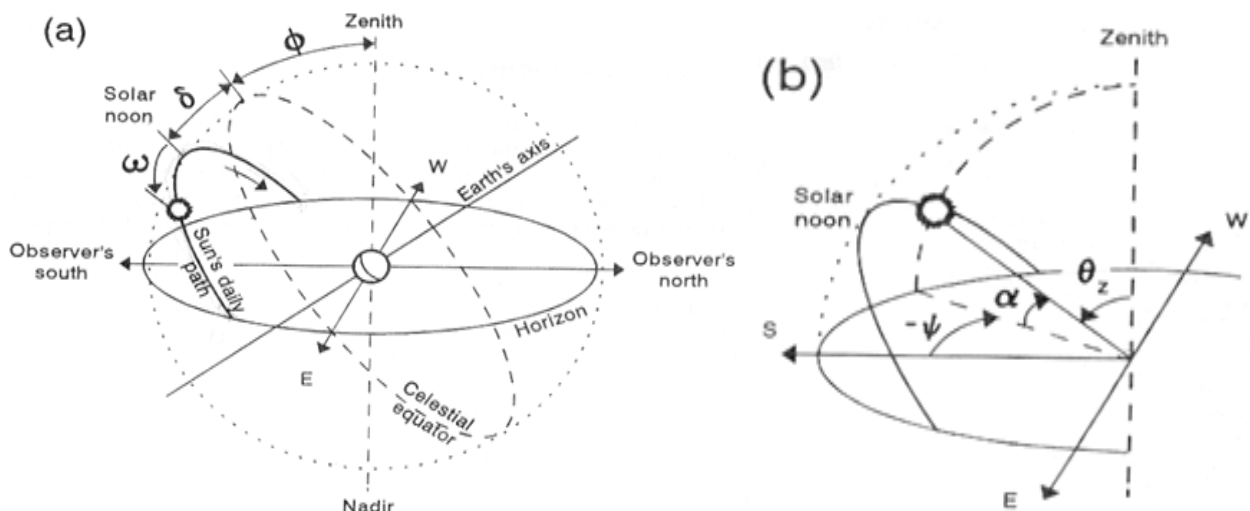
Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση την φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό και δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο του ωρολογίου. Οι δύο χρόνοι συνδέονται με την σχέση:

$$t_s = t_c + (L_{loc} / 15) - T_c$$

Όπου t_s : ο ηλιακός χρόνος σε ώρες , t_c : ο τοπικός χρόνος σε ώρες (1 έως 24)
 T_c : η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT σε ώρες(για την Ελλάδα +2hours)
 L_{loc} : το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή σε μοίρες

2.1.3.4 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της γεωγραφικής θέσης του παρατηρητή

Λόγω της γεωγραφικής θέσης ενός παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της γης, προσφέρεται να οριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων με βάση την κατακόρυφο, η οποία τέμνει την ουράνια σφαίρα στο ζενίθ και το ναδίρ, και τον ορίζοντα που είναι το επίπεδο το κάθετο στον άξονα αυτόν (Σχήμα 3.1.3.4.6(β)). Η γωνία θ_z μεταξύ του ζενίθ και της ευθείας όρασης του ήλιου ονομάζεται γωνία ζενίθ ή ζενιθιακή γωνία, η δε συμπληρωματική της $\alpha = 90^\circ - \theta_z$, ονομάζεται ύψος του ήλιου. Η άλλη πολική συντεταγμένη για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου είναι η *αζιμούθια γωνία ψ* (Σχήμα 3.1.3.4.6(β)), μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ήλιου στο επίπεδο του ορίζοντα και του νότου. Είναι $\psi = 0^\circ$ στο νότο, $\psi = 90^\circ$ στη δύση, $\psi = -90^\circ$ στην ανατολή και $\psi = 180^\circ$ στο βορρά.



Σχήμα 3.1.3.4.6 (α) Το σύστημα συντεταγμένων για τον προσδιορισμό της ημερήσιας κίνησης του ήλιου,
Σχήμα 3.1.3.4.6(β) Ορισμός των γωνιών ύψους του ήλιου α , αζιμούθιας ψ και ζενιθιακής θ_z .

Για οριζόντιες επιφάνειες, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι οι στατιστικές μετρήσεις αναφέρονται συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο, ισχύουν μεταξύ των παραπάνω γωνιών οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\cos\theta = \sin\delta * \sin\phi + \cos\delta * \cos\phi * \cos\omega$$

Όπου: ϕ : είναι το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης και $\theta_z + \alpha = 90^\circ$ (Σχήμα 3.1.3.4.7 (β)). Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta_z > 90^\circ$.

Η ωριαία γωνία ω_s κατά την οποία δύνει ο ήλιος, προκύπτει αν τεθεί $\theta_z = 90^\circ$, οπότε:

$$\cos\omega = -\frac{\sin\phi * \sin\delta}{\cos\phi * \cos\delta} = -\tan\phi * \tan\delta$$

Συνεπώς ο ήλιος θα ανατέλλει σε γωνία $-\omega_s$ και δύει σε $+\omega_s$. Επίσης, αν είναι N (σε ώρες) η διάρκεια της ημέρας, δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, θα είναι:

$$N = 2 * \frac{24}{360} * \omega = \frac{2}{15} * \arccos(-\tan\phi * \tan\delta)$$

2.1.4 Η ηλιακή ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη διαφέρει από αυτήν που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο όταν ο συλλέκτης έχει εγκατασταθεί υπό κάποια κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η υπό γωνία εγκατάσταση του συλλέκτη συνηθίζεται για λόγους μέγιστης εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και μια τέτοια τοποθέτηση προσδίδει επιπλέον χαρακτηριστικά στην ηλιακή ακτινοβολία, που εξετάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.1.4.1 Η επίδραση της κλίσης του συλλέκτη

Η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια είναι μέγιστη όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Συνεπώς για να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης ποσότητας της ηλιακής ενέργειας θα έπρεπε ο συλλέκτης να στρέφεται συνεχώς ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου, πράγμα όμως που κατά κανόνα αυξάνει αδικαιολόγητα το κόστος της εγκατάστασης και εφαρμόζεται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις.

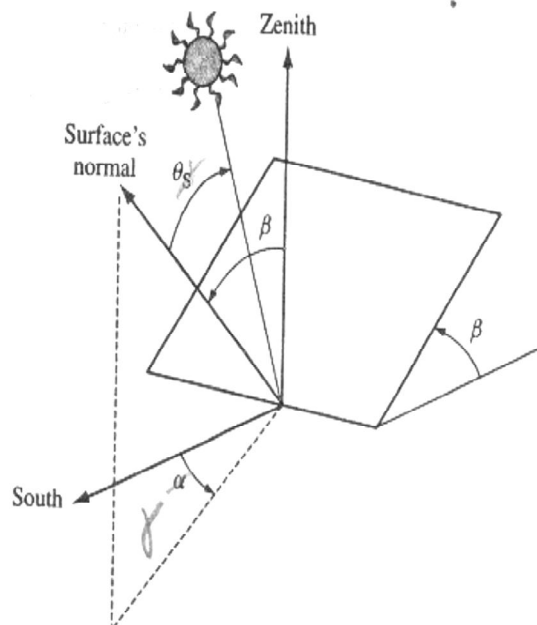
Στην πράξη, κατά γενικό κανόνα, η θέση των συλλεκτών, δηλαδή του προσανατολισμού και της κλίσης τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο, παραμένει αμετάβλητη ή το πολύ προβλέπεται η χειροκίνητη μεταβολή της κλίσης τους μια ή δύο φορές το έτος. Στην γενικότερη περίπτωση η θέση του συλλέκτη προσδιορίζεται από την γωνία β που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο, (ονομάζεται κλίση του συλλέκτη), και την γωνία γ που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς νότο (ονομάζεται αζιμούθια γωνία του συλλέκτη). Για μια τέτοια τυχούσα θέση του συλλέκτη (Σχήμα 3.1.4.1.8) αν είναι:

- (α): θ η γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής (ή άμεσης) ακτινοβολίας του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ηλιακών ακτινών με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη,
- (β): ϕ το γεωγραφικό πλάτος της θέσης ($-90^\circ < \phi < 90^\circ$) και
- (γ): ω η ωριαία γωνία του ήλιου

Αποδεικνύεται ότι ισχύει η σχέση (1) (για το βόρειο ημισφαίριο):

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta + \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega$$

Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta > 90^\circ$. (Για το νότιο ημισφαίριο θα πρέπει να αντιστραφεί το πρόσημο στον 2ο και 4ο από τους πέντε προσθετέους της).



Σχήμα 3.1.4.1.7: Τυχούσα θέση συλλέκτη (κλίση β , αζιμούθια γωνία γ) και γωνία πρόσπτωσης του ήλιου θ .

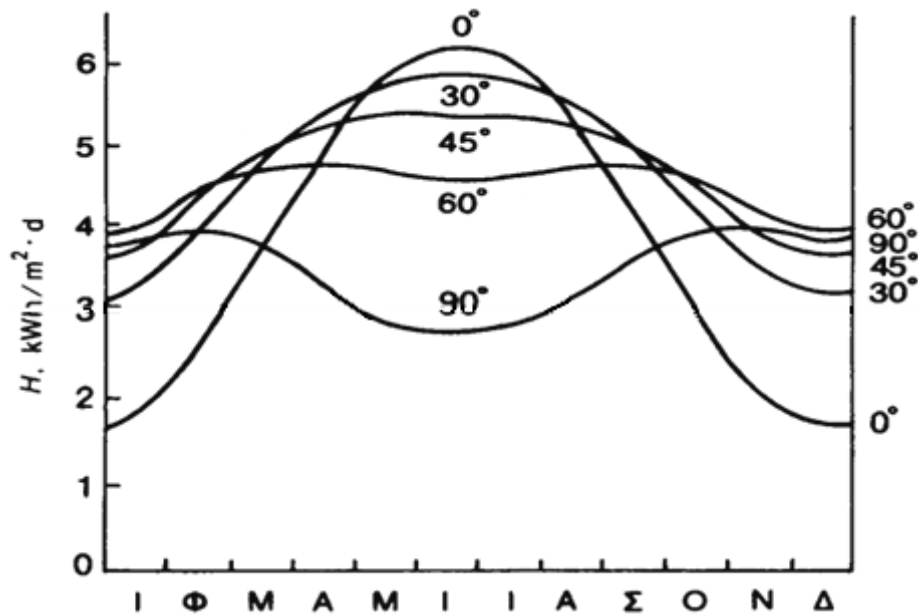
Για κάθετη επιφάνεια αρκεί να τεθεί $\beta = 90^\circ$. Για οριζόντιες επιφάνειες, αρκεί να τεθεί $\beta = 0^\circ$, οπότε η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με το ζενίθ, ήτοι $\theta = \theta_z$, και προκύπτει η σχέση (1) που προαναφέρθηκε. Επίσης για $\omega = 0$ προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης κατά το μεσημέρι.

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες στο νότο, οπότε $\gamma = 0^\circ$, προκύπτει:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \cos\omega$$

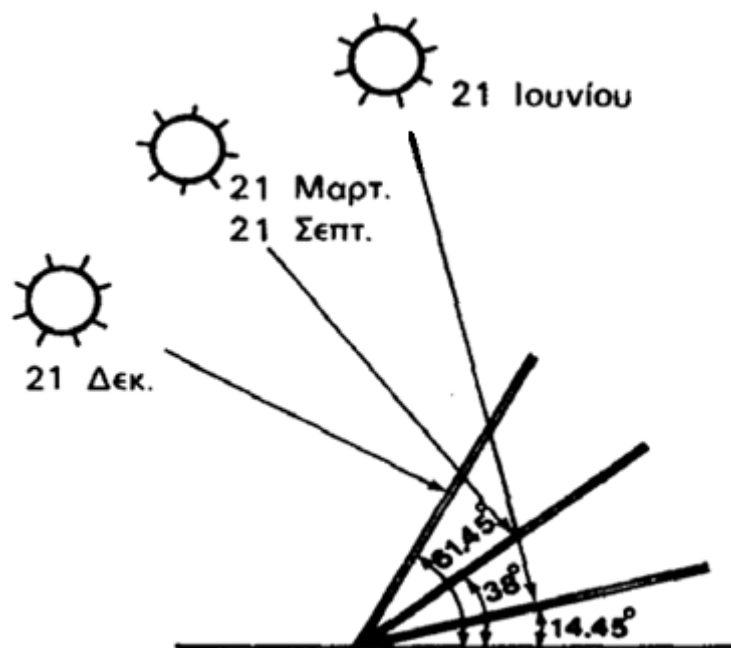
Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta > 90^\circ$. (Για το νότιο ημισφαίριο αρκεί να τεθεί η αρνητική τιμή της γωνίας ϕ). Συχνά οι ηλιακοί συλλέκτες εγκαθίστανται ώστε να στρέφονται προς το νότο, εκτός βέβαια αν ο προσανατολισμός τους επιβάλλεται από τον τρόπο εγκατάστασης (π.χ. όταν οι συλλέκτες αποτελούν δομικά στοιχεία).

Για εγκαταστάσεις στο βόρειο ημισφαίριο η μέγιστη απολαβή επιτυγχάνεται όταν ο συλλέκτης προσανατολίζεται στον νότο και η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με την γεωγραφική παράλληλο του τόπου, ενώ εάν η κλίση μπορεί να μεταβάλλεται χειροκίνητα (σε χρονικά διαστήματα μηνών, π.χ. ανά εποχή του έτους) ενδείκνυται η κλίση να μειώνεται κατά 100 έως 150 κατά την διάρκεια του καλοκαιριού και να αυξάνεται κατά το ίδιο ποσό κατά την διάρκεια του χειμώνα, λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Τα παραπάνω αποτελούν προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε μικρές εγκαταστάσεις, ενώ για μεγάλες πρέπει να γίνεται αναλυτική μελέτη (Σχήμα 3.1.4.1.8).



Σχήμα 3.1.4.1.8: Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία

Παρακάτω (Σχήμα 3.1.4.1.9) δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους.



Σχήμα 3.1.4.1.9: Βέλτιστη κλίση του συλλέκτη στο θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο

Για να εξουδετερωθεί η διαφορά αυτή, βρέθηκε ότι αν τα φβ πλαίσια τοποθετηθούν έτσι ώστε να σχηματίζουν γωνία με το οριζόντιο επίπεδο ίση με $(\phi + 15)$ μοίρες (ϕ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου) η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τα πλαίσια γίνεται μεγαλύτερη τον χειμώνα και μικρότερη το καλοκαίρι με αποτέλεσμα να υπάρχει σχεδόν σταθερότητα για όλη τη διάρκεια του έτους. Δηλαδή η μικρότερη ηλιοφάνεια κατά τις χειμερινές μέρες αντισταθμίζεται με την πιο κάθετη τοποθέτηση των πλαισίων προς τις ηλιακές ακτίνες και η μεγάλη ηλιοφάνεια κατά τις καλοκαιρινές μέρες δίνει λιγότερη ηλιακή ενέργεια με την πιο πλάγια τοποθέτηση τους στις ηλιακές ακτίνες.

Έτσι πρακτικά η ηλιακή ενέργεια που δέχονται τα πλαίσια το χειμώνα είναι ίση περίπου με εκείνη που δέχονται το καλοκαίρι. Επί πλέον η ενέργεια αυτή είναι ίση περίπου με εκείνη που δέχονται τα πλαίσια την άνοιξη και το φθινόπωρο και έτσι διατηρείται η σταθερότητα για όλο τον χρόνο.

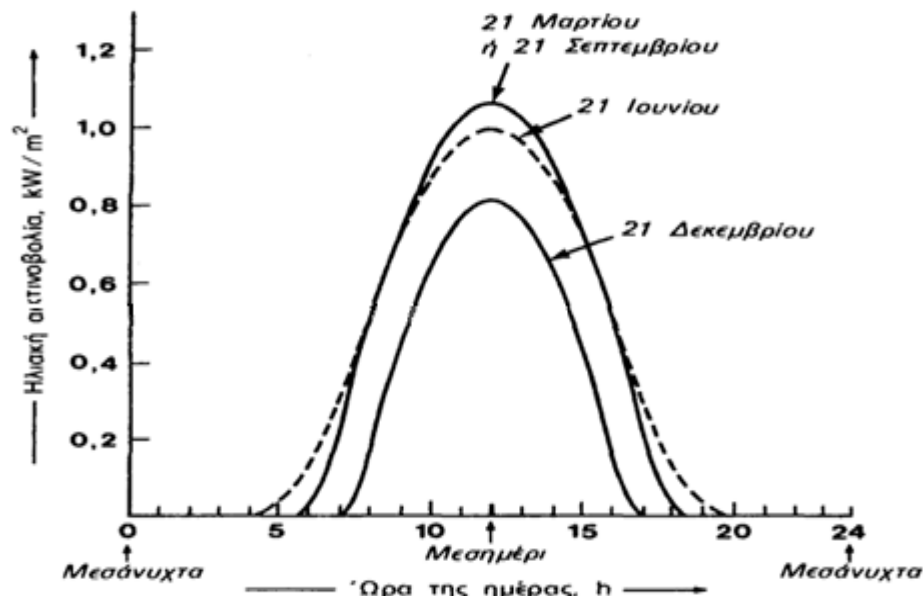
Οι τιμές της ολικής ηλιακής ενέργειας που δέχονται τα φβ πλαίσια κατά μέσο όρο κάθε μέρα για τις διάφορες εποχές του καταγράφονται στους διεθνείς χάρτες. Σημειώνεται ότι οι τιμές που αναγράφονται στους πίνακες αποτελούν μέσο όρο και καλύπτουν γενικά όλη την Ελλάδα. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν υπάρχουν πιο ακριβή στοιχεία για την περιοχή που θα εγκατασταθεί το φβ σύστημα. Τέτοια στοιχεία παρέχονται από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς ή άλλα αρμόδια τμήματα του κράτους.

Επίσης, στον πίνακα 3.3 δίνονται τα γεωγραφικά πλάτη διαφόρων ελληνικών περιοχών, για την επιλογή της σωστής κλίσης του ηλιακού συλλέκτη. Υπάρχουν και εφαρμογές, όπου κρίνεται σκόπιμη η αναπροσαρμογή της κλίσης του συλλέκτη δύο ή περισσότερες φορές στη διάρκεια του έτους, ώστε να παρακολουθεί κάπως την απόκλιση του ήλιου.

<i>Πόλη ή Περιοχή</i>	<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα	41° 30'
Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κυκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41°
Καστοριά, Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40° 30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	40°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39° 30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39°
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Άμφισσα, Λειβαδιά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38° 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάτμος	37° 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36° 30'
Κύθηρα, Καστελλόριζο	36°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσος, Κάρπαθος	35° 30'
Χώρα Σφακιών, Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35°

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: Γεωγραφικό πλάτος διαφόρων ελληνικών πόλεων

Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του οριζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολοι δείχνει 12:25 τον χειμώνα, και 13:25 το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα. Έχουμε ήδη τονίσει ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση, ώστε η πρόσπτωση των ακτινών να γίνεται περισσότερο κάθετα (Σχήμα 3.1.4.1.10).



Σχήμα 3.1.4.1.10: Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις γεωγραφικές εποχικές και κλιματολογικές συνθήκες με τον συλλέκτη σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

2.1.4.2 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές, μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου.

Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυσης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10 - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1, για πλήρη ανάκλαση. Στον πίνακα 3.4 δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στις περιοχές, όπου τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, θάλασσας	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χρώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0,30
Χιόνι	0,60

Πίνακας 3.4 Παράδειγμα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

2.2 Η ανακλαστικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στο άρθρο 17 του σχεδίου του ειδικού χωροταξικού που παρουσίασε το ΥΠΕΧΩΔΕ ως ζώνες αποκλεισμού για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας ορίζονται μεταξύ άλλων και “οι πολυσύχναστοι χώροι στους οποίους η αντανάκλαση του φωτός από τις εγκαταστάσεις μπορεί να αποτελεί σημαντική όχληση”.

Θα προσπεράσουμε προς το παρόν τον αυθαίρετο όρο “πολυσύχναστοι” για να εστιάσουμε σε ένα μύθο που υποκρύβεται στην παραπάνω προτεινόμενη ρύθμιση. Ο μύθος αυτός λέει πως τα ΦΒ πλαίσια μπορούν να προκαλέσουν θαμβώσεις και σημαντική όχληση λόγω αντανάκλασεων του ηλιακού φωτός στη γυάλινη επιφάνειά τους. Ο μύθος αυτός βασίζεται σε λογικοφανείς δοξασίες αλλά όχι σε απτά επιστημονικά δεδομένα που αποδεικνύουν ακριβώς το αντίθετο.

Κάθε αντικείμενο ανακλά την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Αυτό γίνεται είτε “κατοπτρικά”, δηλαδή συνολικά προς μια διεύθυνση όπως από ένα τέλειο κάτοπτρο, είτε ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις του ημισφαιρίου. Αυτές είναι δύο ακραίες περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα η ανάκλαση γίνεται και με τους δύο τρόπους σε κάποιο ποσοστό, ανάλογα με τη φύση του υλικού της επιφάνειας του αντικειμένου.

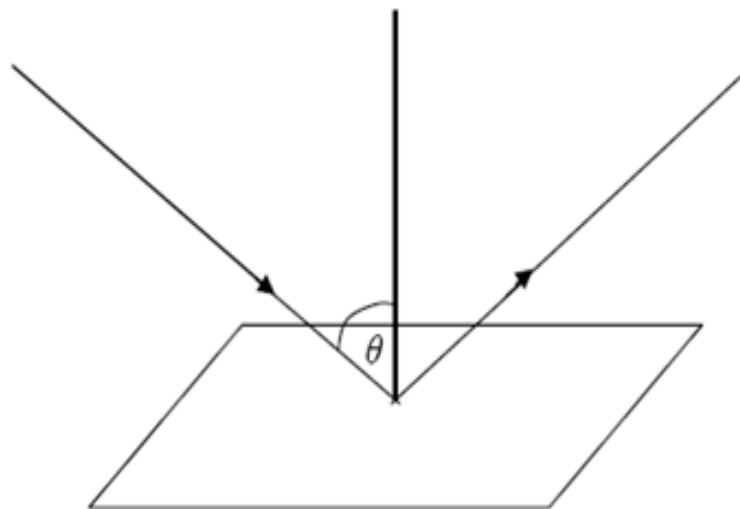
Έχει σημασία να δούμε λοιπόν αν τα ΦΒ ανακλούν το φως περισσότερο ή λιγότερο από άλλα υλικά. Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να υπάρξει εν δυνάμει πρόβλημα, στη δεύτερη προφανώς δεν έχει νόημα ο περιορισμός της χρήσης των φωτοβολταϊκών σε κάποιες περιοχές, αφού τότε θα έπρεπε να απαγορεύσουμε και αντικείμενα, υλικά ή χρήσεις με μεγαλύτερη ανακλαστικότητα.

Το ερώτημα αυτό ετέθη για πρώτη φορά επί της ουσίας στην περίπτωση των αεροδρομίων. Στα αεροδρόμια ή κοντά σ’ αυτά, ενδιαφέρει η ελαχιστοποίηση της κατοπτρικής ανάκλασης προς οποιαδήποτε γωνία ανύψωσης και ειδικότερα προς τον πύργο ελέγχου και τους διαδρόμους προσέγγισης των αεροπλάνων, ώστε να μη δημιουργούνται παρεμβολές στο οπτικό πεδίο των χειριστών και ελεγκτών.

Παρά το γεγονός ότι ΦΒ συστήματα (και μάλιστα ισχύος έως 1-2 MWp) έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πολλά αεροδρόμια του κόσμου, (όπως το αεροδρόμιο Ναρίτα του Τόκιο, της Βαρκελώνης, του Μονάχου, του Πίτσμπουργκ, αλλά και το Ελευθέριος Βενιζέλος στην Αθήνα), για την εγκατάσταση ΦΒ συστήματος σε χώρο ενός αεροδρομίου ή σε άλλο χώρο εγγύς αυτού, θα πρέπει κανείς να βεβαιώσει ότι οι ανακλάσεις που προκαλούνται από την επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων είναι μικρότερες σε ένταση από τις ήδη υπάρχουσες ανακλάσεις που προκαλούνται από κτίρια, οχήματα, εξοπλισμό κ.λπ.

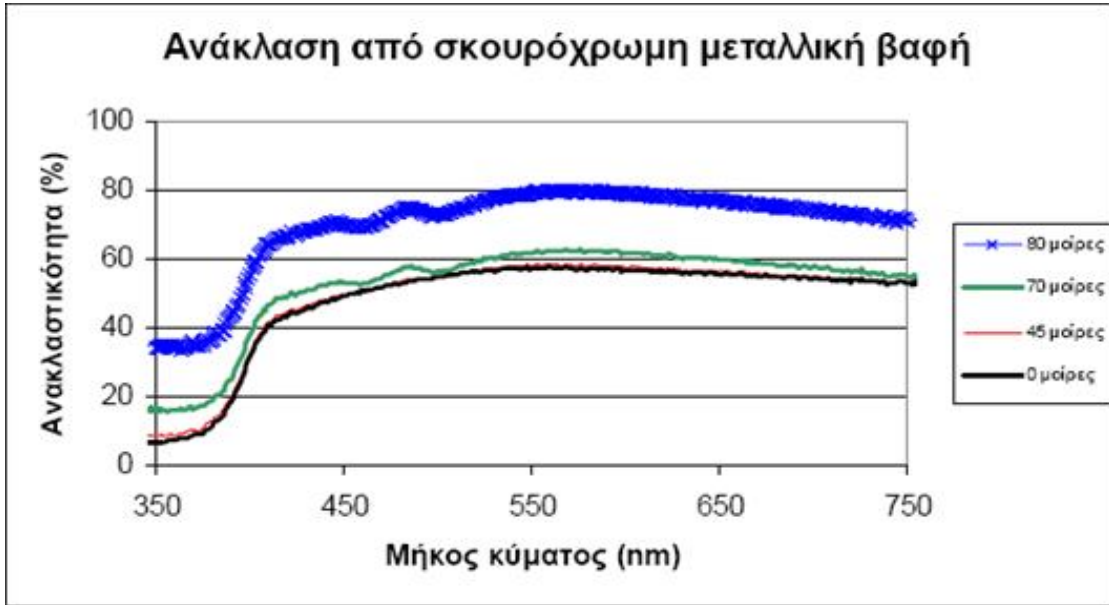
Για να διαπιστωθεί αν θα μπορούσαν να εγκατασταθούν ΦΒ στο χώρο του αεροδρομίου Ελευθέριος Βενιζέλος, το 2001, σχεδιάστηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) μια πειραματική διάταξη που συγκρίνει την ανάκλαση που προκαλεί η επιφάνεια ενός κλασικού ΦΒ πλαισίου, με αυτές από βαφή και παρμπρίζ αυτοκινήτου. Η σύγκριση με τις επιφάνειες ενός αυτοκινήτου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οχήματα βρίσκονται πρακτικά παντού. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μετρήσεις ανάκλασης από την επιφάνεια ΦΒ πλαισίων, που δεν ξεπερνούν το 16% ακόμα κι όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σε γωνία 70° . Συνήθως δε, ο μέσος συντελεστής ανακλαστικότητας (albedo) των φωτοβολταϊκών δεν ξεπερνά το 10%.

Το ηλιακό φως μπορεί να φτάσει σε μια επιφάνεια από όλες τις διευθύνσεις του ημισφαιρίου. Οι πιθανές λοιπόν γωνίες πρόσπτωσης (θ) από την κάθετο είναι από 0° έως $\pm 90^\circ$. Στη συνέχεια η ακτινοβολία μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό της επιφάνειας, να το διαπεράσει ή να ανακλαστεί. Όσο αυξάνεται η γωνία θ , τόσο αυξάνεται το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια οι γωνίες πρόσπτωσης που πλησιάζουν τις 90° παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον.

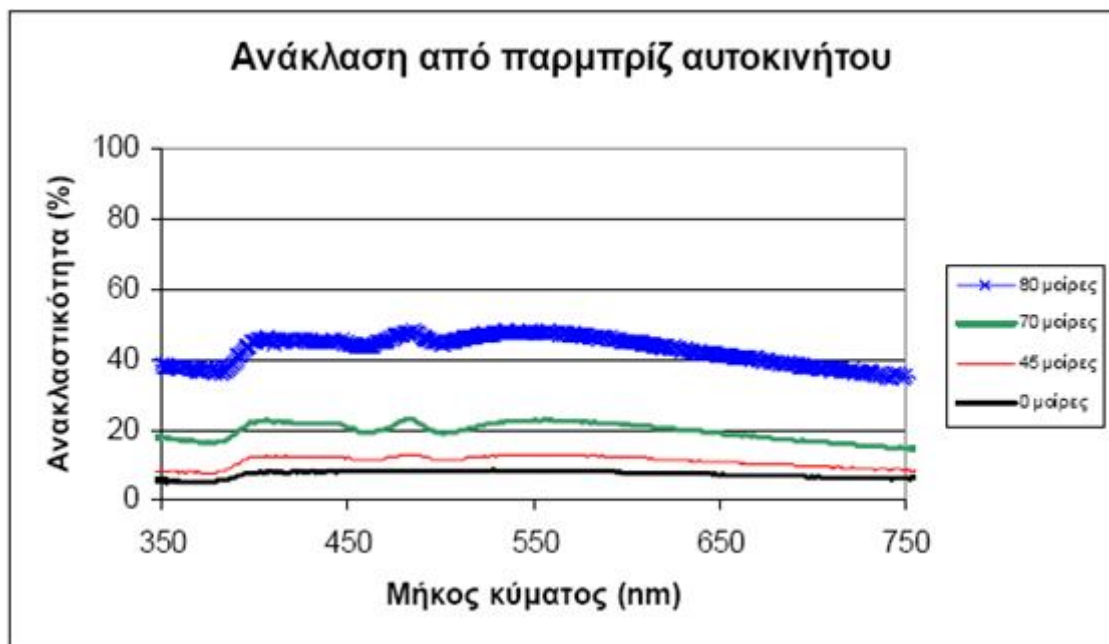
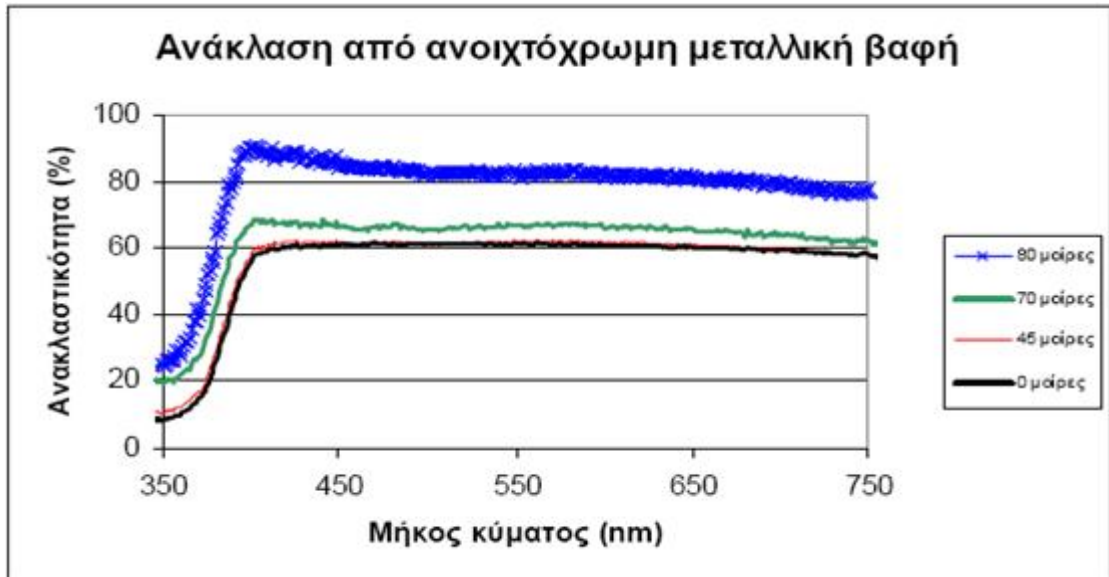


Σχήμα 3.2.11: Ανάκλαση της ηλιακής ακτίνας

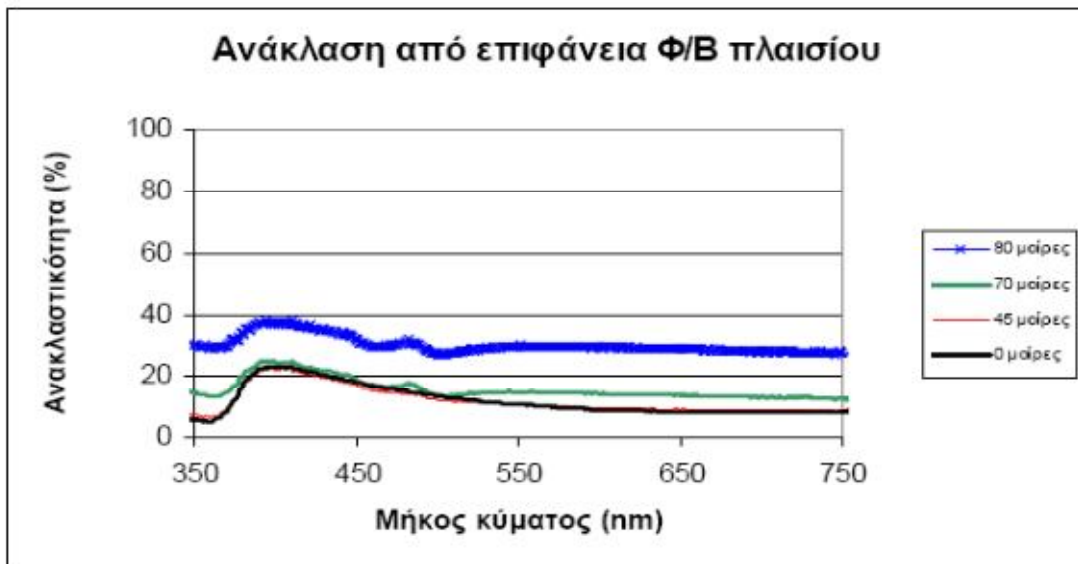
Ανακλάσεις ακτινοβολίας, ανάλογα με το υλικό, γίνονται σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση η περιοχή που ενδιαφέρει είναι αυτή της ορατής ακτινοβολίας, δηλαδή με μήκη κύματος από 380 nm (ιώδες) έως 700 nm (κόκκινο), περίπου. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα κομμάτι ΦΒ πλαισίου, τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου, δύο μεταλλικές βαφές αυτοκινήτου (μια 18/25 σκουρόχρωμη [ανθρακί] και μια ανοιχτόχρωμη [ασημί]) και ένα κομμάτι από παρμπρίζ αυτοκινήτου. Το υψηλότερο ποσοστό ανάκλασης το έχει, όπως είναι αναμενόμενο, η βαφή του αυτοκινήτου και ειδικότερα η ανοιχτόχρωμη. Μέχρι τις 70° η ένταση της ανάκλασης δε διαφοροποιείται σημαντικά από αυτήν της κάθετης ακτινοβολίας ($\theta=0^\circ$), ενώ στις 80° για την ανοιχτόχρωμη βαφή πλησιάζει, σε κάποια μήκη κύματος, το 85%.



Σχήμα 3.2.12: Ανάκλαση από σκουρόχρωμη μεταλλική βαφή

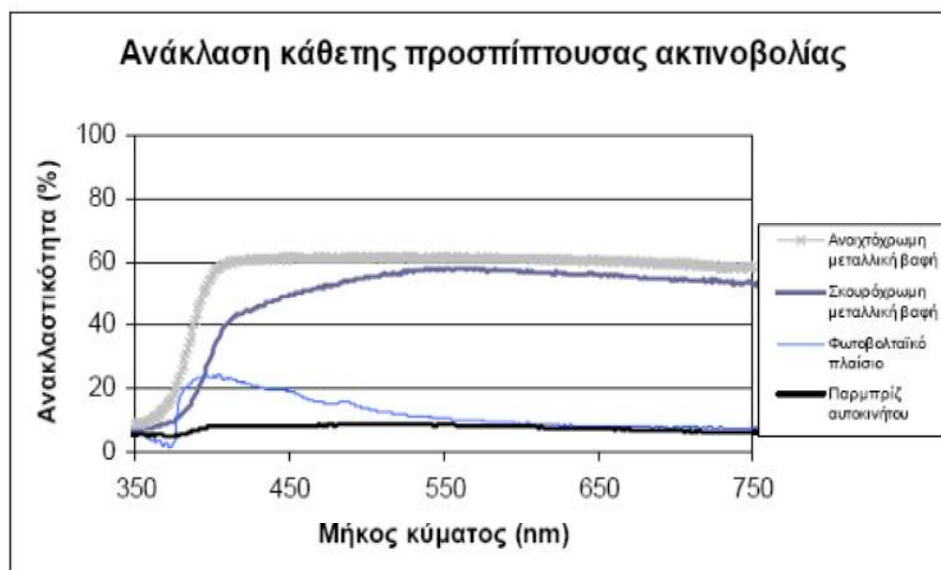


Σχήματα 3.2.13 & Σχήματα 3.2.14: Ανάκλαση από μεταλλική βαφή και από παρμπρίζ αυτοκινήτου



Σχήματα 3.2.15: Ανάκλαση από επιφάνεια ΦΒ πλαίσιο

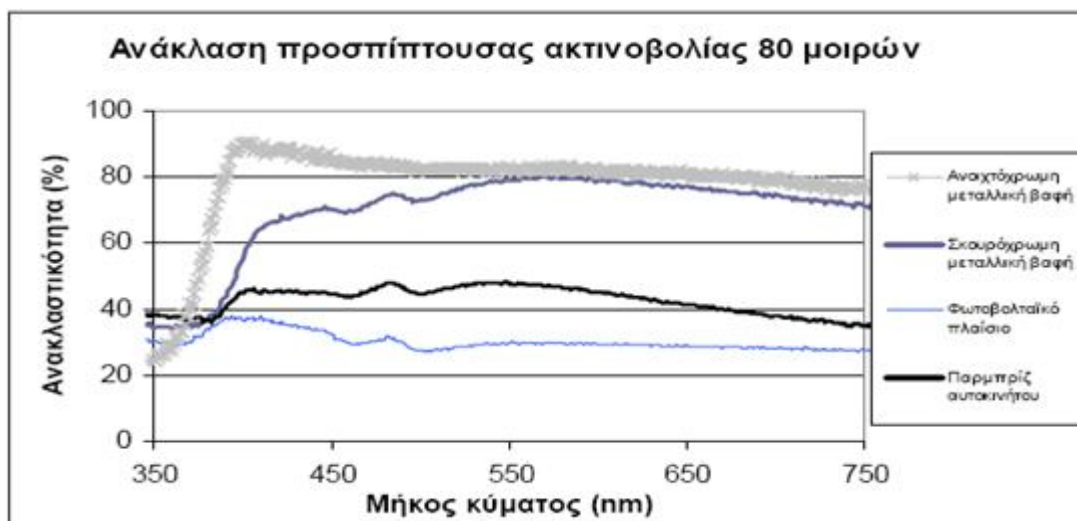
Αν συγκριθούν οι ανακλάσεις που μετρήθηκαν από τα διάφορα υλικά μεταξύ τους, στο ίδιο διάγραμμα, φαίνεται καθαρά στην ανάκλαση της κάθετης ακτινοβολίας ότι το παρμπρίζ και το ΦΒ πλαίσιο έχουν παρόμοια ποσοστά ανάκλασης και μάλιστα κάτω από 10% στην μεγαλύτερη περιοχή του ορατού φάσματος. Παρότι το ΦΒ δεν είναι διαφανές, όπως το παρμπρίζ και στην ανάκλαση προστίθεται η ανάκλαση που προέρχεται από τα ΦΒ στοιχεία που βρίσκονται κάτω από το προστατευτικό τζάμι, οι ειδικές προδιαγραφές του γυαλιού που χρησιμοποιείται διατηρούν τη συνολική ανακλαστικότητα σε χαμηλά επίπεδα. Τα ΦΒ στοιχεία είναι ειδικά επεξεργασμένα για να ελαχιστοποιείται η ανάκλαση της ακτινοβολίας καθώς στόχος είναι η μέγιστη απορρόφηση για τη μετατροπή της ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η συμβολή στην ανακλώμενη ακτινοβολία, που προέρχεται από το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, είναι εντονότερη στην περιοχή των 400-450nm, με αποτέλεσμα η συνολική ανακλαστικότητα να αγγίζει το 20% σε αυτή την περιοχή. Αυτό είναι χαρακτηριστικό του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και του 20/25 προσδίδει το μπλε χρώμα. Σε ΦΒ πλαίσια μονοκρυσταλλικού ή άμορφου πυριτίου αυτή η ανακλαστικότητα αναμένεται μικρότερη καθώς το χρώμα τους φαίνεται μαύρο.



Σχήμα 3.2.16: Ανάκλαση κάθετης προσπίπτουσας ακτινοβολίας

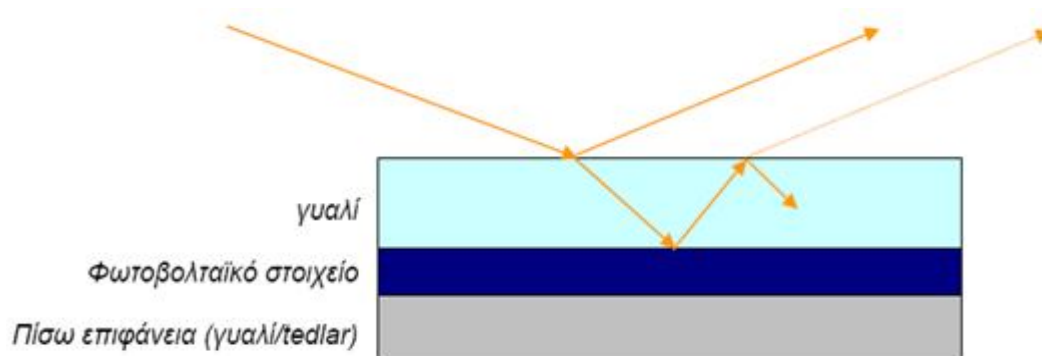
Σύγκριση ανάκλασης ακτινοβολίας από επιφάνεια ΦΒ πλαισίου, μεταλλικών βαφών και παρμπρίζ για κάθετη ακτινοβολία ορατού φάσματος. Οι μεταλλικές βαφές έχουν σαφώς μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από τις επιφάνειες του ΦΒ πλαισίου και του παρμπρίζ.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της ανάκλασης σε μεγαλύτερες γωνίες. Όπως προαναφέρθηκε, η ανακλαστικότητα αυξάνει με αυξανόμενη γωνία πρόσπτωσης (θ). Έτσι, για όλα τα υλικά στις 80° η ανακλαστικότητα αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την κάθετη ακτινοβολία και συγκεκριμένα για τις μεταλλικές βαφές αγγίζει ή ξεπερνάει το 80%, ενώ το παρμπρίζ κυμαίνεται μεταξύ 40-50% στη μεγαλύτερη περιοχή του ορατού φάσματος. Στο ΦΒ πλαίσιο η αύξηση της ανάκλασης είναι επίσης αισθητή, αλλά είναι μικρότερη από ότι για τα υπόλοιπα υλικά. Αυτό οφείλεται στις ειδικές προδιαγραφές του γυαλιού που χρησιμοποιείται στα ΦΒ πλαίσια (χαμηλή περιεκτικότητα σιδήρου για μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατεργασμένη επιφάνεια [texture] για μείωση ανακλαστικότητας), που του μειώνει την ανακλαστικότητα ενώ η ανακλαστικότητα που προστίθεται από το πυρίτιο ελαχιστοποιείται σε αυτές τις γωνίες λόγω εσωτερικής ανάκλασης και παγίδευσης του φωτός. Χαρακτηριστικό της έλλειψης της συνιστώσας που προέρχεται από το πυρίτιο είναι η σχετικά επίπεδη μορφή του φάσματος του ανακλώμενου φωτός σε αντίθεση με την αύξηση της ανακλαστικότητας στην περιοχή των 400-450nm που παρατηρείται στην κάθετη ακτινοβολία και προσδίδει τη μπλε απόχρωση του πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 3.2.17: Ανάκλαση προσπίπτουσας ακτινοβολίας 80°

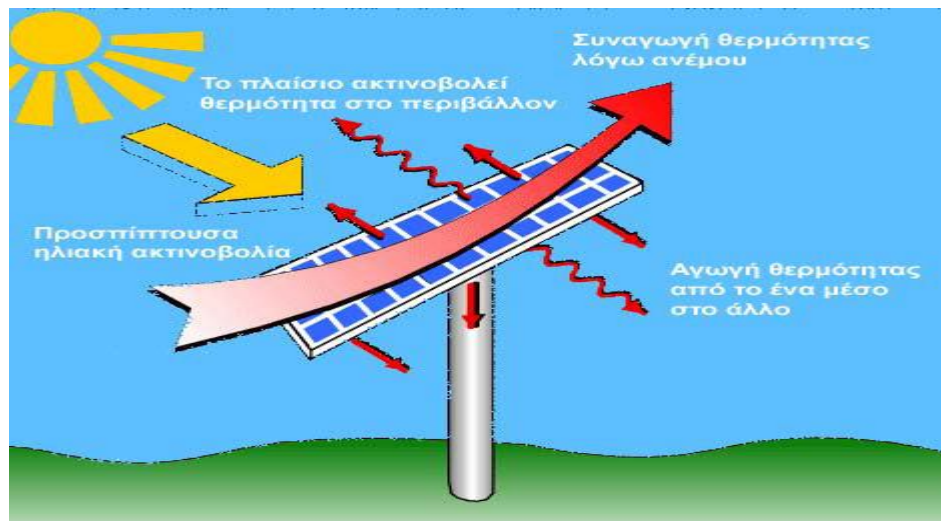
Σύγκριση ανάκλασης ακτινοβολίας από επιφάνεια φβ πλαισίου, μεταλλικών βαφών και παρμπρίζ για ακτινοβολία ορατού φάσματος με γωνία πρόσπτωσης 80° .



Σχήμα 3.2.18: Σχηματική παράσταση μηχανισμού εσωτερικής ανάκλασης από φβ πλαίσιο(εγκάρσια τομή πλαισίου).

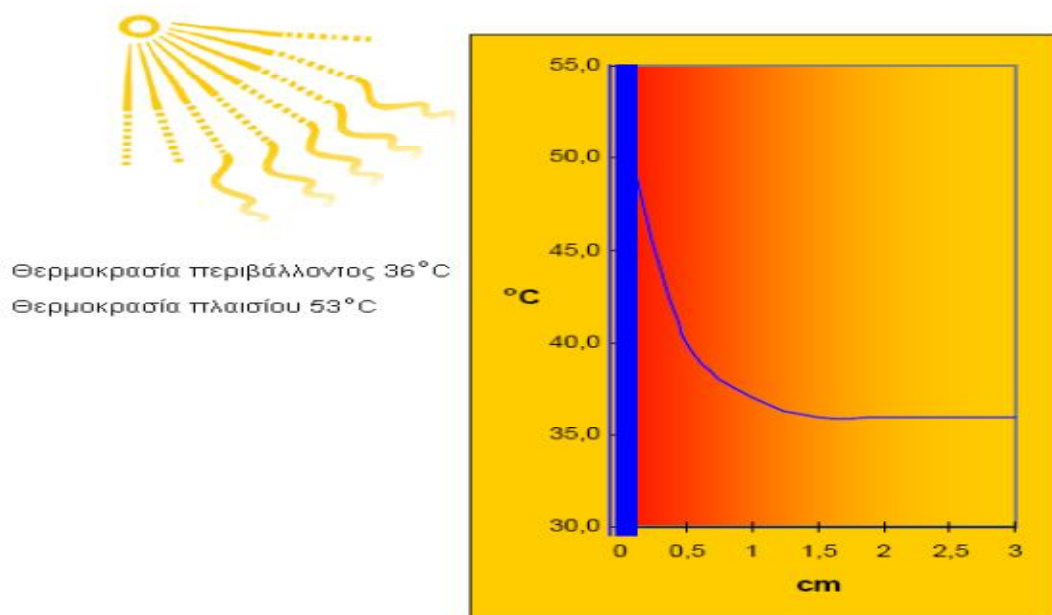
2.3 Ύπαρξη βλάστησης κάτω από τα ΦΒ πλαίσια

Η μέση θερμοκρασία του πλαισίου στη διάρκεια του 24ώρου παραμένει ελάχιστα υψηλότερη απ' αυτή του περιβάλλοντα αέρα ακόμη και τις ζεστότερες μέρες του χρόνου.



Σχήμα 3.2.19: Αγωγή θερμότητας ΦΒ πλαισίου προς το περιβάλλον

Το αμέσως επόμενο ερώτημα είναι αν αυτή η θερμότητα που φεύγει από τα πλαίσια μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, για τον απλό λόγο ότι η μάζα του αέρα είναι πρακτικά άπειρη σε σχέση με τη μάζα των φβ και είναι αδύνατο να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα σε κάποια απόσταση από τα πλαίσια.

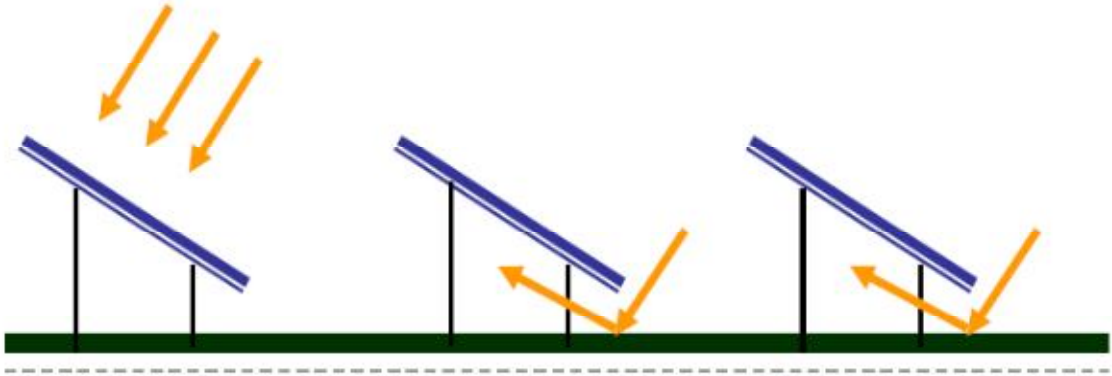


Σχήμα 3.2.20 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος και ΦΒ πλαισίου

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η θερμοκρασία του εδάφους ακριβώς κάτω από τα ΦΒ πλαίσια είναι χαμηλότερη απ' ότι η θερμοκρασία του ακάλυπτου εδάφους. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη θερμοκρασία εδάφους με ή χωρίς σκίαση από φωτοβολταϊκά, για μια καλοκαιρινή μέρα με θερμοκρασία αέρα 41°C και χαμηλή ταχύτητα ανέμου (0,86 m/s). Ενώ η μέγιστη θερμοκρασία του ακάλυπτου εδάφους φτάνει το μεσημέρι τους 65,5°C, το έδαφος κάτω από τα φβ είναι κατά 13,2°C ψυχρότερο.

Η σκίαση που επιτυγχάνουν μάλιστα τα φβ είναι καλύτερη απ' αυτήν που θα επιτυγχάνονταν με σκίαση από δέντρα (τα φβ μειώνουν τη θερμοκρασία 7°C περισσότερο από τα δέντρα).

Από την απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση ενός φβ σταθμού, ένα μικρό ποσοστό μόνο καταλαμβάνεται από τις βάσεις στήριξης των φβ. Η υπόλοιπη έκταση είναι ελεύθερη (για να αποφεύγεται η αλληλοσκίαση των φβ πλαισίων) και σε καμία περίπτωση δεν εμποδίζεται η ηλιακή ακτινοβολία από το να φτάσει στο έδαφος (ακόμη και κάτω από τα φβ).



Σχήμα 3.2.21: Η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στο έδαφος

Επειδή μία εικόνα ισοδυναμεί με χίλιες λέξεις, οι παρακάτω φωτογραφίες αποτελούν αδιάψευστο μάρτυρα ότι ούτε η βλάστηση ούτε το έδαφος επηρεάζονται μακροπρόθεσμα από την εγκατάσταση φβ σταθμών, ανεξαρτήτως μεγέθους και ισχύος του σταθμού.



Σχήμα 3.2.22: Βλάστηση κάτω από το ΦΒ πλαίσιο

Το έδαφος κάτω από τις βάσεις στήριξης των φβ λίγο καιρό μετά την εγκατάσταση του σταθμού.





Σχήμα 3.2.23: Βλάστηση κάτω από τα ΦΒ πλαίσια

Τα φβ δεν εμποδίζουν παράλληλες δραστηριότητες όπως π.χ. η βόσκηση. Ταυτόχρονα, ο καθαρισμός του χώρου του φβ σταθμού μπορεί να γίνει με φυσικό τρόπο αποφεύγοντας τη χρήση ζιζανιοκτόνων.



Σχήμα 3.2.24: Τα ΦΒ πλαίσια δεν εμποδίζουν τα ζώα να βοσκήσουν

Επίσης τα ΦΒ συστήματα (και μάλιστα ισχύος έως 1-2 MWp) έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πολλά αεροδρόμια του κόσμου, (όπως το αεροδρόμιο Ναρίτα του Τόκιο, της Βαρκελώνης, του Μονάχου, του Πίτσμπουργκ, του Φρέσνο, αλλά και το Ελευθέριος Βενιζέλος στην Αθήνα), για την εγκατάσταση ΦΒ συστήματος σε χώρο ενός αεροδρομίου ή σε άλλο χώρο εγγύς αυτού, θα πρέπει κανείς να βεβαιώσει ότι οι ανακλάσεις που προκαλούνται από την επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων είναι μικρότερες σε ένταση από τις ήδη υπάρχουσες ανακλάσεις που προκαλούνται από κτίρια, οχήματα, εξοπλισμό κ.λπ.



Σχήμα 3.2.25: Φωτοβολταϊκά ισχύος 900 KWp στο αεροδρόμιο του Oakland στην Καλιφόρνια

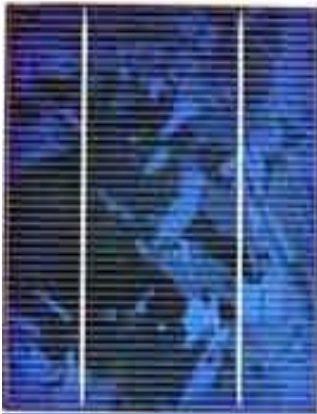
Για να διαπιστωθεί αν θα μπορούσαν να εγκατασταθούν φβ στο χώρο του αεροδρομίου Ελευθέριος Βενιζέλος, το 2001, σχεδιάστηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) μια πειραματική διάταξη που συγκρίνει την ανάκλαση που προκαλεί η επιφάνεια ενός κλασικού φβ πλαισίου, με αυτές από βαφή και παρμπρίζ αυτοκινήτου. Η σύγκριση με τις επιφάνειες ενός αυτοκινήτου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οχήματα βρίσκονται πρακτικά παντού. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μετρήσεις ανάκλασης από την επιφάνεια φβ πλαισίων, που δεν ξεπερνούν το 16% ακόμα κι όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σε γωνία 70° . Συνήθως δε, ο μέσος συντελεστής ανακλαστικότητας (albedo) των φβ δεν ξεπερνά το 10%.

Υλικό	Μέσος συντελεστής ανακλαστικότητας
Νερό	0,05-0,10
Χιόνι	0,50-0,80
Έδαφος	0,20
Φύλλα δέντρων	0,05-0,25
Δάσος	0,05-0,10
Γρασίδι	0,30
Σύννεφα	0,50-0,55
Άσφαλτο	0,05-0,10
Μεταλλική στέγη	0,61
Φωτοβολταϊκά	<0,10-0,16

Πίνακας 3.5: Παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Το ηλιακό φως μπορεί να φτάσει σε μια επιφάνεια από όλες τις διευθύνσεις του ημισφαιρίου. Οι πιθανές λοιπόν γωνίες πρόσπτωσης (θ) από την κάθετο είναι από 0° έως $\pm 90^\circ$. Στη συνέχεια η ακτινοβολία μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό της επιφάνειας, να το διαπεράσει ή να ανακλαστεί. Όσο αυξάνεται η γωνία θ , τόσο αυξάνεται το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια οι γωνίες πρόσπτωσης που πλησιάζουν τις 90° παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον.

3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο



Γενικά

Η αυξανόμενη και αλόγιστη χρήση των συμβατικών καυσίμων αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες για σειρά περιβαλλοντικών προβλημάτων του πλανήτη μας όπως η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η όξινη βροχή, το νέφος των αστικών περιοχών. Μια από τις πλέον ενδιαφέρουσες λύσεις αντιμετώπισης της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, αποτελεί η συστηματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία, μέσω ημιαγωγών στοιχείων, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια συμβάλλοντας στη μη επιβάρυνση του περιβάλλοντος με ρύπους διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και διοξειδίου του θείου (SO₂), που εκπέμπουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής και στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Ο καλύτερος τρόπος να εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος το φαινόμενο της μετατροπής την ηλιακή ακτινοβολία απ' ευθείας σε ηλεκτρική, μέσω ημιαγωγικών στοιχείων, ονομάστηκε φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Παρατηρήθηκε το 1839 από τον Γάλλο επιστήμονα Edmund Becquerel. Η κατασκευή του πρώτου ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου έγινε ένα αιώνα μετά περίπου (1937), αλλά η ουσιαστική χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές άρχισε στις αρχές της 10-ετίας του 1950. Τότε επετεύχθη η παρασκευή του καθαρού πυριτίου, με το οποίο είναι κατασκευασμένα τα περισσότερα πλαίσια ακόμα και σήμερα. Αναμένεται βέβαια να εμφανιστούν πλαίσια από άλλα ημιαγωγικά υλικά, τα οποία θα ξεπεράσουν αυτά από πυρίτιο σε απόδοση και κόστος. Τα κελιά από τα υλικά αυτά θα γίνουν οι βιώσιμοι ανταγωνιστές της αγοράς φωτοβολταϊκών.

Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν θα αναλυθεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο βασίζεται στην ιδιότητα των ημιαγωγικών στοιχείων, που βρίσκονται στη φύση, να δημιουργούν δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια καθώς οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν πάνω τους. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργεί η φβ κυψελίδα, η οποία με κατάλληλη συνδεσμολογία δημιουργεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και κατ' επέκταση τη φβ συστοιχία. Επίσης θα αναφερθούν τα υλικά από τα οποία αποτελείται η κατασκευή της φβ κυψελίδας και του φβ πλαισίου και ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται ορισμένα μεγέθη που είναι απαραίτητα για να βρεθούν τα ονομαστικά μεγέθη που χρειάζονται για την σωστή λειτουργία τους.

3.1 Ημιαγωγοί

Από τα στοιχεία που υπάρχουν στην φύση, τα κυριότερα ημιαγωγικά υλικά είναι το Γερμάνιο (Ge), το Πυρίτιο (Si) και το Σελήνιο (Se). Από αυτά το πιο σημαντικό είναι το πυρίτιο, γιατί βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση (25%) μετά το Οξυγόνο (50%) και είναι βασικό ημιαγωγικό υλικό για την κατασκευή φβ στοιχείων. Γι' αυτό θα αναφερθούμε στο πυρίτιο και θα περιγράψουμε μερικές από τις ιδιότητές του.

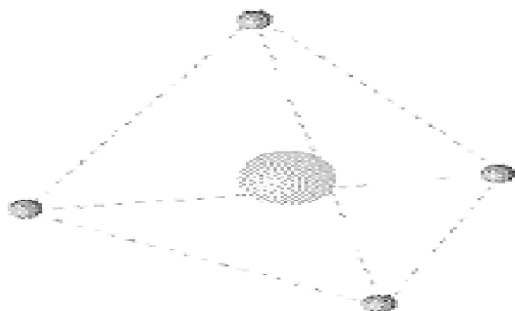
Το Πυρίτιο είναι από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία στη φύση και έχει τη μορφή διαφόρων ενώσεων. Όπως το οξείδιο του Πυριτίου, που αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Για την παρασκευή του πυριτίου χρησιμοποιείται πυριτική άμμος περιεκτικότητας 99% σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άνθρακας (C) που αναμειγνύονται μεταξύ τους και θερμαίνονται σε υψηλή θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα είναι η πρόκληση αναγωγής από τον άνθρακα στο διοξείδιο του πυριτίου και στη συνέχεια η λήψη μετά από σχετικό καθαρισμό του πυριτίου σε λιωμένη κατάσταση. Το επόμενο σχήμα δείχνει τα βασικά στάδια παραγωγής καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη, την άμμο.



Εικόνα 2.1.1: Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου με την μορφή κυλίνδρου, με πρώτη ύλη από άμμο.

Όπως γνωρίζουμε, η ύλη όπως και κάθε στερεό σώμα αποτελείται από άτομα. Κάθε άτομο αποτελείται από ένα πυρήνα (έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο) και ένα αριθμό ηλεκτρονίων (έχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο), που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα σε στοιβάδες (σχήμα 2.1.2). Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας, λέγονται *ηλεκτρόνια σθένους* και έχουν μια συγκεκριμένη στάθμη ενέργειας.

Κάθε άτομο επιδιώκει να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα με 8 ηλεκτρόνια. Το άτομο του πυριτίου στην στοιβάδα σθένους περιέχει 4 ηλεκτρόνια, για να συμπληρώσει τη στοιβάδα σθένους του με 8 ηλεκτρόνια, κάθε άτομο πυριτίου συνεργάζεται με άλλα 4 άτομα, που το περιβάλλουν στο χώρο και συνεισφέρουν ανά δύο από ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου (σχήμα 2.1.3).



Σχήμα 2.1.2: Η τετραεδρική δομή του ατόμου του πυριτίου. Οι μικρές σφαίρες είναι ηλεκτρόνια. Η κεντρική σφαίρα είναι ο πυρήνας.



Σχήμα 2.1.3: Το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου Si

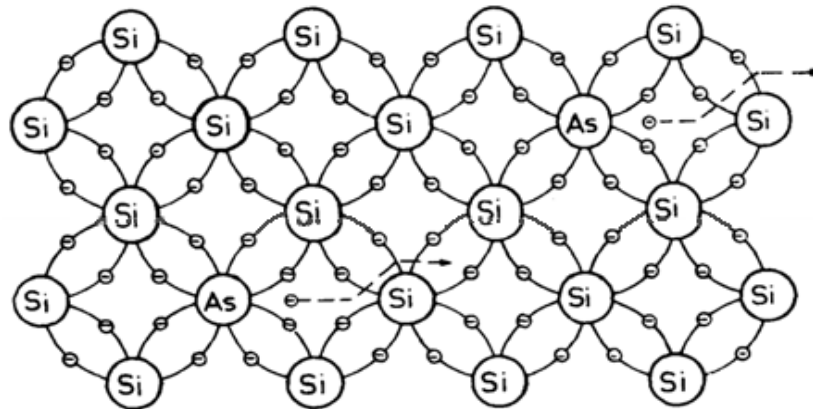
Η συνεργασία αυτή απαιτεί την κίνηση ορισμένων ηλεκτρονίων. Η κίνηση των ηλεκτρονίων αυτών μέσα σε ένα σώμα ονομάζεται **ηλεκτρική αγωγιμότητα**. Ανάλογα με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, τα στερεά διακρίνονται σε **μονωτές** (δεν επιτρέπουν την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος), **αγωγούς** (επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων) και **ημιαγωγούς** (επιτρέπει να περνά το ηλεκτρικό φορτίο από μέσα του με κάποιες προϋποθέσεις). Από την άποψη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς, τα ηλεκτρόνια είναι **εσωτερικών στοιβάδων** (είναι λιγότερο ενεργά και δεν συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας), **ελεύθερα** (έχουν ενέργεια για να αποσπαστούν από τους δεσμούς του σώματος) και **σθένους** (κινούνται προς τις οπές γειτονικών δεσμών).

Τα ηλεκτρόνια σθένους των ημιαγωγών μπορούν να απορροφήσουν σημαντική ποσότητα φωτός. Η απορρόφηση καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων σε σχέση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Δηλαδή αν η ενέργεια του φωτονίου $h \cdot \nu$ είναι μικρότερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος ($E_g > h \cdot \nu$), το φωτόνιο δεν απορροφάται και μένει στη ζώνη σθένους. Αν όμως η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση ή μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού ($E_g < h \cdot \nu$), τότε κάθε φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να διεγερθεί προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή. Ο παραπάνω μηχανισμός διέγερσης εξαρτάται και από το αν ο ημιαγωγός είναι άμεσος ή έμμεσος.

Όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στη ζώνη σθένους αυξάνονται, οπότε αυξάνεται και η αγωγιμότητά του. Δηλαδή όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους στα ηλεκτρόνια σθένους του ημιαγωγού όπου αποδεσμεύονται από την έλξη του πυρήνα τους. Καθώς ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται, δημιουργείται μια κενή θέση στον δεσμό, η οποία λέγεται οπή. Αν αποσπασθεί το ηλεκτρόνιο έξω από τον ημιαγωγό, τότε ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου θα πάρει τη θέση του. Στη συνέχεια, τη θέση του τελευταίου ηλεκτρονίου θα πάρει ένα άλλο ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο και ο μηχανισμός θα συνεχιστεί.

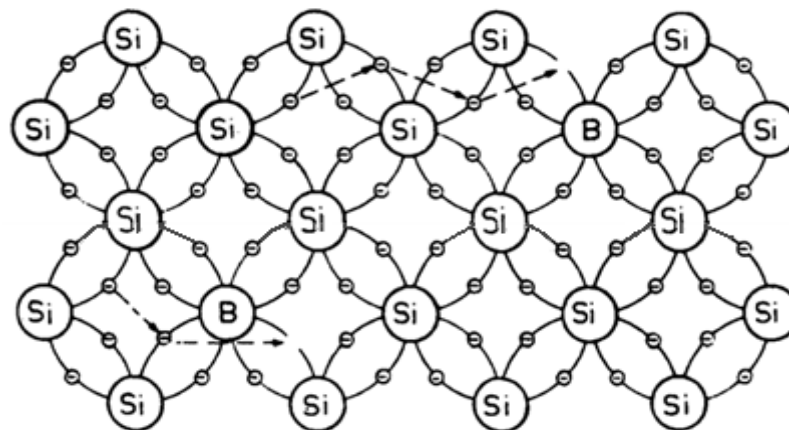
Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι εάν στα άκρα του ημιαγωγού εφαρμοστεί τάση, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, υπό την επίδραση του οποίου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προς τη μία κατεύθυνση και υπάρχει και μία κίνηση των οπών προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η κίνηση των ηλεκτρονίων έξω από τον ημιαγωγό γίνεται με τους ημιαγωγούς πρόσμειξης, οι οποίοι δημιουργούνται με πρόσμειξη άλλων στοιχείων στον κρύσταλλο του πυριτίου. Οι ημιαγωγοί πρόσμειξης διακρίνονται σε δύο τύπους:

- Ημιαγωγός τύπου n: προκύπτει αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού μεγαλύτερου σθένους. Στον ημιαγωγό αυτό ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης δεν συμμετέχει σε δεσμό και είναι ελεύθερο. Έτσι, ο ημιαγωγός τύπου n περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από τον καθαρό αγωγό και τα άτομα της πρόσμειξης ονομάζονται δότες.

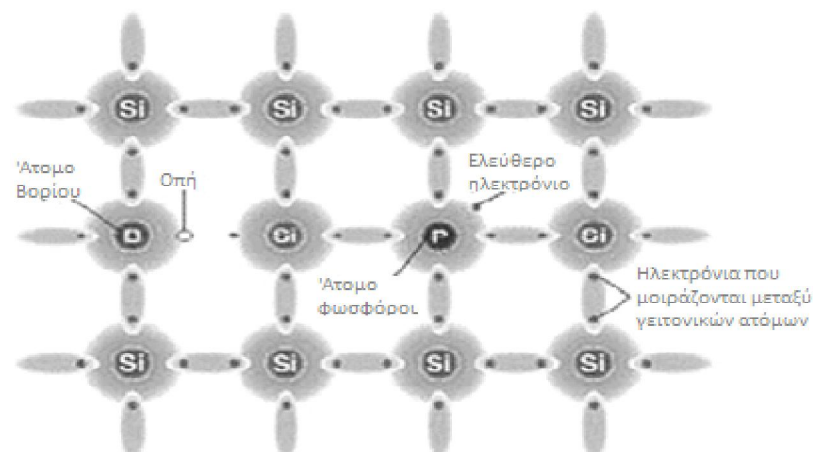


Σχήμα 2.1.4: Σχηματισμός πυριτίου τύπου N με προσμίξεις από άτομα-δότες ηλεκτρονίων

- Ημιαγωγός τύπου p: προκύπτει αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού μικρότερου σθένους. Στον ημιαγωγό αυτό τα άτομα πρόσμειξης μπορούν να δεχτούν ένα ηλεκτρόνιο για να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός και ονομάζεται αποδέκτης.



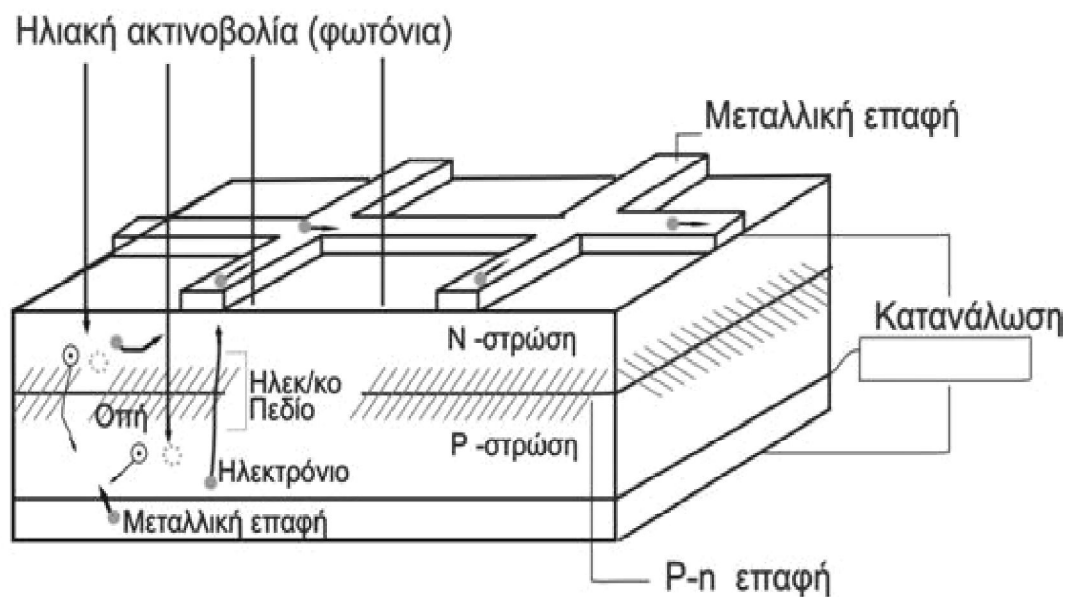
Σχήμα 2.1.5: Σχηματισμός πυριτίου τύπου P με προσμίξεις από άτομα-αποδέκτης ηλεκτρονίων



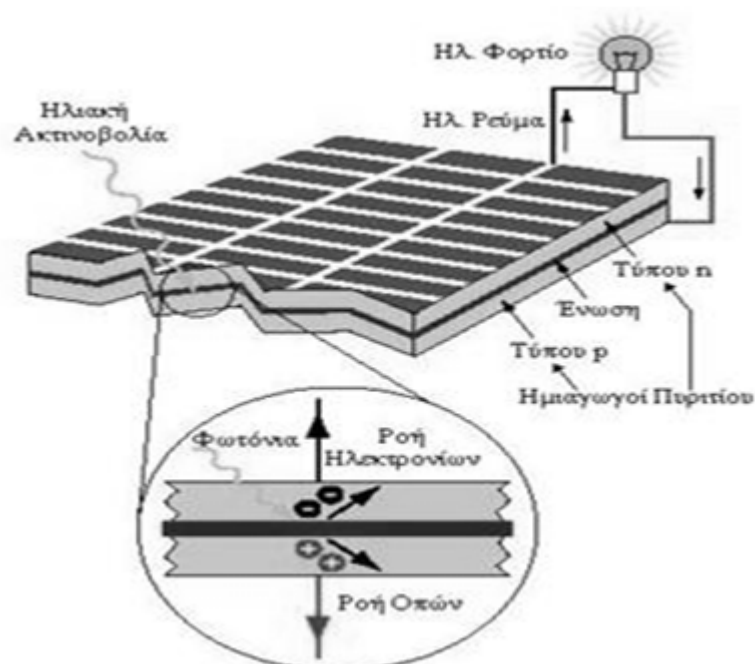
Σχήμα 2.1.6: Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα πρόσμειξης.

3.1.1 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

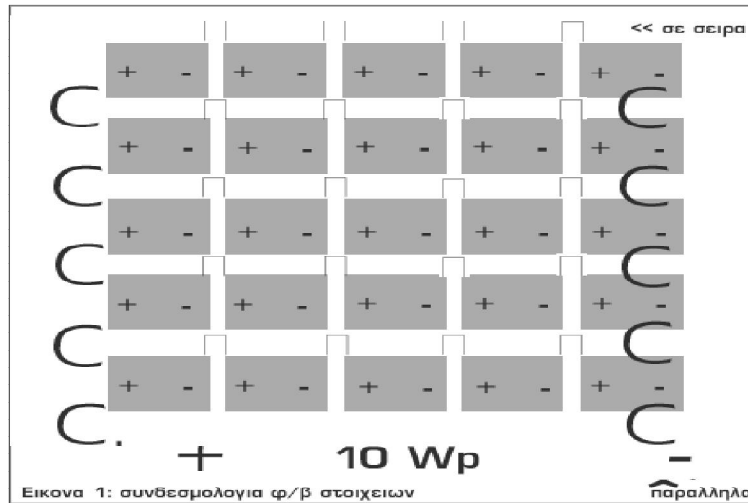
Η συγκέντρωση των κατιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του. Στο Σχήμα 2.1.1.7 φαίνεται η υλοποίηση διόδου σε ένα κρυσταλλικό ηλιακό κύτταρο πυριτίου.



Σχήμα 2.1.1.7 : Σχηματική διάταξη ενός ΦΒ στοιχείου. Ηλιακή ακτινοβολία (φωτόνια) προσπίπτει στην εμπρόσθια επιφάνεια της δι-επαφής p-n όπως δείχνει το σχήμα. Το πάχος του στοιχείου μερικά μm.



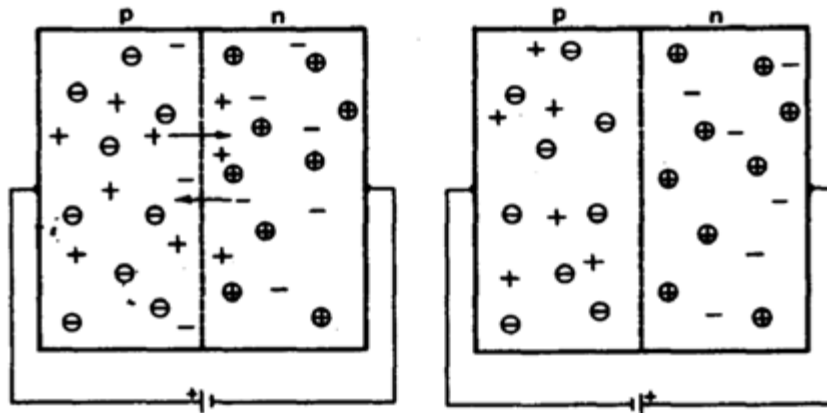
Σχήμα 2.1.1.8: Η ημιαγωγική διάταξη και η δημιουργία φωτορεύματος.



Εικόνα 2.1.1.9: Συνδεσμολογία ΦΒ στοιχείων

3.1.2 Ορθή και αναστροφή πόλωση της διόδου επαφής p-n

Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη δίοδο p-n ορθή πόλωση, δηλαδή ο θετικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου p της διόδου, και ο αρνητικός πόλος με το τμήμα τύπου n. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν χωρίς εμπόδια από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης, όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p (Σχήμα 2.1.2.10).

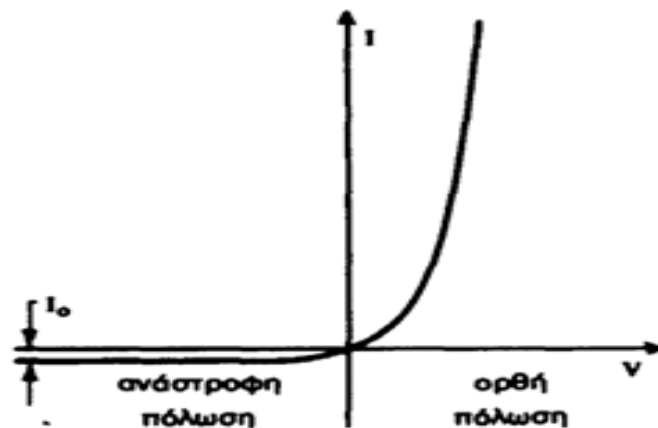


Σχήμα 2.1.2.10: Συνδεσμολογία ορθής και αναστροφής πόλωσης

Αντίθετα, στην αναστροφή πόλωση, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή και από την άλλη μεριά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής. Έτσι, στις συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή.

Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Δηλαδή μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις 10Ω , να την αυξάνει στην αντιστροφή πόλωση σε $100M\Omega$, δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη.

Το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.1.2.11) δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται.

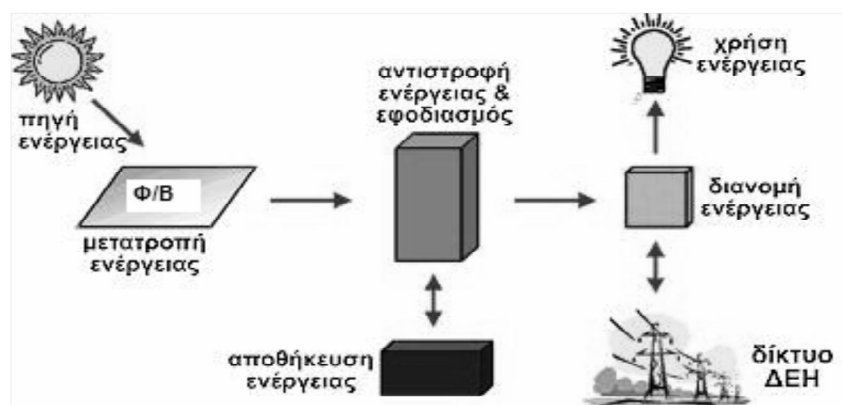


Σχήμα 2.1.2.11: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I)-τάσης (V) μίας διόδου P-N

3.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όταν ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας προσπίπτει σε κάποιο πλαίσιο μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Αν το πλαίσιο αυτό είναι οι καθρέφτες ενός ηλιακού θερμοσίφωνα τότε η θερμική ενέργεια που έχει απορροφηθεί καταναλίσκεται στην θέρμανση του νερού. Βέβαια με ορισμένες διατάξεις η θερμική ενέργεια που έχει συσσωρευτεί στα πλαίσια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κάποιου θερμικού κύκλου.

Ευρύτερη όμως είναι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή απ' ευθείας ηλεκτρικής ενέργειας, όπως συμβαίνει με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο μέσω ορισμένων διατάξεων, ημιαγωγών στοιχείων, που έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια, που προσπίπτει στην επιφάνειά τους, κατευθείαν σε ηλεκτρική. Οι στοιχειώδεις ημιαγωγικές διατάξεις που αποτελούνται από λεπτές πλάκες πυριτίου και έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν απ' ευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, ονομάζονται *φωτοβολταϊκά στοιχεία* (Σχήμα 2.2.12).



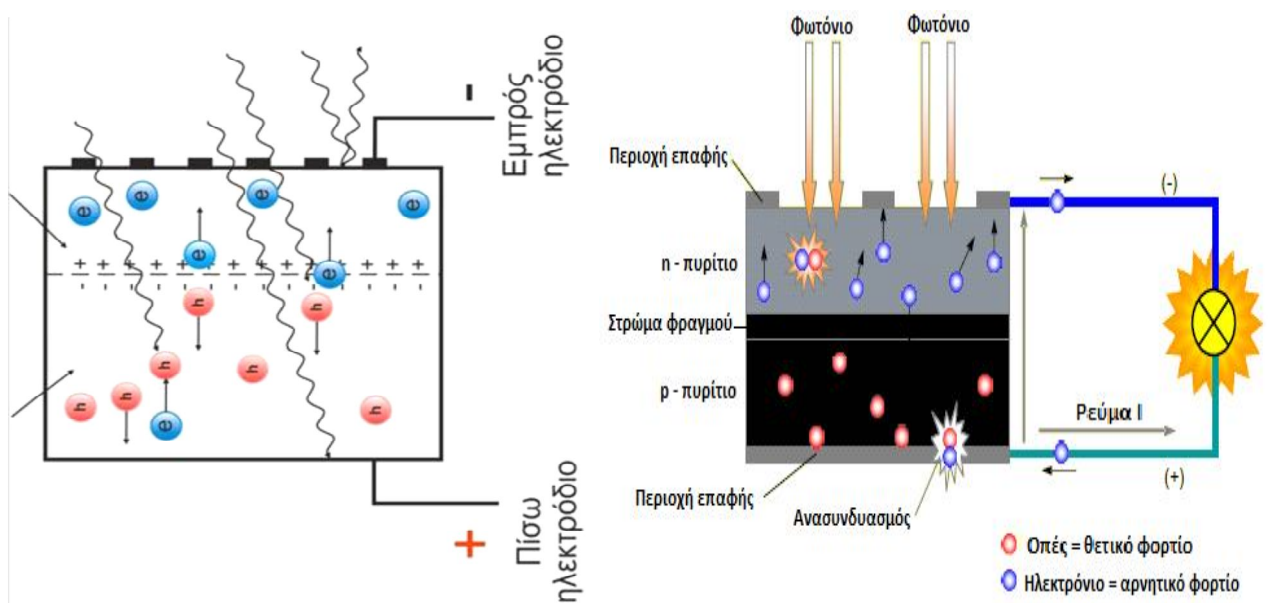
Σχήμα 2.2.12 Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική

ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΒ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ: Η μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, που απορροφάται στο εσωτερικό μιας διάταξης υλικών σε επαφή, σε ηλεκτρική, ονομάζεται *φωτοβολταϊκό φαινόμενο*. Η διάταξη ονομάζεται *φωτοβολταϊκό στοιχείο* ή *πλαίσιο*.

Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Τα φωτόνια περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Επίσης τα φωτόνια ταξιδεύουν με ταχύτητα 300.000 Km/h. Η κίνησή τους διαρκεί μέχρι ένα αντικείμενο να βρεθεί στην κατεύθυνση της ταχύτητάς τους. Τότε τα μόρια του αντικειμένου δέχονται την ενέργεια των φωτονίων με συνέπεια να αυξάνεται η κινητική τους ενέργεια και να παράγεται έτσι θερμότητα. Όταν το φως του ήλιου χτυπά ένα φβ πλαίσιο, τα φωτόνια του απορροφημένου φωτός του ήλιου αποσπών τα ηλεκτρόνια από τα άτομα που αποτελούν το πλαίσιο. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται, δημιουργώντας και συμπληρώνοντας οπές εντός του πλαισίου. Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Η φυσική διαδικασία στο οποίο ένα κύτταρο PV μετατρέπει το φως του ήλιου στην ηλεκτρική ενέργεια είναι γνωστό ως **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Το φαινόμενο της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από την ηλιακή ακτινοβολία με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** και ανακαλύφθηκε από τον Αϊνστάιν το 1905 (για την ανακάλυψη του αυτή πήρε βραβείο Νόμπελ το 1921).

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο διαφορετικών εσωτερικών φαινομένων, της φωτοδημιουργίας «ελεύθερων» ηλεκτρικών φορέων στο εσωτερικό των ημιαγωγών(φωτοαγωγιμότητα) και της δημιουργίας εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή της επαφής δύο ημιαγωγών.

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου (Σχήμα 2.2.13).



Σχήμα 2.2.13: Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο. Η ηλιακή ενέργεια, προσπίπτοντας στη δίοδο p-n, Διαχωρίζει οπές και ηλεκτρόνια δημιουργώντας διαφορά δυναμικού.

3.2.1 Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του ΦΒ φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο.

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

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φβ φαινόμενο.

Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φβ στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φβ διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων όπως από διόδους (Shotcky) Σότκνυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

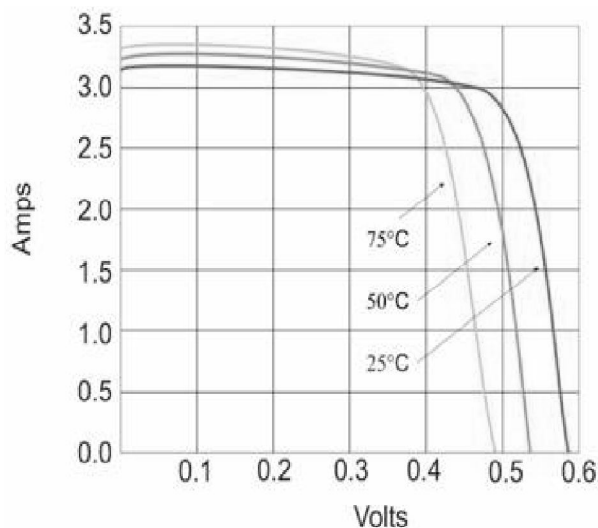
3.2.2 Η απορρόφηση ακτινοβολίας στα ΦΒ πλαίσια

Στα φβ στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά η ενέργεια τους μετατρέπεται σε θερμότητα στο στοιχείο και ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα.

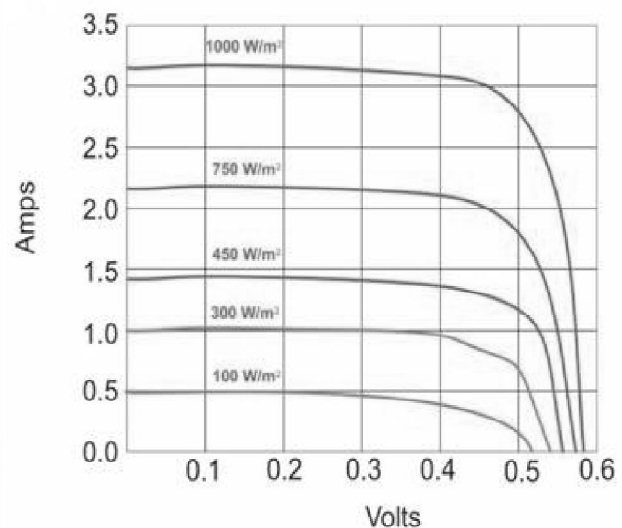
Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγό υλικό του στοιχείου και απορροφάτε τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο με το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει, όπως είδαμε, στην εκδήλωση του φβ φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Έτσι τα φβ αναπτύσσουν αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες όταν λειτουργούν, που φθάνουν ως τους $80\text{ }^\circ\text{C}$.

3.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ΦΒ στοιχείων

- Η αύξηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου που επιδρά αρνητικά στην απόδοση του. Αυτό το βλέπουμε από το τύπο $n_{\theta} = n \times \sigma_{\theta}$, όπου n ο συντελεστής απόδοσης ενός φβ στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία (π.χ. 20°C) και n_{θ} ο συντελεστής απόδοσης σε μια διαφορετική θερμοκρασία. Ο συντελεστής σ_{θ} είναι ίσος με τη μονάδα στη συμβατική θερμοκρασία και μειώνεται κατά 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας.
- Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής απορρόφησης μας δείχνει την ευκολία με την οποία πραγματοποιείτε η απορρόφηση των φωτονίων από ημιαγωγικό υλικό κατασκευής ενός φβ στοιχείου.
- Η απόσταση μεταξύ της όψης του στοιχείου και της ένωσης p – n.
- Η μέση διάρκεια των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.
- Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά σημαντικά στην απόδοση της ηλιακής κυψέλης.



Σχήμα 2.2.3.14: Επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες I-V μιας τυπικής κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου.

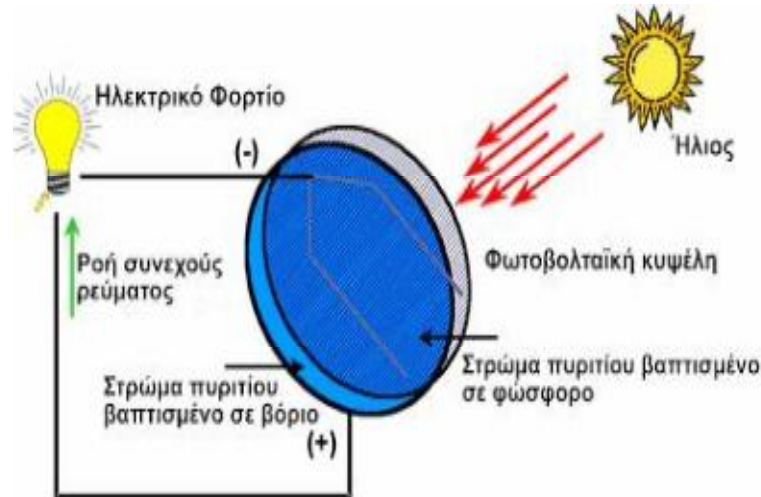


Σχήμα 2.2.3.15: Παραγωγή ρεύματος και τάσης μιας ηλιακής κυψέλης υπό διαφορετικές εντάσεις φωτός.

3.3 Φωτοβολταϊκή κυψελίδα

Αφορά στην μικρότερη δομική μονάδα, ενός συνόλου ομοίων επαναλαμβανόμενων στο χώρο, λειτουργικά αυτόνομη, αποτελώντας τμήμα ενός σύνθετου ηλεκτρικού συσσωρευτή ή ενός ΦΒ πλαισίου.

Μια φβ κυψέλη αποτελείται από στρώματα ημιαγωγικών υλικών με διαφορετικές ηλεκτρονικές ιδιότητες. Σε μια τυπική κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου, ο μεγαλύτερος όγκος του υλικού αποτελείται από πυρίτιο, το οποίο περιέχεται στο χαλαζία και στην κοινή άμμο. Επίσης περιέχει μια μικρή ποσότητα βορίου ώστε να έχει θετικό χαρακτήρα τύπου p. Ένα λεπτό στρώμα στο μπροστινό τμήμα της κυψέλης εμπλουτίζεται με φώσφορο ώστε να έχει αρνητικό χαρακτήρα τύπου n. Η διεπιφάνεια μεταξύ αυτών των δύο στρωμάτων περικλύει ένα ηλεκτρικό πεδίο. Μία φβ κυψελίδα παράγει 1 με 2 W ισχύ.



Σχήμα 2.3.16: Λειτουργία φωτοβολταϊκής κυψέλης

3.4 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Είναι ημιαγωγική διάταξη που μετατρέπει την απορροφούμενη στο χώρο της επαφής του, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Ονομάζεται επίσης ΦΒ κύτταρο ή ΦΒ κυψελίδα.

Η τάση όμως και η ισχύς των ΦΒ στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών.

Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο ΦΒ στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις μέχρι 0,5V περίπου και ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4W περίπου. Για αυτό, τα ΦΒ στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση ΦΒ γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 50 περίπου, σε ένα πλαίσιο, με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης. π.χ. η σύνδεση 35 στοιχείων στη σειρά δίνει περίπου 15-20 V, που είναι κατάλληλη, αν αφαιρέσουμε τις διάφορες απώλειες, για την φόρτιση των συνηθισμένων συσσωρευτών μόλυβδου.

Σε κάθε στοιχείο παράγεται περίπου μια διαφορά δυναμικού 0,5 Volt και ισχύς 0,4 Watt, οπότε αθροισόμενη σε όλα τα σε σειρά στοιχεία δίνει περίπου 17,6 Volt (για ένα συλλέκτη 36 στοιχείων εν σειρά).



Σχήμα 2.5.23: Ηλιακά στοιχεία



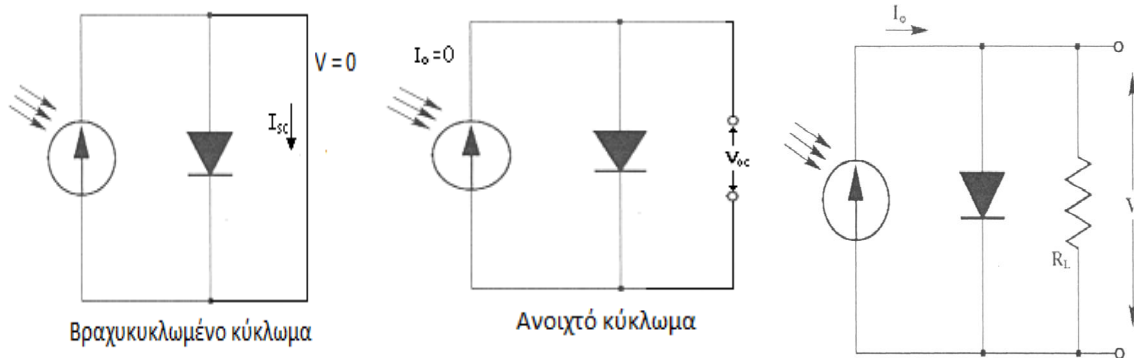
Σχήμα 2.5.24: Ηλεκτρική σύνδεση ηλιακών στοιχείων

3.4.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ΦΒ στοιχείων

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός Φβ στοιχείου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο επαφής.

- Αν στο απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα τα άκρα της επαφής συνδεθούν με μηδενική αντίσταση, το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο (Σχήμα 2.2.4.5) και διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το φωτόρευμα, που ονομάζεται **ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})** του Φβ στοιχείου.

- Αν τα άκρα της επαφής δεν συνδεθούν μεταξύ τους, δηλαδή, έχουμε **ανοιχτό κύκλωμα** (Σχήμα 2.2.4.16), η τάση στα άκρα ονομάζεται **τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})** του Φβ στοιχείου.



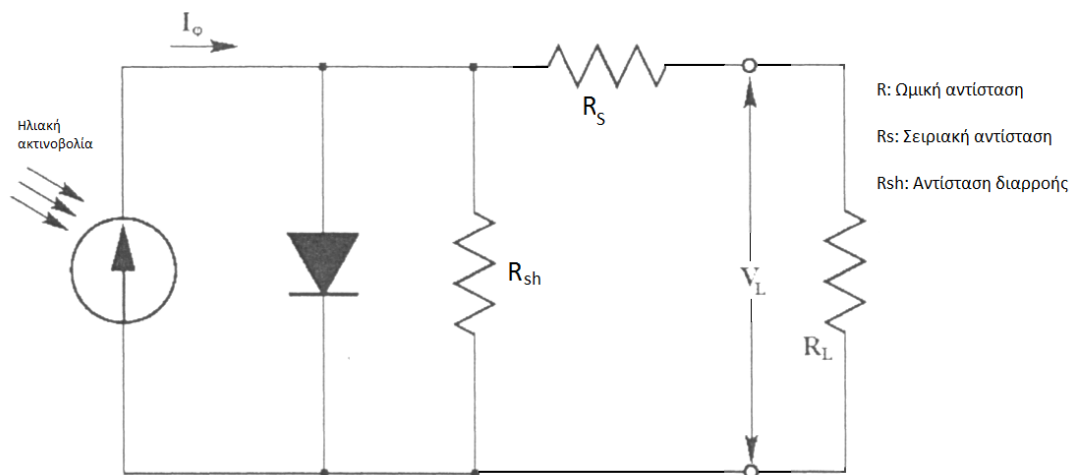
Σχήμα 2.4.1.17: Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Στην πραγματικότητα το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φβ στοιχείου (Σχήμα 2.2.4.6) περιλαμβάνει ακόμα δύο αντιστάσεις:

α) τη **σειριακή αντίσταση R_s** (series resistance), η οποία συνδέεται σε σειρά με την δίοδο επαφής και αφορά στις αντιστάσεις κατά το πέρασμα του ρεύματος μέσα από τη δίοδο και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια,

β) την **αντίσταση διαρροής R_{sh}** (shunt resistance), η οποία συνδέεται παράλληλα με την δίοδο επαφής και αφορά στη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής.

Τα Φβ στοιχεία του εμπορίου έχουν συνήθως $R_s < 5 \Omega$ και $R_{sh} > 500 \Omega$.



Σχήμα 2.4.1.18: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φβ στοιχείου

Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί ισορροπία όταν η τάση που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα, για το οποίο και θα ισχύει:

$$I_{\phi} = I_0(e^{\frac{eV}{\gamma kT}} - 1)$$

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

Από την παραπάνω σχέση, η τάση ανοιχτό κυκλώματος θα είναι:

$$V_{OC} = \frac{\gamma kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1\right)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της V_{oc} σε συνάρτηση με το I_{ϕ} , δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φβ στοιχείο και την εξάρτηση της από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα, $I_{sc}=I_{\phi}$.

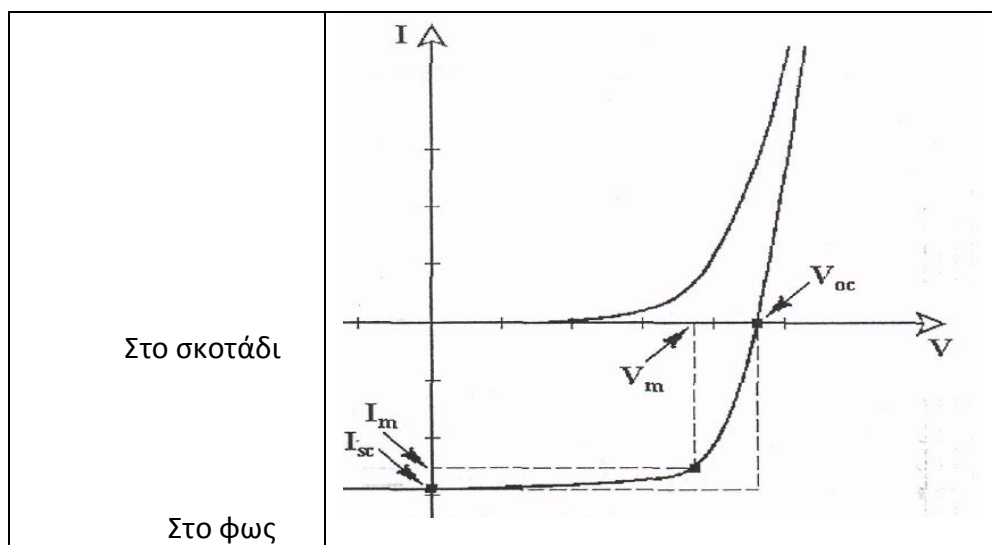
Όταν το κύκλωμα του φβ στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_{\phi} - I_0 * \left(e^{\frac{e * I_L * R_L}{\gamma * k * T}} - 1 \right)$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης, δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος, για την οποία η ισχύς που παράγει το φβ στοιχείο θα γίνεται μέγιστη ($P_m=I_m \cdot V_m$). Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{e * V_m}{\gamma * k * T} \right) * e^{\frac{e * V_m}{\gamma * k * T}}$$

Στο διάγραμμα του κατωτέρω σχήματος, φαίνονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας των φβ στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους.



Σχήμα 2.4.1.19: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I) - τάσης (V) ενός ΦΒ στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως.

3.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου

Η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στην κυψελίδα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της. Σε συνθήκες χρήσης στο ύπαιθρο, όπου το φβ στοιχείο είναι ενσωματωμένο σε ΦΒ πλαίσιο, η διαφορά θερμοκρασιών λειτουργίας της κυψελίδας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα αυξάνεται γραμμικά, ως συνάρτηση της πυκνότητας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$\frac{\theta_c - \theta_a}{G} = 30^\circ\text{C} / \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)$$

Όπου θ_c = θερμοκρασία λειτουργίας κυψελίδας

θ_a = θερμοκρασία περιβάλλοντα αέρα

G = πυκνότητα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

Εφόσον μεταβάλλεται λοιπόν αυτή η διαφορά, μεταβάλλονται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} . Γενικά παρατηρείται μια σταθερή ποσοστιαία αύξηση του I_{sc} από τους -10°C έως τους 60°C της θερμοκρασίας της φβ κυψελίδας. Αυτή η αύξηση αποδίδεται ως εξής:

$$I_{SC} = \frac{E}{E_{STC}} * I_{sc,STC} * (1 + \alpha_{I_{sc}} (\theta_c - \theta_{STC}))$$

Όπου $\alpha_{I_{sc}} = \frac{dI_{sc}}{I_{sc}dT}$ = θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου,

$I_{sc,STC}$ = η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε STC,

E = η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας,

$E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 273 + \theta$.

Από τον προηγούμενο τύπο βλέπουμε ότι έχουμε αναλογική εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης από την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής $\alpha_{I_{sc}}$ έχει τιμές στο διάστημα $0.0001 \div 0.001 \text{ K}^{-1}$, με τιμή αναφοράς $\alpha_{I_{sc}} = 0.0005 \text{ K}^{-1}$. Η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψελίδας. Αυτή την εξάρτηση την βλέπουμε αναλυτικά στην παρακάτω έκφραση:

$$V_{OC} = V_{oc,STC} * (1 + \beta_{V_{oc}} * (\theta_c - \theta_{STC})) * (1 + \delta(\theta_c) * \ln\left(\frac{E}{E_{STC}}\right))$$

Όπου $V_{oc,STC}$ = τάση ανοικτού κυκλώματος σε STC,

$\delta(\theta_c)$ = διορθωτικός παράγοντας της εξάρτησης της V_{oc} από την E ,

$\beta_{V_{oc}} = \frac{dV_{oc}}{V_{oc}dT}$ = θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ στοιχείου.

Το $\beta_{V_{oc}}$ έχει τιμές στο διάστημα $-0.003 \div -0.005 \text{ K}^{-1}$ με τιμή αναφοράς $\beta_{V_{oc}} = -0.004 \text{ K}^{-1}$.

Αυτή η ελάττωση οφείλεται στην εξάρτηση του ρεύματος κόρου της διόδου από τη θερμοκρασία.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από το φβ στοιχείο, όταν αυτό λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_m = V_m * I_m \approx \frac{E}{E_{STC}} * P_P * (1 + \gamma_{P_m} * (\theta_c - \theta_{STC}))$$

Όπου $\gamma_{P_m} = \frac{dP}{P_m dT}$ = θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου,

$$P_p = V_{m,STC} \cdot I_{m,STC} = \text{μέγιστη ηλεκτρική ισχύς σε πρότυπες συνθήκες.}$$

Ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος είναι προσεγγιστικά ίσος με $\gamma_{P_m} \approx -0.0045K^{-1}$ για το c-Si.

Επομένως, ο παράγων θερμότητας που καθορίζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή της ισχύς αιχμής και στο συντελεστή απόδοσης του ΦΒ στοιχείου δίνεται ως εξής:

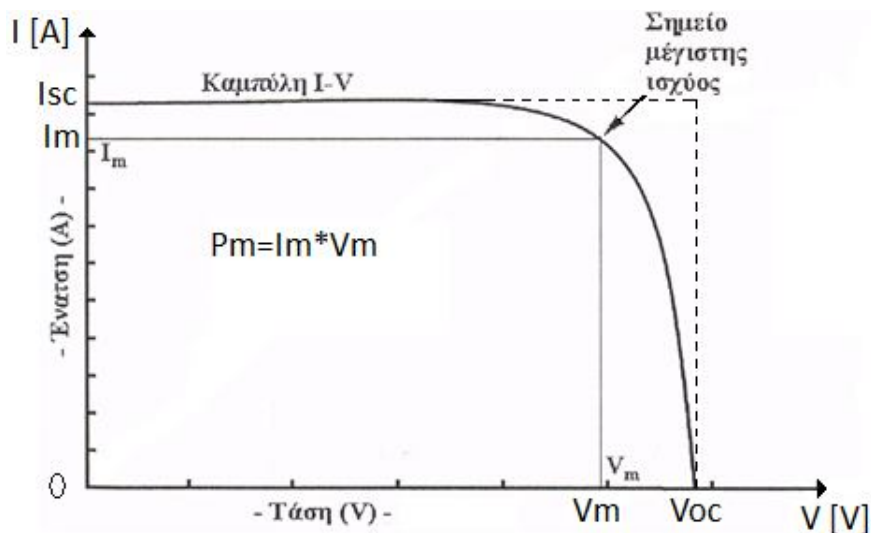
$$n_T = 1 + \gamma_{P_m} * (\theta_C - \theta_{STC})$$

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω τύπο η ισχύς αιχμής και η απόδοση του φβ στοιχείου εμφανίζουν γραμμική εξάρτηση από τη θερμοκρασία.

3.4.3 Χαρακτηριστική καμπύλης ΦΒ στοιχείου

Η τάση των ΦΒ στοιχείων μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν παραμείνει σταθερή η ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται.

Όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή I_{sc} και η ηλεκτρική τάση μηδενίζεται ($V=0$). Αντίθετα, όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται ($I=0$) και η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή V_{oc} . Οι μεταβολές έντασης και τάσεως αποτελούν τη χαρακτηριστική καμπύλη του ΦΒ στοιχείου (Σχήμα 2.4.3.19).



Σχήμα 2.4.3.19: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος I – τάσεως V ενός ΦΒ στοιχείου

Το μέγιστο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο μέσα στην καμπύλη I – V με πλευρές I_m και V_m , έχει εμβαδόν ίσο με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ P_m από το ΦΒ στοιχείο (Σχήμα 2.2.5.7). Το άλλο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με πλευρές I_{sc} και V_{oc} που βρίσκεται εξωτερικά της καμπύλης I – V (Σχήμα 2.2.5.7) περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του ΦΒ στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το πηλίκο των εμβαδών των δύο παραλληλογράμμων ονομάζεται **συντελεστής πλήρωσης FF** του ΦΒ στοιχείου και δίνει το μέτρο προσέγγισης της λειτουργίας ενός στοιχείου προς την ιδανική συμπεριφορά:

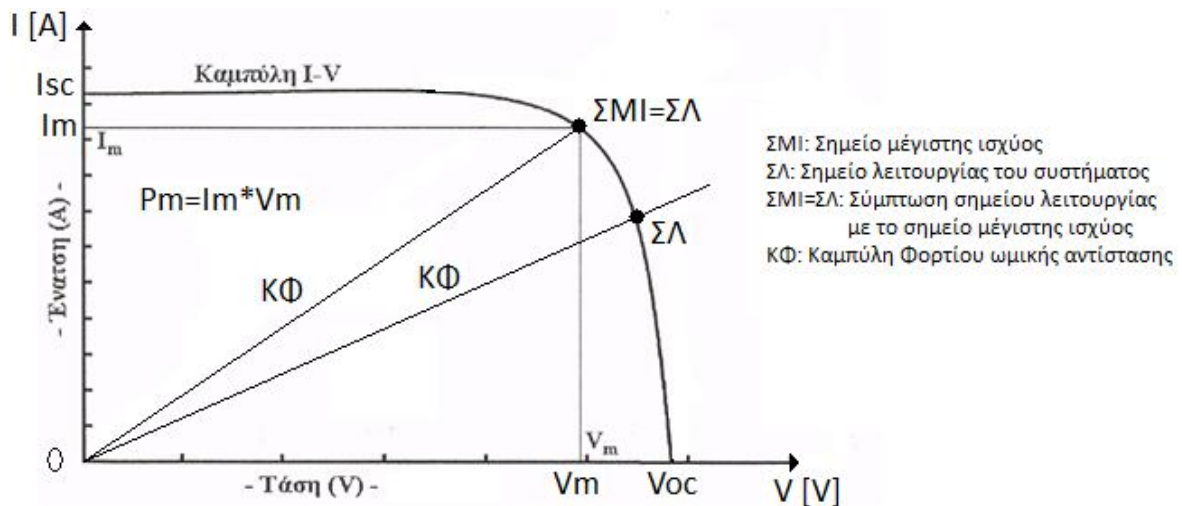
$$FF = \frac{I_m * V_m}{I_{sc} * V_{oc}}$$

Η τιμή του FF κυμαίνεται από 0 έως 1. Μια τιμή από 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζει ένα ΦΒ στοιχείο με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση.

3.4.4 Σημείο λειτουργίας ΦΒ στοιχείου

Στις ακραίες καταστάσεις του βραχυκυκλωμένου και ανοιχτού κυκλώματος, όπου $V=0$ και $I=0$ αντίστοιχα, η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο είναι μηδενική ($P=0$). Άρα, η μεταβολή της ισχύος με την τάση στο σχήμα 2.2.6.8, παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση της τιμής του ρεύματος. Συνεπώς, η αντίσταση του κυκλώματος, που τροφοδοτείται από ένα ΦΒ στοιχείο, πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή για να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο. Δηλαδή, η τάση και το ρεύμα της αντίστασης πρέπει να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ.

Θεωρώντας ότι ένα ΦΒ στοιχείο τροφοδοτεί μια ωμική αντίσταση, μπορούμε στο σχήμα 2.4.4.20 να απεικονίσουμε την καμπύλη φορτίου ΚΦ της αντίστασης, η οποία δείχνει την μεταβολή του ρεύματος που τη διαρρέει σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στα άκρα της ηλεκτρική τάση. Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης και της καμπύλης φορτίου ονομάζεται **σημείο λειτουργίας ΣΛ** του συστήματος και καθορίζει το ρεύμα και την τάση στην αντίσταση.



Σχήμα 2.4.4.20.: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος – τάσεως $I=f(V)$ ΦΒ στοιχείου και καμπύλη φορτίου ΚΦ

3.4.5 Βαθμός απόδοσης ΦΒ στοιχείου

Ένα ΦΒ στοιχείο αποδίδει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ P_m και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ισχύος P_{HA} . Το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύς προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζεται **βαθμός απόδοσης η** του ΦΒ στοιχείου.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{HA}} = \frac{I_m * V_m}{P_{HA}} = \frac{FF * I_{sc} * V_m}{P_{HA}}$$

Όπου: P_m [W]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ ΦΒ στοιχείου

P_{HA} [W]: ισχύ προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

I_m [A]: ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

V_m [V]: τάση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

FF [-]: συντελεστής πλήρωσης

I_{sc} [A]: ρεύμα βραχυκύκλωσης

V_{oc} [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος

Η απόδοση των φβ πλαισίων εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής τους, τη θερμοκρασία των κυψελίδων και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Άλλος παράγοντας είναι το φαινόμενο της θερμής κηλίδας σύμφωνα με το οποίο όταν μία κυψελίδα υποστεί βλάβη επιφέρει ολική αχρήστευση του φβ πλαισίου διότι η σκιασμένη κυψελίδα λειτουργεί όπως η απλή δίοδος p-n, η οποία όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τις άλλες μια υψηλή ανάστροφη τάση με αποτέλεσμα την καταστροφή της. Άλλοι παράγοντες είναι η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό των φβ πλαισίων και οι συνακόλουθες αλλοιώσεις δομής της φβ κυψελίδας, οι σκόνες και άλλα σώματα στην επιφάνεια όψης των πλαισίων.

3.4.6 Ισχύ αιχμής ΦΒ στοιχείου

Σε ένα ΦΒ στοιχείο ελέγχονται τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά: α) ο βαθμός απόδοσης η , β) ο συντελεστής πλήρωσης FF , γ) το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και δ) η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} .

Οι **πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC** (Standard Test Conditions), που έχουν καθοριστεί διεθνώς, είναι οι ακόλουθες:

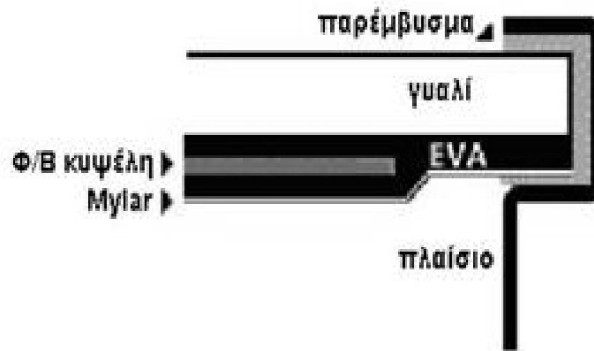
- Θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου ίση με $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος $P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με μάζα αέρα $AM=1,5$.
- Κάθετη πρόσπτωση ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής ως χαρακτηριστικό του ΦΒ στοιχείου. **Ισχύ αιχμής P_p** ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC και έχει μονάδα μέτρησης το Watt(W).

3.5 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Είναι ένα σύνολο φβ στοιχείων, που αποτελούν μια ολοκληρωμένη μονάδα, τοποθετημένη σ' ένα μεταλλικό πλαίσιο συνδεδεμένα σε σειρά ή και παράλληλα, για να καλύπτει με συνολική τάση τη φόρτιση ενός 12βολτου συσσωρευτή.

Το φβ στοιχείο μπορεί να συνδεθεί σε σειρά ή παράλληλα με άλλα φβ στοιχεία, ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ρεύμα και τάση. Το φβ πλαίσιο (panel) είναι μια σύνθεση πολλών φβ στοιχείων σε μια ενιαία κατασκευή, εύκολη στην μεταφορά, την τοποθέτηση και στην αντικατάσταση της. Στο πίσω μέρος της κατασκευής υπάρχει κατάλληλο ηλεκτρικό κιβώτιο για την συνδεσμολογία με την υπόλοιπη εγκατάσταση. Στο παράπλευρο σχήμα παρουσιάζεται η εγκάρσια τομή ενός τυπικού πλαισίου που χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Τα φβ στοιχεία ενθυλακώνονται σε κάποιο πολυμερές υλικό, όπως ο οξικός εστέρας αιθυλενίου-βινυλίου (EVA), το οποίο στη συνέχεια τοποθετείται μεταξύ γυαλιού στην επάνω επιφάνεια και Mylar ή Tedlar στην κάτω.



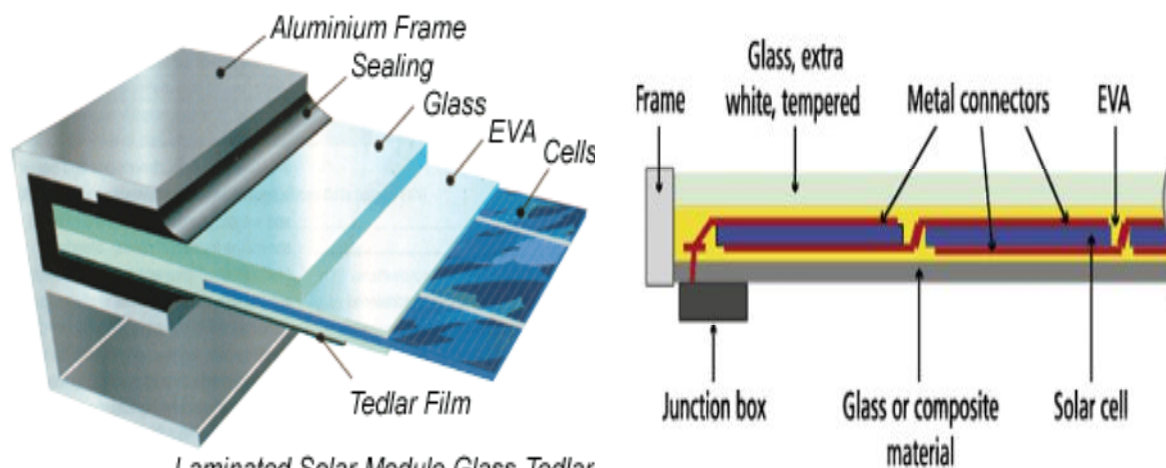
Σχήμα 2.5.21: Τομή ΦΒ πλαισίου

Οι ακμές σφραγίζονται με ένα στεγανωτικό παρέμβυσμα και υποστηρίζονται από ένα πλαίσιο. Ο συνδυασμός πολλών φβ πλαισίων, καλωδιωμένων μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα λέγεται φβ συστοιχία (PV array). Τοποθετούνται συνήθως στην ίδια επίπεδη επιφάνεια, σταθερή ή περιστρεφόμενη. Η παράλληλη σύνδεση αυξάνει το ολικό ρεύμα, ενώ η σύνδεση σε σειρά αυξάνει την ολική τάση. Συνήθως συνδέονται κατά κλάδους. Κάθε κλάδος αποτελείται από πλαίσια σε σειρά. Οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα.

Έτσι επιτυγχάνονται μεγάλες τάσεις (μέσα σε επιτρεπτά όρια, 600V max) και μικρά ρεύματα, άρα μικρές θερμικές απώλειες στους αγωγούς μεταφοράς της ισχύος και χαμηλό κόστος αγοράς των αγωγών και της τοποθέτησης τους. Πολλές συστοιχίες συνεργαζόμενες, εν σειρά ή παράλληλα αποτελούν ένα φβ συγκρότημα ή φβ πάρκο.

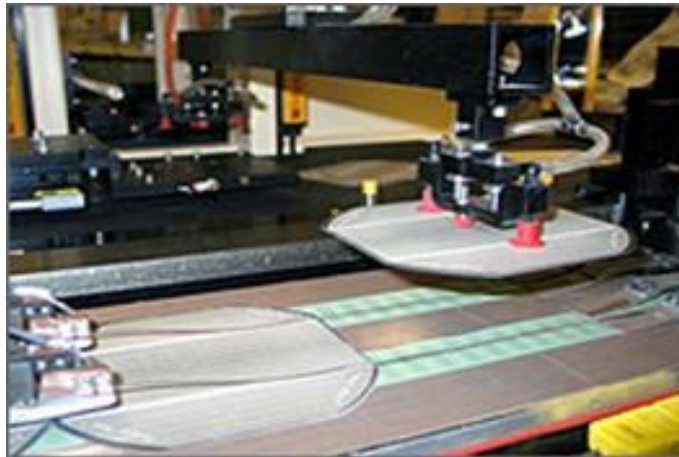
Τα φβ πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4V μέχρι 22V, και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5A μέχρι 2,5A. Πριν βγουν στο εμπόριο, τα φβ πλαίσια υποβάλλονται συνήθως σε μια σειρά από αυστηρές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου με θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και σε δοκιμασία 5ήμερης συνεχούς παραμονής σε ατμόσφαιρα σχετικής υγρασίας 95% και θερμοκρασίας 95°C, για να ελεγχθεί η στεγανότητά τους.

Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν πως γίνεται η συναρμολόγηση των ηλιακών στοιχείων σε φβ πλαίσιο.



Laminated Solar Module Glass-Tedlar

Σχήμα 2.5.25: Συναρμολόγηση ηλιακών στοιχείων σε ΦΒ πλαίσιο

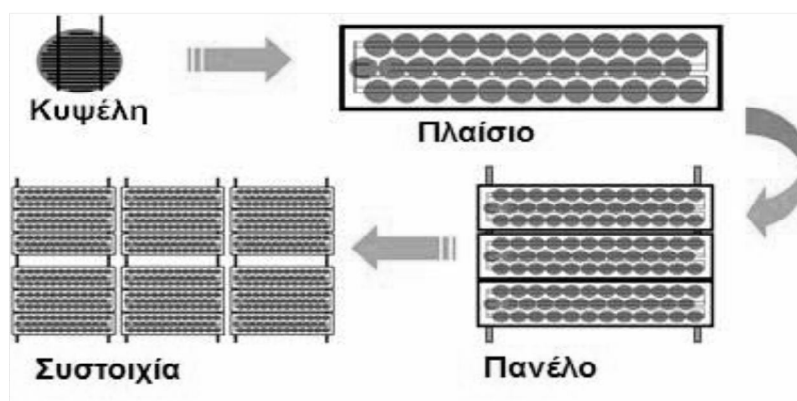


Εικόνα 2.5.22: Φωτοβολταϊκά στοιχεία κατά την συναρμολόγηση του πλαισίου



Σχήμα 2.5.26: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Τα ΦΒ στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου αποτελούν περίπου το 93,8% της παγκόσμιας παραγωγής ΦΒ γεννητριών για το 2003. Το υπόλοιπο της αγοράς καλύπτεται από τεχνολογίες ΦΒ λεπτών υμενίων, όπως το άμορφο-Πυρίτιο (a-Si), το Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe) και το Δισελινιούχο Ινδικό χαλκό με διάφορες προσμίξεις (CIGS). Αν και η τεχνολογία ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου έχει έναν υψηλό βαθμό ωριμότητας, αναμένονται περαιτέρω βελτιώσεις στην απόδοση και στην τεχνολογία παραγωγής τους. Οι μεγάλες επιχειρήσεις που ασχολούνται με την παραγωγή ΦΒ γεννητριών, ενώ διατηρούν και επεκτείνουν το δυναμικό παραγωγής τους σε κρυσταλλικό Πυρίτιο, έχουν ήδη επενδύσει σε μια τουλάχιστον από τις τεχνολογίες των λεπτών υμενίων.



Εικόνα 2.5.27: Φωτοβολταϊκά στοιχεία κατά την συναρμολόγηση του πλαισίου, πάνελ και συστοιχίες.

Τα ΦΒ στοιχεία πυριτίου χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα άμορφα:

Μονοκρυστάλλικα κύτταρα πυριτίου Si



Η ονομασία τους προέρχεται από την μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος των ατόμων πυριτίου(Si) που πλησιάζει τον τέλειο κρύσταλλο. Κατασκευάζονται ύστερα από ψύξη λιωμένου πυριτίου(Si) και πριονισμό του σε λεπτές πλάκες – τα κύτταρα. Η ανάγκη χρησιμοποίησης ιδιαίτερα καθαρού πυριτίου(Si) (ακριβή «πρώτη» ύλη), η χρήση εξειδικευμένων μεθόδων τήξης και κοπής για την επίτευξη του μονοκρυσταλλικού πλέγματος αυξάνει το κόστος παραγωγής δίνοντας τους όμως τον καλύτερο βαθμό απόδοσης από τις τρεις κατηγορίες φθάνοντας το 15-18%. Το ποσοστό αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα είναι πιο ευαίσθητα στην υπέρυθη ακτινοβολία που το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι σχετικά χαμηλό.

Τα φβ στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι το καταλληλότερο για φβ εγκαταστάσεις. Παρασκευάζεται με την μέθοδο Czochralski και τη μέθοδο επιπλεύουσας ζώνης και τεμαχίζεται σε φέτες πάχους 200-400μm. Έχει ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή, κάτι που του δίνει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική φτάνει το 24%, σε εργαστηριακό προϊόν. Σε βιομηχανική μορφή είναι 15-20%.

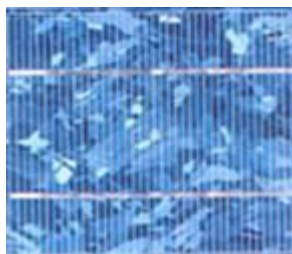
Παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα και είναι κατάλληλο για οικιακές εφαρμογές και σε φβ εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζει υψηλότερο κόστος κατασκευής, καθώς απαιτείται κρύσταλλος πολύ υψηλής καθαρότητας και μεγαλύτερη ποσότητα υλικού, λόγω του πάχους του στοιχείου. Το πάχος της φέτας δεν μπορεί να είναι λιγότερο από 200 μm, καθώς υπάρχει κίνδυνος θραύσης κατά την κοπή και την επεξεργασία. Ο κρύσταλλος έχει χρώμα σκούρο μπλε και ομοιόμορφο σχήμα.

Η εγκατάσταση ενός φβ συστήματος 1kWp απαιτεί 7-8m² ενώ παράγει 160-185 kWh/m². Έτσι προτιμάται σε φβ πάρκα, όπου η απόδοση, η επιφάνεια και η γρήγορη απόσβεση του κεφαλαίου είναι βασικά κριτήρια για τον σχεδιασμό του συστήματος. Οι εταιρίες κατασκευής φβ πλαισίων με μονοκρυσταλλικό πυρίτιο δίνουν εγγύηση για την απόδοσή τους έως και 25 έτη.



Εικόνα 2.5.28: Πλαίσιο με μονοκρυσταλλικά στοιχεία

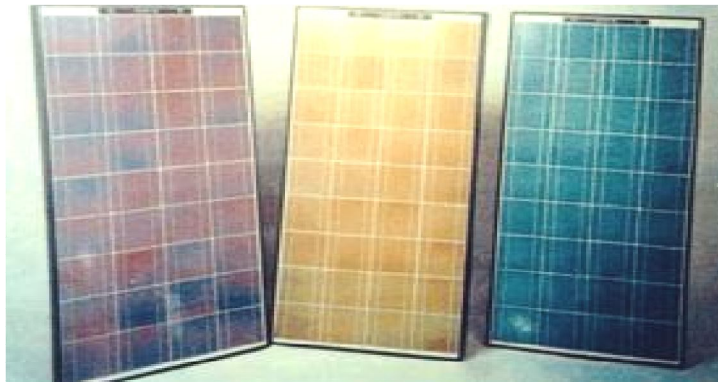
Πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου Si



Σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα στο πλέγμα τους περιλαμβάνουν κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών. Αιτία αυτής της διαφοροποίησης, είναι η μαζική και λιγότερο ελεγχόμενη ψύξη του πυριτίου Si, κάτι που μειώνει αισθητά το κόστος παραγωγής. Όπως και στην προηγούμενη τεχνολογία, μετά την ψύξη, το πολυκρυσταλλικό πλέγμα πριονίζεται στα λεπτά φβ κύτταρα. Η ύπαρξη διαφόρων κρυστάλλων μέσα στο πλέγμα αυξάνει την εσωτερική αντίσταση στα σημεία σύνδεσής τους, με αποτέλεσμα ο συνολικός βαθμός απόδοσης να μην μπορεί να ξεπεράσει το 13-15%.

Δίνουν την δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Κατασκευάζονται με χύτευση λιωμένου πυριτίου. Παρουσιάζουν μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές και μπορούν να κοπούν σε φέτες πάχους 10-50μm. Στην επιφάνειά τους διακρίνονται μονοκρυσταλλικές περιοχές οι οποίες έχουν γαλάζιο χρώμα.

Η εργαστηριακή τους απόδοση είναι 17-20% και 10-14% σε μορφή πλαισίου. Έχουν υψηλότερο κόστος κατασκευής από το άμορφο πυρίτιο. Στην επιφάνεια τις κυψελίδας διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όριά τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Όσο μικρότερο είναι το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης φβ στοιχείο, τόσο καλύτερη θα είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους.



Εικόνα 2.5.29: Πολυκρυσταλλικά ΦΒ σε διάφορους χρωματισμούς

Γενικά όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού στοιχείου, τόσο υψηλότερη θα είναι η απόδοσή του. Για την εγκατάσταση συστήματος 1kWp απαιτούνται 8-10m² ενώ παράγει 130-160 kWh/m². Είναι πιο συμφέρουσα λύση, σε σχέση με το άμορφο πυρίτιο, σε μεσαίου μεγέθους εφαρμογές. Χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα. Συνήθως το χρώμα του είναι γαλάζιο, διατίθενται όμως και φβ στοιχεία σε διάφορα χρώματα, ανάλογα των απαιτήσεων της εφαρμογής. Λόγω του χρώματός του ενσωματώνεται εύκολα σε κτίρια, όπου η αισθητική παίζει σημαντικό ρόλο. Οι εταιρίες κατασκευής φβ πλαισίων με πολυκρυσταλλικό πυρίτιο δίνουν εγγύηση για την απόδοση τους έως και 25 έτη.



Εικόνα 2.5.30: Πολυκρυσταλλικά ΦΒ πανέλα

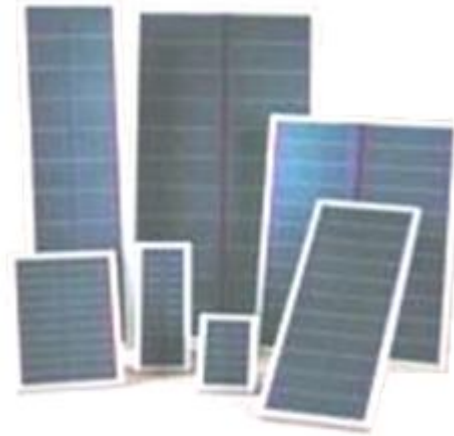
Άμορφα κύτταρα πυριτίου Si

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η μη κρυσταλλική της δομή. Κατασκευάζονται με την εφαρμογή πυριτίου Si σε ειδικό υπόστρωμα γυαλιού. Η μικρή και οικονομική ποσότητα πρώτων υλών, ο απλός τρόπος κατασκευής, η ευκολία στην εγκατάσταση και συναρμολόγηση καθιστούν τα άμορφα κύτταρα ικανά για μαζική παραγωγή. Δυστυχώς, η έλλειψη του κρυσταλλικού πλέγματος από την δομή τους περιορίζει τον βαθμό απόδοσης μόλις στο 5-8%. Για τον λόγο αυτό τα άμορφα κύτταρα δεν απαρτίζουν αμιγώς φβ πλαίσια αλλά προτιμώνται σε τεχνολογίες όπως υβριδικά φβ πλαίσια ή λεπτού φιλμ.

Δημιουργούνται με τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων υμένων (films). Θεωρητικά έχουν πολύ μικρό κόστος παραγωγής, καθώς η ποσότητα της μάζας του χρησιμοποιούμενου υλικού είναι πολύ μικρή. Πάνω σε επιφάνεια υποστήριξης σχηματίζεται το λεπτό επίστρωμα. Η απόδοσή τους μειώνεται έντονα στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 5-8%. Το ενεργειακό διάκενο δεν έχει σταθερή τιμή αλλά κυμαίνεται, ανάλογα με τον τρόπο της παρασκευής του, από 1,2 μέχρι 1,6eV περίπου, σε σύγκριση με 1,1eV του κρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 2.5.31: Τομή άμορφου ΦΒ πλαισίου



Εικόνα 2.5.32: ΦΒ πλαίσια άμορφου Si

Χαρακτηριστικό τους είναι η ομοιόμορφη εμφάνισή τους. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και η υψηλή απορρόφηση. Παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η πολύ χαμηλή απόδοση και η μεγάλη επιφάνεια που καταλαμβάνουν σε σχέση με άλλους τύπους. Για την εγκατάσταση 1kWp φβ συστήματος χρειάζεται επιφάνεια 10-20m², ενώ παράγει 65-80 kWh/m². Η εγγύηση των κατασκευαστών είναι συνήθως για 10 έτη. Για αυτούς τους λόγους δεν επιλέγονται σε μεγάλες εφαρμογές όπου η έκταση και η απόσβεση του αρχικού κόστους είναι σημαντική.

Χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλιακά ρολόγια και σε αριθμητικούς υπολογιστές. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η χρήση της τεχνολογίας άμορφου πυριτίου σε μεγάλα κτίρια, γνωστά και ως κτιριακά ολοκληρωμένα φβ στοιχεία, όπου αντικαθιστούν τα τζάμια συμβάλλοντας έτσι στην τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στο κτίριο.



Εικόνα 2.5.33: Εύκαμπτα ΦΒ

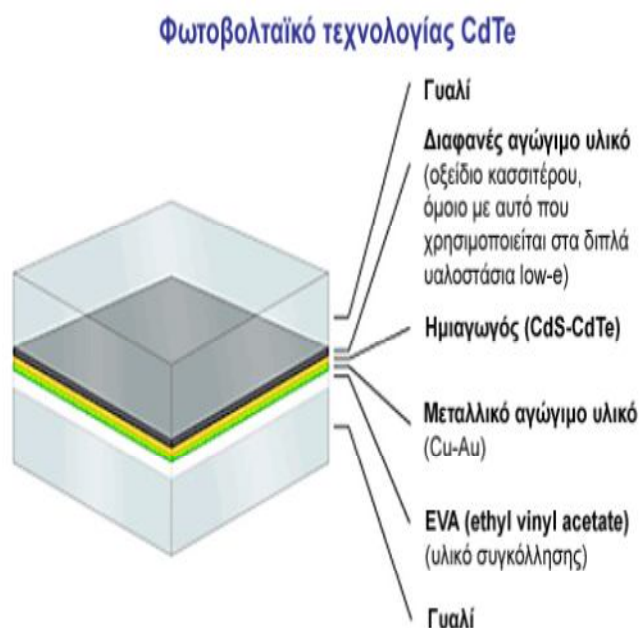
ΦΒ Στοιχεία Ταινίας (Ribbon Silicon)

Τα ΦΒ στοιχεία ταινίας είναι στην ουσία μια λεπτή ταινία από τηγμένο υλικό το οποίο είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με απόδοση 13%. Προς το παρόν το συγκεκριμένο είδος φωτοβολταϊκού στοιχείου έχει πολύ υψηλό κόστος κατασκευής και για το λόγο αυτό είναι περιορισμένης βιομηχανικής παραγωγής.

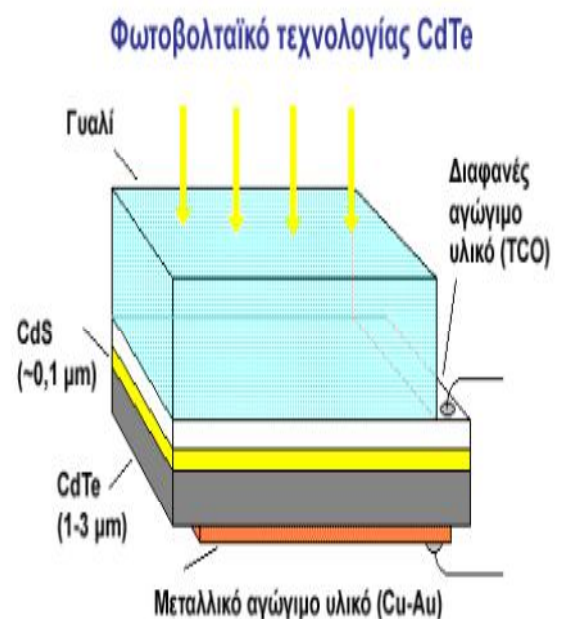
ΦΒ στοιχεία άλλων υλικών

Βέβαια έχουν κατασκευαστεί και ΦΒ στοιχεία από άλλα υλικά όπως αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), δισεληνοϊνδιούχο χαλκό(CuInSe₂), Τελλουριούχο Κάδμιο(CdTe), TiO₂ που παρουσιάζουν κόστος παραγωγής χαμηλότερο από τις τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου Si και αποδόσεις υψηλότερες από αυτές των στοιχείων άμορφου Si. Ήδη στις Η.Π.Α, Ιαπωνία και Ευρώπη προωθείται μια εντατική έρευνα που στοχεύει στη βελτίωση της τεχνολογίας των ΦΒ στοιχείων με αποτέλεσμα τη μαζική παραγωγή ΦΒ στοιχείων λεπτού υμένα ευλύγιστων και μεγάλου μήκους καθώς και ΦΒ στοιχείων νέου τύπου, π.χ. τριπλής επαφής που συντίθενται από GaInP/GaAs/Ge. Φυσικά δεν θα πρέπει να αμεληθεί και η συνδυαζόμενη λειτουργία των ΦΒ στοιχείων με συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν φτάσει σε απόδοση περίπου το 33% κάτω από ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες.

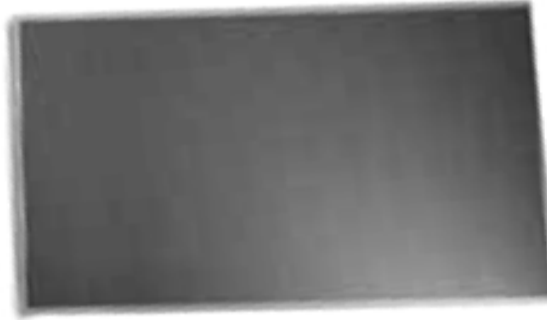
Στην Ευρωπαϊκή πραγματικότητα η γενική τάση των περασμένων ετών έχει σταθεροποιηθεί, με μια ενίσχυση των ΦΒ στοιχείων πολυκρυσταλλικού Si που παράγουν τα εργοστάσια της Ευρώπης και μια μείωση στο σχετικό μερίδιο που κατέχουν οι άλλες τεχνολογίες λόγω της μικρότερης ανάπτυξής τους. Στο τέλος του 2003 η τεχνολογία του πολυκρυσταλλικού Si αποτελούσε το 56,3% των συνολικών ΦΒ στοιχείων που παρήγαγαν τα εργοστάσια της Ευρώπης έναντι 51,6% το 2002. Η τεχνολογία του μονοκρυσταλλικού Si αντιπροσωπεύει μόνο το 33,2% (έναντι 36,4% το 2002) ενώ το άμορφο Si αποτελεί το 4,5% και τα νέα λεπτά υμένα από Τελλουριούχο Κάδμιο CdTe και από δισεληνοϊνδιούχο χαλκό CIS αθροιστικά μόλις το 1,7%.



Σχήμα 2.5.34: Υλικά που αποτελούν το ΦΒ τεχνολογίας CdTe



Σχήμα 2.5.35: ΦΒ πλαίσιο τεχνολογίας CdTe



Σχήμα 2.5.36: ΦΒ πλαίσιο τεχνολογίας CdTe
(τυπική διάσταση 1,2 x 0,6 x 0,0068 m, βάρος 11,4 Kg)

3.5.1 Τρόποι σύνδεσης ΦΒ πλαισίων

Στις περισσότερες περιπτώσεις της χρήσης των ΦΒ πλαισίων, η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται παρέχεται από περισσότερα του ενός ΦΒ πλαίσια κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους σχηματίζοντας μια ΦΒ συστοιχία. Οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να συνδεθούν τα πλαίσια είναι: α) σύνδεση σε σειρά, β) παράλληλη σύνδεση, γ) μικτή σύνδεση. **Η συνολική ισχύς που προκύπτει από μια σύνδεση ΦΒ πλαισίων ανεξάρτητα του τύπου της, είναι το άθροισμα της ισχύος του κάθε ΦΒ πλαισίου χωριστά.**

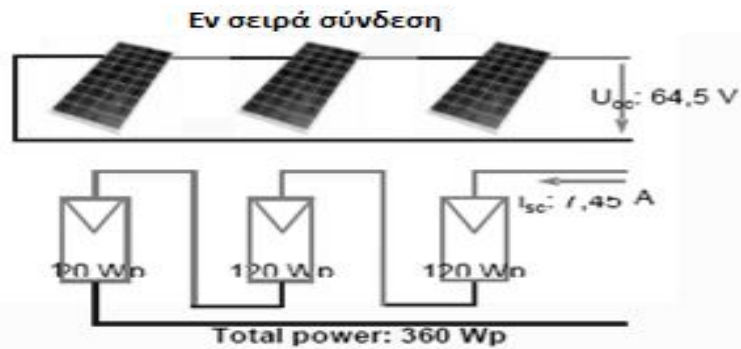
Ακόμα, και στις τρεις κατηγορίες συνδέσεων υποθέτουμε ότι **τα ΦΒ πλαίσια που συνδέονται είναι όμοια κατασκευαστικά, εργάζονται όλα κάτω από ίδιες συνθήκες (θερμοκρασία, ακτινοβολία) και είναι ασκίαστα.** Τα ΦΒ αυτά πλαίσια καλούνται **όμοια**. Είναι όμως συνηθισμένο το φαινόμενο κάποιο ή κάποια από τα ΦΒ πλαίσια που συνδέονται για την δημιουργία της ΦΒ συστοιχίας να μην είναι όμοιο με τα υπόλοιπα, να έχει δηλαδή διαφορετική χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος. Η διαφορά αυτή μπορεί να προέρχεται από κάποιο πρόβλημα στις διεργασίες κατασκευής του πλαισίου, από κακές συνθήκες χρήσης, αλλά και από μερική ή πλήρη σκίαση του πλαισίου. Η σκίαση ενός ΦΒ πλαισίου (όπως και στο ΦΒ στοιχείο) προκαλεί τη μείωση της ισχύος εισόδου του και φυσικά της ισχύος εξόδου του.

3.5.1.1 Σύνδεση των ΦΒ πλαισίων σε σειρά

Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται τάση μεγαλύτερη από την τάση που παρέχει κάθε ΦΒ πλαίσιο χωριστά. Η σύνδεση γίνεται ως εξής: ο θετικός πόλος του ενός πλαισίου συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του επόμενου και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν μεταξύ τους όλα τα πλαίσια. Έτσι προκύπτει μια συστοιχία ΦΒ πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά. Τα ΦΒ πλαίσια που θα συνδεθούν σε σειρά συνήθως είναι όμοια, δηλαδή έχουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και το ίδιο ρεύμα μέγιστης ισχύος I_m .

Η συνολική τάση μιας τέτοιας συστοιχίας όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι το άθροισμα των τάσεων όλων των εν σειρά ΦΒ πλαισίων, ενώ από το κάθε ΦΒ πλαίσιο κυκλοφορεί το ίδιο ρεύμα που είναι και το ρεύμα της ΦΒ συστοιχίας. Δηλαδή η χαρακτηριστική V-I της συστοιχίας προέρχεται από τις χαρακτηριστικές του καθενός ΦΒ πλαισίου με άθροιση των τάσεων για την ίδια τιμή ρεύματος.

- Έτσι για N όμοια ΦΒ πλαίσια ισχύει: $V_{array} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N$
- Το ρεύμα της συστοιχίας είναι: $I_{array} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N$



Στην περίπτωση όμως που κάποιο ή κάποια από τα ΦΒ πλαίσια είναι μη όμοιο (λιγότερο αποδοτικό για κάποιο λόγο), τότε εάν η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η σειρά αυτή των ΦΒ πλαισίων (η ΦΒ συστοιχία) είναι **σχετικά μεγάλη**, το ρεύμα τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι ίδιο με αυτό της ΦΒ συστοιχίας ενώ η τάσεις των μη όμοιων (μικρότερες από ότι των όμοιων) και των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι θετικές (αφού και τα μη όμοια ΦΒ πλαίσια λειτουργούν ως γεννήτριες) και προστίθενται για να δώσουν την τάση της ΦΒ συστοιχίας. Εάν όμως η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η σειρά αυτή των ΦΒ πλαισίων (η ΦΒ συστοιχία) είναι **σχετικά μικρή**, ενώ το ρεύμα τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι ξανά ίδιο με αυτό της ΦΒ συστοιχίας, οι τάσεις των μη όμοιων ΦΒ πλαισίων (μικρότερες από ότι των όμοιων) είναι αρνητικές (αφού τα μη όμοια ΦΒ πλαίσια λειτουργούν ως καταναλωτές) και προστιθέμενες με τις τάσεις των όμοιων ΦΒ πλαισίων για να δώσουν την τάση της ΦΒ συστοιχίας στην ουσία αφαιρούνται. Όσο περισσότερα γίνουν τα όμοια ΦΒ πλαίσια σε σχέση με τα μη όμοια, τόσο πιο μικρή πρέπει να γίνει η R για να λειτουργούν τα μη όμοια ΦΒ πλαίσια ως καταναλωτές.

3.5.1.2 Σύνδεση των ΦΒ πλαισίων παράλληλα

Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται ρεύμα μεγαλύτερο από το ρεύμα που παρέχει το κάθε ΦΒ πλαίσιο χωριστά. Η σύνδεση γίνεται ως εξής: ο θετικός πόλος του ενός ΦΒ πλαισίου συνδέεται με τον θετικό πόλο του άλλου και ο αρνητικός του πόλος με τον αρνητικό πόλο του άλλου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν μεταξύ τους όλα. Έτσι προκύπτει μια συστοιχία ΦΒ πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα. Τα ΦΒ πλαίσια που θα συνδεθούν παράλληλα συνήθως είναι όμοια, δηλ. έχουν την ίδια τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και την ίδια τάση μέγιστης ισχύος V_{mp} .

Το συνολικό ρεύμα μιας τέτοιας συστοιχίας όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι το άθροισμα των ρευμάτων του κάθε ΦΒ πλαισίου, ενώ η τάση κάθε ΦΒ πλαισίου είναι και η τάση της ΦΒ συστοιχίας. Δηλαδή η χαρακτηριστική V-I της συστοιχίας προέρχεται από τις χαρακτηριστικές του καθενός ΦΒ πλαισίου με άθροιση των ρευμάτων για την ίδια τιμή τάσεως.

- Η τάση της συστοιχίας των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι: $V_{array} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_N$
- Έτσι για N όμοια ΦΒ πλαίσια ισχύει: $I_{array} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N$

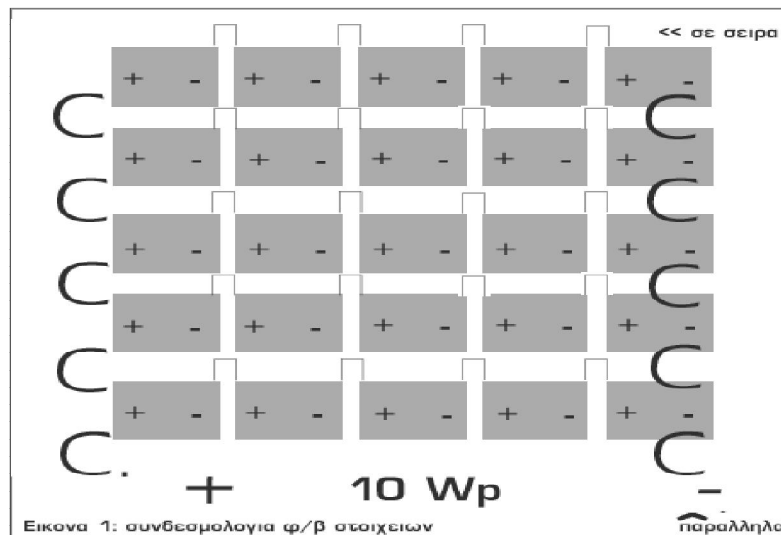


Άρα και οι τάσεις ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και μέγιστης ισχύος V_m της συστοιχίας είναι ίδιες με τις αντίστοιχες τάσεις των ΦΒ πλαισίων.

Στην περίπτωση που κάποιο ή κάποια από τα ΦΒ πλαίσια δεν είναι όμοιο (λιγότερο αποδοτικό για κάποιο λόγο), τότε εάν η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η παράλληλη αυτή σύνδεση των ΦΒ πλαισίων (η ΦΒ συστοιχία) είναι **σχετικά μικρή**, η τάση τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι ίδια με αυτή της ΦΒ συστοιχίας ενώ τα ρεύματα των μη όμοιων και των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι θετικά (αφού και τα μη όμοια ΦΒ πλαίσια λειτουργούν ως γεννήτριες) και προστίθενται για να δώσουν το ρεύμα της ΦΒ συστοιχίας. Εάν όμως η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η παράλληλη αυτή σύνδεση των ΦΒ πλαισίων (η ΦΒ συστοιχία) είναι **σχετικά μεγάλη**, ενώ η τάση τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι πάλι ίδια με αυτή της ΦΒ συστοιχίας, τα ρεύματα των μη όμοιων ΦΒ πλαισίων είναι αρνητικά (αφού τα μη όμοια ΦΒ πλαίσια λειτουργούν ως καταναλωτές) και προστιθέμενα με τα ρεύματα των όμοιων ΦΒ πλαισίων για να δώσουν το ρεύμα της ΦΒ συστοιχίας στην ουσία αφαιρούνται. Όσο περισσότερα γίνουν τα όμοια ΦΒ πλαίσια σε σχέση με τα μη όμοια, τόσο πιο μεγάλη πρέπει να γίνει η R για να λειτουργούν τα μη όμοια ΦΒ πλαίσια ως καταναλωτές.

3.5.1.3 Μικτή σύνδεση των ΦΒ πλαισίων

Με αυτή τη σύνδεση πετυχαίνεται η αύξηση του ρεύματος και της τάσης ταυτόχρονα, σε τιμές που δεν είναι διαθέσιμες από ξεχωριστά ΦΒ πλαίσια. Από τεχνικής πλευράς η μικτή σύνδεση είναι συνδυασμός των συνδέσεων σε σειρά και παράλληλα και κατά συνέπεια ισχύουν τα ήδη αναφερθέντα στις χωριστές αυτές συνδέσεις. Η τάση λοιπόν της συστοιχίας αυτής καθορίζεται από τα ΦΒ πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ενώ το συνολικό ρεύμα από τις παράλληλες ομάδες. Με τον συνδυασμό αυτό, εκμεταλλευόμαστε τις ιδιότητες των ΦΒ πλαισίων και επιτυγχάνεται η καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση τους.



Εικόνα 2.5.1.37: Συνδεσμολογία ΦΒ στοιχείων

3.5.2 Προσανατολισμός ΦΒ πλαισίων

Η σωστή τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων αποτελεί βασικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Ο προσανατολισμός ενός ΦΒ πλαισίου, αλλά και κάθε επίπεδης επιφάνειας, στην επιφάνεια της γης, χαρακτηρίζεται από τη γωνία κλίσης και την αζιμούθια γωνία.

▪ Γωνία κλίσης β

Είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου και στο οριζόντιο επίπεδο και δείχνει πόσο γέρνει το πλαίσιο.

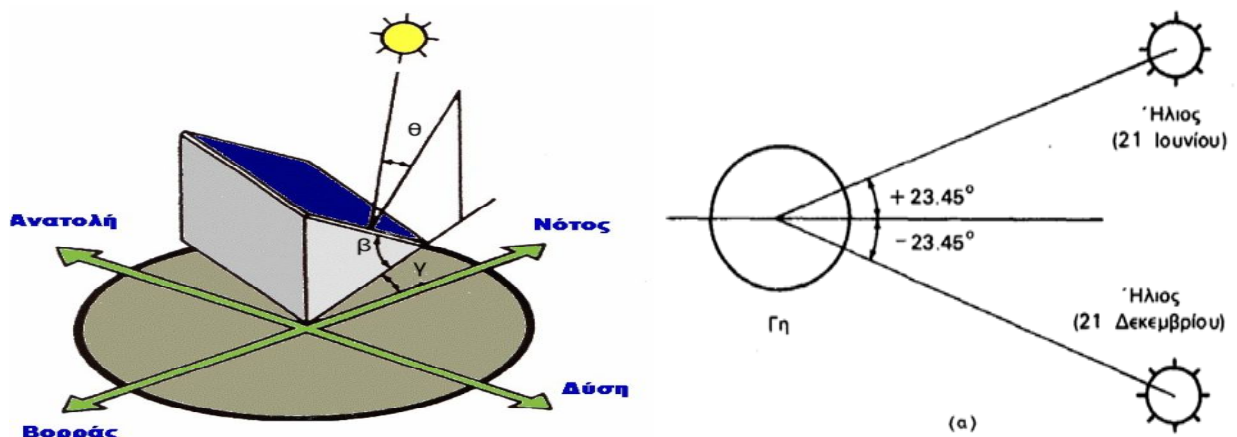
Βέλτιστη γωνία κλίσης ΦΒ πλαισίων στο βόρειο ημισφαίριο

- $\beta = \varphi$ για όλη τη διάρκεια του έτους
- $\beta = \varphi + 15^\circ$ για καλύτερη απόδοση τον χειμώνα
- $\beta = \varphi - 15^\circ$ για καλύτερη απόδοση το καλοκαίρι και για περιοχές με υγρό κλίμα
- $\beta = 5^\circ - 10^\circ$ για περιοχές με γεωγραφικό πλάτος $\varphi \leq 20^\circ$, δηλαδή γύρω από τον Ισημερινό
- $\beta = 0^\circ$ για περιοχές με πολύ μικρή ηλιοφάνεια

▪ Αζιμούθια γωνία α

Είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ΦΒ πλαισίου και στον Νότο. Η γωνία $\alpha = 0^\circ$ αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του ΦΒ πλαισίου προς τον Νότο, η γωνία $\alpha = 90^\circ$ προς τη Δύση, η γωνία $\alpha = -90^\circ$ προς την Ανατολή και η γωνία $\alpha = -180^\circ$ προς τον Βορά. Στο βόρειο ημισφαίριο τα ΦΒ πλαίσια τοποθετούνται προς τον Νότο, ενώ στο νότιο ημισφαίριο τοποθετούνται προς τον Βορά.

Όπως είναι γνωστό ο ήλιος μετακινείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα ΦΒ πλαίσια όμως για να λειτουργούν σωστά, πρέπει η επιφάνειά τους να είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, γιατί τότε η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια τους είναι μέγιστη. Λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους η βέλτιστη γωνία κλίσης των ΦΒ πλαισίων είναι διαφορετική για κάθε εποχή (Σχήμα 2.5.2.38).



Σχήμα 2.5.2.38: Γωνία κλίσης(β), αζιμούθιο(γ) και γωνία πρόσπτωσης(θ).
Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο.

3.5.3 Τρόποι στήριξης ΦΒ πλαισίων

Ο κύριος σκοπός κατά την στερεή τοποθέτηση μιας φβ συστοιχίας είναι ότι αυτή θα κρατήσει για πολλά χρόνια και σε όλες τις καιρικές συνθήκες.

Γενικότερα η στήριξη των φβ βαθμίδων στην οροφή του κτιρίου είναι πιο περίπλοκη από την στήριξη στο έδαφος ή πάνω σε ειδική κατασκευή. Τα στηρίγματα της οροφής είναι δύσκολο να εγκατασταθούν και να συντηρηθούν, ιδίως αν ο προσανατολισμός και η γωνία της οροφής δεν είναι συμβατή με την βέλτιστη γωνία κλίσης της συστοιχίας. Η διείδυση στην μόνωση της σκεπής είναι αναπόφευκτη και μπορεί να προκύψουν διαρροές.

Επίσης είναι σημαντικό να επιτύχουμε μια στερεή και ασφαλή ένωση των στηριγμάτων της συστοιχίας με την σκεπή. Η ένωση των στηριγμάτων με τις δοκούς προσφέρεται ως ο καλύτερος τρόπος θεμελίωσης. Η ένωση της συστοιχίας με το κάλυμμα τύπου κόντρα πλακέ της σκεπής μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην σκεπή, ιδίως αν οι δυνατοί άνεμοι είναι σύνηθες φαινόμενο.

Αν μια στήριξη σκεπής είναι απαραίτητη τότε πρέπει να προβλεφθεί ένα καθαρό ρεύμα αέρα κάτω από την συστοιχία. Η συστοιχία θα λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και θα παράγει μεγαλύτερη ενέργεια αν έχει απόσταση από το επίπεδο της σκεπής τουλάχιστον 8 εκατοστά.

Υπάρχει και η στήριξη με απευθείας επαφή με την σκεπή. Σ' αυτήν όμως την περίπτωση είναι δύσκολος ο έλεγχος και η αντικατάσταση των βαθμίδων, η απόδοση της συστοιχίας μειώνεται λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας.

Τα χαρακτηριστικά ποικίλων υλικών στήριξης είναι :

- ❖ *Αλουμίνιο* - μικρό βάρος, δυνατό με αντοχή στην διάβρωση, μειονέκτημα δεν συγκολλιέται εύκολα.
- ❖ *Σίδηρος* - υλικό με το οποίο μπορούμε να εργαστούμε εύκολα, αλλά διαβρώνεται ραγδαία, δηλαδή σκουριάζει σε υγρό περιβάλλον. Είναι άμεσα διαθέσιμο και συγκολλιέται εύκολα.
- ❖ *Ανοξείδωτο ατσάλι* - ακριβό και δύσκολο να εργαστείς μαζί του, αλλά διατηρείται για δεκαετίες.

Τα θεμέλια της συστοιχίας πρέπει να σχεδιασθούν για να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις απαιτήσεις του φορτίου ανέμου της περιοχής. Το φορτίο ανέμου εξαρτάται από το μέγεθος της συστοιχίας και την γωνία κλίσης.

Οι απαιτήσεις κάθε συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από φβ στοιχεία, καθορίζουν τον τρόπο τοποθέτησης και στήριξης των φβ πλαισίων. Στοιχεία που προσδιορίζουν τον τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων είναι αρκετά, όπως:

- Η ενέργεια που πρέπει να παραχθεί καθορίζει το πλήθος των φβ στοιχείων, το μηχανολογικό και ηλεκτρικό-ηλεκτρονικό εξοπλισμό που θα τοποθετηθεί στο σύστημα μας.
- Το περιβάλλον και οι τοπικές καιρικές συνθήκες καθορίζουν τη θέση και τον τρόπο στήριξης.
- Η οικονομική δυνατότητα που έχουμε είναι αυτή που μας περιορίζει ή μας επιτρέπει να εγκαταστήσουμε ένα ακριβό σύστημα, το οποίο όμως θα έχει καλύτερη απόδοση από ένα οικονομικότερο.

Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι στήριξης των πλαισίων και διακρίνονται ανάλογα με την ενεργειακή απολαβή:

- Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη
- Εποχιακά ρυθμιζόμενη κλίση
- Συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης ηλιοτρόπιο – trackers

3.5.3.1 Στήριξη με Σταθερή Γωνία Κλίσης του Συλλέκτη

Είναι ο απλούστερος και οικονομικότερος τρόπος στήριξης που μπορεί να εφαρμοστεί για την τοποθέτηση συλλεκτών. Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι αρκετά απλός καθώς στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός των συλλεκτών.

Είναι ένας αρκετά αξιόπιστος τρόπος καθώς δεν έχει κινητά μέρη και προτείνεται σε μέρη με ισχυρούς ανέμους, π.χ. βουνά. Επίσης χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να ενσωματώσουμε τους συλλέκτες σε κτίρια πχ. προσόψεις, στέγες.



Εικόνα 2.5.3.1.39: Φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια

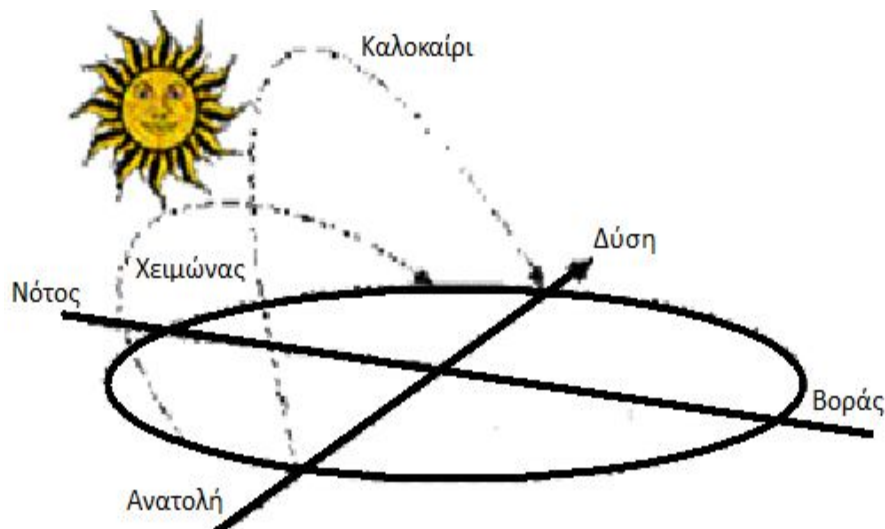
Για την τοποθέτηση των συλλεκτών πρέπει να επιλεγεί η καταλληλότερη γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός. Όταν ο χώρος τοποθέτησης δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, είναι η πιο απλή περίπτωση. Τότε η γωνία κλίσης του συλλέκτη είναι κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου και κατά κανόνα ακολουθείται νότιος αζιμουθιακός προσανατολισμός για το βόρειο ημισφαίριο (στο νότιο ημισφαίριο επιλεγούμε βόρειο). Όταν η γωνία κλίσης είναι ίση με το λ του τόπου, οι ακτίνες πέφτουν κάθετα στους συλλέκτες δυο φορές το χρόνο, το μεσημέρι των ισημεριών, 21 Μαρτίου και 22 Σεπτεμβρίου.



Εικόνα 2.5.3.1.40: Φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια

Κατά το ηλιακό μεσημέρι, ο ήλιος, έχει το μέγιστο ύψος, ELM (maximum elevation). Το ύψος αυτό μεταβάλλεται καθημερινά, από την ελάχιστη τιμή $ELM_{ελ}=(90^\circ-\lambda)-23,5^\circ$, στις 22 Δεκεμβρίου, μέχρι την μέγιστη $ELM_{μεγ}=(90^\circ-\lambda)+23,5^\circ$ (21 Ιουνίου) και στην συνέχεια μειώνεται και παίρνει την τιμή της 22ας Δεκεμβρίου. Η γωνία των ακτίνων κατά την μεσουράνηση του, ως προς την κάθετη στην επιφάνεια του συλλέκτη, μεταβάλλεται από $-23,5^\circ$ έως $+23,5^\circ$.

Όταν ο συλλέκτης έχει κλίση ίση με την γωνιά λ του τόπου, η μέση ημερησία τιμή της ετησίας ενεργειακής απολαβής γίνεται μέγιστη.



Σχήμα 2.5.3.1.41: Οι θέσεις του ηλίου κατά την διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού

Για να προκύψει, βεβαία η βέλτιστη γωνία κλίσης του συλλέκτη, με σταθερή γωνία κλίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι κατά τόπους μετεωρολογικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν την ολική διάχυτη και απευθείας ακτινοβολία καθώς και το albedo του εδάφους (ανακλαστικότητα του εδάφους). Για να προκύψει η βέλτιστη γωνία κλίσης πρέπει να καταγραφούν όλα αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία για αρκετά χρόνια και σε διαφορετικές γωνίες. Συνήθως όμως δεν είναι διαθέσιμες λόγω του μεγάλου κόστους των μετρήσεων, για το λόγο αυτό οι μετρήσεις γίνονται με έναν αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. πυρανόμετρο) σε οριζόντια θέση για το μέγιστο χρονικό διάστημα. Μετά τη λήψη των μετρήσεων και κατάλληλη επεξεργασία προσδιορίζεται η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις για πλησιέστερη περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη το albedo του εδάφους.

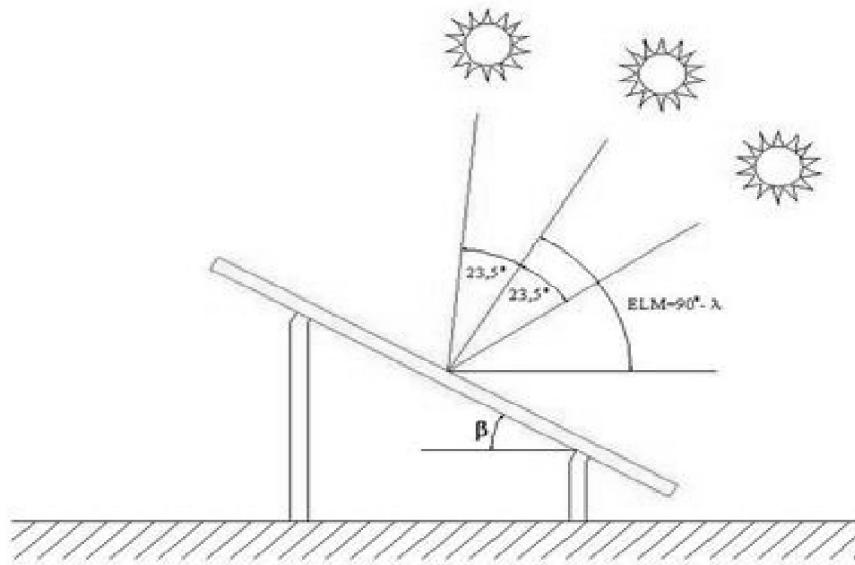


Εικόνα 2.5.3.1.42: Φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα με σταθερή γωνία κλίσης

Παρατηρήσεις για την τοποθέτηση των συλλεκτών με σταθερή κλίση:

- Για τόπους με μικρά λ, γύρω από τον ισημερινό, η βέλτιστη γωνία είναι 0° . Στην πράξη όμως οι συλλέκτες τοποθετούνται με μια μικρή γωνία $5^\circ \div 10^\circ$ ώστε, κατά την πλύση της επιφάνειας από το νερό της βροχής ή της πλύσης να απομακρύνονται τα διαφορά σώματα που επικάθονται (σκόνη, φύλλα κ.α.).

- Για τόπους με μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (>200) βρίσκεται στην περιοχή $\lambda - (10^\circ \div 15^\circ)$.
- Για τόπους στους οποίους δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα ο συλλέκτης τοποθετείται σε γωνία $\beta = \lambda - 10^\circ$.
- Εάν πρέπει να καλυφθούν οι χειμερινές ανάγκες για ενέργεια, η καταλληλότερη γωνία είναι $\beta = \lambda + 15^\circ$. Ενώ εάν πρέπει να καλυφθούν οι θερινές ανάγκες για ενέργεια, τότε οι συλλέκτες τοποθετούνται με κλίση $\beta = \lambda - 15^\circ$.
- Σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ο συλλέκτης τοποθετείται έτσι ώστε να προκύπτει η μέγιστη ενεργειακή απολαβή.



Σχήμα 2.5.3.1.43: Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης

3.5.3.2 Στήριξη με Εποχιακή Ρύθμιση της Κλίσης του Συλλέκτη

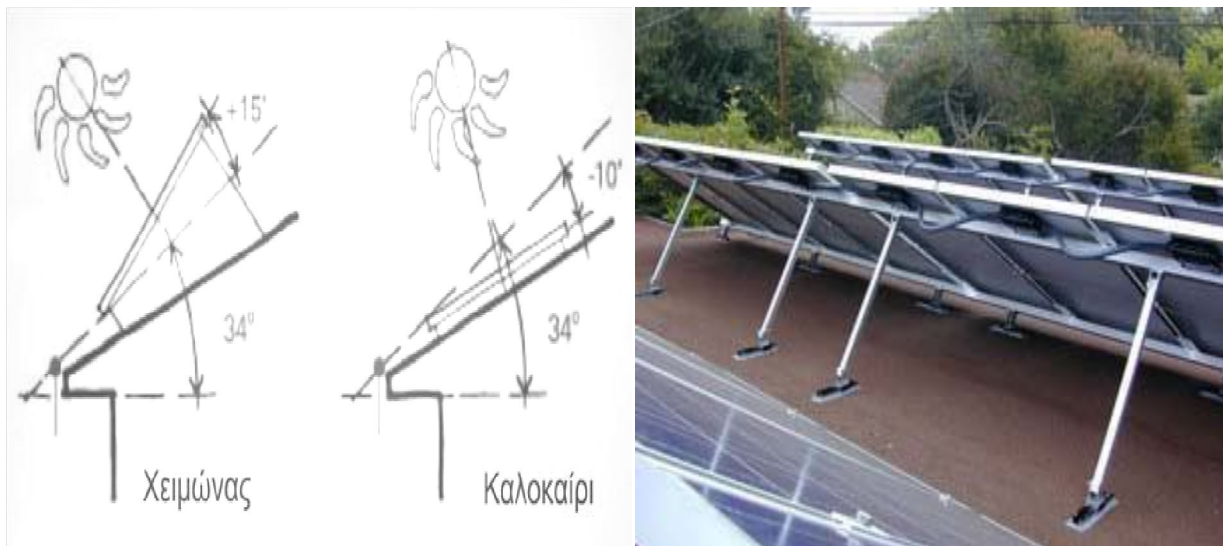
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν υπήρχε δυνατότητα αλλαγής της γωνιάς κλίσης του συλλέκτη, με αποτέλεσμα η εγκατάσταση να αποδίδει πολύ λιγότερο από τις δυνατότητές της. Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος κατασκευάζονται βάσεις, στις οποίες τοποθετούνται οι συλλέκτες, με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης τους. Η μηχανολογική κατασκευή είναι σχετικά φθηνή και απλή ώστε όλοι οι χρήστες να μπορούν να κάνουν την εποχιακή ρύθμιση. Η ρύθμιση του συλλέκτη γίνεται δυο φορές τον χρόνο, μια κατά το χειμερινό εξάμηνο (22 Σεπτεμβρίου - 21 Μαρτίου) και μια κατά το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου - 22 Σεπτεμβρίου). Η αλλαγή αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κλίση μεταξύ των ακτίνων του ηλίου και της επιφάνειας του συλλέκτη να πλησιάζει όσο το δυνατόν τις 90° . Για τον προσδιορισμό της σωστής γωνιάς του συλλέκτη πρέπει να είναι γνωστά τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου (ηλιοφάνειας, ανέμου, θερμοκρασίας, κ.λπ.), καθώς και το albedo του εδάφους όπως και στην προηγούμενη παράγραφο.

Επιτρεπτά όρια γωνίας κλίσης ανάλογα με την εποχή:

- Κατά τη χειμερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία κλίσης είναι $\beta = \lambda + (10^\circ \div 15^\circ)$.
- Κατά τη θερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία είναι $\beta = \lambda - (10^\circ \div 15^\circ)$.

Παρατηρήσεις για την τοποθέτηση των συλλεκτών με ρυθμιζόμενη κλίση:

- Σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ο συλλέκτης τοποθετείται έτσι ώστε να προκύπτει η μέγιστη ενεργειακή απολαβή κατά την διάρκεια όλου του έτους.
- Πρέπει να γίνεται σωστή μελέτη και σχεδιασμός της κατασκευής ώστε και στις δυο κλίσεις να επιτυγχάνεται η βέλτιστη γωνία για μέγιστη απόδοση.



Σχήμα 2.5.3.2.44: Στήριξη με δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας κλίσης

3.5.3.3 Συστήματα Συνεχούς Ημερήσιας Παρακολούθησης, Ηλιοτρόπια (trackers)

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, οι συλλέκτες τοποθετούνται είτε με σταθερή κλίση είτε με εποχιακή ρύθμιση της γωνίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μικρή απολαβή ενέργειας από τον ήλιο ιδιαίτερα στην πρώτη μέθοδο, με σταθερή γωνία κλίσης. Μια βελτιωμένη εκδοχή είναι η δεύτερη μέθοδος με αυξημένη απολαβή σε σχέση με την πρώτη. Για υψηλότερη απολαβή ισχύος κατασκευάζονται συσκευές διαρκούς παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Οι συσκευές αυτές μοιάζουν αρκετά με το φυτό ηλιοτρόπιο ή ηλιανθος, από όπου πήραν και το όνομα τους. Τα ηλιοτρόπια(trackers) στρέφουν τους συλλέκτες έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη. Με τα ηλιοτρόπια υπάρχει μια αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος 30% - 50%, σε σχέση με τους σταθερούς τρόπους στήριξης. Βρίσκουν χρήση τόσο σε φβ εφαρμογές όσο και σε θερμικά συστήματα.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες ηλιοτροπίων ανάλογα με το είδος της κίνησης που εκτελούν:

- Στροφή γύρω από έναν άξονα
- Στροφή γύρω από δύο άξονες

3.5.3.4 Στροφή γύρω από έναν άξονα

Η συστοιχία περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα με κατάλληλο μηχανισμό, ξεκινώντας από την ανατολή και παρακολουθώντας την πορεία του ήλιου καθ' όλη την ημέρα καταλήγοντας στην δύση. Διακρίνουμε δυο περιπτώσεις:

- Το αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο
- Το πολικό ηλιοτρόπιο

Αζιμουθικό Ηλιοτρόπιο

Το σύστημα περιστρέφεται ως προς κατακόρυφο άξονα, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν κάθετα στον συλλέκτη. Δηλαδή παρακολουθεί την αζιμουθιακή κίνηση του ήλιου. Για την επιλογή της γωνίας κλίσης των συλλεκτών ακολουθείται η ίδια λογική με τις προηγούμενες μεθόδους. Δηλαδή τοποθετούνται με σταθερή γωνία η οποία επιλέγεται βάση του γεωγραφικού πλάτους. Χρησιμοποιούνται σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αυξάνουν την παραγωγή ενέργειας. Η αύξηση ισχύος είναι περίπου 25-35%, εξαρτάται βέβαια από την τοποθεσία, την ποιότητα του συστήματος και τον τρόπο ελέγχου της κίνησης.



Εικόνα 2.5.3.4.45: Αζιμουθιακά ηλιοτρόπια

Πολικό Ηλιοτρόπιο (polar tracker)

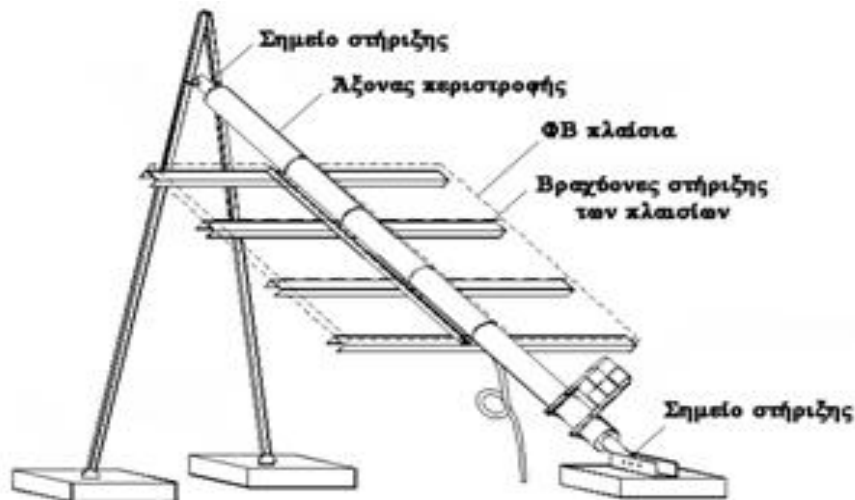
Το σύστημα περιστρέφεται ως προς άξονα τοποθετημένο σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, παράλληλα με τον πολικό άξονα της γης. Έτσι ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη. Κατά την διάρκεια του έτους η γωνιά μεταξύ των ακτινών του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη, κυμαίνεται από $-23,5^\circ$ έως $+23,5^\circ$.

Η βασική χρήση των συστημάτων αυτών είναι σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να αποκλείεται και η χρήση τους σε θερμικούς σταθμούς. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας φτάνει και το 40% ανάλογα την εποχή του έτους.



Εικόνες 2.5.3.4.46 και 2.5.3.4.47 : Πολικό ηλιοτρόπιο

Είναι σχετικά απλά στην κατασκευή και στον έλεγχο. Μειονεκτούν σημαντικά όσο αφορά την αντοχή τους σε ισχυρούς ανέμους. Για την προστασία τους χρειάζονται ισχυρά συστήματα πέδησης. Επίσης τα πλαίσια δεν τοποθετούνται ομοιόμορφα, αλλά σε τριγωνικό σχηματισμό, έτσι ώστε να μην εφάπτονται με το έδαφος το πρωί και το απόγευμα. Αν δεν εφαρμοστεί αυτός ο τρόπος τοποθέτησης μένει αρκετός χώρος αναξιοποίητος. Πολλές φορές τοποθετούνται και κάτοπτρα για την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες.



Σχήματα 2.5.3.4.48: Διαγράμματα παραγομένης ενέργειας με σταθερή τοποθέτηση ΦΒ, με χρήση ηλιοτροπίου και με ηλιοτρόπιο με ενσωματωμένους καθρέπτες



Εικόνα 2.5.3.4.49: ΦΒ Πάρκο με ηλιοτρόπια

3.5.3.5 Διάταξη ΦΒ πλαισίων

Κατά την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων μίας συστοιχίας απαιτείται *ιδιαίτερη προσοχή*, γιατί δεν πρέπει η μία σειρά πλαισίων να σκιάζει αισθητά την επόμενη. Αν συνέβαινε αυτό, δηλαδή η σκίαση ή η βλάβη ενός ΦΒ στοιχείου, υπήρχε πιθανότητα ολικής καταστροφής του. Στην πράξη για τα ΦΒ πλαίσια, που αποτελούνται από 36 ή 72 ΦΒ στοιχεία σε σειρά, η σκιασμένη κυψελίδα λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια, που προσφέρουν οι υπόλοιπες. Παρατεταμένος σκιασμός της, σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων κυψελίδων, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός καταστραμμένου στοιχείου του. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως κατάσταση «θερμής κηλίδας» του ΦΒ στοιχείου.

Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το ΦΒ πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους, οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των σε σειρά συνδεδεμένων ΦΒ στοιχείων του πλαισίου, επιτρέποντας τη χρησιμοποίηση του ΦΒ πλαισίου, ακόμα κι αν κάποιο ΦΒ στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί. Ονομάζονται **δίοδοι παράκαμψης ΔΠ**. Τοποθετούνται στο κιβώτιο συνδέσεων, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ΦΒ πλαισίου.

Επίσης τα ΦΒ πλαίσια σχηματίζουν παράλληλους κλάδους, που καταλήγουν μέσω του φορτιστή στον συσσωρευτή. Προκειμένου να αποκλειστεί, αφενός η εκφόρτιση του συσσωρευτή μέσω των ΦΒ πλαισίων του κλάδου, κατά τη διάρκεια της νύχτας, αφετέρου η κυκλοφορία ρευμάτων που επιβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι στους υπόλοιπους, κάθε κλάδος εφοδιάζεται με μία **δίοδο αντεπιστροφής ή απομόνωσης ΔΑ**. Τοποθετείται στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κλάδου. Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης ϵ μεταξύ δύο γειτονικών σειρών γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης.

$$u = \gamma * \eta\mu\beta - \delta \text{ [m]}$$

Όπου γ [m]: μήκος ΦΒ πλαισίων , β [°]: γωνία κλίσης ΦΒ πλαισίων ,
 δ [m]: υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα δύο σειρών ΦΒ πλαισίων

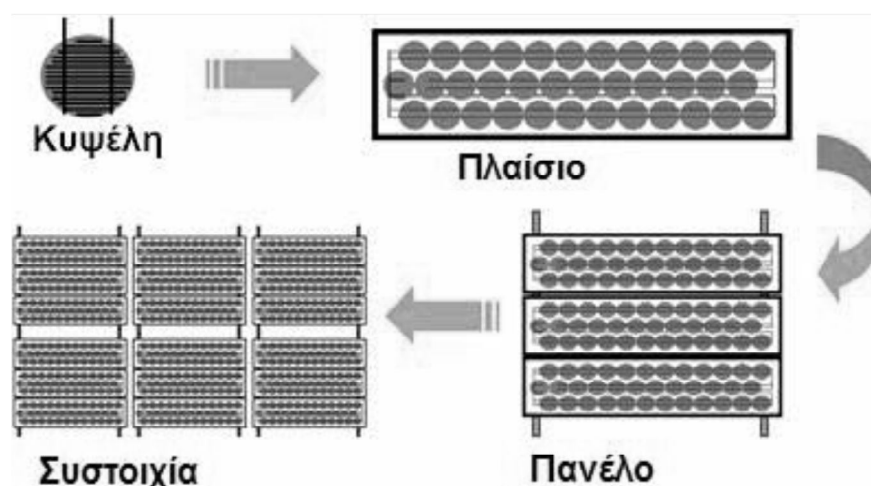
2. Υπολογισμός της ελεύθερης απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων.
 Η ελεύθερη απόσταση α προκύπτει από τον λόγο α/u .
3. Υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων.

$$\epsilon = \alpha + \gamma * \sigma\upsilon\nu\beta \text{ [m]}$$

3.6 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Τα ΦΒ πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό. Ένας μικρός αριθμός ΦΒ πλαισίων, που είναι συναρμολογημένα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο και αποτελούν ενιαία κατασκευή έτοιμη για εγκατάσταση, ονομάζεται ΦΒ πανέλο. Ο αριθμός των πλαισίων ενός πανέλου πρέπει να επιτρέπει την εύκολη μεταφορά και εγκατάστασή του από έναν τεχνίτη και οι καλωδιώσεις του κάθε πλαισίου απολήγουν σε ένα ηλεκτρολογικό κιβώτιο.

Το σύνολο ΦΒ πλαισίων ηλεκτρολογικά συνδεδεμένων μεταξύ τους, σε σειρά ή παράλληλα, με μια ηλεκτρολογική έξοδο, σε κεντρικό ηλεκτρολογικό κιβώτιο ονομάζεται **ΦΒ συστοιχία**. (Σχήμα 2.6.50)



Σχήμα 2.6.50: Σύνθεση των ΦΒ συστοιχιών

Τέλος, ένα σύνολο από ΦΒ συστοιχίες ονομάζεται ΦΒ πάρκο, το οποίο μαζί με όλο τον υπόλοιπο εξοπλισμό και τις απαραίτητες διατάξεις ονομάζεται **ΦΒ σταθμός**.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κάθε ΦΒ εγκατάσταση έχει σπονδυλωτή συγκρότηση από πλαίσια, πανέλα ή συστοιχίες, των οποίων η συνολική επιφάνεια καθορίζεται από την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, που θέλουμε να παράγουμε.

Η τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων ή πανέλων γίνεται σε στέγες κτιρίων, σε σύλους, σε ικριώματα, σε πλαγιές λόφων και σε ελεύθερους χώρους. Για τη σωστή λειτουργία της εγκατάστασης κάθε ΦΒ πλαίσιο πρέπει να έχει ανοιχτό ορίζοντα, δηλαδή, να μην σκιάζεται από κτίρια, δέντρα κ.λπ. Ειδικά στα κτίρια, η τοποθέτηση γίνεται με τρεις τρόπους:

- Σταθερά στηρίγματα

Τα στηρίγματα είναι ξύλινα ή μεταλλικά και προσφέρουν εύκολη πρόσβαση στο εμπρός και το πίσω μέρος των ΦΒ πλαισίων, για να μπορεί να γίνει η συντήρηση, ενώ παράλληλα εξασφαλίζουν καλό αερισμό και δροσισμό των ΦΒ στοιχείων.

- Στηρίγματα ρυθμιζόμενης κλίσης

Τα στηρίγματα επιτρέπουν στα ΦΒ πλαίσια να προσανατολίζονται και να παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι αυτοματισμοί αυξάνουν σημαντικά το κόστος της εγκατάστασης, αλλά βελτιώνουν το βαθμό απόδοσης του συστήματος, επειδή όπως είναι γνωστό, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη σε μία επιφάνεια κάθετη προς αυτήν.

- Ενσωμάτωση στο κέλυφος του κτιρίου

Τα ΦΒ πλαίσια ενσωματώνονται στο κέλυφος του κτιρίου και καλύπτουν τμήματα της οροφής ή των εξωτερικών τοίχων, αντικαθιστώντας μεγάλες επιφάνειες δομικών στοιχείων. Τα νέου τύπου ημιδιαφανή πλαίσια μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση υαλοπινάκων και στεγάστρων συνδυάζοντας την ηλιοπροστασία με την παραγωγή ενέργειας.

3.6.1 Βαθμός απόδοσης ΦΒ συστοιχίας

Ο βαθμός απόδοσης η_{Σ} της ΦΒ συστοιχίας προκύπτει από το γινόμενο του βαθμού απόδοσης η_{Π} ενός ΦΒ πλαισίου με τον συντελεστή ανομοιογένειας σ_{α} και τον συντελεστή καλωδίωσης σ_{κ} .

Βαθμός απόδοσης ΦΒ συστοιχίας: $\eta_{\Sigma} = \eta_{\Pi} * \sigma_{\alpha} * \sigma_{\kappa} [-]$

Βαθμός απόδοσης ΦΒ πλαισίου: $\eta_{\Pi} = \eta_{STC} * \sigma_{\gamma} * \sigma_{\rho} * \sigma_{\theta} * \sigma_{\delta} [-]$

Όπου:

- Ο συντελεστής ανομοιογένειας σ_{α} εκφράζει την ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών $I - V$ των ΦΒ πλαισίων, που απαρτίζουν τη ΦΒ συστοιχία.

- Ο συντελεστής καλωδίωσης σ_{κ} εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης των ΦΒ πλαισίων της συστοιχίας.

- Ο συντελεστής γήρανσης $\sigma_{\gamma} = 0,90$ εκφράζει τη διαχρονική μείωση της απόδοσης.

- Ο συντελεστής ρύπανσης σ_{ρ} εκφράζει τη ρύπανση της επιφάνειάς του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, εντόμων, ακαθαρσίες κ.λπ.

- Ο συντελεστής θερμοκρασίας σ_{θ} εκφράζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση του ΦΒ πλαισίου.

- Ο συντελεστής απωλειών διόδου $\sigma_{\delta}=0,99$ εκφράζει τις απώλειες ενέργειας που προκαλεί η δίοδος αντεπιστροφής λόγω μη εκφόρτισης του συσσωρευτή από το ΦΒ πλαίσιο όταν δεν φωτίζεται.

3.6.2 Επιφάνεια ΦΒ συστοιχίας

Η επιφάνεια S_{Σ} της συστοιχίας υπολογίζεται από τη σχέση: $S_{\Sigma} = E_{m\Sigma} / E_{HA} * \eta_{\Sigma} * \sigma_{\mu} [m^2]$

Όπου:

- $E_{m\Sigma} [kWh/ημ.]$: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη ΦΒ συστοιχία για την κάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας κατανάλωσης E_K .
- $E_{HA} [kWh/m^2 * ημ.]$: ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.
- $\eta_{\Sigma} [-]$: βαθμός απόδοσης ΦΒ συστοιχίας.
- $\sigma_{\mu} [-]$: συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις απώλειες του ΦΒ συστήματος, από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση.

3.6.3 Ισχύ αιχμής ΦΒ συστοιχίας

Ισχύ αιχμής $P_{\rho\Sigma}$ μίας ΦΒ συστοιχίας ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από τη ΦΒ συστοιχία κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\rho\Sigma} = (E_K * P_{STC} * m) / (E_{HA} * \sigma_{A\Sigma} * \sigma_{\mu}) [kW_{\rho}]$$

Όπου:

- $E_K [kWh/ημ.]$: ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης
- $P_{STC} [kW/m^2]$: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC ($P_{STC} = 1 kW/m^2$)
- $m [-]$: συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων για να καλύψουν μία πιθανή υποτίμηση των αναγκών της κατανάλωσης ($m=1,2$).
- $E_{HA} [kWh/m^2 * ημ.]$: ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.
- $\sigma_{A\Sigma} [-]$: συντελεστής απωλειών ΦΒ συστοιχίας. Όπου $\sigma_{A\Sigma} = \sigma_{\gamma} * \sigma_{\rho} * \sigma_{\theta} * \sigma_{\delta} * \sigma_{\alpha} * \sigma_{\kappa}$
- $\sigma_{\mu} [-]$: συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις απώλειες στα ΦΒ πλαίσια και τη ΦΒ συστοιχία, κάθε μία από τις οποίες εκφράζεται με ένα συντελεστή.

Η ισχύ αιχμής $P_{\rho\Sigma}$ μίας ΦΒ συστοιχίας για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων,

υπολογίζεται από τη σχέση:
$$P_{\rho\Sigma} = \frac{E_K * P_{STC} * m}{E_{HA} * \sigma_{A\Sigma} * \sigma_{\mu}} * \frac{N}{N-\eta} [kW_{\rho}]$$

Όπου: $N [ημ.]$: χρονική περίοδος αναφοράς, $H [ημ.]$: αριθμός ημερών αυτονομίας

3.6.4 Σχεδιασμός ΦΒ συστοιχίας

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 σε σειρά.

Άρα ο αριθμός των ΦΒ πλαισίων υπολογίζεται από τη σχέση: $N = N_{\Pi} * N_{\sigma}$ [-]

Όπου: N_{Π} [-]:αριθμός παράλληλων κλάδων ΦΒ πλαισίων

N_{σ} [-]: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. Επίσης 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 τη σύνδεση των ΦΒ πλαισίων:

α) Η τάση ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας είναι ίση με την τάση ρεύματος ενός κλάδου.

β) Η τάση ρεύματος ενός κλάδου ισούται με το γινόμενο της τάσεως ρεύματος ενός πλαισίου επί τον αριθμό των πλαισίων N_{σ} του κλάδου.

γ) Η ένταση ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας ισούται με το γινόμενο της εντάσεως ρεύματος ενός κλάδου επί τον αριθμό των κλάδων N_{Π} .

δ) Η ένταση ρεύματος ενός κλάδου είναι ίση με την ένταση ρεύματος ενός κλάδου.

- Μέγιστη τάση ρεύματος ΦΒ συστοιχίας: $V_{m\Sigma} = V_{m\Pi} * N_{\sigma}$ [V]
- Μέγιστη ένταση ρεύματος ΦΒ συστοιχίας: $I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} * N_{\Pi}$ [A]

Όπου:

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

N_{Π} : αριθμός παράλληλων κλάδων ΦΒ πλαισίων , N_{σ} : αριθμός ΦΒ πλαισίων σε σειρά ανά κλάδο.

Βασική επιδίωξη είναι το σύστημα να λειτουργεί κάθε φορά στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ με αντίστοιχη τάση $V_{m\Sigma}$, η οποία εξαρτάται από την τάση εισόδου.

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

1. Υπολογισμός αριθμού ΦΒ πλαισίων: $N = P_{\rho\Sigma} / P_{\rho\Pi}$ [-]

Όπου: $P_{\rho\Sigma}$ [kW_ρ]: ισχύ αιχμής ΦΒ συστοιχίας , $P_{\rho\Pi}$ [kW_ρ]: ισχύ αιχμής ΦΒ πλαισίου

2. Υπολογισμός αριθμού ΦΒ πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά: $N_{\sigma} = V_{m\Sigma} / V_{m\Pi}$ [-]

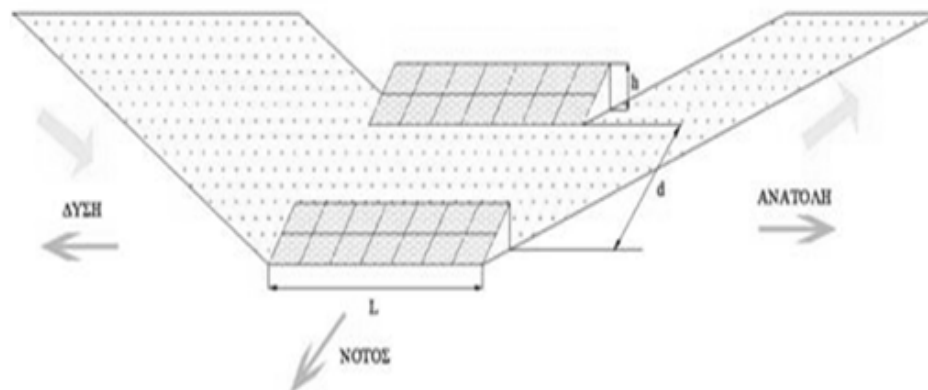
Όπου: $V_{m\Pi}$ [V]: μέγιστη τάση ρεύματος ΦΒ πλαισίου ,
 $I_{m\Pi}$ [A]: μέγιστη ένταση ρεύματος ΦΒ πλαισίου

3. Υπολογισμός αριθμού παράλληλων κλάδων: $N_{\Pi} = N / N_{\sigma}$ [-]

3.6.5 Ελάχιστη απόσταση μεταξύ συστοιχιών Φωτοβολταϊκού Συγκροτήματος

Κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός φβ συγκροτήματος, από το πιο μικρό (π.χ. οικιακή εφαρμογή) έως το πιο μεγάλο (π.χ. φβ πάρκο), πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην τοποθέτηση των συστοιχιών. Όταν οι συστοιχίες τοποθετούνται η μια πίσω από την άλλη παρουσιάζεται το πρόβλημα της σκίασης. Η συστοιχία που βρίσκεται μπροστά από μία άλλη ρίχνει την σκιά της στην αμέσως επόμενη. Όσο μακριά και να τοποθετηθεί η μια από την άλλη, κάποια στιγμή της ημέρας θα σκιάζεται. Για αυτό το λόγο οι συστοιχίες τοποθετούνται σε απόσταση τέτοια ώστε η σκίαση να είναι η ελάχιστη. Όμως η χαμηλότερη σειρά πλαισίων θα σκιάζεται κατά την ανατολή και τη δύση. Κατά την σκίαση όμως η ενεργειακή τους απόδοση μηδενίζεται και για αυτό χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης σε κάθε φβ πλαίσιο.

Μία ιδέα για την τοποθέτηση των συστοιχιών θα ήταν η απόσταση μεταξύ των συστοιχιών να είναι ίση με το μέγιστο μήκος της μεσημεριανής σκιάς κατά την διάρκεια του έτους, στις 21 Δεκεμβρίου. Η λύση αυτή είναι ενεργειακά ασύμφορη, διότι πριν και μετά το μεσημέρι, η σκιά θα καλύπτει μεγάλο μέρος της συστοιχίας. Γι' αυτό το λόγο η μελέτη γίνεται έτσι ώστε η απώλεια ισχύος να μην ξεπερνά ένα καθορισμένο ποσοστό, π.χ. 5%, αν και κατά την ανατολή και τη δύση για κάποιο χρονικό διάστημα η πίσω συστοιχία θα σκιάζεται. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η ενεργειακή απολαβή κατά τη διάρκεια όλου του έτους και το σύνολο και η έκταση των συστοιχιών να είναι η ελάχιστη.



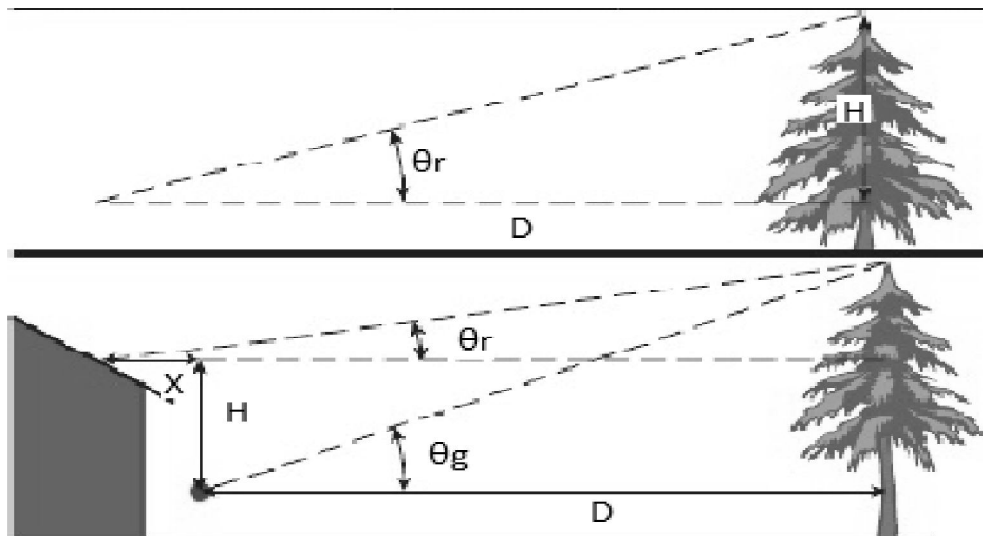
Εικόνα 2.6.5.51: Η σκιά πίσω από συστοιχία

Για να χωροθετηθούν οι ΦΒ συστοιχίες είναι απαραίτητο να είναι γνωστός ο λόγος $r = \frac{d}{h}$ του διάκενου μεταξύ των διαδοχικών συστοιχιών προς το ύψος των συστοιχιών, σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος, όπου d η απόσταση των διαδοχικών συστοιχιών και h το ύψος της πίσω πλευράς τις συστοιχίας. Όσο μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος του τόπου το r αυξάνεται άρα μειώνεται το πλήθος των διαδοχικών σειρών ΦΒ, ανά μονάδα επιφανείας. Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου r , σε κάθε τόπο, κατασκευάζονται διαγράμματα με το γεωγραφικό πλάτος και το ποσοστό απωλειών. Συνήθως στα διαγράμματα παρουσιάζονται δυο ποσοστά π.χ. 5% και 10%.

3.6.6 Αποφυγή σκίασης από εμπόδια

Η σκίαση επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των ΦΒ πλαισίων. Ακόμα και μία μικρή ποσότητα σκιάς μπορεί να μειώσει την απόδοσή τους έως και 80%. Απαιτείται, λοιπόν, σχολαστική αξιολόγηση της περιοχής και προσεκτική επιλογή του τόπου εγκατάστασης, προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Ανεπιθύμητη σκίαση μπορούμε να έχουμε από δέντρα, θάμνους, κτίρια, γειτονικά ΦΒ πλαίσια, κολώνες κ.λπ. Η σκίαση αποτελείται μεγαλύτερο πρόβλημα κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, όταν το ύψος του ήλιου είναι χαμηλό και οι σκιές γίνονται μακρύτερες. Για τις περιοχές στο βόρειο ημισφαίριο οι υπολογισμοί της χειρότερης σκίασης γίνονται για την 21^η Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).



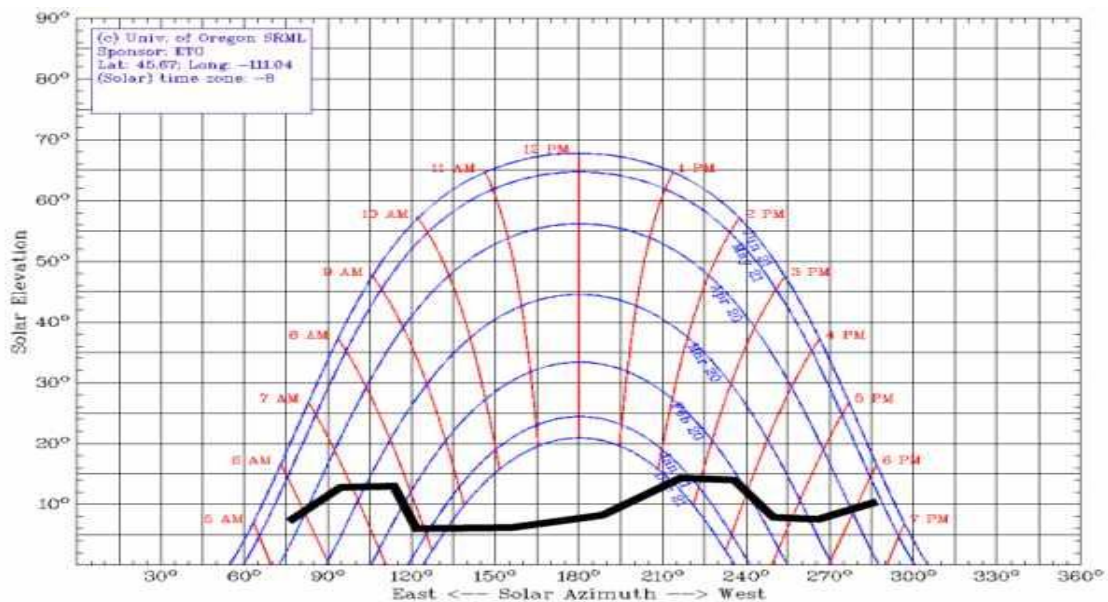
Σχήμα 2.6.6.52: Ελάχιστη απόσταση μεταξύ ΦΒ πλαισίου και εμποδίου για την αποφυγή σκίασης.

Ένας πρακτικός τρόπος για να αποφύγουμε τη σκίαση των πλαισίων είναι να εξασφαλίσουμε ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ αυτών και το εμπόδιο είναι διπλάσια του ύψους του εμποδίου. Πρέπει να υπάρχει επαρκής ελεύθερος και ασκίαστος χώρος. Χονδρικά απαιτούνται $8 \text{ m}^2/\text{KW}$ για μονοκρυσταλλικά ΦΒ, 10 m^2 για πολυκρυσταλλικά και περίπου το διπλάσιο για τα άμορφα.

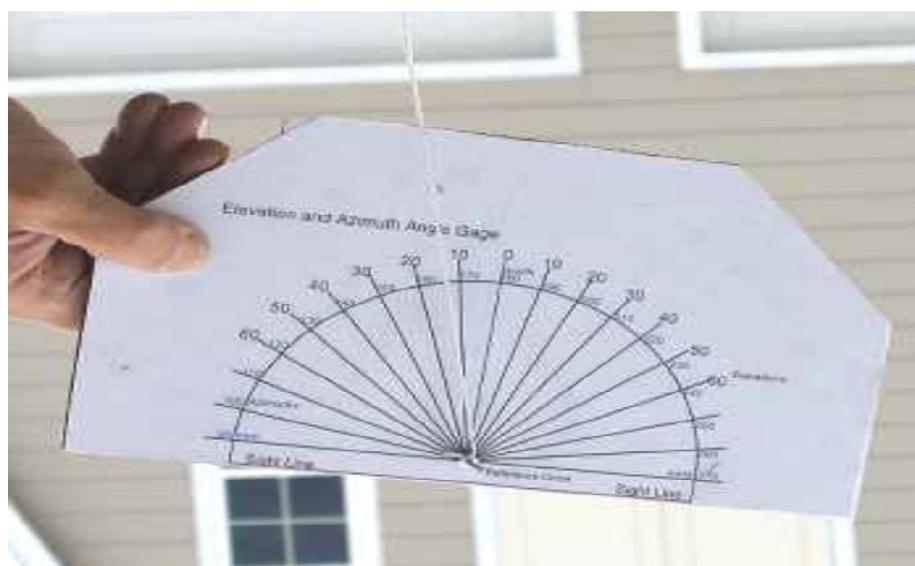
Μία σωστά επιλεγμένη περιοχή εγκατάστασης θα πρέπει να μην σκιάζεται από τις 9:00 π.μ. έως τις 3:00 μ.μ. για οποιανδήποτε ημέρα του χρόνου. Το χρονικό αυτό περιθώριο των έξι ωρών ονομάζεται ηλιακό παράθυρο.

Η αξιολόγηση μίας περιοχής μπορεί να γίνει εύκολα με τη βοήθεια του ηλιακού χάρτη της περιοχής, μίας πυξίδας και ενός ταχυμέτρου, που είναι όργανο μέτρησης του ύψους ενός εμποδίου. Για τον σκοπό αυτό ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

- **Βήμα 1:** Στεκόμαστε στο κέντρο της προτεινόμενης θέσης εγκατάστασης της ΦΒ συστοιχίας.
- **Βήμα 2:** Χρησιμοποιώντας την πυξίδα, που δείχνει πάντοτε τον Βορά, βρίσκουμε τελικά την Ανατολή.
- **Βήμα 3:** Χρησιμοποιώντας το ταχύμετρο υπολογίζουμε το ύψος του κάθε εμποδίου, που βρίσκεται στην Ανατολή, σε μοίρες.
- **Βήμα 4:** Σημειώνουμε το ύψος σε μοίρες κάθε εμποδίου επάνω στον ηλιακό χάρτη
- **Βήμα 5:** Περιστρεφόμαστε κατά 15° , με την πλάτη προς τον Βορά και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3 και 4 για τη νέα θέση.
- **Βήμα 6:** Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3, 4 και 5 μέχρι να φτάσουμε στη Δύση.
- **Βήμα 7:** Συνδέουμε τα σημεία πάνω στον ηλιακό χάρτη και σκιάζουμε την περιοχή κάτω από τη γραμμή που σχεδιάσαμε. Μία σωστά επιλεγμένη περιοχή δεν πρέπει να σκιάζεται τις 9:00 π.μ. έως τις 3:00 μ.μ.



Σχήμα 2.6.6.53: Σχεδίαση γραμμής σκιασμού πάνω στον ηλιακό χάρτη.

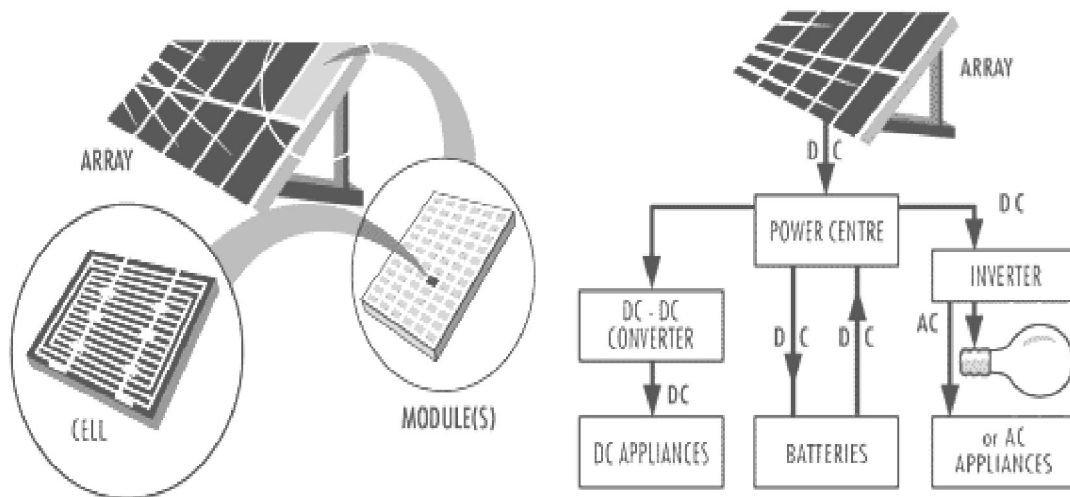


Εικόνα 2.6.6.54: Πρακτικός ηλιακός χάρτης

3.6.7 Γενικές πληροφορίες για τα ΦΒ πλαίσια

Τα φβ πλαίσια έρχονται σε πολλά μεγέθη, αλλά συνήθως ένα κύτταρο 10cm x 10cm παράγει μισό βολτ. Τα κύτταρα συνδέονται μαζί για να παράγουν υψηλότερες τάσεις και παρεχόμενη ισχύ. Μια ενότητα 12-βολτ, παραδείγματος χάριν θα μπορούσε να έχει 30 έως 40 πλαίσια PV. Μια ενότητα που παράγει 50 Watt έχει μέγεθος 40cm x 100cm.

Τα φβ πλαίσια δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικά, μετατρέποντας μόνο 12 έως 15 τοις εκατό του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά τα εργαστηριακά πρωτότυπα φθάνουν σε 30 τοις εκατό αποδοτικότητας.



Εικόνα 2.6.7.55: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Αν και τα φβ παράγουν συνεχές ρεύμα(DC), (το είδος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις μπαταρίες) και οι λάμπες μπορούν να λειτουργήσουν με συνεχές ρεύμα, οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές απαιτούν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) 220-βολτ. Μια συσκευή γνωστή ως αντιστροφέας(inverter) μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Οι αντιστροφείς ποικίλλουν σε μέγεθος και σε ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχουν. Οι λιγότερο ακριβοί αντιστροφείς είναι κατάλληλοι για απλά φορτία, όπως φώτα και υδραντλίες, αλλά οι περισσότερο ποιοτικοί που δίνουν καλής ποιότητας κυματομορφή απαιτούνται για να τροφοδοτήσουν ηλεκτρονικές συσκευές όπως τηλεοράσεις, στερεοφωνικά συγκροτήματα, φούρνους μικροκυμάτων και υπολογιστές.

Ένα σύνηθες φβ σύστημα αποτελείται από τα πλαίσια, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και τις μπαταρίες. Ο αριθμός των πλαισίων επιλέγεται αναλόγως του επιθυμητού ρεύματος απορρόφησης ανά ημέρα/εβδομάδα. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελείται από τις ηλεκτρονικές συσκευές που περνούν την τάση και ρεύμα που δίνουν τα πλαίσια και τη μεταβιβάζουν αναλόγως στα ac/dc φορτία ή και τις μπαταρίες για φόρτιση. Οι μπαταρίες επιλέγονται σε αριθμό και χωρητικότητα (Ah) βάση τις απαιτούμενης ισχύος σε Wh (Βατ ανά ώρα).

Οι εφαρμογές των φβ μπορούν να χωρισθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

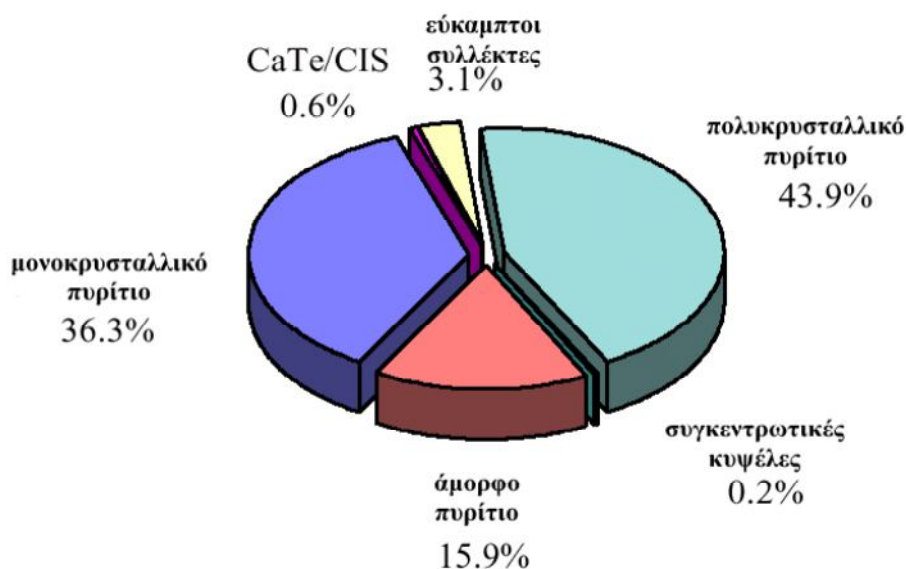
- Απλό ή ανεξάρτητο φβ σύστημα
- Φωτοβολταϊκό σύστημα με αποθήκευση σε μπαταρίες
- Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στον οργανισμό κοινής ωφελείας
- Φωτοβολταϊκό σύστημα σε επίπεδο εργοστασίου παραγωγής ενέργειας
- Μικτά / Υβριδικά συστήματα

Η ενέργεια παράγεται όπου και όταν χρειάζεται και το φβ σύστημα είναι απλό σε όλα του τα στάδια - από την καλωδίωση, την αποθήκευση του έως και τα κέντρα ελέγχου του. Τα μικρά συστήματα (έως 500W) έχουν χαμηλό βάρος και είναι πολύ εύκολα στην μεταφορά και στην εγκατάστασή τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εγκατάσταση ενός συστήματος διαρκεί μερικές ώρες. Ένα παράδειγμα είναι οι αντλίες νερού που απαιτούν συχνή συντήρηση, ενώ το φβ σύστημα που τις τροφοδοτεί με ηλεκτρικό απαιτούν μόνο ένα περιοδικό έλεγχο της κατάστασής τους και καθάρισμα.

Τα φβ συστήματα με μπαταρίες είναι μία πολύ αξιόπιστη λύση για την ηλεκτροδότηση ενός χώρου ή μηχανήματος 24 ώρες το 24ωρο, με βροχή ή λιακάδα. Χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο για να μας δίνουν φως, να προμηθεύουν ηλεκτρικό ρεύμα τις οικιακές συσκευές, διακόπτες, τηλέφωνα, ακόμα και μηχανολογικό εξοπλισμό βαρέως τύπου. Κατά την διάρκεια της ημέρας τα στοιχεία συλλέγουν ηλιακό φως, το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα και το αποθηκεύουν στις μπαταρίες. Αυτές με την σειρά τους μας προμηθεύουν με ηλεκτρισμό όταν ζητηθεί. Μεσολαβεί μία συσκευή που ονομάζεται "ρυθμιστής φόρτισης" η οποία φροντίζει να φορτίζονται σωστά οι μπαταρίες και επιμηκύνει την διάρκεια ζωής τους, προστατεύοντάς τις από υπερφόρτιση ή από την ολική τους αποφόρτιση.

3.7 Η αγορά των φωτοβολταϊκών σήμερα

Αναμφίβολα την πρωτοκαθεδρία στην αγορά των φβ κατέχουν οι τεχνολογίες του μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Οι μεγαλύτεροι παραγωγοί φβ είναι σήμερα η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ και ακολουθεί η Ευρωπαϊκή Ένωση. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την κατανομή των παραγόμενων φβ ανά τεχνολογία σήμερα.



Εικόνα 2.7.56: Μερίδιο ίδιος αγοράς ανά τεχνολογία φωτοβολταϊκών συλλεκτών.

Ωστόσο υπάρχει μια τάση για μεγαλύτερη παραγωγή στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία αφενός μεν έχουν υψηλές αποδόσεις, αφετέρου έχουν λογικό κόστος παραγωγής εν συγκρίσει με αυτά του μονοκρυσταλλικού.

3.8 Ενέργεια αποπληρωμής στα φωτοβολταϊκά

Μέχρι σήμερα οι πιο δύσπιστοι σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από φβ, τόνιζαν ότι η ενέργεια που απαιτείται για να παρασκευαστεί ένα φβ στοιχείο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα παράγει σε όλη του τη διάρκεια λειτουργίας. Ωστόσο το επιχείρημα φαίνεται σήμερα εξ ολοκλήρου λαθεμένο, καθώς μελέτες δείχνουν ότι ένα φβ πλαίσιο παράγει την ενέργεια που απαιτήθηκε για την κατασκευή του σε διάρκεια δύο μέχρι τεσσάρων ετών λειτουργίας του.

Συγκεκριμένα, για την μελέτη ίδιος ενεργειακής αποπληρωμής ίδιος φβ χρειάζεται να μετρηθεί η ενέργεια που παράγει αυτό σε ένα έτος (KWh/m²/έτος) και να συγκριθεί με την ενέργεια που απαιτήθηκε να κατασκευασθεί τόσο ο ίδιος ο συλλέκτης όσο και τα επιμέρους υλικά του.

Για ένα τυπικό συλλέκτη των 75 Wp, τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού πυριτίου, υπολογίστηκε ότι απαιτούνται περίπου 2.875 κιλοβατώρες ενέργειας για να παραχθεί 1 KWh φβ(βλέπε πίνακα 2.8.1).

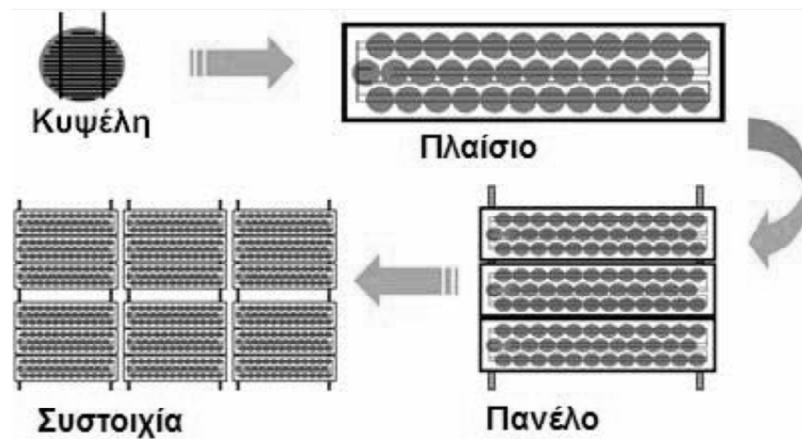
Απαιτούμενη ενέργεια ανα διεργασία		
Είδος υλικού και διεργασίας	ενώσεις, κολλήσεις	0.1
	γραφίτης	1.1
	επίστρωση αργύρου	1.2
	λωρίδες χαλκού	5
	tedlar	7
	j box set	9
	χαλαζίας	11
	άζωτο	17
	χάραξη	17
	Αργό	24
	κόψιμο ηλεκτροδίων	31
	EVA (0,018")	33
	λάδι κοψίματος	51
	διαλύτες, καθαριστικά	58
	γυαλί	136
	καρβίδιο του πυριτίου	239
	πλαίσιο αλουμινίου	324
πυρίτιο	1884	
Μονάδες ενέργειας KWHe/KWp		2875
Σύνολο:		(υλικά: 133, επεξεργασία 2742)

Πίνακας 2.8.1 Απαιτούμενη ενέργεια ανά διεργασία για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού.

Η ενέργεια που θα παραχθεί από το πλαίσιο εξαρτάται φυσικά από το μέρος που θα τοποθετηθεί, δηλαδή από το μέσο όρο της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής. Θεωρώντας ότι για ένα πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου η απόδοσή του δεν θα πέσει κάτω από το 80% της ονομαστικής του τιμής για 25 έτη, πολλαπλασιάζοντας την ετήσια παραγόμενη ενέργεια επί τα χρόνια λειτουργίας του βρίσκουμε την ολική παραγόμενη ενέργεια στη διάρκεια ζωής του. Θεωρώντας μια μέση τιμή 1700KWh/m²/έτος βρίσκουμε ότι για 25 έτη θα παράγει 42500 KWh. Βλέπουμε ότι η τιμή αυτή είναι 15πλάσια από την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του.

Όλες αυτές οι μετρήσεις είναι βέβαια αρκετά ασαφείς, καθώς πολλοί παράγοντες δεν λαμβάνονται υπ' όψιν, όπως ότι το φβ μπορεί να συνεχίσει να παράγει ενέργεια και μετά από 25 χρόνια. Επίσης υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην ενέργεια που απαιτείται για τους διάφορους τύπους φβ. Για παράδειγμα στα φβ ινδίουδισεληνίου (CIS) το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας για την παρασκευή του δεν καταναλώνεται στο υλικό του αλλά στο αλουμίνιο που συνήθως περιβάλλει το πλαίσιο, καθώς το αλουμίνιο χρειάζεται πολύ ενέργεια για να παρασκευαστεί. Λογικό είναι ότι φβ χωρίς πλαίσιο αλουμινίου έχουν πολύ μικρότερο χρόνο ενεργειακής απόσβεσης.

3.9 Βασικοί Ορισμοί των Φωτοβολταϊκών



Σχήμα 58: Σύνθεση των ΦΒ συστοιχιών

Φωτοβολταϊκή κυψελίδα: Αφορά στην μικρότερη δομική μονάδα, ενός συνόλου ομοίων επαναλαμβανόμενων στο χώρο, λειτουργικά αυτόνομη, αποτελώντας τμήμα ενός σύνθετου ηλεκτρικού συσσωρευτή ή ενός ΦΒ πλαισίου.

Φωτοβολταϊκό στοιχείο: Είναι ημιαγωγική διάταξη που μετατρέπει την απορροφούμενη στο χώρο της επαφής του, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Ονομάζεται επίσης ΦΒ κύτταρο ή ΦΒ κυψελίδα.

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο: Είναι ένα σύνολο ΦΒ στοιχείων, που αποτελούν μια ολοκληρωμένη μονάδα, τοποθετημένη σ' ένα μεταλλικό πλαίσιο συνδεδεμένα σε σειρά ή και παράλληλα, για να καλύπτει με συνολική τάση τη φόρτιση ενός 12βολτου συσσωρευτή.

Φωτοβολταϊκό πανέλο: Είναι σύνθεση από μερικά ΦΒ πλαίσια, συνδεδεμένα μεταξύ τους, ώστε ως τμήμα μιας ΦΒ συστοιχίας, να μπορεί να τοποθετηθεί σ' αυτή, να ρυθμιστεί η κλίση του ή να απομακρυνθεί απ' αυτή, ως ενιαίο σύνολο. Ένα ή περισσότερα ΦΒ πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε ΦΒ εγκατάσταση (PV panel).

Φωτοβολταϊκή συστοιχία: Είναι το σύνολο ΦΒ πλαισίων ηλεκτρολογικά συνδεδεμένων μεταξύ τους, σε σειρά ή παράλληλα, με μια ηλεκτρολογική έξοδο, σε κεντρικό ηλεκτρολογικό κιβώτιο.

Φωτοβολταϊκό συγκρότημα: Είναι το σύνολο των ΦΒ συστοιχιών ενός σταθμού. Ονομάζεται επίσης ΦΒ πάρκο.

Φωτοβολταϊκή γεννήτρια (PV generator): Είναι το τμήμα μιας ΦΒ εγκατάστασης που περιέχει ΦΒ στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα (PV generator).

Φωτοβολταϊκό σταθμός: Είναι ο ηλεκτρικός σταθμός με όλες τις ηλεκτρικές συσκευές μετατροπών και ελέγχου της ηλεκτρικής ενέργειας, στον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τα ΦΒ πλαίσια όλων των ΦΒ συστοιχιών της εγκατάστασης.

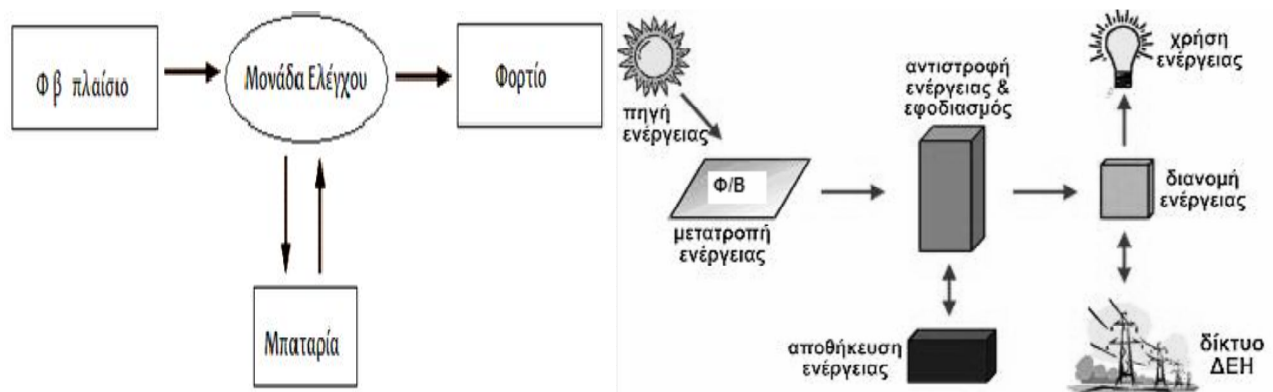
4 Φωτοβολταϊκά Σύστημα



4.1 Περιγραφή ΦΒ συστήματος μίας εγκατάστασης

Ένα ΦΒ σύστημα πρέπει να παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια, για την ικανοποίηση της ζήτησης και τις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες δεν υπάρχει αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Τέτοιες περιόδους είναι οι νυχτερινές ώρες και οι συννεφιασμένες ημέρες. Η καλή λειτουργία και η αυξημένη απόδοση των ΦΒ συστημάτων απαιτεί τη χρήση κατάλληλων διατάξεων, οι οποίες βελτιώνουν τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τον οικονομικότερο τρόπο και προστατεύουν τον ηλεκτρικό συσσωρευτή από υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση.

Οι διατάξεις αυτές είναι ο ρυθμιστής φόρτισης του συσσωρευτή και οι μετατροπείς τάσεως, οι οποίες είναι μονάδες ελέγχου. Ένα ηλιακό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται ΦΒ πλαίσια για την παραγωγή, μπαταρίες για την αποθήκευση, έναν ρυθμιστή για να κρατήσει τις μπαταρίες σε καλή λειτουργούσα κατάσταση, και έναν μετατροπέα για παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Αν συνδεθούν κατάλληλα οι μονάδες ελέγχου με τα φορτία κατανάλωσης, τη μπαταρία και τα ΦΒ πλαίσια δημιουργείται μία ΦΒ εγκατάσταση όπως στο σχήμα 4.1.1.



Σχήμα 4.1.1: Περιγραφή συστήματος

4.2 ΦΒ πλαίσιο

Όπως έχει ήδη αναλυθεί στο δεύτερο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στην παράγραφο 2.5, το ΦΒ πλαίσιο είναι σύνολο ΦΒ στοιχείων, που αποτελούν μια ολοκληρωμένη μονάδα, τοποθετημένα σ' ένα μεταλλικό πλαίσιο, συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Τα ΦΒ στοιχεία πυριτίου χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα άμορφα.

Η χαρακτηριστική ιδιότητα των ΦΒ πλαισίων είναι καθώς προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία πάνω τους να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Αν τα ΦΒ πλαίσια συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα, με μία ηλεκτρολογική έξοδο, σε κεντρικό ηλεκτρολογικό κιβώτιο, τότε δημιουργείται μία ΦΒ συστοιχία. Δηλαδή με αυτόν τον τρόπο, από τη συστοιχία συλλέγεται μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς πέφτουν πάνω της, οι ακτίνες του ήλιου. Στη συνέχεια το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τη συστοιχία, διαρρέει τη μονάδα ελέγχου, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού.

4.2.1 Η τοποθέτηση και η λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Δεδομένης της μικρής απόδοσης του ΦΒ πλαισίου έχει μεγάλη σημασία να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που θα τοποθετηθεί. Γι' αυτόν τον σκοπό ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα τα οποία εξασφαλίζουν την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ηλίου και την βέλτιστη λειτουργία του ΦΒ.

❖ Ηλιακή ακτινοβολία:

Ο ήλιος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τη γη, και ανάλογα με το που βρίσκεται το σημείο που θα τοποθετηθεί το φβ, προσδιορίζεται κατάλληλα ο προσανατολισμός του. Η αζιμούθια γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ηλιακού συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Για να έχουμε βέλτιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να είναι κάθετη στο συλλέκτη οπότε και η αζιμούθια γωνία μηδέν. Για το βόρειο ημισφαίριο όπου και βρίσκεται η Ελλάδα, η αζιμούθια γωνία είναι μηδέν, οπότε και ο προσανατολισμός του συλλέκτη πρέπει να είναι προς το νότο. Επίσης η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο της περιοχής που βρίσκεται αυτός. Για την Αθήνα π.χ. είναι ίση με 38 μοίρες. Για μεγαλύτερη απόδοση των φβ στοιχείων είναι καλύτερο η κλίση των συλλεκτών να μην μένει σταθερή όλο το χρόνο, αλλά να αλλάζει δύο φορές το χρόνο. Για την Αθήνα για παράδειγμα, μια καλή λύση είναι να τοποθετούνται οι συλλέκτες υπό κλίση 60 μοιρών τους χειμερινούς μήνες και 30 μοιρών τους θερινούς.

❖ Ηλιακοί ιχνηλάτες:

Μια πιο εξεζητημένη λύση που εφαρμόζεται είναι η τοποθέτηση των φβ πάνω σε «ηλιακούς ιχνηλάτες» (solar trackers). Οι ηλιακοί ιχνηλάτες, είναι κινούμενες πλατφόρμες πάνω στις οποίες τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες. Οι πλατφόρμες αυτές είναι συνδεδεμένες με κύκλωμα το οποίο ελέγχει κάθε στιγμή την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένας κινητήρας στη βάση τους επιτρέπει την κίνηση της πλατφόρμας από την ανατολή μέχρι τη δύση. Επίσης συναντώνται εφαρμογές που επιτρέπουν την κίνηση και στο κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή μεταβάλλουν και την κλίση των συλλεκτών. Το κύκλωμα ελέγχου, έχει φωτοαισθητήρες τοποθετημένους πάνω στην πλατφόρμα με ίδια φυσικά κλίση με τους ηλιακούς συλλέκτες. Μια μικρή διαταραχή στον προσανατολισμό της πλατφόρμας θα προκαλέσει αύξηση ή μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν υπάρξει αύξηση τότε το κύκλωμα ελέγχου θα περιστρέψει την πλατφόρμα προς την κατεύθυνση που προκάλεσε την αύξηση. Αντίθετα μια μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας θα την περιστρέψει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μετρήσεις δείχνουν ότι η χρήση μιας τέτοιας τεχνολογίας μπορεί να αυξήσει την απόδοση των φβ συλλεκτών από 10% τους χειμερινούς μήνες μέχρι 40% τους θερινούς, εν συγκρίσει με την περίπτωση σταθερά τοποθετημένων συλλεκτών. Ωστόσο, το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η εγκατάσταση πολλών τέτοιων μηχανισμών, ιδιαίτερα αν πρόκειται για πολλές συστοιχίες συλλεκτών, αλλά και η μικρότερη μηχανική αντοχή στους ανέμους, δεν έχουν διαδώσει ευρέως αυτή την τεχνολογία. Εναλλακτικές τεχνικές χωρίς τη χρήση κινητήρα και επιπλέον φβ για την παρακολούθηση του ηλίου, εφαρμόζονται με την τοποθέτηση δύο ράβδων με αέριο φρέον στα δύο άκρα της πλατφόρμας. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ράβδων προκαλεί διαφορά βάρους στις δύο ράβδους, άρα και στην όλη πλατφόρμα με αποτέλεσμα να κατευθύνεται προς την μεριά που δέχεται μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Αν και η απόκριση είναι πιο αργή και ανακριβής σε σχέση με την πρώτη τεχνική, η έλλειψη μηχανικών και ηλεκτρικών μερών εξασφαλίζει μεγαλύτερη αξιοπιστία στο χρόνο και στις κεραυνικές υπερτάσεις.

❖ **Ενίσχυση της ηλιακής ακτινοβολίας με κάτοπτρα.**

Μια άλλη πρακτική που εφαρμόζεται για την αύξηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες είναι η τοποθέτηση ηλιακών κατόπτρων στις γύρω πλευρές του συλλέκτη ώστε να αντανακλάται η γύρω προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στον συλλέκτη. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται καθρέπτες ή άλλες αντανακλαστικές επιφάνειες στην κάτω και στις πλαϊνές πλευρές του φβ ώστε η ακτινοβολία που πέφτει στα σημεία αυτά να αντανακλάται πάνω στον φβ συλλέκτη. Η τοποθέτησή αυτών γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εμποδίζει την πρόσπτωση τόσο της άμεσης ακτινοβολίας όσο και του διάχυτου φωτισμού απ' το να πέφτει πάνω στον συλλέκτη. Ακόμη πιο εξεζητημένη είναι η τοποθέτηση παραβολικών κατόπτρων ώστε να κατευθύνουν συγκεντρωμένα την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στους συλλέκτες. Ωστόσο οι αυξημένες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην περίπτωση αυτή πάνω στον συλλέκτη απαιτούν κάποιας μορφής ψύξη αυτού.

❖ **Σωστή τοποθέτηση:**

Ένας φβ συλλέκτης αποτελείται από φβ στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά. Όταν κάποιο από αυτά σκιαστεί τελείως, τότε η δίοδος αυτή δεν παράγει τάση με αποτέλεσμα να μπλοκάρεται όλη η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα στοιχεία σε σειρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση του φβ να μηδενίζεται τελείως, αν πρόκειται για μια ολόκληρη σειρά από στοιχεία τα οποία σκιάζονται, ή να πέφτει τουλάχιστον στο μισό αν πρόκειται έστω και για ένα τελείως σκιασμένο στοιχείο. Το πιο σημαντικό όμως δεν είναι η ενέργεια που δεν παράγεται στην έξοδο του συλλέκτη, αλλά το ότι η ενέργεια που παράγεται από τα μη σκιασμένα στοιχεία, φτάνει στα άκρα της σκιασμένης διόδου (στοιχείου) και μετατρέπεται φυσικά σε θερμότητα. Η παρατεταμένη αυτή δυσλειτουργία μπορεί να μειώσει σοβαρά τη διάρκεια ζωής του στοιχείου, ακόμη και να το καταστρέψει τελείως ιδιαίτερα αν συμβαίνει το καλοκαίρι όπου έτσι κι αλλιώς αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες.

❖ **Θερμοκρασία:**

Η απόδοση της φβ γεννήτριας μειώνεται με τη θερμοκρασία. Συνήθως η θερμοκρασία που αναπτύσσεται πάνω στον συλλέκτη είναι 30 βαθμούς Κελσίου μεγαλύτερη από αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$I_{sc} = I_0 * (1 + \alpha * \Delta T) \qquad V_{oc} = V_0 * (1 - \beta * \Delta T)$$

Όπου ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς T_0 και α , β σταθερές. Από πειραματικές μετρήσεις έχει βρεθεί ότι η απόδοση του φβ μειώνεται κατά 0,5% ανά βαθμό Κελσίου, πέρα από τη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας που είναι 30 °C. Βέβαια στις μικρές εγκαταστάσεις δεν υπάρχει κάποιος λειτουργικός τρόπος για την μείωση της θερμοκρασίας των φβ συλλεκτών, ωστόσο στις μεγάλες εγκαταστάσεις μερικές φορές χρησιμοποιείται κλειστό κύκλωμα ψύξης με νερό έτσι ώστε να απάγεται η μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σ' αυτά.

❖ **Καθαριότητα:**

Είναι προφανές ότι για να έχουμε μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι απαραίτητο η επιφάνεια των συλλεκτών να είναι καθαρή από σκόνη και άλλες επικαθίσεις. Τα φβ στοιχεία επικαλύπτονται από ειδικά αντί-ανακλαστικά υλικά για να αποφεύγεται η αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρομοίως το προστατευτικό τζάμι που καλύπτει τα στοιχεία, είναι φτιαγμένο για να επιτρέπει καλύτερη μετάδοση του φωτός.

❖ Απόδοση των φβ στοιχείων.

Σε αντίθεση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, η απόδοση του φβ στοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται πάντοτε από το φορτίο που τροφοδοτεί, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που είναι συνδεδεμένης στα άκρα του. Όταν δεν υπάρχει καθόλου αντίσταση, συναντάται η μέγιστη τάση εξόδου, ή τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} . Τυπική τιμή για συλλέκτες 12V τάσης εξόδου είναι τα 21 Volt. Αντίθετα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος, ή ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Ωστόσο, η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-έντασης δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται όπως φαίνεται εύκολα στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης. Επιθυμητό είναι λοιπόν σε κάθε φβ εγκατάσταση, οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ένταση. Όταν η φβ γεννήτρια τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι πραγματοποιήσιμο καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Όταν όμως μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος(maximum power point trackers MPPT).

❖ Σημείο μέγιστης ισχύος - Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φβ και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών.

Η λογική πίσω από τη λειτουργία τους είναι η εξής: Παρακολουθώντας συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φβ γεννητριών, προκαλούν ανά τακτά χρονιά 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 φβ στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα φβ 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 φβ 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. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φβ στοιχείου.

❖ Η χαρακτηριστική V-I μιας ΦΒ γεννήτριας

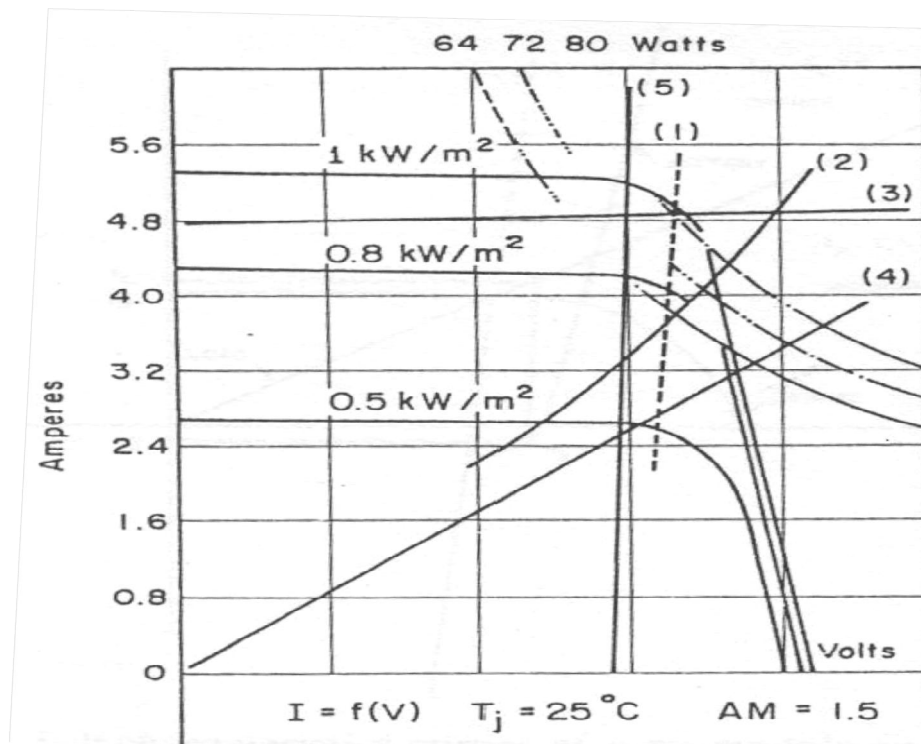
Η χαρακτηριστική V-I μιας ΦΒ γεννήτριας(ΦΒ στοιχείου, ΦΒ πλαισίου ή ΦΒ συστοιχίας) περιέχει τρία σημαντικά σημεία: το σημείο που δίνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , το σημείο που δίνει την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και το σημείο της μέγιστης ισχύος που συμβολίζεται με P_{max} .

Αν η ΦΒ γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με ένα φορτίο, τότε το σημείο λειτουργίας καθορίζεται από την τομή της χαρακτηριστικής V-I της ΦΒ γεννήτριας με την χαρακτηριστική V-I του φορτίου της. Για ένα ωμικό φορτίο R η χαρακτηριστική V-I είναι μια ευθεία με κλίση $1/R$ ($I/V = 1/R$).

Για την περίπτωση του ωμικού φορτίου:

- Η ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο εξαρτάται μόνο από την αντίσταση R.
- Η μέγιστη ισχύς αποδίδεται για $R = R_{opt}$ όπου: $R_{opt} = V_m / I_m$
- Αν η R είναι μικρή η ΦΒ γεννήτρια συμπεριφέρεται ως πηγή σταθερού ρεύματος, με ρεύμα σχεδόν ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης.
- Αν η R είναι μεγάλη η ΦΒ γεννήτρια συμπεριφέρεται ως πηγή σταθερής τάσης, με τάση σχεδόν ίση με την τάση ανοικτού κυκλώματος.

Στο Σχήμα 4.2.1.2 φαίνονται οι χαρακτηριστικές V-I μιας ΦΒ γεννήτριας για τρεις διαφορετικές τιμές της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η γραμμή μέγιστης ισχύος είναι η καμπύλη (1) που σχεδιάστηκε με διακεκομμένη γραμμή. Στο Σχήμα 4.2.1.2 φαίνονται επίσης οι χαρακτηριστικές V-I διαφόρων φορτίων που συνήθως τροφοδοτούν τα ΦΒ συστήματα. Η καμπύλη (2) είναι η χαρακτηριστική V-I μιας φυγόκεντρης αντλίας, η καμπύλη (3) είναι η χαρακτηριστική V-I μιας αντλίας θετικής μετατόπισης, η καμπύλη (4) είναι η V-I ενός ωμικού φορτίου και η (5) είναι η V-I μιας συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.

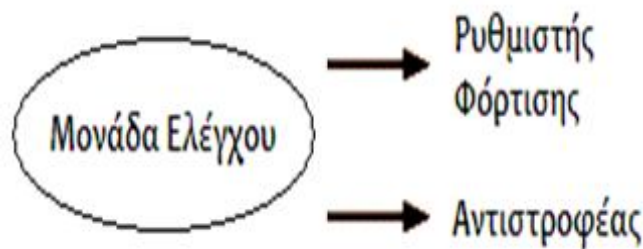


Σχήμα 4.2.1.2: Οι χαρακτηριστικές μιας ΦΒ γεννήτριας και οι χαρακτηριστικές διαφόρων φορτίων

Η σχετική θέση της χαρακτηριστικής V-I ενός φορτίου και της γραμμής μέγιστης ισχύος, δείχνει το πόσο το φορτίο μπορεί να εκμεταλλευτεί τη ΦΒ γεννήτρια. Η χαρακτηριστική V-I του συστήματος των συσσωρευτών (καμπύλη 5), βρίσκεται πολύ κοντά στη γραμμή μέγιστης ισχύος και είναι σχεδόν παράλληλη με αυτήν, πράγμα που σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας θα βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Από τη θέση και την κλίση της χαρακτηριστικής V-I του ωμικού φορτίου βγαίνει το συμπέρασμα ότι το σύστημα θα λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος σε χαμηλές τιμές της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες καθώς και τις συννεφιασμένες ημέρες), ενώ θα απομακρύνεται από το σημείο μέγιστης ισχύος όσο αυξάνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

4.3 Η Μονάδα Ελέγχου

Η μονάδα ελέγχου αποτελείται από τον ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας και τον αντιστροφέα (inverter)(βλ. σχήμα 4.3.3). Ο ρυθμιστής φόρτισης οδηγεί το ρεύμα από το ΦΒ στη μπαταρία, αποτρέπει την υπερφόρτιση της και την αποκόπτει από το φορτίο όταν η τάση της πέσει κάτω από το όριο ασφαλούς λειτουργίας. Ο αντιστροφέας μετατρέπει το συνεχές ρεύμα από το ΦΒ ή την μπαταρία σε εναλλασσόμενο και τροφοδοτεί το φορτίο. Όταν υπάρχει ηλιοφάνεια το φορτίο τροφοδοτείται απευθείας από το ΦΒ ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Αυτό συνεχίζεται και κατά την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας. Όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια το φορτίο τροφοδοτείται από τη μπαταρία εφόσον αυτή βρίσκεται σε κατάσταση ασφαλούς λειτουργίας. Έτσι έχουμε ένα αυτόνομο ΦΒ σύστημα.



Σχήμα 4.3.3: Συστήματα ελέγχου της εγκατάστασης

4.3.1 Ο ρυθμιστής φόρτισης στα ΦΒ συστήματα

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια απλή ηλεκτρονική συσκευή που φροντίζει για τη σωστή φόρτιση των συσσωρευτών (μπαταριών) του φβ συστήματος και παράλληλα αποτρέπει την υπερφόρτιση τους, την ανάπτυξη αερίων ως επακόλουθα της χρήσης, την απώλεια ηλεκτρολύτη και την πιθανή βλάβη του ηλεκτροδίου του στοιχείου. Επίσης ελέγχει τη διαδικασία φόρτισης και σταματά τη φόρτιση όταν διαπιστώσει ότι η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως. Το 70% με 80% της χωρητικότητας ενέργειας της μπαταρίας, είναι εύκολο να επαναποκτηθεί. Το τελευταίο 20% με 30% απαιτεί περισσότερη προσοχή και πιο πολύπλοκες διαδικασίες για να αποκτηθεί. Αλλιώς θα υπήρχε ο σοβαρός κίνδυνος να καταστραφεί η μπαταρία.

Εξετάζοντας συνέχεια την τάση της μπαταρίας, ρυθμίζουν το ρεύμα φόρτισης που δημιουργεί η συστοιχία των φβ βαθμίδων, για να διευκολύνει την συστοιχία της μπαταρίας να φορτιστεί και όχι να υπερφορτιστεί. Οι ρυθμιστές περιέχουν ακόμα κατάλληλη προστασία για να εμποδίσουν ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει από τις μπαταρίες προς την συστοιχία φβ κατά την διάρκεια της νύχτας. Οι περισσότεροι ρυθμιστές περιλαμβάνουν διόδους ή άλλη προστασία για να αποτρέψουν την ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τις μπαταρίες προς την φβ συστοιχία κατά την διάρκεια της νύχτας ή συννεφιάς.

Επειδή οι μπαταρίες έχουν την τάση να αποφορτίζονται σταδιακά ακόμα κι αν δεν τροφοδοτούν με ρεύμα κάποια συσκευή, ο ρυθμιστής φόρτισης φροντίζει αυτόματα να ξαναρχίσει η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας όταν διαπιστώσει ότι η τάση της έπεσε κάτω από το επίπεδο της πλήρους φόρτισης.

Αρκετοί ρυθμιστές φόρτισης έχουν υποδοχή πάνω στην οποία συνδέουμε τις ηλεκτρικές συσκευές που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε από τη μπαταρία. Έτσι, έχουν την επιπλέον δυνατότητα να διακόψουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών όταν διαπιστώσουν ότι η μπαταρία κοντεύει να αδειάσει πλήρως, προστατεύοντάς την πάλι με αυτό τον τρόπο από πλήρη αποφόρτιση που θα οδηγούσε στην καταστροφή της.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης είναι να απομονώνει το συσσωρευτή από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της υπερφόρτισης και να απομονώνει το συσσωρευτή από την κατανάλωση στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Η υπερφόρτιση προκαλεί την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου λόγω ηλεκτρόλυσης και μειώνει τη στάθμη του ηλεκτρολύτη, ενώ η υπερεκφόρτιση περιορίζει σημαντικά το χρόνο ζωής του συσσωρευτή.

Ο ρυθμιστής τάσης είναι ένα ζωτικής σημασίας εξάρτημα όλων των συστημάτων ισχύος που φορτίζουν μπαταρίες, ανεξάρτητα από το αν η πηγή ισχύος είναι ο ήλιος, ο άνεμος, υδάτινοι πόροι, καύσιμα ή το δίκτυο της Δ.Ε.Η.

Εμποδίζοντας το αναστραφόμενο ρεύμα.

Οι φβ βαθμίδες τροφοδοτούν με ηλεκτρικό ρεύμα τις μπαταρίες. Κατά την διάρκεια της νύχτας ή συννεφιάς η φορά του ρεύματος αναστρέφεται με αποτέλεσμα την μερική εκφόρτιση των μπαταριών. Στους περισσότερους ρυθμιστές το ρεύμα φόρτισης περνά διαμέσου ενός ημιαγωγού (π.χ. ενός τρανζίστορ) ο οποίος ενεργεί σαν μια βαλβίδα ελέγχου του ρεύματος. Έτσι έχουμε την ροή ηλεκτρικού ρεύματος μόνο προς την μια κατεύθυνση, δηλαδή προς τις μπαταρίες.

Εμποδίζοντας την υπερφόρτιση.

Όταν μια μπαταρία φορτιστεί πλήρως, δεν μπορεί να αποθηκεύσει την επιπλέον ενέργεια που δέχεται. Αν συνεχιστεί η τροφοδοσία της συστοιχίας μπαταριών με ηλεκτρικό ρεύμα, το δυναμικό της θα γίνεται όλο και υψηλότερο. Τότε το νερό που περιέχει θα διαχωριστεί σε υδρογόνο και οξυγόνο. Τα αέρια αυτά θα εξέλθουν από την υγρή φάση σε μορφή φυσαλίδων και θα γεμίσουν τον κενό χώρο της μπαταρίας. Λόγω της πίεσης που θα δημιουργηθεί θα έχουμε απώλειες νερού και σε κάποιο χρονικό σημείο την ανάφλεξη των αερίων με αποτέλεσμα να προκληθεί έκρηξη και καταστροφή της μπαταρίας.

Ένα άλλο ενδεχόμενο που μπορεί να συμβεί είναι η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας της συστοιχίας μπαταριών με συνέπεια την ταχύτερη υποβάθμιση της ποιότητας της μπαταρίας. Ακόμα μπορεί κατά την υπέρμετρη αύξηση της τάσης της συστοιχίας των μπαταριών να βγει εκτός λειτουργίας ο μετατροπέας του φβ συστήματος.

Για να εμποδιστεί η υπερφόρτιση, απλά μειώνουμε την ροή ενέργειας προς τις μπαταρίες, όταν η τάση τους φθάσει σε ένα συγκεκριμένο δυναμικό. Όταν υπάρχει πτώση της παραγόμενης τάσης από την φβ συστοιχία λόγω της μείωσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ή λόγω μιας αύξησης σε ηλεκτρική κατανάλωση, ο ρυθμιστής ξανά επιτρέπει την μέγιστη δυνατή φόρτιση. Αυτό ονομάζεται **ρύθμιση τάσης**. Δηλαδή ελέγχεται η τάση από τον ρυθμιστή και με βάση αυτήν ρυθμίζεται και η φόρτιση της μπαταρίας.

Μερικοί ρυθμιστές φόρτισης ελέγχουν την ροή ενέργειας στην μπαταρία διακόπτοντας πλήρως ή επιτρέποντας πλήρως την ροή ηλεκτρικού ρεύματος με κατεύθυνση προς τις μπαταρίες. Αυτός ο τρόπος αποκαλείται **on / off έλεγχος**.

Άλλοι ρυθμιστές μειώνουν το ηλεκτρικό ρεύμα σταδιακά. Αυτός ο τρόπος ονομάζεται **έλεγχος με διαμόρφωση πλάτους παλμού (pulse width modulation PWM)**. Και οι δυο μέθοδοι είναι αποτελεσματικοί με κατάλληλη ρύθμιση για συγκεκριμένο είδος μπαταρίας.

Ένας ρυθμιστής τύπου PWM διατηρεί καλύτερα την τάση σταθερή. Αν έχει δυο στάδια ρύθμισης, πρώτα θα διατηρήσει την τάση σε μια ασφαλή για την μπαταρία μέγιστη τιμή. Έπειτα θα προκαλέσει πτώση της τάσης σε μια χαμηλότερη τιμή για το στάδιο της τελικής φόρτισης ή την διατήρηση της πλήρους φόρτισης.

Τα δύο αυτά στάδια ρύθμισης είναι σημαντικά για ένα σύστημα που μπορεί να δέχεται επί μέρες επιπλέον ενέργεια από αυτήν που χρειάζεται για να καλύψει τα φορτία που τροφοδοτεί ή όταν του ζητούνται μικρά ποσά ενέργειας από τις καταναλώσεις. Έτσι διατηρεί την πλήρη φόρτιση των μπαταριών, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες τους σε νερό. Οι τιμές της τάσης στις οποίες ο ρυθμιστής τάσης αλλάζει τον ρυθμό φόρτισης ονομάζονται **σημεία ρύθμισης**.

Καθορίζοντας τα ιδανικά σημεία ρύθμισης, κάνουμε έναν συμβιβασμό μεταξύ της γρήγορης φόρτισης πριν ο ήλιος τείνει προς την δύση του και της ελάχιστης υπερφόρτισης της μπαταρίας. Ο καθορισμός των σημείων ρύθμισης εξαρτάται από τα προσδοκώμενα σχέδια χρήσης, τον τύπο της μπαταρίας και ως κάποια επέκταση, την εμπειρία και φιλοσοφία του σχεδιαστή ή χρήστη του συστήματος που πρόκειται να δημιουργηθεί. Μερικοί ρυθμιστές έχουν προσαρμοζόμενα σημεία ρύθμισης, ενώ άλλοι όχι.

Σημεία ρύθμισης και θερμοκρασία

Το αν τα σημεία ρύθμισης που θα επιλέξουμε για έναν ρυθμιστή φόρτισης είναι ιδανικά, είναι κάτι που εξαρτάται από την θερμοκρασία της μπαταρίας. Μερικοί ρυθμιστές έχουν την χαρακτηριστική **λειτουργία της αντιστάθμισης θερμοκρασίας**.

Όταν ο ρυθμιστής αισθανθεί μια χαμηλή θερμοκρασία θα αυξήσει την τιμή των σημείων ρύθμισης. Διαφορετικά αν η μπαταρία είναι κρύα, ο ρυθμός φόρτισης θα μειωθεί πιο γρήγορα. Αν οι μπαταρίες είναι εκτεθειμένες σε θερμοκρασιακές ταλαντώσεις της τάξεως των τριάντα βαθμών Κελσίου και πάνω, η αντιστάθμιση θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας.

Οι ρυθμιστές φόρτισης που διαθέτουν αισθητήρες θερμοκρασίας πρέπει να τοποθετούνται σε σημείο που η θερμοκρασία του χώρου να είναι σχεδόν ίση με αυτήν των μπαταριών. Οι ρυθμιστές καλύτερης ποιότητας διαθέτουν εξωτερικούς αισθητήρες θερμοκρασίας, οπότε ο ρυθμιστής μπορεί να βρίσκεται σε απόσταση από τον χώρο στον οποίο βρίσκεται η συστοιχία των μπαταριών. Ο εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας συνδέεται άμεσα στην μπαταρία προκειμένου η θερμοκρασία της να αναφέρεται στα κυκλώματα του ρυθμιστή.

Μια εναλλακτική μέθοδος έναντι της αυτόματης αντιστάθμισης θερμοκρασίας είναι η χειρονακτική προσαρμογή των τιμών που θα έχουν τα σημεία ρύθμισης σύμφωνα με την κάθε εποχή. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετό η ρύθμιση αυτή να γίνει δυο φορές τον χρόνο, την άνοιξη και το φθινόπωρο.

Σημεία ρύθμισης και οι τύποι μπαταριών.

Η επιλογή των τιμών των σημείων ρύθμισης εξαρτάται από τον σχεδιασμό της μπαταρίας. Η πλειοψηφία των συστημάτων που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες μορφές ενέργειας χρησιμοποιούν βαθύ κύκλου, μολύβδου – οξέος μπαταρίες σφραγισμένου τύπου ή «πλημμυρισμένου» τύπου. Οι «πλημμυρισμένου» τύπου μπαταρίες συμπληρώνονται με υγρό. Αυτές είναι οι περισσότερο διαδεδομένες, οικονομικές βαθύ κύκλου μπαταρίες.

Οι σφραγισμένου τύπου μπαταρίες χρησιμοποιούν κορεσμένες επιφάνειες μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επίσης αποκαλούνται μπαταρίες μηδενικής συντήρησης. Η φόρτιση για αυτού του είδους μπαταριών πρέπει να γίνεται σε δυναμικό ελάχιστο χαμηλότερο από αυτό των μπαταριών «πλημμυρισμένου» τύπου.

Αποσύνδεση λόγω χαμηλού δυναμικού.

Οι βαθύ κύκλου μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας σχεδιάζονται για να αποφορτιστούν κατά το 80%. Εάν αποφορτιστούν κατά το 100%, καταστρέφονται σχεδόν αμέσως.

Αν η μπαταρία βρεθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση υπεραποφόρτισης θα καταστραφεί σύντομα. Ο μόνος τρόπος για να εμποδιστεί η υπεραποφόρτιση είναι να διακοπεί η σύνδεση του φορτίου και να γίνει επανασύνδεση της τροφοδοσίας των φορτίων μόνο όταν ανακτηθεί το δυναμικό της μπαταρίας μετά από ένα χρονικό διάστημα φόρτισης. Η κατάσταση υπεραποφόρτισης υφίσταται όταν, το δυναμικό μιας 12V μπαταρίας πέφτει στα 11V ή όταν το δυναμικό μιας 24V πέφτει στα 22V.

Μόλις το δυναμικό της μπαταρίας φθάσει στο χαμηλό σημείο ρύθμισης το κύκλωμα τροφοδοσίας θα διακοπεί. Θα γίνει επανασύνδεση φορτίου μόνο όταν το επιτρεπτό δυναμικό επανακτηθεί μέσω της φόρτισης της μπαταρίας. Δηλαδή μόλις φθάσει τα 13V ή τα 26V για ένα 24V σύστημα.

Οι περισσότεροι μετατροπείς έχουν **την λειτουργία της διακοπής λόγω χαμηλού δυναμικού**. Ο μετατροπέας θα βγει εκτός λειτουργίας για να αυτοπροστατευτεί και για να προστατεύσει τα φορτία και την συστοιχία των μπαταριών. Κανονικά ο μετατροπέας συνδέεται απευθείας στις μπαταρίες, και όχι δια μέσου του ρυθμιστή φόρτισης, γιατί το ρεύμα που τον διαπερνά είναι πολύ υψηλό και επειδή δεν χρειάζεται η διακοπή λόγω χαμηλού δυναμικού να γίνει από εξωτερικό όργανο.

Εάν το σύστημα εξυπηρετεί DC φορτία πρέπει να έχει μηχανισμό διακοπής του κυκλώματος λόγω χαμηλού δυναμικού της μπαταρίας. Είναι αρκετοί οι ρυθμιστές φόρτισης που περιλαμβάνουν τέτοιους μηχανισμούς. Υπάρχει και χωριστή συσκευή που μόνο σκοπό έχει την λειτουργία διακοπής λόγω χαμηλού δυναμικού. Ειδικότερα μερικές από αυτές τις συσκευές όταν ενεργοποιηθούν, επιτρέπουν την ροή ελάχιστου ποσού ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή του χρήστη του συστήματος στην προκείμενη πλήρη διακοπή της τροφοδοσίας κάθε κατανάλωσης εντός του συστήματος. Πολλοί DC καταψύκτες περιλαμβάνουν έναν τέτοιο μηχανισμό. Ο αγοραστής ενός ρυθμιστή φόρτισης, με μηχανισμό διακοπής λόγω χαμηλού δυναμικού, πρέπει να ξέρει αν μπορεί να χειριστεί τα DC φορτία του.

Προστασία από υπερεντάσεις.

Ένα κύκλωμα είναι υπερφορτωμένο όταν το ρεύμα που το διαρρέει είναι υψηλότερο από αυτό που μπορεί να εκτεθεί με ασφάλεια. Σε μια τέτοια κατάσταση μπορεί να προκληθεί υπερθέρμανση των υλικών που χρησιμοποιούνται, με συνέπεια τον κίνδυνο πυρκαγιάς και καταστροφής του συστήματος.

Η υπερένταση μπορεί να προκληθεί από βλάβη στην μόνωση των καλωδίων, που με την σειρά της μπορεί να προκαλέσει βραχυκύκλωμα ή από σφάλμα στο κύκλωμα και την μόνωση κάποιας συσκευής. Μερικοί ρυθμιστές φόρτισης διαθέτουν προστασία από υπερφόρτιση, συνήθως με ένα μπουτόν επανατοποθέτησης. Φυσικά αυτή η ενσωματωμένη προστασία είναι χρήσιμη, αλλά τα περισσότερα συστήματα απαιτούν επιπρόσθετη προστασία με την μορφή ασφαλειών με τηκόμενο νήμα και μικροαυτόματων. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο αν ο αγωγός τροφοδοσίας μπορεί να αντέξει τα ονομαστικά αμπέρ του ρυθμιστή.

Οπτική παρουσίαση πληροφοριών στον ρυθμιστή.

Οι ρυθμιστές φόρτισης περιλαμβάνουν μια ποικιλία οπτικής πληροφόρησης, ξεκινώντας από ένα κόκκινο led έως την ψηφιακή απεικόνιση της τάσης και του ρεύματος. Αυτές οι ενδείξεις είναι σημαντικές και χρήσιμες. Ένα σύστημα ενδείξεων μπορεί να απεικονίσει την ροή ισχύος προς και από ένα σύστημα, την κατά προσέγγιση κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και πότε συγκεκριμένα όρια έχουν προσεγγισθεί.

Εάν θελήσουμε ολοκληρωμένη και ακριβή παρακολούθηση μπορούμε να επιλέξουμε μια ξεχωριστή ψηφιακή συσκευή που θα περιλαμβάνει και ένα μετρητή αμπερορών. Έτσι ο χρήστης θα γνωρίζει την ενέργεια που είναι διαθέσιμη από τις μπαταρίες του συστήματος ανά πάσα στιγμή. Αν υπάρχει ένα αυτόνομο σύστημα παρακολούθησης, εννοείται ότι ο ρυθμιστής δεν χρειάζεται να έχει κανένα εξάρτημα για ενδείξεις. Πάντως και στα πιο απλά συστήματα θεωρείται δεδομένη η παρουσία ενός βολτόμετρου ως η ελάχιστη πληροφόρηση για την λειτουργία του.

Έλεγχος της λειτουργίας του ρυθμιστή φόρτισης.

Για να γίνει ο έλεγχος λειτουργίας ενός ρυθμιστή παρακολουθούμε την τάση των μπαταριών καθώς αυτές πλησιάζουν στην πλήρη φόρτισή τους. Ελέγχουμε αν η τάση προσεγγίζει και δεν υπερβαίνει τα κατάλληλα σημεία ρύθμισης για κάθε τύπο μπαταρίας. Ελέγχουμε με την ακοή και την όραση για την παραγωγή φυσαλίδων εντός του υγρού της μπαταρίας, φαινόμενο όμοιο με αυτό του βρασμού. Αν υπάρχει αυτό το φαινόμενο τότε έχουμε μια ισχυρή ένδειξη ότι το κύκλωμα είναι εκτεθειμένο σε υπερένταση. Ελέγχουμε ακόμα αν η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών είναι αυτή που αναμέναμε. Αν οι έλεγχοι αυτοί είναι αρνητικοί, τότε υπάρχει πρόβλημα στην λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης και ο κίνδυνος καταστροφής των μπαταριών είναι άμεσος.

Ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.

Μια νέα χαρακτηριστική λειτουργία περιλαμβάνεται στους ρυθμιστές φόρτισης από τους σύγχρονους κατασκευαστές. Καλείται **λειτουργία ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος**. Με αυτήν εξάγεται επιπρόσθετη ισχύ από την συστοιχία των φβ βαθμίδων υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Η λειτουργία που αναφέρθηκε παρομοιάζεται με την αλλαγή ταχυτήτων κατά την κίνηση ενός αυτοκινήτου. Όταν η μετάδοση της ταχύτητας γίνεται με την λάθος ταχύτητα, οι τροχοί δεν λαμβάνουν την μέγιστη ισχύ από την μηχανή. Και αυτό επειδή η μηχανή έχει λιγότερες ή περισσότερες στροφές από το εύρος των στροφών το οποίο είναι κατάλληλο για την συγκεκριμένη ταχύτητα. Το σύστημα μετάδοσης συνδέει την μηχανή στους τροχούς με τέτοιο τρόπο ώστε οι στροφές της μηχανής να βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, ανεξάρτητα από την επιτάχυνση.

Έστω τώρα ότι συγκρίνουμε μια φβ βαθμίδα με μια μηχανή με την μηχανή ενός αυτοκινήτου και το δυναμικό σε αναλογία με τις στροφές της μηχανής. Σε μια ιδανική τιμή του δυναμικού η φβ βαθμίδα μπορεί να προσφέρει μέγιστη ισχύ. Η τιμή αυτή της ισχύος ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος και η συγκεκριμένη τιμή του δυναμικού ονομάζεται τάση της κορυφής ισχύος (V_{pp}) γιατί αντιστοιχεί στην κορυφή (ως μέτρο) της ισχύος. Η V_{pp} ποικίλει ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και με την θερμοκρασία των φβ κελιών του συστήματος. Η τάση της μπαταρίας είναι ανάλογη της ταχύτητας των τροχών του αυτοκινήτου και ποικίλει από την κατάσταση φόρτισης στην οποία βρίσκεται και από τις ενεργές καταναλώσεις του συστήματος. Για ένα 12V φβ σύστημα, το επιτρεπτό εύρος τάσης εντοπίζεται μεταξύ των 11 και 14,5V.

Για να φορτιστεί μια μπαταρία (για να αυξήσουμε το δυναμικό της), η φβ βαθμίδα πρέπει να εφαρμόσει στα άκρα της μπαταρίας τάση μεγαλύτερη από την ονομαστική της τάση. Εάν η V_{pp} της φβ βαθμίδας έχει τιμή ελάχιστα χαμηλότερη από την τάση της μπαταρίας, τότε η τιμή του ρεύματος πέφτει κοντά στο μηδέν (όπως ακριβώς όταν οι στροφές μιας μηχανής είναι χαμηλότερες ως προς την ταχύτητα των τροχών του αμαξίου).

Οι τυπικές φβ βαθμίδες σχεδιάζονται με V_{pp} περίπου ίση με τα 17V, όταν η θερμοκρασία των φβ κελιών είναι 25°C. Αυτό γίνεται γιατί σε μια πολύ ζεστή μέρα η τιμή V_{pp} πέφτει περίπου στα 15V, ενώ σε μια πολύ κρύα μέρα αυξάνεται περίπου στους 18V.

Όταν η V_{pp} είναι πολύ πιο υψηλότερη από την τάση της μπαταρίας, τότε η τάση της βαθμίδας μειώνεται σε τιμή πιο κάτω από την ιδανική. Οι παραδοσιακοί ρυθμιστές φόρτισης έτσι διοχετεύουν το παραγόμενο φβ ρεύμα απευθείας στην μπαταρία, χωρίς να περιλαμβάνουν την επιπλέον ποσότητα που είναι δυνατό να αντληθεί.

Σύμφωνα με το προηγούμενο παράδειγμα ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης του αυτοκινήτου μεταβάλλει τον λόγο της ταχύτητας ως προς την ροπή. Σε μια χαμηλή ταχύτητα, η ταχύτητα μειώνεται και αυξάνεται η ροπή.

Ομοίως το ποιά θα είναι το σημείο μέγιστης ισχύος μεταβάλλει τον λόγο μεταξύ της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που τελικά φορτίζει την μπαταρία και με την οποία πετυχαίνουμε την παραγωγή της μέγιστης ισχύος από τις φβ βαθμίδες.

Εάν υπάρχει επιπλέον περιθώριο αύξησης της διαθέσιμης από τις βαθμίδες τάση, τότε αυτή μετατρέπεται σε επιπρόσθετη αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας. Είναι κάτι όμοιο με τις αυτόματες ταχύτητες. Καθώς η V_{pp} της φβ συστοιχίας μεταβάλλεται λόγω της θερμοκρασίας ή άλλων συνθηκών που επικρατούν στον χώρο του συστήματος ισχύος, οι ρυθμιστές που διαθέτουν την λειτουργία ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος αντιλαμβάνονται και παρακολουθούν την μεταβολή αυτή, ρυθμίζοντας αντίστοιχα την αναλογία τάσης και έντασης. Γι' αυτό τους αποκαλούμε ρυθμιστές με ανιχνευτή του μέγιστου σημείου ισχύος.

Το αν ο ανιχνευτής του μέγιστου σημείου ισχύος θα προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα εξαρτάται από την φβ συστοιχία, το κλίμα και από το τι εποχιακά φορτία θέλουμε να καλύψουμε. Πάντως αυτός θα προσφέρει μια αποτελεσματική αύξηση του ρεύματος μόλις η V_{pp} γίνει παραπάνω από περίπου 1V υψηλότερη από την τάση της μπαταρίας. Σε ζεστό καιρό αυτό δεν ισχύει, εκτός και αν οι μπαταρίες είναι σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης. Κατά την διάρκεια του χειμώνα όμως η V_{pp} μπορεί να αυξηθεί έως και τα 18V. Εάν οι ενεργειακές ανάγκες είναι μεγαλύτερες τον χειμώνα και έχουμε χειμώνα με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, τότε μπορούμε να κερδίσουμε μια απότομη και ουσιαστική αύξηση όταν την χρειαζόμαστε περισσότερο.



Εικόνα 4.3.1.4: Τηλεπικοινωνίες και φωτοβολταϊκές βαθμίδες άρρηκτα συνδεδεμένες υπό ακραίες συνθήκες.

Επιλογή του σωστού ρυθμιστή φόρτισης.

Το μέγεθος του ρυθμιστή φόρτισης εξαρτάται από το μέγεθος των ΦΒ που θα συνδεθούν πάνω του. Πρέπει να υπερκαλύπτει την συνολική ένταση σε Ampere των ΦΒ ή αλλιώς να έχει τη δυνατότητα να δεχθεί το μέγιστο ρεύμα, που παράγεται από τη ΦΒ συστοιχία, αλλά και να δώσει το μέγιστο ρεύμα στα φορτία κατανάλωσης. Αν, για παράδειγμα, η ονομαστική ένταση σε Ampere των ΦΒ είναι 10A, τότε πρέπει να επιλέξουμε ένα ρυθμιστή φόρτισης 12A.

Επίσης, πρέπει να είναι κατάλληλος και για την τάση του ΦΒ συστήματος, δηλαδή να έχει τάση ίση με την ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Αν τα ΦΒ βγάζουν συνολική τάση 12V, επιλέγουμε ρυθμιστή για ΦΒ 12V. Αν τα ΦΒ μας βγάζουν συνολική τάση 24V, επιλέγουμε ρυθμιστή για ΦΒ 24V.

Καλό είναι να προβλέπουμε και για το μέλλον. Αν έχουμε σκοπό να επεκτείνουμε το ΦΒ μας σύστημα με περισσότερα ΦΒ πάνελ στο μέλλον, τότε καλό είναι να επιλέξουμε ένα μεγαλύτερο ρυθμιστή φόρτισης για να καλύπτει και τις μελλοντικές ανάγκες.

Ο τύπος του ρυθμιστή φόρτισης που θα επιλεγεί μπορεί να έχει δραματική επίδραση στην καθολική συμπεριφορά του συστήματος ισχύος στο οποίο θα ανήκει. Το αν επιλέγεται ρυθμιστή φόρτισης με δυνατότητα PWM ή με λειτουργία ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος εξαρτάται :

- 1)** Από το μέγεθος και το δυναμικό της ΦΒ συστοιχίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η συστοιχία, τόσο περισσότερο είναι το όφελος που θα αποκομίσουμε από την χρήση της λειτουργίας ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Τα μεγέθη όμως αυτού του τύπου ρυθμιστών είναι περιορισμένα για κάθε δυναμικό το οποίο προορίζονται.
- 2)** Από την απόσταση μεταξύ των ΦΒ βαθμίδων και της μπαταρίας. Σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων έχουμε όφελος από μια υψηλή τιμή δυναμικού. Το μέγεθος του καλωδίου μπορεί να μειωθεί κατά δυο μεγέθη, κάτι που κάνει την εγκατάσταση ευκολότερη και λιγότερο ακριβή.
- 3)** Οι ρυθμιστές με δυνατότητα μόνο PWM είναι φθηνότεροι από αυτούς με την λειτουργία ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Παρ' όλα αυτά όμως η υψηλότερη απόδοση τους των δεύτερων αντισταθμίζει το κόστος τους.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ακόμα μία φορά ότι όταν το μέγεθος του συστήματος το επιτρέπει, είναι καλύτερη η χρήση ρυθμιστών με λειτουργία ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος, γιατί αυξάνουν την παραγωγή ισχύος και δίνουν την δυνατότητα μείωσης της διατομής των καλωδίων τροφοδοσίας που θα χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση.

Η διαχείριση της ενεργειακής ισορροπίας μέσα στο αυτόνομο ΦΒ σύστημα επιτυγχάνεται με ηλεκτρονική ρύθμιση (δηλαδή μέσω ενός ρυθμιστή φόρτισης). **Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι η διάταξη εκείνη που από τη μια μεριά εκτελεί απλά τη διαδικασία on-off**, δηλαδή προστατεύει τις μπαταρίες από ενδεχόμενη υπερφόρτιση από τη ΦΒ γεννήτρια (δηλαδή αποσυνδέει τη ΦΒ γεννήτρια από τη μπαταρία) ή από ενδεχόμενη υπέρ-εκφόρτιση σε κάποιο φορτίο Σ.Ρ (δηλαδή αποσυνδέει τα φορτία Σ.Ρ από τη μπαταρία). Ο ρυθμιστής φόρτισης που έχει μόνο αυτές τις δύο λειτουργίες καλείται ρυθμιστής φόρτισης on-off και ελέγχοντας συνεχώς την τάση των συσσωρευτών συνδέει αυτούς ή τους αποσυνδέει από τη ΦΒ γεννήτρια και το φορτίο.

Πέραν αυτών των δύο λειτουργιών όταν οι μπαταρίες λειτουργούν μεταξύ υπερφόρτισης και υπέρ-εκφόρτισης, τότε είτε λειτουργεί ως απλός διακοπτικός μετατροπέας συνεχούς τάσης (ο ρυθμιστής φόρτισης είναι ένας απλός DC-DC Converter) φορτίζοντας απλά τη μπαταρία με

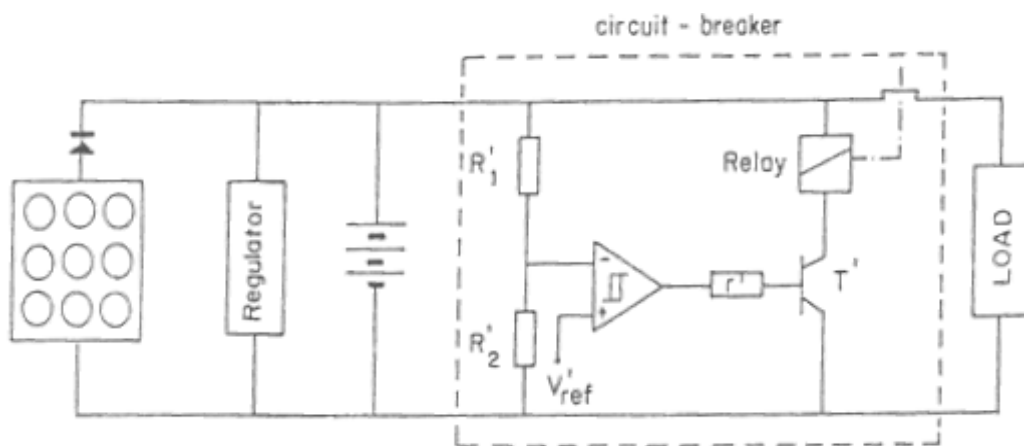
την τάση φόρτισής της, είτε αλλάζει και τη σχετική θέση της χαρακτηριστικής ενός φορτίου (π.χ. μπαταρίας) με τη γραμμή μέγιστης ισχύος κάνοντας έτσι το φορτίο να εκμεταλλευτεί όσο το δυνατόν περισσότερο τη ΦΒ γεννήτρια (ο ρυθμιστής φόρτισης είναι ένας MPP Tracker).

Πιο αναλυτικά η λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης είναι:

1) Αποσύνδεση της μπαταρίας από το φορτίο Σ.Ρ. σε περιπτώσεις υπέρ-εκφόρτισης (απλός on-off ρυθμιστής φόρτισης).

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που η τάση των συσσωρευτών είναι μικρότερη από την τάση V_{min} , που αντιστοιχεί στην τάση υπέρ-εκφόρτισης τους. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ασθενής, όταν εμφανίζεται βλάβη στη ΦΒ γεννήτρια, ή όταν η κατανάλωση στο φορτίο είναι πολύ μεγάλη. Στις περιπτώσεις αυτές οι συσσωρευτές πρέπει να αποσυνδεθούν από το φορτίο γιατί η υπέρ-εκφόρτιση μπορεί να τους καταστρέψει. Οι συσσωρευτές πρέπει να επανασυνδεθούν με το φορτίο όταν επαναφορτιστούν και η τάση τους ξεπεράσει την V_{min} .

Ένας ρυθμιστής φόρτισης τύπου on-off εικονίζεται στο Σχήμα 4.3.1.5 όπου μέσα στο ορθογώνιο με τη διακεκομμένη γραμμή φαίνεται το υποσύστημα αυτομάτου ανοίγματος του κυκλώματος που εκτελεί ακριβώς αυτή την αποσύνδεση της μπαταρίας από το φορτίο Σ.Ρ. σε περιπτώσεις υπέρ-εκφόρτισης της. Στο υποσύστημα αυτό υπάρχει ένας ηλεκτρονόμος (ρελαί). Το σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου του ηλεκτρονόμου είναι ένας συγκριτής με διπλό κατώφλι. Η έξοδος του συγκριτή είναι 'υψηλή' όταν η $V_+ = V_{ref} = V_{min}$ είναι μεγαλύτερη της V_- που κατά προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ίση με την τάση της μπαταρίας ($V_{bat} = V_-$), και παραμένει στην κατάσταση αυτή όσο η $V_+ = V_{ref} = V_{min}$ είναι μεγαλύτερη της $V_{bat} - H$. Η υστέρηση H είναι η διαφορά μεταξύ των δύο οριακών επιπέδων της σύγκρισης. Το κατώφλι είναι διαφορετικό εάν η V_- αυξάνει ή ελαττώνεται.



Σχήμα 4.3.1.5: Υποσύστημα αυτομάτου ανοίγματος κυκλώματος

Η λειτουργία του υποσυστήματος αυτομάτου ανοίγματος του κυκλώματος, θεωρώντας ότι αρχικά το ρελαί είναι κλειστό, είναι η εξής:

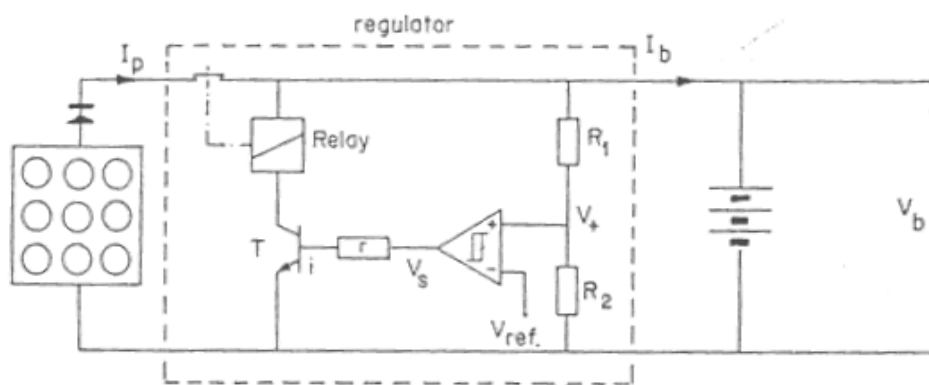
- 1) Εάν $V_- > V_{ref}$ τότε $V_s=0$ και $I_s=0$ οπότε το Transistor (τρανζίστορ) δεν άγει και το ρελαί παραμένει κλειστό.
- 2) Εάν $V_- < V_{ref}$ τότε $V_s>0$ και $I_s>0$ οπότε το Transistor άγει και το ρελαί ανοίγει ώστε να μην εκφορτιστούν πλήρως οι μπαταρίες.
- 3) Από τη στιγμή που το ρελαί ανοίξει θα πρέπει $V_- > (V_{ref} + H)$ ώστε $V_s=0$ και $I_s=0$ και το ρελαί να κλείσει.

2) Αποσύνδεση της ΦΒ γεννήτριας από τη μπαταρία σε περιπτώσεις υπερφόρτισης (απλός ρυθμιστής φόρτισης on-off).

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που η τάση των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη από την τάση V_{max} , που αντιστοιχεί στην τάση υπερφόρτισής τους. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ισχυρή και όταν η κατανάλωση στο φορτίο είναι πολύ μικρή. Στις περιπτώσεις αυτές οι συσσωρευτές πρέπει να αποσυνδεθούν από τη ΦΒ γεννήτρια γιατί η υπερφόρτιση μπορεί να τους καταστρέψει. Οι συσσωρευτές πρέπει να επανασυνδεθούν στη ΦΒ γεννήτρια όταν εκφορτιστούν και η τάση τους γίνει μικρότερη της V_{max} . Τη λειτουργία αυτή την κάνει στην απλούστερη περίπτωση ένας ρυθμιστής φόρτισης on-off που μπορεί να ανήκει σε μια από τις ακόλουθες κατηγορίες:

A) Ρυθμιστής σε σειρά με ηλεκτρονόμο.

Το υποσύστημα ρύθμισης με ηλεκτρονόμο φαίνεται στο Σχήμα 4.3.1.6 μέσα στο ορθογώνιο με τη διακεκομμένη γραμμή. Η λειτουργία του υποσυστήματος αυτού είναι ίδια με τη λειτουργία του υποσυστήματος αυτομάτου ανοίγματος του κυκλώματος μόνο που τώρα η όλη διάταξη χρησιμοποιείται για την προστασία της μπαταρίας από υπερφόρτιση.



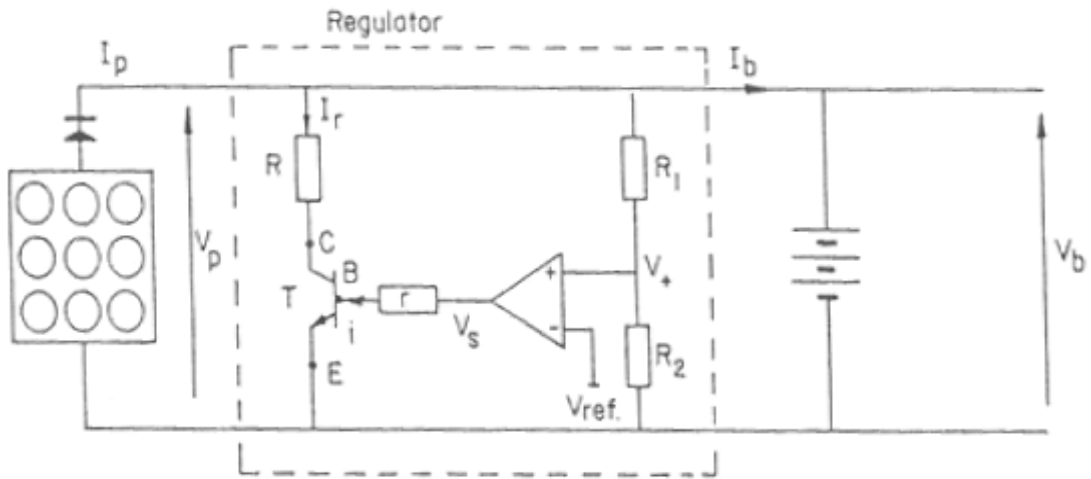
Σχήμα 4.3.1.6: Ο Ρυθμιστής σε σειρά με ηλεκτρονόμο

Η έξοδος του συγκριτή στην περίπτωση αυτή είναι 'υψηλή' όταν $V_+ > V_{ref}$ (όπου $V_{ref} = V_- = V_{max}$) και παραμένει στην κατάσταση αυτή όσο η V_+ είναι μεγαλύτερη από την $V_{ref} - H$. Η λειτουργία του υποσυστήματος ρύθμισης με ηλεκτρονόμο, θεωρώντας ότι αρχικά το ρελαί είναι κλειστό, είναι η εξής:

- 1) Εάν $V_+ < V_{ref}$ τότε $V_s=0$ και $I_s=0$ οπότε το Transistor δεν άγει και το ρελαί παραμένει κλειστό επιτρέποντας στη μπαταρία να φορτίζεται μιας και είναι αφόρτιστη.
- 2) Εάν $V_+ > V_{ref}$ τότε $V_s > 0$ και $I_s > 0$ οπότε το Transistor άγει και το ρελαί ανοίγει έτσι ώστε η μπαταρία να σταματήσει να φορτίζεται.
- 3) Από τη στιγμή που το ρελαί ανοίξει θα πρέπει $V_+ < (V_{ref} - H)$ ώστε $V_s=0$ και $I_s=0$ και το ρελαί να κλείσει.

B) Παράλληλος ρυθμιστής (Shunt Controller).

Το υποσύστημα ρύθμισης φαίνεται στο Σχήμα 4.3.1.7 μέσα στο ορθογώνιο με τη διακεκομμένη γραμμή και παίρνει το όνομά του επειδή συνδέεται παράλληλα με τη ΦΒ γεννήτρια και τους συσσωρευτές. Η ΦΒ γεννήτρια συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος το ρεύμα I_p της οποίας είναι ανάλογο με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.



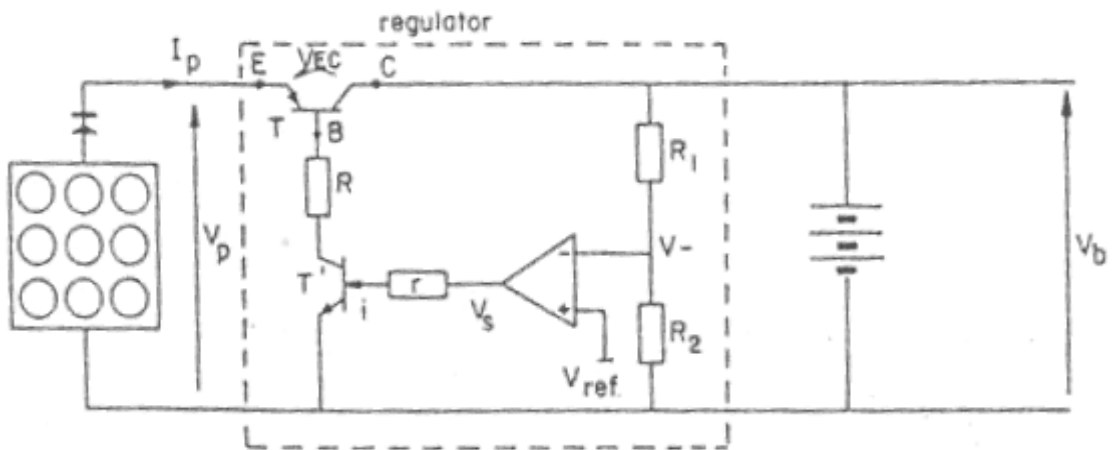
Σχήμα 4.3.1.7: Ο Παράλληλος ρυθμιστής

Αν η τάση των συσσωρευτών $V_B = V_+$ είναι μικρότερη από τη $V_{max} = V_{ref} = V_-$, που αντιστοιχεί στην κατάσταση υπερφόρτισης, τότε $V_+ < V_{ref}$ και επομένως $V_s = 0$ και $I_s = 0$. Το transistor T βρίσκεται στην περιοχή της αποκοπής και $I_r = 0$. Στην περίπτωση αυτή το κύκλωμα ρύθμισης δεν καταναλώνει ισχύ και δεν υπάρχει πτώση τάσης. Συνεπώς όλο το ρεύμα της ΦΒ γεννήτριας πάει στο συσσωρευτή και η τάση του $V_B = V_+$ αυξάνει.

Στην περίπτωση όμως που η τάση των συσσωρευτών $V_B = V_+$ είναι μεγαλύτερη από την $V_{max} = V_{ref} = V_-$, τότε $V_+ > V_{ref}$ και επομένως $V_s > 0$ και $I_s > 0$. Το transistor T άγει και $I_r > 0$, οπότε $I_p = I_r + I_B$. Η παρουσία του ρεύματος I_r περιορίζει το ρεύμα I_p και την τάση $V_B = V_+$ και επομένως και το ρυθμό φόρτισης των συσσωρευτών. Η επιπλέον ενέργεια καταναλίσκεται στην αντίσταση R και στο transistor T.

Γ) Ρυθμιστής σειράς (Series Controller).

Το υποσύστημα ρύθμισης φαίνεται στο Σχήμα 4.3.1.8 μέσα στο ορθογώνιο με τη διακεκομμένη γραμμή και παίρνει το όνομά του επειδή υπάρχει ένα transistor που τοποθετείται σε σειρά με τη ΦΒ γεννήτρια και τους συσσωρευτές. Η ΦΒ γεννήτρια συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, το ρεύμα I_p της οποίας είναι ανάλογο με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. **Το transistor σε σειρά συμπεριφέρεται ως μεταβλητή αντίσταση της οποίας η τιμή είναι συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών.**



Σχήμα 4.3.1.8: Ο Ρυθμιστής σειράς

Στην περίπτωση που η τάση των συσσωρευτών $V^- = V_B$ είναι μικρότερη από την τάση $V_{ref} = V^+ = V_{max}$ που αντιστοιχεί στην υπερφόρτιση, τότε $V^- < V_{ref}$ οπότε $V_s > 0$, $I > 0$ και $i_B > 0$. Άρα το transistor T βρίσκεται στον κορεσμό και το ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών είναι το μεγαλύτερο δυνατό. Βέβαια υπάρχει μια πτώση τάσης V_{EC} και ένα ρεύμα I_B που καταναλώνεται στο κύκλωμα της ρύθμισης.

Στην περίπτωση που η τάση των συσσωρευτών $V^- = V_B$ είναι μεγαλύτερη από την τάση $V_{ref} = V^+ = V_{max}$ που αντιστοιχεί στην υπερφόρτιση, τότε $V^- > V_{ref}$ οπότε $V_s = 0$, $I = 0$ και $i_B = 0$. Άρα το transistor T δεν άγει και $I_p = 0$. Δηλαδή το transistor συμπεριφέρεται ως μια αντίσταση $R = V_{EC} / I_p$ της οποίας η τιμή αυξάνει με την αύξηση του φορτίου των συσσωρευτών.

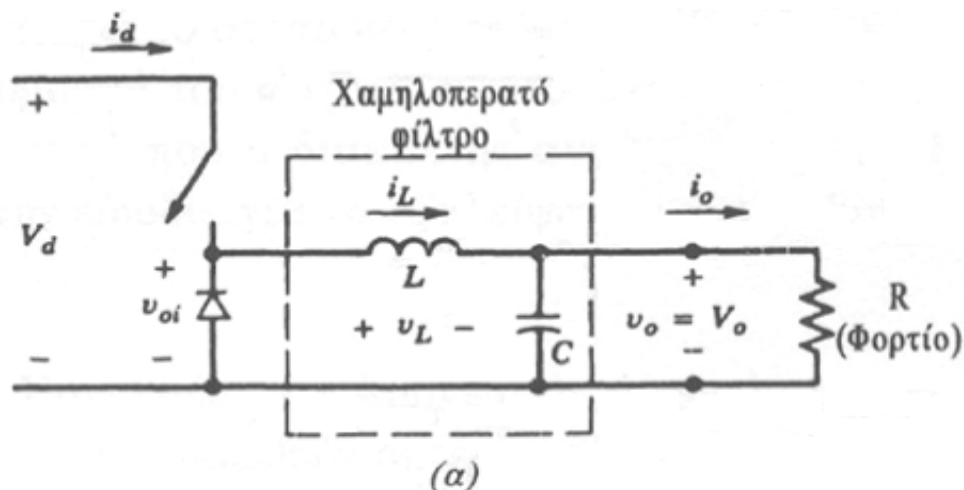
3) Ομαλή φόρτιση της μπαταρίας με τάση ίση με την τάση φόρτισής της εκτελώντας την λειτουργία ενός απλού διακοπτικού μετατροπέα συνεχούς τάσης.

Η λειτουργία αυτή επιτελείται όταν η τάση των συσσωρευτών μεταβάλλεται ανάμεσα στα όρια μέγιστης και ελάχιστης τάσης, που αντιστοιχούν στο όριο υπερφόρτισης και υπέρ-εκφόρτισής της. Στην κατάσταση αυτή το σύστημα ρυθμίζεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ τη νύχτα μια προστατευτική δίοδος (που είναι ενσωματωμένη στο ρυθμιστή φόρτισης) αποτρέπει την εκφόρτιση των συσσωρευτών πάνω στη ΦΒ γεννήτρια. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς τάσης που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή, της συνεχούς αλλά μεταβαλλόμενης τιμής τάσης που παράγεται από τη ΦΒ γεννήτρια, σε συνεχή τάση σταθερής τιμής ίση με την τάση φόρτισης της μπαταρίας, είναι :

A) Ο ρυθμιστής μείωσης τάσης (Step-down ή Buck dc-dc converter).

Όπως υποδηλώνει το όνομά του, ο μετατροπέας αυτός παράγει μια μέση dc τάση εξόδου V_{out} χαμηλότερη από τη dc τάση εισόδου V_{in} . Το βασικό κύκλωμα ενός τέτοιου ρυθμιστή φαίνεται στο Σχήμα 4.3.1.9 όπου οι διακόπτες θεωρούνται ιδανικοί και οι απώλειες στα επαγωγικά και χωρητικά στοιχεία αγνοούνται.

Ένα μικρό φίλτρο στη βαθμίδα εξόδου θεωρείται αναπόσπαστο μέρος του dc-dc μετατροπέα. Η έξοδος θεωρείται ότι τροφοδοτεί ένα φορτίο (στην προκειμένη περίπτωση μπαταρία) που μπορεί να παρασταθεί με μια ισοδύναμη αντίσταση, ενώ στην περίπτωση που το φορτίο είναι ένας κινητήρας dc αυτός μπορεί να παρασταθεί με μια dc τάση σε σειρά με την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του τυλίγματος του κινητήρα.



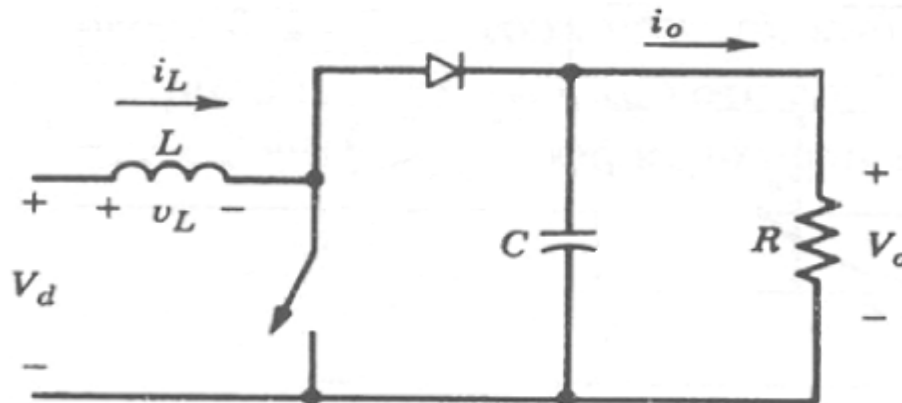
Σχήμα 4.3.1.9: Ο ρυθμιστής μείωσης τάσης

Το κύκλωμα λειτουργεί με τον εξής τρόπο: Ένα transistor Q_1 χρησιμοποιείται ως διακόπτης που μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση ON και OFF ελεγχόμενο από ένα διαμορφωτή εύρους παλμών (PWM). Όταν το Q_1 είναι σε κατάσταση ON (βραχυκυκλωμένο) παρέχεται ισχύς από την $V_d = V_{in}$ και εφαρμόζεται στο φορτίο R μέσω του πηνίου L . Η V_A (που είναι η τάση στον κόμβο μεταξύ του διακόπτη και της διόδου) είναι προσεγγιστικά όσο η V_{in} , η διόδος D_1 (δίοδος ελεύθερης διέλευσης ή προστασίας) είναι ανάστροφα πολωμένη και ο πυκνωτής C φορτίζεται.

Όταν το transistor Q_1 γίνει OFF, η αυτεπαγωγή L αναγκάζει το δυναμικό V_A να γίνει αρνητικό προκειμένου να διατηρήσει τη ροή του ρεύματος σε αυτό, η διόδος D_1 θα αρχίσει να άγει και το ρεύμα του φορτίου θα άγει διαμέσου της διόδου και της αυτεπαγωγής. Η τάση V_A εξομαλύνεται με τη βοήθεια του φίλτρου L και C παρέχοντας έτσι στην έξοδο μια καθαρή dc τάση. Στην ανάλυση κατά τη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, που παρουσιάστηκε εδώ, ο πυκνωτής εξομάλυνσης C θεωρείται πολύ μεγάλος, όπως συμβαίνει συνήθως σε εφαρμογές που απαιτούν μια σχεδόν σταθερή στιγμιαία τάση εξόδου V_{out} .

B) Ο ρυθμιστής αύξησης τάσης (Step-up ή Boost dc-dc Converter)

Στο Σχήμα 4.3.1.10 δίνεται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης dc-dc, όπου όπως υποδηλώνει το όνομά του η τάση εξόδου του είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου του. Και σε αυτή την περίπτωση οι διακόπτες θεωρούνται ιδανικοί και οι απώλειες στα επαγωγικά και χωρητικά στοιχεία αγνοούνται, ενώ στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας ο πυκνωτής εξομάλυνσης θεωρείται πολύ μεγάλος, ώστε να εξασφαλίζει μια σταθερή τάση εξόδου.



Σχήμα 4.3.1.10: Ο ρυθμιστής αύξησης τάσης

Το κύκλωμα λειτουργεί με τον εξής τρόπο: Καταρχήν το Transistor Q_1 (διακόπτης) χρησιμοποιείται για την εναλλακτική εφαρμογή της τάσης V_{in} διαμέσου της αυτεπαγωγής L . Κατά τη διάρκεια του χρόνου t_{on} το Transistor Q_1 είναι σε κατάσταση ON και εξαιτίας της τάσης V_{in} αποθηκεύεται ενέργεια στην αυτεπαγωγή L . Η διόδος D_1 είναι πολωμένη ανάστροφα και το φορτίο R διαρρέεται από το ρεύμα I_o που οφείλεται στο αποθηκευμένο φορτίο στον πυκνωτή C . Όταν το Transistor Q_1 ανοίγει κατά τη διάρκεια του χρόνου t_{off} , η τάση V_1 (η τάση στον κόμβο μεταξύ του πηνίου και του διακόπτη) αυξάνεται θετικά και αρχίζει να άγει η διόδος D . Το φορτίο τώρα τροφοδοτείται με το ρεύμα εξόδου διαμέσου των L και D και αποκαθίσταται οποιαδήποτε απώλεια φορτίου στον πυκνωτή C η οποία συνέβη κατά τη διάρκεια του χρόνου t_{on} .

Εδώ, όπως και στον ρυθμιστή μείωσης, το ρεύμα διαμέσου της L έχει μια συνιστώσα dc συν κάποια κυμάτωση ΔI_L . Το ΔI_L επιλέγεται και πάλι ίσο περίπου με το 40% του I_L .

Για την κυμάτωση ΔI_L ισχύει :

$$\Delta I_L = \frac{V_L * T}{L}$$

Από όπου προκύπτουν: $\Delta I_L^+ = \frac{V_{IN} * t_{ON}}{L}$ και $\Delta I_L^- = \frac{(V_{OUT} - V_{IN}) * t_{OFF}}{L}$

Εφόσον είναι $\Delta I_L^+ = \Delta I_L^-$ τότε θεωρώντας ως αμελητέα τα V_{SAT} και V_D η τάση εξόδου V_{out} θα είναι :

$$V_{out} = V_{in} * \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}}\right) = V_{in} * \frac{1}{1-D}$$

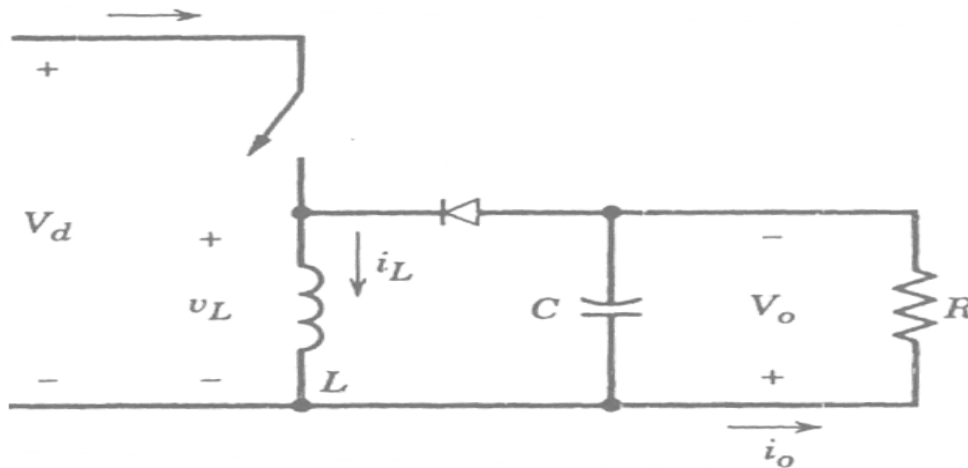
όπου $D = t_{on} / T$ ενώ το ρεύμα I_{out} θα είναι : $I_{in} = I_{out} * \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}}\right)$

Το ρεύμα εισόδου ή της αυτεπαγωγής είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα εξόδου ως προς τον όρο $\left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}}\right)$. Εφόσον αυτός ο παράγοντας είναι ο ίδιος με τον παράγοντα που υπάρχει στη σχέση

μεταξύ της τάσης V_{out} και V_{in} , το ρεύμα I_{in} μπορεί να εκφραστεί επίσης ως εξής: $I_{in} = I_{out} * \frac{V_{out}}{V_{in}}$

Γ) Ο ρυθμιστής αντιστροφής τάσης – Μικτός μετατροπέας DC-DC (Step-up/down ή Boost-buck dc-dc Converter)

Ένας μικτός μετατροπέας dc-dc μπορεί να σχηματιστεί με την εν σειρά σύνδεση των δύο βασικών μετατροπέων dc-dc δηλαδή του μετατροπέα υποβιβασμού και του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Το βασικό του κύκλωμα φαίνεται στη Σχήμα 4.3.1.11.



Σχήμα 4.3.1.11: Ο ρυθμιστής αντιστροφής τάσης

Με το μετατροπέα αυτό μπορεί να επιτευχθεί μια έξοδος με αρνητική πολικότητα σε σχέση με την τάση εισόδου και μια τάση εξόδου που μπορεί να είναι είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη από την τάση εισόδου. Στην ανάλυση της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας που θα δοθεί παρακάτω ο πυκνωτής εξόδου θεωρείται πολύ μεγάλος, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να είναι σταθερή.

Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης (το Transistor που παίζει το ρόλο του διακόπτη άγει) η αυτεπαγωγή L τροφοδοτείται μόνο από την τάση $V_d = V_{in}$ και αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτήν, ενώ η δίοδος D βρίσκεται σε αποκοπή. Η είσοδος δεν δημιουργεί ρεύμα εξόδου κατά τη διάρκεια του χρόνου t_{on} και έτσι το ρεύμα φορτίου περιορίζεται από το ρεύμα κορυφής. Κατά τη διάρκεια του χρόνου t_{off} (το Transistor δεν άγει) αντιστρέφεται η πολικότητα στα άκρα της αυτεπαγωγής εξαιτίας του αποθηκευμένου μαγνητικού πεδίου, η δίοδος D πολώνεται ορθά και ο πυκνωτής C διαρρέεται από το ρεύμα I_c . Έτσι μια τάση εξόδου με αντίθετη πολικότητα από την πολικότητα της τάσης εισόδου εμφανίζεται στην έξοδο.

Με παρόμοιο τρόπο με τους μετατροπέις υποβιβασμού και ανύψωσης της τάσης ισχύουν:

$$\Delta L_L^+ = \frac{V_{in} * t_{on}}{L} \quad \text{και} \quad \Delta L_L^- = \frac{V_{OUT} * t_{off}}{L}$$

Εφόσον είναι $\Delta I_L^+ = \Delta I_L^-$ τότε θεωρώντας ως αμελητέα τα V_{SAT} και V_{D1} η τάση εξόδου V_{out} θα είναι :

$$\frac{V_0}{V_{in}} = D * \frac{1}{1-D} \quad \text{και} \quad \frac{I_0}{I_{in}} = \frac{1-D}{D}$$

Ανάλογα με την τιμή του λόγου $D = t_{on} / T$, η τάση εξόδου μπορεί να είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από την τάση εισόδου.

4) Λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης στο Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPP Tracker)

Το συνολικό κόστος μιας ΦΒ γεννήτριας είναι ακόμα σχετικά υψηλό. Επιπλέον, η χαρακτηριστική P-V της ΦΒ γεννήτριας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από δύο περιβαλλοντικούς παράγοντες: την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Έτσι οι διάφορες αλλαγές αυτών των δύο παραμέτρων αποφέρουν αλυσιδωτές αλλαγές στη θέση του **Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPP)**. Για να επιτευχθεί βέλτιστη εκμετάλλευση της ΦΒ γεννήτριας είναι συνεπώς απαραίτητο να ρυθμίζεται συνεχώς το σημείο λειτουργίας της ώστε αυτό να προσεγγίζει όσο το δυνατόν το Σημείο Μέγιστης Ισχύος. Η παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP Tracking) είναι δηλαδή μια τεχνική ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία των ΦΒ στοιχείων και κατά επέκταση της ΦΒ γεννήτριας. Γενικά υπάρχουν τέσσερις τρόποι για να αυξηθεί η ισχύς που προέρχεται από μια ΦΒ γεννήτρια:

α) να αυξηθεί η απόδοση των ΦΒ στοιχείων (αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει ως σήμερα για τη βελτίωση των υλικών και του τρόπου κατασκευής των ΦΒ στοιχείων πράγμα που συνήθως όμως οδηγεί σε αύξηση του κόστους τους),

β) να προστεθούν περισσότερα ΦΒ πλαίσια στη ΦΒ συστοιχία (γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης επιφάνειας πάνω στην οποία θα εγκατασταθεί η ΦΒ γεννήτρια και φυσικά σε αύξηση του κόστους της),

γ) να αυξηθεί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στη ΦΒ γεννήτρια (αυτό γίνεται είτε χρησιμοποιώντας δαπανηρές συσκευές παρακολούθησης της θέσης του ηλίου είτε αναταξινομώντας τη διάταξη των ΦΒ στοιχείων στις ΦΒ συστοιχίες ανάλογα με τις αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες) και

δ) να γίνει προσπάθεια ώστε η υπάρχουσα ΦΒ γεννήτρια να λειτουργεί συνεχώς στο σημείο με τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση. Η συσκευή η οποία επιτυγχάνει αυτό το στόχο είναι ένας ρυθμιστής φόρτισης ο οποίος καλείται **MPP Tracker**. Αρκετές τεχνικές σχεδιασμού διατάξεων MPP Tracking έχουν προταθεί, αναλυθεί και υλοποιηθεί ως σήμερα. Αυτές περιλαμβάνουν και αναλογικούς και ψηφιακούς αλγόριθμους.

Συμπερασματικά για τον ρυθμιστή φόρτισης.

Ο έλεγχος της φόρτισης μιας μπαταρίας είναι τόσο σημαντικός που οι περισσότεροι κατασκευαστές ηλεκτρικών στοιχείων υψηλής ποιότητας(με εγγύηση πέντε χρόνων και πάνω) καθορίζουν για τις μπαταρίες τους τις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν ως προς την διαδικασία για την ρύθμιση του δυναμικού τους. Δηλαδή το πότε πρέπει να γίνει διακοπή λόγω χαμηλού δυναμικού και το πώς θα γίνει η αντιστάθμιση θερμοκρασίας.

Όταν αυτά τα όρια δεν είναι σεβαστά, είναι σίγουρο ότι το προβλεπόμενο χρονικό διάστημα καλής λειτουργίας της μπαταρίας θα μειωθεί κατά τρία τέταρτα του αρχικού, ανεξάρτητα από την ποιότητα κατασκευής της και από το κόστος της. Ένας καλός ρυθμιστής φόρτισης δεν είναι ακριβός σε σχέση με το κόστος ενός συστήματος παραγωγής ισχύος.

4.3.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος

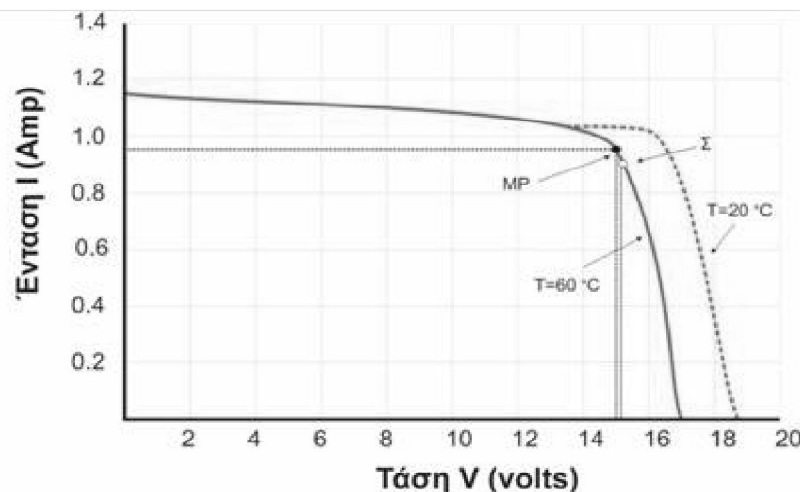
Οι μετατροπείς ισχύος επιτελούν τον πιο σημαντικό και πολύπλοκο έλεγχο στο μικροδίκτυο όπως και σε όλες σχεδόν τις διατάξεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Μέσω αυτών, η παραγόμενη τάση από ΑΠΕ, μετατρέπεται είτε σε συνεχή (DC) άλλης στάθμης είτε σε εναλλασσόμενη (AC) ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας. Μια διαφορετική μέθοδος θα ήταν η τροφοδότηση με τη συνεχή τάση κινητήρων συνεχούς ρεύματος οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Η διάταξη αυτή δεν χρησιμοποιείται τόσο λόγω των μεγάλων απωλειών όσο και λόγω κόστους. Γεγονός είναι ότι χωρίς τα ηλεκτρονικά ισχύος θα ήταν πολύ δύσκολος ο έλεγχος όλων των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μετατροπείς ισχύος χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Μετατροπείς AC/DC (ανορθωτές)
- Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC
- Αντιστροφείς DC/AC

Μιλώντας γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι όλες οι διατάξεις ΑΠΕ χρησιμοποιούν τις ίδιες βασικές διατάξεις και αρχές λειτουργίας. Οι βασικοί τύποι μετατροπέων που εξετάζουμε είναι ο μετατροπέας DC/DC, και ο αντιστροφέας DC/AC. Πυρήνας των διατάξεων αυτών είναι τα τρανζίστορ ισχύος, τα οποία μέσω των διακοπτικών τους ιδιοτήτων αναλαμβάνουν την μετατροπή της τάσης. Οι σύγχρονες διατάξεις χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον τρανζίστορ τύπου IGBT.

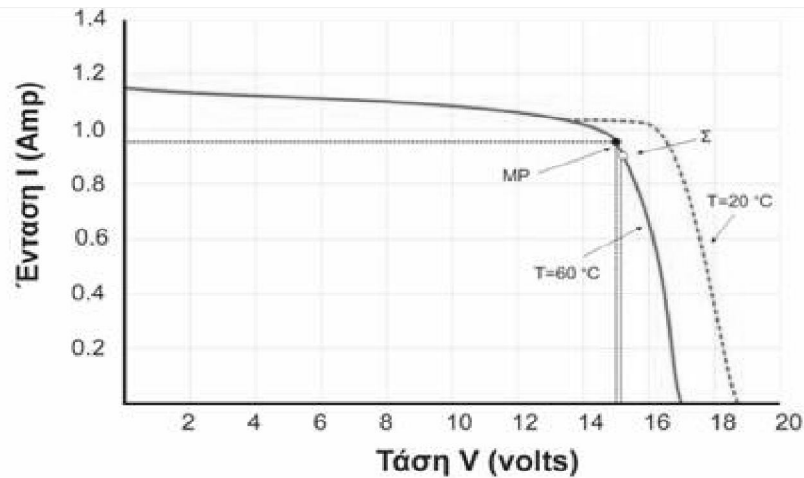
Η καλή λειτουργία και αυξημένη απόδοση των ΦΒ συστημάτων υποβοηθείται συχνά με την χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων, συνήθως ηλεκτρονικών ισχύος, που επεξεργάζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η ΦΒ γεννήτρια. Στο Σχήμα 4.3.2.12 δείχνεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - έντασης ενός ΦΒ πλαισίου του εμπορίου όταν τα ηλιακά στοιχεία του έχουν θερμοκρασία 60°C (δηλαδή η θερμοκρασία περιβάλλοντος περίπου 30 °C).



Σχήμα 4.3.2.12: Παράδειγμα της καμπύλης τάσης (V) – έντασης (I) ενός Φβ πλαισίου του εμπορίου στη θερμοκρασία 60°C (συνεχής γραμμή) και στη συμβατική θερμοκρασία 20°C (ασυνεχής γραμμή) και επιλογή του κατάλληλου σημείου της Σ για τη φόρτιση κοινών συσσωρευτών 12V που είναι όμως διαφορετικό από το ΣMI - MP.

Για την φόρτιση συσσωρευτών 12V, στους οποίους όπως είδαμε η κατάλληλη τάση φόρτισης είναι 15.15V, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παράλληλα ή σε σειρά με το ΦΒ πλαίσιο, ένας ρυθμιστής τάσης που διατηρεί την τάση εξόδου του ΦΒ πλαισίου στην επιθυμητή τιμή. Επίσης, η τάση φόρτισης των συσσωρευτών μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί εντελώς από την τάση εξόδου της ΦΒ γεννήτριας με την παρεμβολή ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος.

Ο μετατροπέας αυτός παραλαμβάνει την τάση που δίνει η ΦΒ γεννήτριας που είναι αναγκαστικά ασταθής λόγω των διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας την μετατρέπει στην ευνοϊκή τάση για την φόρτιση των συσσωρευτών και την σταθεροποιεί ώστε να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες συνθήκες φόρτισης (Σχήμα 4.3.2.13).



Σχήμα 4.3.2.13: Απλοποιημένα διαγράμματα ενός ΦΒ συστήματος (Α) χωρίς ρυθμιστή τάσης (Β) με ρυθμιστή για τη φόρτιση των συσσωρευτών στη βέλτιστη τάση. Και στις δυο περιπτώσεις προβλέπεται η τοποθέτηση μιας προστατευτικής διόδου για την αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών διαμέσου της ΦΒ γεννήτριας, αν μειωθεί σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν οι συσσωρευτές του συστήματος φορτιστούν πλήρως, η περίσσεια του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στη ΦΒ γεννήτρια διοχετεύεται από τον ρυθμιστή προς κατάλληλες αντιστάσεις ή προς τη γη, και έτσι προστατεύονται οι συσσωρευτές από τους κινδύνους της υπερφόρτισης.

Εκτός από τον ρυθμιστή τάσης, τα ΦΒ συστήματα μπορούν να περιέχουν και άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως είναι οι ρυθμιστές ισχύος, γνωστοί με τη συντομογραφία MPPT (από την αγγλική έκφραση maximum power point trackers, δηλαδή διατάξεις παρακολούθησης του σημείου της μέγιστης ισχύος). Ο προορισμός τους είναι να επιδιώκουν τη λειτουργία της ΦΒ γεννήτριας στο σημείο της καμπύλης τάσης - έντασης που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση, όσο επιτρέπει ο συντελεστής πλήρωσης (FF). Στη συνέχεια, με τον μετατροπέα τάσης, η τάση εξόδου της ΦΒ γεννήτριας μετατρέπεται στην απαιτούμενη για τη φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος. Πάντως, το κόστος των διατάξεων αυτών είναι σημαντικό, και έτσι, συνήθως παραλείπονται στα σχετικά μικρής ισχύος ΦΒ συστήματα.

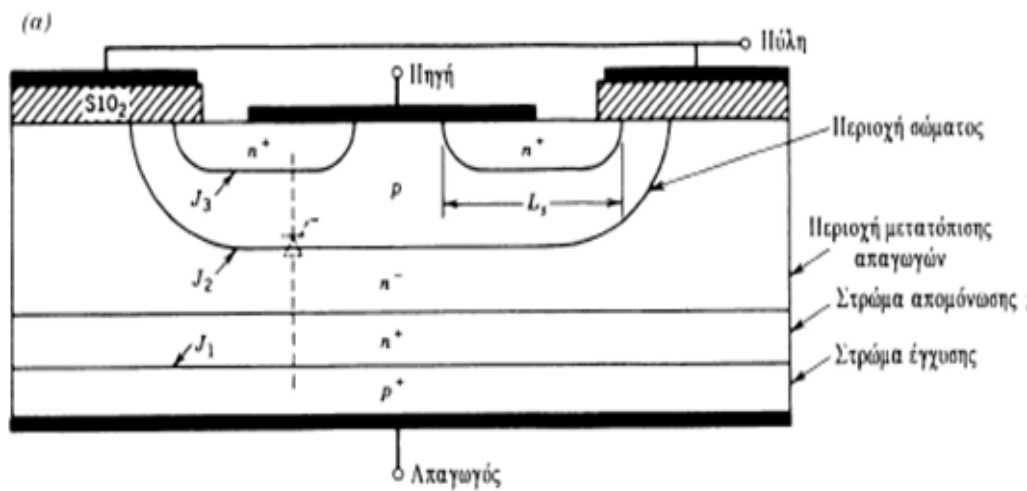
Τέλος, στην έξοδο των ΦΒ συστημάτων παρεμβάλλεται συχνά ένας αντιστροφέας, που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της ΦΒ γεννήτριας και των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενο, αν αυτό εξυπηρετεί καλύτερα το δίκτυο της τοπικής κατανάλωσης. Κύρια κίνητρα για την προτίμηση της εναλλασσόμενης τάσης, και την τοποθέτηση μεταλλακτών και μετασχηματιστών, είναι ότι οι ηλεκτρικές συσκευές του εμπορίου είναι συνήθως κατασκευασμένες για εναλλασσόμενο ρεύμα και έχουν μικρότερο κόστος από τις αντίστοιχες του συνεχούς ρεύματος. Επίσης, η ανύψωση της τάσης, που γίνεται συγχρόνως με τη μετατροπή της από συνεχή σε εναλλασσόμενη, συνεπάγεται μείωση των απωλειών στους αγωγούς του δικτύου. Σημειώνεται πάντως, ότι η λειτουργία των παραπάνω διατάξεων συνοδεύεται με συχνά αξιόλογες απώλειες. Π.χ. ο συντελεστής απόδοσης των διαφόρων ηλεκτρονικών ισχύος που αναφέραμε είναι συνήθως περίπου 90 - 50%, εφόσον λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους ισχύ, αλλά γίνεται πολύ μικρότερος όταν η ισχύ είναι μειωμένη.

Παρεμβολές

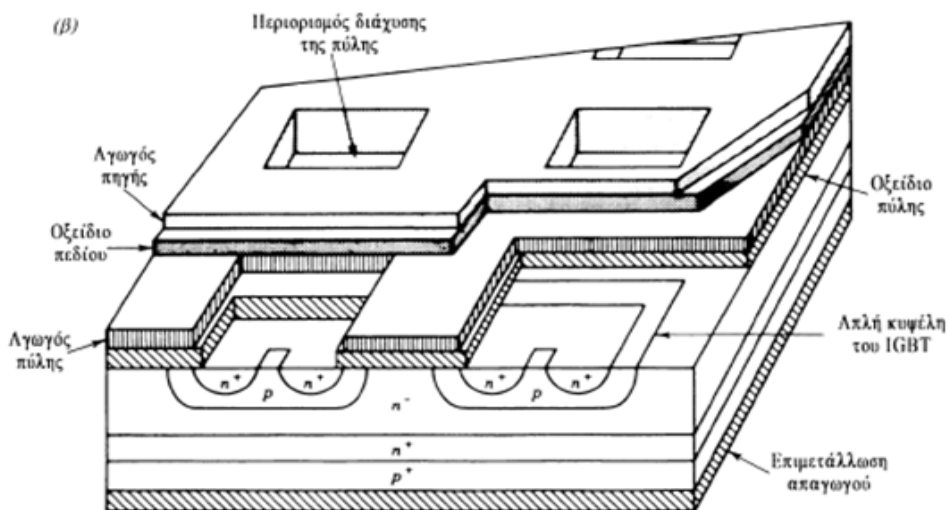
Το ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός inverter σε μερικές περιπτώσεις προκαλεί προβλήματα στους δέκτες των τηλεοράσεων και των ραδιοφώνων, θόρυβο στις τηλεφωνικές συνδιαλέξεις και σε ακουστικό εξοπλισμό. Οι μετατροπείς ημιτονοειδούς κυματομορφής προκαλούν το λιγότερο ποσό παρεμβολών. Οι παρεμβολές μπορούν να ελαχιστοποιηθούν τοποθετώντας τον μετατροπέα πολύ κοντά στις μπαταρίες και μακριά από συσκευές που δεν έχουν κατάλληλη θωράκιση. Όλοι οι μετατροπείς προκαλούν παρεμβολές στους δέκτες AM των ραδιοφώνων.

4.3.2.1 Διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBT)

Το βασικότερο στοιχείο μιας διάταξης μετατροπέα ή αντιστροφέα ισχύος είναι τα τρανζίστορ τα οποία χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της τάσης εισόδου από τις πηγές, είτε σε άλλης στάθμης συνεχή τιμή (DC/DC) είτε σε εναλλασσόμενη (DC/AC). Η μετατροπή αυτή στηρίζεται στις διακοπτικές ικανότητες των τρανζίστορ ισχύος. Διάφοροι τύποι τρανζίστορ χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Τα IGBT αποτελούν ένα συνδυασμό των MOSFET ισχύος και των διπολικών τρανζίστορ επαφής (BJT), δηλαδή τις ταχείες μεταβάσεις από την κατάσταση αποκοπής σε κατάσταση αγωγιμότητας των πρώτων και τις μικρές απώλειες κατά την αποκοπή μεγάλων τάσεων των δεύτερων.



(α) Κατακόρυφη τομή ενός IGBT

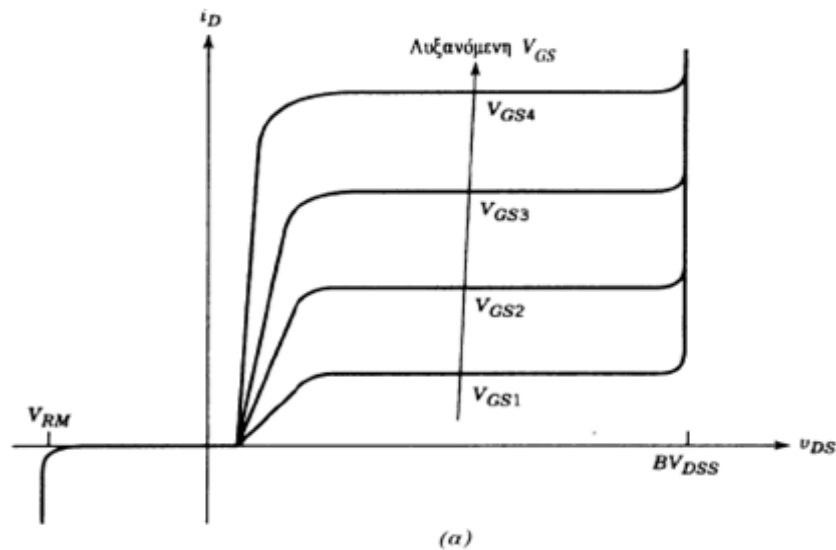


Σχήμα 4.3.2.1.14: (α) Κατακόρυφη τομή ενός IGBT και (β) προοπτική άποψη ενός IGBT

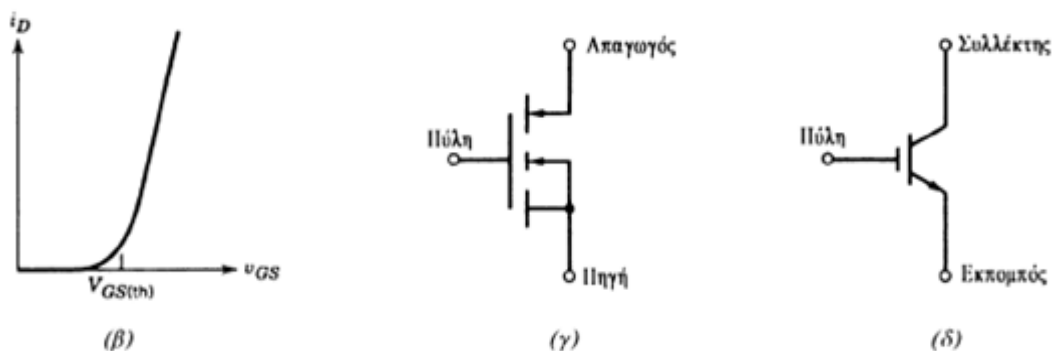
Τυπικοί χρόνοι μετάβασης από κατάσταση αποκοπής σε κατάσταση αγωγιμότητας είναι της τάξεως του 1μsec, ενώ για την μετάβαση αυτή δεν απαιτείται παρά μόνο μια μικρή τάση της τάξεως των 2-3Volt στην πύλη. Τα IGBT μπορούν να διαχειριστούν μεγάλες τάσεις και ρεύματα που σήμερα φτάνουν τα 1700volt και τα 1200A.

Στο IGBT ο έλεγχος της ροής ρεύματος μεταξύ πηγής (source) και απαγωγού (drain) γίνεται από την πύλη (gate). Ο ακροδέκτης της πηγής είναι κοινός μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Για την μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τα IGBT χρησιμοποιούνται ως διακόπτες, παράγοντας παλμούς τάσης μεταβλητής διάρκειας ώστε να σχηματιστεί στην έξοδο της γέφυρας η ημιτονοειδής κυματομορφή.

Στο σχήμα 4.3.2.1.15 φαίνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης καθώς και το κυκλωματικό σύμβολο του IGBT.



α)Χαρακτηριστική λειτουργίας I-V για IGBT τύπου -n



Σχήμα 4.3.2.1.15: Χαρακτηριστικές λειτουργίας IGBT. α)Χαρακτηριστική λειτουργίας I-V για IGBT τύπου -n, β) χαρακτηριστική μεταφοράς ρεύματος απαγωγού – τάσης πύλης(i_D - V_{gs}), γ), δ) κυκλωματικά σύμβολα IGBT καναλιού-n.

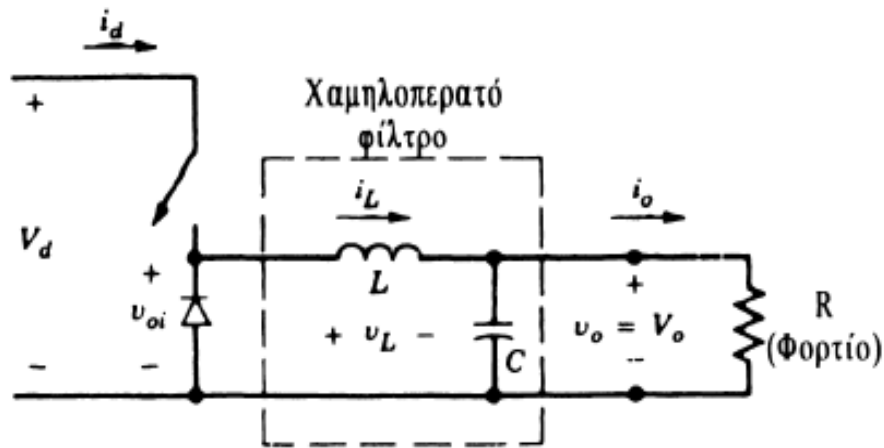
4.3.2.2 Επισκόπηση μετατροπών DC/DC

Οι μετατροπείς DC/DC χρησιμοποιούνται για την μετατροπή μιας μη σταθεροποιημένης τάσης συνεχούς ρεύματος σε μια ελεγχόμενη συνεχή τάση εξόδου. Ανάλογα με την σχέση των δύο αυτών τάσεων χωρίζονται σε:

- Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης
- Μετατροπείς ανύψωσης τάσης
- Μικτοί μετατροπείς (υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης)
- Μετατροπείς CUK
- Μετατροπείς πλήρους γέφυρας

Από τους τύπους αυτούς βασικοί είναι οι μετατροπείς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, ενώ οι υπόλοιποι αποτελούν συνδυασμό των δύο διατάξεων. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας προκύπτει από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

❖ Ένας **μετατροπέας υποβιβασμού τάσης**, όπως λέει και το όνομά του, μετατρέπει μια μη ελεγχόμενη DC τάση εισόδου σε ελεγχόμενη DC τάση εξόδου μικρότερης τιμής. Ένα απλοποιημένο κυκλωματικό του διάγραμμα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.2.2.16, αποτελείται από ένα διακόπτη, μία δίοδο, πηνίο και πυκνωτή. Όσο ο διακόπτης είναι κλειστός, η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό.



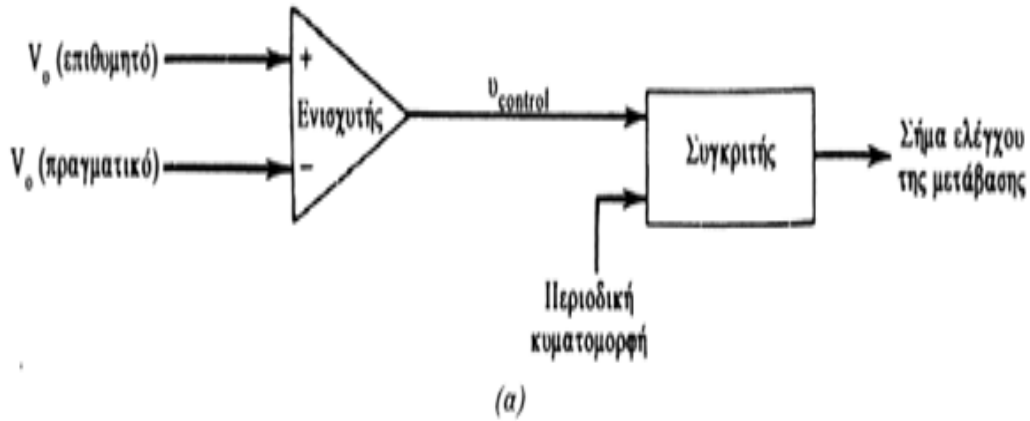
Σχήμα 4.3.2.2.16: Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης.

Ο χρόνος μέσα στον οποίο μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ο διακόπτης άγει προς το διάστημα αυτό είναι αυτό που καθορίζει και τη μέση τιμή της τάξης εξόδου. Για τον έλεγχο του διακόπτη αυτού χρησιμοποιείται ως επί το πλείστο η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).

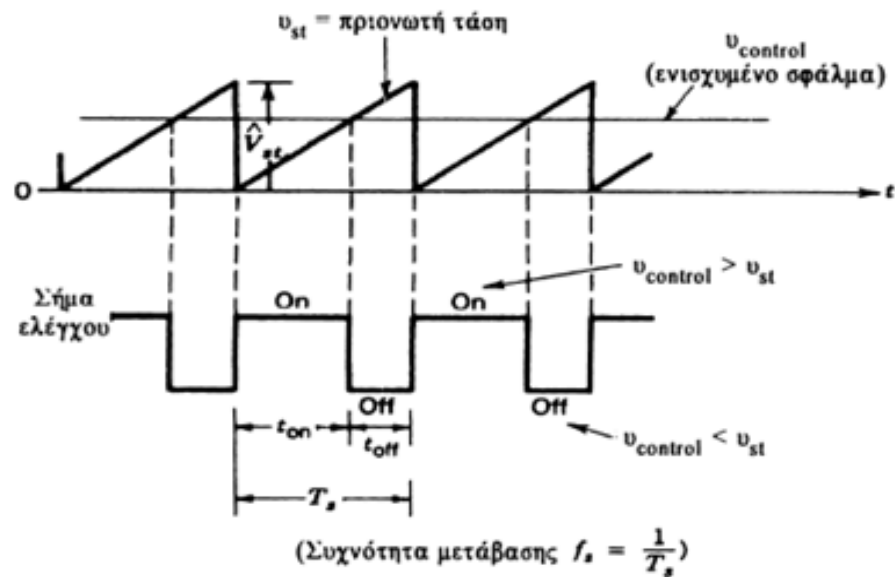
Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται ρυθμίζοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακοπτικού στοιχείου. Η περίοδος καθώς και η συχνότητα μετάβασης του διακόπτη είναι σταθερά, ενώ αυτό που μεταβάλλεται είναι η σχετική διάρκεια αγωγής αυτού, δηλαδή ο λόγος $D=t_{on}/T_s$, όπου t_{on} , ο χρόνος αγωγής, t_{off} ο χρόνος σβέσης και $T_s=t_{on}+t_{off}$, η περίοδος μετάβασης. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι τότε:

$$V_o = \frac{1}{T_s} * \int_0^{T_s} V_o(t) dt = \frac{1}{T_s} * (\int_0^{t_{on}} V_d * dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 * dt) = \frac{t_{on}}{T_s} * V_d = D * V_d$$

Το σήμα για πού ελέγχει τη σχετική αυτή διάρκεια αγωγής παράγεται από ένα κύκλωμα συγκριτή, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3.2.2.17 και 18.



Σχήμα 4.3.2.2.17: Κύκλωμα για την παραγωγή του σήματος ελέγχου $V_{control}$.



Σχήμα 4.3.2.2.18: Κύκλωμα για την παραγωγή του σήματος ελέγχου $V_{control}$. Η διαφορά του πλάτους της επιθυμητής τάσης εξόδου μείον την πραγματική τάση εξόδου, ενισχύεται και κατόπιν εισέρχεται σε συγκριτή μαζί με μια πριονωτή κυματομορφή. Όταν το σήμα ελέγχου είναι μεγαλύτερο κατά πλάτος από την πριονωτή τάση, ο διακόπτης άγει για χρόνο t_{on} . Η συνολική περίοδος μετάβασης είναι η περίοδος της πριονωτής τάσης.

Το σήμα ελέγχου $V_{control}$, που παράγεται από την ενίσχυση της διαφοράς της επιθυμητής τάσης εξόδου από την πραγματική τάση εξόδου, εισέρχεται σε ένα συγκριτή μαζί με μια περιοδική πριονωτή τάση V_s . Η συχνότητα της πριονωτής τάσης καθορίζει και τη συχνότητα μετάβασης T_s του διακόπτη. Έτσι η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δύο αυτών τάσεων ως εξής:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{V_{tr}}$$

Έτσι η τάση εξόδου του μετατροπέα γίνεται $V_0 = \frac{V_d}{V_{st}} * V_{control} = k * V_{control}$

Μεταβάλλοντας προφανώς το λόγο t_{on}/T_s , η τάση εξόδου V_0 μπορεί να ελεγχθεί. Επανερχόμενοι στο κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού και ολοκληρώνοντας στο διάστημα μιας περιόδου έναυσης- σβέσης του διακόπτη θα έχουμε:

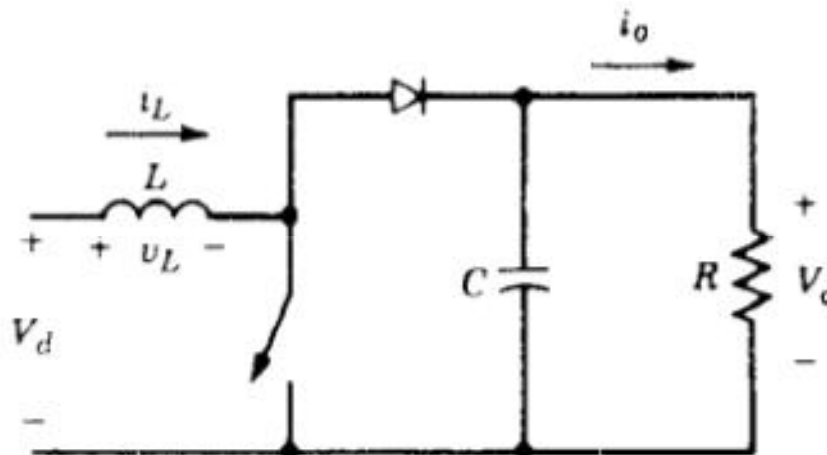
$$\int_0^{T_s} VL * dt = \int_0^{t_{on}} VL * dt + \int_{t_{on}}^{T_s} VL * dt = 0$$

Εξίσωση που μεταφράζεται για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη ως εξής:

$$(V_d - V_0) * t_{on} = V_0 * (T_s - t_{on}) \Rightarrow \frac{V_0}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \Rightarrow V_0 = D * V_d$$

Από την τελευταία εξίσωση είναι φανερό ότι η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από το σχετικό εύρος των παλμών D , οπότε με την κατάλληλη ρύθμιση αυτού επιτυγχάνεται ο υποβιβασμός στην επιθυμητή τιμή.

❖ Το αντίστοιχο κύκλωμα για ένα **μετατροπέα ανύψωσης τάσης** φαίνεται παρακάτω. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα, απομονώνοντας τελείως την έξοδο από την είσοδο. Αυτό το διάστημα ενέργεια αποθηκεύεται στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το φορτίο στην έξοδο του μετατροπέα απορροφά ενέργεια τόσο από την είσοδο όσο και από το πηνίο. Ο πυκνωτής είναι απαραίτητος για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου.



Σχήμα 4.3.2.2.19: Μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης

Για την μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου ανοιχτού – κλειστού διακόπτη ($T_s = t_{on} + t_{off}$ και $D = t_{on}/T_s$) ισούται με μηδέν καθώς η ενέργεια που αποθηκεύεται σ' αυτό δεν χάνεται, οπότε έχουμε τις αντίστοιχες εξισώσεις:

$$V_d * t_{on} + (V_d + V_0) * t_{off} = 0 \Rightarrow \frac{V_0}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \Rightarrow V_0 = \frac{1}{1-D} * V_d$$

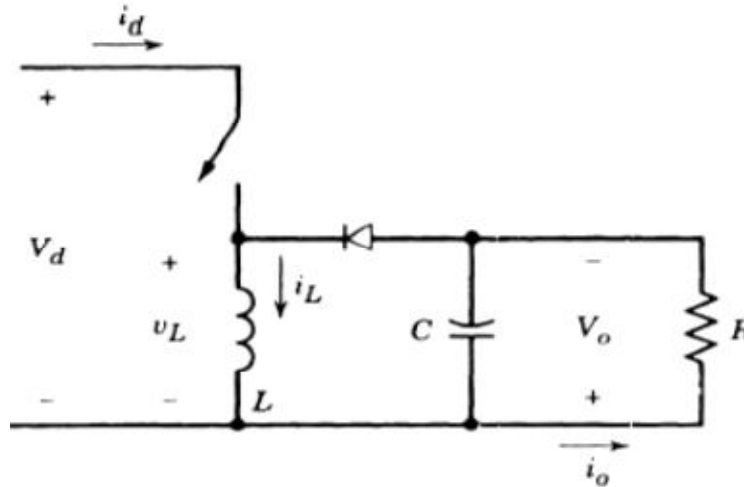
Καθώς ο λόγος $D = t_{on}/T_s$ είναι πάντα μικρότερος της μονάδας, η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη της τάσης εισόδου V_d .

❖ Ο **μεικτός DC/DC μετατροπέας** μπορεί να κατασκευαστεί με την εν σειρά σύνδεση των μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης (σχήμα 4.3.2.2.20), οπότε η συνάρτηση μεταφοράς για την τάση εξόδου θα είναι το γινόμενο αυτών των δύο:

$$\frac{V_0}{V_d} = D * \frac{1}{1-D} \Rightarrow V_0 = \frac{D}{1-D} * V_d$$

Ανάλογα με την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής D , η τάση εξόδου μπορεί να ρυθμίζεται μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου. Όπως και στους μετατροπείς από τους οποίους συντίθεται, ο μεικτός μετατροπέας χρησιμοποιεί σαν κύριο αποθηκευτικό μέσο της ενέργειας για μεταβίβαση προς την έξοδο το πηνίο.

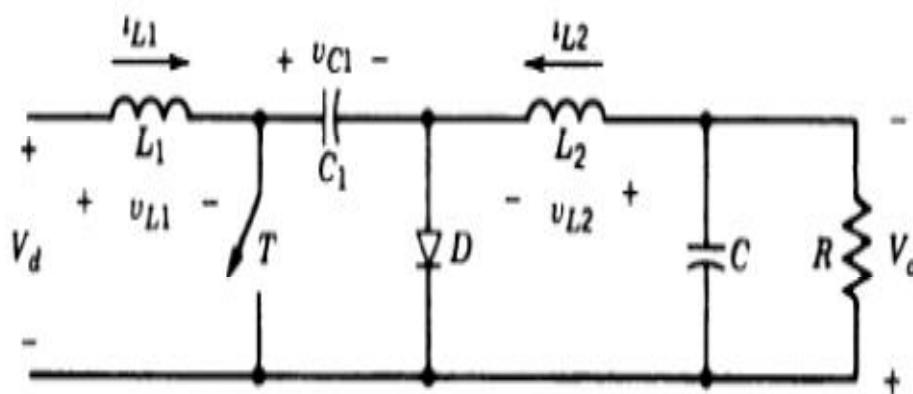
Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός ενέργεια παρέχεται από την είσοδο τόσο στο πηνίο όσο και στο φορτίο εξόδου. Όταν όμως ο διακόπτης ανοίξει, η είσοδος απομονώνεται ενώ η ενέργεια που είχε αποθηκευθεί στο πηνίο μεταφέρεται στην έξοδο. Ο πυκνωτής χρησιμοποιείται κι εδώ για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου.



Σχήμα 4.3.2.2.20: Μεικτός μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης

❖ **Ο μετατροπέας CUK:** Εφαρμόζοντας την αρχή της δυαδικότητας στο κύκλωμα του μικτού DC/DC μετατροπέα, προκύπτει ο μετατροπέας CUK (Σχήμα 4.3.2.2.21). Ο μετατροπέας αυτός παρέχει μια σταθεροποιημένη τάση εξόδου με αρνητική πολικότητα σε σχέση με το κοινό της τάσης εισόδου. Το αποθηκευτικό μέσο για την μεταφορά της ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο δεν είναι τα πηνία, αλλά ο πυκνωτής C_1 . Στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και για διάρκεια μιας περιόδου έναυσης – σβέσης του διακόπτη η μέση τάση τόσο του πρώτου όσο και του δεύτερου πηνίου είναι μηδέν, οπότε έχουμε: $V_{C1} = V_d + V_o$

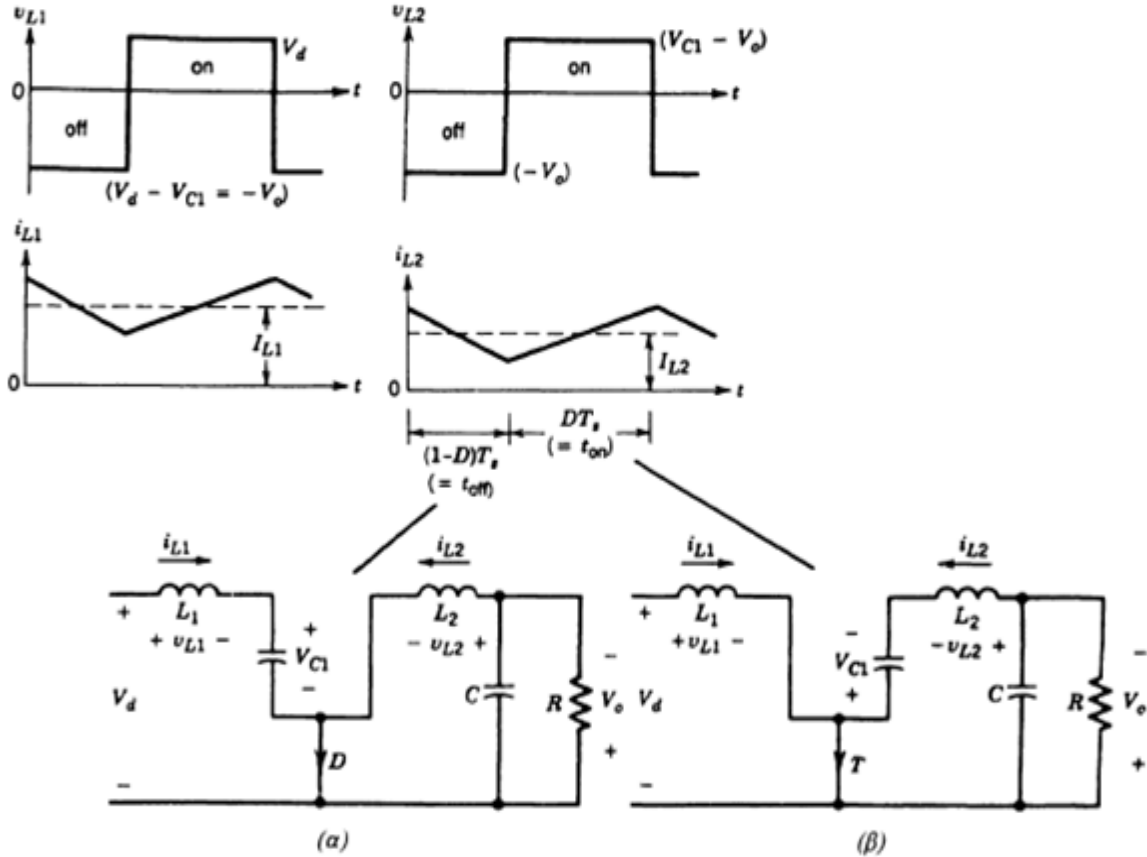
Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι η τάση V_{C1} είναι μεγαλύτερη και από την τάση εισόδου V_d και από την τάση εξόδου V_o .



Σχήμα 4.3.2.2.21: Μετατροπέας του CUK (DC/DC)

Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός τα ρεύματα των αυτεπαγωγών i_{L1} και i_{L2} ρέουν μέσω της διόδου. Ο πυκνωτής C_1 φορτίζεται δια μέσου της διόδου με ενέργεια προερχόμενη τόσο από την είσοδο όσο και από το πηνίο L_1 . Το ρεύμα i_{L1} μειώνεται καθώς η V_{C1} είναι μεγαλύτερη από την V_d . Η ενέργεια που αποθηκεύθηκε στο πηνίο L_2 τροφοδοτεί το φορτίο εξόδου. Άρα μειώνεται ταυτόχρονα και το ρεύμα i_{L2} .

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η V_{C1} πολώνει ανάστροφα τη δίοδο. Τα ρεύματα των αυτεπαγωγών i_{L1} και i_{L2} ρέουν μέσω του διακόπτη. Καθώς όμως η τάση του πυκνωτή είναι μεγαλύτερη από την τάση εξόδου, ο πυκνωτής θα αρχίσει να εκφορτίζεται μέσω του διακόπτη, παρέχοντας ενέργεια στην έξοδο αλλά και στο πηνίο L_2 , με συνέπεια το ρεύμα i_{L2} να αυξάνεται. Ταυτόχρονα όμως από την είσοδο παρέχεται ενέργεια στο πηνίο L_1 , προκαλώντας αύξηση στο ρεύμα i_{L1} .



Σχήμα 4.3.2.2.22: Οι δύο φάσεις του μετατροπέα CUK. α) διακόπτης ανοιχτός, ο πυκνωτής $C1$ φορτίζεται μέσω της εισόδου και του πηνίου $L1$. Η έξοδος τροφοδοτείται από το πηνίο $L2$, β) διακόπτης κλειστός. Η δίοδος πολώνεται ανάστροφα, ο πυκνωτής εκφορτίζεται διαμέσου του διακόπτη, μεταφέροντας ενέργεια στην έξοδο και το πηνίο $L2$. Το πηνίο $L1$ φορτίζεται από την είσοδο.

Θεωρώντας την τάση V_{C1} του πυκνωτή σταθερή, και εξισώνοντας τα ολοκληρώματα των τάσεων στα άκρα των δύο πηνίων με μηδέν (για διάστημα μιας περιόδου):

$$\text{Για μεν το πηνίο } L_1: \quad V_d * D * T_s + (V_d - V_{C1}) * (1 - D) * T_s = 0 \Rightarrow V_{C1} = \frac{1}{1-D} * V_d$$

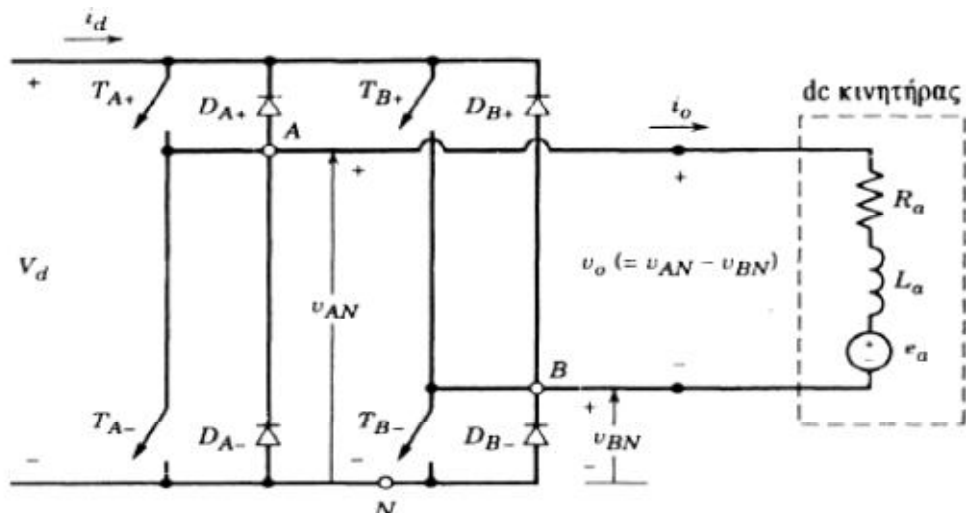
$$\text{και για το πηνίο } L_2: \quad (V_{C1} - V_o) * D * T_s + (-V_o) * (1 - D) * T_s = 0 \Rightarrow V_{C1} = \frac{1}{D} * V_o$$

Συνδυάζοντας τις δύο αυτές εξισώσεις προκύπτει για τη σχέση τάσης εισόδου – εξόδου:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D} \Rightarrow V_o = \frac{D}{1-D} * V_d$$

Με κατάλληλη επιλογή της σχετικής διάρκειας αγωγής D , είναι δυνατόν ο μετατροπέας CUK να υποβιβάζει ή να ανυψώνει την τάση εισόδου, κατά το κλάσμα $D/(1-D)$.

❖ Ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα χρησιμοποιεί συνολικά τέσσερις διακόπτες και τέσσερις διόδους τοποθετημένες αντιπαράλληλα(βλ. σχήμα 4.3.2.2.23). 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.



Σχήμα 4.3.2.2.23: Μετατροπέας DC/DC με πλήρη γέφυρα. Οι διακόπτες T_{A+}, T_{B-} και T_{A-}, T_{B+} είναι ανοιχτοί ή κλειστοί ταυτόχρονα στην διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου

Στον μετατροπέα αυτόν η τάση εισόδου έχει καθορισμένη τιμή V_d 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 $V_{control}$ συγκρίνεται αυτή τη φορά με μία τριγωνική κυματομορφή. Δύο παραλλαγές αυτής της τεχνικής χρησιμοποιούνται συνήθως:

- Στην διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου οι διακόπτες T_{A+}, T_{B-} και T_{A-}, T_{B+} αντιμετωπίζονται ως δύο ζεύγη διακοπών, τα οποία ανοίγουν και κλείνουν ταυτόχρονα.
- Στην διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου ο έλεγχος των διακοπών του κάθε σκέλους γίνεται ανεξάρτητα από το άλλο.

Αντίθετα από τα υπόλοιπα τέσσερα 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 .

4.3.2.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς DC/AC (Inverter)

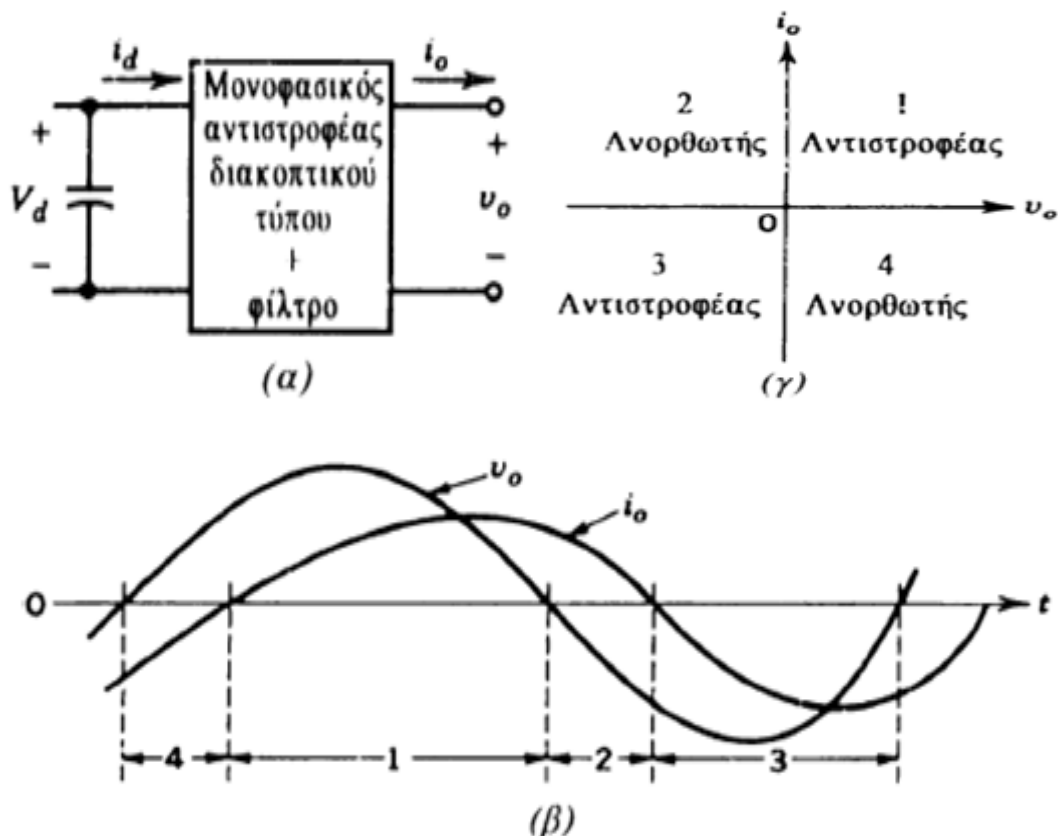
Οι αντιστροφείς DC/AC χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, σε τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας και στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στα τελευταία η λειτουργία τους είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσεως διαφόρων πηγών και αποθηκευτικών μέσων ενέργειας, σε εναλλασσόμενη (ημιτονοειδή) στην τάση και συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Οι αντιστροφείς DC/AC διακρίνονται σε αντιστροφείς τροποποιημένου ημίτονου (modified sine-wave) και σε αντιστροφείς καθαρού ημίτονου (pure / true sine-wave). Ένας μετατροπέας με τροποποιημένο ημίτονο, είναι φθηνότερος από έναν με καθαρό ημίτονο και είναι κατάλληλος για τις περισσότερες συσκευές. Καταναλώνει όμως έως και 20% περισσότερη ενέργεια από τη μπαταρία σε σχέση με έναν μετατροπέα καθαρού ημίτονου. Επίσης, σε τηλεοράσεις και ηχοσυστήματα μέτριας ποιότητας θα ακούγεται ένα ελαφρύ βουητό.

Από την άλλη μεριά, το μοναδικό μειονέκτημα που έχουν οι αντιστροφείς DC/AC καθαρού ημίτονου είναι η τιμή τους, αφού είναι τρεις έως τέσσερις φορές ακριβότεροι από έναν αντίστοιχο με τροποποιημένο ημίτονο. Αν έχουμε ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές, καλό είναι να χρησιμοποιούμε για αυτές αντιστροφείς DC/AC με καθαρό ημίτονο.

Επίσης 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). Διάφορες τεχνικές ελέγχου, υλοποιούν διαφορετικές κυματομορφές εξόδου της εναλλασσόμενης τάσης, στην εργασία όμως αυτή θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον στους μονοφασικούς αντιστροφείς με έλεγχο PWM, παρόμοια μέθοδο με αυτή που εξετάστηκε και στους αντιστροφείς DC/AC. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής εξόδου η οποία μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα, και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα σύνδεσης πηγών ΑΠΕ και δικτύου χαμηλής τάσης.

Ένας μονοφασικός αντιστροφέας DC/AC που λειτουργεί με συντελεστή ισχύος διαφορετικό της μονάδας, πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί τόσο ως αντιστροφέας όσο και ως ανορθωτής, δηλαδή να επιτρέπει τη ροή ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό γίνεται κατανοητό με το εξής παράδειγμα:



Σχήμα 4.3.2.3.24: Μονοφασικός αντιστροφέας διακοπτικού τύπου με αμφίδρομη ροή ισχύος. Το γινόμενο των V_o, I_o τάσεως και ρεύματος εξόδου του αντίστοιχα, καθορίζει την λειτουργία του αντιστροφέα και την κατεύθυνση της ροής της ισχύος.

Έστω ένας αντιστροφέας που τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο, δηλαδή η ένταση που αυτό απορροφά υστερεί της τάσης. Ενώ κατά τα διαστήματα 1 και 3 που φαίνονται στο σχήμα το γινόμενο $V_o \cdot I_o$ είναι θετικό, δηλαδή η ισχύς ρέει προς το φορτίο, στα διαστήματα 2 και 4 το γινόμενο αυτό είναι αρνητικό, πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς ρέει προς την είσοδο.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια διάταξη πλήρους γέφυρας η οποία αποτελείται από 4 ζεύγη διακοπών και διόδων, όπως και στους μετατροπείς DC/DC πλήρους γέφυρας.

Για την παραγωγή της ημιτονοειδούς τάσης εξόδου με την μέθοδο της διαμόρφωσης εύρους παλμών χρησιμοποιείται η εξής τεχνική:

Μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους V_{tri} συγκρίνεται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η οποία είναι και η κυματομορφή ελέγχου $V_{control}$. Η συχνότητα f_s 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 ελέγχου $V_{control}$ χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπών και έχει συχνότητα f_1 . 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_1 .

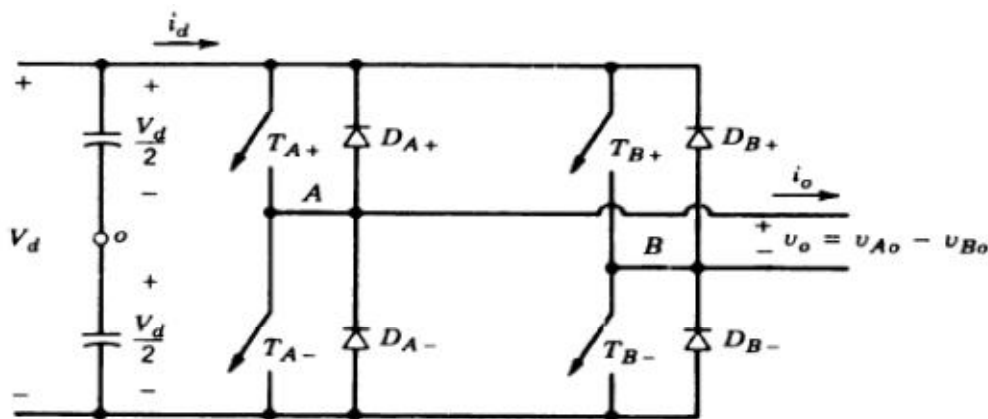
Από τον λόγο της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης προκύπτει

ο **συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας** m_f :
$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Ομοίως ορίζεται και ο **συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους** ως ο λόγος του πλάτους του σήματος

ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής:
$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}}$$

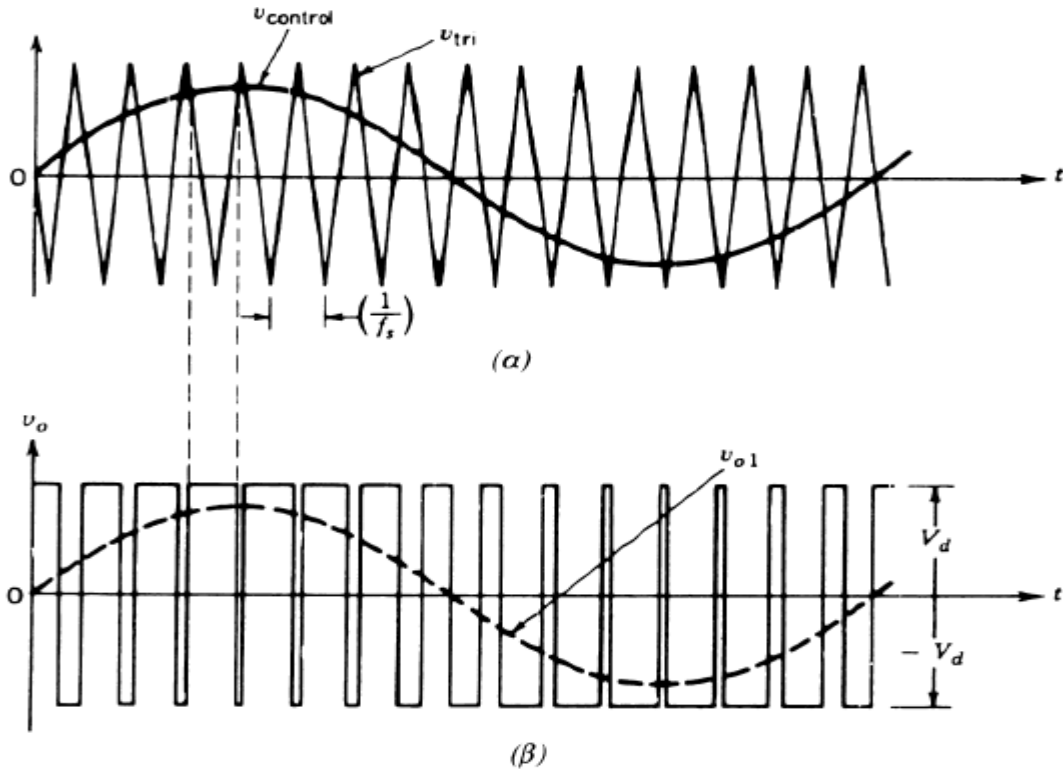
Στην διαμόρφωση PWM για τους μονοφασικούς αντιστροφείς η μετατροπή της DC τάσης μπορεί να γίνεται είτε από μισή γέφυρα (2 ζεύγη διακοπών – διόδων) είτε από πλήρη γέφυρα (4 ζεύγη διακοπών – διόδων), που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση για αντιστροφείς ισχύος. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνεται είτε με διπολική είτε με μονοπολική τάση εξόδου.



Σχήμα 4.3.2.3.25: Αντιστροφέας DC/AC με πλήρη γέφυρα. Κατά τη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου οι διακόπτες T_{A+}, T_{B-} και T_{A-}, T_{B+} λειτουργούν ως ζεύγη.

❖ **Διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου:** Τα ζεύγη διακοπών T_{A+}, T_{B-} και T_{A-}, T_{B+} αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Τα δύο ζεύγη διακοπών αυτά ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των κυματομορφών $V_{control}$ και V_{tri} , και ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος εξόδου i_o , προκύπτει τάση εξόδου:

- $V_0 = V_d$, όταν $V_{control} > V_{tri}$ οπότε οι (T_{A+}, T_{B-}) άγουν
- $V_0 = -V_d$, όταν $V_{control} < V_{tri}$ οπότε οι (T_{A-}, T_{B+}) άγουν



Σχήμα 4.3.2.3.26: Διαμόρφωση εύρους παλμών με διπολική τάση εξόδου στον αντιστροφέα DC/AC ημιτονοειδούς εξόδου. Το σήμα ελέγχου $V_{control}$ συγκρίνεται με μία τριγωνική κυματομορφή. Η έξοδος προκύπτει $+V_d$ για $V_{control} > V_{tri}$ και $-V_d$ για $V_{control} < V_{tri}$. Η τριγωνική κυματομορφή καθορίζει την φέρουσα συχνότητα, ενώ η κυματομορφή ελέγχου την συχνότητα διαμόρφωσης (συχνότητα εξόδου).

Έτσι, η μέση τάση εξόδου V_0 στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης αγωγής – αποκοπής ($T_s=1/f_s$) για τάση εισόδου V_d , και για κυματομορφή ελέγχου $V_{control} - V_d$, θα είναι:

$$V_0 = \frac{V_{control}}{V_{tri}} * V_d = m_a * V_d$$

Για διάφορες τιμές των συντελεστών διαμόρφωσης συχνότητας και πλάτους m_f και m_a αντίστοιχα, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- **$m_f < 21$:** Συγχρονισμένη διαμόρφωση. Στην περίπτωση μικρού συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας, τα δύο σήματα $V_{control}$ και V_{tri} πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους, πράγμα που με τη σειρά του απαιτεί ακέραια τιμή του m_f . Μάλιστα αυτός πρέπει να είναι περιττός ακέραιος καθώς αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιττή συμμετρία στην συνάρτηση εξόδου. Περιττή συμμετρία σημαίνει ότι υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές σ' αυτή.
- **$m_f > 21$:** Ασύγχρονη διαμόρφωση: Στην περίπτωση αυτή, η μεν συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής διατηρείται σταθερή, ενώ η συχνότητα του σήματος ελέγχου μεταβάλλεται, έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας.
- **$m_a > 1$:** Στην θεώρηση που έγινε θεωρήθηκε δεδομένο ότι το πλάτος του σήματος ελέγχου είναι μικρότερο ή ίσο από το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής, οπότε η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους. Στην περίπτωση αυτή, οι αρμονικές της τάσης εξόδου εμφανίζονται σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα μετάβασης f_s και τις πολλαπλάσιες αυτής.

Όταν ο συντελεστής m_a είναι μεγαλύτερος της μονάδας έχουμε υπερδιαμόρφωση, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου V_0 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:

$$V_d < V_0 < \frac{4}{\pi} * V_d$$

❖ **Διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου:** Κατά τη μέθοδο αυτή οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα. Το σκέλος A ελέγχεται με σύγκριση της τάσης V_{tri} με την $V_{control}$, ενώ οι διακόπτες του σκέλους B ελέγχονται με τη σύγκριση των κυματομορφών V_{tri} και $-V_{control}$. Έτσι για το σκέλος A, θα έχουμε:

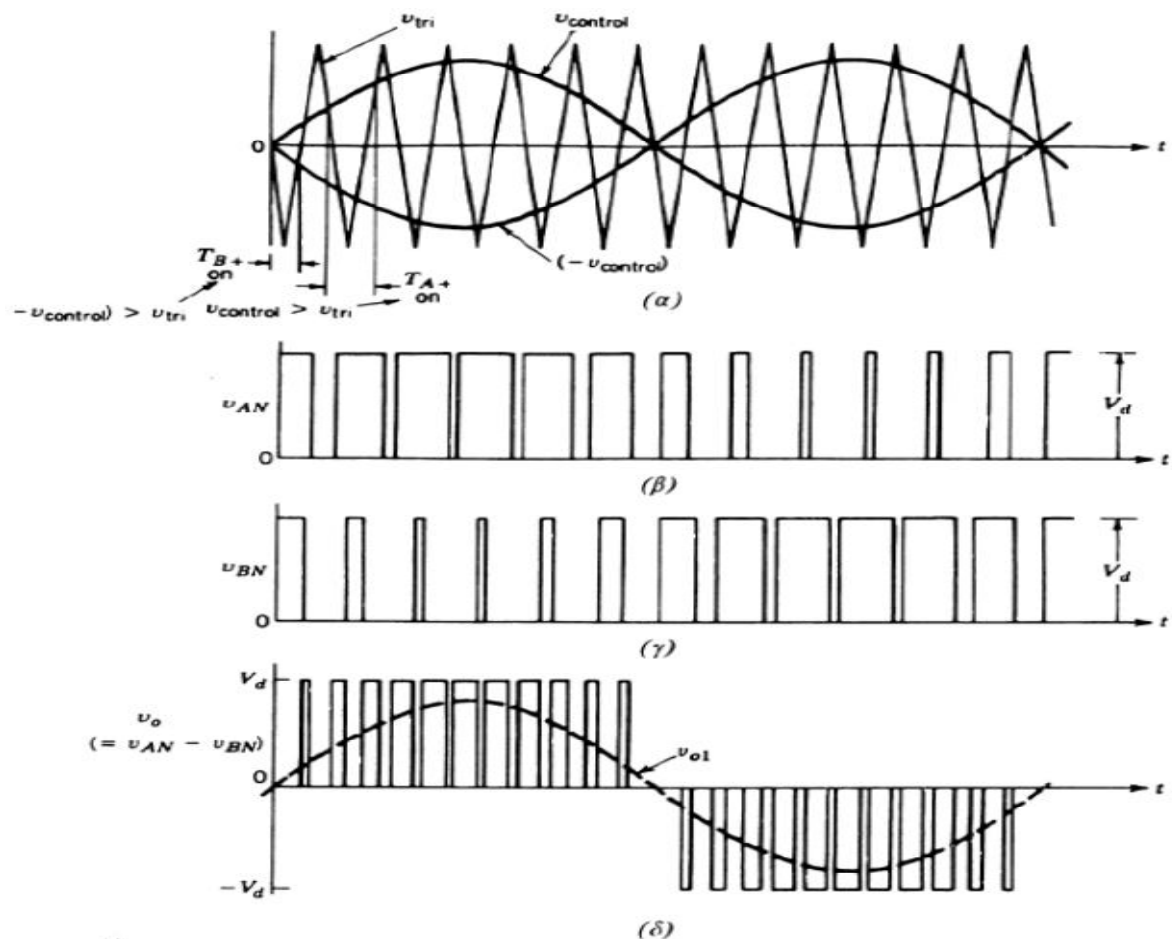
$$V_{control} > V_{tri} : T_{A+} \text{ on και } V_{AN} = V_d \quad \text{ή} \quad V_{control} < V_{tri} : T_{A-} \text{ on και } V_{AN} = 0$$

και για το σκέλος B:

$$V_{control} > V_{tri} : T_{B+} \text{ on και } V_{BN} = V_d \quad \text{ή} \quad V_{control} < V_{tri} : T_{B-} \text{ on και } V_{BN} = 0$$

Τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί κλειστών διακόπτων υπάρχουν δίνοντας τα εξής επίπεδα τάσης εξόδου:

- $T_{A+}, T_{B-}, \text{ κλειστοί: } V_{AN} = V_d, V_{BN} = 0, V_0 = V_d$
- $T_{A-}, T_{B+}, \text{ κλειστοί: } V_{AN} = 0, V_{BN} = V_d, V_0 = -V_d$
- $T_{A+}, T_{B+}, \text{ κλειστοί: } V_{AN} = V_d, V_{BN} = V_d, V_0 = 0$
- $T_{A-}, T_{B-}, \text{ κλειστοί: } V_{AN} = 0, V_{BN} = 0, V_0 = 0$



Σχήμα 4.3.2.3.27: Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου

Με τη μέθοδο αυτή, τα άλματα της τάσης εξόδου μειώνονται σε V_d (από $2V_d$ στη διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου), ενώ διπλασιάζεται η συχνότητα μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου. Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό, καθώς οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους. Εάν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f , οι κυματομορφές της τάσης U_{AN} και U_{BN} μετατοπίζονται κατά 180° από τη θεμελιώδη συχνότητα f_1 , η μια σε σχέση με την άλλη. Οι αρμονικοί όροι στη συχνότητα μετάβασης στις U_{AN} και U_{BN} έχουν την ίδια φάση, με αποτέλεσμα να απαλείφεται ο αρμονικός όρος στη συχνότητα μετάβασης στην τάση εξόδου $U_0 = U_{AN} - U_{BN}$. Το ίδιο εξαλείφονται και οι πλευρικές ζώνες των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης. Για λόγο:

$$m_a \leq 1, \text{ έχουμε ότι } V_{01} = m_a * V_d \quad \text{ή} \quad m_a > 1, \text{ έχουμε ότι } V_d < V_{01} < \frac{4}{\pi} V_d$$

4.3.2.4 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπών 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. Για την Αγγλία το όριο του επιτρεπόμενου DC ρεύματος που παράγουν οι αντιστροφείς είναι 5mA (0,025% του ονομαστικού ρεύματος εξόδου), ενώ για τα δίκτυα της Αμερικής αυτό είναι 0,5% του ρεύματος αυτού.

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.

4.3.2.5 Έλεγχος τάσης και συχνότητας αντιστροφών

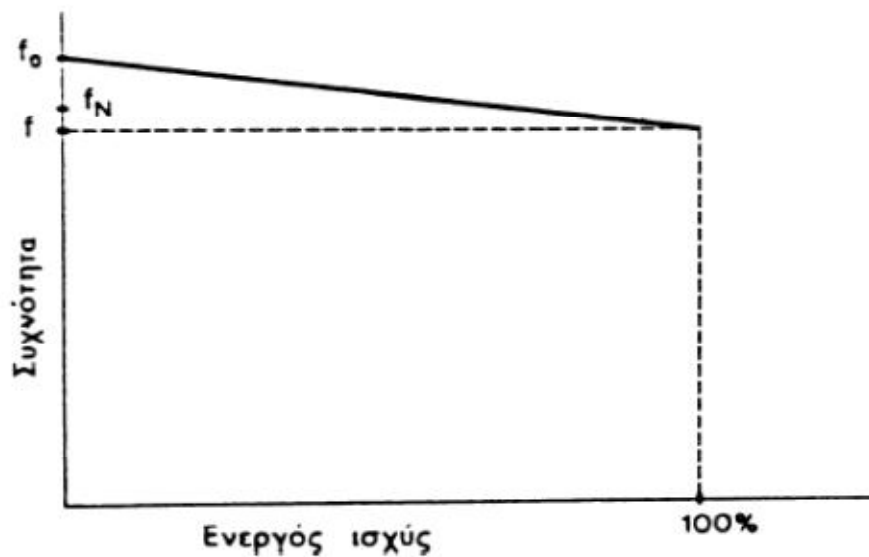
Σε ό,τι αφορά το στάδιο εξόδου των αντιστροφών ισχύος, αυτό που είναι καθοριστικής σημασίας είναι τι ακριβώς διασύνδεση έχει με το κύκλωμα εξόδου. Όταν ο αντιστροφέας απλά τροφοδοτεί φορτία χωρίς την ύπαρξη άλλων πηγών, η λογική ελέγχου είναι σχετικά απλή. Ο αντιστροφέας, μέσω αναδραστικών κυκλωμάτων ελέγχου, προσπαθεί να παράγει ημιτονοειδή κυματομορφή, στην ονομαστική τάση και συχνότητα που έχει καθοριστεί να λειτουργεί. Και αυτό διότι με την μεταβολή των φορτίων η τάση και η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλονται.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται αντιστροφείς DC/AC, οι οποίοι συνδέονται με ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Διαφέρουν από τους κοινούς αντιστροφείς, οι οποίοι απλά παράγουν μια ημιτονοειδή τάση εξόδου, στο ότι έχουν την δυνατότητα να συγχρονίζονται με μια υπάρχουσα κυματομορφή που εντοπίζουν στην έξοδό τους. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα βρόχο κλειδώματος φάσης (phase locked loop), σύμφωνα με τον οποίο το κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα, μετρά τη διαφορά φάσης μεταξύ της παραγόμενης από αυτόν τάσης και της ήδη υπάρχουσας. Ολισθαίνοντας κατάλληλα την φάση της τάσης που παράγει, μέσω αλλαγής της συχνότητας, μηδενίζει την διαφορά αυτή, οπότε και η σύνδεση γίνεται ομαλά.

Ένας αντιστροφέας που έχει φτιαχτεί για να παρέχει μόνο ισχύς στο δίκτυο (π.χ. αντιστροφείς φβ) λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μονάδα και ουσιαστικά αποδίδει ενεργό ισχύ. Αντίθετα, ένας αντιστροφέας με δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος, χρειάζεται διαφορετικές τεχνικές ελέγχου ροής της ισχύος. Μερικά στοιχεία για την λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων είναι απαραίτητα, για να γίνει κατανοητός ο πρωτότυπος τρόπος σύνδεσης του ενός απ' τους δύο αντιστροφείς που εξετάζονται παρακάτω με το δίκτυο.

Πηγή κάθε μεγάλου ηλεκτρικού δικτύου είναι η σύγχρονη γεννήτρια, οι ιδιότητες της οποίας καθορίζουν βασικά την συμπεριφορά του δικτύου στις μεταβολές της τάσης και της συχνότητας. Για αυτήν, η συχνότητα της τάσεως εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογη της ενεργού ισχύος εξόδου αυτής. Ομοίως η τάση εξόδου αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογη της άεργου ισχύος εξόδου. Στο παρακάτω σχήμα 4.3.2.5.28 φαίνεται η μεταβολή των μεγεθών f , V (συχνότητας, τάσης) συναρτήσει της ενεργού P και άεργου Q ισχύος αντίστοιχα.

Ένα δίκτυο που περιλαμβάνει περισσότερες από μια γεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιες από αυτές για την παραγωγή μιας σταθερής ισχύος (γεννήτριες βάσης) ενώ κάποιες άλλες για τη ρύθμιση της συχνότητας f και της τάσης V (ρυθμίζουσες γεννήτριες).



Σχήμα 4.3.2.5.28: Χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας σύγχρονης γεννήτριας (στατισμός)

Ονομάζοντας ως f_0 την συχνότητα λειτουργίας σε κενό φορτίο, f_N την ονομαστική συχνότητα του δικτύου,

- Ο στατισμός της γεννήτριας ορίζεται ως $R\mu = -\frac{f_0 - f}{f_n}$
- Ο διαφορικός στατισμός ορίζεται ως $R\delta = -\frac{\Delta f / f_n}{\Delta P / P_n}$

Σύμφωνα με την κλίση αυτής της χαρακτηριστικής εξίσωσης η γεννήτρια ανταποκρίνεται στις μεταβολές της ενεργού ισχύος του δικτύου μεταβάλλοντας την συχνότητά της. Όταν η γεννήτρια αυξάνει την ενεργό ισχύ εξόδου της, υπάρχει η τάση να μειωθούν οι στροφές περιστροφής της, οπότε μειώνεται και η συχνότητα εξόδου. Η σχέση μεταξύ συχνότητας και ταχύτητας περιστροφής εξάγεται άμεσα από την βασική εξίσωση της σύγχρονης γεννήτριας: $f = \frac{P * n}{120}$

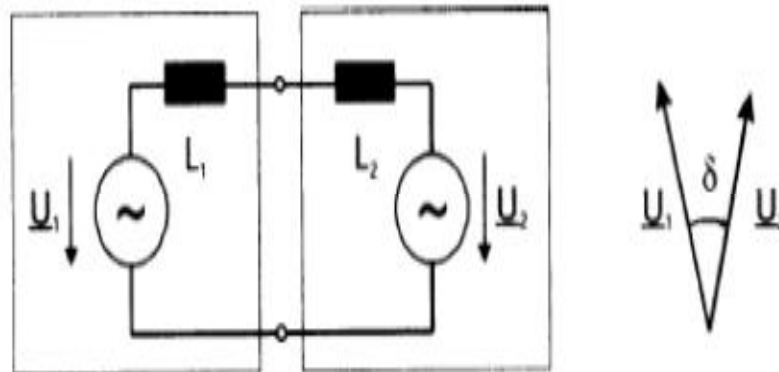
όπου: f - η συχνότητα της τάσης εξόδου , n - ο αριθμός στροφών της γεννήτριας και

P - ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας

Αντίθετα, μείωση της παρεχόμενης ενεργού ισχύος προκαλεί αύξηση της συχνότητας εξόδου της γεννήτριας. Το κύκλωμα ελέγχου της γεννήτριας αλλάζει είτε την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας, είτε την συχνότητα κενού φορτίου (μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς τα πάνω ή κάτω) είτε την κλίση της χαρακτηριστικής αυτής, προκειμένου να ανταποκριθεί στις μεταβολές του φορτίου ή της συχνότητας. Το είδος της ρύθμισης εξαρτάται από το αν είναι επιθυμητή η τήρηση σταθερής της συχνότητας ή του φορτίου.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για τον έλεγχο της τάσης. Η ρυθμίζουσα γεννήτρια, μεταβάλλοντας την άεργο ισχύ μπορεί να ελέγχει την τάση του δικτύου. Με μία αρνητική κλίση τάσεως – άεργου ισχύος, αύξηση της άεργου ισχύος θα προκαλέσει μείωση της τάσεως εξόδου, αντίθετα μείωση της άεργου ισχύος αυξάνει την τάση εξόδου. Ενώ η κλίση του στατισμού της συχνότητας είναι πάντα αρνητική για την σύγχρονη γεννήτρια, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την κλίση του στατισμού της τάσης. Ανάλογα με το κύκλωμα ελέγχου που υλοποιείται, μπορεί να λειτουργεί είτε με θετική είτε με αρνητική κλίση τάσεως – άεργου ισχύος.

Ένα τέτοιο κύκλωμα μεταβάλλει την διέγερση της σύγχρονης γεννήτριας, δηλαδή το συνεχές ρεύμα που παράγει το μαγνητικό πεδίο. Όταν η γεννήτρια λειτουργεί με υπερδιέγερση, παράγει άεργο ισχύ, ενώ όταν λειτουργεί με υποδιέγερση απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο. Για την διευκόλυνση της ανάλυσης θεωρούμε ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα δύο γεννητριών σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.



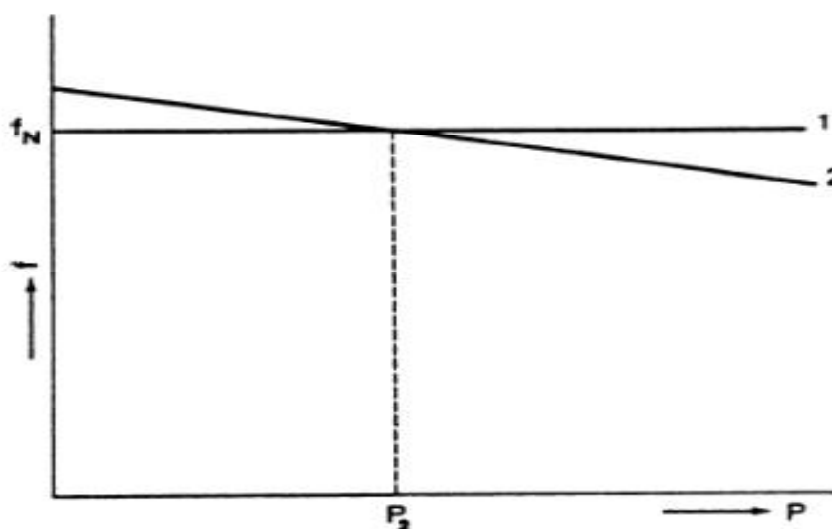
Σχήμα 4.3.2.5.29: Ισοδύναμο κύκλωμα δύο γεννητριών που συνδέονται μέσω επαγωγών L_1, L_2 . Η διαφορά φάσης μεταξύ των διανυσμάτων των τάσεων δ , προκαλεί ροή ενεργού ισχύος, ενώ η διαφορά στα πλάτη, ροή αέργου ισχύος

Εάν οι γεννήτριες συνδέονται μέσω των επαγωγών L_1, L_2 και η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τάσεων είναι δ , τότε η ενεργός ισχύς που ρέει στο δίκτυο είναι

$$P = \frac{V_1 * V_2}{\omega * (L_1 + L_2)} * \sin(\delta) \quad \text{και η άεργος} \quad Q = \frac{V_1^2}{\omega * (L_1 + L_2)} - \frac{V_1 * V_2}{\omega * (L_1 + L_2)} * \cos(\delta)$$

Από την εξίσωση της ενεργού ισχύος είναι εμφανές ότι αυτό που προκαλεί ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των δύο γεννητριών είναι η ύπαρξη διαφοράς φάσης δ . Απ' την άλλη, ροή αέργου ισχύος υπάρχει όταν υπάρχει διαφορά στο μέτρο των τάσεων των δύο γεννητριών.

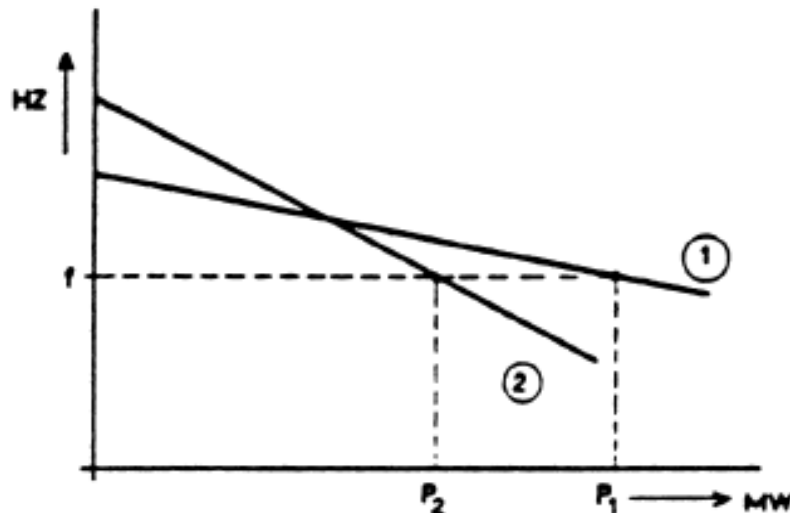
Από τις δύο αυτές γεννήτριες η μία μπορεί να λειτουργεί ως βασική, ενώ η άλλη ως ρυθμίζουσα. Για την ρυθμίζουσα ο στατισμός είναι μηδενικός, οπότε η ενεργός και η άεργος ισχύς από αυτήν δεν μεταβάλλονται με τις αλλαγές στην τάση και στην συχνότητα του δικτύου.



Σχήμα 4.3.2.5.30: Επίπεδος έλεγχος συχνότητας μεταξύ δύο γεννητριών. Η γεννήτρια 1 (ρυθμίζουσα μονάδα) με μηδενικό στατισμό απορροφά όλες τις διακυμάνσεις του φορτίου, φροντίζοντας για την σταθερότητα της συχνότητας στη τιμή f_n , ενώ η γεννήτρια 2, που έχει στατισμό, παράγει σταθερή ενεργό ισχύ.

Οι δύο γεννήτριες τροφοδοτούν το κοινό δίκτυο με ισχύ στην ονομαστική πάντα συχνότητα f_N . Καθώς η συχνότητα μένει σταθερή, η γεννήτρια 2 που έχει στατισμό, αναγκάζεται να δίνει πάντα σταθερή ισχύ P_2 , όπως προκύπτει από το σημείο τομής των δύο ευθειών. Συνεπώς όλες τις διακυμάνσεις στο φορτίο τις απορροφά η γεννήτρια με τον μηδενικό στατισμό, κρατώντας τη συχνότητα συνεχώς στην ονομαστική της τιμή.

Εάν και οι δύο γεννήτριες έχουν οριστεί ως ρυθμιζουσες, ο έλεγχος θα μπορούσε να γίνει και από τις δύο, ανάλογα με τις κλίσεις P-f, Q-V που έχουν οριστεί για την κάθε μια. Εάν οι κλίσεις των δύο γεννητριών είναι διαφορετικές, η ροή ισχύος από την κάθε γεννήτρια, προκύπτει από την τομή της τιμής της συχνότητας του δικτύου την στιγμή εκείνη (οριζόντια διακεκομμένη γραμμή) με την κάθε μια κλίση στατισμού. (Σχήμα 4.3.2.5.31)



Σχήμα 4.3.2.5.31: Παράλληλη λειτουργία δύο γεννητριών με στατισμό. Το κοινό δίκτυο λειτουργεί με συχνότητα f . Φέρνοντας την παράλληλη του σημείου f , προς τον άξονα των x , η ευθεία συναντά σε διαφορετικά σημεία τις δύο διαφορετικές κλίσεις στατισμού. Το συνολικό φορτίο που απορροφάται προκύπτει ως άθροισμα της συμβολής της κάθε γεννήτριας $P=P_1+P_2$

Εξετάζοντας τώρα την περίπτωση σύνδεσης μικρών αντιστροφών ισχύος με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, θα λέγαμε ότι στην πράξη, το τελευταίο φαίνεται στον αντιστροφέα σαν μια γεννήτρια σταθερής τάσης και συχνότητας, ικανή να δίνει ή να απορροφά όση ισχύ επιτρέπουν οι ασφάλειες της γραμμής χαμηλής τάσης. Είναι προφανές ότι το δίκτυο είναι αυτό που επιβάλλει τα δύο αυτά μεγέθη στην διασυνδεδεμένη λειτουργία με τον αντιστροφέα. Η ροή ενεργού ισχύος, καθορίζεται κάθε στιγμή από τη διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων των δύο πηγών, ενώ ροή άεργου ισχύος προκαλείται από τη διαφορά στο πλάτος της τάσης. **Συνεπώς ένας αντιστροφέας ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο, είτε ρυθμίζοντας την συχνότητα (διαφορά φάσης δ με το δίκτυο) και το πλάτος της τάσης εξόδου του αντίστοιχα, είτε δευτερευόντως, αλλάζοντας την κλίση των χαρακτηριστικών καμπύλων στατισμού αυτού.**

Την περίπτωση όμως δύο ρυθμιζών γεννητριών μπορεί να έχουμε όταν διασυνδέονται δύο αντιστροφείς σε ένα απομονωμένο δίκτυο (island grid). Και εδώ, η ροή ισχύος μεταξύ των δύο αντιστροφών προκαλείται από τη διαφορά φάσης στα διανύσματα της τάσης (συχνότητα) καθώς και του μέτρου αυτών. Μια τυπική μέθοδος συνεργασίας μεταξύ των δύο μονάδων είναι να ρυθμιστεί η μία ως βασική (ρυθμιζουσα) και η άλλη ως δευτερεύουσα. Αυτό μπορεί να γίνει με καλώδια επικοινωνιών ελέγχου μεταξύ των δύο αντιστροφών.

Ωστόσο, ο έλεγχος των δύο αντιστροφών θα μπορούσε να γίνει κατευθείαν μέσω των μεγεθών της διαφοράς φάσης και συχνότητας, χωρίς να απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος τρόπος επικοινωνίας των μικροεπεξεργαστών τους. Η περίπτωση αυτή είναι δυνατή, αν οι δύο αντιστροφείς συμπεριφέρονται όπως οι σύγχρονες γεννήτριες. Προφανές είναι ότι ένας αντιστροφέας δεν διαθέτει στατισμό, αυτός είναι χαρακτηριστικό μιας σύγχρονης γεννήτριας που προέρχεται από τη δομή της ηλεκτρικής της λειτουργίας, ωστόσο προσομοίωση του στατισμού μπορεί να γίνει μέσω μικροεπεξεργαστή. Η ονομαστική τάση V_N και συχνότητα λειτουργίας f_N είναι μέγεθος που ρυθμίζεται από το χειριστή του συστήματος, καθώς και οι κλίσεις των καμπύλων στατισμού $droop(P-f)$, $droop(Q-V)$. Με βάση αυτές τις τιμές, ο κάθε αντιστροφέας μετρά ξεχωριστά την τάση V και τη συχνότητα f του κοινού δικτύου στους ακροδέκτες του, και ρυθμίζει την ροή της ενεργού και άεργου ισχύος του με βάση τη διαφορά f_N-f και V_N-V αντίστοιχα.

Για την κλίση του στατισμού συχνότητας θα έχουμε:
$$droopf = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{(f_N - f) * P_N}{P}$$

όπου ΔP η ενεργός ισχύς του αντιστροφέα ως κλάσμα επί της ονομαστικής του P_N

και αντίστοιχα για την κλίση του στατισμού της τάσεως:
$$droopV = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{(V_N - V) * Q_N}{Q}$$

όπου ΔQ η άεργος ισχύς, ως κλάσμα επί της ονομαστικής του Q_N

Λύνοντας τις εξισώσεις αυτές ως προς P και Q , έχουμε για την ισχύ του κάθε αντιστροφέα:

$$P = \frac{(f_N - f) * P_N}{droopf} \quad Q = \frac{(V_N - V) * Q_N}{droopV}$$

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.2.5.31, η τομή των δύο κλίσεων με την ευθεία της συχνότητας λειτουργίας f , καθορίζει το ποσοστό της ισχύος που θα δίνει κάθε αντιστροφέας στο κοινό δίκτυο. Για συνολική απορροφούμενη ισχύ από τα φορτία του απομονωμένου δικτύου $P=P_1+P_2$, η κοινή συχνότητα λειτουργίας f βρίσκεται λύνοντας ως προς την μεταβλητή αυτή, την εξίσωση της ισχύος, δηλαδή

$$P = \frac{(f_{N1} - f) * P_{N1}}{droopf1} + \frac{(f_{N2} - f) * P_{N2}}{droopf2}$$

4.3.2.6 Αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας (Anti-Islanding detection)

Η ραγδαία εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αύξησε παράλληλα και τον αριθμό των συστημάτων ΑΠΕ τα οποία συνδέονται με το δίκτυο και ανταλλάσσουν ενέργεια με αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την Ελλάδα αποτελεί η Κρήτη με ένα 10% συνολικά παραγόμενης ενέργειας από ανεμογεννήτριες. Σε πολλές χώρες έχει προχωρήσει ευρύτατα και η διεύθυνση μικρότερων συστημάτων παραγωγής ενέργειας, όπως αυτό του μικροδικτύου, τα οποία χρησιμοποιούν είτε ηλιακούς συλλέκτες, είτε ανεμογεννήτριες, είτε μικρά υδροηλεκτρικά. Χαρακτηριστικά στην Γερμανία έχουν εγκατασταθεί μέχρι στιγμής 260,6 MWp φβ τα οποία παρέχουν ισχύ στο δίκτυο.

Καθώς όμως η ισχύς αυτή είναι αποκεντρωμένη, οι προστασίες του δικτύου ουσιαστικά καθίστανται αδρανείς. Αυτό διότι όπως προαναφέρθηκε τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δομημένα κάθετα, από την συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς την διανεμημένη κατανάλωση. Σε περίπτωση αποσύνδεσης ενός μεγάλου εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, υπάρχει η πιθανότητα οι γεννήτριες διανεμημένης παραγωγής να συνεχίσουν να παρέχουν ισχύ. Ακόμη χειρότερα, σε περίπτωση ηθελημένης διακοπής της τροφοδότησης μέρους του δικτύου για την εκτέλεση εργασιών συντήρησης και βλαβών, χωρίς την ύπαρξη διανεμημένης παραγωγής αρκούσαν ο συντηρητής να διακόψει τη σύνδεση με την κεντρική πύλη παροχής της

ενέργειας αυτού. Με την διανεμημένη παραγωγή όμως, ακόμη και αν διακοπεί η τροφοδότηση από τον κεντρικό σταθμό, υπάρχουν εκατοντάδες άλλοι που παράγουν και είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους.

Ας χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα. Ένας μικρός οικισμός περιλαμβάνει πολλές οικίες που έχουν εγκατεστημένα στις στέγες τους φβ συστήματα τα οποία παρέχουν ισχύ στο δίκτυο. Για να γίνει συντήρηση του δικτύου, απαιτείται η διακοπή τροφοδότησης του. Ακόμη όμως κι αν διακοπεί η κεντρική σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς μέσης τάσης, υπάρχει η περίπτωση η συνολικά παραγόμενη ισχύς από τα φβ να είναι ίση με την συνολικά καταναλισκόμενη στο δίκτυο του οικισμού, το οποίο με την αποσύνδεση από τον μετασχηματιστή μέσης τάσης είναι πλέον απομονωμένο. Αυτή η περίπτωση είναι κάτι παραπάνω από ανεπιθύμητη. Κατ' αρχάς για τον συντηρητή του δικτύου ο οποίος μπορεί να μην γνωρίζει ότι υπάρχει τάση στο δίκτυο. Επίσης αν δεν διακοπεί έγκαιρα η παροχή από τους αντιστροφείς, λόγω έλλειψης αδράνειας, μπορεί να συμβούν φαινόμενα διαταραχών της συχνότητας, της τάσης, με πιθανό αποτέλεσμα επιτάχυνση κινητήρων, καταστροφή ηλεκτρονικών συσκευών, ψυγείων και άλλων ευαίσθητων φορτίων.

Μέχρι τώρα η συνήθης πρακτική για τα συστήματα ελέγχου απομονωμένης λειτουργίας ήταν να μετράνε την τάση και στις τρεις φάσεις του δικτύου (όταν συμβεί κάποιο σφάλμα στο δίκτυο η τριφασική τάση αλλάζει).

Η κυματομορφή της τάσης όμως ενός μεγάλου ηλεκτρικού δικτύου κάθε άλλο παρά ιδανική είναι. Μια σειρά από παράγοντες επηρεάζουν συνεχώς την ποιότητά του. Συνήθη φαινόμενα σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι η διαρκής κυμάτωση της τάσης, η συνεχής αυξομείωση της συχνότητας και κυρίως οι αιχμές και οι βυθίσεις που προκαλούνται από την ζεύξη - απόζευξη γεννητριών και κινητήρων ή άλλων φορτίων. Μέσα σ' αυτά περιλαμβάνεται και η υψηλή στάθμη αρμονικών που παρουσιάζεται όταν υπάρχουν πολλά ηλεκτρονικά ισχύος συνδεδεμένα.

Αφενός λοιπόν ένας αντιστροφέας πρέπει να είναι ανεκτικός στην παραπάνω ασταθή συμπεριφορά του ηλεκτρικού δικτύου, αφετέρου πρέπει να «καταλαβαίνει» γρήγορα πότε υπάρχει διακοπή στο δίκτυο, οπότε και να διακόψει τη λειτουργία του. Είναι μια περίπτωση που δύο αντιτιθέμενες απαιτήσεις πρέπει να καλυφθούν.

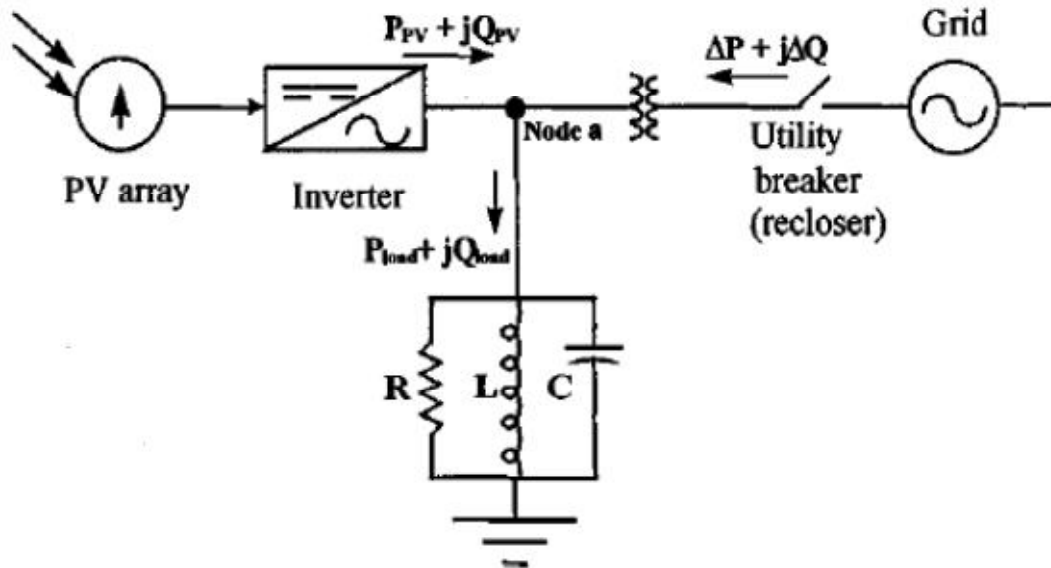
Αυστηρότερη ρύθμιση αυτών των ορίων, ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες απομονωμένης λειτουργίας του αντιστροφέα, αλλά τον καθιστά παράλληλα περισσότερο ευαίσθητο στις διαταραχές του δικτύου χαμηλής τάσης.

Αντίθετα, χαλαρότερη ρύθμιση των παραπάνω ορίων, αυξάνει τις πιθανότητες απομονωμένης λειτουργίας, αλλά και καθιστά τον αντιστροφέα πιο ανεκτικό στις διαταραχές του δικτύου.

Μέχρι σήμερα διάφορες τεχνικές ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί στους ηλεκτρονικούς αντιστροφείς ισχύος ώστε να εντοπίζουν την διακοπή της τάσεως του κεντρικού δικτύου και στη συνέχεια να διακόπτουν τη λειτουργία τους. Αυτές μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες.

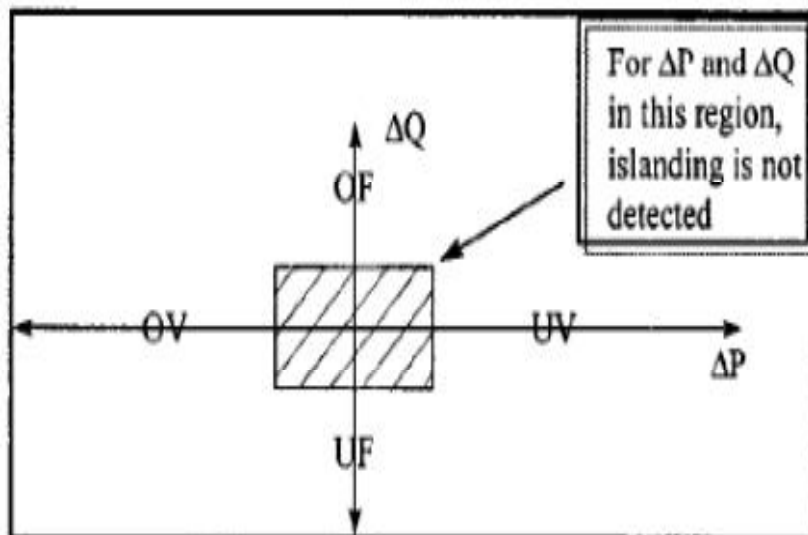
- 1) Τεχνικές παθητικής ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (passive methods)
- 2) Τεχνικές ενεργητικής ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (active methods)
- 3) Τεχνικές που υλοποιούνται από την πλευρά του κεντρικού δικτύου
- 4) Τεχνικές που βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου

Στο σχήμα 4.3.2.6.32 φαίνεται μια τυπική διασύνδεση ενός αντιστροφέα φβ με ένα τυπικό φορτίο σύνθετης αντίστασης και διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 4.3.2.6.32: Τυπική σύνδεση αντιστροφέα φβ στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το κοινό σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο και το τοπικό φορτίο ονομάζεται node a. Η ύπαρξη μετασχηματιστή δεν είναι απαραίτητη. Ο αντιστροφέας παρέχει ισχύ $P_{PV} + jQ_{PV}$, ενώ το τοπικό φορτίο στο μέρος όπου είναι εγκατεστημένος ο αντιστροφέας απορροφά φορτίο $P_{load} + jQ_{load}$. Έτσι η ροή ισχύος από και προς το δίκτυο είναι: $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$, και $\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$. Συνήθως οι αντιστροφείς των φβ παρέχουν μόνο ενεργό ισχύ, οπότε $\Delta Q = Q_{load}$

Ως βασικό κριτήριο εξέτασης των αντιστροφέων ισχύος για την ικανότητα τους στην αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας χρησιμοποιείται η ζώνη μη-ανίχνευσης (None Detection Zone, NDZ). Η ζώνη αυτή ορίζεται ως η περιοχή μέσα στην οποία ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία. Οι άξονες της περιοχής καθορίζονται με βάση τις τιμές $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$ και $\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$ της ισχύος η οποία ρέει από το ηλεκτρικό δίκτυο προς το σημείο σύνδεσης αντιστροφέα – δικτύου (δηλαδή στο φορτίο). Για μικρές τιμές εγχεόμενης ισχύος, όπως φαίνεται από το διάγραμμα, ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την διακοπή με το δίκτυο, εξακολουθώντας να τροφοδοτεί το φορτίο.



Σχήμα 4.3.2.6.33: Περιοχή στην οποία ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία (NDZ, none detection zone). Οριζόντιος άξονας: κατώτερο όριο επιτρεπτής τάσης, (αριστερά), ανώτερο όριο τάσης (δεξιά), κάθετος άξονας: κατώτερο όριο συχνότητας (κάτω), ανώτερο όριο συχνότητας(πάνω).

4.3.2.7 Χρόνος ζωής αντιστροφών ισχύος

Η πολυπλοκότητα της κατασκευής των αντιστροφών DC/AC, καθιστά αυτούς το πιο ευάλωτο σημείο από τα επιμέρους στοιχεία ενός μικροδικτύου. Μια σειρά από ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται, είναι αρκετά επιρρεπή στην αστοχία όταν αυτά λειτουργούν κοντά στις οριακές τους συνθήκες ή έστω με συνεχώς μεγάλα φορτία, καθώς και στα σφάλματα που παρουσιάζονται, ιδιαίτερα από την πλευρά του δικτύου. Στατιστικές μελέτες δείχνουν ότι τα τρανζίστορ ισχύος της γέφυρας PWM, τα βαρίστορ για την προστασία από τις υπερτάσεις και οι πυκνωτές είναι τα στοιχεία που κυρίως παρουσιάζουν τη μικρότερη αντοχή στο χρόνο ή στις εντατικές συνθήκες λειτουργίας. Μέχρι πρόσφατα η τυπική διάρκεια συνεχούς λειτουργίας μέχρι να παρουσιαστεί σφάλμα κυμαινόταν μέχρι το πολύ τα 5 έτη, περίοδος πολύ μικρή αν αναλογιστεί κανείς το κόστος των συσκευών αυτών και το γεγονός ότι εγκαθίσταται για να λειτουργούν για μακροπρόθεσμα χρονικά διαστήματα. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση από τις εταιρείες ηλεκτρονικών να αυξηθεί η αξιοπιστία των αντιστροφών, φθάνοντας ένα μέσο όριο των 10 ετών λειτουργίας πριν παρουσιαστεί σφάλμα.

Εκτός από την ποιότητα των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται καθοριστικής σημασίας είναι και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τον αντιστροφέα ισχύος. Για παράδειγμα, οι αντιστροφείς που έχουν μετασχηματιστή απομόνωσης χαμηλής συχνότητας, είναι πολύ λιγότερο επιρρεπείς στα σφάλματα διαρροής συνεχούς συνιστώσας ρεύματος από το δίκτυο, καθώς απομονώνουν τελείως την πλευρά του DC ηλεκτρικού μέρους από αυτό.

Αντίθετα, προβλήματα ενδέχεται να παρουσιαστούν τόσο στους αντιστροφείς που δεν χρησιμοποιούν καθόλου μετασχηματιστή απομόνωσης, όσο και σε αυτούς που χρησιμοποιούν υψίσυχνους μετασχηματιστές. Οι αντιστροφείς αυτοί είναι πιο επιρρεπείς σε σφάλματα συνεχούς ρεύματος που μπορεί να παρουσιαστούν, τα οποία και μπορούν άνετα να προκαλέσουν την καταστροφή πυκνωτών ή τρανζίστορ.

Σημαντικό ρόλο παίζει εξάλλου και το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίσταται ο αντιστροφέας. Από την πλευρά του δικτύου, μια τάση με μεγάλο ποσοστό αρμονικών μπορεί να προκαλεί ανεπιθύμητες καταστάσεις στον αντιστροφέα, το ίδιο μπορεί να συμβαίνει με τυχόν συχνές υπερτάσεις ή βραχυκυκλώματα. Αναπόφευκτα οι οριακές αυτές συνθήκες λειτουργίας όπως μεταφράζονται από τον αντιστροφέα μέχρι να βγει εκτός λειτουργίας από τις ανοχές του, μειώνουν το χρόνο ζωής. Παράλληλα το εξωτερικό περιβάλλον, ιδιαίτερα η αυξημένη θερμοκρασία επηρεάζει καθοριστικά όχι μόνο την απόδοση αυτού, αλλά και τον χρόνο ζωής του, καθώς θερμαίνονται περισσότερο όλα τα ηλεκτρονικά του εξαρτήματα. Γι' αυτό το λόγο και οι πιο εξελιγμένοι αντιστροφείς διαθέτουν έλεγχο μείωσης της ισχύος εξόδου τους με την αύξηση της θερμοκρασίας.

ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

Συχνά γίνεται η εγκατάσταση ηλεκτρονικών ελεγκτών και μετατροπέων στο κέντρο ελέγχου μαζί με τους διακόπτες, τις ασφάλειες και άλλου υλικού. Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει τις αναμενόμενες ακραίες θερμοκρασίες σε κατάσταση λειτουργίας ή ηρεμίας. Οποιαδήποτε τυπωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα πρέπει να σφραγιστούν για να προστατευτούν από την υγρασία και την σκόνη.



Εικόνα 4.3.2.7.34: Εγκατάσταση κέντρου ελέγχου σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.



Εικόνα 4.3.2.7.35: Τοποθέτηση του κέντρου ελέγχου και της συστοιχίας μπαταριών σε κοντέινερ.

Οι υψηλές θερμοκρασίες συντομεύουν την διάρκεια λειτουργικότητας του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Γι' αυτό τα περιβλήματα τους θα πρέπει να στηρίζονται σε σκιαζόμενους χώρους με ανακυκλωμένο αέρα. Η σκόνη είναι πρόβλημα για περιβλήματα με καλό εξαερισμό. Μερικά περιβλήματα έχουν ειδικά φίλτρα στα σημεία εισόδου του αέρα, τα οποία πρέπει να καθαρίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Καλό είναι να τοποθετηθούν και ειδικές σήτες που θα απαγορεύουν τα έντομα να κάνουν το περίβλημα κατοικία τους.

4.4 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές (μπαταρίες)

Ένα ακόμα σημαντικό υποσύστημα ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος σε σχέση με την εναποθήκευση και χρήση της ενέργειάς του είναι η μπαταρία. Η μπαταρία είναι απαραίτητη σε ένα τέτοιο σύστημα λόγω της μεταβαλλόμενης φύσης της εξόδου των ΦΒ γεννητριών. Έτσι, κατά την διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας η ΦΒ γεννήτρια τροφοδοτεί τα φορτία και η περίσσεια της ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται στην μπαταρία. Αντίθετα κατά την διάρκεια της νύχτας, ή κατά την διάρκεια μιας περιόδου χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, ενέργεια παρέχεται στα φορτία από την μπαταρία.

Οι συσσωρευτές αποτελούν θα λέγαμε το αδύναμο κρίκο κάθε αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό διότι ενώ είναι από τα πιο βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος, ταυτόχρονα είναι το πιο ευαίσθητο από όλα τα υπόλοιπα. Αν και το κόστος τους δεν είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις φβ γεννήτριες ή τους αντιστροφείς ισχύος, μπορεί να αποβεί μεγάλο αν δεν γίνεται προσεκτική χρήση τους, με το να μειώνεται δραστικά η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους και να χρειάζονται συνεχώς αντικατάσταση. Μελέτες δείχνουν ότι για ένα διάστημα 20 ετών η δαπάνη για τους συσσωρευτές ανέρχεται στο 55% του κόστους του συστήματος.

Οι μπαταρίες είναι χρήσιμες στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά απαιτούν μία περιοδική συντήρηση. Μοιάζουν με τις μπαταρίες των αυτοκινήτων, αλλά είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μας δίνουν περισσότερο από το αποθηκευμένο ρεύμα τους κάθε ημέρα. Τα υγρά τους πρέπει να ελέγχονται περιοδικά και πρέπει να προστατεύονται από υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορούμε να απαιτήσουμε από αυτές μετά την δύση του ήλιου ή σε συννεφιασμένο καιρό καθορίζεται από την παραγωγή των ΦΒ στοιχείων και το είδος/ποσότητα των μπαταριών. Η πρόσθεση επιπλέον μπαταριών και στοιχείων ανεβάζει το κόστος της επένδυσης, για αυτό τον λόγο πρέπει να γίνεται καλή μελέτη των ενεργειακών αναγκών πριν την εγκατάσταση του συστήματος για τον ορισμό του αποδοτικότερου μεγέθους του συστήματος. Εάν οι ανάγκες σε ενέργεια αλλάξουν η προσθήκη και άλλων μερών του συστήματος είναι εφικτή και απλή.

Η μπαταρία είναι μια συσκευή η οποία αποθηκεύει χημική ενέργεια και την αποδεσμεύει με τη μορφή ηλεκτρισμού. Εδώ εκτός από τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας των συσσωρευτών θα εξεταστούν και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται σε φβ συστήματα.

4.4.1 Αρχή λειτουργίας και είδη συσσωρευτών

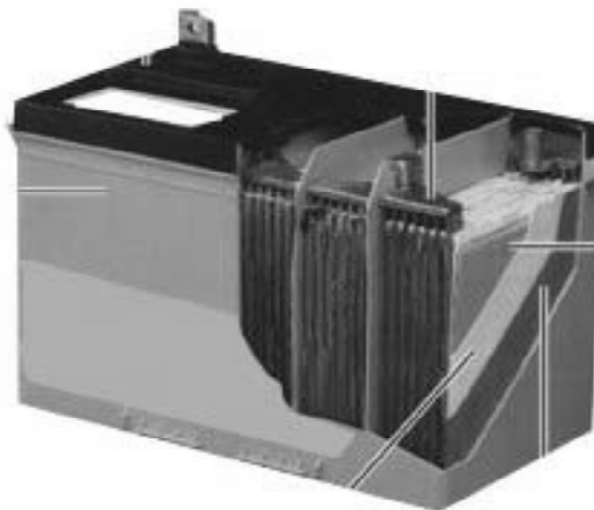
Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και, συνήθως, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα να αποταμιεύουν ενέργεια ανά πάσα στιγμή ή όχι είναι αυτή που χωρίζει τους συσσωρευτές στις δύο κυριότερες κατηγορίες. Στην κατηγορία των πρωτεύοντων (primary) συσσωρευτών ανήκουν αυτοί που έχουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια την οποία και μπορούν να την αποδώσουν ως ηλεκτρική, δεν μπορούν όμως να επαναφορτιστούν. Οι τυπικές μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και επειδή δεν μπορούν να επαναφορτιστούν δεν είναι λειτουργικές στα φβ συστήματα. Αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των δευτερευόντων (secondary) συσσωρευτών. Η δυνατότητα τους να επαναφορτίζονται είναι αυτή που τους κάνει κατάλληλους για φβ συστήματα και ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξείδιου.

Υπάρχουν όμως, διάφοροι τύποι συσσωρευτών και ανάλογα με τον τύπο των ηλεκτροδίων, παίρνουν το όνομά τους. Έτσι για παράδειγμα υπάρχουν οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, αργύρου-ψευδαργύρου και μολύβδου-οξέος. Βέβαια ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος συσσωρευτών στα φβ συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (τα ηλεκτρόδια των συσσωρευτών αυτών αποτελούν πλάκες από καθαρό μόλυβδο ή κράματά του για μεγαλύτερη αντοχή, βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος) και αυτό συμβαίνει διότι έχουν μια σειρά από

πλεονεκτήματα και μικρό σχετικά κόστος. Οι συσσωρευτές μολύβδου αποτελούνται από κυψελίδες συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά, δηλαδή πρόκειται για ζεύγη μονωμένων μεταξύ τους πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέως. Ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των κυψελίδων καθορίζουν και τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν ανάγκη προστασίας από βαθιές εκφορτίσεις οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν τα στοιχεία της μπαταρίας. Παράλληλα όταν ξεπεραστεί η πλήρης φόρτιση, τότε η μπαταρία παράγει αέρια. Τα βαριά αέρια οδηγούν σε απώλεια των υγρών τους (όταν ο συσσωρευτής είναι υγρού τύπου) που προκαλούν τη δημιουργία ηλεκτρολυτικών αερίων μέσω διαρροής υδρογόνου. Εάν εξαιτίας της απώλειας των υγρών, μέρη των πλακών της μπαταρίας δεν είναι καλυμμένα με ηλεκτρολύτη, τότε μπορεί να προκληθεί ζημιά στη μπαταρία.

Οι μπαταρίες έχουν ως σκοπό την κεντρική αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παράγεται ή καταναλώνεται. Αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια προς κατανάλωση μετά από ένα πεπερασμένο χρόνο και προσφέρουν την δυνατότητα να παραδίδουν μεγάλα ποσά ρεύματος σε σχετικά μικρές χρονικές περιόδους. Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος είναι το είδος μπαταριών που συναντάμε πιο συχνά στις εγκαταστάσεις ενός ΦΒ συστήματος. Οι μπαταρίες αυτού του τύπου αποτελούνται από πλάκες μολύβδου ή οξειδίου του μολύβδου που χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη ή ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υγρό ή διάλυμα θειικού οξέος και νερού.



Σχήμα 4.4.1.36: Ηλεκτρικός Συσσωρευτής

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι μπαταριών ή στοιχείων μολύβδου - οξέος:

Βαθύ κύκλου, ρηχού κύκλου και SLI (εκκίνηση, ηλεκτρική εκκένωση, ανάφλεξη).

Οι SLI μπαταρίες αποτελούν τμήμα των διαφόρων οχημάτων και είναι γενικώς ακατάλληλες για εφαρμογές με ΦΒ τεχνολογία. Οι μπαταρίες βαθύ κύκλου σχεδιάζονται με σκοπό ένα μεγάλο ποσοστό από την αποθηκευμένη ενέργεια τους να αφαιρείται σε σταθερό ρυθμό. Από την άλλη μεριά οι ρηχού κύκλου μπαταρίες δίνουν την δυνατότητα της σπάνιας εφεδρικής υπηρεσίας, με ποσοστό χρήσης μόνο του 15 – 20 % της αποθηκευμένης ενέργειάς τους. Παράδειγμα χρήσης των μπαταριών ρηχού κύκλου είναι οι εφεδρικές μπαταρίες των νοσοκομείων και των τηλεφώνων. Άρα συμπερασματικά τα στοιχεία βαθύ κύκλου είναι η καλύτερη επιλογή για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται από τις ΦΒ συστοιχίες.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται σε αμπερώρες(Ah) σε δοσμένο όριο εκφόρτισης ως την πλήρη εκφόρτιση. Μια άλλη λειτουργία της μπαταρίας είναι το ότι προσφέρει σταθερή τάση σε αντίθεση με τις ταλαντώσεις των τιμών τάσης εξόδου μιας συστοιχίας. Δηλαδή μια απευθείας σύνδεση της συστοιχίας με το φορτίο, θα εκθέσει το δεύτερο σε τάση υψηλότερη ή χαμηλότερη από την κατάλληλη. Οι μπαταρίες λειτουργούν εντός πιο στενού εύρους διακύμανσης της τάσης από ότι οι ΦΒ βαθμίδες και μπορούν να δράσουν για να κρατήσουν την τάση σε τιμή πιο κατάλληλη για το σύστημα.

Μια μπαταρία με ελεύθερο υγρό ηλεκτρολύτη ονομάζεται μπαταρία «πλημμυρισμένου» τύπου και έχει ειδικές υποδοχές για να συμπληρώνουμε περιοδικά τον ηλεκτρολύτη, όταν αυτό βλέπουμε ότι είναι απαραίτητο. Ένας άλλος τύπος μπαταρίας μολύβδου – οξέος είναι η σφραγισμένου τύπου. Οι μπαταρίες **τύπου τζέλ** περιέχουν τον ηλεκτρολύτη σε μορφή τζέλ, ένα μείγμα ηλεκτρολύτη και σιλικόνης που αποτελεί ένα ακινητοποιημένο τζέλ.

Τέλος υπάρχει και ο σφραγισμένος τύπος μπαταρίας **απορροφητικού γυαλιού ματ**. Αυτές οι μπαταρίες σχεδιάζονται κατασκευάζοντας την μπαταρία από επιστρώσεις χαρτιού από **απορροφητικό φάιμπερ γυαλί** μεταξύ των πλακών. Ο υγρός ηλεκτρολύτης απορροφάται εντός του χαρτιού και ακινητοποιείται.



Σχήμα 4.4.1.37: Συστοιχίες μπαταριών από φωτοβολταϊκά συστήματα.

4.4.2 Τύποι συσσωρευτών

Τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των πλακών κατηγοριοποιούν τους συσσωρευτές μολύβδου και νικελίου σε υποκατηγορίες. Αυτοί οι συνδυασμοί, μαζί με άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, καθορίζουν τις ιδιαιτερότητες των επιδόσεων τους και τις εφαρμογές για τις οποίες είναι περισσότερο κατάλληλοι. Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι:

Οι συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb), οι συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca) οι οποίοι χωρίζονται σε υγρού καταλύτη με ανοικτή ή με σφραγισμένη βαλβίδα εξαέρωσης, οι υβριδικοί συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου / μολύβδου-ασβεστίου, οι μολύβδου με δεσμευμένο καταλύτη που μπορεί να είναι τύπου τζέλ ή απορροφητικού γυαλιού ματ (gelled ή absorbed glass material (AGM)).

Για εφαρμογές φβ συστημάτων, όπου οι ανάγκες κατανάλωσης πολύ σπάνια συμβαδίζουν με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, περισσότερο κατάλληλοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν τη δυνατότητα να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς να αλλοιώνεται η χωρητικότητα τους και να μειώνεται η διάρκεια ζωής. Αναλόγως του φορτίου, άλλοτε είναι απαραίτητη η δυνατότητα παροχής εντόνου ρεύματος για μικρά χρονικά διαστήματα και άλλοτε η παροχή μίας κανονικής τιμής ρεύματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Συχνά οι απαιτήσεις του φορτίου σε κατανάλωση δεν είναι τόσο μεγάλες όσο η ανάγκη για κατανάλωση να παρέχεται με αξιοπιστία και για μεγάλες χρονικές περιόδους και άλλες φορές ο τύπος της εγκατάστασης είναι τόσο δυσπρόσιτος που προτιμώνται συσσωρευτές με μικρές ανάγκες συντήρησης και επίβλεψης.

Ιδιαίτερα για αυτόνομα φβ συστήματα, όπου δεν υπάρχει εναλλακτική λύση παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και όπου οι μεταβολές της ηλιοφάνειας μπορούν να είναι έντονες και μακρόχρονες, απαραίτητοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μπορούν να υποστούν βαθιά εκφόρτιση και συχνά απαιτείται μία καλή σχέση κόστους και διάρκειας ζωής. Για ένα τέτοιο σύστημα, καλή επιλογή θα αποτελούσε ένας συσσωρευτής μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sd). Αυτοί είναι συσσωρευτές με εξαιρετικά χαρακτηριστικά, όσο αφορά τις δυνατότητες βαθιάς εκφόρτισης και υψηλού ρυθμού εκφόρτισης. Έχουν, επίσης, μεγάλη διάρκεια ζωής και υφίστανται μικρή διάχυση των ενεργών υλικών τους. Μειονέκτημα τους είναι ο μεγάλος βαθμός αυτοεκφόρτισης που υφίστανται και που οδηγεί στην ανάγκη να υπερφορτίζονται με αποτέλεσμα τη μεγάλη απώλεια υγρών που εξαρτάται και από τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Είναι συνήθως συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη, με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού και για τον λόγο αυτό απαιτείται συχνή αναπλήρωση των υγρών. Η κατάσταση τους μπορεί εύκολα να ελεγχθεί μετρώντας την ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη.

Πολύ δημοφιλής επιλογή για αυτόνομα φβ συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte Lead-Acid Batteries), λόγω της στεγανότητας τους και της ευκολίας μετακίνησης που παρουσιάζουν. Έχουν βαλβίδα εξαέρωσης, που ανοίγει σε ορισμένη πίεση όταν υπερφορτιστούν, για να απελευθερωθούν τα αέρια που δημιουργήθηκαν όμως, δεν υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του ηλεκτρολύτη. Το γεγονός ότι δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης (ούτε και δυνατότητα), σε συνδυασμό με την ευκολία στη μετακίνηση, τις καθιστά ιδανικές για συστήματα σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα μέρη. Εκτός από το πρόβλημα της υπερφόρτισης, η απώλεια ηλεκτρολύτη μπορεί να επιταχυνθεί λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα της αναπλήρωσης του, ειδικά μέτρα πρέπει να ληφθούν. Είναι δυνατόν να γίνει θερμοκρασιακή αντιστάθμιση και ρύθμιση ακριβείας ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση και η υπερβολική εκφόρτιση και μέσω του περιορισμού του φορτίου να αποφευχθεί ο μεγάλος ρυθμός εκφόρτισης. Έτσι μειώνεται σημαντικά η απώλεια ηλεκτρολύτη και αυξάνεται αντιστοίχως η διάρκεια ζωής. Μέσω του αλγορίθμου φόρτισης αντιμετωπίζεται η ευαισθησία που παρουσιάζουν οι συσσωρευτές αυτοί στη διαδικασία φόρτισης. Οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη δεν αντιμετωπίζουν τόσο μεγάλο πρόβλημα μείωσης χωρητικότητας σε ψυχρότερο περιβάλλον όσο αυτοί του υγρού ηλεκτρολύτη, παρέχονται σε δύο τύπους (gelled electrolyte, AGM) και πάνω από τα μισά απομακρυσμένα μικρά φβ συστήματα τους χρησιμοποιούν.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι εκτός από τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των ηλεκτροδίων, άλλα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, όπως ο τρόπος κατασκευής τους ή οι σχετικές διαστάσεις, ο αριθμός και η γεωμετρία των πλακών τους, μπορούν να τους κατατάξουν

σε ειδικότερες κατηγορίες. Για παράδειγμα, συσσωρευτές μολύβδου με θετικές πλάκες μεγαλύτερης επιφάνειας από αυτή των αρνητικών, αναφέρονται με το συνοδευτικό σύμβολο GroEH, ενώ για σπλισμένα θετικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται το συνοδευτικό OrzS. Έτσι, το συνοδευτικό 5OrzS, υποδεικνύει κυψελίδα με 5 θετικές πλάκες, τύπου OrzS.

4.4.3 Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας συσσωρευτών

Δομική μονάδα του συσσωρευτή είναι η κυψελίδα (cell), και μία εποπτική παρουσίαση της μονάδας αυτής δίνεται ανωτέρω σχήμα 4.4.3.38.

Η κυψελίδα είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα της μπαταρίας, συνίσταται από μία θετική και μία αρνητική πλάκα που είναι βυθισμένες σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη και περικλείονται σε ένα δοχείο. Με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος θα γίνει μία περιγραφή των συστατικών μερών της κυψελίδας ώστε να γίνεται στη συνέχεια, πιο εύκολα και κατανοητά η αναφορά σε σχετικά θέματα.



Σχήμα 4.4.3.38: Κυψελίδα συσσωρευτή

Ενεργό Υλικό (Active Material): Το ενεργό υλικό είναι ένας συνδυασμός υλικών τα οποία από τη θετική και την αρνητική πλάκα, είναι οι βασικοί συντελεστές της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στην κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού σε μία μπαταρία είναι ανάλογη της χωρητικότητας της. Σε μία τυπική μπαταρία μολύβδου, όπως είναι και η περίπτωση της μπαταρίας που χρησιμοποιούμε, το ενεργό υλικό είναι συνδυασμός διοξειδίου του μολύβδου (PbO_2) στη θετική πλάκα με μεταλλικό πορώδη μόλυβδο (Pb) στην αρνητική, που αντιδρούν σε διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.

Ηλεκτρολύτης: Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγώγιμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ιοντικής ανταλλαγής ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, επάνω στις πλάκες της κυψελίδας. Στις μπαταρίες μολύβδου είναι διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) σε υγρή μορφή ή σε μορφή gel, ενώ στις μπαταρίες νικελίου (Ni) είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Σε περιπτώσεις σαν τη δική μας, που ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό διάλυμα, συχνά, απαιτείται η αναπλήρωση νερού λόγω του φαινομένου της εξαέρωσης.

Πλέγμα (Grid): Σε μία μπαταρία μολύβδου, το πλέγμα συνήθως είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου το οποίο υποστηρίζει το ενεργό υλικό επάνω στις πλάκες και είναι αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικά κράματος όπως το αντιμόνιο (Sb) ή το ασβέστιο (Ca) συχνά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη μηχανική αντοχή των πλακών και έχουν χαρακτηριστική επίδραση στις επιδόσεις της μπαταρίας.

Οι συσσωρευτές του συστήματος έχουν μικρή πρόσμιξη αντιμονίου ($Sb < 3\%$) στα θετικά ηλεκτρόδια, με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν διατηρούμενοι σε άριστη κατάσταση συνεχώς για 3 χρόνια σε παράλληλη, standby λειτουργία όταν τις διαπερνάει ρεύμα 2,23 V/κελί και βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

Πλάκες (Plates): Οι πλάκες, που συνίστανται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό, είναι το βασικό στοιχείο της μπαταρίας και συνήθως αναφέρονται ως ηλεκτρόδια. Γενικά, υπάρχει ένα πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών, συνδεδεμένων παράλληλα, μέσα σε μία κυψελίδα. Το πάχος τους και η σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των αρνητικών και των θετικών πλακών, έχουν καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

Διαχωριστής (Separator): Ο διαχωριστής είναι ένα πορώδες απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών της μπαταρίας που εμποδίζει την αγώγιμη επαφή μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου. Σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωριστής εφαρμόζεται σαν φάκελος και περικλείει ολόκληρο το ηλεκτρόδιο, εμποδίζοντας τη δημιουργία βραχυκυκλώματος, λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

4.4.4 Όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών.

Η δυνατότητα αποταμίευσης ενέργειας, οι περιορισμοί στο ρεύμα που μπορεί να παρασχεθεί προς κατανάλωση από έναν συσσωρευτή, η συμπεριφορά του σε σχέση με τη θερμοκρασία και τα όρια γενικότερα της λειτουργίας του, θα είναι το θέμα των επόμενων παραγράφων.

1. Εκφόρτιση και επιτρεπόμενος βάθος εκφόρτισης.

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge ή DOD) είναι το μέγιστο ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποδοθεί από τη μπαταρία. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής ή τάση βάθους εκφόρτισης και από τον ρυθμό εκφόρτισης. Στα τυπικά φβ συστήματα, προβλέπεται μία τάση αποκοπής του φορτίου από τη συσκευή του ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και έτσι καθορίζεται το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης για δεδομένο ρυθμό εκφόρτισης. Οι τιμές του επιτρεπόμενου βάθους εκφόρτισης (DOD) μπορούν να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας.

Όπως προαναφέρθηκε η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή επηρεάζεται με το ρεύμα εκφόρτισης. Όταν ο συσσωρευτής εκφορτίζεται με ένα ρεύμα μικρής έντασης μπορεί υπό κανονικές συνθήκες να δώσει το 80% της αποθηκευμένης του ενέργειας. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όσο το ρεύμα που απορροφάται μεγαλώνει.

Ένας πρακτικός κανόνας για το κανονικό ρεύμα εκφόρτισης που μπορεί να δίνει ένας συσσωρευτής αναφέρει ότι αυτό πρέπει να μην είναι μεγαλύτερο από $C/10$, όπου C η χωρητικότητα του συσσωρευτή σε Ah. Ομοίως ο ρυθμός φόρτισης αυτού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των ορίων $C/20$ και $C/10$.

Ωστόσο, ακόμη πιο σημαντικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή είναι ο βαθμός στον οποίο εκφορτίζεται (DOD, depth of discharge). Διάφορες τεχνολογίες συσσωρευτών επιτρέπουν ένα βαθμό εκφόρτισης από 10% έως 100%. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τη δομή του συσσωρευτή. Μια μεγάλη εκφόρτιση αυτού, προκαλεί σημαντική μεταβολή στη μάζα των πλακών του, πράγμα που με τη σειρά του συντελεί στη διάβρωση των πλακών και στην επικάλυψη μέρους του υλικού που σχηματίζεται από την εκφόρτιση στο κάτω μέρος του δοχείου. Ουσιαστικά, ο συσσωρευτής χάνει μέρος του ενεργού υλικού του μολύβδου που υπάρχει στη σχάρα των πλακών του.

Αποτέλεσμα είναι η μείωση τόσο της ζωής όσο και της χωρητικότητάς του, καθώς λιγότερο υλικό παραμένει για να συμβάλει στη χημική αντίδραση της φόρτισης. Η χωρητικότητά του μειώνεται επίσης και λόγω της αύξησης της εσωτερικής του αντίστασης, αφού μέρος του ρεύματος εκφόρτισης καταναλώνεται πάνω σ' αυτήν. Μεγάλη ποσότητα ιζήματος είναι δυνατόν να προκαλέσει βραχυκύκλωμα των δύο πλακών, καταστρέφοντας έτσι τελείως το στοιχείο.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνεται η πυκνότητα του διαλύματος του ηλεκτρολύτη, δηλαδή μειώνεται το ειδικό του βάρος. Το φαινόμενο της μείωσης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για λειτουργία του συσσωρευτή σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν τη θερμοκρασία στερεοποίησης του νερού (0°C). Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η συγκέντρωση ηλεκτρολύτη στο διάλυμα είναι περίπου 35% κατά βάρος και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος είναι πολύ χαμηλό (περίπου -60°C). Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται, το διάλυμα του ηλεκτρολύτη αραιώνεται και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος πλησιάζει το σημείο στερεοποίησης του νερού (0°C). Υπάρχει λοιπόν το ενδεχόμενο της στερεοποίησης του με αποτέλεσμα τη διαστολή και την πιθανή διάρρηξη των τοιχωμάτων του δοχείου της κυψελίδας.

Για να αποφευχθεί αυτή η εξέλιξη, το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης πρέπει να μειώνεται θέτοντας την τάση αποκοπής του φορτίου στην συσκευή ρυθμιστή φόρτισης σε κατάλληλο σημείο. Το αποτέλεσμα θα είναι ο συσσωρευτής να μην εκφορτίζεται πλήρως και η θερμοκρασία στερεοποίησης να διατηρείται χαμηλά. Το κόστος θα είναι η μείωση της αυτονομίας του συστήματος μπαταρίας-συσσωρευτή.

Για να διατηρείται η αυτονομία, η χωρητικότητα του συσσωρευτή πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τη μείωση της σε χαμηλές θερμοκρασίες όσο και το βάθος εκφόρτισης DOD στις θερμοκρασίες αυτές. Η τάση του βάθους εκφόρτισης σχετίζεται με τον ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

Για την αποφυγή της βαθιάς εκφόρτισης των συσσωρευτών (πάνω από 80%) χρησιμοποιούνται συνήθως στα αυτόνομα ηλιακά συστήματα, ελεγκτές διακοπής της τροφοδοσίας όταν η τάση του συσσωρευτή πέσει κάτω από ένα καθορισμένο σημείο (low voltage disconnect).

Καθοριστικό στοιχείο για το επιτρεπόμενο μέγιστο βάθος εκφόρτισης είναι το πάχος των πλακών. Όσο πιο παχιές είναι αυτές τόσο βαθύτερη εκφόρτιση μπορούν να αντέξουν χωρίς να χάσουν ενεργό ουσία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συσσωρευτών με μικρό πάχος είναι οι κοινοί συσσωρευτές εκκίνησης που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα. Επειδή αυτό που χρειάζεται σ' αυτά είναι ένα μεγάλο ρεύμα για σύντομο χρονικό διάστημα προκειμένου να τροφοδοτηθεί η μίζα, κατασκευάζονται με πολλές λεπτές πλάκες, ώστε να υπάρχει μεγάλη επιφάνεια ενεργού ουσίας, άρα και μεγαλύτερη ικανότητα παροχής υψηλού ρεύματος.

Αντίθετο παράδειγμα αποτελούν οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτροκίνητα οχήματα και τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών, οι οποίες έχουν λίγες και χοντρές πλάκες, ικανές να δώσουν μικρό μεν ρεύμα εξόδου αλλά για πολύ μεγαλύτερο διάστημα σε σύγκριση με των αυτοκινήτων.

2. Αυτοεκφόρτιση.

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση της κατάστασης φόρτισης (SOC: state of charge), χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποια κατανάλωση.

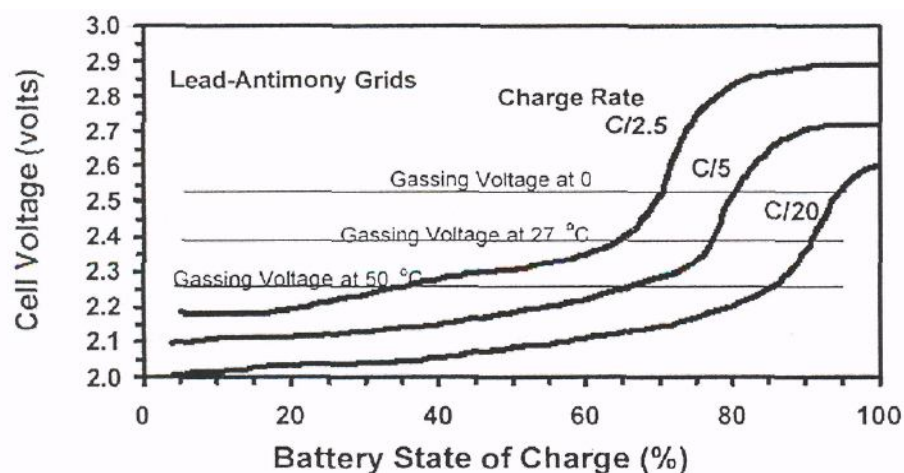
Τα αιτία είναι οι εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί ή άλλες απώλειες της μπαταρίας και σημαντικοί παράγοντες στη διαδικασία της αυτοεκφόρτισης είναι τα ενεργά υλικά και τα στοιχεία του κράματος του πλέγματος που επιλέχθηκαν κατά τον σχεδιασμό του συσσωρευτή. Τυπικό μέγεθος αυτοεκφόρτισης είναι η απώλεια του 0.7% της κατάστασης φόρτισης SOC ανά ημέρα και για τον λόγο αυτό, οι συσσωρευτές πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει κατανάλωση.

- Η αυτό-εκφόρτιση του συσσωρευτή: **Πρόκειται για την απώλεια ηλεκτρικού φορτίου των φορτισμένων συσσωρευτών εξαιτίας της κατανάλωσης ενός τμήματος της χωρητικότητάς τους από παρασιτικές χημικές αντιδράσεις.** Ο ρυθμός της αυτό-εκφόρτισης εξαρτάται από τη σύνθεση των ηλεκτροδίων του συσσωρευτή και αυξάνει με την ηλικία του.

3. Φόρτιση.

Η φόρτιση του συσσωρευτή είναι η διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τον συσσωρευτή. Οι μέθοδοι φόρτισης που εφαρμόζονται από τους ρυθμιστές φόρτισης στα φβ συστήματα, διαφέρουν γενικά από αυτές που εφαρμόζουν οι κατασκευαστές για να καθορίσουν τις επιδόσεις της μπαταρίας.

Οι προδιαγραφές δεν περιορίζουν κατά κανόνα το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή εφόσον δεν γίνει υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Ωστόσο, η τάση εκλύσεως αερίων γίνεται μικρότερη καθώς το ρεύμα φόρτισης γίνεται μεγαλύτερο. Γενικά η έκλυση αερίων είναι αναπόφευκτη αφού συμβαίνει τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτισης όσο και μετά την υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Για σωστή φόρτιση του συσσωρευτή ένα σωστό σημείο ισορροπίας πρέπει να αναζητείται μεταξύ της μέγιστης δυνατής φόρτισης και της τάσης εκλύσεως αερίων, αφού και οι δύο είναι παράγοντες που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την επιδιωκόμενη κατάσταση φόρτισης SOC είναι η - θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή, μειώνεται όμως η τάση εκλύσεως αερίων. Έτσι, η μέγιστη κατάσταση φόρτισης SOC που μπορεί να επιτευχθεί σε δεδομένη θερμοκρασία, κατά κάποιο τρόπο φράσσεται από την τάση εκλύσεως αερίων. Στο διάγραμμα του σχήματος 4.4.4.39 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σχέση της τάσης ανά κυψελίδα και της κατάστασης φόρτισης SOC που μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (C/2.5, C/5, C/20) καθώς και οι τάσεις εκλύσεως αερίων σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας για συσσωρευτή μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb).



Σχήμα 4.4.4.39: Διάγραμμα τάσης ανά κυψελίδα και της κατάστασης φόρτισης (cell voltage – SOC) και επίπεδα τάσης εκλύσεως αερίων για συσσωρευτή Pb-Sb.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται προφανής η ανάγκη αντιστάθμισης ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή και της κατάστασης πλήρους φόρτισης. Η μείωση της εκλύσεως αερίων για συσσωρευτές δεσμευμένου ηλεκτρολύτη είναι σημαντική και είναι αυτή που καθορίζει τη διάρκεια ζωής τους.

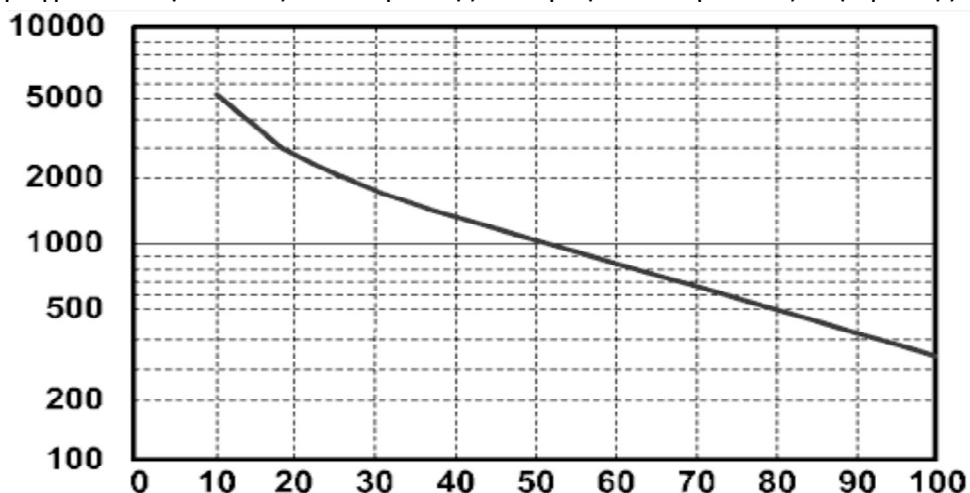
• Η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή: Είναι ο λόγος μεταξύ της παρούσας χωρητικότητας και της ονομαστικής χωρητικότητας του συσσωρευτή: $SOC = q / q_{max}$

Οι τιμές που παίρνει η κατάσταση φόρτισης κυμαίνονται μεταξύ $0 \leq SOC \leq 1$, ενώ εάν $SOC=1$ η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ εάν $SOC=0$ η μπαταρία είναι πλήρως αφόρτιστη.

▪ Κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης

Στα βασικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα συσσωρευτή συγκαταλέγεται εκτός από την ονομαστική του χωρητικότητα και το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης, ο μέγιστος αριθμός κυκλικών φορτίσεων-επαναφορτίσεων που μπορεί να δεχθεί μέχρι να χάσει την ονομαστική του χωρητικότητα. Το στοιχείο αυτό αποκτά ύψιστη σημασία στα αυτόνομα φβ συστήματα, καθώς οι συσσωρευτές τροφοδοτούν τις καταναλώσεις όχι μόνο κάθε νύχτα, αλλά και όταν η παραγόμενη ενέργεια από τους συλλέκτες δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Έχει λοιπόν μεγάλη σημασία να είναι γνωστός ο αριθμός των πλήρων φορτίσεων-εκφορτίσεων κατά την εγκατάσταση και λειτουργία ενός αυτόνομου φβ συστήματος. Σε γενικές γραμμές θα λέγαμε ότι ο αριθμός αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος εκφόρτισης στον οποίο αυτοί πραγματοποιούνται. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο μειώνεται ο αριθμός των κύκλων πλήρους φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να δεχθεί ένας συσσωρευτής. Αυτό διότι, κατά τη διαδικασία εκφόρτισης προκαλείται μια διαστολή μάζας του υλικού, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μέρος αυτού να αποκολλάται και να πέφτει στον πυθμένα του συσσωρευτή. Έτσι μειώνεται σιγά σιγά η ενεργός ουσία των πλακών. Ομοίως σε πολλές περιπτώσεις και η φόρτιση καταπονεί τον συσσωρευτή, ιδιαίτερα όταν αυτός υπερφορτίζεται προκειμένου να φορτίζονται πλήρως όλα τα στοιχεία του. Η συνεπαγόμενη αύξηση της περιεκτικότητας του ηλεκτρολύτη σε στάθμες πάνω από $1,28 \text{ gr/cm}^3$ συμβάλλει στη διάβρωση των πλακών, άρα και στην μείωση της ενεργού τους ουσίας. Επίσης παρατηρούνται φαινόμενα στρέβλωσης των πλακών με την αύξηση της θερμοκρασίας, πράγμα που μπορεί να καταστρέψει τελείως ένα στοιχείο.

Παρακάτω φαίνεται ένα σχεδιάγραμμα των διαδοχικών κύκλων(σχήμα 4.4.4.40) τους οποίους μπορεί να πραγματοποιήσει ένας συσσωρευτής συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης.

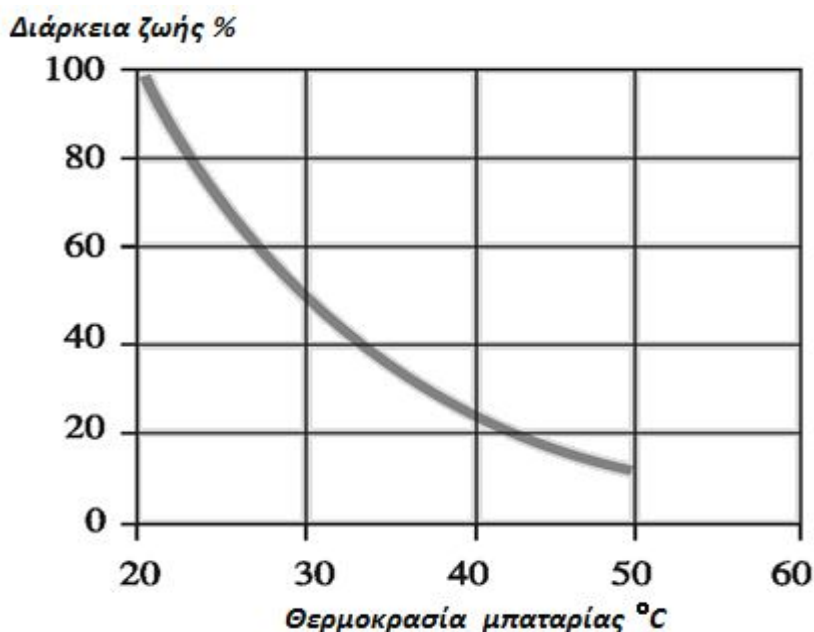


Σχήμα 4.4.4.40: Αριθμός κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης για συσσωρευτές SLI (αυτοκινήτου)

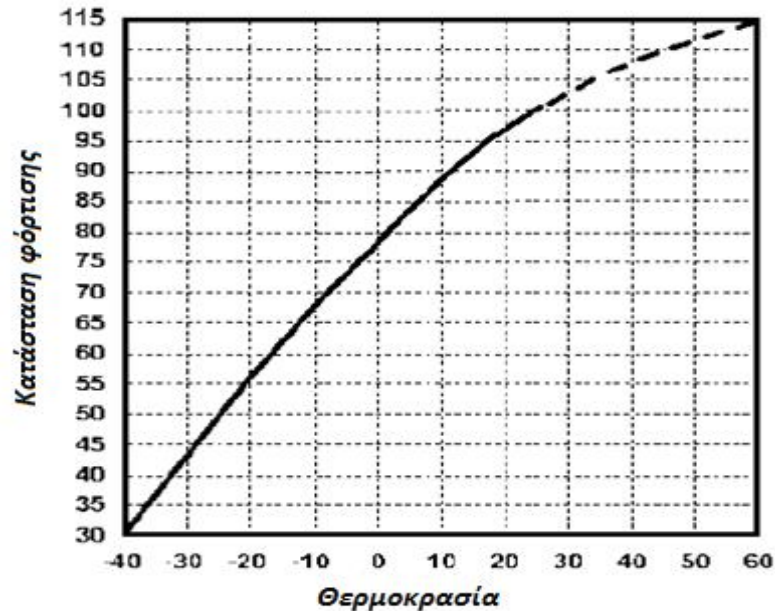
- Παράγοντες που επιδρούν στην φόρτιση – εκφόρτιση των συσσωρευτών και στην διάρκεια ζωής τους.

Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν σε μια θερμοκρασία αναφοράς για τις μετρήσεις η οποία είναι 25°C. Ωστόσο όλη η συμπεριφορά ενός συσσωρευτή επηρεάζεται σημαντικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αναφοράς η χωρητικότητα του συσσωρευτή αυξάνει, μειώνεται ωστόσο η διάρκεια ζωής του καθώς επιταχύνονται οι ρυθμοί διάβρωσής του. Αντίθετα σε μικρές θερμοκρασίες (π.χ. το χειμώνα) ναι μεν μειώνεται η συνολική ενέργεια που μπορεί αυτός να αποθηκεύσει αλλά αυξάνεται η διάρκεια ζωής του. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην άμεση επίδραση της θερμοκρασίας στην εσωτερική αντίσταση και στην πυκνότητα του ηλεκτρολύτη. Μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η διείδυση αυτού στους πόρους των ενεργών υλικών των πλακών. Παράλληλα, μειώνεται η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη (άρα αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή), μειώνοντας έτσι και την απόδοση αυτού.

Παρακάτω δίνεται ένα σχεδιάγραμμα του ποσοστού φόρτισης ενός συσσωρευτή συναρτήσει της θερμοκρασίας του. Πολλοί ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών έχουν ειδικό κύκλωμα που μετρά την θερμοκρασία του συσσωρευτή ώστε να ρυθμίζουν κατάλληλα τη στάθμη φόρτισής του. Η ρύθμιση αυτή αντιστοιχεί σε 0,005Volt/°C, πέρα από το σημείο των 25°C. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία προσθέτουμε αυτή την τάση στα όρια φόρτισης, ενώ όσο αυξάνεται τη μειώνουμε.



Σχήμα 4.4.4.1: Διάρκεια ζωής συσσωρευτή ως ποσοστό της κανονικής του διάρκειας ζωής στην θερμοκρασία των 20°C, συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας



Σχήμα 4.4.42: Κατάσταση φόρτισης ενός συσσωρευτή (SOC%), συναρτήσεως της θερμοκρασίας

Μια γενική παρατήρηση είναι επίσης ότι σε περιπτώσεις όπου το περιβάλλον στο οποίο θα τοποθετηθεί ο ηλεκτρολύτης είναι πολύ θερμό, συνήθως η αραίωση του ηλεκτρολύτη με νερό είναι λίγο μεγαλύτερη από τη συνήθη των $1,28 \text{ gr/cm}^3$. Αντίθετα σε ψυχρά κλίματα, επιλέγεται πυκνότερο διάλυμα ηλεκτρολύτη, εξασφαλίζοντας παράλληλα κατ' αυτό τον τρόπο και την αποφυγή της πήξης του.

4. Ο χρόνος ζωής του συσσωρευτή:

Είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης που η μπαταρία μπορεί να αντέξει πριν αυτή χάσει το 20% της ονομαστικής της χωρητικότητας. Ο πραγματικός χρόνος ζωής ενός συσσωρευτή είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια, αφού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες χρήσης του, τη θερμοκρασία λειτουργίας του, το πλήθος των διαδοχικών κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, το βάθος εκφόρτισης κ.α.

Μάλιστα όσο βαθύτερη είναι η εκφόρτιση τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος ζωής παρέχοντας το ίδιο ρεύμα εκφόρτισης. Η τιμή του χρόνου ζωής κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των 500 και 1500 κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, με ακριβή στοιχεία να παρέχονται από τον κατασκευαστή.

- Άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών

Δεδομένης της μεγάλης ευαισθησίας που παρουσιάζει ο συσσωρευτής ως μια ηλεκτροχημική διάταξη είναι πολύ σημαντικό να καταγραφούν οι πιο συνηθισμένες αιτίες που συμβάλλουν στη μείωση της ζωής του, κυρίως στα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα.

Ήδη αναφέρθηκε ότι η εκφόρτιση των συσσωρευτών πέρα από την επιτρεπόμενη από τον κατασκευαστή του τιμή, μειώνει δραστικά τη χωρητικότητα και τη ζωή του. Το ίδιο συμβαίνει όταν ο συσσωρευτής δεν φορτίζεται παραπάνω από τα επιτρεπόμενα όρια. Η πιο συνηθισμένη ωστόσο αιτία αστοχίας είναι η φόρτιση του με μικρότερες τιμές ή η παραμονή του σε επίπεδα χαμηλού βαθμού φόρτισης για μεγάλο διάστημα. Το φαινόμενο αυτό έχει να κάνει με τη **θειίκωση** των πλακών.

Υπό κανονικές συνθήκες, ο θειικός μόλυβδος που δημιουργείται κατά την εκφόρτιση στην επιφάνεια των πλακών έχει άμορφη σύσταση (λεπτή σκόνη) και μετατρέπεται εύκολα σε πορώδη μόλυβδο και υπεροξειδίο του μολύβδου κατά τη φόρτιση.

Όταν όμως ο συσσωρευτής έχει χαμηλό βαθμό φόρτισης για διάστημα μεγαλύτερο των 15 περίπου ημερών, ο άμορφος αυτός θειικός μόλυβδος μετατρέπεται αργά σε κρυσταλλικό, και αυτή η διαδικασία ονομάζεται θειίκωση. Ο κρυσταλλικός όμως θειικός μόλυβδος είναι μονωτικό υλικό, οπότε η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή αυξάνεται πολύ, πράγμα που συνεπάγεται υψηλότερες τιμές τάσης για να φορτιστεί ξανά. Επιπρόσθετα καλύπτει το στρώμα του ενεργού άμορφου θειικού μολύβδου που μπορεί να πάρει μέρος στην αντίδραση, ενώ αυξάνεται ο όγκος των πλακών. Όταν η θειίκωση προχωρήσει πολύ, δύσκολα ο συσσωρευτής μπορεί να ανακτήσει την ονομαστική του χωρητικότητα. Αν δεν έχει προχωρήσει πολύ, μια παρατεταμένη φόρτιση με χαμηλό ρεύμα αλλά μεγαλύτερη τάση από 2,4Volt/στοιχείο, μπορεί να διαλύσει τους κρυστάλλους και να επαναφέρει την ικανότητα αποθήκευσης.

Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου λοιπόν, συνίσταται η περιοδική φόρτιση των συσσωρευτών (περίπου κάθε ένα μήνα ή 8 βαθιές εκφορτίσεις) με τάση 2,5-2,55Volt/στοιχείο για λίγες ώρες ώστε να διασπώνται τυχόν κρύσταλλοι που έχουν δημιουργηθεί.

Μια σχετικά καινούργια τεχνική είναι η χρήση των λεγόμενων αποθειικωτών (desulfators) για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι desulfators είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία συνδέονται στα άκρα των συσσωρευτών στέλνοντας κρουστικούς παλμούς τάσης, που μπορούν να φτάσουν έως και τα 50Volt για ένα συσσωρευτή 12Volt και ρεύματος 1-10A, οι οποίοι προκαλούν τη σταδιακή διάλυση των κρυστάλλων και την επαναφορά του ενεργού θειικού μολύβδου στο διάλυμα. Η όλη διαδικασία γίνεται σε μοριακό επίπεδο, καθώς η υψηλή συχνότητα των κρουστικών παλμών σε συχνότητες περίπου 1-10KHz ταλαντώνει τους σχηματιζόμενους κρυστάλλους, έχοντας σαν αποτέλεσμα την σταδιακή διάλυση αυτών. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά αργή και εξαρτάται φυσικά από το ποσοστό της κρυστάλλωσης. Περίοδος ενός μήνα επαναφέρει στην αρχική του κατάσταση ένα συσσωρευτή που δεν έχει καταστραφεί. Εάν εφαρμόζεται μόνιμα αυτή η μέθοδος, ο συσσωρευτής δεν έχει ανάγκη την περιοδική βελτιστοποιητική του φόρτιση.

Άλλη συχνή αιτία μείωσης της χωρητικότητας των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε φβ εγκαταστάσεις είναι η καθίζηση του ηλεκτρολύτη (stratification). Καθώς το ειδικό βάρος του θειικού οξέος είναι μεγαλύτερο από αυτό του νερού, με το πέρασμα του χρόνου, έχει την τάση να συγκεντρώνεται προς τον πυθμένα του δοχείου του συσσωρευτή. Αυτό είναι φυσικό φαινόμενο που προκαλείται από τη διαφορά του ειδικού βάρους των δύο υγρών. Αυτό έχει σαν συνέπεια την ανομοιογένεια της περιεκτικότητας σε θειικό οξύ του ηλεκτρολύτη. Μεγάλη περιεκτικότητα (πολύ όξινο) προς το κάτω μέρος, μικρή περιεκτικότητα προς το πάνω. Αυτό έχει σαν συνέπεια όχι μόνο την ανομοιόμορφη φόρτιση του συσσωρευτή, αλλά κυρίως την έναρξη μιας διαδικασίας διάβρωσης του ενεργού υλικού των πλακών η οποία αρχίζει από το κατώτατο σημείο τους, καθώς η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη ξεπερνά την επιτρεπτή τιμή των 1,28 gr/cm³ μέχρι την οποία δεν διαβρώνει τις πλάκες.

Αντίθετα με την περίπτωση των συσσωρευτών που τοποθετούνται σε κινούμενες εφαρμογές, όπως αυτοκίνητα, σκάφη, οπότε και η ανάδευση του ηλεκτρολύτη γίνεται με την κίνηση του συσσωρευτή, στις ηλιακές επίγειες εφαρμογές οι συσσωρευτές βρίσκονται πάντοτε ακίνητοι, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μηχανική κίνηση που θα μπορούσε να αναδεύσει το διάλυμα.

Την απαραίτητη αυτή ενέργεια πραγματοποιεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Με την περιοδική υπερφόρτιση του συσσωρευτή, η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα στην εσωτερική αντίσταση αλλά και πυροδοτεί την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού. Η διάσπαση του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο προκαλεί την εμφάνιση αναδυόμενων φυσαλίδων στο διάλυμα, η ανοδική κίνηση των οποίων είναι ικανή να αναμειγνύει τον ηλεκτρολύτη.

Η τεχνική αυτή είναι ικανοποιητική για λίγες συστοιχίες συσσωρευτών, αν και απαιτεί την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, πολύτιμης τις περισσότερες φορές στα φβ συστήματα. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η επικινδυνότητα που συνδέεται με την έκλυση του εκρηκτικού υδρογόνου, γι' αυτό και οι συσσωρευτές πρέπει να τοποθετούνται σε πάντοτε σε καλά αερισμένους χώρους και να αποφεύγονται οι εστίες φωτιάς κοντά τους. Επίσης η απώλεια νερού που συνεπάγεται η ηλεκτρόλυση του νερού, απαιτεί συχνή παρακολούθηση και συμπλήρωση με αποσταγμένο νερό. Αποτελεί εξίσου συνήθη αιτία βλαβών των συσσωρευτών, η μείωση της στάθμης του ηλεκτρολύτη πράγμα που φέρνει σε επαφή τις πλάκες μολύβδου με τον αέρα. Η ταχεία οξείδωση που πραγματοποιείται απ' τον αέρα προκαλεί αναντικατάστατη βλάβη.

Μια διαφορετική μέθοδος που εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πολλών συστοιχιών συσσωρευτών, συνίσταται στην μηχανική ανάδευση του ηλεκτρολύτη με αντλία. Τα στοιχεία επικοινωνούν σε αυτή την περίπτωση υδραυλικά μεταξύ τους, οπότε ένα κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων και αντλίας αναλαμβάνει την ανάδευση του ηλεκτρολύτη ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

5. Έκλυση ατμών, δημιουργία κρυστάλλων και διάβρωση στους συσσωρευτές μολύβδου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υπερβολική φόρτιση και το αυξημένο ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών οδηγεί σε έκλυση αερίων. Το φαινόμενο αφορά στον σχηματισμό αερίου οξυγόνου (O_2) στις θετικές πλάκες και αερίου υδρογόνου (H_2) στις αρνητικές. Γενικά, αυτό το εκρηκτικό αέριο μίγμα ελευθερώνεται μέσω των βαλβίδων εξαερισμού και οδηγεί στην απώλεια νερού. Σε συσσωρευτές δεσμευμένου ηλεκτρολύτη, ένας εσωτερικός μηχανισμός επιτρέπει τον επανασχηματισμό νερού από το αέριο μίγμα για την αποκατάσταση του διαλύματος του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, αν η πίεση των ατμών αυξηθεί ιδιαίτερα, αυτοί απελευθερώνονται στον αέρα μέσω των βαλβίδων ασφαλείας, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του χαμένου νερού. Για φβ συστήματα που χρησιμοποιούν τέτοιους συσσωρευτές, είναι ανάγκη να γίνεται προσεκτική ρύθμιση στην επιλογή της τάσης πλήρους φόρτισης και στον ρυθμό φόρτισης των συσσωρευτών για να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής τους.

Σε κάποιους συσσωρευτές συχνά επιδιώκεται η έκλυση ατμών. Πρόκειται για τους συσσωρευτές υγρού καταλύτη με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού και η αιτία έχει σχέση με τη δημιουργία βαρέως θειικού οξέως, το οποίο σχηματίζεται στις πλάκες και επικάθεται στο πάτο του δοχείου. Με την πάροδο του χρόνου ο ηλεκτρολύτης επικάθεται και δημιουργείται μεγαλύτερη συγκέντρωση στο κάτω μέρος των κυψελίδων, με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη λειτουργία και τη σταδιακή διάβρωση του πλέγματος που οδηγεί στη συντόμευση της ζωής του συσσωρευτή. Η δημιουργία ατμών, σε τέτοιους συσσωρευτές, έχει αποτέλεσμα την ανάδευση του διαλύματος και αποτελεί μία μέθοδο συντήρησης. Κατά κανόνα, η έκλυση ατμών πρέπει να περιορίζεται ιδιαίτερα αν οι συσσωρευτές βρίσκονται κοντά σε χώρους εργασίας.

Αν ο συσσωρευτή βρεθεί για παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης, κρύσταλλοι θειικού μολύβδου αναπτύσσονται επάνω στην επιφάνεια των θετικών πλακών. Οι κρύσταλλοι με την πάροδο του χρόνου αυξάνονται, μειώνοντας την ποσότητα του ενεργού υλικού που συμμετέχει στην αντίδραση και την ενεργή επιφάνεια των πλακών με αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή. Αν οι κρύσταλλοι γίνουν πολύ μεγάλοι μπορούν να προκαλέσουν μη αναστρέψιμες μηχανικές βλάβες στο πλέγμα των πλακών. Αυτό είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα στα φβ συστήματα όπου οι συσσωρευτές, λόγω καιρικών συγκυριών, μπορούν να βρεθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης και για τον λόγο αυτό απαιτείται εφαρμογή ρεύματος εξισορρόπησης για συντήρηση.

Γενικότερα, το πλέγμα μπορεί να υποστεί διάβρωση για πολλούς λόγους όπως η οξειδωση και συχνά η αντοχή του είναι αυτή που υποδεικνύει την διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.

4.4.5 Προστασία των συσσωρευτών

Οι μπαταρίες πρέπει να προστατεύονται. Αν αναμένονται υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες, τα ηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να ταφούν κάτω από την επιφάνεια παγετού, μέσα σε ένα υδατοστεγές περίβλημα ή σε ένα κτίριο του οποίου η θερμοκρασία θα παραμείνει άνω της θερμοκρασίας ψύξεως. Η ταφή των μπαταριών πρέπει να γίνει σε μια τοποθεσία με όσο το δυνατό λιγότερη υγρασία στο έδαφος.

Οι μπαταρίες δεν πρέπει να τοποθετηθούν απευθείας σε επιφάνεια μπετόν, γιατί οι διαρροές αυτοαποφορτισμού τους θα αυξηθούν, ιδιαίτερα αν η επιφάνεια γίνει υγρή. Πρέπει να προσφερθεί επαρκής εξαερισμός για να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες έκρηξης, αν χρησιμοποιούνται μπαταρίες τύπου ανοιχτών κελιών. Η αποθήκευση της μπαταρίας πρέπει να γίνεται σε μέρος όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη σε ειδικευμένο προσωπικό. Τα παιδιά και τα κατοικίδια πρέπει να είναι μακριά από τις μπαταρίες.

Τα εμπορικά περιβλήματα μπαταριών είναι διαθέσιμα αλλά είναι συνήθως ακριβά. Για μικρά συστήματα, ένας ειδικός πλαστικός κάδος μπορεί να εξυπηρετήσει ως μια μη ακριβή επιλογή. Πρέπει να μπορεί να αντέχει σε απευθείας έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία αν πρόκειται να εγκατασταθεί σε υπαίθριο χώρο και πάνω από το έδαφος.



Σχήμα 4.4.5.43: Φβ σύστημα που καταλαμβάνει χώρο δυο τετραγωνικών μέτρων.

4.4.6 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών

1. Χωρητικότητα

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή ή που μπορεί να αποδοθεί από αυτόν, είναι η χωρητικότητα C του συσσωρευτή. Η χωρητικότητα συνήθως καθορίζεται για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης ή περίοδο εκφόρτισης. Εξαρτάται από αρκετούς σχεδιαστικούς παράγοντες, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται η ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη, η ποσότητα του ενεργού υλικού, ο αριθμός, ο σχεδιασμός και οι φυσικές διαστάσεις των πλακών (ηλεκτροδίων). Λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, το βάθος της εκφόρτισης (ποσοστό της συνολικής

χωρητικότητας που αποδόθηκε από τη μπαταρία), η τάση της μπαταρίας στο τέλος της εκφόρτισης (τάση αποκοπής), η θερμοκρασία, η ηλικία της μπαταρίας και το ιστορικό της χρήσης της (κακή χρήση κτλ). Η χωρητικότητα του συσσωρευτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρεύμα εκφόρτισης, δηλαδή το ρεύμα που παρέχει προς την κατανάλωση. Μάλιστα όσο μικρότερο είναι το ρεύμα εκφόρτισης τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα. Επίσης η χωρητικότητα αυξάνει και με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ ελαττώνεται με τη διάβρωση των πλακών και τον σχηματισμό επικαθήσεων. Η συνήθης μονάδα έκφρασης της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι το Amber-hour (Ah) και ο ρυθμός εκφόρτισης εκφράζεται ως το κλάσμα της χωρητικότητας C προς τη διάρκεια της περιόδου εκφόρτισης σε ώρες (π.χ. εκφόρτιση σε 120 ώρες ισοδυναμεί με ρυθμό εκφόρτισης C/120). Φυσικά, η μονάδα του ρυθμού εκφόρτισης είναι το Amber(A). Έτσι, μία μπαταρία με χωρητικότητα C—375Ah ορισμένη σε ρυθμό εκφόρτισης C/120, δηλαδή 375A, μπορεί να αποδίδει 375A για χρονικό διάστημα 120 ωρών (η χωρητικότητα ορισμένη για ρεύμα εκφόρτισης 375A μπορεί να αναφέρεται και ως K_{375}). Μερικές φορές η χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή, εκφράζεται σε Kilowatt-hour (KWh) και υπολογίζεται προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα σε Ah με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή και διαιρώντας με 1000. Για παράδειγμα, συσσωρευτής 12V, 100Ah, έχει χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια $12 \cdot 100 / 1000 = 1.2 \text{KWh}$.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας, είναι ένας καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή του αριθμού των κυψελίδων και του τύπου του συσσωρευτή. Δεδομένου του μέγιστου ρεύματος που μπορεί ένα φορτίο να καταναλώσει και του χρονικού διαστήματος που το φορτίο μπορεί να εξαρτάται αποκλειστικά από τον συσσωρευτή (δηλαδή την αυτονομία του), η χωρητικότητα που απαιτείται πρέπει να είναι ορισμένη για ρυθμό εκφόρτισης τουλάχιστον ίσο με το μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης ή για χρόνο εκφόρτισης τουλάχιστον ίσο με τον χρόνο που το φορτίο θα καταναλώνει αποκλειστικά από τον συσσωρευτή. Σημαντικός παράγοντας επιλογής της χωρητικότητας είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή καθώς οι επιδράσεις της μπορεί να είναι σημαντικές. Ειδικότερα για συσσωρευτές μολύβδου, η θερμοκρασία λειτουργίας μεταβάλλει έντονα τη χωρητικότητα τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας, έχει αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας, ενώ για λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μειώνεται. Όταν η θερμοκρασία λειτουργίας πέσει σημαντικά, η ιδέα της προσέγγισης της αρχικής χωρητικότητας μέσω εσκεμμένης υπερφόρτισης πρέπει να εγκαταλειφθεί, αφού υπάρχει κίνδυνος εξαέρωσης. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, μέτρα πρέπει να λαμβάνονται για τη φόρτιση ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα εξαέρωσης του ηλεκτρολύτη και για την εκφόρτιση που πρέπει να είναι περιορισμένη.

Άλλο μέτρο της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι η κατάσταση φόρτισης (state of charge ή SOC), που ορίζεται σαν το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας και εκφράζεται ως το ποσοστό της ενέργειας ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή. Έτσι, ένας συσσωρευτής του οποίου τα 3/4 της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% S_{OC} . Μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί το S_{OC} του συσσωρευτή είναι η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Αυτή ορίζεται ως το κλάσμα της πυκνότητας του διαλύματος του ηλεκτρολύτη προς την πυκνότητα του καθαρού νερού. Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η περιεκτικότητα σε θειικό οξύ (H_2SO_4) είναι 36% κατά βάρος ή 25% κατ' όγκο και το ειδικό βάρος του διαλύματος είναι περίπου 1.25 στους 27°C. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται το ειδικό βάρος του διαλύματος του μειώνεται και επανέρχεται όταν επαναφορτίζεται.

2. Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτή.

Η ονομαστική χωρητικότητα ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή, δηλαδή, το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό του με τη μορφή χημικής ενέργειας, δίνεται από τη σχέση

$$C = \frac{(n + b) * m * E_{κ}}{\sigma_{γB} * \sigma_{εκ} * \beta_{εκ} * V_B} [Ah]$$

Όπου: $n [-]$: αριθμός μη ηλιοφανών ημερών(ημέρες αυτονομίας του συστήματος)

$b [-]$: ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας $b = E_{κε} / E_{κ}$

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

$E_{κ} [Wh/ημ]$: ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης

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

$\sigma_{γB} [-]$: συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή, $\sigma_{γB} = 0,8$

$\sigma_{εκ} [-]$: συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης

$\beta_{εκ} [-]$: βάθος εκφόρτισης συσσωρευτή

$V_B [V]$: ονομαστική τάση συσσωρευτή

3. Συντελεστής φόρτισης και απόδοση ισχύος.

Τα αμπερώρια (Ah) που είναι απαραίτητα για τη φόρτιση ενός συσσωρευτή και την αύξηση του S_{OC} κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό είναι, κατά κανόνα, περισσότερα από τα Ah που αποδίδει όταν εκφορτιστεί κατά το ίδιο ποσοστό του S_{OC} . Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής φόρτισης ως το κλάσμα της εισερχόμενης ποσότητας Ah προς την εξερχόμενη ποσότητα Ah, δηλαδή ισχύει:

$$\text{Συντελεστής φόρτισης} = \frac{\text{εισερχόμενη ποσότητα Ah}}{\text{εξερχόμενη ποσότητα Ah}}$$

Αντίστοιχα, ο λόγος της ισχύος που δίνει ένας πλήρως φορτισμένος συντελεστής προς την ενέργεια που απαιτείται για να φορτιστεί πλήρως ονομάζεται απόδοση ισχύος. Δηλαδή ισχύει:

$$\text{Απόδοση ισχύος} = \frac{\text{εξερχόμενη ενέργεια (KW)}}{\text{εισερχόμενη ενέργεια (KW)}}$$

4. Βαθμός απόδοσης συσσωρευτή

Κατά τη φόρτιση ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή το 10 – 20% της προσφερόμενης σε αυτόν ενέργεια χάνεται, θερμαίνοντας τον ηλεκτρολύτη ή προκαλώντας ηλεκτρόλυση.

Ο βαθμός απόδοσης η_B ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή προκύπτει από το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδει κατά την εκφόρτιση, προς την ηλεκτρική ενέργεια που του προσφέρεται κατά την φόρτιση.

$$\eta_B = \frac{E_{εκ}}{E_{φ}}$$

$E_{εκ} [J]$: αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή

$E_{φ} [J]$: προσφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά την φόρτιση του συσσωρευτή

5. Η ονομαστική τάση του συσσωρευτή:

Είναι η τάση που παρέχει ο συσσωρευτής στα άκρα του κατά το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας του με ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης και είναι ανάλογη του αριθμού των κυψελίδων που περιέχει.

Κάθε φορτισμένη κυψελίδα των συσσωρευτών μολύβδου, δηλαδή κάθε ζεύγος ηλεκτροδίων, παρέχει τάση περίπου 2V. Συνήθως οι συσσωρευτές περιέχουν πολλές κυψελίδες συνδεδεμένες σε σειρά και παρέχουν ανάλογα αυξημένη τάση. Για παράδειγμα ένας συσσωρευτής μολύβδου με 6 κυψελίδες δίνει τάση περίπου 12V. Ελέγχοντας την ονομαστική τάση του συσσωρευτή μπορούμε να καταλάβουμε αν αυτός είναι φορτισμένος, αν έχει εκφορτιστεί ή είναι υπέρφορτισμένος.

Η χαρακτηριστική της τάσης μιας κυψελίδας μολύβδου-οξέος έχει μια αρνητική εξάρτηση από την θερμοκρασία, της τάξεως περίπου των $-3,9 \text{ mV}/^\circ\text{C}/\text{Cell}$. Το επίπεδο κατωφλίου που συνιστάται για την φόρτιση της μπαταρίας συνήθως αναφέρεται σε θερμοκρασία της μπαταρίας της τάξης των 25°C . Αυτό σημαίνει πως για άλλες θερμοκρασίες της μπαταρίας, ένας ρυθμιστής φόρτισης θα πρέπει να εμφανίζει κάποια μορφή αντιστάθμισης της θερμοκρασίας της μπαταρίας. Μαθηματικά η αντιστάθμιση της θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V_B(T) = [V_{c,25} + \alpha_T * (T - 25)] * N_c$$

όπου $V_B(T)$ είναι η νέα τάση κατωφλίου στους $T(^\circ\text{C})$, $V_{c,25}$ είναι η τάση κατωφλίου της κυψελίδας στους 25°C , το α_T είναι $-3,9 \text{ mV}/^\circ\text{C}/\text{Cell}$ και N_c είναι ο αριθμός των κυψελίδων στην μπαταρία.

Στην περίπτωση μεγαλύτερων θερμοκρασιών, τα ΦΒ συστήματα που διαθέτουν ρυθμιστές φόρτισης αντιστάθμισης της θερμοκρασίας, επιδεικνύουν μια σταθεροποίηση στην απώλεια του υγρού, ενώ αυτά χωρίς αντιστάθμιση της θερμοκρασίας επιδεικνύουν μεγάλη απώλεια του υγρού.

6. Η μέγιστη τάση του συσσωρευτή:

Είναι η τάση μέχρι την οποία επιτρέπεται να φορτιστεί ο συσσωρευτής (τάση του ίδιου του συσσωρευτή) χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθούν αέρια που θα τον καταστρέψουν. Στη συνέχεια, η τροφοδότηση του συσσωρευτή πρέπει να διακοπεί, διότι η υπερφόρτιση των κυψελίδων προκαλεί ηλεκτρόλυση του διαλύματος με έκλυση υδρογόνου και οξυγόνου και επιτάχυνση έτσι της φυσικής φθοράς του συσσωρευτή.

7. Η τάση φόρτισης (τάση συντήρησης) του συσσωρευτή:

Είναι η τάση που πρέπει να εφαρμόζεται στα άκρα του συσσωρευτή προκειμένου αυτός να φορτιστεί και να παραμείνει φορτισμένος. Έτσι για την πλήρη φόρτιση κάθε κυψελίδας χρειάζεται να γίνεται τροφοδότηση με τάση περίπου 2,4V, με αποτέλεσμα για την φόρτιση ενός συσσωρευτή 6 κυψελίδων να απαιτείται τάση φόρτισης ($6 * 2,4$)V και επιπλέον 0,75V για την πτώση τάσης στην προστατευτική δίοδο (blocking diode) που υπάρχει μεταξύ του συσσωρευτή και της ΦΒ γεννήτριας. Δηλαδή τάση φόρτισης 15,15V. Μάλιστα συνιστάται συνεχώς σταθερή τάση φόρτισης της μπαταρίας ούτως ώστε να χρησιμοποιηθούν πλήρως τα χαρακτηριστικά της.

8. Η τελική τάση εκφόρτισης του συσσωρευτή:

Είναι η μικρότερη τιμή της τάσης που πρέπει να υπάρχει στα άκρα του συσσωρευτή (τάση του ίδιου του συσσωρευτή) χωρίς αυτός να κινδυνεύει να καταστραφεί. Η τιμή της τάσης αυτής καθορίζει το βάθος εκφόρτισης του συγκεκριμένου συσσωρευτή και αν η τιμή της τάσης κατέβει κάτω από την τάση τελικής εκφόρτισης, τότε ενεργοποιούνται οι κατάλληλοι αυτοματισμοί του ρυθμιστή φόρτισης και αποσυνδέουν τα φορτία από τους συσσωρευτές. Μάλιστα επειδή με μικρά ρεύματα εκφόρτισης τα ενεργά υλικά στην μπαταρία λειτουργούν αποδοτικά, οι τελικές τάσεις εκφόρτισης είναι υψηλές σε σχέση με τις τελικές τάσεις εκφόρτισης για μεγαλύτερα ρεύματα εκφόρτισης.

9. Το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή:

Είναι το ρεύμα με το οποίο συνιστάται να φορτίζεται ο συσσωρευτής για μέγιστη διάρκεια ζωής. Η τιμή του δίνεται από τον κατασκευαστή και συνήθως ισούται με το 1/10 της ονομαστικής του χωρητικότητας.

10. Το ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης του συσσωρευτή:

Είναι το ρεύμα μέσω του τροφοδοτούμενου φορτίου που εξαντλεί τη χωρητικότητα του συσσωρευτή σε 20 ώρες. Το ρεύμα αυτό ισούται με το 1/20 της ονομαστικής χωρητικότητας του συσσωρευτή.

11. Η απόδοση του συσσωρευτή:

Είναι ο λόγος του ηλεκτρικού φορτίου (q) που εξάγεται κατά την διάρκεια της εκφόρτισης διαιρεμένο κατά το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που απαιτείται για να αποκατασταθεί η αρχική κατάσταση φόρτισης. Αυτή εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης και από το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης.

12. Η ενέργεια E (Wh) που είναι αποθηκευμένη ή που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή:

Θεωρητικά δίνεται από το γινόμενο της ονομαστικής τάσης επί την χωρητικότητά του. Στην πράξη όμως δίνεται από την εξίσωση: $E = Q * V * \beta * n$

Όπου Q η χωρητικότητα (Ah), V η ονομαστική τάση, β το βάθος εκφόρτισης και n ο συντελεστής απόδοσης του συσσωρευτή που κυμαίνεται μεταξύ 0,8 και 0,9.

13. Η μέση ισχύς P

Η μέση ισχύς P που καλείται να παράσχει ο συσσωρευτής προκειμένου να καλύψει απαιτήσεις φορτίου αυτοδυναμίας N ημερών: Δίνεται από την εξίσωση:

$$P = (Q * n * V) / (t * N)$$

όπου Q η χωρητικότητα (Ah) και n ο συντελεστής απόδοσης του συσσωρευτή (%), N η αυτονομία (ή αυτοδυναμία) του ΦΒ συστήματος, και t ο αριθμός των ωρών της κάθε ημέρας της αυτοδυναμίας που συνδέονται τα φορτία στο ΦΒ σύστημα.

4.4.7 Τεχνικές φόρτισης μπαταρίας

Ένας φορτιστής έχει τρεις βασικές λειτουργίες :

1. Να διοχετεύει την ενέργεια από το μέσο στην μπαταρία (φόρτιση).
2. Να βελτιστοποιεί το ποσοστό φόρτισης (σταθεροποίηση).
3. Να ξέρει πότε για να σταματήσει (τερματισμός).

- Χρόνος φόρτισης:

Φορτίζοντας γρήγορα μια μπαταρία, στέλνουμε ενέργεια στην μπαταρία με γρηγορότερο ρυθμό από το χρόνο που χρειάζεται για να γίνει η χημική διαδικασία σ' αυτή, με καταστροφικά αποτελέσματα. Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικός ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας. Ο χρόνος φόρτισης είναι ανάλογος της χωρητικότητας της μπαταρίας, του ρυθμού φόρτισης και των απωλειών φόρτισης. Σε ιδανικές συνθήκες χωρίς απώλειες φόρτισης, ο χρόνος πλήρους φόρτισης μιας άδειας μπαταρίας είναι το πηλίκο της χωρητικότητας της (σε Αμπέρ), προς το ρυθμό φόρτισης (ρεύμα φόρτισης σε Αμπέρ).

Ο ιδανικός ρυθμός φόρτισης είναι το 10% της χωρητικότητας της μπαταρίας και ο μέγιστος το 20%. Έτσι αν π.χ. έχουμε μια μπαταρία χωρητικότητας 10Ah και τη φορτίζουμε με ρυθμό 10% δηλαδή 1A, χωρίς απώλειες, θα χρειαστούν 10 ώρες για πλήρη φόρτιση της αν αυτή είναι άδεια.

- Μέθοδοι φόρτισης:

1. Σταθερής τάσης: είναι βασικά μια παροχή συνεχούς ρεύματος που δημιουργείται από ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού και ένα ανορθωτή. Τέτοιους βρίσκουμε συχνά σε φορτιστές μπαταριών αυτοκινήτων (lead-acid) και φορτιστές μπαταριών lithium-ion όπου προστίθενται στοιχεία προστασίας για τις μπαταρίες και την ασφάλεια του χρήστη.

2. Σταθερού ρεύματος: οι φορτιστές αυτοί μεταβάλλουν την παρεχόμενη τάση για να διατηρήσουν σταθερό το ρεύμα που δίνουν, σβήνοντας όταν η τάση φτάσει στο επίπεδο μιας πλήρους φόρτισης. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται συνήθως σε μπαταρίες νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου.

3. Ελαττωμένου ρεύματος: η φόρτιση γίνεται από μια ανεξέλεγκτη σταθερή πηγή τάσης. Το ρεύμα μικραίνει καθώς η τάση κυττάρων αυξάνεται, ενώ υπάρχει σοβαρός κίνδυνος υπερφόρτωσης. Αυτό αντιμετωπίζεται με περιορισμό του ρυθμού και του χρόνου φόρτισης. Τέτοιος φορτιστής είναι κατάλληλος μόνο για μπαταρίες τύπου SLA.

4. Παλμική φόρτιση: το ρεύμα παραδίδεται στη μπαταρία σε παλμούς. Ο ρυθμός φόρτισης (βασισμένο στο μέσο ρεύμα) μπορεί να ελεγχθεί καθορίζοντας το εύρος των παλμών. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, οι μικρές περιόδους ανάπαυσης σταθεροποιούν τις χημικές ενέργειες στην μπαταρία αφού εξισώνεται η αντίδραση σε όλο τον όγκο του ηλεκτροδίου πριν ξαναρχίσει η φόρτιση. Αυτό επιτρέπει στη χημική αντίδραση να συμβαδίσει με το ποσοστό απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης αυτή η μέθοδος μπορεί να μειώσει τις ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων όπως δημιουργία αερίων και κρυστάλλου.

5. Φόρτιση *Burr* ή αρνητική παλμική φόρτιση : χρησιμοποιείται από κοινού με τη παλμική φόρτιση και εφαρμόζει έναν πολύ σύντομο παλμό εκφόρτισης 2 έως 3 φορές το ρεύμα φόρτισης για 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου, κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπαυσης για να αποπολώσει το κύτταρο. Αυτοί οι παλμοί αποσπούν οποιεσδήποτε φυσαλίδες αερίου που έχουν δημιουργηθεί στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση.

6. Φόρτιση *IUI* : αρχικά η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρυθμό έως ότου η τάση κυττάρων φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή – συνήθως κοντά σε αυτή στην οποία δημιουργούνται αέρια. Τότε ο φορτιστής σταθεροποιεί τη τάση του και το ρεύμα που απορροφά η μπαταρία μειώνεται. Χρησιμοποιείται για γρήγορη φόρτιση ειδικών τύπων μπαταριών μολύβδου.

Σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες οι λειτουργίες Trickle charge είναι ο ρυθμός απαιτούμενης φόρτισης που αντισταθμίζει το ρυθμό εκφόρτισης της μπαταρίας και Float charge η κατάσταση στην οποία το φορτίο και η μπαταρία είναι συνδεδεμένα παράλληλα με τον φορτιστή και διατηρούν τη τάση στα άκρα της μπαταρίας μικρότερη από το ανώτατο όριο της μπαταρίας.

- Ρυθμός φόρτισης:

Η φόρτιση των μπαταριών μπορεί να γίνει με ποικίλους ρυθμούς ανάλογα με την απαίτηση. Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται κατωτέρω οι εξής ρυθμοί:

- 1) Αργή : 14-16 ώρες με ρυθμό 0.1c (10%)
 - 2) Γρήγορη : 3 έως 6 ώρες με ρυθμό 0.3c (30%)
 - 3) Ταχεία : λιγότερο από 1 ώρα με ρυθμό 1.0c (100%)
- Όπου $\text{ρεύμα φόρτισης} = \text{ρυθμός} \% \times Ah(\text{μπαταρίας})$

- Τύποι φορτιστών:

Οι φορτιστές συνήθως εκδηλώνουν μια μορφή διαχείρισης της τάσης για να ελεγχθεί η τάση φόρτισης που εφαρμόζεται στην μπαταρία. Η ποιότητα και απόδοση ενός φορτιστή είναι πάντοτε ανάλογη της τιμής του. Μερικά παραδείγματα ακολουθούν:

1. Διακοπτικός ρυθμιστής (switcher): χρησιμοποιεί διαμόρφωση πλάτους παλμού για να ελέγξει την τάση. Έχει χαμηλή απαίτηση ισχύος και είναι αποδοτικότερος από τους γραμμικούς ρυθμιστές αλλά είναι πιο σύνθετος. Χρειάζεται ένα μεγάλο παθητικό φίλτρο για να εξομαλύνει τους παλμούς.

2. Ρυθμιστής σειράς (γραμμικός): λιγότερο σύνθετος αλλά με περισσότερες απώλειες και παραγωγή θερμότητας. Όλο το ρεύμα περνά μέσω κάποιου ρυθμιστικού στοιχείου που πρέπει να είναι υψηλής ισχύος (μόσφет, τρανζίστορ). Επειδή δεν υπάρχει καμία μετατροπή, παραδίδει συνεχές ρεύμα και δεν χρειάζεται φίλτρο εξόδου. Οι ρυθμιστές σειράς έχουν συνήθως καλύτερα χαρακτηριστικά ελέγχου και φόρτισης.

3. Ρυθμιστής εκτροπής: περισσότερο χρησιμοποιούνται σε φβ συστήματα δεδομένου ότι είναι σχετικά φτηνοί για να κατασκευαστούν και απλοί για να σχεδιαστούν. Το ρεύμα φόρτισης ελέγχεται από έναν διακόπτη ή τρανζίστορ που συνδέεται παράλληλα με το φβ πλαίσιο και την μπαταρία. Η υπερφόρτωση της μπαταρίας αποτρέπεται με την εκτροπή του ΦΒ μέσω του τρανζίστορ όταν φθάσει η τάση σε ένα προκαθορισμένο όριο.

4. Ρυθμιστής Buck: λειτουργεί με ένα DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού. Είναι υψηλής απόδοσης και έχει χαμηλές απώλειες θερμότητας. Δεν χρησιμοποιεί μετασχηματιστή, καταπονεί λίγο τα διακοπτικά του στοιχεία και έχει ένα μικρό φίλτρο εξόδου.

5. Φορτιστής παλμών: χρησιμοποιεί τρανζίστορ σειράς που μπορεί να ανοιγοκλείσει. Όταν η τάση μπαταρίας είναι χαμηλή το τρανζίστορ μένει κλειστό και περνάει το ρεύμα της πηγής στη μπαταρία. Καθώς η τάση της μπαταρίας πλησιάζει την επιθυμητή τάση το τρανζίστορ ανοιγοκλείνει για να διατηρήσει την επιθυμητή τάση. Επειδή ενεργεί διακοπτικά παράγει λιγότερη θερμότητα και επειδή ενεργεί και γραμμικά το φίλτρο εξόδου μπορεί να είναι μικρότερο.

6. Επαγωγική φόρτιση : αναφέρεται στο σχέδιο του φορτιστή. Ουσιαστικά η πλευρά εισόδου του φορτιστή, το μέρος που συνδέεται με τη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, κατασκευάζεται από έναν μετασχηματιστή που είναι χωρισμένος σε δύο μέρη. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή στεγάζεται σε μια μονάδα που συνδέεται με τη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή στεγάζεται στην συσκευή που περιέχει την μπαταρία, μαζί με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία. Αυτό επιτρέπει στην μπαταρία να φορτιστεί χωρίς κάποια σύνδεση με τη πηγή και χωρίς έκθεση οποιωνδήποτε επαφών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στο χρήστη.

- Τερματισμός φόρτισης:

Μόλις φορτιστεί πλήρως μια μπαταρία, το ρεύμα φόρτισης πρέπει να αποκοπεί. Αν δεν γίνει αυτό, το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή θερμότητας και αερίων, τα οποία καταστρέφουν τις μπαταρίες. Ένας καλός φορτιστής πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει πότε η ανασύνθεση των ενεργών χημικών ουσιών είναι πλήρης και για να σταματήσει τη διαδικασία φόρτισης προτού να γίνει οποιαδήποτε ζημία ενώ διατηρεί τη θερμοκρασία κυττάρων μέσα σε ασφαλή όρια. Ανιχνεύοντας αυτό το σημείο και τερματίζοντας τη φόρτιση επιτυγχάνουμε αύξηση της ζωής της μπαταρίας. Στους περισσότερους φορτιστές το σημείο αυτό είναι ένα προκαθορισμένο ανώτατο όριο τάσης.

- Ασφαλής φόρτιση:

Εάν για οποιοδήποτε λόγο υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτισης της μπαταρίας, όπως λάθος στον καθορισμό του ανώτατου ορίου τάσης, αυτό θα συνοδευθεί από μια άνοδο στη θερμοκρασία. Ελαττώματα μέσα στην μπαταρία ή υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν επίσης να οδηγήσουν μια μπαταρία πέρα από τα ασφαλή όρια θερμοκρασίας της. Οι υψηλές θερμοκρασίες καταστρέφουν τις μπαταρίες και ο έλεγχος της θερμοκρασίας κυττάρων είναι ένας καλός τρόπος ελέγχου της κατάστασης αυτών. Ο έλεγχος φόρτισης βάση της θερμοκρασίας της μπαταρίας, είναι ένας άλλος τρόπος ρύθμισης φόρτισης. Τέτοια προφύλαξη ασφάλειας είναι ιδιαίτερα σημαντική για μπαταρίες υψηλής ισχύος όπου οι συνέπειες αποτυχίας είναι σοβαρές και ακριβές.

4.4.8 Τεχνικές σύνδεσης των συσσωρευτών

Στα ΦΒ συστήματα που απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα συσσωρευτών, συνδέονται μεταξύ τους περισσότεροι του ενός συσσωρευτές σχηματίζοντας μια συστοιχία η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις. Υπάρχουν τρεις τρόποι σύνδεσης των πόλων των συσσωρευτών:

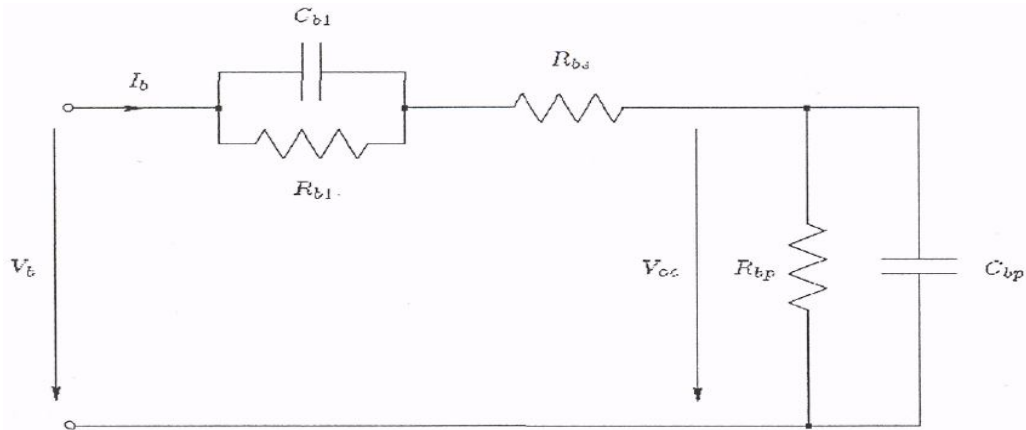
A) Η **σύνδεση σε σειρά** η οποία πετυχαίνεται συνδέοντας τον θετικό πόλο του ενός συσσωρευτή με τον αρνητικό πόλο του άλλου. Οι ονομαστικές χωρητικότητες του κάθε συσσωρευτή θα πρέπει να είναι ίσες και η συνολική ονομαστική τάση της συστοιχίας ισούται με το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων του κάθε συσσωρευτή που την απαρτίζει.

B) Η **παράλληλη σύνδεση** η οποία πετυχαίνεται συνδέοντας μεταξύ τους όλους τους θετικούς πόλους σε ένα κοινό θετικό πόλο και όλους τους αρνητικούς σε ένα αρνητικό. Οι ονομαστικές τάσεις του κάθε συσσωρευτή θα πρέπει να είναι ίσες και η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας ισούται με το άθροισμα των επιμέρους χωρητικότητων του κάθε συσσωρευτή που την απαρτίζει.

Γ) Η **μικτή σύνδεση** η οποία υλοποιείται συνδυάζοντας τις δύο προηγούμενες διατάξεις.

4.4.9 Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε φβ σύστημα

Από όσα έχουν ήδη αναφερθεί και θα αναφερθούν στα επόμενα κεφαλαία, οι συσσωρευτές είναι αναπόσπαστο μέρος των φβ συστημάτων. Για να βελτιστοποιηθεί η συνεργασία τους με τις φβ γεννήτριες και για να γίνει ο σχεδιασμός των συσκευών που θα επιληφθούν αυτής της συνεργασίας, όπως ο ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών, υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού μοντέλου, που θα συμπεριληφθεί στο συνολικό μοντέλο του συστήματος. Το ισοδύναμο μοντέλο του σχήματος που ακολουθεί είναι μία βελτίωση του κοινώς χρησιμοποιούμενου ισοδύναμου μοντέλου Thevenin.



Σχήμα 4.4.9.44: Ισοδύναμο κύκλωμα συσσωρευτή μολύβδου.

Η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή αντιπροσωπεύεται από τις αντιστάσεις R_{bs} , R_{b1} και R_{bp} . Η R_{bs} είναι η αντίσταση που οφείλεται στις πλάκες και στη μάζα του ηλεκτρολύτη και η R_{b1} μαζί με τον πυκνωτή C_{b1} αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στη διάχυση του ηλεκτρολύτη. Με τη χρήση αυτών των στοιχείων μοντελοποιείται το φαινόμενο της διαφοροποίησης της τάσης του συσσωρευτή όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα (φόρτισης ή εκφόρτισης) από την τάση ανοικτοκυκλώματος (V_{oc}). Η R_{bp} είναι η αντίσταση απωλειών λόγω αυτοεκφόρτισης και ο πυκνωτής C_{bp} σχετίζεται με τη χωρητικότητα του συσσωρευτή σε ηλεκτροχημική ενέργεια.

Η εσωτερική αντίσταση που παρουσιάζει ο συσσωρευτής, ως απαραίτητη απομονωτική βαθμίδα μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη σχεδίαση ενός φβ συστήματος.

4.5 Ηλεκτρικοί αγωγοί

Οι ηλεκτρικοί αγωγοί συνδέουν όλες τις διατάξεις ενός ΦΒ συστήματος μεταξύ τους. Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, σε κάθε ηλεκτρικό αγωγό η πτώση τάσεως V , είναι ίσο με το γινόμενο της αντίστασης του αγωγού επί την ένταση του διερχόμενου ρεύματος.

$$\text{Πτώση τάσεως αγωγού: } V = R * I [V]$$

Όπου: $R[\Omega]$: αντίσταση αγωγού , $I[A]$: ένταση ρεύματος

Η **αντίσταση** ενός **αγωγού** υπολογίζεται από τη σχέση: $R = \rho * \frac{l}{S} [\Omega]$

Όπου: $\rho [\Omega * mm^2 / m]$: ειδική αντίσταση αγωγού , $l [m]$: μήκος αγωγού ,
 $S [mm^2]$: διατομή αγωγού

Τέλος, σύμφωνα με το νόμο του Joule, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα απορροφά ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα αυτή αυξάνει τη θερμοκρασία του αγωγού και αποτελεί τις θερμικές του απώλειες.

$$\text{Θερμικές απώλειες αγωγού: } Q = I^2 * R * T = V * I * T [J]$$

Όπου: $T [s]$: χρονικό διάστημα ροής ρεύματος και $I[A]$, $R[\Omega]$, $V[V]$ όπως προηγούμενα.

Επιλογή ηλεκτρικών αγωγών

Η διαδικασία επιλογής των κατάλληλων αγωγών, δηλαδή, ο υπολογισμός της διατομής τους, γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Βήμα 1: Σχεδιασμός ηλεκτρικής εγκατάστασης (δείχνει την ακριβή θέση όλων των διατάξεων του ΦΒ συστήματος για να υπολογιστεί το μήκος των αγωγών μεταξύ ΦΒ συστοιχίας-ελεγκτή φόρτισης, ελεγκτή φόρτισης-συσσωρευτή, συσσωρευτή-φορτίων κατανάλωσης)

Βήμα 2: Υπολογισμός έντασης ρεύματος στους αγωγούς (για τον αγωγό ΦΒ συστοιχίας- ελεγκτή φόρτισης και ελεγκτή φόρτισης- συσσωρευτή δίδεται $I=1,25 \cdot I_{SCZ}$ [A] και για τον αγωγό συσσωρευτή-φορτίων κατανάλωσης δίδεται $I = \frac{P_k}{V_k}$ [A], όπου I_{SCZ} το ρεύμα βραχυκύκλωσης, P_k [W] η ισχύς κατανάλωσης, V_k [V] η τάση κατανάλωσης)

Βήμα 3: Υπολογισμός διατομής αγωγών

Βήμα 4: Υπολογισμός πτώσης τάσεως στους αγωγούς

Βήμα 5: Υπολογισμός συνολικής πτώσης τάσεως μεταξύ ΦΒ συστοιχίας και συσσωρευτή (ισούται με το άθροισμα της πτώσης τάσης αγωγού ΦΒ συστοιχίας-συσσωρευτή + πτώσης τάσης ελεγκτή φόρτισης + πτώσης τάσης διόδων αντεπιστροφής + πτώσης τάσης ΦΒ συστοιχίας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας των στοιχείων άνω των 25°C)

Βήμα 6: Έλεγχος μέγιστης τάσεως της ΦΒ συστοιχίας (πρέπει να ισχύει $V_{m\sigma} \geq V_B + \Delta V$ [V], όπου $V_{m\sigma}$ η μέγιστη τάση της ΦΒ συστοιχίας, V_B η ονομαστική τάση του συσσωρευτή και ΔV η συνολική πτώσης τάσης)

Το ρεύμα που παράγει ένα φωτοβολταϊκό

Ένα φβ θα παράγει κάθε μέρα την ονομαστική ισχύ του επί 6 το καλοκαίρι και επί 3,5 το χειμώνα. Έτσι, από ένα φβ 100Wr μπορούμε να αναμένουμε 550-600 Watt/h (0,6 KWh-κιλοβατώρες) το καλοκαίρι και περίπου 350 Wh (0,35 KWh) το χειμώνα, ανά ημέρα και κατά μέσο όρο.

Δηλαδή το χειμώνα, δεν θα παράγει 350 Wh ΚΑΘΕ μέρα, αλλά αν διαιρέσουμε την συνολική μηνιαία του παραγωγή σε KWh (πχ. τον Δεκέμβριο) δια 31, θα μας δώσει τον αριθμό 0,35 KWh.

Ανά 1.000 Watt/ρ φβ, η συνολική ετήσια παραγωγή σε κιλοβατώρες (KWh) θα είναι από 1100 KWh (βόρεια Ελλάδα) έως 1450 KWh (νότια Ελλάδα). Έτσι, ένα πάνελ 100 Wr θα παράγει από 110 KWh έως 140 KWh το χρόνο.

Συμπεράσματα

Αυξάνοντας τη διατομή του αγωγού ή μειώνοντας το μήκος του, μειώνεται η αντίσταση του αγωγού. Με τη μείωση της αντίστασης εξασφαλίζεται μείωση της πτώσης τάσης και των θερμικών απωλειών του αγωγού. Η υπερθέρμανση ενός αγωγού μπορεί να προκαλέσει τήξη της μόνωσης, βραχυκύκλωμα και πυρκαγιά. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του διερχόμενου ρεύματος, τόσο μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγό χρησιμοποιείται.

4.6 Γείωση

Το δυναμικό της γης θεωρείται συμβατικά μηδέν. Έτσι, κάθε αγωγός που συνδέει κάποιο σημείο ενός κυκλώματος ή ένα μεταλλικό αντικείμενο με το έδαφος ονομάζεται **γειωμένος** και το σημείο ή το αντικείμενο αποκτούν ίδιο δυναμικό με τη γη. Η αγωγή σύνδεση του σημείου ή του αντικειμένου με το έδαφος ονομάζεται **γείωση** και ο αγωγός που τοποθετείται μέσα στο έδαφος και στο επάνω μέρος του συνδέεται με τον γειωμένο αγωγό ονομάζεται **γειωτής**.

Μια καλή γείωση θα προσφέρει ασφάλεια σε ένα φβ σύστημα από βραχυκυκλώματα που μπορούν να προκληθούν από κάποια βλάβη του συστήματος. Γι' αυτό ο αγωγός γείωσης πρέπει να έχει διατομή ίση με αυτήν του μεγαλύτερου αγωγού του συστήματος. Δύο τύποι γείωσης απαιτούνται – γείωση συστήματος και γείωση του εξοπλισμού.

Τα ΦΒ συστήματα πρέπει να γειώνονται για τους παρακάτω λόγους:

A) Αποφυγή ζημιών που μπορεί να υποστεί ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λόγω κρουστικών υπερτάσεων, δηλαδή λόγω απότομων αυξήσεων της απόλυτης τιμής του δυναμικού από μερικά Volts μέχρι χιλιάδες, των οποίων η διάρκεια κυμαίνεται από 10^{-6} s έως 10^{-3} s. Οι κρουστικές υπερτάσεις δημιουργούνται από κεραυνούς, αστραπές, χειρισμούς διακοπών, βραχυκυκλώματα κ.λπ.

B) Ασφάλεια του προσωπικού συντήρησης από ηλεκτροπληξία λόγω διαρροής ρευμάτων.

Γ) Διατήρηση του αρνητικού πόλου του συσσωρευτή, σε όλο το μήκος της καλωδίωσης, σε δυναμικό μηδέν.

Αν χρησιμοποιηθούν δύο γειώσεις, για παράδειγμα μία για τη ΦΒ συστοιχία και μία για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, **θα πρέπει πάντοτε να συνδέονται μεταξύ τους**.

4.7 Ηλεκτρικές καταναλώσεις

Η ηλεκτρική ισχύς είναι ένα στιγμιαίο μέγεθος, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα μέγεθος που αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, ένα ραδιόφωνο καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ 80W όταν λειτουργεί, αλλά καταναλώνει 80Wh ηλεκτρική ενέργεια όταν λειτουργεί μία ώρα.

Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει μία συσκευή προκύπτει από το γινόμενο της ηλεκτρικής ισχύος της συσκευής επί τον χρόνο λειτουργίας της.

$$\text{Ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης: } E_K = P_K * T \text{ [Wh]}$$

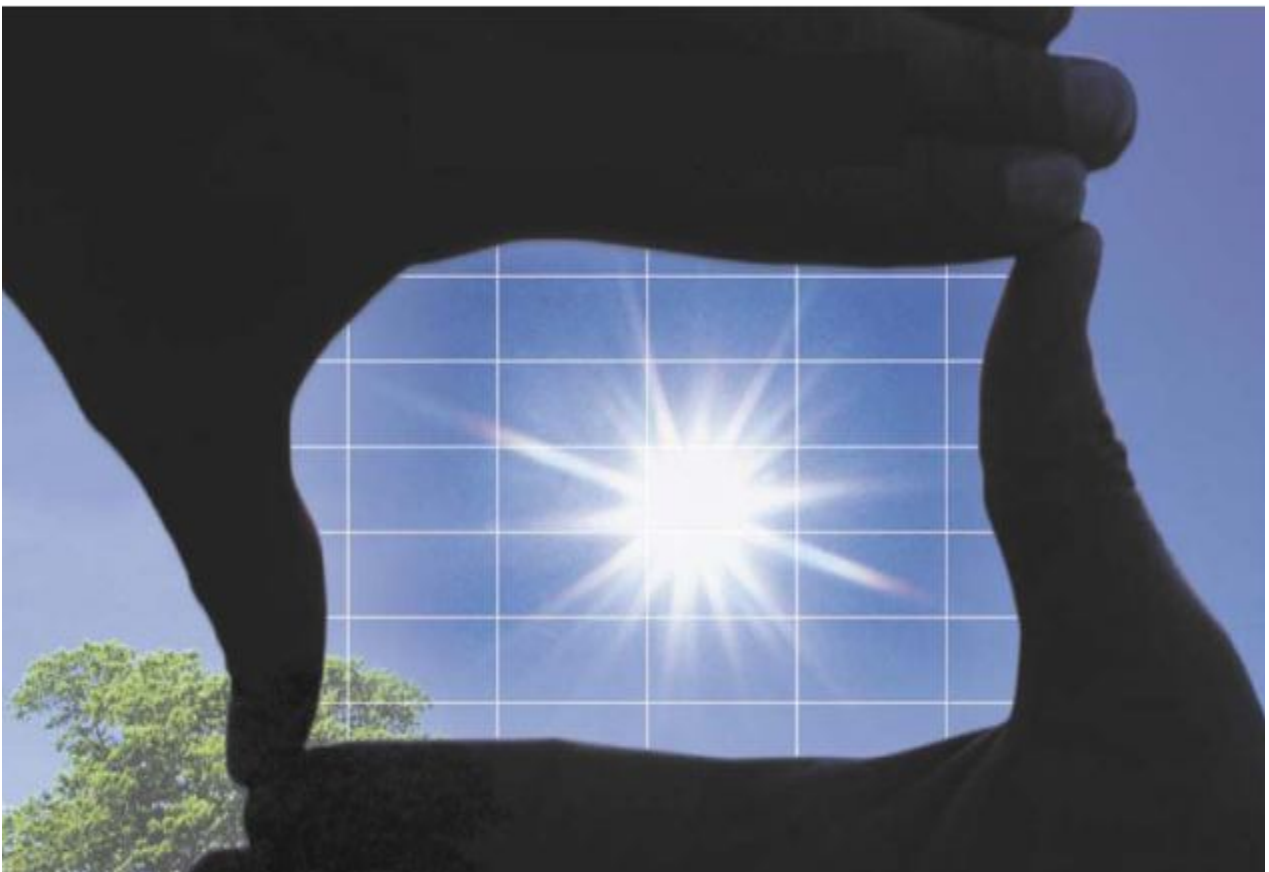
Όπου P_K [W] ηλεκτρική ισχύς κατανάλωσης, T [h] χρόνος λειτουργίας συσκευής

Αν όλες οι συσκευές μίας εγκατάστασης λειτουργούν στην ίδια τάση, η ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης μπορεί να υπολογισθεί σε [Ah] ή [Wh] από τις παρακάτω σχέσεις

$$E_K = I * T \text{ [Ah]} \quad \text{ή} \quad E_K = I * T * V \text{ [Wh]}$$

Όπου: I [A] ηλεκτρικό ρεύμα συσκευής, T [h] χρόνος λειτουργίας συσκευής,
 V [V] ηλεκτρική τάση συσκευής

5 Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση διασυνδεδεμένων φβ συστημάτων



5.1 Μέγεθος συστήματος και επιλογή μονάδων

Επιλέγεται ένας κατάλληλος χώρος για το ΦΒ σύστημα κατά την επίσκεψη με τον πελάτη στην περιοχή. Η λίστα εκτίμησης του «πάρκου» συμπεριλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του συστήματος: προσανατολισμός, κλίση, διαθέσιμη περιοχή, είδος στησίματος, σκίαση, μήκος καλωδίων, τοποθεσία του μετατροπέα (inverter) κλπ.

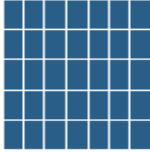
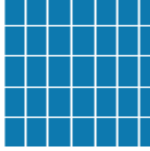
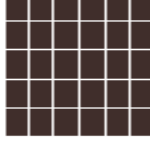
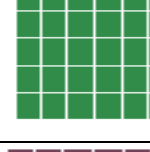
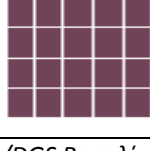
Στην συνέχεια οι ενότητες επιλέγονται με βάση τα παρακάτω:

- Το υλικό των κυψελών: μονό-κρυσταλλικό, πολύ-κρυσταλλικό, άμορφο, τελλουριούχου καδμίου (CdTe) ή CIS ή τεχνολογία της λεπτής μεμβράνης (ή ταινίας), και
- Το είδος του πλαισίου: πρότυπη μονάδα με ή χωρίς εξωτερικό πλαίσιο, πλαίσιο γυαλί με γυαλί, πλακίδιο ΦΒ (tile) κλπ.

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά επιλέγεται ένα συγκεκριμένο είδος πλαισίου. Τα χαρακτηριστικά αυτά του πλαισίου καθορίζουν το μέγεθος του υπόλοιπου συστήματος. Πρώτα γίνεται ένας πρόχειρος υπολογισμός του αριθμού των πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν στην περιοχή. Ο αριθμός αυτός επιτρέπει έναν πρόχειρο υπολογισμό της συνολικής ενέργειας του συστήματος:

- Κανόνας του δεξιού χεριού: $1\text{kWp} \approx 10\text{m}^2$ έκτασης ΦΒ.

Ο πίνακας 5.1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιο ακριβείς εκτιμήσεις του χώρου που απαιτείται ανάλογα με το υλικό των κυψελών.

Υλικό κυψελών	Απαιτούμενη περιοχή ΦΒ για 1KW	
Μονο-κρυσταλλικό Κυψέλες υψηλής απόδοσης	$7\text{m}^2 - 9\text{m}^2$ $6\text{m}^2 - 7\text{m}^2$	
Πολυκρυσταλλικό	$7.5\text{m}^2 - 10\text{m}^2$	
(CIS)	$9\text{m}^2 - 11\text{m}^2$	
Τελλουριούχο κάδμιο(CdTe)	$12\text{m}^2 - 17\text{m}^2$	
Άμορφο πυρίτιο	$14\text{m}^2 - 20\text{m}^2$	

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 Απαιτούμενος χώρος ΦΒ συστημάτων, (Πηγή: Solarpraxis/DGS Βερολίνο BRB)

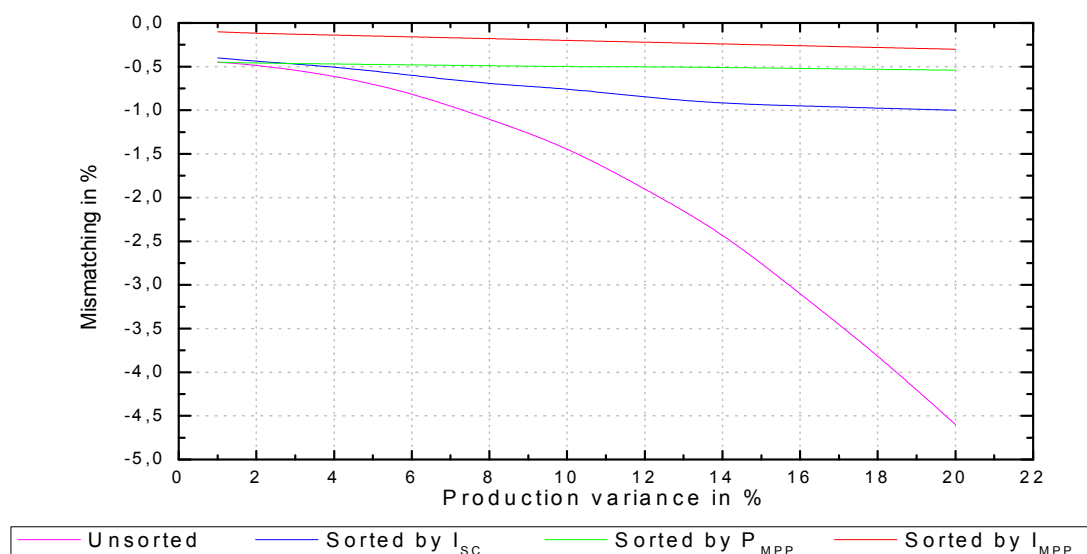
Στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθούν ημδιαφανείς πλαίσια θα αυξηθεί το μέγεθος της έκτασης που απαιτείται περίπου σε αναλογία με τον χώρο στον οποίο τα πλαίσια είναι διαφανείς. Τα παρακάτω σημεία πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για τον πραγματικό σχεδιασμό του «πάρκου»:

- Ο αριθμός των πλαισίων που αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια πλάτους και ύψους ενός πλαισίου σε σχέση με το διαθέσιμο πλάτος και ύψος της ταράτσας/έκτασης.
- Η απόσταση ανάμεσα στα πλαίσια και την άκρη της οροφής, η οποία θα πρέπει να είναι τριπλάσια της κατακόρυφης απόστασης της επιφάνειας του πλαισίου με το επίπεδο της οροφής.
- Ένα περιθώριο διαστολής ανάμεσα στα πλαίσια, περίπου 6 με 10mm.
- Διάφορα εποικοδομήματα στην οροφή (πχ. καμινάδες, ανεμιστήρες, κεραίες) και οι σκιές που προκαλούν.
- Ο περιβάλλον χώρος όσον αφορά πιθανό ίσκιο.

Πολύ σημαντικό ρόλο για τον σχεδιασμό παίζουν επίσης το στήσιμο και την αρχιτεκτονική ολοκλήρωση της ΦΒ συστοιχίας.

5.2 Είδη συστημάτων

Το είδος του συστήματος καθορίζεται από τα μέρη του μετατροπέα. Έτσι συναντώνται κεντρικά και αποκεντρωμένα συστήματα. Η σύνδεση των πλαισίων πρέπει να σχηματίζει σειρά ενώ η παράλληλη σύνδεσή τους πρέπει να είναι βέλτιστα συντονισμένη με τον μετατροπέα. Ανάλογα με την ανοχή(περιθώριο εφαρμογής) του πλαισίου εμφανίζονται μεγαλύτερες ή μικρότερες απώλειες λόγω κακού συνδυασμού, όταν τα πλαίσια είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Ο Werner Hermann στο εργαστήριο πιστοποίησης ΦΒ στην Γερμανία (TUV Reinland PV Certification Laboratory, Germany) υπολόγισε την εξάρτηση των απωλειών των πλαισίων λόγω κακού συνδυασμού ανάλογα με το περιθώριο εφαρμογής και πριν ταξινομηθούν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.2.1 .



Σχήμα 5.2.1: Κακός συνδυασμός σε μία ΦΒ συστοιχία με 8 γραμμές και 14 πλαίσια των 150W συνδεδεμένες σε σειρά με βάση την διακύμανση παραγωγής (σύνολο 112 ΦΒ πλαίσια). Πηγή: TUV Rheinland.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.2.1, αν τα πλαίσια με ανοχή παραγωγής 5% είναι συνδεδεμένες σε σειρά αταξινομήτα, οι απώλειες είναι λιγότερο από 1%. Αν τα πλαίσια είναι ταξινομημένα με βάση την ένταση, η απώλεια λόγω κακού συνδυασμού μειώνεται περίπου στα 0,2%. Με διακύμανση παραγωγής μεγαλύτερη από 8%, είναι δυνατό να προταθεί ως πρότυπη τακτική η ταξινόμηση με βάση τις εντάσεις MPP (Herrmann,2005).

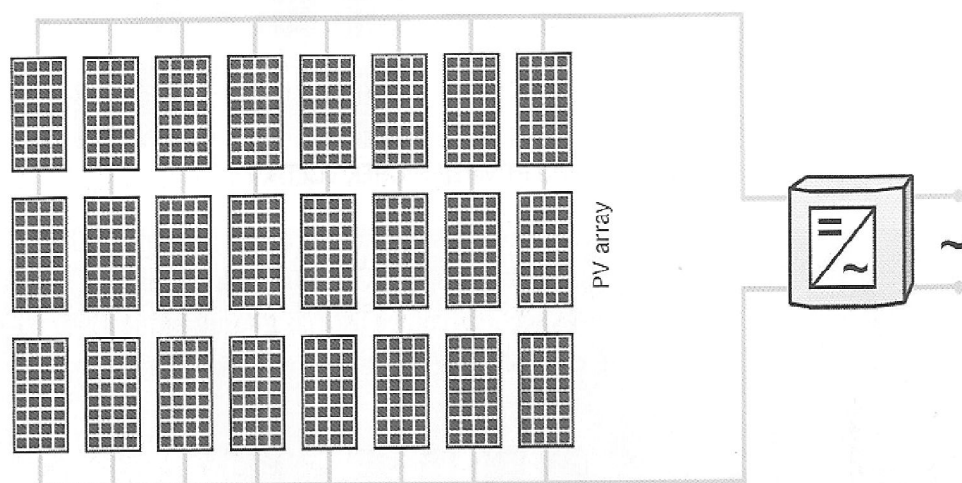
Οι μετατροπείς χωρίζονται στους κεντρικούς μετατροπείς για ένα ολόκληρο σύστημα, στους σε σειρά μετατροπείς και στους μετατροπείς πλαισίου, για κάθε ένα ξεχωριστό πλαίσιο. Κάθε ένα από τα τρία είδη έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Το είδος του συστήματος που θα επιλεγεί εξαρτάται από τον τύπο της εφαρμογής. Αποκεντρωτικά είδη μετατροπών πρέπει να επιλέγονται για συστήματα που αποτελούνται από περιοχές ημι-συστοιχίας με διαφορετικούς προσανατολισμούς και κλίσεις ή για συστήματα που είναι μερικώς σκιασμένα.

5.2.1 Είδος κεντρικού μετατροπέα

ΕΙΔΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Στην περίπτωση χαμηλής τάσης (UDC-συνεχές $\leq 120V$) ένας μικρός αριθμός πλαισίων (3-5 τυπικά πλαίσια) είναι συνδεδεμένος σε σειρά σε κάθε γραμμή. Ένα πλεονέκτημα των κοντών γραμμών σε σχέση με τις πιο μακριές είναι ότι οι σκιές επιδρούν λιγότερο, αφού η μονάδα με την μεγαλύτερη σκιά σε μία γραμμή καθορίζει ολόκληρη την ένταση της γραμμής. Επιπλέον, η απώλεια εξαρτάται από τον αριθμό των γραμμών υπό σκιά, ενώ ο αριθμός των πλαισίων υπό σκιά είναι λιγότερο σημαντικός. Στην περίπτωση που μόνο λίγες γραμμές είναι σκιασμένες οι απώλειες παραμένουν μικρές.

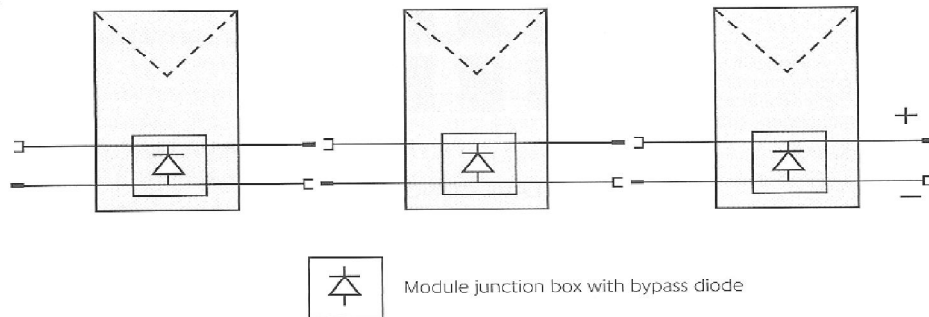
Επιπλέον, με τάση λιγότερη από 120V, είναι δυνατό να «επιτύχουμε» το μοντέλο Κλάσης Προστασίας III (Πίνακας 5.2). Το μειονέκτημα αυτού του είδους είναι οι υψηλές εντάσεις που παρουσιάζονται. Πρέπει να δημιουργηθούν σχετικά υψηλές περιοχές καλωδίων για τη μείωση των ωμικών απωλειών. Για το λόγο αυτό, το είδος αυτό σπάνια είναι εφαρμόσιμο. Τυπικές περιπτώσεις είναι τα κατά παραγγελία εγκατεστημένα σε κτίρια συστήματα.



Σχήμα 5.2.1.2: Είδος χαμηλής τάσης με κεντρικό μετατροπέα. Πηγή: Solarpraxis

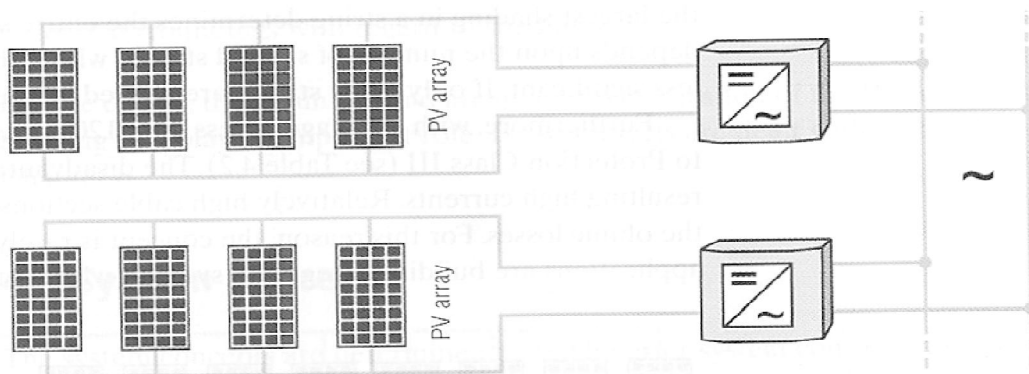
Τάξεις ηλεκτρικής προστασίας	Σύμβολα
Γειωμένη συσκευή	
Τάξη II Προστατευτική μόνωση (διπλή/ ενισχυμένη μόνωση)	
Τάξη III Ασφάλεια πολύ χαμηλής τάσης (μέγιστο AC: 50V , μέγιστο DC: 120V)	

Πίνακας 5.2: Κλάσεις Προστασίας



Σχήμα 5.2.1.3: Παράλληλη σύνδεση πλαισίων με τέσσερα καλώδια σύνδεσης

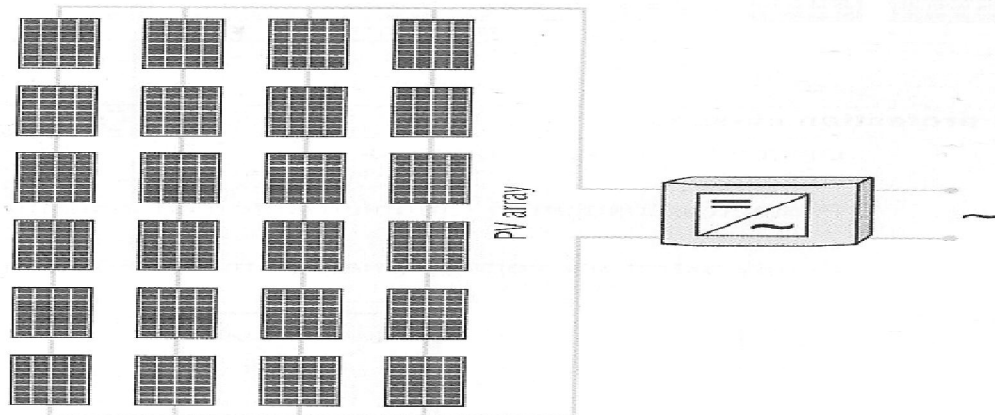
Η Ολλανδική εταιρία OKE-services έχει αναπτύξει ένα είδος στο οποίο κρυσταλλικές μονάδες χωρίς σκελετό είναι συνδεδεμένες παράλληλα χωρίς παρακαμπτήριες διόδους. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτού του είδους είναι ότι ο μεταλλικός σκελετός στησίματος του πλαισίου χρησιμοποιείται για να κατευθύνει το ρεύμα και για απευθείας παράλληλες συνδέσεις των πλαισίων. Αυτό το είδος ονομάζεται ΦΒ χωρίς σύρμα και καταργεί το σύρμα ρεύματος DC καθώς και τα άλλα εξαρτήματα του ρεύματος (όπως ασφάλειες και πίνακα συνδέσεων). Άλλα πλεονεκτήματα είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω σκίασης το οποίο είναι δυνατό να επιτευχθεί χωρίς την Κλάση Προστασίας II. Για αυτό το λόγο το είδος αυτό είναι κατάλληλο για εγκαταστάσεις σε κτίρια και περιοχές με απευθείας σκίαση. Παρ' όλα αυτά αυτό το είδος έχει ελάχιστα χρησιμοποιηθεί. Ο λόγος είναι ότι το πλαίσιο του ηλεκτρικού στοιχείου σύνδεσης της μονάδας προς τοποθέτηση υπάρχει μόνο ως πρωτότυπο και ελάχιστες κατάλληλες μονάδες καθώς και μετατροπείς χαμηλής τάσης βρίσκονται υπό παραγωγή. Η εταιρία Multi-Contact θεωρείται αναπτυξιακός συνεργάτης όσον αφορά στα ηλεκτρικά στοιχεία σύνδεσης. Αυτό που απομένει είναι να δούμε τα πρώτα συστήματα με χρήση ΦΒ χωρίς σύρμα στην αγορά.



Σχήμα 5.2.1.4: Είδος παράλληλης σύνδεσης. Πηγή: Solarpraxis

ΕΙΔΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Σε είδη με μακριά γραμμή και αντίστοιχα υψηλές τάσεις ($UDC > 120V$) απαιτείται η Κλάση Προστασίας II. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερης διατομής καλώδιο ως αποτέλεσμα των χαμηλών εντάσεων. Ένα μειονέκτημα είναι οι περισσότερες απώλειες σκίασης λόγω των μακριών γραμμών.



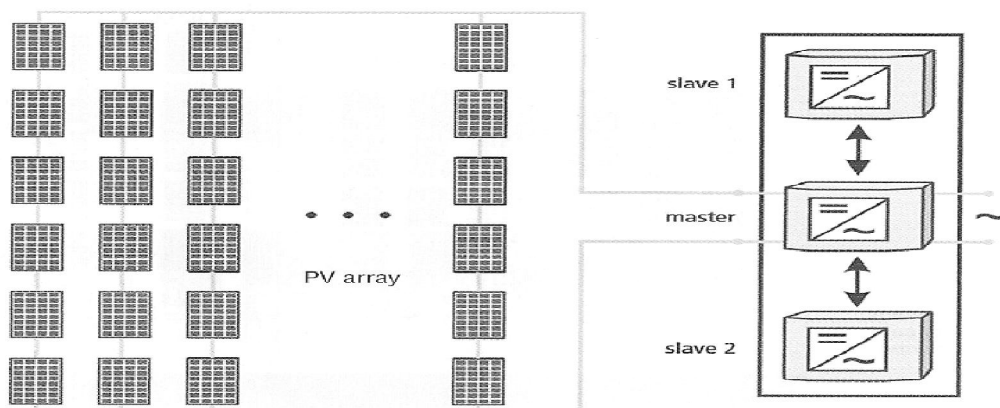
Σχήμα 5.2.1.5: Είδος με κεντρικό μετατροπέα και υψηλές τάσεις. Πηγή: Solarpraxis

ΕΙΔΟΣ «MASTER-SLAVE»

Σε μεγάλα ΦΒ συστήματα συχνά χρησιμοποιείται ένα είδος με κεντρικό μετατροπέα το οποίο βασίζεται στην αρχή «αφέντη-σκλάβου» («master-slave»). Το είδος αυτό χρησιμοποιεί κεντρικούς μετατροπέες (δύο ή τρεις το πολύ). Για να υπολογιστεί το μέγεθος διαιρείται η συνολική ενέργεια με τον αριθμό των μετατροπέων. Ένας μετατροπέας χρησιμοποιείται ως κεντρικό όργανο το οποίο λειτουργεί σε χαμηλότερου εύρους ακτινοβολία. Με αυξανόμενη ακτινοβολία η δύναμη του κεντρικού μετατροπέα φτάνει στο όριό της κι έτσι συνδέεται ο επόμενος μετατροπέας (slave). Για την ισόποση φόρτωση των μετατροπέων, ο πρώτος (master) και ο δεύτερος (slave) μετατροπέας εναλλάσσονται (περιστρεφόμενος master) με μία συγκεκριμένη σειρά.

Το πλεονέκτημα αυτού του είδους είναι ότι σε χαμηλή ακτινοβολία λειτουργεί μόνο ο πρώτος (master) μετατροπέας, οπότε η αποδοτικότητα-ιδιαίτερα σε χαμηλή ένταση-είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση χρησιμοποίησης ενός κεντρικού μετατροπέα. Παρόλα αυτά, το κόστος επένδυσης αυξάνεται σε σχέση με τους κεντρικούς μετατροπέες.

Ένα παράδειγμα του είδους «αφέντη-σκλάβου» («master-slave») είναι το ΦΒ σύστημα 1MW στην στέγη του Εκθεσιακού κέντρου Neue Messe στο Μόναχο, Γερμανία (Σχήμα 5.2.1.7).



Σχήμα 5.2.1.6: Είδος master-slave με κεντρική μονάδα μετατροπέα. Πηγή: Solar praxis

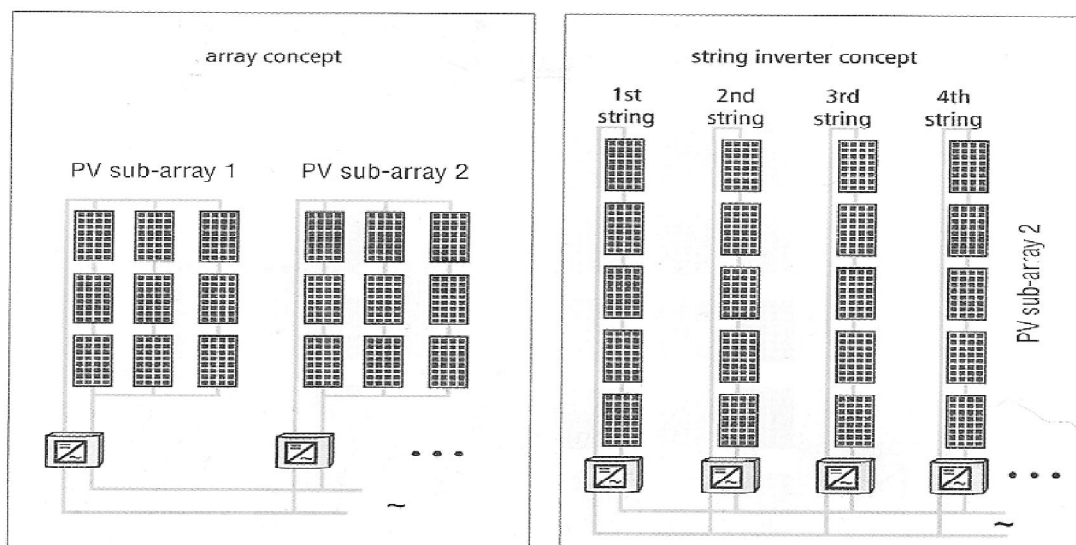


Σχήμα 5.2.1.7: ΦΒ σύστημα 1MW στο Εκθεσιακό κέντρο Neue Messe, Μόναχο, Γερμανία.

5.2.2 Είδος μετατροπέα ημι-συστοιχίας και γραμμής

Τα συστήματα με παραγωγή έως 3kW είναι συνήθως κατασκευασμένα με μετατροπείς γραμμών. Στις πιο πολλές περιπτώσεις ολόκληρη η ΦΒ συστοιχία σχηματίζει μία και μόνο σειρά. Τα μεσαίου μεγέθους συστήματα έχουν συνήθως δύο ή τρεις γραμμές συνδεδεμένες στον μετατροπέα οπότε έχουν ως αποτέλεσμα ένα είδος ημι-συστοίχισης. Έχοντας ένα σύστημα με ημι-συστοιχίες διαφορετικών προσανατολισμών ή με σκίαση, το είδος του μετατροπέα με ημι-συστοιχίες και σειρές επιτρέπει την καλύτερη προσαρμογή (όσον αφορά το ρεύμα) στις διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας. Χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανά ημι-συστοιχία ή ανά σειρά. Είναι σημαντική η διασφάλιση της σύνδεσης μονάδων στην ίδια σειρά με τον ίδιο προσανατολισμό, την ίδια γωνία και ελευθερία από πιθανή σκίαση. Στην περίπτωση όπου οι σειρές είναι πολύ μακριές η σκίαση μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας αφού η μονάδα με την λιγότερη ακτινοβολία καθορίζει το συνολικό ρεύμα της γραμμής.

Η χρησιμοποίηση μετατροπέων γραμμής διευκολύνει την εγκατάσταση και μπορεί να μειώσει σημαντικά τα έξοδά της. Συχνά οι μετατροπείς τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από την ΦΒ συστοιχία και είναι συνδεδεμένοι σε γραμμές. Σήμερα μπορούν να βρεθούν για τάσεις ρεύματος 500W με 3000W.



Σχήμα 5.2.2.8: Είδος μετατροπέα ημι-συστοιχίας και σε σειρά. Πηγή: Solar praxis



Σχήμα 5.2.2.9: Μετατροπείς σε γραμμή χρησιμοποιούνται σε ΦΒ συστήματα 1MW, στην ακαδημία εκπαίδευσης Mont Ceris, στο Herne της Γερμανίας.

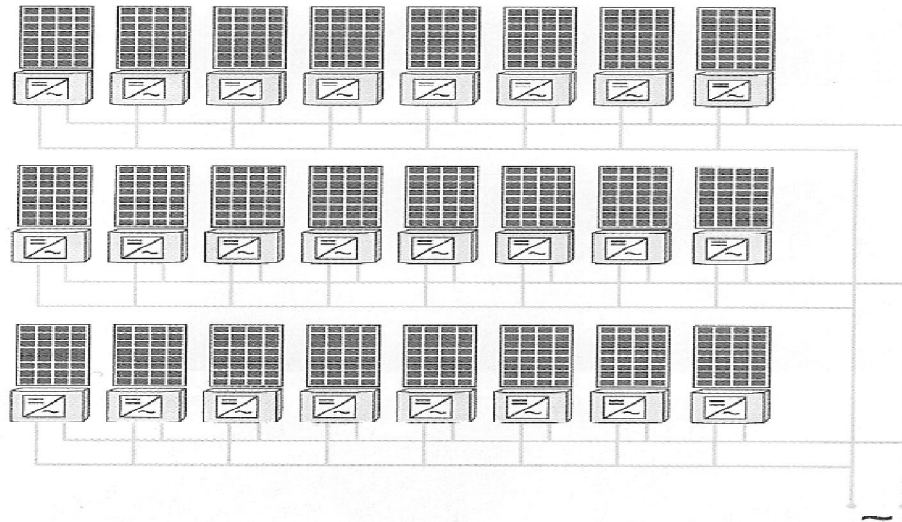
Οι μετατροπείς συνδέονται απευθείας με τις γραμμές των μονάδων οπότε παρουσιάζονται τα εξής πλεονεκτήματα και μία μείωση του κόστους συγκριτικά με τα είδη με κεντρικούς μετατροπείς:

- Κατάργηση του πίνακα συνδέσεων
- Μείωση του αριθμού καλωδίων της μονάδας στις σειρές διασύνδεσης και κατάργηση του βασικού καλωδίου ρεύματος DC.

Το ΦΒ σύστημα 1MW που χρησιμοποιείται στην ακαδημία εκπαίδευσης Mont Ceris στην Herne, στην Νότια Rhine-Westphalia, στην Γερμανία(Σχήμα 5.2.2.9), είναι ένα παράδειγμα υβριδικού είδους στο οποίο χρησιμοποιούνται μετατροπείς ημι-συστοιχίας και σε γραμμή. Χρησιμοποιούνται 569 μετατροπείς γραμμής. Από αρχιτεκτονικής άποψης προβλέπεται η χρησιμοποίηση έξι διαφορετικών ΦΒ πλαισίων. Σχηματίστηκε ένα σύνολο από 16 διαφορετικές συνθέσεις γραμμών έτσι ώστε τα επίπεδα τάσης να είναι μερικές φορές ανάμοια. Οι μετατροπείς γραμμών επιτρέπουν την προσαρμογή των γραμμών σε διαφορετικές MPP τάσεις ρεύματος.

5.2.3 Είδος μετατροπέα πλαισίου

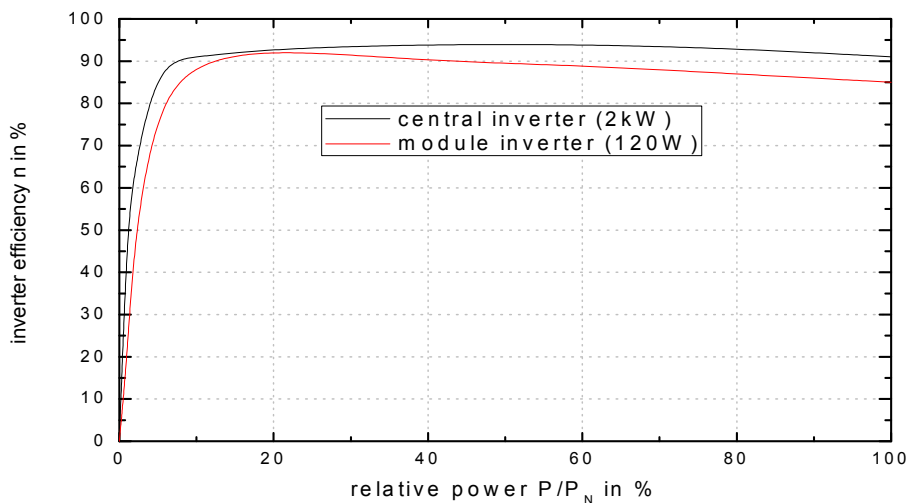
Σε ένα σύστημα υψηλής αποδοτικότητας είναι υποχρεωτικό οι μετατροπείς να είναι κατά τον βέλτιστο τρόπο προσαρμοσμένοι με τα ΦΒ πλαίσια. Θα αποτελούσε μεγάλο πλεονέκτημα για ένα σύστημα, αν κάθε μονάδα λειτουργούσε σε μόνιμη βάση στο υψηλότερο σημείο απόδοσης της. Το ταίριασμα των MPP είναι πιο επιτυχές όταν τα ΦΒ πλαίσια και οι μετατροπείς συναντώνται ως μία μονάδα. Αυτοί οι μετατροπείς πλαισίων ονομάζονται επίσης και πλαίσια συνεχούς ρεύματος (AC). Κάποιες συσκευές είναι τόσο μικρές ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στον πίνακα συνδέσεων του πλαισίου.



Σχήμα 5.2.3.10: Είδος μετατροπέα πλαισίου. Πηγή: Solarpraxis

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να επεκταθεί ένα ΦΒ σύστημα, πράγμα που δεν ισχύει σε άλλα είδη μετατροπέων. Οι μετατροπείς πλαισίου επιτρέπουν στα ΦΒ συστήματα να μπορούν να επεκταθούν όσο είναι επιθυμητό ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχει ένας μόνο μετατροπέας.

Συχνά αναφέρεται ότι ένα μειονέκτημα των μετατροπέων πλαισίου είναι η χαμηλή τους αποδοτικότητα. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά με την περίπτωση των κεντρικών μετατροπέων, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 5.2.3.11. Επιπλέον, η χαμηλή αποδοτικότητα αποζημιώνεται από την καλύτερη απόδοση που προσφέρει το βελτιωμένο ταίριασμα με το αντίστοιχο σημείο MPP του μετατροπέα.



Σχήμα 5.2.3.11: Καμπύλη αποδοτικότητας κεντρικού μετατροπέα και μετατροπέα πλαισίου.

Πηγή: V.Quaschnig

Οι μετατροπείς πλαισίου είναι ακόμα σχετικά ακριβοί. Όταν κυκλοφορήσουν ευρέως στο εμπόριο πλαίσια συνεχούς ρεύματος και μετατροπείς πλαισίου τότε το κόστος θα είναι περισσότερο συμφέρων.

Κατά το στήσιμο των πλαισίων συνεχούς ρεύματος πρέπει να εξασφαλίζεται η εύκολη αντικατάσταση ελαττωματικών μετατροπέων. Σε αυτό το είδος μετατροπέων είναι εξίσου σημαντική η παρακολούθηση του κάθε μετατροπέα χωριστά. Αυτό επιτυγχάνεται με την καταγραφή των σχετικών δεδομένων λειτουργίας, τυχόντων βλαβών και εσφαλμένων σημάτων και την αποθήκευση αυτών των πληροφοριών. Οι κατασκευαστές προσφέρουν συστήματα τα οποία μπορούν να παρακολουθηθούν από έναν Η/Υ, με ένα λογισμικό που προβάλλει τα καταγεγραμμένα δεδομένα.

Το είδος του μετατροπέα πλαισίου πλεονεκτεί σε ολοκληρωμένα ΦΒ συστήματα ενσωματωμένα σε πρόσοψη κτηρίων, ιδιαίτερα αν υπάρχει κάποια μερική σκίαση της πρόσοψης από τα περιβάλλοντα ή προεξοχές και εσοχές στην πρόσοψη. Στο Moritzplatz στο Βερολίνο, στη Γερμανία χρησιμοποιούνται σε γραφεία ή διαμερίσματα ολοκληρωμένα ΦΒ συστήματα πρόσοψης με γυάλινη μόνωση και με μετατροπείς πλαισίου οι οποίοι τροφοδοτούνται στις μονάδες διανομής των διαμερισμάτων.



Σχήμα 5.2.3.12: Μετατροπέας πλαισίου. Πηγή: NKF



Σχήμα 5.2.3.13: ΦΒ πρόσοψη με μετατροπείς σε σειρά, του κτηρίου ECN στις Κάτω Χώρες. Πηγή: OJA-Services, Copyright: Tjerk Reijenga

5.3 Χώρος εγκατάστασης των μετατροπέων

Κατά την επιλογή του χώρου εγκατάστασης είναι πολύ σημαντικό να διατηρούνται οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες (κυρίως υγρασία και θερμοκρασία) που έχουν καθοριστεί από τον κατασκευαστή. Ο ιδανικός χώρος εγκατάστασης ενός μετατροπέα είναι ένας δροσερός και ξηρός εσωτερικός χώρος χωρίς σκόνη. Είναι λογικό να τοποθετηθεί ο μετατροπέας δίπλα ή κοντά στο κουτί με τους μετρητές. Αν το επιτρέπουν οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες, ο μετατροπέας μπορεί να εγκατασταθεί κοντά στον πίνακα συνδέσεων της ΦΒ συστοιχίας. Αυτό μειώνει το μήκος του κύριου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος και λιγοστεύει τα έξοδα εγκατάστασης.

Τα συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης πρέπει να κρατούνται ακάλυπτοι για να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ψύξη. Για τον ίδιο λόγο, οι συσκευές δεν θα πρέπει να τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη, αν φυσικά αυτό είναι δυνατό. Κατά την επιλογή του χώρου εγκατάστασης πρέπει επιπλέον να λαμβάνεται υπ' όψιν και ο θόρυβος του μετατροπέα. Οι μονάδες θα πρέπει να προστατεύονται από επιθετικούς ατμούς, υδρατμούς και λεπτά μόρια. Για παράδειγμα, σε αχυρώνες και στάβλους, όπου ατμοί αμμωνίας μπορεί να αναδύονται, είναι δυνατό να φθείρει τον μετατροπέα. Συχνά, οι μεγάλοι κεντρικοί μετατροπείς τοποθετούνται σε ένα ξεχωριστό ντουλάπι μαζί με κατάλληλο εξοπλισμό προστασίας τους, τους μετρητές καθώς και τον εξοπλισμό διανομής του ηλεκτρικού φορτίου.

Οι μετατροπείς σε σειρά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε οροφές ή σε εξωτερικούς χώρους. Οι συσκευές αυτές έχουν προστασία IP 54 που τους επιτρέπει να αντέχουν στις καιρικές συνθήκες στους εξωτερικούς χώρους. Παρ' όλα αυτά συνίσταται οι μετατροπείς να παραμένουν προστατευμένοι από την απευθείας έκθεση στον ήλιο και την βροχή προκειμένου να ασκηθεί θετική επιρροή στη διάρκεια λειτουργίας. Επιπλέον, πρέπει να είναι εγγυημένη η δυνατότητα πρόσβασης στην περίπτωση μιας βλάβης του μετατροπέα ώστε να είναι δυνατή η επισκευή του. Αν οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες το επιτρέπουν είναι δυνατή η εγκατάσταση του μετατροπέα κοντά στον πίνακα συνδέσεων της ΦΒ συστοιχίας. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες ενέργειας λόγω του μήκους του κυρίου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος και χαμηλώνει και το κόστος εγκατάστασης.

5.4 Το μέγεθος του μετατροπέα

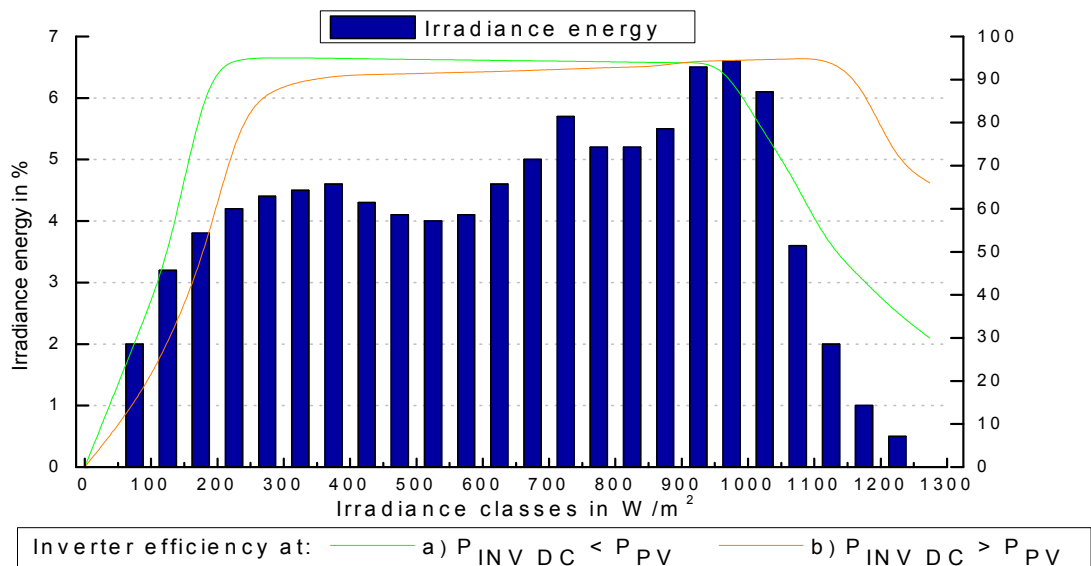
Οι τεχνικές προδιαγραφές των μετατροπέων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το μέγεθος και την εγκατάστασή τους. Είναι σημαντικό αυτές να μην παραβλέπονται. Το σύστημα και το είδος της σύνδεσης καθορίζουν τον αριθμό, τα επίπεδα τάσης και την κατηγορία δύναμης του μετατροπέα.

5.4.1 Επιλέγοντας το πλήθος και την εκτίμηση δύναμης των μετατροπέων

Ο αριθμός και η εκτίμηση δύναμης των μετατροπέων καθορίζεται από την συνολική ενέργεια του ΦΒ συστήματος καθώς και από τον επιλεγμένο σύστημα. Σύμφωνα με τον οδηγό VDEW στην Γερμανία, μία μονοφασική παράλληλη τροφοδοσία επιτρέπεται έως μία φαινομενική τροφοδοσία ρεύματος της τάξης του $S_{AC} = 4,6kVA$. Σύμφωνα με αυτό, θα πρέπει η πιθανή παραγόμενη ενέργεια του μετατροπέα P_{nAC} να αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή. Πάνω από $4,6kVA$, θα πρέπει η τροφοδοσία να είναι πολυφασική. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πολλαπλούς μονοφασικούς μετατροπείς οι οποίοι, αν είναι δυνατό, να διανέμουν το ρεύμα ισόποσα στις τρεις φάσεις (με μέγιστο άνισο φορτίο τα $4,6kVA$). Παρόλα αυτά, σύμφωνα με το δελτίο VDN (03/2004) σχετικά με τον οδηγό VDEW, η μέγιστη επιτρεπόμενη τροφοδοσία ρεύματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για ένα διάστημα 10 λεπτών μπορεί να είναι μέχρι 10% πιο πάνω από την αναμενόμενη παραγωγή του μετατροπέα (VDN, 2004). Οι κατασκευαστές μετατροπέων εγγυώνται και πιστοποιούν τις τιμές αυτές σύμφωνα με την δήλωση συμμόρφωσης:

Μέγιστη παραγωγή ενέργειας του μετατροπέα (AC) = $S_{max10min} \leq 1,1 \times S_N$

Οι ηλιακές συστοιχίες και οι μετατροπείς πρέπει να είναι βέλτιστα ταιριασμένοι με τις μεταξύ τους παραγόμενες τιμές. Η ονομαστική παραγόμενη ενέργεια των μετατροπέων μπορεί να είναι $\pm 20\%$ του ρεύματος εξόδου (υπό STC) της ΦΒ συστοιχίας, ανάλογα με τον μετατροπέα και την τεχνολογία του πλαισίου και τις τοπικές συνθήκες, όπως η έκθεση στις ηλιακές ακτίνες της περιοχής και τον προσανατολισμό των πλαισίων.



Σχήμα 5.4.1.14: Κατανομή της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο πλαίσιο ενός συστήματος στο Μόναχο, Γερμανίας (30° Νότια) και καμπύλες αποδοτικότητας για ένα μικρότερο (-10%) κι ένα μεγαλύτερο (+10%) μετατροπέα, οι τάξεις ακτινοβολίας είναι βασισμένες σε τιμές 5-λεπτης μέτρησης. Πηγή: R.Haselhuhn.

Οι μικρότεροι, μέχρι και κατά 40%, μετατροπείς, οι οποίοι συχνά χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν, προτεινόταν με βάση δεδομένα ωριαίας ακτινοβολίας. Τα ωριαία δεδομένα έδειξαν ότι υπήρχαν μόνο κάποια μικρά ποσά ενέργειας της ακτινοβολίας σε επίπεδα ακτινοβολίας πάνω από 850W/m^2 . Παρόλα αυτά οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν σε μία βάση λεπτού/δευτερολέπτου δείχνουν ότι σημαντικές ποσότητες ενέργειας εμφανίζονται και σε επίπεδα ακτινοβολίας της τάξης των 1000W/m^2 .

Η αναλογία ανάμεσα στην ενέργεια των ΦΒ συστοιχιών και του μετατροπέα είναι 1:1 και χρησιμοποιείται σαν οδηγός στην επιλογή μεγέθους. Εφόσον οι μετατροπείς που είναι διαθέσιμοι έχουν συγκεκριμένα επίπεδα δύναμης και ο αριθμός των πλαισίων, οπότε και της ενέργειας της ηλιακής συστοιχίας, καθορίζονται από το μέγεθος της περιοχής που χρησιμοποιείται, μία απόκλιση της αναλογίας μεγέθους 1:1 είναι εν γένει κανόνας. Παρόλα αυτά δεν πρέπει απαραίτητα να εμπιστευόμαστε την αναφερόμενη από τον κατασκευαστή, μέγιστη συνδέσιμη ΦΒ ενέργεια. Η εμπειρία δείχνει ότι σε μερικές περιπτώσεις αναφέρονται μεγάλες τιμές πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα να λειτουργούν οι συσκευές υπερφορτωμένες. Οι επιπτώσεις είναι οι αποφεύξιμες ενεργειακές απώλειες από τον πίνακα ελέγχου των ορίων ρεύματος και η πιθανή πρόωρη γήρανση των μηχανημάτων. Μία πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι ο υπολογισμός του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω της ονομαστικής αποδοτικότητας του μετατροπέα από το φαινομενικό (ονομαστικό) συνεχές ρεύμα. Ο κατασκευαστής του μετατροπέα οφείλει να δηλώνει το ονομαστικό συνεχές ρεύμα στη δήλωση συμμόρφωσης. Το ονομαστικό συνεχές ρεύμα είναι το ρεύμα με το οποίο μπορεί να τροφοδοτεί συνεχόμενα ο μετατροπέας το πλέγμα χωρίς διακοπή σε περιβάλλουσα θερμοκρασία της τάξης των 25°C ($\pm 2^\circ\text{C}$).

Το ποσοστό του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι κατά μέσο όρο 5% υψηλότερο από το ονομαστικό συνεχές ρεύμα του μετατροπέα. Το παρακάτω εύρος ενέργειας μπορεί να καθοριστεί για το μέγεθος:

$$0,8 \times P_{PV} < P_{INV DC} < 1,2 \times P_{PV}$$

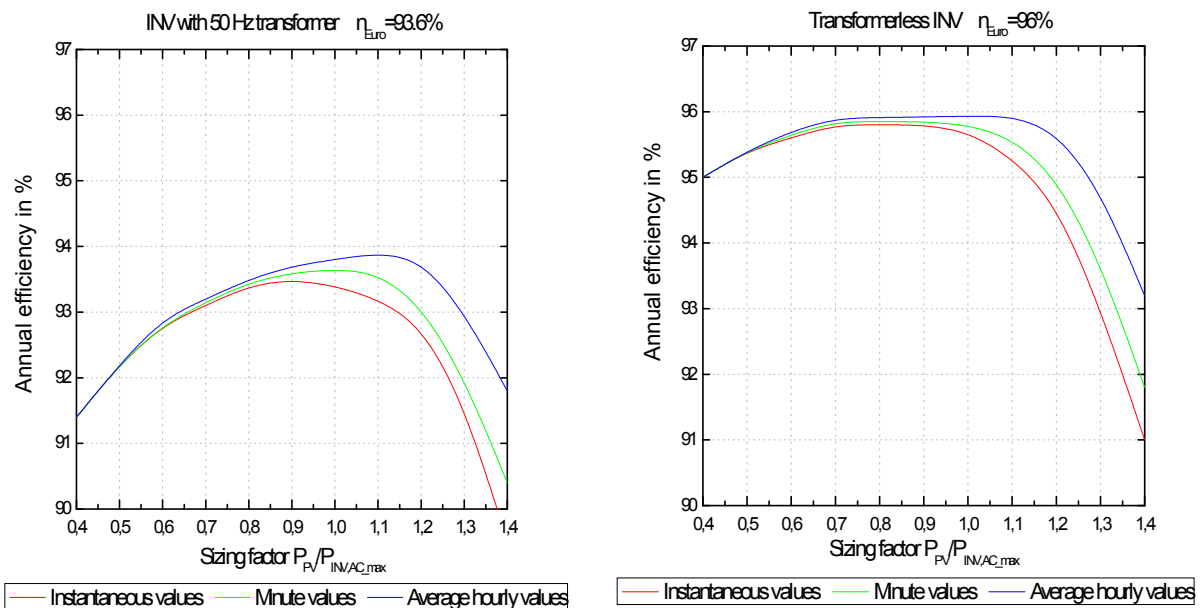
Η αναλογία του ποσοστού της ενέργειας της ΦΒ συστοιχίας (W_p) με το ονομαστικό εναλλασσόμενο ρεύμα του μετατροπέα είναι γνωστή ως ο παράγοντας μεγέθους του μετατροπέα C_{INV} :

$$C_{INV} = \frac{P_{PV}}{P_{INV AC}}$$

Ο παράγοντας μεγέθους περιγράφει τα επίπεδα αξιοποίησης του μετατροπέα. Ένας τυπικός παράγοντας μεγέθους είναι το 1 μέσα σε ένα εύρος: $0,83 < c_{INV} < 1,25$

Όταν οι μετατροπείς τοποθετούνται σε υπερώο ή σε εξωτερικούς χώρους, είναι πιθανό να πρέπει να είναι λίγο μικρότεροι διότι ίσως να λειτουργούν σε συνθήκες υψηλής περιβάλλουσας θερμοκρασίας. Κάποιες περιοχές δεν είναι κατάλληλες λόγω των ακραίων θερμοκρασιών και άλλων περιβαλλοντολογικών παραγόντων. Τα εγχειρίδια ή οι προμηθευτές πρέπει να αναφέρουν την περίπτωση μη καταλληλότητας κάποιας περιοχής.

Έρευνες που έγιναν από τον Bruno Berger στο Fraunhofer ISE, στο Freiburg της Γερμανίας, έδειξαν επιπλέον απώλειες 0,5% με 1%, με έναν παράγοντα μεγέθους c_{INV} της τάξης του 1,1 με 1,2 σαν αποτέλεσμα παύσης της λειτουργίας του μετατροπέα κατά την διάρκεια αυξημένης ακτινοβολίας. Με παράγοντα μεγέθους 1,2 με 1,3 παρουσιάστηκαν επιπλέον απώλειες ανάμεσα στο 1% με 3%. Οι έρευνες αυτές βασίστηκαν σε μία προσανατολισμένη προς το νότο, με 30° κλίση για ψύξη της ΦΒ συστοιχίας. Έχουν υπολογιστεί οι ετήσιες αποδόσεις των μετατροπέων με ή χωρίς μετασχηματιστή (Σχήμα 5.4.1.15). Οι καμπύλες αναφέρονται σε στιγμιαίες, σε κατά μέσο όρο ενός λεπτού καθώς και σε ωριαίες τιμές. Οπότε, η διαφορά στην παραγωγή κατά την καταγραφή στιγμιαίων τιμών φαίνεται ξεκάθαρα στη γραφική παράσταση όταν υπολογίζουμε το μέγεθος χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα προσομοίωσης σε μία βάση της μίας ώρας. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και η ποιότητα του συστήματος καταγραφής του μετατροπέα, δηλαδή ικανότητα καταγραφής.



Σχήμα 5.4.1.15: Προσομοιωμένες ετήσιες αποδόσεις μετατροπέων με ή χωρίς μετασχηματιστή ανάλογα με τον παράγοντα μεγέθους. Πηγή: Fraunhofer ISE

Όπως η ικανότητα καταγραφής του μετατροπέα, έτσι και οι απώλειες καλωδίων και η πιθανή αρνητική απόκλιση από την ονομαστική ενέργεια του πλαισίου, δεν έχουν μέχρι τώρα ληφθεί υπ' όψιν (Burger, 2005).

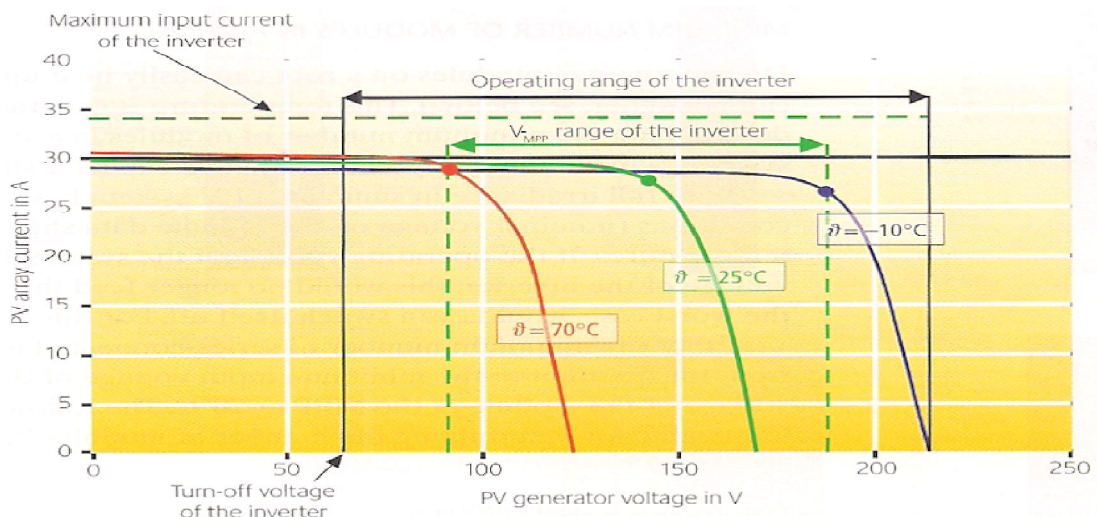
Σε συστήματα χωρίς βέλτιστη ευθυγράμμιση ή με μερική σκίαση είναι λογικό από τεχνικής και οικονομικής πλευράς να επιλέγεται λίγο μικρότερο μέγεθος μετατροπέα. Στην περίπτωση αυτή τα διαφορετικά χαρακτηριστικά υπερφόρτωσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Με συχνές συνεχόμενες υπερφορτώσεις η ζωή του μηχανήματος μειώνεται ταχύτατα. Παρόλα αυτά δεν θα πρέπει να ξεπερνιέται η μέγιστη τάση εισόδου. Για τον λόγο αυτό τα παρακάτω είναι σημαντικά για την επιλογή μεγέθους.

Όταν χρησιμοποιούνται αλλοπρόσαλλα/άμορφα πλαίσια, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά την επιλογή μεγέθους η υποβάθμιση των πλαισίων. Τα άμορφα αυτά πλαίσια είναι δυνατό να έχουν περίπου 15% υψηλότερη ισχύ τους πρώτους μήνες λειτουργίας τους πριν αυτή μειωθεί σε κάποια σταθερή ονομαστική τιμή ως αποτέλεσμα της αρχικής υποβάθμισης του φωτός. Το αποτέλεσμα αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν σε συνδυασμό με την παρεπόμενη τάση και το τωρινό μέγεθος του μετατροπέα. Κατά την διάρκεια της περιόδου αυτής, η τάση λειτουργίας μπορεί να είναι περίπου 11% υψηλότερη από την ονομαστική τιμή και το ρεύμα λειτουργίας να είναι 4% περίπου υψηλότερο.

5.4.2 Επιλογή τάσης

Το μέγεθος της τάσης του μετατροπέα είναι το άθροισμα των τάσεων των πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά σε μία γραμμή. Εφόσον η τάση του πλαισίου και η τάση ολόκληρης της ΦΒ συστοιχίας εξαρτώνται από την θερμοκρασία, για την επιλογή του μεγέθους χρησιμοποιούνται οι ακραίες συνθήκες λειτουργίας του χειμώνα και του καλοκαιριού.

Για να είναι δυνατό το βέλτιστο ταίριασμα των μετατροπέων με την ηλιακή συστοιχία, είναι σημαντικό να υπολογίζονται η θερμοκρασία των πλαισίων και οι παράμετροι λειτουργίας λόγω της ακτινοβολίας. Η τάση της ΦΒ συστοιχίας είναι άμεσα εξαρτώμενοι από την θερμοκρασία. Το εύρος λειτουργίας του μετατροπέα πρέπει να είναι συμβατό με την I-V καμπύλη της συστοιχίας. Το εύρος του MPP του μετατροπέα θα πρέπει, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4.2.16, να συγχωνεύει τα σημεία MPP της I-V καμπύλης της συστοιχίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και η διακοπή λειτουργίας της τάσης καθώς και η αντίσταση της τάσης.



Σχήμα 5.4.2.16: I-V καμπύλη της ΦΒ συστοιχίας και ένα εύρος λειτουργίας του μετατροπέα. Πηγή: R.Haselhuhn

Μέγιστος αριθμός πλαισίων σε μία γραμμή

Ο πρώτος περιορισμός καθορίζεται από την θερμοκρασία -10°C το χειμώνα (Γερμανία). Σε χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνεται η τάση του πλαισίου. Η υψηλότερη τάση που μπορεί να επιτευχθεί σε συνθήκες λειτουργίας είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αν ο μετατροπέας κλείσει κατά την διάρκεια μίας ηλιόλουστης χειμωνιάτικης μέρας (π.χ. λόγω βλάβης του πλέγματος), μπορεί να προκληθεί υψηλή τάση στο ανοιχτό κύκλωμα όταν ο μετατροπέας ξαναλειτουργήσει. Η τάση αυτή θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από την μέγιστη εναλλασσόμενη τάση εισόδου του μετατροπέα, διότι σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκληθεί ζημιά στο μετατροπέα. Οπότε, ο μέγιστος αριθμός των πλαισίων που μπορούν να είναι συνδεδεμένοι σε σειρά προκύπτει από το πηλίκο της μέγιστης τάσης εισόδου του μετατροπέα και την τάση ανοιχτού κυκλώματος του πλαισίου στους -10°C :

$$n_{max} = \frac{V_{max(INV)}}{V_{OC(\text{πλαίσιο}-10^{\circ}\text{C})}}$$

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος των πλαισίων στους -10°C δεν προσφέρεται πάντα από τον κατασκευαστή του πλαισίου. Αντ' αυτού η πληροφορία αυτή μπορεί να βρεθεί στην διαφορά τάσης ΔV σαν επί τοις εκατό ποσοστό ή στα mV ανά $^{\circ}\text{C}$. Η διαφορά τάσης είναι προκαθορισμένη με αρνητικό πρόσημο. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της τάσης του ανοιχτού κυκλώματος στους -10°C από την τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{OC(STC)}$.

Με ΔV επί τοις εκατό ποσοστό ανά $^{\circ}\text{C}$:

$$V_{OC(\text{πλαίσιο}-10^{\circ}\text{C})} = \left(1 - 35^{\circ}\text{C} \times \frac{\Delta V}{100}\right) \times V_{OC(STC)}$$

Με ΔV σε mV ανά $^{\circ}\text{C}$:

$$V_{OC(\text{πλαίσιο}-10^{\circ}\text{C})} = V_{OC(STC)} - 35^{\circ}\text{C} \times \Delta V$$

Εδώ θα πρέπει να διασφαλίζεται το αρνητικό πρόσημο της ΔV .

Στην περίπτωση που δεν δίνεται καμία καμπύλη, είναι δυνατό να δείχνει ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός μονό-κρυσταλλικού ή πολύ-κρυσταλλικού πλαισίου αυξάνεται στους -10°C κατά περίπου 14% σε σύγκριση με τις συνθήκες STC: $V_{OC(\text{πλαίσιο}-10^{\circ}\text{C})} = 1,14 \times V_{OC(STC)}$

Ελάχιστος αριθμός πλαισίων σε μία γραμμή

Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, τα πλαίσια σε μία σκεπή είναι δυνατό να θερμανθούν μέχρι και τους 70°C (μπορεί και υψηλότερα, βλ. παρακάτω). Η θερμοκρασία αυτή χρησιμοποιείται γενικά ως βάση για τον καθορισμό του ελάχιστου αριθμού πλαισίων σε μία γραμμή. Σε συστήματα με καλό σύστημα ψύξης, μία μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να θεωρηθεί στην Γερμανία είναι της τάξης των 60°C .

Με μέγιστη ακτινοβολία το καλοκαίρι, ένα ΦΒ σύστημα έχει τάση χαμηλότερη από αυτή σε συνθήκες STC (ονομαστική τάση στα φυλλάδια πληροφοριών του πλαισίου) χάρις στις αυξημένες θερμοκρασίες. Αν η τάση λειτουργίας του συστήματος πέσει κάτω από την ελάχιστη MPP τάση του μετατροπέα, τότε αυτός δεν θα μπορεί πλέον να τροφοδοτήσει με τη μέγιστη ενέργεια και στην χειρότερη περίπτωση, θα σταμάταγε από μόνος του. Για τον λόγο αυτό, το μέγεθος του συστήματος θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε ο μικρότερος αριθμός πλαισίων σε σειρά που είναι σε μία γραμμή καθορίζεται από το πηλίκο της ελάχιστης τάσης εισόδου του μετατροπέα στο MPP προς την τάση του πλαισίου στο MPP στους 70°C .

Ο παρακάτω τύπος δίνει τον περιορισμό για τον ελάχιστο αριθμό πλαισίων σε σειρά:

$$\eta_{\min} = \frac{V_{MPP(INV \min)}}{V_{MPP(\text{πλαίσιο } 70^{\circ}\text{C})}}$$

Αν η τάση του πλαισίου στο MPP στους 70°C δεν καθορίζεται από τον κατασκευαστή, μπορεί να υπολογιστεί από την MPP τάση $V_{MPP(STC)}$ υπό συνθήκες STC, χρησιμοποιώντας τα σχήματα για την διαφορά τάσης ΔV σε επί τοις εκατό ποσοστό ή σε mV ανά $^{\circ}\text{C}$:

$$V_{MPP(\text{πλαίσιο } 70^{\circ}\text{C})} = \left(1 + 45^{\circ}\text{C} \times \frac{\Delta V}{100}\right) \times V_{MPP(STC)}$$

Με ΔV σε mV ανά $^{\circ}\text{C}$:
$$V_{MPP(\text{πλαίσιο } 70^{\circ}\text{C})} = V_{MPP(STC)} + 45^{\circ}\text{C} \times \Delta V$$

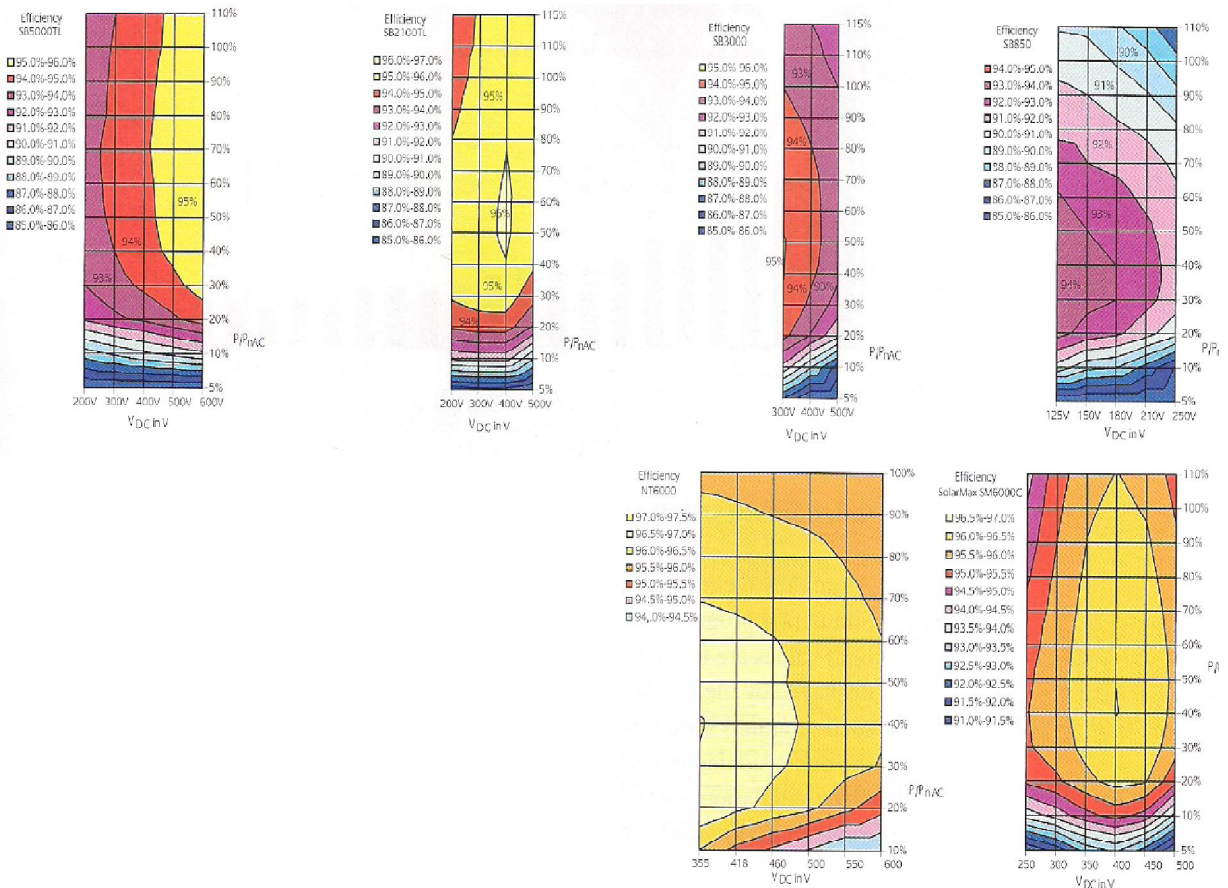
Γενικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η MPP τάση ενός μονό-κρυσταλλικού ή πολύ-κρυσταλλικού πλαισίου στους 70°C θα μειωθεί κατά περίπου 18% σε σχέση με τις συνθήκες STC:

$$V_{MPP(\text{πλαίσιο } 70^{\circ}\text{C})} = 0,82 \times V_{OC(STC)}$$

Η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται καθορίζεται από την τοποθεσία του συστήματος. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τον υπολογισμό της διαφοράς τάσης. Σε συστήματα οροφής ή πρόσοψης χωρίς σύστημα ψύξης, οι θερμοκρασίες μπορούν να φτάσουν μέχρι και τους 100°C . Σε αυτή τη περίπτωση, η τάση V_{MPP} στους 100°C χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ελάχιστου αριθμού του αριθμού πλαισίων σε μία γραμμή. Σε συστήματα με μακριές γραμμές, έντονη σκίαση μπορεί να προκαλέσει σημαντική πτώση της MPP τάσης. Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν όταν επιλέγεται το μέγεθος. Ελέγχοντας τα όρια τάσης και καθορίζοντας την συχνότητα που επιτυγχάνονται οι τάσεις αυτές, διάφορα προγράμματα εξομίωσης μπορούν να δώσουν πληροφορίες για το βέλτιστο μέγεθος.

Βελτιστοποίηση τάσης

Κατά την βελτιστοποίηση της τάσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι η αποδοτικότητα του μετατροπέα εξαρτάται από την τάση. Οι προδιαγραφές ή/και οι καμπύλες εξάρτησης της τάσης είναι απαραίτητες στην περίπτωση αυτή. Παρόλα αυτά, κατά την παρούσα περίοδο, μόνο ελάχιστοι κατασκευαστές προσφέρουν πληροφορίες για την αποδοτικότητα σε διαφορετικές τάσεις του μετατροπέα. Ένας αριθμός συσκευών (π.χ. από τους κατασκευαστές μετατροπέων Fronius, SMA και Sunways) μετρήθηκε λεπτομερώς στο εργαστήριο φβ στο Πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών της Βέρνης, στο Burgdorf στην Σουηδία. Μία εκτενής περιγραφή της εξέτασης και τα τεχνικά δεδομένα είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο στο www.pvtest.ch.



Σχήμα 5.4.2.17 Αποδοτικότητα σε σχέση με την τάση εισόδου διαφορετικών ειδών μετατροπέων κατασκευασμένων από τις SMA, Sputnik και Sunways. Πηγή: Baumgartner, 2005

Τα παραπάνω σχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ’ ευθείας για κάποιους τύπους μετατροπέων, κατασκευασμένους από τις SMA, Sputnik και Sunways, για την βελτιστοποίηση του μεγέθους της τάσης. Είναι βασισμένα σε μετρήσεις και έρευνες των κατασκευαστών, οι οποίες έλαβαν χώρα στο εργαστήριο για συστήματα ηλεκτρονικών μετρήσεων στο Neu-Technikum Buchs (Τεχνολογικό Κολλέγιο Buchs, NTB) στην Σουηδία.

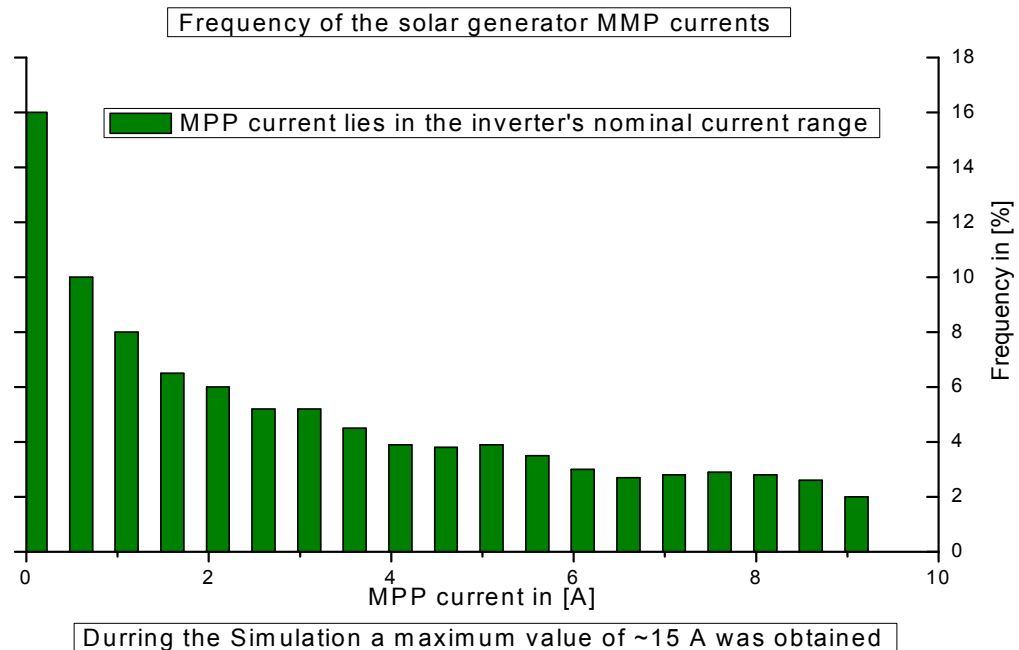
Ταιριάζοντας καλύτερα την ΦΒ συστοιχία με τον μετατροπέα, η παραγωγή μπορεί να αυξηθεί κατά αρκετά ποσοστά. Γι’ αυτό και ένας μετατροπέας με καλύτερη αποδοτικότητα σε όλο το εύρος της κανονικής τάσης λειτουργίας της ΦΒ συστοιχίας μπορεί να αποτελεί μία καλή επένδυση. Ο μετατροπέας συνήθως καταλαμβάνει το 10% του κόστους σε ένα ΦΒ σύστημα με πλέγμα, οπότε οποιαδήποτε αύξηση του κόστους του μετατροπέα μπορεί γρήγορα να αποσβεφθεί.

5.4.3 Καθορίζοντας το πλήθος των γραμμών

Ολοκληρώνοντας την επιλογή μεγέθους, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το μέγιστο ρεύμα του ΦΒ συστήματος δεν ξεπερνά το μέγιστο ρεύμα εισόδου στον μετατροπέα. Ο μέγιστος αριθμός γραμμών είναι όσο μεγάλο είναι το πηλίκο του μέγιστου επιτρεπτού εναλλασσόμενου ρεύματος εισόδου στον μετατροπέα προς το μέγιστο ρεύμα της γραμμής:

$$n_{\text{γραμμή}} = I_{\text{max INV}} / I_{\text{γραμμή}}$$

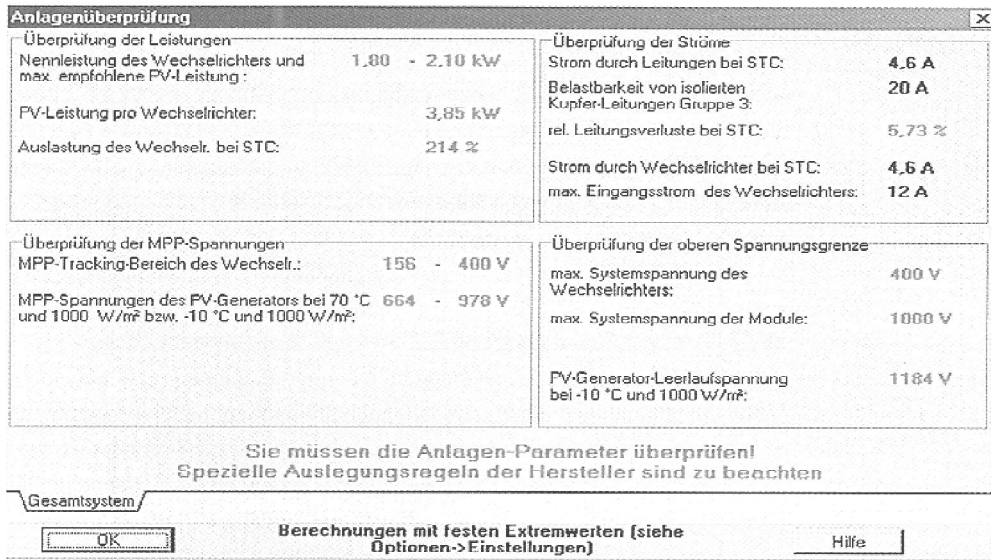
Αν ο μετατροπέας είναι μικρότερος, θα πρέπει να ελεγχθεί πόσο συχνά εκτίθεται ο μετατροπέας σε υπέρβαση του εύρους του ρεύματος. Έτσι μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις στο αν υπάρχει μικρή ή μεγάλη υπερφόρτωση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα προγράμματα προσομοίωσης. Το Σχήμα 5.4.3.18 απεικονίζει έναν υπερφορτωμένο μετατροπέα: αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη γήρανση του μετατροπέα ή σε καταστροφή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.



Σχήμα 5.4.3.18: Υπολογίζοντας το φορτίο ρεύματος χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα προσομοίωσης SolEm

5.4.4 Επιλογή του μεγέθους χρησιμοποιώντας πρόγραμμα προσομοίωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μέγεθος του μετατροπέα μπορεί να επιλεγεί χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα προσομοίωσης. Τα προγράμματα αυτά καθώς και τα προγράμματα επιλογής μεγέθους παρέχουν προειδοποιήσεις για το λάθος μέγεθος αν υπερβαίνονται οι οριακές τιμές. Ως παράδειγμα, το Σχήμα 5.4.4.19 δείχνει το μήνυμα λάθους που εμφανίζεται από το πρόγραμμα PV*SOL όταν έχει επιλεγεί λάθος μέγεθος για το ΦΒ σύστημα. Παρόλα αυτά τέτοια προγράμματα δεν θα πρέπει να χαιρούν τυφλής εμπιστοσύνης. Τα προγράμματα μπορεί να περιέχουν λάθη και ακόμη όταν τα όρια των διαστάσεων τηρούνται πιστά μπορεί το μέγεθος να μην είναι το βέλτιστο. Επιπλέον, πολλά προγράμματα προσομοίωσης ελέγχουν το μέγεθος χρησιμοποιώντας μόνο ωριαίες τιμές ακτινοβολίας. Τα προγράμματα προσομοίωσης περιγράφονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 5.

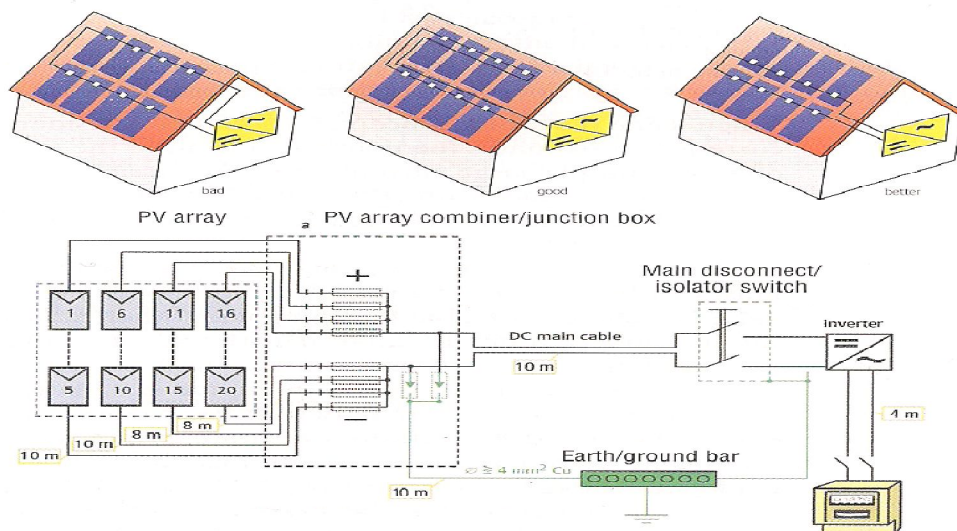


Σχήμα 5.4.4.19: Μήνυμα λάθους που εμφανίζεται από το πρόγραμμα PV*SOL. Πηγή: Siemens

5.5 Επιλέγοντας είδος και μέγεθος καλωδίων για φβ συστήματα συνδεδεμένα σε πλέγμα

Όταν επιλέγεται το είδος και το μέγεθος των καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος για ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα σε πλέγμα, πρέπει αυτά να συμφωνούν με τους εθνικούς κώδικες και κανονισμούς που επιτρέπονται σε τέτοιου είδους συστήματα. Το παρακάτω παράδειγμα βασίζεται σε εφαρμογή στην Γερμανία. Εφαρμογές σε άλλες χώρες διαφέρουν. Το ίδιο ισχύει και για ασφάλειες και άλλα εξαρτήματα σύνδεσης καλωδίων.

Υπολογίστηκαν προσεγγιστικά τα μήκη των καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε ένα σχέδιο οροφής παρουσιάζοντας την διάταξη του πλαισίου και την τοπογράφηση του κτιρίου. Για την καλωδίωση του πλαισίου έμπειρη ρύθμιση των πλαισίων μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα μήκη των συρμάτων οπότε και τις απώλειες καλωδίων και τη ζεύξη κύματος (βλ. παράγραφος 5.7.2 Έμμεση επίδραση αστραπής και εσωτερική προστασία από αστραπή).



Σχήμα 5.5.20: (α) Παραλλαγές καλωδίων πλαισίου: η παραλλαγή στα δεξιά βελτιστοποιεί τα μήκη καλωδίων και τη ζεύξη κύματος, (β) διάγραμμα καλωδίων για σύστημα των 2kW με κεντρικό μετατροπέα (παράδειγμα).

Πηγή: R.Haselhuhn

Ένα διάγραμμα συστήματος καλωδίων πρέπει να καταρτιστεί. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός κατά την διάρκεια εγκατάστασης και να αποτελέσει μέρος των εγγράφων του συστήματος.

Όταν επιλέγεται το μέγεθος των καλωδίων, πρέπει να παρατηρηθούν τρία βασικά κριτήρια: οι εκτιμήσεις τάσης των καλωδίων, η χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος του καλωδίου και η ελαχιστοποίηση των απωλειών του καλωδίου.

5.5.1 Εκτιμήσεις τάσης καλωδίων

Τα ΦΒ συστήματα εν γένει δεν ξεπερνούν τις εκτιμήσεις τάσης των πρότυπων καλωδίων (ονομαστικές τάσεις των 450V με 1000V) που χρησιμοποιούνται στην Γερμανία και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Σε μεγάλα ΦΒ συστήματα και μακριές γραμμές πλαισίων, η εκτίμηση της τάσης του καλωδίου θα πρέπει να ελέγχεται, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος (στους -10°C) της ΦΒ γραμμής ή συστοιχίας στην οποία είναι συνδεδεμένο.

5.5.2 Χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος καλωδίου

Η διατομή του καλωδίου επιλέγεται ανάλογα με το μέγιστο ρεύμα. Εδώ οι τιμές για την χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος του καλωδίου, οι οποίες παρατίθενται στην IEC 60512, Μέρος 3, πρέπει να διατηρούνται. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να περνάει από το καλώδιο του πλαισίου ή της γραμμής είναι το παράγων ρεύμα βραχυκυκλώματος μείον το ρεύμα βραχυκυκλώματος μιάς γραμμής:

$$I_{\max} = I_{SC \Phi/B} - I_{SC \text{ γραμμής}}$$

Το καλώδιο είναι είτε σχεδιασμένο για αυτό το ρεύμα είτε χρησιμοποιούνται ασφάλειες των γραμμών για την προστασία των καλωδίων από υπερφόρτωση. Το μέγιστο ρεύμα I_{\max} πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από την χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος του καλωδίου ή από την συσκευή προστασίας I_Z :

$$I_{\max} \leq I_Z$$

	Τμήμα καλωδίου διατομής σε mm ²	Μέγιστο ρεύμα σε A μεμονωμένο που				
		30 °C	55 °C	70 °C	Συσώρευση: Έξι πυρήνες σε μια δέσμη	
		30 °C	55 °C	70 °C	55 °C	70 °C
ΑEG Ηλιακό πλαίσιο	2.5	42	32	24	17	13
Καλώδιο (μέγιστο 90°C)	4	56	42	32	22	17
Radox 125	2.5	49	38	34	20	18
(μέγιστο 125 °C)	4	66	51	45	27	24
Titanex 11	2.5	33	24	17	13	9
(μέγιστο 85 °C)	4	45	33	23	17	12

Πίνακας 5.3: Χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος των πρότυπων ΦΒ καλωδίων σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών. Πηγή: VDE

Όταν χρησιμοποιείται το είδος συστήματος με γραμμές, θα πρέπει να υπολογίζεται ότι το παραγόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος προσεγγίζει το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής. Εφόσον οι ασφάλειες «πέφτουν» μόνο λόγω των πολλαπλών διακυμάνσεων του ρεύματος, δεν είναι δυνατό να προστατευθεί το καλώδιο χρησιμοποιώντας μόνο ασφάλειες των γραμμών. Με βάση την IEC 60364-7-712, το καλώδιο της γραμμής θα πρέπει να μπορεί να μεταφέρει 1,25 φορές το παραγόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος και να είναι γειωμένο και προστατευμένο από βραχυκύκλωμα.

Κατά την επιλογή του μεγέθους του καλωδίου, θα πρέπει οι απαιτήσεις διαβιβάσεις να ακολουθούν την IEC 60512, Μέρος 3. Η χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος του καλωδίου επηρεάζονται από την περιβάλλουσα θερμοκρασία, τα συγκεντρωμένα καλώδια και την μέθοδο τοποθέτησης (μέσα στον σωλήνα καλωδίων, σε ξύλινο χώρισμα, ή πίσω από γύψο κλπ.). Τα κεραμίδια μπορεί να έχουν θερμοκρασία της τάξης των 70°C, η οποία θα πρέπει να εφαρμόζεται όταν επιλέγεται το μέγεθος του πλαισίου ή των καλωδίων των γραμμών σε εγκαταστάσεις οροφής.

Οι ασφάλειες γραμμών συνήθως χρησιμοποιούνται σε ΦΒ συστήματα με αρκετές γραμμές και πρέπει να επιλέγονται για συστήματα με τέσσερις ή περισσότερες γραμμές όπου συνθήκες βραχυκυκλώματος μπορούν να οδηγήσουν σε αναστροφή του ρεύματος των πλαισίου. Ασφάλειες ή μικροί διακόπτες κυκλώματος (MCBs) επιστρατεύονται. Οι διαστάσεις της διατομής του καλωδίου του πλαισίου ή των καλωδίων των γραμμών μπορούν να επιλέγονται με βάση το ρεύμα ώθησης των ασφαλειών της γραμμής. Σε αυτή τη περίπτωση, η επιτρεπτή χωρητικότητα του ρεύματος μεταφοράς του καλωδίου $I_{Z\text{καλωδίου}}$ θα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ρεύμα ώθησης της ασφάλειας της γραμμής:

$$I_{Z\text{καλωδίου}} \geq I_{Z\text{ασφαλ.γραμμής}} \quad I_{\text{max γραμμής}} \geq I_{Z\text{καλωδίου}}$$

Η ασφάλεια θα πρέπει να «πέφτει» σε διπλάσια ποσότητα ρεύματος από αυτή του βραχυκυκλώματος της γραμμής σε STC:

$$2 \times I_{SC\text{ γραμμής}} > I_{a\text{ασφαλ.γραμμής}} > I_{SC\text{ γραμμής}}$$

Για την αποφυγή εσφαλμένης κυκλοφορίας, το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.25 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής:

$$I_{n\text{ασφαλ.γραμμής}} \geq 1,25 \times I_{n\text{γραμμής}}$$

Εφόσον είναι δυνατό να προκληθεί λάθος στη θετική και την αρνητική πλευρά της τάσης, οι ασφάλειες θα πρέπει να εγκαθίστανται κατά μήκος όλων των μη γειωμένων καλωδίων. Η ασφάλεια ή η MCB πρέπει να λειτουργούν σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

5.5.3 Ελαχιστοποιώντας τις απώλειες καλωδίων/πτώσεις τάσης

Κατά την επιλογή του μεγέθους της διατομής των καλωδίων θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η ανάγκη για όσο το δυνατό λιγότερες απώλειες και πτώσεις τάσης. Το γερμανικό πρότυπο προσχέδιο VDE 0100, Μέρος 712, του 1998 προτείνει: «Η πτώση της τάσης του απευθείας κυκλώματος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 1% της ονομαστικής τάσης του ΦΒ συστήματος σε πρότυπες συνθήκες δοκιμασίας (STC)». Αυτό περιορίζει την απώλεια ενέργειας από όλα τα καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος στο 1% σε STC. Εφαρμογές έδειξαν ότι το προτεινόμενο 1% για ΦΒ συστήματα με μετατροπείς που λειτουργούν με μεγαλύτερη εναλλασσόμενη τάση εισόδου ($V_{MPP} > 120V$) μπορεί να διατηρηθεί χωρίς κανένα πρόβλημα με καλώδια πρότυπης διατομής. Ένα καλό παράδειγμα είναι τα σχέδια συστημάτων με μετατροπείς γραμμής.

Για ΦΒ συστήματα με μετατροπείς που λειτουργούν με χαμηλότερες τιμές V_{MPP} (π.χ. είδος χαμηλής τάσης), είναι δυνατό η πτώση τάσης με καλώδια γραμμής ή πλαισίου να υπερβαίνει το όριο του 1%, ακόμα και όταν χρησιμοποιείται καλώδιο 6mm^2 , ιδιαίτερα όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες ανάμεσα στο μετατροπέα και την ΦΒ γεννήτρια. Σε τέτοια συστήματα μία πτώση τάσης του καλωδίου της γραμμής κατά 1% και ένα επιπλέον 1% πτώση στο κύριο καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος είναι επιτρεπτά.

Ανάλογα με τις συνθήκες ακτινοβολίας, το ρεύμα είναι σχεδόν πάντα χαμηλότερο από το ονομαστικό ρεύμα του συστήματος, το οποίο επιτυγχάνεται μόνο σε συνθήκες STC. Με το μισό ρεύμα, η απώλεια καλωδίου που προκύπτει από $P=2I \cdot R$ είναι μόνο το $\frac{1}{4}$ των απωλειών σε ονομαστικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό, όταν χρησιμοποιείται ένα όριο για τις διαστάσεις, της τάξης του 2% πτώση τάσης, είναι αναμενόμενο η ετήσια μείωση απόδοσης του εναλλασσόμενου ρεύματος να είναι περίπου 1%. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους συστήματος είναι περισσότερο ότι αποζημιώνονται για τις απώλειες αυτές, ιδιαίτερα σε καταστάσεις σκίασης (βλ. παράγραφο 5.2.1 Είδος κεντρικού μετατροπέα). Αν είναι δύσκολη η εργασία με ένα καλώδιο, τότε σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί καλώδιο με μικρότερη διατομή. Αυτό θα έχει βέβαια ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας. Ως οδηγός τιμών για καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ονομαστικό φορτίο ρεύματος 2A με 3A ανά τετραγωνικό χιλιοστό διατομή.

5.5.4 Επιλογή του μέγεθος του πλαισίου και καλωδίωση της γραμμής

Ηλεκτρικοί παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδα
Απλό μήκος καλωδίωσης για το πλαίσιο και γραμμή καλωδίωσης	L_M	m
Απώλεια γραμμής του πλαισίου και γραμμή καλωδίωσης κάτω STC	P_M	W
Καλώδιο διατομής του πλαισίου και γραμμή καλωδίωσης	A_M	mm ²
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (χαλκός $\kappa_{CU}=56$; Αλουμίνιο $\kappa_{AL}=34$)	κ	m/Ω 3 mm ²
Ισχύς της γραμμής κάτω STC	P_{ST}	W
Γραμμή τάσης	V_{MPP}	V
Γραμμή ρεύματος	I_{ST}	A
Νούμερο της γραμμής του ΦΒ γεννήτριας	n	

Πίνακας 5.4: Ηλεκτρικοί παράμετροι για το μέγεθος του καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος

Αφού διαλέξει το μέγεθος της διατομής, έχοντας λάβει υπ' όψιν την χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος, μπορεί να επιλεγεί η διατομή με το 1% που προτείνεται. Οι παρακάτω τρεις τύποι επιτρέπουν τον υπολογισμό της διατομής του καλωδίου του πλαισίου ή της γραμμής που έχουν περίπου το ίδιο μήκος. Εδώ υποθέτεται ότι θα υπάρχει μία απώλεια καλωδίου της τάξης του 1% σε σχέση με την ενέργεια της γραμμής σε STC:

$$A_M = \frac{2 \times L_M \times P_{St}}{1\% V_{MPP}^2 \times \kappa} \quad A_M = \frac{2 \times L_M \times I_{St}^2}{1\% P_{St} \times \kappa} \quad A_M = \frac{2 \times L_M \times I_{St}}{1\% V_{MPP} \times \kappa}$$

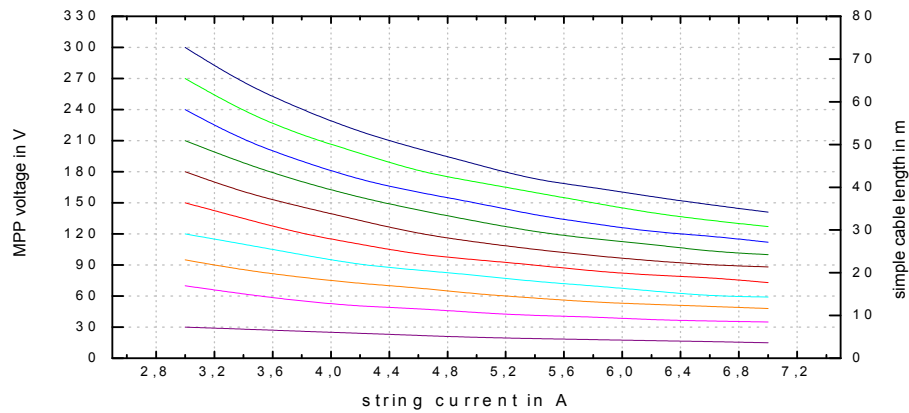
Η υπολογισμένη τιμή της διατομής του καλωδίου του πλαισίου ή της γραμμής A_M είναι στρογγυλεμένη προς την επόμενη μέγιστη τιμή των πρότυπων διατομών καλωδίων (2,5mm², 4mm² και 6mm²). Οι επόμενοι τύποι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών των καλωδίων πλαισίου ή γραμμής για τις επιλεγμένες διατομές:

$$P_M = \frac{2 \times n \times L_M \times P_{St}^2}{A_M \times V_{MPP}^2 \times \kappa} \quad P_M = \frac{2 \times n \times L_M \times I_{St}^2}{A_M \times \kappa}$$

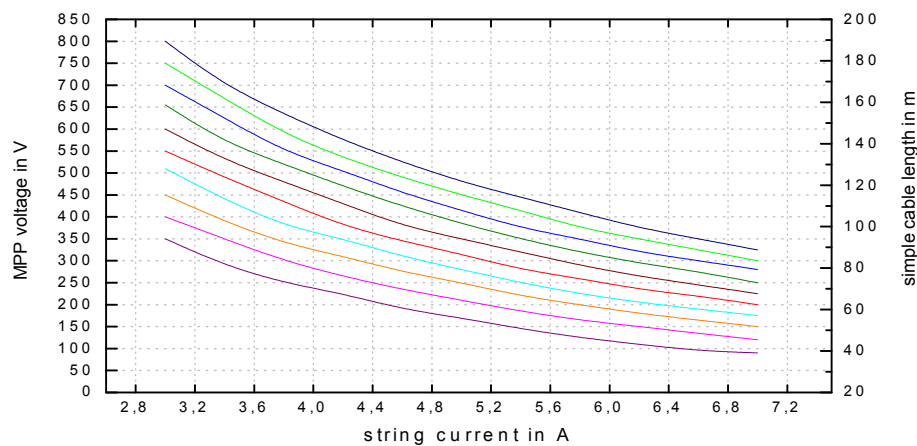
Η διάταξη του ΦΒ συστήματος λογικά οδηγεί σε διαφορετικά μήκη καλωδίων των γραμμών οπότε και διαφορετικές διατομές των καλωδίων των πλαισίων και των γραμμών. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω γενικευμένος τύπος:

$$P_M = \frac{2 \times I_{St}^2}{\kappa} \times \left(\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \frac{L_3}{A_3} + \dots \right)$$

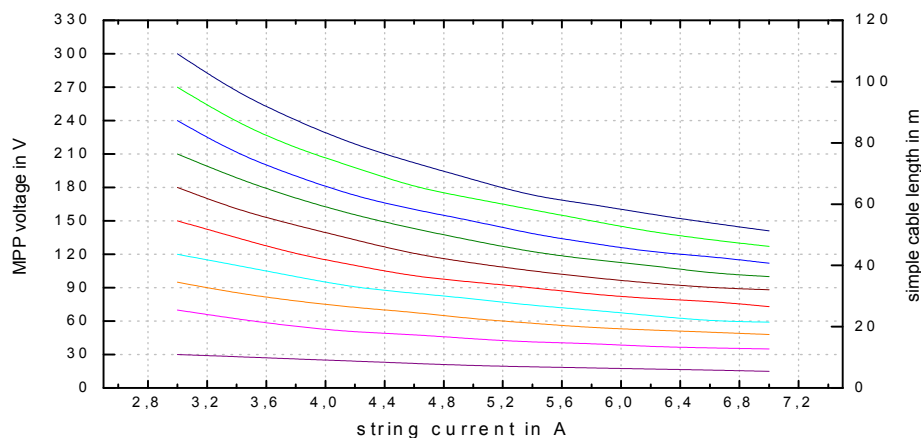
Τα μήκη των καλωδίων (χάλκινα) των πλαισίων και των γραμμών φαίνονται στα Σχήματα 5.5.4.21 με 5.5.4.26 για τις συνήθεις διατομές. Εδώ επιτρέπεται να υπολογιστεί ένα 1% απώλειες.



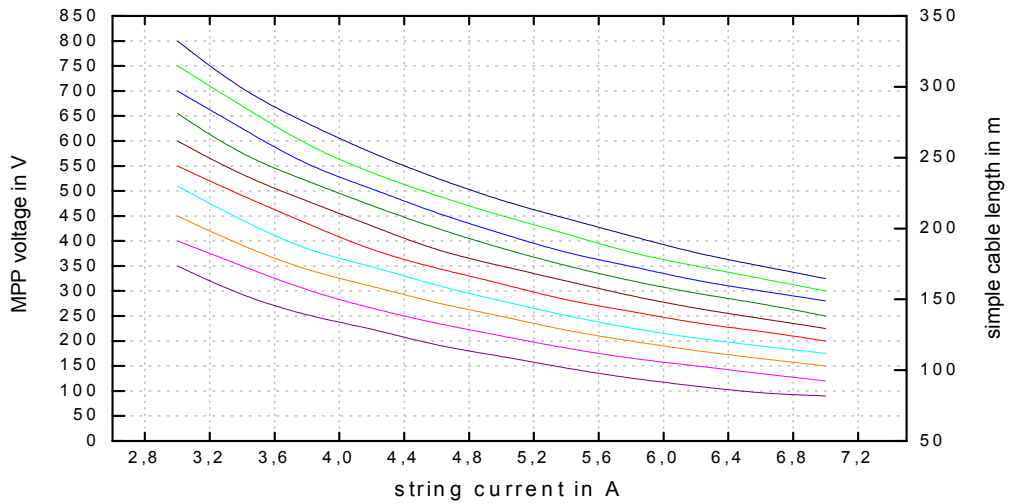
Σχήμα 5.5.4.21: Προτεινόμενα μήκη σύρματος για σύνδεση γραμμών με διατομή καλωδίου $A=2,5\text{mm}^2$ μέχρι τάση MPP 300V. Πηγή: R.Haselhuhn



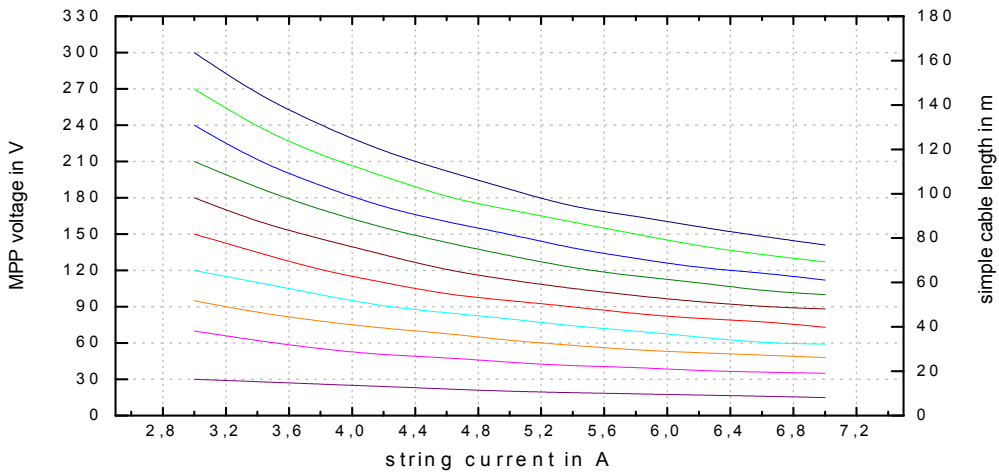
Σχήμα 5.5.4.22: Προτεινόμενα μήκη σύρματος για σύνδεση γραμμών με διατομή καλωδίου $A=2,5\text{mm}^2$ για τάση MPP μεγαλύτερη από 300V. Πηγή: R.Haselhuhn



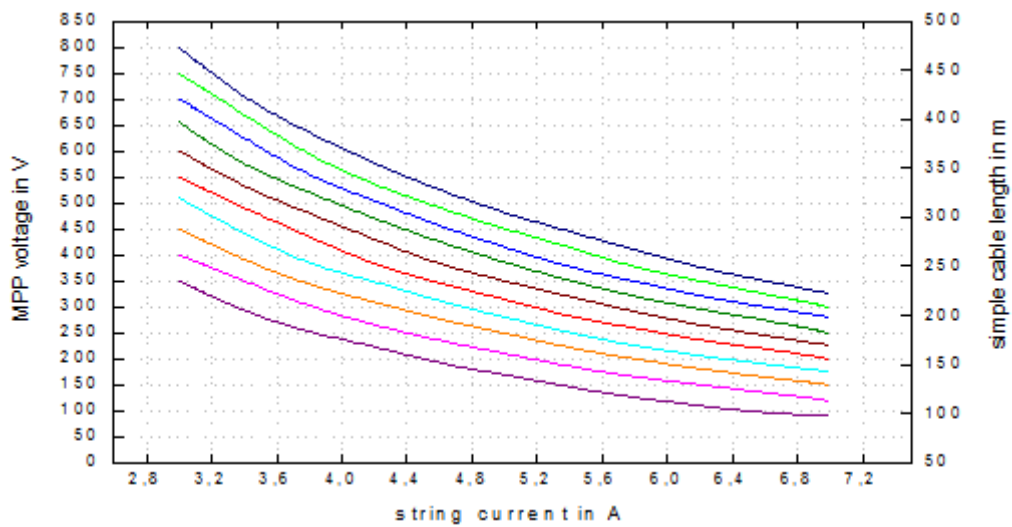
Σχήμα 5.5.4.23: Προτεινόμενα μήκη σύρματος για σύνδεση γραμμών με διατομή καλωδίου $A=4\text{mm}^2$ μέχρι τάση MPP 300V. Πηγή: R.Haselhuhn



Σχήμα 5.5.4.24: Προτεινόμενα μήκη σύρματος για σύνδεση γραμμών με διατομή καλωδίου $A=4\text{mm}^2$ για τάση MPP μεγαλύτερη από 300V. Πηγή: R.Haselhuhn



Σχήμα 5.5.4.25: Προτεινόμενα μήκη σύρματος για σύνδεση γραμμών με διατομή καλωδίου $A=6\text{mm}^2$ μέχρι τάση MPP 300V. Πηγή: R.Haselhuhn



Σχήμα 5.5.4.26: Προτεινόμενα μήκη σύρματος για σύνδεση γραμμών με διατομή καλωδίου $A=6\text{mm}^2$ για τάση MPP μεγαλύτερη από 300V. Πηγή: R.Haselhuhn

5.5.5 Επιλέγοντας το μέγεθος του κύριου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος

Ηλεκτρικοί παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδα
Απλό μήκος γραμμής του κύριου καλωδίου DC	$L_{DC \text{ cable}}$	m
Απώλειες γραμμής του κύριου καλωδίου DC	$P_{DC \text{ cable}}$	W
Καλώδιο διατομής του κύριου καλωδίου DC	$A_{DC \text{ cable}}$	mm ²
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (χαλκός $\kappa_{Cu}=56$; Αλουμίνιο $\kappa_{Al}=34$)	κ	m/Ω x mm ²
Ονομαστική ισχύ του ΦΒ πλαισίου/συστοιχίας	P_{PV}	W _p
Ονομαστική τάση του ΦΒ πλαισίου/συστοιχίας	V_{MPP}	V
Ονομαστικό ρεύμα του ΦΒ πλαισίου/συστοιχίας	I_n	A

Πίνακας 5.5: Ηλεκτρικές παράμετροι για την επιλογή του μεγέθους του κύριου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος

Το κύριο καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος και τα καλώδια διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος από τις ΦΒ ημι-συστοιχίες θα πρέπει να μπορούν να μεταφέρουν το μέγιστο παραγόμενο ρεύμα. Εφόρων το ρεύμα βραχυκυκλώματος στην ΦΒ συστοιχία είναι λίγο μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα, αυτό δεν θα «ρίξει» τις ασφάλειες. Είναι δυνατό, ως προστασία κατά της μόνωσης και βλαβών γείωσης, να χρησιμοποιηθεί ένας διακόπτης διαρροής από βλάβη γείωσης εναλλασσόμενου ρεύματος.

Γενικά, το μέγεθος του κύριου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος επιλέγεται για 1,25 φορές περισσότερο από το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε STC με βάση την IEC 60364-7-712 (παρόλα αυτά πρέπει να αναφέρονται σ' αυτό οι εθνικοί κώδικες και κανονισμοί):

$$I_{\max} = 1,25 \times I_{SC \Phi/B}$$

Η διατομή του καλωδίου θα πρέπει να επιλεγεί με βάση την επιτρεπτή χωρητικότητα μεταφοράς ρεύματος. Και πάλι εδώ, οι παράγοντες μείωσης της θερμοκρασίας και με δεσμίδες καλωδίων, οι παράγοντες συσσώρευσης θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

Η διατομή του καλωδίου είναι δυνατό να είναι η βέλτιστη όσον αφορά την ενέργεια αν χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τύποι. Εδώ ξανά υποθέτεται ότι θα υπάρχει μία απώλεια από το καλώδιο της τάξης του 1% σε σχέση με την ονομαστική δύναμη της ΦΒ συστοιχίας.

Η διατομή $A_{DC \text{ καλωδ}}$ προκύπτει από:

$$A_{DC \text{ καλωδ}} = \frac{2 \times L_{DC \text{ καλωδ}} \times I_n^2}{(v \times P_{\Phi B} - P_M) \times \kappa}$$

Με παράγοντα απώλειας $v=1\%$ ή $v=2\%$ σε είδος χαμηλής τάσης.

Η υπολογισμένη τιμή της διατομής του κύριου καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος $A_{DC \text{ καλωδ}}$ είναι στρογγυλοποιημένο προς τα πάνω προς την υψηλότερη τιμή για πρότυπες διατομές καλωδίων ($2,5 \text{ mm}^2$, 4 mm^2 , 6 mm^2 , 10 mm^2 , 16 mm^2 , 25 mm^2 , 35 mm^2 κλπ.)

Η πραγματική απώλεια από το κύριο καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος $P_{DC \text{ καλωδ}}$ υπολογίζεται για την επιλεγμένη διατομή καλωδίου ως εξής:

$$P_{DC \text{ καλωδ}} = \frac{2 \times L_{DC \text{ καλωδ}} \times I_n^2}{A_{DC \text{ καλωδ}} \times \kappa} \qquad P_{DC \text{ καλωδ}} = \frac{2 \times L_{DC \text{ καλωδ}} \times P_{\Phi B}^2}{A_{DC \text{ καλωδ}} \times V_{MPP}^2 \times \kappa}$$

Για τις περιπτώσεις εγκατάστασης προστασίας από βλάβες γείωσης και βραχυκυκλώματος, προτείνονται ατομικά μονοπύρηνια καλώδια σε θήκη για αρνητικά και θετικά καλώδια.

Αν χρησιμοποιούνται πολυπύρνα καλώδια, το πράσινο/κίτρινο σύρμα (γείωσης-Ευρωπαϊκός κώδικας χρωμάτων) δεν θα πρέπει να «κουβαλάνε» καθόλου τάση. Για εκτεθειμένες σε αστραπές ΦΒ εγκαταστάσεις θα πρέπει να χρησιμοποιούνται καλώδια που έχουν δοκιμαστεί. Αν τα καλώδια συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος είναι τοποθετημένα μαζί θα πρέπει να ακολουθούνται οι προϋποθέσεις και τα καλώδια να καταγράφονται, όπως καθορίζεται από τους εθνικούς κώδικες και κανονισμούς.

5.5.6 Επιλέγοντας το καλώδιο σύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος

Ηλεκτρικοί παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδα
Απλό μήκος γραμμής του καλωδίου σύνδεσης AC	$L_{AC\ cable}$	M
Απώλειες γραμμής του καλωδίου σύνδεσης AC	$P_{AC\ cable}$	W
Καλώδιο διατομής του καλωδίου σύνδεσης AC	$A_{AC\ cable}$	mm ²
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (χαλκός $\kappa_{Cu}=56$; Αλουμίνιο $\kappa_{Al}=34$)	k	m/Ω * mm ²
AC ονομαστικό ρεύμα του αντιστροφέα	I_{nAC}	A
Ονομαστική τάση δικτύου (μονοφασικό: 230 V; τριφασικό: 400 V)	V_n	V
Συντελεστής ισχύος (μεταξύ 0.8 και 1)	cosφ	-

Πίνακας 5.6: Ηλεκτρικοί παράμετροι για την επιλογή μεγέθους καλωδίου τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος

Στον υπολογισμό της διατομής του καλωδίου σύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος υποθέτεται μία πτώση τάσης της τάξης του 3% σε σχέση με την ονομαστική τάση του πλέγματος (Γερμανικοί κανονισμοί).

Για την διατομή $A_{AC\ καλωδ}$ με μονοφασική τροφοδοσία:

$$A_{AC\ καλωδ} = \frac{2 \times L_{DC\ καλωδ} \times I_{nAC} \times \cos\varphi}{3\%V_n \times \kappa}$$

Και με συμμετρική τριφασική τροφοδοσία για το τριφασικό καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος:

$$A_{AC\ καλωδ} = \frac{\sqrt{2} \times L_{AC\ καλωδ} \times I_{nAC} \times \cos\varphi}{3\%V_n \times \kappa}$$

Με ΦΒ συστήματα μέχρι 5kW, αυτό δίνει καλώδιο διατομής $A_{AC\ καλωδ}$ έως και 6mm². Για παράδειγμα, με μονοφασικούς μετατροπείς και τροφοδοσία, χρησιμοποιείται ο πρότυπος τύπος καλωδίου NYM-J 3×1,5mm² με 6mm². Με τριφασική τροφοδοσία, χρησιμοποιείται ο τύπος NYM-J 5mm²×1,5mm²-4mm².

Για τον υπολογισμό της απώλειας από το καλώδιο $P_{AC\ καλωδ}$ για την επιλεγμένη διατομή καλωδίου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι.

Με μονοφασική τροφοδοσία:

$$P_{AC\ καλωδ} = \frac{2 \times L_{AC\ καλωδ} \times I_{nAC}^2 \times \cos\varphi}{A_{AC\ καλωδ} \times \kappa}$$

Και με τριφασική:

$$P_{AC\ καλωδ} = \frac{\sqrt{3} \times L_{AC\ καλωδ} \times I_{nAC}}{V_n \times \kappa \times \cos\varphi} \times P_n = \frac{3 \times L_{AC\ καλωδ} \times I_{nAC}^2}{A_{AC\ καλωδ} \times \kappa}$$

Με ασύμμετρη τριφασική τροφοδοσία από πολλαπλές μονοφασικές μονάδες, οι απώλειες από το καλώδιο υπολογίζονται από τις συνολικές απώλειες του ενός καλωδίου στις διάφορες φάσεις

και τον ουδέτερο αγωγό: $P_{AC \text{ καλωδ}} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} + P_N$

Για τον υπολογισμό, θα πρέπει να υπολογισθεί και το ρεύμα στις διαφορετικές φάσεις των καλωδίων L_1 , L_2 , L_3 και N . Η περίπτωση του ασύμμετρου φορτίου επιτρέπεται μέχρι κάποια δύναμη της διαφοράς των φάσεων, της τάξης του 4,6kVA (Γερμανικοί κανονισμοί).

Επιπλέον, η εμπέδηση του πλέγματος, γνωστή και ως αντίσταση κυκλώματος, θα πρέπει να μην υπερβαίνει τα 1,25Ω στην είσοδο του μετατροπέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία συγκεκριμένη αντίσταση για το καλώδιο τροφοδοσίας του μετατροπέα. Η αντίσταση αυτή καθορίζεται από το μήκος (απόσταση από το σημείο τροφοδοσίας) και την διατομή του καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος.

5.6 Επιλογή είδους και μεγέθους του κουτιού διασταυρώσεις και του κύριου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος

Σε πολλές διατάξεις συστημάτων, τα κιβώτια διανομής/συνδεσμολογίας μιας ΦΒ συστοιχίας μπορούν να αγοραστούν από τους εμπόρους (solar wholesalers) ως έτοιμα εξαρτήματα. Οι κατασκευαστές των πλαισίων και των μετατροπέων προσφέρουν διαφορετικούς τύπους οι οποίοι ταιριάζουν με τα πρότυπα συστήματα. Τα κιβώτια διανομής/συνδεσμολογίας (των ΦΒ συστοιχιών) που είναι εγκατεστημένα εξωτερικά θα πρέπει να είναι προστατευμένα από IP 54 και να αντέχουν στη UV. Επιπλέον, συνιστάται να επιλέγεται το σημείο εγκατάστασης ώστε να προστατεύεται το κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας από την βροχή και την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία.

Κατά την επιλογή του είδους πρέπει να εξασφαλίζεται ένας ικανός αριθμός από ακροδέκτες για τις γραμμές. Το κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας μιας ΦΒ συστοιχίας θα πρέπει να τηρεί τους κανονισμούς της Κλάσης Προστασίας II. Θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμο για πιθανή μελλοντική συντήρηση. Σε κιβώτια διανομής/συνδεσμολογίας με βιδωτούς ακροδέκτες θα πρέπει να έχουν γίνει σωστά οι συνδέσεις, διότι λανθασμένες συνδέσεις μπορούν να προκαλέσουν διακοπή ολόκληρης της γραμμής. Κιβώτια διανομής/συνδεσμολογίας με ακροδέκτες-ελατήρια συσφιγκτήρες ή με άλλα κατάλληλα συστήματα ακροδεκτών δεν απαιτούν μεταλλικά καλύμματα (μανσόν) και είναι εύκολα στη χρήση.

Συνήθως σε πρότυπα πλαίσια με ρεύμα βραχυκύκλωσης 3A τοποθετούνται ασφάλειες 4A. Παρόλα αυτά, αυτές τις μέρες, πολλά πλαίσια στην αγορά έχουν υψηλότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης 4 με 18A. Οι κατάλληλες ασφάλειες των γραμμών επιλέγονται αντιστοίχως. Οι ασφάλειες πρέπει να είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι δίοδοι αποσύζευξης των ξεχωριστών γραμμών χρησιμοποιούνται σε συστήματα με κεντρικούς μετατροπείς σε περιπτώσεις σοβαρής σκίασης ή όταν δεν τηρούνται οι κανονισμοί της Κλάσης Προστασίας II. Τοποθετούνται στο κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας ενώ εγγυάται ότι η θερμοκρασία λειτουργίας τους μπορεί να εξανεμιστεί. Για την προστασία από την υπερφόρτωση, οι αναστολείς βραχυκυκλώματος είναι συνδεδεμένοι στο κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας με τους θετικούς και τους αρνητικούς πόλους για να προστατέψουν από το δυναμικό γείωσης. Για το λόγο αυτό, ο αγωγός γείωσης είναι συνδεδεμένος στον κύριο ακροδέκτη γείωσης (οι κανονισμοί γείωσης διαφέρουν από χώρα σε χώρα και είναι απαραίτητο να αναφέρονται οι εθνικοί κώδικες και οι κανονισμοί που σχετίζονται με τις συνδέσεις γείωσης των ΦΒ συστημάτων). Όμοια, ο κύριος διακόπτης/απομονωτής εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συχνά εγκατεστημένος μέσα στο κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας της ΦΒ συστοιχίας.

Επίσης, είναι συνετό να βρίσκεται ο κύριος διακόπτης αποσύνδεσης/απομόνωσης εναλλασσόμενου ρεύματος αμέσως πριν το κιβώτιο. Αυτό γενικά αποσοβεί από την ενεργοποίηση κατά λάθος από κάποιο άλλο πρόσωπο, για παράδειγμα, όταν εκτελούνται εργασίες συντήρησης στο μετατροπέα. Επιπλέον, επιτρέπει στο κύριο καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος να απομονώνεται.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60364-7-712, απαιτείται να είναι προσβάσιμος ο διακόπτης αποσύνδεσης/απομόνωσης ανάμεσα στην ΦΒ συστοιχία και το μετατροπέα. Ο κύριος διπολικός διακόπτης αποσύνδεσης/απομόνωσης εναλλασσόμενου ρεύματος είναι σχεδιασμένος για το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης της ηλιακής συστοιχίας στους -10°C $V_{OC(\Phi B-10^{\circ}\text{C})}$ και για 125% του μέγιστου ρεύματος της συστοιχίας (ρεύμα βραχυκύκλωσης με πλήρη ακτινοβολία $I_{SC \Phi B}$):

$$I_{DC MS} = 1,25 \times I_{SC \Phi B}$$

Κατά την επιλογή του κύριου διακόπτη αποσύνδεσης/απομόνωσης εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει να διασφαλίζεται ότι έχει μετρηθεί για το σχετικό απευθείας ρεύμα. Είναι δυνατό, οι ρευματοδότες με βύσμα touch-proof (π.χ. στους μετατροπείς) να λειτουργούν μόνο ως απομονωτές χωρίς φορτίο και να μην τους επιτρέπεται να αντικαθιστούν τους κύριους διακόπτες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας της ΦΒ συστοιχίας μπορεί επίσης να κατασκευαστεί από πρότυπα ηλεκτρικά μέρη/εξαρτήματα σε ένα αντιστοιχώς προστατευμένο από ηλεκτροπληξία χώρο. Είναι δυνατό, κατά την εγκατάσταση του διακόπτη, να χρησιμοποιηθούν κουτιά ακροδεκτών σε κιγκλιδώματα τοποθετημένα στο πάνω μέρος. Οι θετικές και οι αρνητικές πλευρές θα πρέπει να είναι σχολαστικώς διαχωρισμένοι για την αποτροπή πιθανών βλαβών λόγω γείωσης ή βραχυκυκλωμάτων.

Σε μεγάλα συστήματα συχνά απαιτούνται αρκετά κιβώτια διανομής/συνδεσμολογίας της ΦΒ συστοιχίας. Σε ένα σύστημα με μετατροπών με γραμμές, το κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας μπορεί να καταργηθεί καθώς οι γραμμές είναι απευθείας συνδεδεμένες με το μετατροπέα. Οι αναστολές βραχυκυκλώματος (αντιστάσεις μεταβλητής τιμής) είναι εγκατεστημένοι μέσα στους μετατροπείς με γραμμές.

5.7 Προστασία από αστραπή, γείωση και προστασία βραχυκυκλώματος

Οι εθνικοί κώδικες και κανονισμοί που αναφέρονται γενικά στην προστασία από αστραπές και σε σχέση με συνδεδεμένα σε πλέγμα ΦΒ συστήματα διαφέρουν αισθητά από χώρα σε χώρα, ακόμη και από περιοχή σε περιοχή μέσα στην ίδια χώρα. Σε αυτή την παράγραφο ασχολούμαστε με την εγκατάσταση και τις πρακτικές που ακολουθούνται στην Γερμανία.

Γενικά τα παρακάτω εφαρμόζονται: τα ΦΒ συστήματα δεν αυξάνουν τον κίνδυνο κεραυνού. Για αυτόν το λόγο δεν είναι απαραίτητο κάποιο επιπλέον σύστημα προστασίας από αστραπές. Παρόλα αυτά, στην επίσημή της (αυστηρή) οδηγία VDS 2010, ο Γερμανικός σύλλογος προστασίας (ασφάλειας) της ιδιοκτησίας Verband der Schadensversichere απαιτεί συστήματα προστασίας από αστραπή και υπερφόρτωση, τα οποία πρέπει να εγκατασταθούν σύμφωνα με την Κλάση Προστασίας από Αστραπές III και τα πρότυπα VDE. Σύμφωνα με το VDE 0185, ο βαθμός προστασίας για ένα κτήριο κατηγοριοποιείται σε μία από τις τέσσερις Κλάσης Προστασίας από Αστραπές I-IV. Οι απαιτήσεις για προστασία από αστραπή και υπερφόρτωση μειώνονται από την Κλάση I στην IV.

Στη Γερμανία, οι νομικές προϋποθέσεις για προστασία από αστραπές, καθορίζονται αυστηρά από τα διάφορα ομοσπονδιακά κρατίδια στους κανονισμούς των κτηρίων. Για παράδειγμα οι υψηλότερες κλάσεις προστασίας εφαρμόζονται στα αεροδρόμια, στα νοσοκομεία, σε εγκαταστάσεις υψηλού κινδύνου φωτιάς και έκρηξης, όπως επίσης και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Σε δημόσια κτήρια και σημεία συγκέντρωσης, οι κανονισμοί καθορίζονται από την Κλάση Προστασίας III.

Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που κάποιος ειδικός μπορεί να αποδείξει, σύμφωνα με το VDE 0185, Μέρος 2, ότι ο κίνδυνος κεραυνού και ζημιών είναι μικρός, οι ασφαλιστές δέχονται λύσεις που αποκλίνουν από το VDE 2010. Αυτό, για παράδειγμα, ήδη εφαρμόζεται σε μέρη όπου ήδη υπάρχουν ψηλά κτήρια με προστασία από αστραπές.

Τα συστήματα προστασίας από αστραπές έχουν ειδικότερα το σκοπό να προσφέρουν ατομική προστασία όταν υπάρχουν απευθείας χτυπήματα κεραυνών. Αν το ΦΒ σύστημα βρίσκεται σε εκτεθειμένη περιοχή, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο αλεξικέραυνο. Για παράδειγμα, τα ΦΒ συστήματα που είναι εγκατεστημένα σε βάσεις, πάνω σε οροφές κτηρίων και είναι εκτεθειμένα σε χτυπήματα κεραυνών, θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με τα δικά τους συστήματα προστασίας, αφού η ΦΒ γεννήτρια, ως εγκατάσταση προστασίας της οροφής, αποτελεί ελκυστικό σημείο κρούσης. Τα συστήματα προστασίας από αστραπές κατασκευάζονται σύμφωνα με τα VDE V 0185, Μέρη 1 μέχρι 5. Αν υπάρχει ήδη στο κτήριο ένα σύστημα προστασίας η ΦΒ γεννήτρια θα πρέπει να συνδεθεί με αυτό.

Ο Πίνακας 5.7 παρουσιάζει μια γενική επισκόπηση των απαραίτητων μέτρων που πρέπει να λαμβάνονται για την προστασία από αστραπές και υπερφόρτωση των ΦΒ συστημάτων σε κτήρια τα οποία δεν φιλοξενούν πολύτιμη τεχνολογία δεδομένων.

ΦΒ συστήματα σε κτήρια ... χωρίς σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

Αντιστροφέας με μετασχηματιστή

Αντιστροφέας χωρίς μετασχηματιστή

ΦΒ πλαίσιο για την προστασία Τάξεις II ή την έννοια της χαμηλής τάσης;

Ναι

Όχι

1 Χωρίς υπερτάσεις της ΦΒ συστοιχίας/κιβώτιο διασύνδεσης και

2 Δεν υπάρχει καμία δυνατότητα εξισορρόπησης των κατεστραμμένων ΦΒ που απαιτούνται

1 Χωρίς υπερτάσεις στο κιβώτιο διασύνδεσης της γεννήτριας που απαιτούνται

2 Δυνατότητα εξισορρόπησης των κατεστραμμένων ΦΒ: διατομή του ισοδυναμικού αγωγού συγκόλλησης = διατομή του κύριου καλωδίου DC; Ωστόσο, τουλάχιστον 4 mm²

3 Με αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή: γείωση και δυναμικό εξισορρόπησης σύμφωνα με το τμήμα 4.7, εάν απαιτείται

Με ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

ΦΒ συστοιχία στην περιοχή προστασίας

ΦΒ συστοιχία εκτός της περιοχής προστασίας

Τηρείται η απόσταση ασφαλείας για το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας;

1 Συνδέστε τη ΦΒ συστοιχία με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με την συντομότερη δυνατή διαδρομή με διάμετρο τουλάχιστον 16 mm^2

2 Υπερτάσεις τάξεις I και II με ισοδυναμικό αγωγό συγκόλλησης (ελάχιστο 16 mm^2)

ΦΒ πλαίσιο για την προστασία Τάξεις II ή την έννοια της χαμηλής τάσης;

1 Υπέρταση τάξεις II

2 Δυνατότητα εξισορρόπησης των κατεστραμμένων ΦΒ: διατομή του ισοδυναμικού αγωγού συγκόλλησης = διατομή του κύριου καλωδίου DC; Ωστόσο, τουλάχιστον 4 mm^2

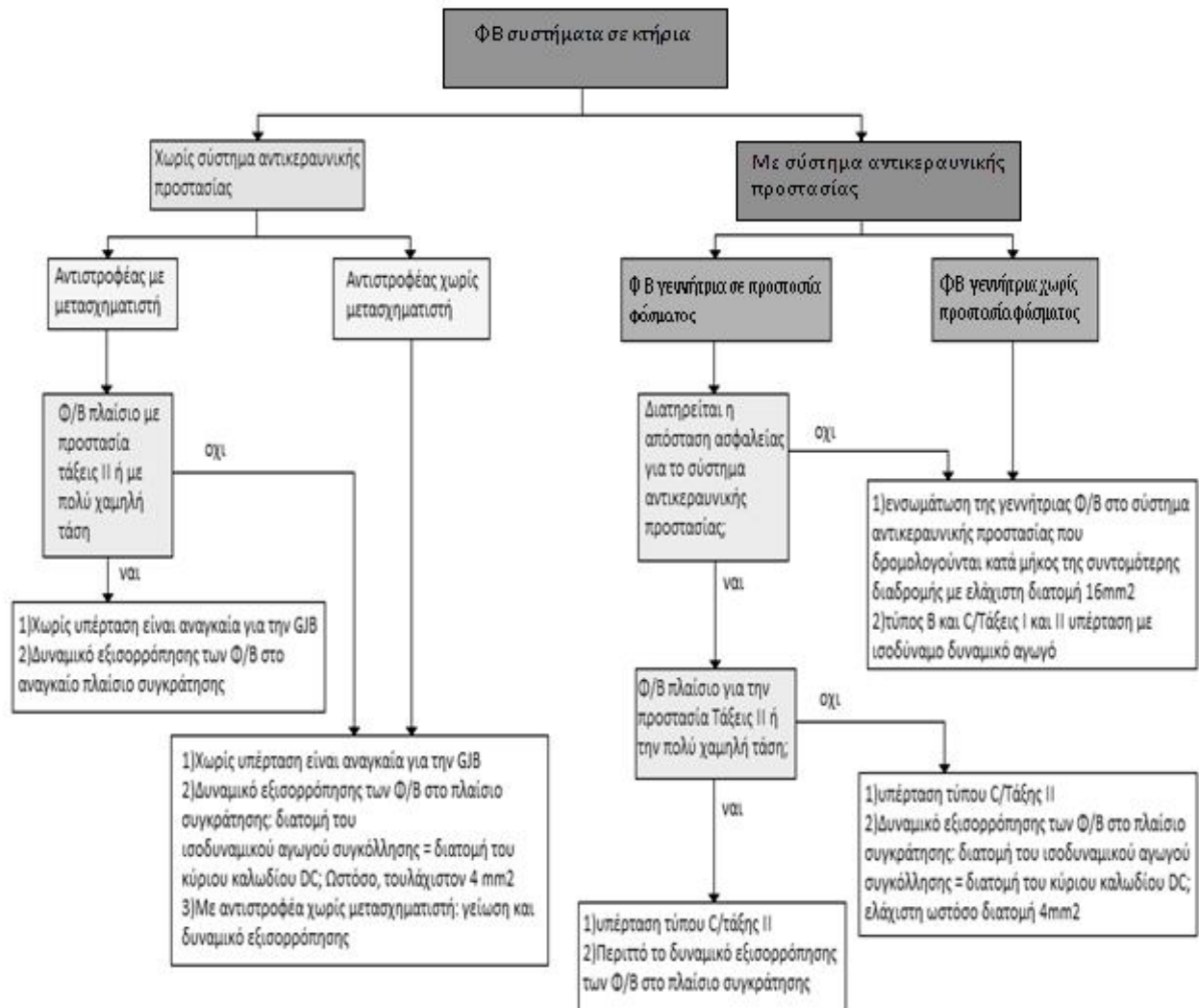
1 Υπέρταση τάξεις II

2 Δεν υπάρχει καμία δυνατότητα εξισορρόπησης των κατεστραμμένων ΦΒ που απαιτούνται

Πίνακας 5.7: Επιλογή μέτρων που πρέπει να λαμβάνονται για προστασία από αστραπές και υπερφόρτωση των ΦΒ συστημάτων σε κτήρια χωρίς καθόλου πολύτιμη τεχνολογία δεδομένων. Πηγή: R.Haselhuhn

Τα παρακάτω σχόλια ισχύουν για την προστασία των ΦΒ συστημάτων από αστραπές και υπερφόρτωση:

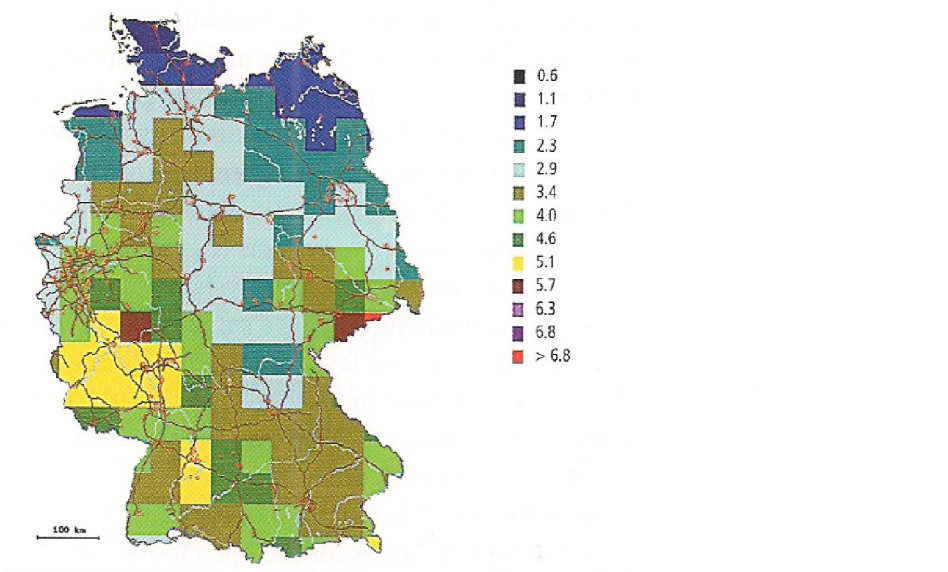
- Τα ΦΒ συστήματα εν γένει δεν αυξάνουν τον κίνδυνο χτυπήματος από κεραυνό.
- Στην περίπτωση που ήδη υπάρχει σύστημα προστασίας στο κτήριο, η ΦΒ γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί με αυτό. Θα πρέπει να εκτελείται προσεχτικά η εσωτερική προστασία από αστραπές.
- Αν το ΦΒ σύστημα είναι εκτεθειμένο, θα πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλο αλεξικέραυνο.
- Αν δεν υπάρχει σύστημα προστασίας, η ΦΒ γεννήτρια θα πρέπει να γειώνεται και να συνδέεται με τη εξομοίωση δυναμικού, εκτός από τις παρακάτω περιπτώσεις:
 - σε μικρότερα συστήματα (<5kW), και
 - όταν χρησιμοποιούνται ΦΒ πλαίσια με Κλάση Προστασίας II , ή
 - με ηλεκτρική μόνωση και ένα ασφαλές, πολλή χαμηλής τάσης (SELV) σχέδιο.
- Προτείνονται κατάλληλοι αναστολείς βραχυκύκλωσης στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος στο κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας.
- Προστασία υπερφόρτωσης στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος, επίσης γενικά προτείνεται.



Σχέδιο 5.7.27: Επιλογή μέτρων προστασίας από αστραπές και υπερφόρτωση για ΦΒ συστήματα σε κτήρια χωρίς πολύτιμη τεχνολογία δεδομένων

5.7.1 Προστασία από αστραπές-απευθείας χτυπήματα

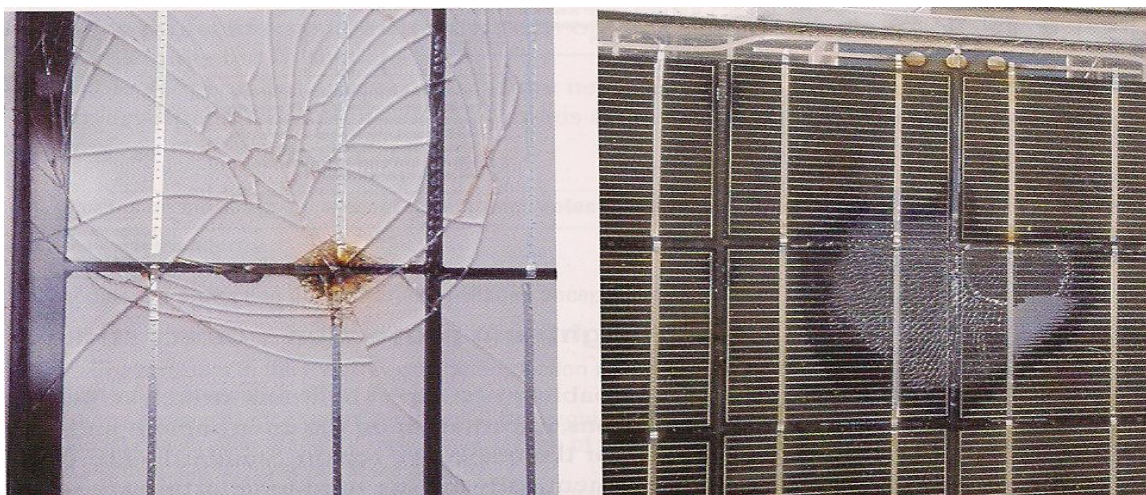
Η πιθανότητα απευθείας χτυπήματος από κεραυνό μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις του κτηρίου, πληροφορίες για το περιβάλλον και το μέσο αριθμό χτυπημάτων κεραυνών της περιοχής. Το πρότυπο VDE 0185, Μέρος 2 και το αντίστοιχο λογισμικό διοίκησης κινδύνου του, χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του κινδύνου από χτυπήματα κεραυνών και των βέλτιστων από τεχνικής και οικονομικής άποψης μέτρων προστασίας. Ο Πίνακας 4.8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κρίνει αν ένα ΦΒ σύστημα έχει εγκατασταθεί σε περιοχή όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα χτυπημάτων κεραυνών (δηλ. που υπάρχει μεγάλη πυκνότητα αστραπών). Για ένα μέσο σπίτι σε μία αστική περιοχή, η πιθανότητα χτυπήματος από κεραυνό είναι περίπου ένα κάθε 1000 χρόνια. Για παράδειγμα, η πιθανότητα να χτυπηθεί ένα απομονωμένο χωριάτικο σπίτι στην κορυφή ενός βουνού, σε μία περιοχή με αυξημένη δραστηριότητα βροχόπτωσης αυξάνεται σε ένα χτύπημα κάθε 30 χρόνια. Αν αυτό το σπίτι βρεθεί σε μία μη-εκτεθειμένη αγροτική περιοχή με «λογικό» αριθμό καταιγίδων, η πιθανότητα αυτή πέφτει ξανά περίπου στο ένα χτύπημα κάθε 500 χρόνια (Becker, 1997).

Lightning strikes per year and km²

Πίνακας 5.8: Μέσος αριθμός χτυπημάτων από κεραυνούς από το 1999 έως το 2004. Σημειώσεις: Η εξωτερική προστασία περιλαμβάνει όλο τον εξοπλισμό για την σύλληψη και διοχέτευση του κεραυνού. Ένα σύστημα προστασίας αποτελείται από μία συσκευή σύλληψης, το αλεξικέραυνο (τουλάχιστον 16mm² χάλκινος αγωγός) και το σύστημα γείωσης. Θα πρέπει να κατασκευαστεί με βάση το VDE 0185, Μέρος 3 και VDE 0185, Μέρος 100. Πηγή: Υπηρεσία Πληροφοριών Αστραπών Siemens, www.blids.de

Κατά την εγκατάσταση ενός ΦΒ συστήματος, τα παρακάτω κριτήρια θα πρέπει να τηρούνται στην εξωτερική προστασία από αστραπές:

- Δημόσια χρήση (κίνδυνος πανικού, δημόσιοι χώροι συγκέντρωσης)
- Αγωγίμες υπερκατασκευές που προεξέχουν από τα κτήρια
- Επιφάνεια της ηλιακής γεννήτριας > 15m²
- Το κτήριο περιέχει πολύτιμη τεχνολογία δεδομένων με υψηλές διαθέσιμες προϋποθέσεις και συστήματα υποστήριξης
- Προστασία της σημαντικής ηλεκτρικής τεχνολογίας ασφαλείας (συναγερμός πυρκαγιάς, κλοπής και τεχνολογία ασφαλείας)



Εικόνα 5.7.1.28: Ζημιά από αστραπή. Πηγή: Phonix Contact

5.7.2 Έμμεσες επιπτώσεις κεραυνού και εσωτερική προστασία από κεραυνούς

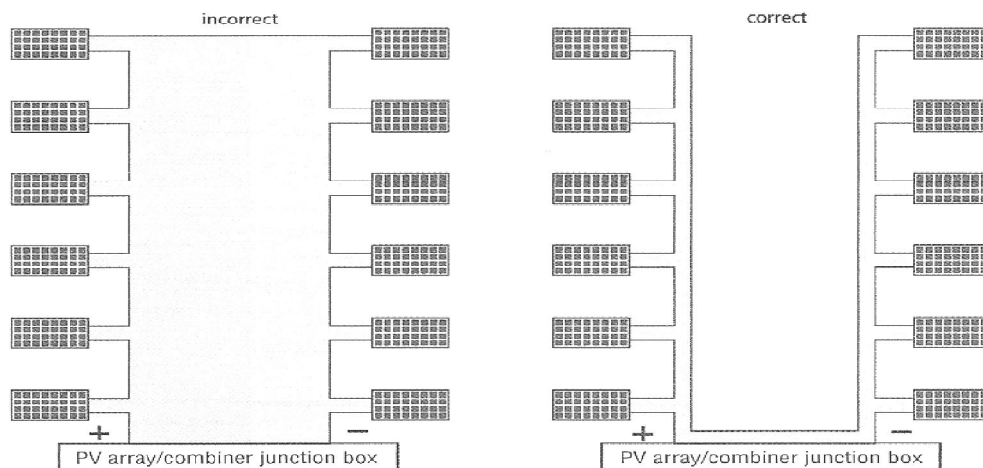
Κάθε χτύπημα κεραυνού έχει έμμεσες επιπτώσεις στην περιβάλλουσα περιοχή σε μία περίμετρο περίπου 1 Km. Για αυτό και η πιθανότητα ενός κτηρίου να επηρεαστεί από έμμεσο χτύπημα κεραυνού είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πιθανότητα να χτυπηθεί απ' ευθείας από κεραυνό. Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι ένα ΦΒ σύστημα, σε όλη τη περίοδο ζωής του, έχει προσβληθεί πολλές φορές από τα χτυπήματα κεραυνών στην περιβάλλοντα περιοχή.

Οι έμμεσες επιπτώσεις κεραυνού είναι στην ουσία μία επαγωγική, χωρητική και γαλβανική σύζευξη. Οι συζεύξεις αυτές δημιουργούν τάσεις βραχυκυκλώματος από τις οποίες θα πρέπει τα ηλεκτρικά συστήματα του κτηρίου να προστατεύονται. Η εσωτερική προστασία από κεραυνό περιλαμβάνει όλα τα μέτρα και τον εξοπλισμό στο κτήριο που αφορούν όχι μόνο στην προστασία, για παράδειγμα, από τις επιπτώσεις στις ηλεκτρονικές συσκευές από έμμεσα χτυπήματα κεραυνών, αλλά επίσης από τις επιπτώσεις αλλαγής στο δημόσιο ανεφοδιασμό κεντρικών αλλαγών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος κεραυνού για ένα σπίτι και όσο πολυτιμότερη είναι η τεχνολογία δεδομένων, τόσο περισσότερο εκτενή θα πρέπει να είναι τα μέτρα που θα ληφθούν για την εσωτερική προστασία από κεραυνό. Ένα βασικό προαπαιτούμενο για την λειτουργία της εσωτερικής προστασίας από κεραυνούς είναι η συνεχόμενη δυνατή εξίσωση με το IEC 364-5-54. Όλα τα δυνατά αγωγικά συστήματα (π.χ. νερό, θέρμανση, σωλήνες αερίου κλπ.) θα πρέπει να είναι συνδεδεμένα με ένα σύστημα γείωσης.

Ο κεραυνός μπορεί να επάγει βραχυκύκλωμα τάσης στα ΦΒ πλαίσια, στα καλώδια των πλαισίων και στο κύριο καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα επαγόμενα επίπεδα τάσης στα ΦΒ πλαίσια με μεταλλικούς σκελετούς έχουν περίπου τη μισή τιμή από αυτά χωρίς σκελετό. Για να μειωθεί η ροή του ρεύματος στα καλώδια των πλαισίων θα πρέπει τα θετικά και τα αρνητικά καλώδια (+ και -) των γραμμών να κινούνται όσο το δυνατό πιο κοντά μεταξύ τους.

Εδώ, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το καλώδιο που βρίσκεται στο έδαφος είναι προστατευμένο από βραχυκύκλωμα. Όσο μικρότερες είναι οι κίτρινες περιοχές στους ανοιχτούς βρόγχους του κυκλώματος της ΦΒ συστοιχίας, τόσο χαμηλότερη είναι η επαγωγική τάση που παράγεται από το ρεύμα του κεραυνού στα καλώδια του πλαισίου (βλ. Σχήμα 5.7.2.31).

Η βραχυκύκλωση της επαγωγικής τάσης στο κύριο καλώδιο του εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί τοποθετώντας τα θετικά και τα αρνητικά καλώδια όσο το δυνατό πιο κοντά μεταξύ τους. Σε συστήματα που είναι εκτεθειμένα σε κίνδυνο χτυπήματος από κεραυνό προτείνονται καλώδιο με προστατευτικό περιβλημά.



Σχήμα 5.7.2.29: Διάταξη βρόγχου σε καλωδίωση πλαισίου. Πηγή: Solarpraxis

Η διατομή του περιβλήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 16mm^2 χαλκός (Cu). Η πάνω άκρη του περιβλήματος θα πρέπει να είναι καλά συνδεδεμένη με την μεταλλική υπό κατασκευή και τους σκελετούς του ΦΒ πλαισίου κατά μήκος μιάς όσο το δυνατό μικρότερης διαδρομής. Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένας μεταλλικός σωλήνας προστασίας. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται προστατευμένα καλώδια θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αναστολές βραχυκυκλώματος, με ονομαστική διαρροή ρεύματος περίπου 10kA, οι οποίοι θα είναι συνδεδεμένοι με τους ενεργούς αγωγούς. Σε προστατευμένα καλώδια αρκεί να χρησιμοποιούνται αναστολές βραχυκύκλωσης με ονομαστική διαρροή περίπου της τάξης του 1kA.

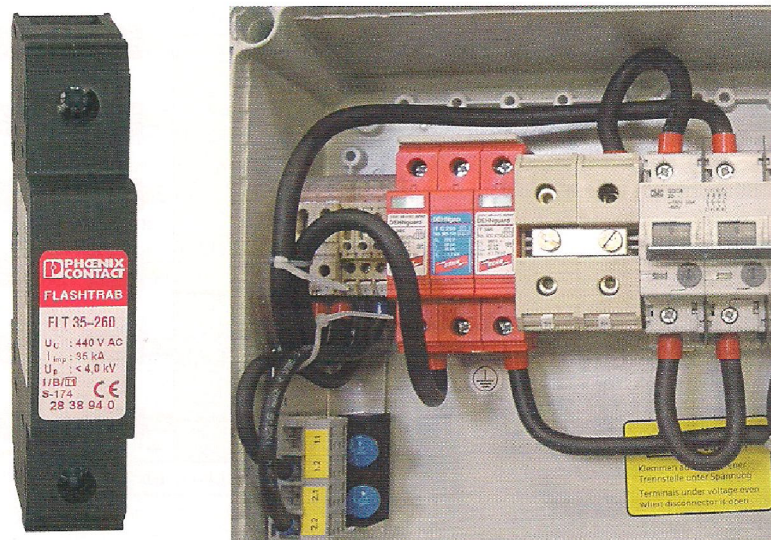
Οι αναστολές βραχυκύκλωσης χρησιμοποιούνται για την προστασία των ΦΒ συστημάτων και να καθοδηγήσουν τις ηλεκτρικές συσκευές μακριά από τις περιπτώσεις χωρητικής και επαγωγικής σύζευξης και υπερφόρτωσης της τάσης του πλέγματος. Συνήθως, οι αναστολές είναι εγκατεστημένοι στο κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας της ΦΒ συστοιχίας. Σε συστήματα με κίνδυνο χτυπήματος από κεραυνό, εγκαθίστανται και άλλοι αναστολές βραχυκύκλωσης πριν και μετά το μετατροπέα.

Το DIN VDE 0675, Μέρος 6 (Γερμανία) διαφοροποιεί δύο κλάσεις αναστολέων: I και II. Οι αναστολής της Κλάσης I αποφορτίζουν το απευθείας ρεύμα και χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει αυξημένος κίνδυνος κεραυνού. Οι αναστολές βραχυκύκλωσης της Κλάσης II χρησιμοποιούνται συνήθως στις πλευρές του συνεχούς και του εναλλασσόμενου ρεύματος με δυνατότητα ρεύματος βραχυκύκλωσης της τάξης του 1kA (πρότυπη βραχυκύκλωση 8/20) ανά 1kWp. Η τάση λειτουργίας UC (εναλλασσόμενο ρεύμα) του αναστολέα βραχυκύκλωσης πρέπει να αντιστοιχεί τουλάχιστον στην τάση ανοιχτού κυκλώματος της ΦΒ συστοιχίας. Ο Πίνακας 5.9 δίνει τα είδη και τις μετρήσεις της τάσης των αναστολέων βραχυκύκλωσης εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.

Τύπος	V _c (AC)	V _c (DC)
75	75V	100V
150	150V	200V
275	275V	350V
320	320V	420V
440	440V	585V
600	600V	600V

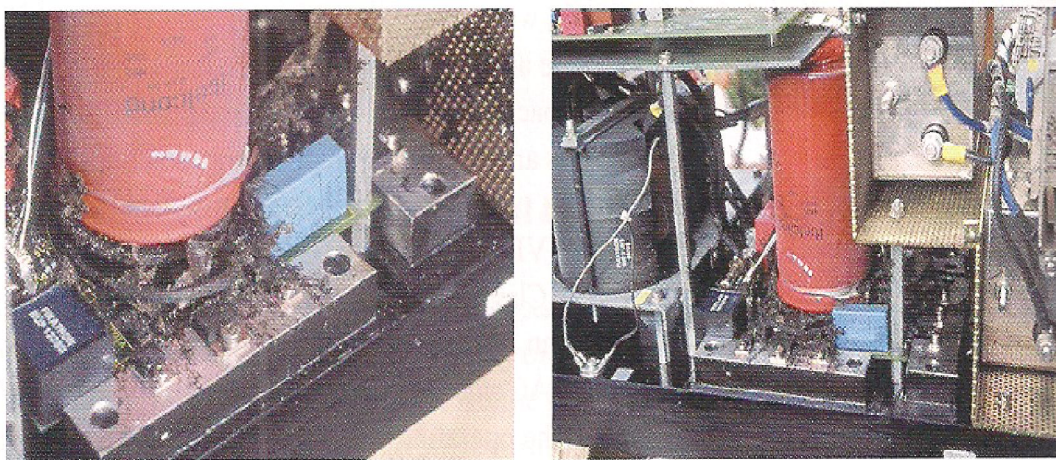
Πίνακας 5.9: Είδη και τιμές τάσης για αναστολές βραχυκύκλωσης εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.

Ένας αναστολέας βραχυκύκλωσης θα πρέπει να είναι συνδεδεμένος ανάμεσα στους δύο πόλους και επιπλέον να είναι και γειωμένος. Σε αναστολές της Κλάσης II, η αρχική και οι αναπτυσσόμενες τάσεις θα πρέπει να είναι 1,4 φορές την μέγιστη ΦΒ τάση (E VDE 0126 Μέρος 31, Γερμανία). Είναι σημαντικό σε συστήματα με κίνδυνο κεραυνού να τοποθετούνται μόνο είδη συσκευών με θερμική μόνωση και δείκτες βλαβών. Ο χειριστής του συστήματος θα πρέπει να επιθεωρεί οπτικά τους αναστολές βραχυκύκλωσης τουλάχιστον έπειτα από κάθε καταιγίδα, ή κάθε έξι μήνες. Αν το σημείο εγκατάσταση των αναστολέων δεν είναι εύκολα προσβάσιμο οι αναστολές θα πρέπει να τοποθετούνται με ένα τηλεχειριστήριο με ένδειξη βλαβών. Το όργανο ένδειξης βλαβών θα πρέπει να είναι τοποθετημένο σε ένα σημείο που να είναι ορατό από τον χειριστή του συστήματος (π.χ. σε κοντινή περιοχή από το ντουλάπι των μετρητών). Σε μετατροπείς που παρακολουθούν την απομόνωση, μπορεί η ενεργοποίηση των αναστολέων βραχυκύκλωσης να δηλωθεί ώστε να μην χρειάζεται χειροκίνητη καταγραφή.



Εικόνα 5.7.2.30: Αναστολέας βραχυκύκλωσης στο κιβώτιο διανομής/συνδεσμολογίας της ΦΒ συστοιχίας

Σε εξαρτήματα για τα οποία ο κατασκευαστής παρέχει προστασία υπερφόρτωσης τάσης (συνήθως αντιστάσεις μεταβλητών τιμών), είναι πιθανό να προσφέρονται και με εξωτερική προστασία από ατμοσφαιρικές υπερφορτώσεις τάσης. Η καταγραφή απομόνωσης των μετατροπέων αναγνωρίζει αν κάποια από τις αντιστάσεις μεταβλητών τιμών έχει ενεργοποιηθεί.



Εικόνα 5.7.2.31: Επίδραση του έμμεσου κεραυνού για αντιστροφείς: εισροές ηλεκτρολυτικών συμπυκνωτών έχει εκραγεί λόγω υψηλής τάσης διόγκωσης. Πηγή: Phoenix Contact

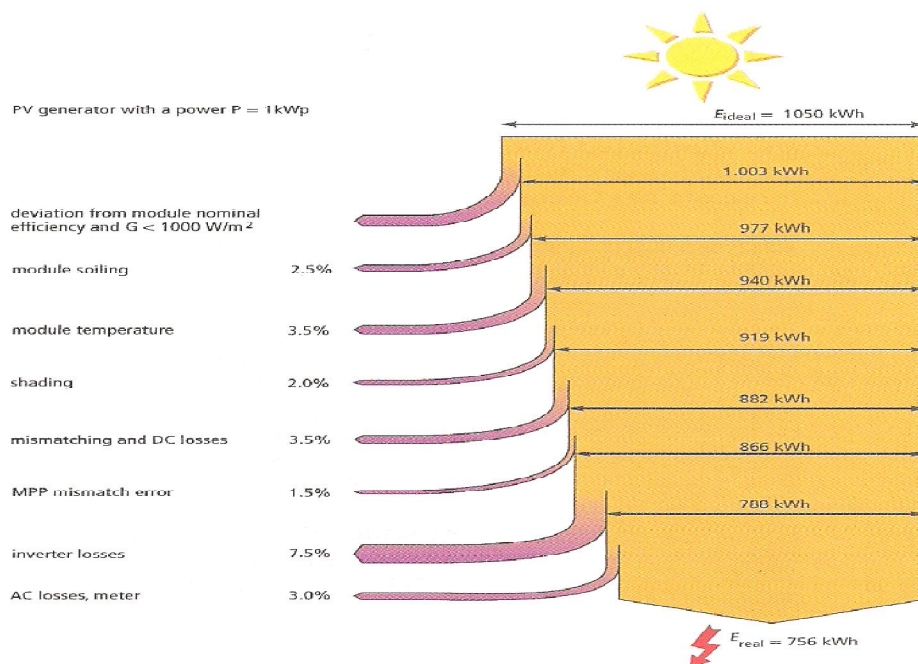
5.8 Πρόβλεψη απόδοσης

Για τη δημιουργία μιας πρόβλεψης της απόδοσης (μία εκτίμηση που θα αποτελεί την ετήσια συνολική ηλεκτρική παραγωγή του συστήματος σε kWh ανά έτος), θα πρέπει να εκτιμηθεί η τοποθεσία και η συνολική αποδοτικότητα του ΦΒ συστήματος. Για να γίνει αυτό, αφαιρούνται οι διαφορετικοί παράγοντες απωλειών του συστήματος από την θεωρητικά αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση της ΦΒ συστοιχίας, E_{ideal} . Το Σχήμα 5.8.32 δείχνει τους διαφορετικούς παράγοντες απωλειών και το μέσο ποσοστό που καταλαμβάνουν ως προς την ενέργεια που παράγεται από την ΦΒ συστοιχία.

Μία παράμετρος ανεξάρτητη της τοποθεσίας, γνωστή ως λόγος επίδοσης χρησιμοποιείται σαν ένα μέτρο για την ποιότητα της εγκατάστασης. Ο λόγος επίδοσης (ΛΕ ή PR) ορίζεται ως ο λόγος ανάμεσα στην πραγματική συνολική παραγωγή ενέργειας ενός συστήματος και την ονομαστική ενέργεια παραγωγής δυναμικού του συστήματος (απόδοση συστήματος σε ιδανικές/STC συνθήκες)-προϊόν της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Ο ΛΕ είναι ένας δείκτης της πραγματικής συνολικής παραγωγής του συστήματος σε σύγκριση με ένα ιδανικό σύστημα που λειτουργεί χωρίς απώλειες: $PR = E_{real} / E_{ideal}$

Η θεωρητικά αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση της ΦΒ συστοιχίας E_{ideal} λέγεται επίσης και ιδανική συνολική παραγωγή ενέργειας. Η ιδανική συνολική παραγωγή ενέργειας της ΦΒ συστοιχίας είναι το αποτέλεσμα του γινομένου της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων $A_{ΦΒ}$ και της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων:

$$E_{ideal} = g_{ΦΒ} * n * A_{ΦΒ}$$



Σχήμα 5.8.32: Διάγραμμα ροής ενέργειας ενός διασυνδεδεμένου ΦΒ συστήματος. Πηγή: R. Haselhuhn

Διότι : $n = P_{ΦΒ} / (1000(\text{W/m}^2) * A_{ΦΒ})$

Ο ΛΕ μπορεί να υπολογισθεί πιο εύκολα:

$$PR = E_{real} / g_{ΦΒ} \quad [\text{kWh/kWp}]$$

Όπου $E_{πραγ}$ είναι η συγκεκριμένη ετήσια ηλιακή απόδοση υπολογισμένη από τον μετρητή συνολικής απόδοσης του συστήματος σε kWh/kWp.

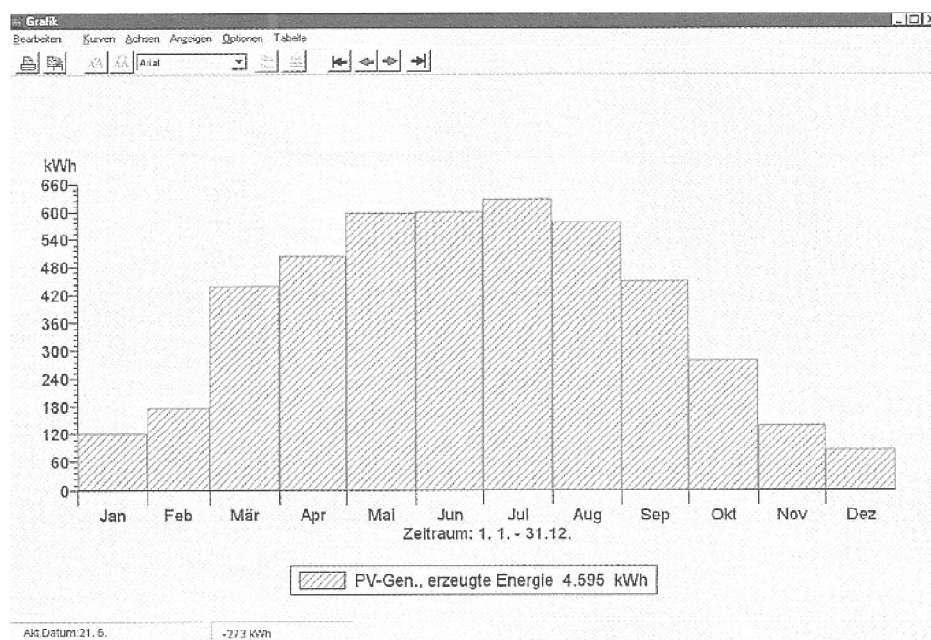
Να σημειωθεί εδώ ότι το $g_{ΦΒ}$ είναι η συγκεκριμένη ακτινοβολία στην επικλινή επιφάνεια της συστοιχίας και όχι η συνολική οριζόντια ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία στο εγκάρσιο επίπεδο υπολογίζεται από την πρόβλεψη της απόδοσης με βάση τις μακροπρόθεσμες μέσες τιμές για την οριζόντια συνολική ακτινοβολία της περιοχής, οι οποίες προσφέρονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες και στην συνέχεια μετατρέπονται για το επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας. Ως αποτέλεσμα, τα προγράμματα εξομίωσης συχνά χρησιμοποιούν 20ετείς μηνιαίες τιμές οι οποίες έχουν μετατραπεί σε ωριαίες τιμές χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους.

Οι μέσες τιμές που υπολογίζονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες βασίζονται σε μετρήσεις με πυρανόμετρο από μετεωρολογικούς σταθμούς και από μετρήσεις από καιρικούς δορυφόρους.

Σε κάποιες περιπτώσεις, για την καταγραφή του συστήματος μετράται η ακτινοβολία στο επικλινές επίπεδο και από αυτή υπολογίζεται ο ΛΕ. Γενικά, χρησιμοποιούνται αισθητήρες αναπλήρωσης θερμοκρασίας της ΦΒ ακτινοβολίας. Λόγω της φασματικής απόκλισης του ΦΒ αισθητήρα μετρώνται χαμηλότερες ακτινοβολίες από όταν λειτουργεί ένα πυρανόμετρο. Οπότε ο υπολογισμός του ΛΕ που είναι βασισμένος στον υπολογισμό της τοπικής ακτινοβολίας είναι πιο ακριβής από όταν χρησιμοποιούνται οι τιμές μετρήσεων των μετεωρολογικών υπηρεσιών. Σε αυτή τη περίπτωση όμως τείνει να δείχνει υψηλότερο ΛΕ. Μπορούν να προκύψουν ακριβείς αριθμοί μόνο όταν χρησιμοποιούνται ακριβά πυρανόμετρα για να βρεθεί η ακτινοβολία όπου θα πρέπει επίσης να καθαρίζονται τακτικά και να επανακαλυμπράρονται.

Οι πελάτες θα περιμένουν μία πρόβλεψη της αποδοτικότητας. Η χρήση προγραμμάτων εξομοίωσης αποτελούν πλέον μία συνήθη πρακτική για προβλέψεις απόδοσης (βλ. Κεφάλαιο 6).



Σχήμα 5.8.33: Πρόβλεψη απόδοσης με πρόγραμμα εξομοίωσης PV*SOLI. Πηγή: Valentin

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται κανένα πρόγραμμα προσομοίωσης, ένα διάγραμμα ακτινοβολίας της περιοχής μπορεί να προσφέρει μία εκτίμηση. Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ακτινοβολίας, πρώτα υπολογίζεται η ετήσια ακτινοβολία $g_{\Phi B}$ επί της ΦΒ συστοιχίας από το αζιμούθιο και την κλίση. Αν υπάρχει σκίαση, θα πρέπει να αφαιρεθούν οι απώλειες, λόγω της σκίασης, από την ακτινοβολία. Πολλαπλασιασμένο με το λόγο επίδοσης (ΛΕ), παίρνουμε την ετήσια ενεργειακή απόδοση του ΦΒ συστήματος σε kWh ανά kWp:

$$E_{\text{real}} = g_{\Phi B} * PR \quad [\text{kWp/m}^2]$$

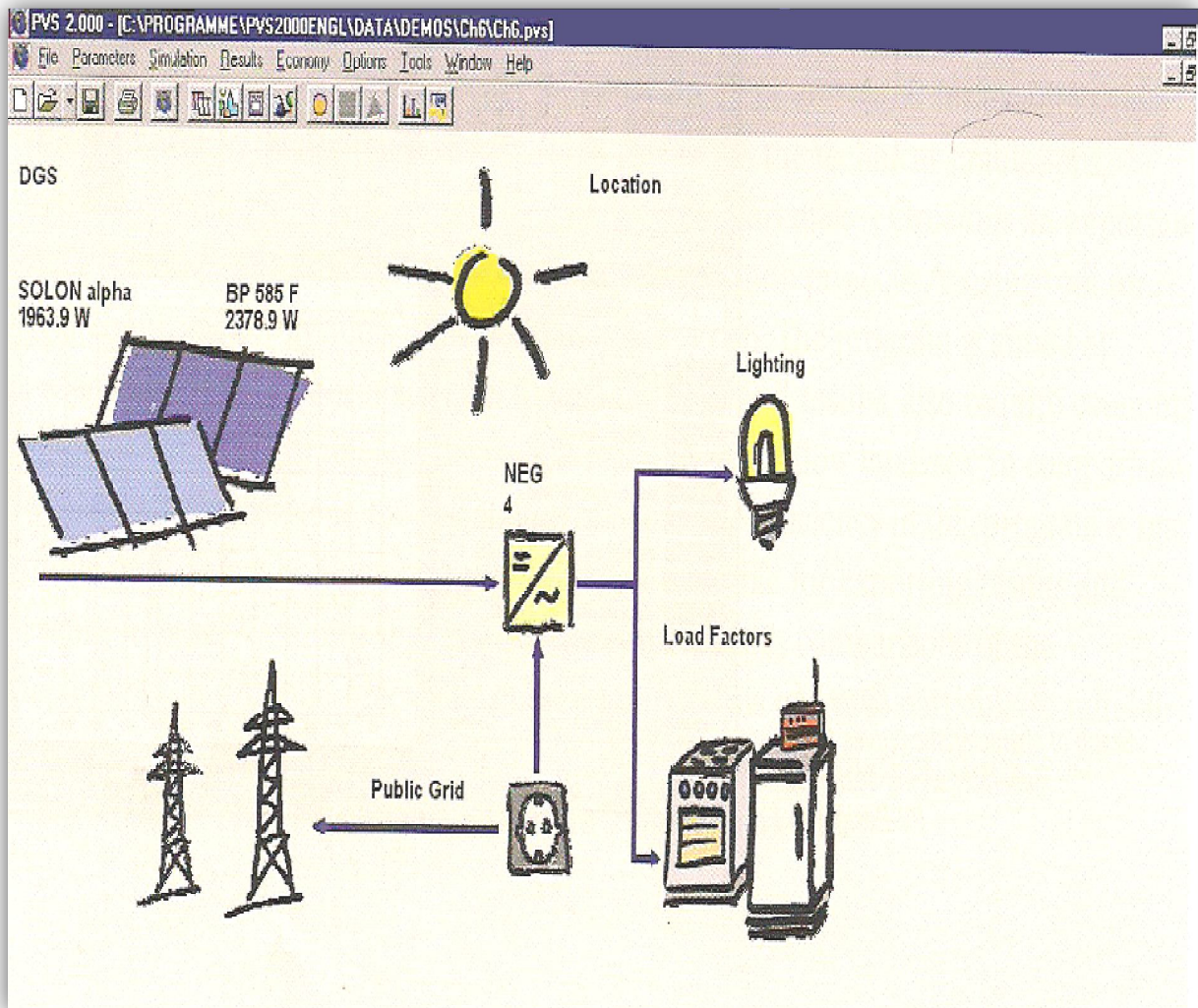
Ανάλογα με την ποιότητα εγκατάστασης, ο λόγος επίδοσης μπορεί να υποθεθεί περίπου στα 70% με 80%. Ένα πολύ καλό ΦΒ σύστημα μπορεί να επιτύχει ακόμα υψηλότερες τιμές.

Για να συγκρίνουμε λειτουργικά αποτελέσματα από διαφορετικά συστήματα, υπολογίζεται η συγκεκριμένη απόδοση σε kWh ανά kWp και έτος, καθώς και ο λόγος επίδοσης. Μία επιπλέον μεταβλητή για την εκτίμηση του συστήματος είναι οι ώρες πλήρους φορτίου, η οποία στην Αγγλική ορολογία αναφέρεται ως παράγοντας τελικής απόδοσης (FY ή TA).

Οι ώρες πλήρους φορτίου είναι το αποτέλεσμα του πηλίκου της απόδοσης προς μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο και την ονομαστική δύναμη της ΦΒ συστοιχίας. Ο χρόνος αναφοράς μπορεί να είναι μία μέρα, μία εβδομάδα, ένας μήνας ή ένας χρόνος:

$$FY = \frac{E_{real}}{P_{NΦΒ}}$$

6 Σχέδιο και λογισμικό προσομοίωσης



6.1 Η χρησιμότητα του μεγέθους, το σχέδιο και τα προγράμματα προσομοίωσης

Υπάρχουν πολλές χρήσεις λογισμικών στα ΦΒ. Για παράδειγμα, η κατάστρωσή του είναι θέμα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης του ΦΒ συστήματος. Τα προγράμματα επιλογής του μεγέθους και οι προσομοιωτές επιτρέπουν τον έλεγχο για κατώτερες τιμές και επίπεδα λειτουργίας και τελικά προσομοιώνουν τη λειτουργία με πολλές διαφορετικές διακυμάνσεις. Για ακριβείς εκτιμήσεις και αναφορές απόδοσης είναι απαραίτητη η χρήση προσομοιωτών. Παραδοσιακά, οι προσομοιωτές έχουν χρησιμοποιηθεί στην έρευνα και στην ανάπτυξη, ή και από κατασκευαστές συστατικών μερών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό προσομοίωσης στην περίπτωση που ο σκοπός είναι η καλύτερευση, η βελτιστοποίηση ή η ανάπτυξη νέων συστατικών μερών και νέου είδους συστήματος. Αυτό βοηθάει στην μείωση ανεπιθύμητων νέων προϊόντων και επιπλέον μειώνει το φάσμα των πειραμάτων. Εκτός από αυτές τις εφαρμογές, τα προγράμματα αυτά μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν στην εκπαίδευση και για λόγους εξάσκησης.

Υπάρχει η περίπτωση, πολλοί μηχανικοί εγκατάστασης ή σχεδιαστές που έχουν δουλέψει για μεγάλο χρονικό διάστημα με συγκεκριμένα ΦΒ πλαίσια και είδη μετατροπέων, να έχουν περάσει κάποιες τιμές για το μέγεθος και την αποδοτικότητα. Σύντομα όμως θα βρεθούν στα όρια των γνώσεων τους, για παράδειγμα, ως προς την επίδραση σκίασης του συστήματος. Γενικά, η επιλογή του μεγέθους και τα λογισμικά προσομοίωσης κάνουν περίπλοκες καταστάσεις διαφανείς, γρήγορα και εύκολα. Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός ΦΒ συστημάτων συνδεδεμένων με πλέγμα, δεν είναι με κανένα τρόπο όσο εύκολος φαίνεται στην αρχή. Κάθε μετατροπέας έχει αντίστοιχα μία περιοχή MPP στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος. Την ίδια στιγμή, κάθε μετατροπέας έχει τις δικές του οριακές τιμές ρεύματος και τάσης, οι οποίες προφανώς καθορίζουν το επιτρεπτό εύρος του εξοπλισμού. Τα ΦΒ πλαίσια πρέπει τώρα να είναι καλωδιωμένα σαν γεννήτρια με τέτοιο τρόπο ώστε το εύρος λειτουργίας του κάθε συστατικού μέρους του συστήματος (ΦΒ πλαίσια και μετατροπέας) να ταιριάζουν μεταξύ τους. Κάθε μετατροπέας, μαζί με ένα συγκεκριμένο ΦΒ πλαίσιο μπορεί να καλωδιωθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Για κάθε πιθανή διάταξη της καλωδίωσης, τα λογισμικά προσομοίωσης μπορούν να προβλέψουν και να εκτιμήσουν την συμπεριφορά του συστήματος με βάση τη πιθανή συμπεριφορά του καιρού, τη κατεύθυνση και τη κλίση της ΦΒ συστοιχίας. Κατά την επιλογή της διάταξης που θα προσφέρει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα ή την πιο οικονομική πραγματοποιήσιμη λύση και το λεπτομερές σχέδιο πιο περίπλοκων ΦΒ συστημάτων -για να μην αναφέρουμε προβλέψεις της λειτουργικής συμπεριφοράς- οι κανόνες του αντίχειρα καθώς και η εμπειρία από προηγούμενα συστήματα είναι συνήθως άχρηστα. Η επιλογή του συστήματος και ο υπολογισμός της απόδοσης μπορούν να πραγματοποιηθούν γρήγορα και ακριβώς αν χρησιμοποιηθεί και ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Μία επιλογή από διάφορες παραλλαγές μπορεί να προσομοιωθεί για τον εντοπισμό της καλύτερης λύσης από ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντολογικής άποψης.

Η λειτουργική συμπεριφορά των μεμονωμένων συστημάτων είναι πιο πολύπλοκη σε σύγκριση με τα ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα με πλέγμα. Όταν σχεδιάζονται τέτοια συστήματα, είναι σημαντικό να βρεθεί για μία δοσμένη τοποθεσία (συμπεριφορά καιρού) μία ισορροπία στις σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές πλαισίων/αποθήκευσης ενέργειας/φορτίου (προφίλ φορτίου) και να βελτιστοποιηθεί η αλληλεπίδρασή τους ως προς με τις προδιαγραφές του συστήματος. Για τον σχεδιασμό του συστήματος και την βελτιστοποίησή του θα πρέπει να μην ξεχνάμε ότι η αξιοπιστία της παροχής, ο χρόνος λειτουργίας των συστατικών μερών του συστήματος (μπαταρίες - βάθος κύκλου αποφόρτισης / αριθμός κύκλων) και ο τρόπος που χρησιμοποιείται το

σύστημα, καθορίζουν την οικονομική επάρκεια του ΦΒ συστήματος. Σε μεμονωμένα συστήματα, λανθασμένη επιλογή μεγέθους μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ανικανότητα των συστημάτων να λειτουργήσουν, την απόλυτη ανεπάρκειά τους ή την γρήγορη γήρανση της μπαταρίας. Τα προγράμματα προσομοίωσης κάνουν να λειτουργικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων συστατικών μερών και τη διάταξη του συστήματος διαφανή, δυνατά στην ανάλυση και έτσι δυνατά στην βελτιστοποίησή τους.

Τα προγράμματα προσομοίωσης, εκτός από την παροχή υποστήριξης στον σχεδιασμό, τα αποτελέσματά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εμπορικούς σκοπούς και να συμπεριληφθούν σε αναφορές προς τους πελάτες. Όταν προσφέρονται καλές τιμές τροφοδοσίας του παραγόμενου ΦΒ ρεύματος για τροφοδότηση πλέγματος (όπως στις περιπτώσεις της Γερμανίας, της Ισπανίας, της Γαλλίας και της Κορέας), οι πελάτες θέλουν να ξέρουν ποιά θα είναι η αναμενόμενη απόδοση και ποια η κατάσταση όσον αφορά την οικονομική απόδοση των διαφόρων παραλλαγών του συστήματος. Οι πιθανοί επενδυτές και οι χειριστές των ΦΒ συστημάτων θα ρωτήσουν για την βέλτιστη λύση του συστήματος, υπολογίζοντας την οικονομική επάρκεια, το επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας και τις μειώσεις εκπομπών. Η επεξεργασία της αποδοτικότητας, ο υπολογισμός της οικονομικής επάρκειας και η δήλωση της μείωσης εκπομπών προβάλλουν τα πλεονεκτήματα των ΦΒ συστημάτων και περιέχουν επιχειρήματα στις πωλήσεις. Κάποια προγράμματα συντάσσουν σε μία αντιπροσωπευτική αναφορά, η οποία είναι έτοιμη για τύπωση το διάγραμμα, τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

6.2 Ελέγχοντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης

Είναι καλύτερα, πριν τον υπολογισμό προσομοίωσης, να γίνεται ένα προκαταρκτικό σχέδιο και μία εκτίμηση της απόδοσης. Αυτό ισχύει διότι εκτός από έναν ισχυρό προσομοιωτή, επικαλείται και η τεχνογνωσία του σχεδιαστή με σκοπό τη συλλογή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων μέσω της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης μεγαλύτερων και πιο πολύπλοκων συστημάτων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι μόνο τόσο καλά όσο ρεαλιστική είναι η εισαγωγή των παραμέτρων και η μέθοδος προσομοίωσης. Στην περίπτωση που εισαχθούν λανθασμένα δεδομένα σε έναν υπολογιστή το αποτέλεσμα θα είναι απλώς ένα εντυπωσιακό σύνολο από ανόητα δεδομένα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως κρίσιμα αλλά όχι με τυφλή εμπιστοσύνη. Είναι σημαντικό να επιλέγεται το σωστό πρόγραμμα για το συγκεκριμένο έργο, αφού ο χρόνος που απαιτείται για την εκμάθηση ενός προγράμματος είναι λίγος αν τα όρια του προγράμματος αυτού δείξουν ότι δεν είναι το κατάλληλο.

Χρησιμοποιώντας ΦΒ προγράμματα είναι δυνατό να επιταχυνθεί η διαδικασία σχεδιασμού και να αποφευχθούν λάθη. Παρόλα αυτά, την ίδια στιγμή το λογισμικό δημιουργεί επιπρόσθετους τρόπους να κάνουν λάθη οι χρήστες του. Ως βάση απαιτείται μια όσο το δυνατό πιο σωστή και ακριβής περιγραφή του σχεδιασμένου ΦΒ. Όπως παρατηρήθηκε σε ορισμένα προγράμματα, λάθη στην εισαγωγή δεδομένων και αντίστοιχων λανθασμένων υπολογισμών δεν είναι σπάνια σε πολύπλοκες φόρμες εισαγωγής δεδομένων, ιδιαίτερα από άπειρους χρήστες. Κάποια προγράμματα περιέχουν έναν αληθοφανή έλεγχο των σημαντικών παραμέτρων που εισάγονται. Όμως ακόμα και αυτά δεν είναι ικανά να απαλείψουν όλα τα λάθη. Στην περίπτωση που εισαχθούν νέα συστατικά μέρη στις βάσεις δεδομένων του υπολογιστή, θα πρέπει πριν τη χρήση τους να εξετάζονται τα δεδομένα από το εγχειρίδιο δεδομένων του κατασκευαστή για αληθοφάνεια. Πραγματοποιήθηκε από το ηλιακό εργαστήριο του Πανεπιστημίου Εφαρμοσμένων Επιστημών του Μονάχου, στη Γερμανία, ένας έλεγχος στις λεπτομέρειες του εγχειριδίου

κατασκευαστών πλαισίων και μετατροπέων, από τον οποίο βρέθηκαν πολλά λάθη. Σε κάποια εγχειρίδια, βασικές και ουσιαστικές πληροφορίες για το σχέδιο του συστήματος, όπως οι συντελεστές θερμοκρασίας, είχαν τελείως παραληφθεί. Άλλα εγχειρίδια ήταν ασυνεπή με τον εαυτό τους ή με τις προδιαγραφές παραμέτρων και τις σχέσεις μεταξύ τους. Σε κάποιες περιπτώσεις, μεμονωμένες τιμές ήταν φυσικά αναληθείς. Για παράδειγμα, η καθορισμένη ονομαστική ενέργεια δεν αντιστοιχούσε στο γινόμενο του ρεύματος και της τάσης, η δηλωμένη τιμή I_{SC} ήταν η ίδια ή περίπου ίση με την I_{MPP} ή οι συντελεστές της τρέχουσας θερμοκρασίας ήταν ύποπτοι.

Ανακριβείς αλγόριθμοι υπολογισμών στα προγράμματα μπορούν να προκαλέσουν εσφαλμένα και μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Είναι εύκολο να καταλάβουμε γιατί τα προγράμματα των υπολογιστών δεν λειτουργούν απαραίτητα ακόμη και χωρίς καθόλου λάθη-μπορεί κανείς απλά να σκεφτεί ευρέως διαδεδομένα λειτουργικά συστήματα ή πακέτα γραφείου για τα οποία εκατοντάδες προγραμματιστές εργάστηκαν για να τα αναπτύξουν. Από την άλλη, τα προγράμματα προσομοίωσης στην ηλιακή ενέργεια δημιουργήθηκαν από μεμονωμένα άτομα ή μικρές ομάδες. Το πλήθος των μονάδων που έχουν πουληθεί είναι σχετικά μικρός, ενώ οι αντιδράσεις στα λάθη που είναι σποραδικές και κοστίζουν πίεση, σπάνια επιτρέπουν τη συνεχή συντήρηση και ανάπτυξη μετά την κυκλοφορία του λογισμικού. Έλεγχοι αληθοφάνειας είναι πάντα σημαντικοί. Όταν χρησιμοποιούνται προγράμματα προσομοίωσης θα πρέπει πάντα να ελέγχεται το αποτέλεσμα σε σχέση με παλαιότερες τιμές. Σε συστήματα με συνδέσεις σε πλέγμα, ο λόγος επίδοσης (ΛΕ) ή η ετήσια απόδοση σε σχέση με την ενέργεια, σε kWh/kWp προσφέρουν πολύ καλά σημεία αναφοράς. Αυτές οι παράμετροι εκτίμησης παρουσιάζονται στα περισσότερα προγράμματα. Σε ΦΒ συστήματα στην Γερμανία, ο λόγος επίδοσης θα πρέπει να είναι υψηλότερος από 0,7 και η ετήσια απόδοση τουλάχιστον 700kWh/kWp. Παρόλα αυτά, σε οροφές με όχι καλές γωνίες ή σε περιπτώσεις σκίασης η απόδοση που μπορεί να προκύπτει να είναι χαμηλότερη. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα είναι αρκετά υψηλότερα από 1000kWh/kWp ή πολύ χαμηλότερα από 500kWh/kWp για συστήματα σε προσόψεις κτηρίων ή λιγότερο από 700kWh/kWp για πρότυπα συστήματα εγκατεστημένα σε βάσεις σε επίπεδες οροφές, μπορεί να υποθεθεί ότι οι παράμετροι που έχουν εισαχθεί είναι λανθασμένοι ή υπάρχει κάποιο λάθος στους υπολογισμούς.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μεμονωμένων ΦΒ συστημάτων είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. Μπορούν να ελεγχθούν με βάση τους κανόνες του αντίχειρα για την σχέση ανάμεσα στα ΦΒ πλαίσια, την αποθήκευση ενέργειας και φορτίου ή με βάση παλαιότερες τιμές προηγούμενων συστημάτων.

6.3 Προσομοίωση σκίασης

Κατά την διαδικασία σχεδιασμού, οι καταστάσεις σκίασης παρουσιάζουν ιδιαίτερη πρόκληση. Στα ΦΒ συστήματα η σκίαση είναι σύνθητες φαινόμενο. Για παράδειγμα, σε συστήματα που είναι εγκατεστημένα σε επίπεδες σκεπές ή στο έδαφος, οι γραμμές των πλαισίων σκιάζουν η μία την άλλη. Άλλες περιπτώσεις είναι η σκίαση είναι λόγω του περιβάλλοντος, η σκίαση των άκρων ή ο υπερυψωμένος ορίζοντας. Η σκίαση έχει επίπτωση στην απόδοση του συστήματος και στην βέλτιστη τεχνολογία του (δίοδοι σε γραμμές και παρακάμψεις, καλωδιώσεις πλαισίων και συμπεριφορά μετατροπέα). Τα προγράμματα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται στην ουσία για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω σκίασης και την βελτιστοποίηση του σχεδίου του ηλεκτρικού και γεωμετρικού συστήματος.

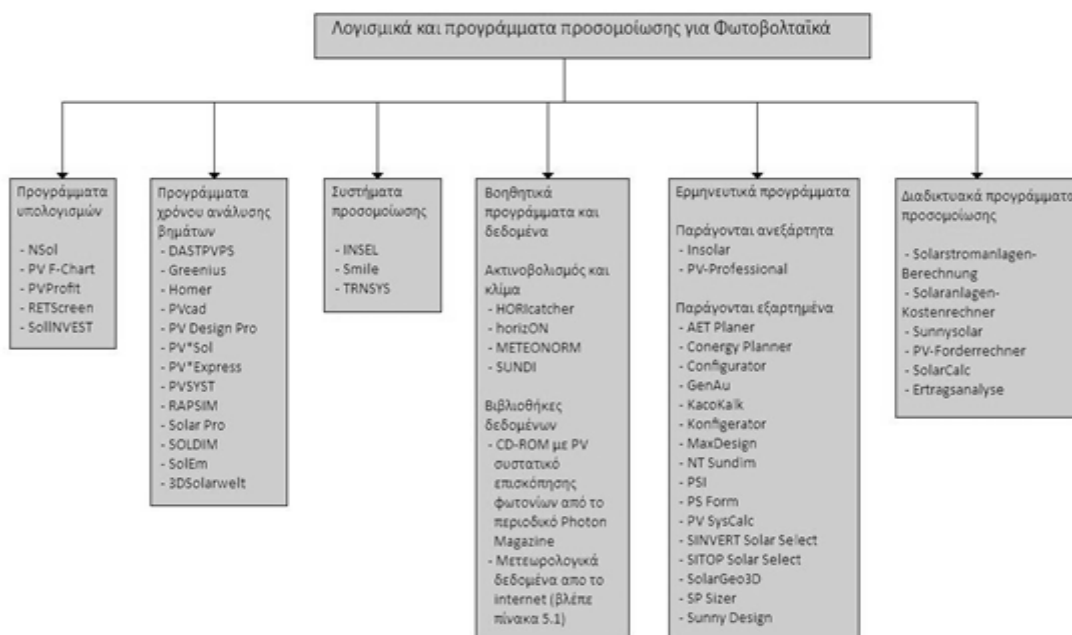
Στο πρόγραμμα 1000 οροφές της Γερμανίας, η σκίαση αποτέλεσε τον πρώτο παράγοντα μείωσης της απόδοσης και ήταν υπεύθυνη για σημαντικές μειώσεις 30% ή και περισσότερο των ΦΒ συστημάτων. Γενικά, οι μειώσεις απόδοσης προκύπτουν να είναι μεγαλύτερες από ότι θα περίμενε κανείς βασιζόμενος στην επιφάνεια που βρίσκεται υπό σκιά (βλ. Κεφάλαια 3 και 4). Γι' αυτό και η ανάλυση της σκίασης είναι ένα ευαίσθητο σημείο στις προσομοιώσεις των ΦΒ συστημάτων. Την ίδια στιγμή, η ποιότητα στα μεμονωμένα συστήματα διαφέρει κατά πολύ. Ενώ στα SOLDIM και GOMBIS οι απώλειες λόγω της σκίασης εκτιμώνται από τον χρήστη, πολλά προγράμματα (όπως τα PVS, Greenius και SolEm) έχουν ένα χαρακτηριστικό που επιτρέπει την είσοδο της οριζόντιας σκίασης γραφικά. Παρόλα αυτά, υποθέτεται ότι η σκίαση καλύπτει ολόκληρη την ΦΒ συστοιχία ομοιόμορφα. Δύο εφαρμογές λογισμικών (horizon και HORICatcher), που υποστηρίζουν τις προδιαγραφές των πληροφοριών για την σκίαση και δημιουργούν προσομοίωση σε οριζόντια γραμμή από τις ψηφιακές φωτογραφίες, είναι διαθέσιμες.

Τα προγράμματα PVSYST, Pvcad, 3DSolarWelt και Solar Pro, επιτρέπουν τις τρισδιάστατες αναλύσεις της σκίασης. Παρόλα αυτά, αυτή η μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτεί μία πιο πολύπλοκη περιγραφή του περιβάλλοντα χώρου. Για πιο λεπτομερείς αναλύσεις, προτείνονται τα προγράμματα PVSYST και Solar Pro.

6.4 Γενική επισκόπηση της αγοράς και ταξινόμηση

Για να δημιουργηθεί μία επισκόπηση της αγοράς, τα προγράμματα προσομοίωσης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τις μεθόδους προγραμματισμού και υπολογισμού.

Η μέθοδος προγραμματισμού καθορίζει την ακρίβεια, τις προϋποθέσεις εισαγωγής δεδομένων του χρήστη, την ευελιξία, το πλαίσιο εφαρμογής, το χρόνο υπολογισμού (δεν ισχύει σήμερα λόγω των δυνατοτήτων των νέων υπολογιστών) και τέλος την τιμή του προγράμματος. Όσο πιο ευέλικτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, τόσο υψηλότερες γίνονται οι απαιτήσεις του χρήστη.



Σχήμα 6.4.1: Ταξινόμηση των μεγεθών και τον λογισμικών σχεδίασης για ΦΒ συστήματα.

6.5 Περιγραφή συστημάτων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μία συλλογή από τα διαθέσιμα, τα πρακτικά και τα πιο σημαντικά προγράμματα προσομοίωσης. Επίσης αναφέρονται γενικές πληροφορίες για τα προγράμματα, την δυνατότητα επίδοσης, την ευκολία της χρήσης και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Προσφέρονται παραδείγματα εικόνων (μορφή χρήσης του λογισμικού) με σκοπό να δώσουν μία οπτική αίσθηση για την καλύτερη κατανόηση του προγράμματος. Επίσης, είναι διαθέσιμη, χωρίς κανένα κόστος, μία demo εκδοχή όλων σχεδόν των προγραμμάτων η οποία σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να "κατέβει" από το διαδίκτυο. Κατά την επιλογή ενός προγράμματος προσομοίωσης σημαντικό ρόλο παίζουν, η διαδικασία προσομοίωσης, η συγκεκριμένη εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας, η δυνατότητα επίδοσης και οι πιθανές χρήσεις του προγράμματος. Εδώ, είναι σημαντικό το είδος του συστήματος ή η διάταξη η οποία χρειάζεται να προσομοιωθεί. Αυτό εξαρτάται από το αν ο σκοπός είναι η προσομοίωση ενός συστήματος που βρίσκεται στην οροφή, ενός συστήματος ενσωματωμένου στην οροφή, ενός μεμονωμένου συστήματος, ενός υβριδικού ΦΒ, ενός συστήματος με αντλία ή ενός συστήματος με συνδέσεις σε πλέγμα. Τα δεδομένα του προγράμματος, οι παράμετροι, ο καιρός και οι συνιστώσες βιβλιοθήκες, οι λεπτομέρειες του περιβάλλοντος του συστήματος καθώς και οι λειτουργικές δυνατότητές του θα πρέπει να παίρνονται από τις μικρές περιγραφές και τους πίνακες.

Επιπλέον, αναλύονται σε βάθος τα ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα PV*SOL και PVS, παρόλο που κανένα από αυτά δεν έχει σχέδιο διασυνδετική διάταξης(interface) βοηθούμενο από υπολογιστή (CAD). Καθώς η εγκατάσταση ΦΒ σε κτήρια αυξάνεται, τα προγράμματα που προσφέρουν διασυνδετική διάταξη CAD θα χρησιμοποιούνται συχνά. Για το λόγο αυτό, ζητείται από τους κατασκευαστές πλαισίων να παρέχουν μέσω των ηλεκτρονικών τους σελίδων αρχεία CAD για τα πλαίσιά τους ως τεχνική εξυπηρέτηση. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι τα προγράμματα διαρκώς ενημερώνονται. Δεν κατέστη όμως δυνατό να περιγραφούν όλα τα διαθέσιμα λογισμικά και είναι πιθανό μερικά από αυτά που αναφέρονται να έχουν αναβαθμιστεί πριν το βιβλίο τυπωθεί.

6.5.1 Προγράμματα υπολογισμού

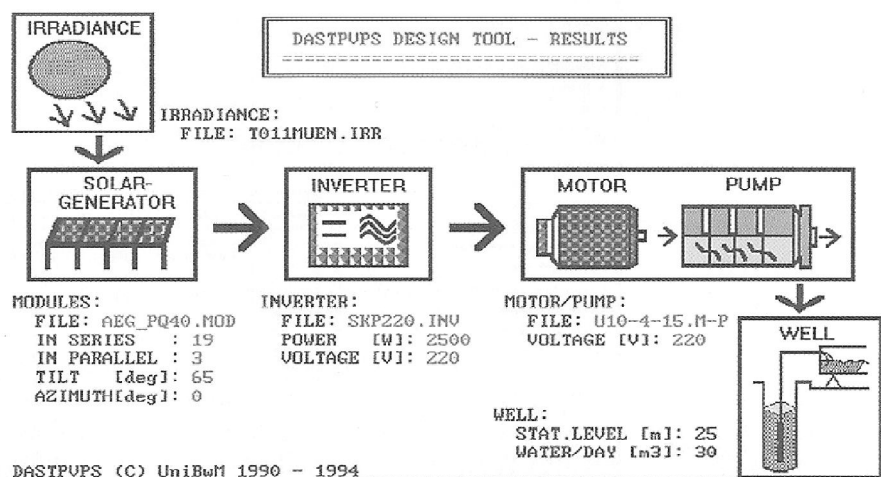
Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει την ομάδα προγραμμάτων υπολογισμού ή αλλιώς τα προγράμματα μίας «πρόχειρης» ανάλυσης. Τα προγράμματα αυτά κυρίως βασίζονται σε στατιστικές μεθόδους συνδυασμένες με απλούς υπολογισμούς. Στο μεγαλύτερο μέρος τους, τα αποτελέσματα είναι βασισμένα σε μηνιαίες τιμές. Τα προγράμματα υπολογισμών είναι υπό μορφή εφαρμογής και παραδίδουν αποτελέσματα πολύ γρήγορα. Παρόλα αυτά, είναι λιγότερο ευέλικτα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε πρότυπα προγράμματα. Το πρόγραμμα PV F-chart (ΦΒ F-διάγραμμα) παρουσιάζεται εν συντομία παρακάτω. Λόγω της απλής τους δομής, οι διαδικασίες υπολογισμού στα προγράμματα υπολογισμού είναι κατάλληλες για προγράμματα προσομοίωσης που βασίζονται στο διαδίκτυο.

ΦΒ F-διάγραμμα

Το ΦΒ F-διάγραμμα είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης του συστήματος και σχεδιασμού των ΦΒ συστημάτων. Προσφέρει μέσες μηνιαίες εκτιμήσεις επίδοσης για κάθε ώρα της ημέρας. Υπάρχει διαθέσιμη μία έκδοση για Windows και το πρόγραμμα διαθέτει δεδομένα για τον καιρό για

DASTPVPS

Το DASTPVPS είναι ένα λογισμικό πακέτο για την επιλογή μεγέθους, προσομοίωση και την αντιμετώπιση των προβλημάτων στα ΦΒ συστήματα με αντλία. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε στο Universität der Bundeswehr (Πανεπιστήμιο του Bundeswehr- Πανεπιστήμιο των Ομοσπονδιακών ενόπλων δυνάμεων), στο Μόναχο στη Γερμανία. Η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους είναι μία πολύπλοκη υπόθεση. Έτσι δημιουργήθηκε το λογισμικό DASTPVPS (Εργαλείο Σχεδίου και Προσομοίωσης για ΦΒ Συστήματα με Αντλία-ΕΣΕΦΒΑ). Το πακέτο DASTPVPS περιλαμβάνει πέντε μονάδες: την εκμάθηση, την επιλογή μεγέθους, την προσομοίωση του συνεχούς ρεύματος, του εναλλασσόμενου και τα διαγνωστικά. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα μπορεί να επιλεγεί το μέγεθος της γεννήτριας του ΦΒ, του μετατροπέα (όπου εφαρμόζεται), του συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος κινητήρα, της φυγόκεντρου, της έκκεντρης βίδας, της εμβολοφόρου αντλίας και τέλος των σωληνώσεων, οπότε ολόκληρο το σύστημα της αντλίας του ΦΒ να προσομοιωθεί. Η μονάδα εκμάθησης χρησιμοποιείται για να εξηγήσει τον βασικό τρόπο με τον οποίο δουλεύει ένα ΦΒ σύστημα και υποστηρίζει το μηχανικό στην επιλογή μεγέθους ενός κατάλληλου συστήματος. Στη μονάδα προσομοίωσης του συνεχούς ρεύματος, η λειτουργική συμπεριφορά ενός συστήματος αντλίας ΦΒ εναλλακτικού ρεύματος υπολογίζεται για δεδομένα διαφόρων διατάξεων και ακτινοβολίας. Η μονάδα προσομοίωσης εναλλασσόμενου ρεύματος επιτρέπει την προσομοίωση των συστημάτων αντλίας εναλλασσόμενου ρεύματος με απευθείας σύνδεση στην ηλιακή γεννήτρια (χωρίς εντοπιστή MPP). Οι διαγνωστικές μονάδες προσφέρουν ανάλυση του συστήματος και επικύρωση των δυνατοτήτων του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή γραφημάτων και πινάκων. Το DASTPVPS περιέχει μία εκτενή βιβλιοθήκη δεδομένων ακτινοβολίας, πλαισίων και **motor**/αντλίες. Αλλά οι χρήστες μπορούν απευθείας να εισάγουν και τα δικά τους δεδομένα στη βάση δεδομένων των συνιστώμενων μερών. Το DASTPVPS εξακολουθεί να λειτουργεί ως εφαρμογή στο σύστημα DOS, αλλά μπορεί να «τρέξει» και στα Windows.

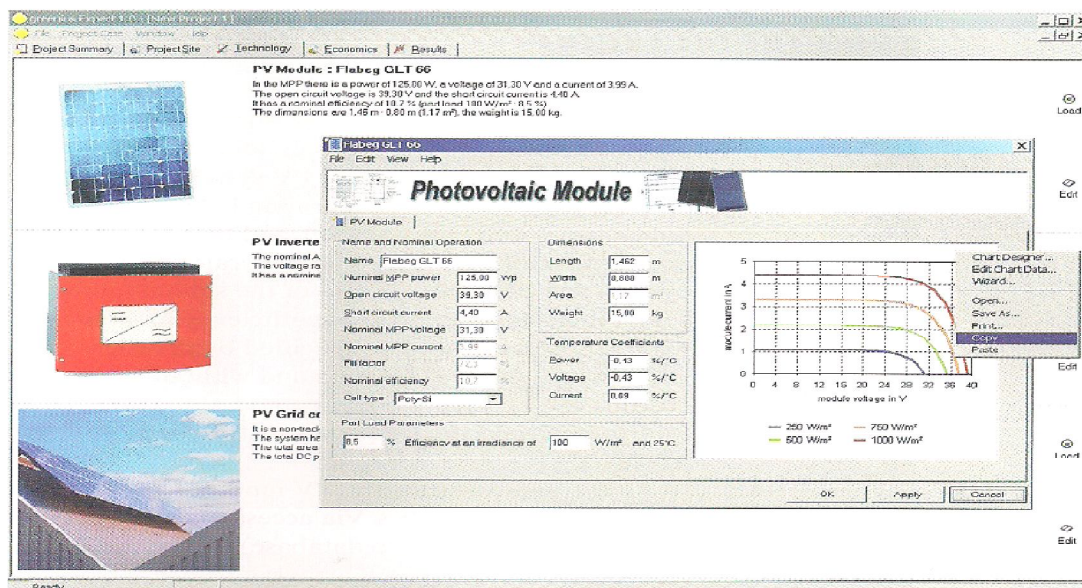


Σχέδιο 6.5.2.3: Αποτελέσματα επιλογή των διαστάσεων με DASTPVPS

GREENIUS

Το πρόγραμμα προσομοίωσης Greenius κυκλοφορεί στην αγορά από τον Ιούλιο 2002. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε από τους Γερμανούς Zentrum fur Luft und Raumfahrt e.V. (Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο) στις εγκαταστάσεις τους Plataforma Solar de Almeria, στην Ισπανία και επιδοτήθηκε από το πρόγραμμα Altener της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το πρόγραμμα αυτό κυρίως εφαρμόζεται σε μεγάλα έργα εμπορικών σταθμών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Εκτός από ΦΒ συστήματα, το πρόγραμμα μπορεί να προσομοιώσει αιολικά πάρκα και διάφορα είδη σταθμών ηλιακής θερμικής ενέργειας. Στο Greenius, ο σταθμός παραγωγής ενέργειας καθορίζεται χρησιμοποιώντας τοπογραφικά δεδομένα, τεχνολογικές παραμέτρους και οικονομικές παραμέτρους. Τα δεδομένα για τις διάφορες περιοχές υπάρχουν στη βάση δεδομένων για τον καιρό του προγράμματος. Εναλλακτικά, οι χρήστες μπορούν να εισάγουν τα δικά τους μετεωρολογικά δεδομένα. Οι τεχνικές προσομοιώσεις λαμβάνουν χώρα για πάνω από έναν χρόνο σε ωριαία διαστήματα και μπορούν, για παράδειγμα, να δείξουν την ωριαία παραγωγή ενέργειας των σταθμών. Εκτός από τις τεχνικές προσομοιώσεις, το πρόγραμμα μπορεί να εκτελέσει εκτενείς υπολογισμούς οικονομίας. Αυτό κάνει το Greenius ένα σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό έργων για σταθμούς παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Στο πρόγραμμα περιλαμβάνεται και ένα εργαλείο επιλογής τους μεγέθους για ΦΒ συστήματα με πλέγμα. Το πρόγραμμα απευθύνεται σε υπεύθυνους ανάπτυξης έργων οι οποίοι εκτός από λεπτομερή τεχνικά αποτελέσματα, ενδιαφέρονται για οικονομικές αναλύσεις με παραμέτρους κλειδιά μέχρι και εκτενείς ανάλυσης ρευστότητας. Σε σύγκριση με άλλα προγράμματα, η επάρκεια των οικονομικών υπολογισμών είναι, σε αυτό το πρόγραμμα, η πιο ευέλικτη. Προσφέρεται μεγάλο πλήθος διασυνδεδεμένων διατάξεων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων καθώς και γραφήματα σε άλλες εφαρμογές των Windows. Το Greenius επιτρέπει συγκρίσεις στην τεχνολογία των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό το καθιστά κατάλληλο για εταιρείες σχεδιαστών που εστιάζουν στην διεθνή αγορά. Προσφέρεται και μία έκδοση χαμηλού κόστους στην περίπτωση που σκοπός είναι η εξάσκηση.

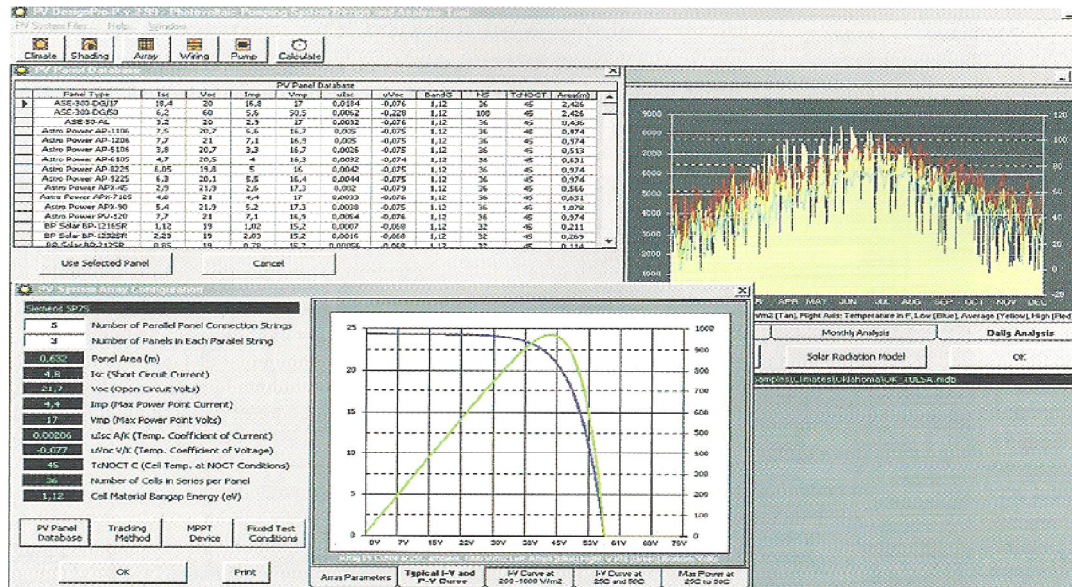


Σχήμα 6.5.2.4: Χαρακτηριστικά ενός ΦΒ ενεργειακού πάρκου στο Greenius

PV-DESIGNPRO (SOLAR STUDIO SUITE)

Το πρόγραμμα προσομοίωσης PV-DesignPro περιλαμβάνει τρεις παραλλαγές. Για προσομοίωση μεμονωμένων συστημάτων, για συστήματα με πλέγμα και για ΦΒ συστήματα αντλίας. Στην περίπτωση των μεμονωμένων συστημάτων, μία εφεδρική γεννήτρια και μία αιολική γεννήτρια μπορούν να ενσωματωθούν στο ΦΒ σύστημα και να εκτελεσθεί μία ανάλυση για την σκίαση. Το σύστημα μπορεί να βελτιστοποιηθεί από ποικίλες μεμονωμένες παραμέτρους, ενώ εκτελούνται λεπτομερείς υπολογισμοί για τα δεδομένα λειτουργίας και τις χαρακτηριστικές καμπύλες.

Οι βάσεις δεδομένων για τα πλέγματα και το κλίμα είναι πολύ περιεκτικές. Το πρόγραμμα προσομοίωσης PV-DesignPro περιλαμβάνεται στο Solar Studio Suite, μαζί με προγράμματα υπολογισμού των ηλιακών θερμικών συστημάτων, με εργαλεία για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου και δεδομένα για το κλίμα. Παρόλο που σε αυτή τη γενική επισκόπηση το Solar Studio Suite είναι το πιο περιεκτικό πακέτο προγραμμάτων, η τιμή του είναι χαμηλότερη από τα περισσότερα ανταγωνιστικά προϊόντα. Αυτό το πακέτο προγραμμάτων αναπτύχθηκε στη Χαβάη.



Σχήμα 6.5.2.5: Γράφημα χαρακτηριστικών καμπυλών για σχέδιο καλωδίωσης γεννήτριας, στο PV-DesignPro

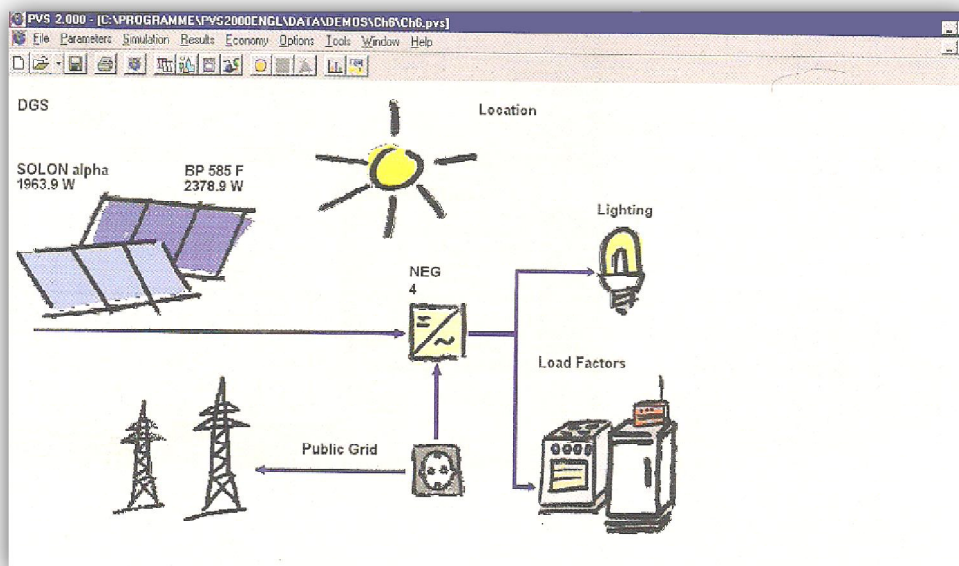
PVS

Το PVS για Windows είναι ένα από τα πιο παλαιά καθιερωμένα προγράμματα προσομοίωσης με χρονικά βήματα στην αγορά των λογισμικών για ΦΒ. Αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Fraunhofer για Συστήματα Ηλιακής Ενέργειας στο Freiburg της Γερμανίας και πουλιέται από μία εταιρεία που ονομάζεται Econzept. Το PVS είναι ένα επαγγελματικό πρόγραμμα που καθοδηγείται από ένα μενού και χρησιμοποιείται για προσομοίωση και επιλογή των διαστάσεων ΦΒ συστημάτων με πλέγμα και μεμονωμένων ΦΒ συστημάτων. Οι μεταβλητές που εισάγονται επηρεάζουν την λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο PVS με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Από τις μεταβλητές επηρεάζονται η ακτινοβολία, η θερμοκρασία των πλαισίων, η κατανάλωση. Επίσης, οι σημαντικές αλληλεξαρτήσεις όπως η μέθοδος λειτουργίας της ηλιακής γεννήτριας και ο ρόλος του συστήματος ελέγχου. Η συμπεριφορά των συνιστώμενων μερών του συστήματος περιγράφεται με μοντέλα επάρκειας τα οποία χαρακτηρίζονται από λίγες παραμέτρους οι οποίες πρέπει να καθοριστούν από τον χρήστη. Οι τυπικές διατάξεις του συστήματος, όπως τα συστήματα εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος με ή χωρίς επιπρόσθετη γεννήτρια και τα συστήματα με πλέγμα μπορούν να προσομοιωθούν. Στην περίπτωση των μεμονωμένων συστημάτων, μπορεί για παράδειγμα, να οριστεί ο χώρος αποθήκευσης και να παρουσιαστεί η κατανομή συχνότητων των επιπέδων φόρτωσης της μπαταρίας.

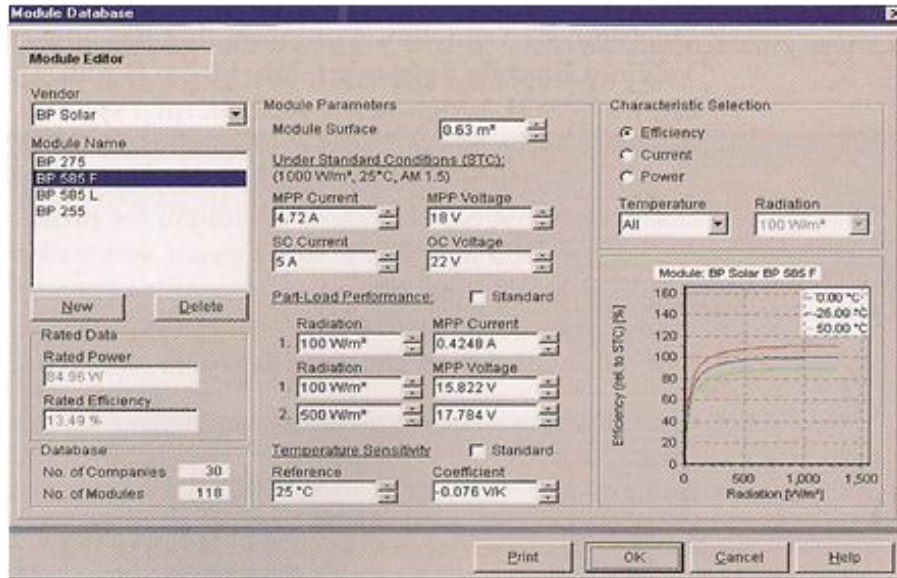
Στις βάσεις δεδομένων μπορούν στα χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων και των μετατροπέων να προστεθούν νέα προϊόντα. Μέσω μιας βάσης δεδομένων στο διαδίκτυο, μπορούν να ενημερώνονται διαρκώς τα συνιστώμενα μέρη (μέχρι τώρα υπάρχει μόνο βάση δεδομένων για τα πλαίσια) με τα πιο πρόσφατα δεδομένα.

Είναι δυνατό να εισάγονται δυο διαφορετικές προσανατολισμένες συστοιχίες. Παρόλα αυτά, μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο ένας τύπος μετατροπέα ανά σύστημα. Καθώς οι παράμετροι που έχουν εισαχθεί ελέγχονται, υποστηρίζεται η επιλογή του μεγέθους. Αν ο μετατροπέας και η ΦΒ γεννήτρια έχουν λανθασμένα μεγέθη εμφανίζεται ένα μήνυμα λάθους.

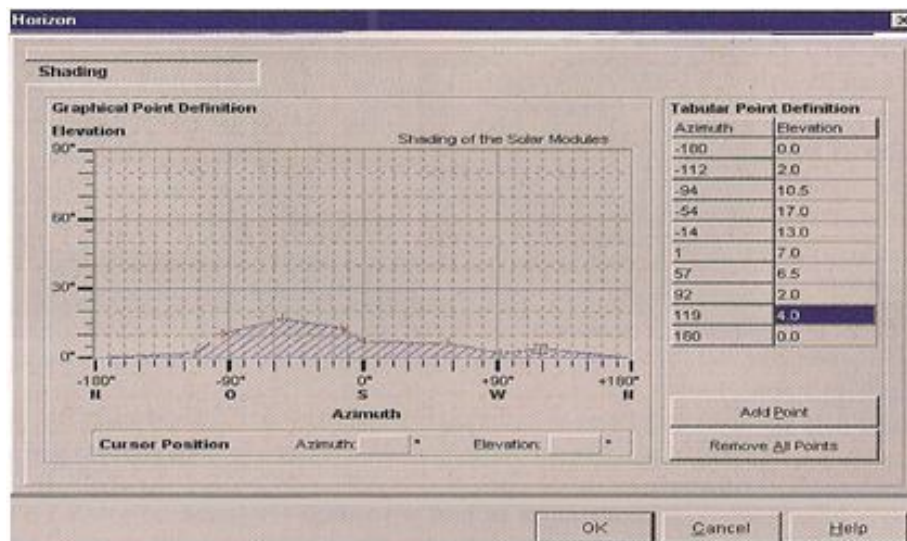
Τα απαιτούμενα δεδομένα για την προσομοίωση της ακτινοβολίας παρέχονται από τον επεξεργαστή ακτινοβολίας ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο PVS. Για τα δεδομένα που εισάγονται, απαιτούνται μόνο οι μέσες μηνιαίες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Αυτά παρέχονται από την βάση δεδομένων που συνοδεύει. Επιπλέον, είναι ενσωματωμένο ένα εργαλείο που συγκρίνει τις διακυμάνσεις σε διαφορετικές γωνίες κλίσης. Για να ληφθεί υπ' όψιν η σκίαση υπάρχει ένας συντάκτης σκίασης. Αυτό επιτρέπει στο να γίνεται η σκιαγράφηση της σκιάς χρησιμοποιώντας τον κέρσορα. Επίσης, το λογισμικό περιέχει και ένα μενού για τον υπολογισμό της οικονομικής επάρκειας. Τα αποτελέσματα που εξάγονται μπορούν να τυπωθούν σε τρεις διαφορετικές μορφές: σε μία μικρή αναφορά, σε μία παρουσίαση και σε μία παρουσίαση της συμπεριφοράς του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχει και ένα χαρακτηριστικό που επιτρέπει την σύγκριση του συστήματος. Η οικονομική επάρκεια παρουσιάζεται σε μία αναφορά. Προχωρώντας ακόμα βαθύτερα, είναι δυνατό να «σωθούν» οι ωριαίες τιμές προσομοίωσης σε ένα αρχείο ASCII, επιτρέποντας την περαιτέρω αξιολόγηση χρησιμοποιώντας άλλα λογισμικά. Η νέα έκδοση βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Προβλέπεται ένας νέος πυρήνας δομημένου προγράμματος και μία περιεκτική επαναδημιουργία στο υπό-πρόγραμμα που προσομοιώνει τα ΦΒ μεμονωμένα συστήματα. Η δουλειά θα εστιάζει στο μοντέλο της μπαταρίας (λαμβάνοντας υπ' όψιν τα λειτουργικά είδη, την συμπεριφορά γήρανσης, τις απώλειες και τα συστήματα ελέγχου), όπως επίσης στην ενσωμάτωση μίας ανάλυσης του κόστους και μιας αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης του κόστους, με την δυνατότητα διαμόρφωσης των σύνηθων πολύπλοκων μεμονωμένων συστημάτων.



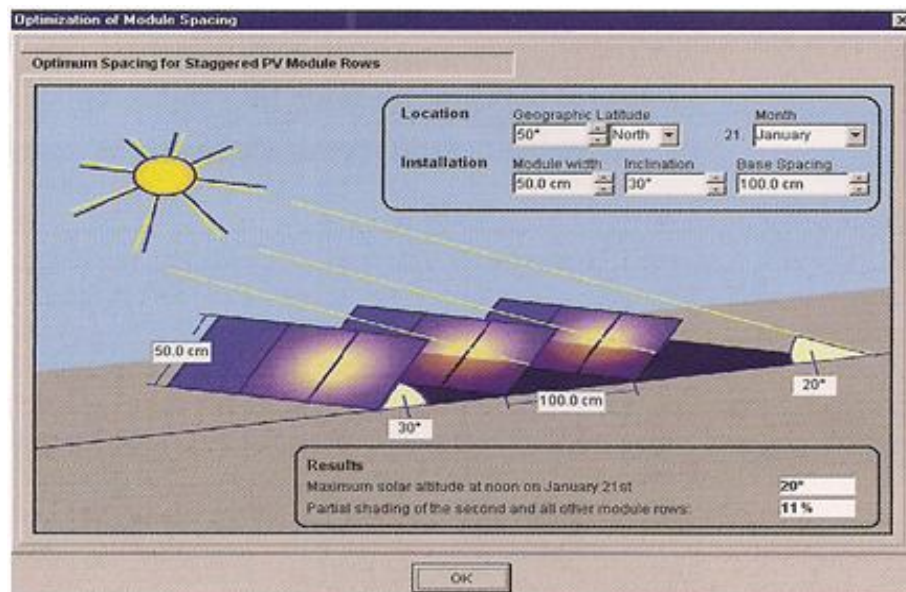
Σχήμα 6.5.2.6: Το βασικό μενού εξομοίωσης συστήματος με πλέγμα στο PVS



Σχήμα 6.5.2.7: Μενού της βάσης δεδομένων πλαισίων στο PVS



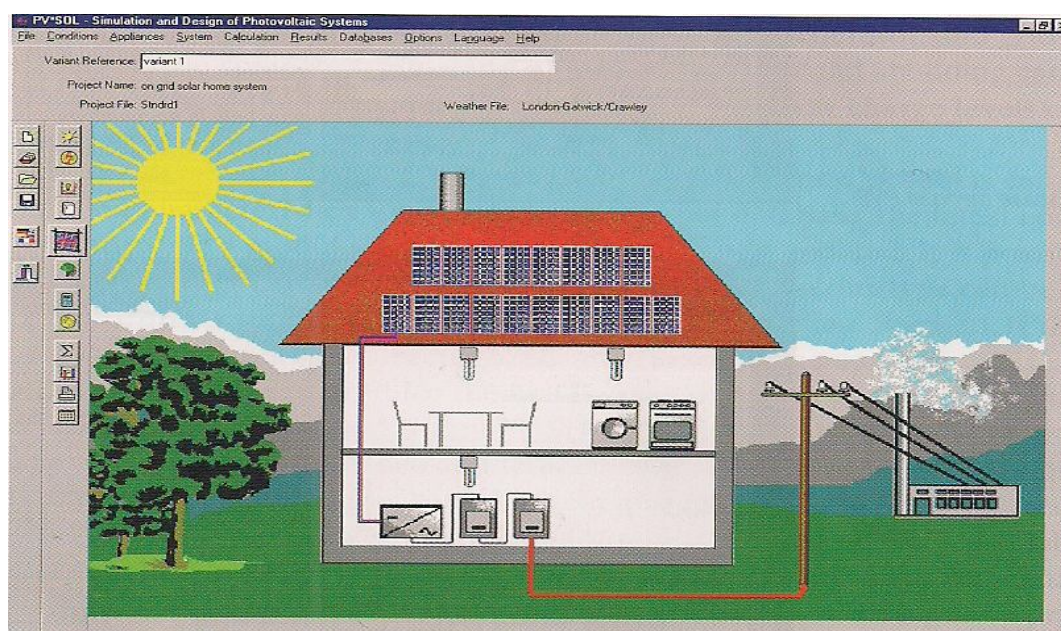
Σχήμα 6.5.2.8: Συντάκτης σκίασης στο PVS



Σχήμα 6.5.2.9: Βελτιστοποίηση χώρου για επικλινή συστήματα

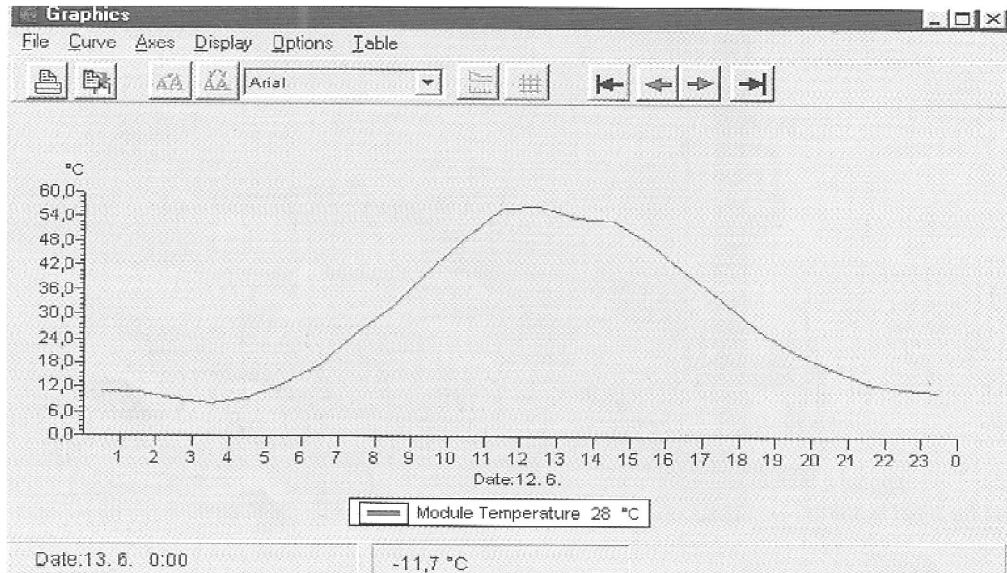
PV*SOL

Το PV*SOL από το Valentin Energie Software GmbH από το Βερολίνο, είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ενός χρονικού βήματος, το οποίο πλέον χρησιμοποιείται ευρέως. Η εταιρεία αυτή ανέπτυξε επίσης και το γνωστό πρόγραμμα T*SOL για ηλιακά θερμικά συστήματα. Το PV*SOL επιτρέπει τον σχεδιασμό και την προσομοίωση ΦΒ συστημάτων με πλέγμα και μεμονωμένων συστημάτων. Με την πάροδο των τελευταίων ετών, το πρόγραμμα έχει υποβληθεί σε μία σταθερή αναβάθμιση, αγγίζοντας μία λειτουργική χρήση που του επιτρέπει να αποτελεί μία υψηλή βοήθεια για επαγγελματική ΦΒ εργασία. Έχοντας ένα γρήγορο εργαλείο σχεδίασης, το πρόγραμμα επιτρέπει ευκολότερη επιλογή του μεγέθους του συστήματος και προσφέρει τα πιο σημαντικά αποτελέσματα προσομοίωσης σε εντυπωσιακές ταχύτητες. Οι γνώστες στη χρήση του επωφελούνται από τα πολλά προγράμματα βελτιστοποίησης του συστήματος. Λαμβάνονται υπ' όψιν η θερμοκρασία και η επίδραση των μη ταιριασμάτων καθώς και ο διασκορπισμός των χαρακτηριστικών δεδομένων.



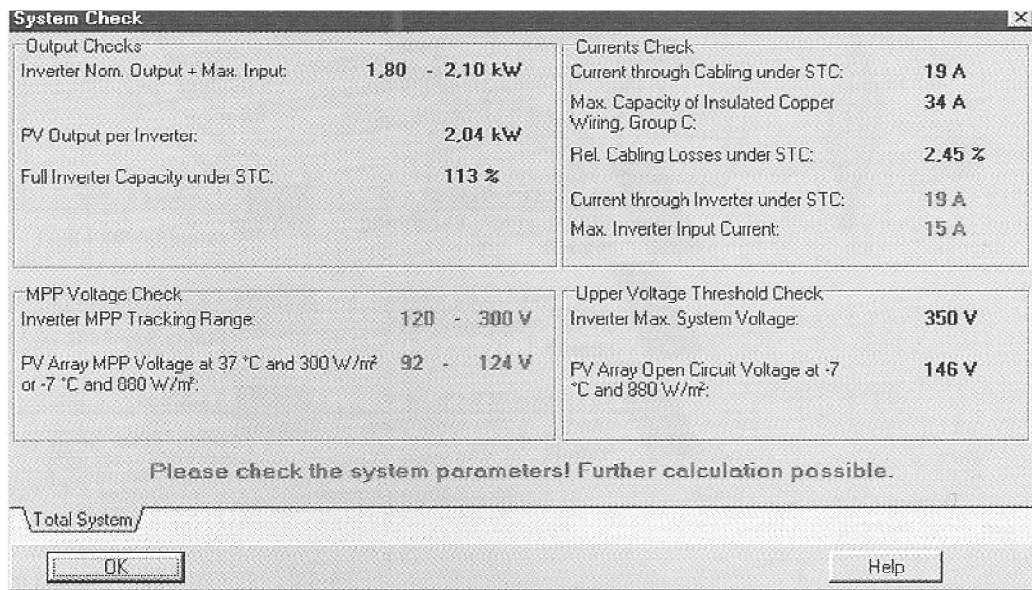
Σχήμα 6.5.2.10: Βασικό μενού για την εξομοίωση ΦΒ συστήματος με πλέγμα στο PV*SOL

Τα ΦΒ συστήματα που προσομοιώνονται μπορούν να διαχωριστούν σε συστοιχίες με διαφορετικούς προσανατολισμούς, πλαίσια και μετατροπείς. Το πρόγραμμα επιτρέπει την προσομοίωση όλων των ειδών συστημάτων (κεντρικούς, σε γραμμές και με πλαίσια μετατροπείς). Όπως και στο PVS, μπορούν να πραγματοποιηθούν αναλύσεις σκίασης παρόλο που σε πιο πολύπλοκες περιπτώσεις σκίασης η ακρίβειά τους δεν ταιριάζει με αυτή του PVSYST. Είναι βοηθητικό να εισάγονται στον συντάκτη σκίασης του PV*SOL τα προκαθορισμένα αντικείμενα που επηρεάζουν την σκίαση. Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων για τα αντικείμενα αυτά, σχεδιάζεται αυτόματα η μορφή της σκίασης. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει σκίαση, μπορούμε επίσης να αναμένουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα αφού υπολογίζεται η συμπεριφορά μερικού φορτίου των ΦΒ πλαισίων και των μετατροπέων. Οι παράγοντες της θερμοκρασίας μπορούν να ενσωματωθούν χρησιμοποιώντας ένα δυναμικό μοντέλο θερμοκρασίας. Είναι, για παράδειγμα, δυνατό, μετά την προσομοίωση, να εμφανιστεί για μία συγκεκριμένη μέρα, το γράφημα της θερμοκρασίας για πλαίσιο χωρίς ανεμιστήρα.



Σχήμα 6.5.2.11: Γράφημα θερμοκρασίας για ένα πλαίσιο σε μία καλοκαιρινή ημέρα.

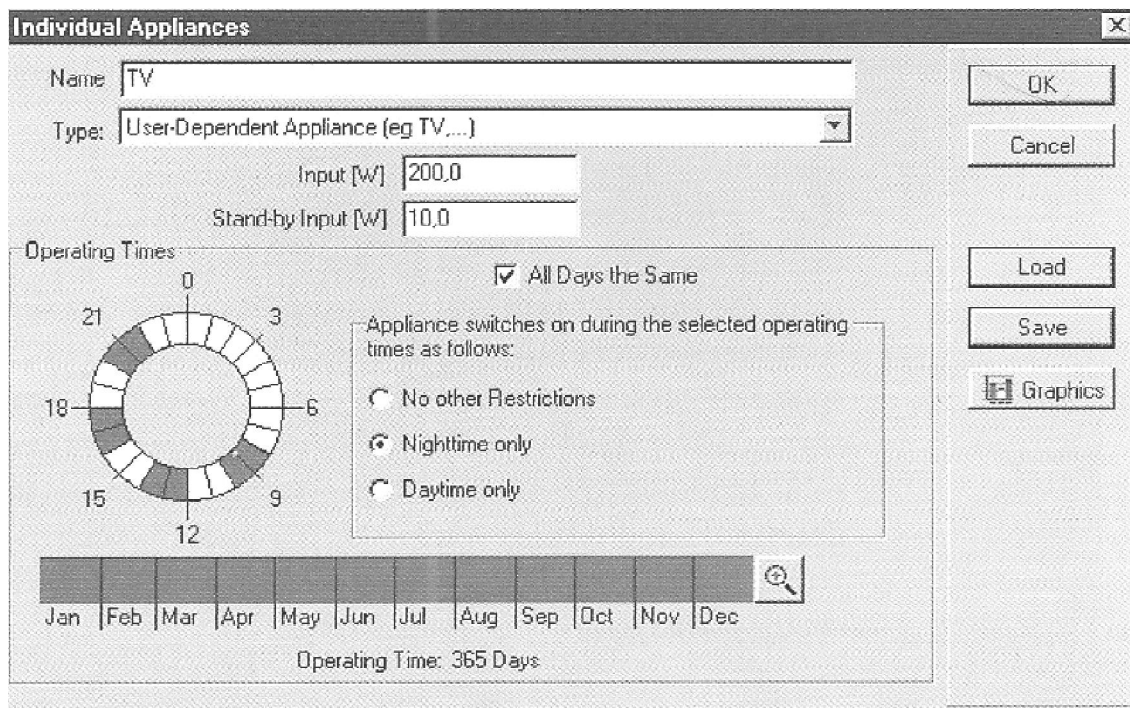
Κατά την προσομοίωση υπολογίζονται και οι διάφορες απώλειες του ΦΒ συστήματος, όπως μη-ταίριασμα, θερμοκρασία, απώλειες τάσης και διόδων και η ανάκλαση της Γης. Το PV*SOL πραγματοποιεί αληθοφανείς ελέγχους στα εισαγόμενα δεδομένα, οι οποίοι μπορούν να αποτρέψουν λάθη προηγούμενων σταδίων. Η λανθασμένη επιλογή μεγέθους εντοπίζεται και ο χρήστης ενημερώνεται.



Σχήμα 6.5.2.12: Μήνυμα λάθους για λανθασμένο σχέδιο

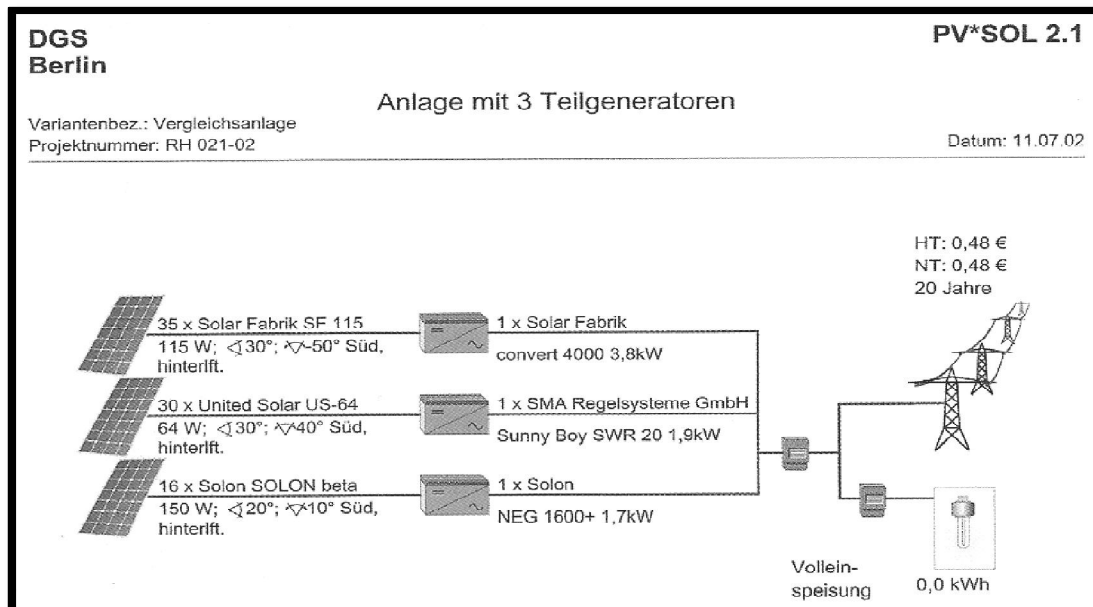
Κατά την επιλογή ενός μετατροπέα, είναι δυνατό να εμφανίζονται στην οθόνη μόνο τα μοντέλα εκείνα που ταιριάζουν με το επιλεγμένο πλαίσιο και την αντίστοιχη διάταξη της καλωδίωσης. Διατίθενται περιεκτικές και ενημερωμένες βιβλιοθήκες για την επιλογή των συνιστώμενων μερών: περίπου 500 είδη πλαισίων, γύρω στους 200 μετατροπείς, διάφοροι τύποι ηλεκτρικών συσσωρευτών και προκαθορισμένα φορτία. Εκτός από την βάση δεδομένων των μερών, υπάρχουν βάσεις δεδομένων με προκαθορισμένα προφίλ κατανάλωσης, δασμολόγια για το ηλεκτρικό και τροφοδοτικά μοντέλα. Είναι πολύ εύκολο να καθοριστούν προφίλ φορτίων για καταναλωτές χρησιμοποιώντας το καλά σχεδιασμένο μενού.

Στο πρόγραμμα περιέχονται περίπου 250 σύνολα με πληροφορίες για τον καιρό σε περιοχές της Ευρώπης, όπως επίσης και για σχεδόν οποιαδήποτε πολιτεία των ΗΠΑ. Επιπλέον μπορεί να «φορτιστεί» και μία αναρίθμητη ποσότητα επιπλέον καιρικών δεδομένων. Όλες οι βάσεις δεδομένων μπορούν να επεξεργαστούν για μελλοντική ενημέρωση. Ως αποτέλεσμα, το PV*SOL εφοδιάζει με τους υπολογισμούς των σύνηθων μεταβλητών αξιολόγησης για ΦΒ συστήματα, όπως επίσης με εκτενείς παρουσιάσεις των αποτελεσμάτων σε μορφή αναφορών και γραφημάτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν σαν πίνακες ή γραφήματα σε μία μέχρι και ωριαία ανάλυση.



Σχήμα 6.5.2.13: Προφίλ φορτίου στο μενού ορισμών

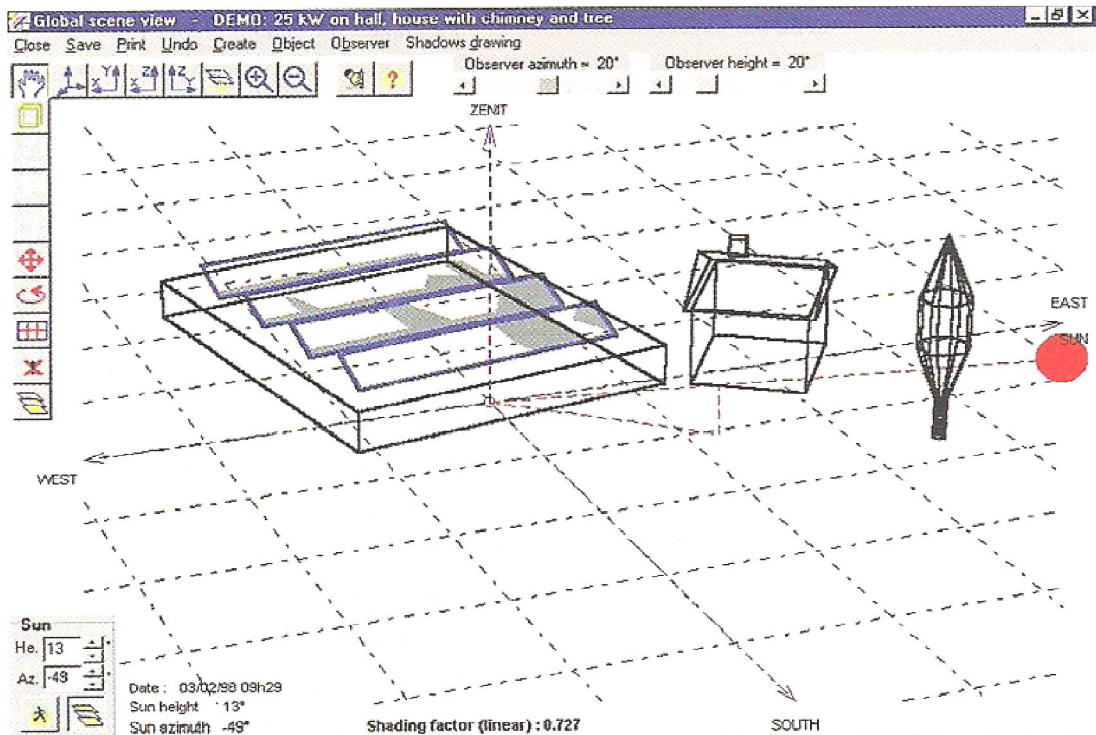
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να προβληθούν σαν μία εκτενής αναφορά του έργου ή να επεξεργαστούν σε άλλες εφαρμογές. Εκτός από τους διεξοδικούς υπολογισμούς επάρκειας, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις δυνατές επιχορηγήσεις, τις ταρίφες και τα μοντέλα τροφοδοσίας, το PV*SOL επιτρέπει τον υπολογισμό των μολυσματικών εκπομπών. Το πρόγραμμα έχει απευθείας διασύνδεση με το πρόγραμμα METEONORM για τη σύνθεση καιρικών δεδομένων. Το PV*SOL διατίθεται και σε μικρότερη έκδοση N, καθαρά για προσομοίωση ΦΒ συστημάτων με πλέγμα. Επιπλέον, η «επαγγελματική» έκδοση περιέχει μοντέλα και βιβλιοθήκες για προσομοίωση μεμονωμένων συστημάτων. Μία πολύγλωσση έκδοση του PV*SOL είναι επίσης διαθέσιμη. Εδώ, ο χρήστης μπορεί να εναλλάσσει τις γλώσσες κατά προτίμηση καθώς η εφαρμογή τρέχει.



Σχήμα 6.5.2.14: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του PV*SOL

PVSYST

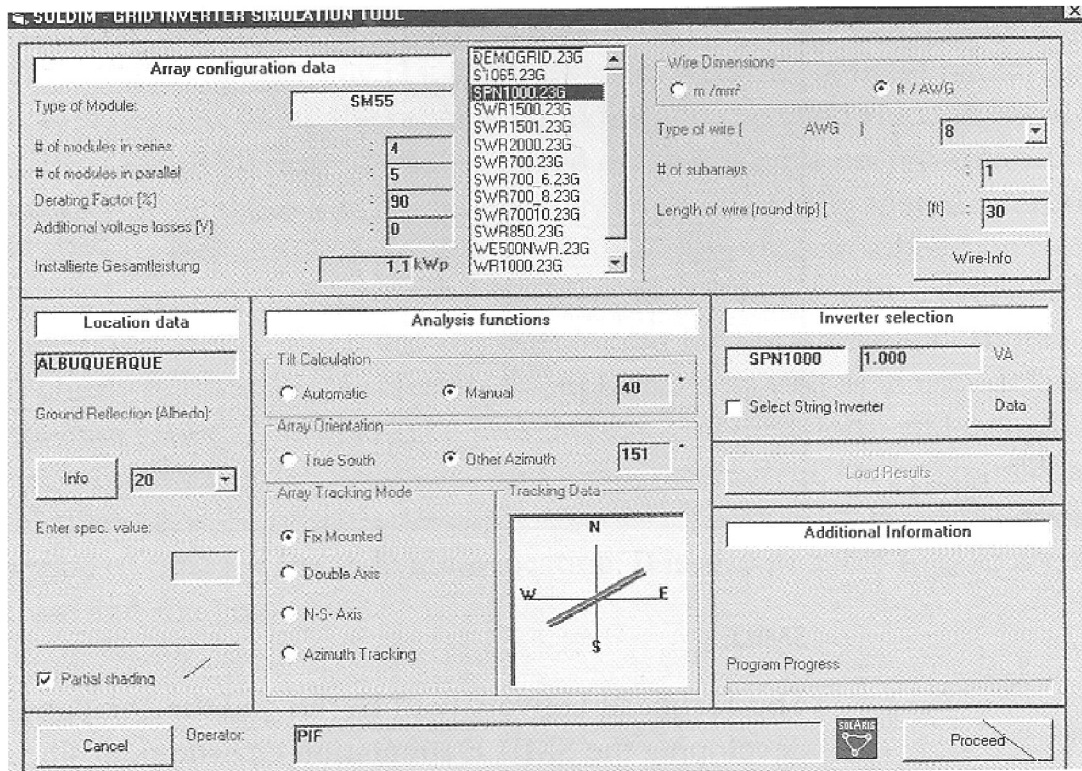
Η εκτενής χρησιμότητά του, μαζί με τη συνεχή περαιτέρω βελτίωσή του από το Πανεπιστήμιο της Γενεύης, στην Ελβετία, κάνει το PVSYST ένα από τα πιο δυναμικά και περιεκτικά προγράμματα σε αυτήν εδώ την αναφορά. Στην τωρινή του έκδοση και συγκριτικά με τις παλαιότερες εκδόσεις, έχουν βελτιωθεί αισθητά η φιλικότητά του προς το χρήστη και η λειτουργία του. Το PVSYST δουλεύει τώρα με μία «πολυεπίπεδη προσέγγιση». Υπάρχουν τρία επίπεδα εφαρμογής με διαφορετικές λειτουργίες σε αντιστοιχία με τις διαφορετικές ομάδες χρηστών, όπως αρχιτέκτονες, ειδικούς ΦΒ, μηχανικούς και επιστήμονες, με τις διαφορετικές τους προσδοκίες και γνώσεις. Το πρόγραμμα έχει όλων των ειδών τα χαρακτηριστικά, όπως ένα 3-διάστατο εργαλείο για τον υπολογισμό της σκίασης, την δυνατότητα εισαγωγής στο σύστημα μετρικών δεδομένων για την απευθείας σύγκριση και προσομοίωση των τιμών και ένα πακέτο εργαλείων για ηλιακή γεωμετρία, μετεωρολογία και ΦΒ λειτουργική συμπεριφορά. Η επόμενη έκδοση του PVSYST εξομοιώνει επιπλέον και άμορφα ηλιακά πλαίσια. Το πρόγραμμα διατίθεται μόνο στα Αγγλικά και Γαλλικά. Η διαδικτυακή υποστήριξη στο χρήστη είναι επίσης ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό. Εκτός από προσομοιώσεις μεμονωμένων συστημάτων με βοηθητικές γεννήτριες και συστημάτων με πλέγμα, το PVSYST μπορεί να εκτελεί ειδικές αναλύσεις. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών καμπύλων των πλαισίων που πρόκειται να προκαθοριστούν, όταν υπάρχει μερική σκίαση, η οποία, για παράδειγμα, επιτρέπει την θερμική φόρτωση των ηλιακών πλαισίων. Επιπλέον, για την προσομοίωση, είναι δυνατό να καθοριστούν και να παρουσιαστούν πολλές παράμετροι, όπως μετεωρολογικά δεδομένα, ηλεκτρικές τάσεις, ρεύματα, ενέργειες και οι επιδόσεις. Το PVSYST επιτρέπει επίσης την 3-διάστατη ανάλυση σκίασης.



Σχήμα 6.5.2.15: Γραφική διασυνδετική διάταξη του χρήστη για 3-διάστατη ανάλυση σκίασης με PVSYSYNT

SOLDIM

Το πρόγραμμα SOLDIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό μεμονωμένων ΦΒ και συστημάτων με πλέγμα ή για την απόκτηση πελάτη. Το PVSYSYNT περιλαμβάνει τα πλαίσια STASYS και IN-GRID, όπως επίσης και βάσεις δεδομένων και εργαλεία για εμπορική στήριξη. Το IN-GRID δημιουργήθηκε για τον σχεδιασμό και την οικονομική ανάλυση ΦΒ συστημάτων με πλέγμα. Για την ακρίβεια, το SOLDIM αντιπροσωπεύει τον συνδυασμό ενός προγράμματος υπολογισμών και ενός προγράμματος ανάλυσης σε χρονικά βήματα. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες τιμές και κάποιες επιλεγμένες ημερήσιες διακυμάνσεις στην κοντινότερη ώρα. Οι γρήγοροι υπολογισμοί, οι ξεχωριστές ρυθμίσεις στο παράθυρο εισαγωγής, οι βάσεις δεδομένων και οι τιμολογημένες λίστες των προϊόντων κάνουν το SOLDIM μία χρήσιμη υποστήριξη σε μία συμβουλευτική συζήτηση ή σε συζήτηση με πελάτη. Το πρόγραμμα επιτρέπει στους εκπαιδευμένους χρήστες να εκτελούν γρήγορους και αξιόπιστους υπολογισμούς καθώς και συγκριτικές ρυθμίσεις. Οι χρήστες μπορούν είτε να αγοράσουν το SOLDIM σαν ένα ολοκληρωμένο λογισμικό πακέτο είτε απλά κάποιες μεμονωμένες ενότητες. Το SOLDIM και οι ενότητές του διατίθενται στα Αγγλικά και στα Γερμανικά. Μία νέα έκδοση του SOLDIM, σε συγκροτημένες ενότητες, αναπτύσσεται περαιτέρω για να προσφέρει ένα πακέτο που θα περιλαμβάνει ενότητες για τον σχεδιασμό μεμονωμένων συστημάτων, υβριδικών συστημάτων, ΦΒ συστημάτων με αντλία, συστημάτων με τροφοδοτικό πλέγμα και κουτί εργαλείων.



Σχήμα 6.5.2.16: Βασικό μενού του SOLDIM για τον υπολογισμό ΦΒ συστημάτων με πλέγμα

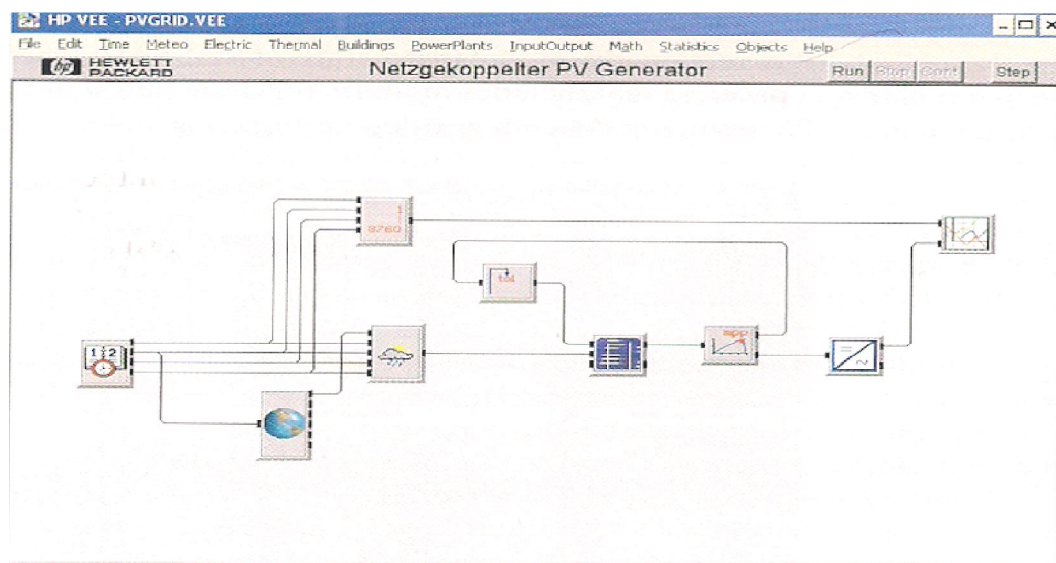
6.5.3 Συστήματα προσομοίωσης

Τα προγράμματα προσομοίωσης συστημάτων είναι απαραίτητα για την προσομοίωση των συστημάτων που χρειάζονται περισσότερα από κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης με χρονικά βήματα ή που χρειάζεται να υπολογιστούν εξολοκλήρου νέα συνιστώσα μέρη και παραλλαγές του συστήματος. Τα προγράμματα αυτά επιτρέπουν να γραφούν και να εκτελεστούν οι υπολογισμοί κατά τη μεμονωμένη προσομοίωση των πλαισίων. Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης ορίζει μία τακτική προσομοίωσης χρησιμοποιώντας μία φόρμουλα ή μία διαγραμματική γλώσσα προσομοίωσης. Το πιο γνωστό πρόγραμμα προσομοίωσης ΦΒ συστημάτων είναι το INSEL. Το SMILE το οποίο δημιουργήθηκε στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου, ανήκει επίσης σε αυτή τη κατηγορία. Τα ΦΒ συστήματα μπορούν ακόμα να προσομοιωθούν με το TRNSYS, ένα πρόγραμμα προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται στην προσομοίωση κτηρίων και ηλιακών θερμικών τομέων. Τα συστήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικούς τομείς, όπως το PSpice, μπορούν να επιτύχουν καλά αποτελέσματα προσομοίωσης αν έχουν εισαχθεί τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις ηλιακές κυψέλες.

Παρόλα αυτά απαιτείται αρκετή εκπαίδευση για να μπορέσει κανείς να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα του προγράμματος. Στην περίπτωση των επαγγελματικών προγραμμάτων προσομοίωσης με χρονικά βήματα και φιλικά προς τον χρήστη διασυνδετικές διατάξεις, μπορούν ακόμη και οι άπειροι χρήστες υπολογιστών να παράγουν προσομοίωση του συστήματος μέσα σε λίγες ώρες. Από την άλλη, απαιτείται εκπαίδευση αρκετών ημερών, ίσως και εβδομάδων για τα προγράμματα προσομοίωσης. Για αυτόν το λόγο είναι πιο κατάλληλα για ερευνητικούς και αναπτυξιακούς σκοπούς.

INSEL

Το περιβάλλον προσομοίωσης INSEL, το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Oldenburg, κυκλοφορεί στην αγορά από την δεκαετία 1990. Μία γλώσσα προσομοίωσης βασισμένη σε blocks δημιουργήθηκε για το INSEL, η οποία είναι κατάλληλα φτιαγμένη για να προσομοιώνει ανανεώσιμα ηλεκτρικά συστήματα. Πολλά μοντέλα έχουν ενσωματωθεί στα διάφορα blocks, συμπεριλαμβανομένων των υπολογισμών ηλιακής ακτινοβολίας, ηλιακών κυψελών, μετατροπών, μπαταριών, αιολικών γεννητριών, συστημάτων αντλίας και σταθμών παραγωγής ηλιακό-θερμικής ενέργειας. Τα διάφορα blocks μπορούν να συνδυαστούν οπτικά με την διασυνδεδετική διάταξη HP VEE. Το INSEL περιέχει μία βάση δεδομένων για την ακτινοβολία, η οποία περιλαμβάνει τις μηνιαίες μέσες τιμές από 2000 περίπου περιοχές παγκοσμίως. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για ερευνητικούς σκοπούς, για εξομίωση ειδικών εφαρμογών, για λεπτομερείς ανάλυσης προσομοίωσης ή για επαγγελματίες που χρειάζονται μια σημαντική ευελιξία.



Σχήμα 6.5.3.17: Το περιβάλλον του INSEL

SMILE

Το Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου και η εταιρεία GMD First έχουν κατασκευάσει το περιβάλλον προσομοίωσης SMILE από το 1990. Χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση και την βελτιστοποίηση περίπλοκων συστημάτων μετατροπής ενέργειας. Το περιβάλλον προσομοίωσης SMILE περιλαμβάνει μία γλώσσα με μεταφραστή, βασισμένη στην ιδέα αντικείμενο-φόρμουλα, ένα σύστημα χρόνου εκτέλεσης, διαφόρους αριθμητικούς επιλύτες, ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης και μία βιβλιοθήκη από συνιστάμενα μέρη. Αυτή η βιβλιοθήκη προσφέρει ένα βασικό σύνολο μοντέλων για την περιγραφή σχεδόν οποιουδήποτε μετατροπέα ενέργειας και των συνδυασμών τους και επιτρέπει στον χρήστη να συναρμολογήσει, να προσομοιώσει και να βελτιστοποιήσει ένα σύστημα ενεργειακής τεχνολογίας χρησιμοποιώντας την «αρχή χτισίματος blocks». Η φόρμουλα και η μέθοδος χτισίματος επιτρέπει στις διάφορες μονάδες να εγκαθίστανται εύκολα και στις υπάρχουσες να μπορούν να επεκταθούν. Οι περιοχές εφαρμογής του SMILE επεκτείνονται στη χρήση θερμο-ηλιακής ενέργειας, την τεχνολογία θέρμανσης και κλιματισμού, στην προσομοίωση κτηρίων, στο υδραυλικά δίκτυα και στην τεχνολογία σταθμών παραγωγής ενέργειας.

Στο πεδίο των ΦΒ, εφαρμόζονται διάφορα μοντέλα ΦΒ πλαισίων και μετατροπών. Παρόλα αυτά, στο SMILE δεν είναι δυνατή η γραφική διασυνδεδετική διάταξη και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Μέχρι τώρα το SMILE είναι διαθέσιμο μόνο για το λειτουργικό σύστημα UNIX. Υπάρχει η δυνατότητα το SMILE να «κατέβει» από το internet δωρεάν, για μη-εμπορικούς σκοπούς.

TRNSYS

Το TRNSYS αναπτύχθηκε το 1974 στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας του Πανεπιστημίου του Wisconsin στις ΗΠΑ και συνεχώς βελτιώνεται από τότε. Σήμερα, στην αγορά, το TRNSYS ηγείται μεταξύ των θερμικών συστημάτων προσομοίωσης και αξιολογεί τα είδη εύλογης κατανάλωσης ενέργειας και τα συστήματα ενεργητικής και παθητικής κατανάλωσης ηλιακής ενέργειας. Παρόλο που η προσομοίωση εστιάζεται στα θερμικά συστήματα, το περιβάλλον προσομοίωσης TRNSYS περιλαμβάνει και ΦΒ μοντέλα. Παρόλα αυτά η γραφική διασυνδεδετική διάταξη μετά δυσκολίας υποστηρίζει την προσομοίωση των ΦΒ συστημάτων. Το TRNSYS προτείνεται μόνο στους πεπειραμένους χρήστες λόγω του ότι απαιτείται αρκετός χρόνος για την εκμάθησή του.

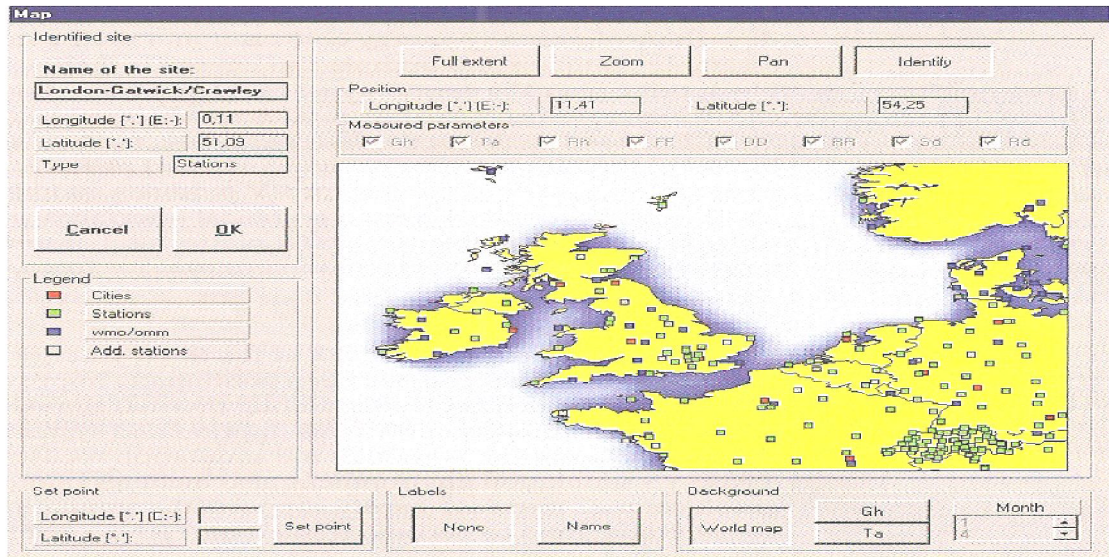
6.5.4 Συμπληρωματικά προγράμματα και πηγές δεδομένων

Οι κατηγορίες αυτές περιέχουν προγράμματα για υπολογισμούς ακτινοβολίας και αναλύσεις σκίασης, όπως επίσης και για βιβλιοθήκες συνιστώμενων μερών και καιρικών δεδομένων. Τα προγράμματα με συμπληρωματικά τοπογραφικά δεδομένα για την προσομοίωση περιλαμβάνουν τα METEONORM, SHELL SOLAR PATH και SUNDI, τα οποία επιτρέπουν την δημιουργία δεδομένων ακτινοβολίας και την απεικόνιση των διαγραμμάτων της διαδρομής του ήλιου ή των αναλύσεων σκίασης. Επιπλέον καιρικά δεδομένα είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο.

METEONORM

Η Meteotest στη Βέρνη επιδοτήθηκε από το Ομοσπονδιακό Γραφείο Ενέργειας της Ελβετίας να αναπτύξει το πρόγραμμα METEONORM για τις ανάγκες διεξαγωγής υπολογισμών με μετεωρολογικά δεδομένα. Παρόλο που τα προγράμματα έχουν μία εκτενή βιβλιοθήκη, πολλές φορές οι τοποθεσίες πρέπει να προσομοιώνονται με αυτές για τις οποίες δεν υπάρχουν καθόλου πληροφορίες. Χρησιμοποιώντας το METEONORM, μπορούμε να υπολογίσουμε τα απαιτούμενα δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας παγκοσμίως για οποιοδήποτε μέρος του κόσμου. Εκτός από αυτές τις παραμέτρους, είναι επίσης δυνατό να καθορίσουμε την σχετική υγρασία καθώς και την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Στο METEONORM, έχουν συνδυαστεί διάφορες δοκιμασμένης ποιότητας βάσεις δεδομένων για τον σχηματισμό μίας παγκόσμιας βάσης δεδομένων για την προσομοίωση ενεργειακών συστημάτων. Χρησιμοποιώντας χωροταξικές παρεμβολές σε αυτή την περιεκτική βάση δεδομένων, οι οποίες πλέον περιλαμβάνουν καιρικά δεδομένα από 2400 μετεωρολογικούς σταθμούς σε ολόκληρο τον κόσμο, μπορούν να υπολογισθούν τα απαιτούμενα δεδομένα σε ωριαία διαστήματα για περιοχές που μας ενδιαφέρουν. Οι πληροφορίες που προκύπτουν για τις επακόλουθες προσομοιώσεις δίνονται σε ωριαία διαστήματα σε 16 επιλεγμένες μορφές δεδομένων, όπως επίσης και σε προκαθορισμένες από τον χρήστη μορφές.

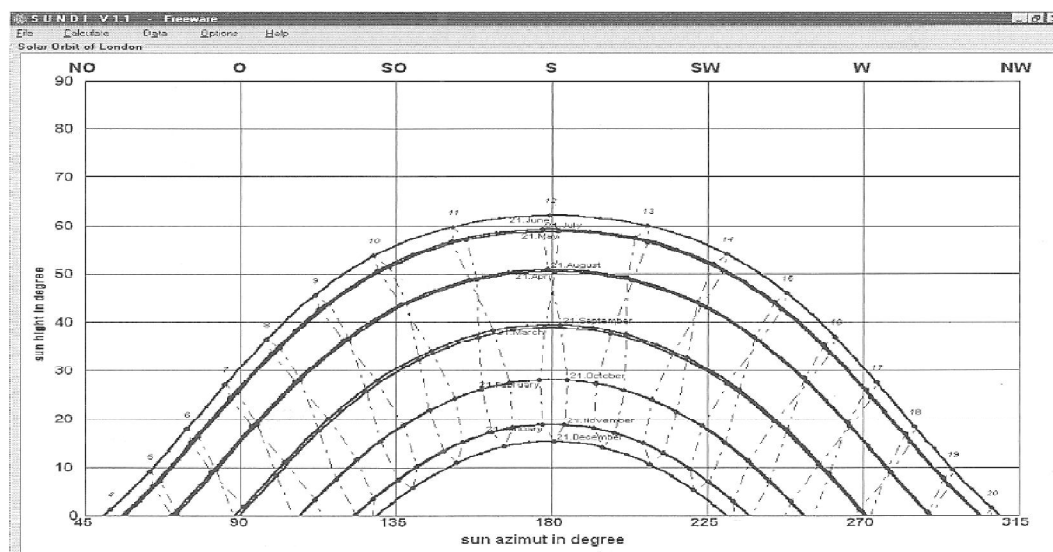
Για τη μεμονωμένη καταγραφή δεδομένων ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, το πρόγραμμα επιτρέπει την χρήση στατιστικών υπολογισμών για τη δημιουργία μιας χρονικής σειράς σε μηνιαία ή ωριαία βάση για οποιαδήποτε χρονική περίοδο στην εκάστοτε τοποθεσία. Είναι επίσης δυνατό να ληφθούν υπ' όψιν οι κεκλιμένες περιοχές και η σκίαση.



Σχήμα 6.5.4.18: Οπτική επιλογή μιας τοποθεσίας στο METEONORM

SUNDI

Το SUNDI δημιουργήθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου. Το πρόγραμμα υπολογίζει τη πορεία του ήλιου και επιτρέπει την ανάλυση σκίασης. Αυτό μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε τοποθεσία πάνω στη Γη, η οποία είτε υπάρχει στη βάση δεδομένων είτε έχει να προστεθεί αργότερα. Επιπλέον, το λογισμικό, χρησιμοποιώντας τις δικές του τιμές μετρήσεων για την παγκόσμια ακτινοβολία, μπορεί να προσδιορίσει την απευθείας και την διαχέουσα ακτινοβολία σε μία περιοχή με οποιονδήποτε προσανατολισμό. Όλοι οι υπολογισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μέρα ή χρόνο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα ή γραφικά. Τα διαγράμματα της πορείας του ήλιου μπορούν να εμφανιστούν στην οθόνη μαζί με τη σκίαση. Είναι επίσης δυνατή η εξαγωγή σε ημίωρα διαστήματα, των πληροφοριών για την οριζόντια, την χωρίς σκίαση ή με σκίαση ακτινοβολία, για περαιτέρω χρησιμοποίησή τους από άλλα προγράμματα. Το πρόγραμμα ήδη χρησιμοποιείται από Πανεπιστήμια, κολλέγια και εκπαιδευτικές μονάδες. Το SUNDI μπορεί να «κατέβει» δωρεάν από το διαδίκτυο.



Σχήμα 6.5.4.19: Οπτική απεικόνιση διαγράμματος της πορείας του ήλιου με στοιχεία σκίασης, για μία τοποθεσία στο Λονδίνο με SUNDI

SHELL SOLAR PATH

Το πρόγραμμα Shell Solar Path δημιουργήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Μπόχουμ στη Γερμανία και η τωρινή του έκδοση 2.0 πωλείται από την Shell Solar. Επιτρέπει την απεικόνιση διαγραμμάτων που δείχνουν την απόσταση του ήλιου από οποιαδήποτε τοποθεσία στο κόσμο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σκίαση. Μπορεί επίσης να προσδιορίσει τη διάρκεια της απ' ευθείας σκίασης κεκλιμένων περιοχών. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ότι μπορεί να απεικονίσει την ανατολή και τη δύση του ήλιου καθώς και τη διάρκεια της ημέρας. Οι χρονικές σειρές που δημιουργούνται από την απόσταση του ήλιου μπορούν να εξαχθούν ως αρχείο κειμένου με ελάχιστο χρονικό διάστημα το ένα λεπτό. Παρόλα αυτά και ενώ είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διάρκειας σκίασης, δεν υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των ενεργειών ακτινοβολίας και των απωλειών λόγω της σκίασης. Για το λόγο αυτό το Shell Solar Path δεν μπορεί να συγκριθεί με το πρόγραμμα SUNDI ως προς τη λειτουργικότητά του.

ΚΑΙΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Οι παρακάτω ιστοσελίδες του διαδικτύου προσφέρονται για έρευνα στα δεδομένα του καιρού.

URL (Ενιαίος Εντοπισμός Πόρων)	Περιοχή	Περιγραφή
http://www.satellite.com	Ευρώπη	Παγκόσμια ακτινοβολία δεδομένων που βασίζονται σε δορυφορικές εικόνες,
http://eosweb.larc.nasa.gov/sse	Σε όλο τον κόσμο	Παγκόσμια ακτινοβολία δεδομένων από τη βάση δεδομένων της NASA,
http://wrdc-mgo.nrel.gov/	Σε όλο τον κόσμο	Παγκόσμια ακτινοβολία δεδομένων από το NREL (US),

Πίνακας 6.1: Διευθύνσεις στο διαδίκτυο για έρευνα στα δεδομένα του καιρού

6.5.5 Προγράμματα σχεδιασμού και εξυπηρέτησης

Εκτός από τα προγράμματα προσομοίωσης τα οποία ανακατασκευάζουν και αναλύουν ολόκληρο το σύστημα, υπάρχουν και προγράμματα για τον σχεδιασμό και τη εξυπηρέτηση τα οποία προσφέρουν πληροφορίες στα ΦΒ συστήματα και υποστήριξη κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού.

Διάφοροι κατασκευαστές μετατροπών προσφέρουν στους χρήστες άλλα προγράμματα, δωρεάν από το διαδίκτυο. Ο σκοπός των κατασκευαστών αυτών είναι να παρέχουν σωστές πληροφορίες πέρα από αυτές που προσφέρονται στο εγχειρίδιο του προϊόντος για κάθε μεμονωμένη συσκευή, για την λειτουργική του συμπεριφορά και την οποιαδήποτε διάταξη καλωδίωσής του. Τα προγράμματα αυτά είναι κυρίως εφαρμογές σε πίνακες του Microsoft Excel και έχουν διάφορες λειτουργίες. Το πιο ίσως γνωστό πρόγραμμα το οποίο παρέχεται από το κατασκευαστή μετατροπών SMA προσφέρεται σαν πίνακας Excel GenAu (βλ. www.sma.de). Το GenAu έχει μία βάση δεδομένων με ΦΒ πλαίσια που διατίθενται στην αγορά και με μετατροπείς SMA. Το πρόγραμμα επιτρέπει τον συνδυασμό των πλαισίων με τους μετατροπείς με τη χρησιμοποίηση διαφόρων δυνατών πολυσυνδέσεων των γεννητριών. Στην περίπτωση αυτή ελέγχονται οι διάφοροι συνδυασμοί των διαφορετικών μετατροπών γεννητριών για να εξασφαλίσουν ότι συμμορφώνονται με τις πιο σημαντικές οριακές τιμές. Στο πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στα Γερμανικά, Αγγλικά, Ιταλικά και Ισπανικά.

Ο κατασκευαστής μετατροπέων Fronius (βλ. www.fronius.at) προσφέρει το πρόγραμμα Configurator για την επιλογή μεγέθους ΦΒ συστημάτων με τις δικές του συσκευές. Το πρόγραμμα λειτουργία όμοια με το GenAu αλλά είναι κατά κάποιο τρόπο πιο εξελιγμένο όσον αφορά τον χειρισμό, αφού έχει το χαρακτηριστικό της διαχείρισης του πελάτη και επιτρέπει την εκτύπωση των αποτελεσμάτων.

Προσφέρεται από το κατασκευαστή μετατροπέων Siemens ένα περιεκτικό πρόγραμμα εξυπηρέτησης. Ονομάζεται SITOP solar select (βλ. www.siemens.de/sitop/solar). Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από μία ολόκληρη σειρά λειτουργιών οι οποίες το καθιστούν αρκετά πιο εύκολο στην επιλογή της καλύτερης δυνατής διάταξης καλωδίωσης για ένα ΦΒ σύστημα που χρησιμοποιεί μετατροπείς Siemens. Το πρόγραμμα υπολογίζει όλες τις πιθανές ευαίσθητες πολυσυνδέσεις, τις αξιολογεί και στη συνέχεια επιτρέπει την λεπτομερή ανάλυση των επιλεγμένων συστημάτων. Όπως και στη περίπτωση των λογισμικών προσομοίωσης μέσω διαδικτύου, τα προγράμματα εξυπηρέτησης δεν αντικαθιστούν σε καμία περίπτωση την διαβούλευση από έναν επαγγελματία ειδικό στα ΦΒ. Ένα άλλο εργαλείο είναι το πρόγραμμα SolarSizer. Μία έκδοση demo είναι διαθέσιμη στο www.solenergy.org/html/about/SolarSizer.html. Πρόκειται για ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό και την επιλογή μεγέθους ΦΒ συστημάτων. Έχει μία γραφική διασυνδεδετική διάταξη για την επιλογή των συνιστώμενων μερών και παρέχει υπολογισμούς του αντίστοιχου κόστους και ενέργειας. Το πρόγραμμα αυτό σχεδιάστηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας και Βιώσιμης Τεχνολογίας με την βοήθεια της Διεθνούς Ηλιακής Ενέργειας. Άλλα διαθέσιμα προγράμματα είναι το Insolar (βλ. www.elektropraktiker.de/software) και το PV-Professional.

6.5.6 Διαδικτυακά προγράμματα προσομοίωσης

Το διαδίκτυο συνεχίζει να αναπτύσσεται ως μία πλατφόρμα προσομοίωσης. Υπάρχει ήδη μία ολόκληρη σειρά από προγράμματα που βασίζονται στο διαδίκτυο για online ΦΒ προσομοιώσεις. Οι δωρεάν αυτές υπηρεσίες είναι συχνά αρκετά περιορισμένες όσον αφορά αυτά που προσφέρουν. Τα προγράμματα συχνά χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή και βελτίωση των χαρακτήρων της υπηρεσίας κάποιας συγκεκριμένης ιστοσελίδας. Αυτά είναι συνήθως απλά, καλοσχεδιασμένα προγράμματα που προσφέρουν προσεγγιστικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά εν γένει τα διαδικτυακά λογισμικά προσομοίωσης είναι πολύ περιορισμένα ως προς τη λειτουργικότητα και την ακρίβειά του. Όμως, είναι χρήσιμα για την παροχή αρχικών πληροφοριών για πρότυπα ΦΒ συστήματα και μία χοντρική εκτίμηση της απόδοσης. Παρόλο που ανακουφίζουν τις εταιρείες από την πολύ δουλειά στην άντληση πληροφοριών, θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι στις αντίστοιχες ιστοσελίδες οι υπολογισμοί είναι περιορισμένοι και καθόλου ακριβείς. Επίσης δεν αντικαθιστούν σε καμία περίπτωση τη διασυμβούλευση επαγγελματία ειδικού στα ΦΒ.

Ένα περιεκτικό διαδικτυακό εργαλείο είναι το PVWATTS, το οποίο σχεδιάστηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας στις ΗΠΑ. Η ιστοσελίδα υπολογίζει την παραγόμενη σε ΦΒ συστήματα με πλέγμα, ηλεκτρική ενέργεια. Όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συστήματα μόνο στις ΗΠΑ. Οι μη-ειδικοί μπορούν γρήγορα να πάρουν εκτιμήσεις επίδοσης για ΦΒ συστήματα με πλέγμα.

7 Φωτοβολταϊκά πλαίσια σε στέγες κτιρίων



7.1 Κάλυψη αναγκών με φωτοβολταϊκά

Φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη, ηχητική κάλυψη οποιαδήποτε ουσιαστικά ενεργειακή ανάγκη μπορεί να καλυφθεί, με ένα κατάλληλα σχεδιασμένο φβ σύστημα.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να ξέρει κανείς για τα φβ είναι ότι παράγουν συνεχές ρεύμα. Αυτό σημαίνει είτε ότι τα χρησιμοποιούμε με συσκευές συνεχούς ρεύματος είτε μετατρέπουμε αυτό το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο 230V (σε ρεύμα ίδιο με της ΔΕΗ δηλαδή) με τη βοήθεια κάποιων ηλεκτρονικών συσκευών.

Για λόγους απόδοσης και οικονομίας πάντως, δεν συνιστάται η χρήση φβ συστημάτων για την τροφοδότηση θερμικών ηλεκτρικών συσκευών, όπως κουζίνες, θερμοσίφωνες, ηλεκτρικά καλοριφέρ ή θερμοσυσσωρευτές. Για τις χρήσεις αυτές υπάρχουν πολύ οικονομικότερες λύσεις που δεν στηρίζονται καθόλου στον ηλεκτρισμό, όπως οι ηλιακοί θερμοσίφωνες, ο ηλιακός κλιματισμός, οι κουζίνες ή τα συστήματα θέρμανσης φυσικού αερίου, υγραερίου κ.λπ.

Ας πάρουμε το παράδειγμα της θέρμανσης νερού: αν χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρικό θερμοσίφωνα που τροφοδοτείται από ένα φβ σύστημα, το ηλιακό φως μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και κατόπιν από το θερμοσίφωνα σε θερμότητα. Το συνολικό κόστος των δύο αυτών συστημάτων είναι πολύ μεγαλύτερο από έναν ηλιακό θερμοσίφωνα που μετατρέπει απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.

Από την άλλη μεριά, ο φωτισμός με λάμπες εξοικονόμησης και η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών (υπολογιστές, ηχητικά συστήματα, ψυγεία, τηλεοράσεις, τηλεπικοινωνίες κ.λπ.) αποτελούν ανάγκες που μπορούν να καλυφθούν εύκολα και οικονομικά με φβ.

7.2 Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών

Σήμερα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τρόποι εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων:

α) Αυτοδύναμα ή Αυτόνομα ΦΒ συστήματα (off-grid systems/inselanlagen)

Είναι ιδανικά για απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει τρόπος σύνδεσης με το δίκτυο και όπου είναι δύσκολη η μεταφορά καυσίμου σε περίπτωση χρήσης γεννήτριας ντίζελ. Το σύστημα απαιτεί και την ύπαρξη μονάδας αποθήκευσης (μπαταρίας) για την συνεχή λειτουργία του κατά τις νυκτερινές ώρες ή ώρες συννεφιάς.

Ένας ειδικός ρυθμιστής φόρτισης ρυθμίζει την ενέργεια των ΦΒ για να εξασφαλίσει την άριστη φόρτιση των μπαταριών. Σε απλές εγκαταστάσεις, η ενέργεια απορροφάται κατ' ευθείαν από τις μπαταρίες από DC καταναλωτές, ενώ σε εγκαταστάσεις με συνήθεις AC καταναλωτές, το ρεύμα της μπαταρίας μετατρέπεται από συνεχές σε εναλλασσόμενο με αντιστροφέα (inverter).

Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σήμερα:

Σε αναμεταδότες(ραδιοφώνου ή TV), σε συστήματα επιτήρησης, σε τηλεφωνικούς θαλάμους, σε κεραίες κινητής τηλεφωνίας, σε φάρους, σε διαφημιστικές πινακίδες, στάσεις συγκοινωνίας και σε φωτισμό δρόμων και εθνικών οδών. Επίσης σε βάρκες και τροχόσπιτα, σε αρδεύσεις, γεωτρήσεις και σε σιντριβάνια (και βεβαίως, για να μη ξεχνάμε και την ελληνική πραγματικότητα, σε ...αυθαίρετα!!!). Όλες αυτές οι εφαρμογές χρησιμοποιούν μπαταρίες για αποθήκευση, αλλά αν απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, μπορούν να συνδυαστούν με γεννήτριες βιομάζας, με ανεμογεννήτριες ή με γεννήτριες ντίζελ, ώστε να έχουμε ένα υβριδικό σύστημα τροφοδότησης ενέργειας.

β) Διασυνδεδεμένα με το δίκτυο ΦΒ συστήματα (grid-connected systems/netzgekoppelte anlage)

Θα αποτελέσουν πιστεύω, την κύρια περιοχή ενδιαφέροντος για τα επόμενα χρόνια, όταν επιτέλους αλλάξει η ελληνική νομοθεσία και δώσει κίνητρα, όπως σε όλες τις προηγμένες χώρες, και στις μικρές οικιακές ΦΒ εγκαταστάσεις(<5KW).

Αυτά τα συστήματα συνδέονται με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι κατά την διάρκεια της ημέρας ο ηλεκτρισμός που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα μπορεί ή να χρησιμοποιηθεί άμεσα(κάτι που είναι σύνηθες για συστήματα που εγκαθίστανται σε κτίρια γραφείων και άλλων εμπορικών χρήσεων) ή μπορεί να πωληθεί στην ΔΕΗ(κάτι που είναι σύνηθες για οικιακά συστήματα που ο ιδιοκτήτης μπορεί να λείπει κατά τη διάρκεια της ημέρας). Τη νύχτα, όταν το ΦΒ δεν μπορεί πια να παράγει ενέργεια, μπορεί να αγοραστεί πλέον ενέργεια από τη ΔΕΗ. Στην πράξη δηλαδή η ΔΕΗ λειτουργεί σαν μια αποθήκη ενέργειας, γι' αυτό αυτά τα συστήματα δεν χρειάζονται μπαταρίες για αποθήκευση. Μπορούμε όμως, αν θέλουμε, να τοποθετήσουμε μπαταρίες, οπότε πλέον το ΦΒ μας σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα Αδιάλειπτης Παροχής Ενέργειας(UPS), σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι στην αντιμετώπιση από την ηλεκτρική εταιρεία ενός διασυνδεδεμένου συστήματος ΦΒ. Για παράδειγμα, στην Γερμανία, όλη η ενέργεια που παράγεται πωλείται στην ηλεκτρική εταιρεία και ο καταναλωτής αγοράζει για τις ανάγκες του. Αντίθετα στην Αυστρία, η ενέργεια που παράγεται, πρώτα καλύπτει τις ανάγκες του παραγωγού και το περίσσειμα δίνεται(πωλείται) στο ηλεκτρικό δίκτυο.

7.3 Σύνδεση με τη ΔΕΗ

Μια φβ εγκατάσταση μπορεί να αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα (off-grid system) που να καλύπτει το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός σπιτιού ή μιας επαγγελματικής χρήσης. Για τη συνεχή εξυπηρέτηση του καταναλωτή, η εγκατάσταση θα πρέπει να περιλαμβάνει και μια μονάδα αποθήκευσης (μπαταρίες) και διαχείρισης της ενέργειας.

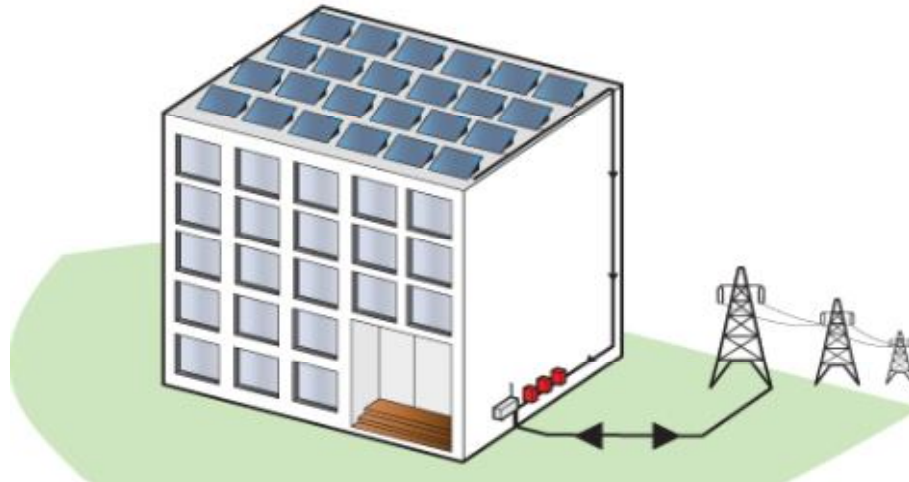
Εναλλακτικά, ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού με φβ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ –διασυνδεδεμένο (grid-connected system), δηλαδή φβ συστήματα τα οποία συνδέονται και λειτουργούν παράλληλα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Δεν διαθέτουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες), οπότε δεν έχουν και αναλώσιμα υλικά. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν, καταναλώνεται από τον ιδιοκτήτη και η πλεονάζουσα ή και όλη η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο. Χρησιμοποιούνται για εξοικονόμηση ενέργειας ή παραγωγή και πώληση της ενέργειας στο δίκτυο.



Σχήμα 7.3.1: Διασυνδεδεμένο σύστημα

Έτσι το σύστημα, καταναλώνει ρεύμα από το δίκτυο όταν το φβ σύστημα δεν επαρκεί (π.χ. όταν έχει συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας) και δίνει ενέργεια στο δίκτυο όταν η παραγωγή υπερκαλύπτει τις ανάγκες (π.χ. τις ηλιόλουστες ημέρες).

Κατά κανόνα τα φβ συστήματα που έχουν εγκατασταθεί στην Ελλάδα εξυπηρετούν απομονωμένες χρήσεις, σε σημεία όπου δεν υπάρχει δίκτυο της ΔΕΗ επειδή στις περιπτώσεις αυτές η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος είναι πολύ πιο εμφανής. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η εναλλακτική λύση μιας ηλεκτρογεννήτριας αποδεικνύεται μακροπρόθεσμα εξαιρετικά ακριβή.



Σχήμα 7.3.2: φωτοβολταϊκού συστήματος σε κοινόχρηστο ή κοινόκτητο χώρο κτιρίου (ταράτσα)

7.4 Η αυτονομία στα φωτοβολταϊκά.

Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τον ήλιο με φβ χρειάζεται το φως της ηλιακής ακτινοβολίας, όχι τη θερμότητά της. Ακόμη και μια συννεφιασμένη χειμωνιάτικη μέρα θα υπάρχει άφθονο διάχυτο φως και τα φβ θα συνεχίσουν να παράγουν ηλεκτρισμό, έστω και με μειωμένη απόδοση (π.χ. ακόμα και με απόλυτη συννεφιά, το φβ θα παράγει ένα 5-20% της μέγιστης ισχύος του). Ανάλογα με την ισχύ του συστήματός και τις ανάγκες, η μειωμένη αυτή παραγωγή μπορεί να μην επαρκεί. Στις περιπτώσεις αυτές, αν η εγκατάστασή είναι συνδεδεμένη με τη ΔΕΗ, θα καταναλωθεί ρεύμα από το δίκτυο.

Μια πλήρως αυτόνομη λύση με καλή σχέση κόστους-απόδοσης είναι π.χ. ένας συνδυασμός φβ στοιχείων και μιας μικρής ανεμογεννήτριας, δηλαδή ένα υβριδικό σύστημα. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από τον ήλιο και τον άνεμο αλληλοσυμπληρώνονται μέσα από το σύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης της ενέργειας.



Σχήμα 7.4.3: Αυτόνομο σύστημα

Η Ελλάδα είναι πάντως ιδιαίτερα ευνοημένη από τον ήλιο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αν σκεφτεί κανείς ότι πολλά από τα συστήματα για τα οποία μιλάμε έχουν αναπτυχθεί και αποδίδουν στη βόρεια Ευρώπη, γίνεται κατανοητό ότι οι συνθήκες ηλιοφάνειας στη χώρα μας προσφέρονται για τη συμφέρουσα παραγωγή ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, ένα φβ σύστημα στην Ελλάδα παράγει ετησίως περί τις 1.100-1.500 κιλοβατώρες ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (KWh/έτος/KW). Προφανώς στις νότιες και πιο ηλιόλουστες περιοχές της χώρας ένα φβ παράγει περισσότερο ηλιακό ηλεκτρισμό απ' ότι στις βόρειες. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως ένα φβ σύστημα στην Αθήνα αποδίδει 1.300-1.400 KWh/έτος/KW, στη Θεσσαλονίκη 1.150-1.250 KWh/έτος/KW και στην Κρήτη ή στη Ρόδο 1.350-1.500 KWh/έτος/KW.

7.5 Υβριδικά συστήματα

Συνδυάζουν ηλεκτρικό ρεύμα που προέρχεται από πετρελαιογεννήτριες, ανεμογεννήτριες, μικρές υδροηλεκτρικές γεννήτριες και φβ συστήματα, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που υπάρχουν, αξιοποιώντας τα γεωγραφικά πλεονεκτήματα της περιοχής. Είναι ιδανικά συστήματα για εφαρμογές σε απομακρυσμένες τοποθεσίες όπως τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί και αναμεταδότες, στρατιωτικές εγκαταστάσεις και παραμεθόρια χωριά. Απαραίτητη γνώση για την εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος είναι η ζήτηση σε ηλεκτρικό ρεύμα όπως και τα γεωγραφικά και τοπολογικά πλεονεκτήματα, οπότε πρέπει να καταμετρηθεί η ηλιακή ενέργεια, ο άνεμος και άλλες πιθανές πηγές σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή η καταμέτρηση θα αποτελέσει την βάση για τον σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτει σε όσον το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος τις ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα της εγκατάστασης ή της κοινότητας.

Τα υβριδικά συστήματα απευθύνονται σε μεγαλύτερες οικιακές ή επαγγελματικές εφαρμογές. Το Η/Ζ, συνήθως ενεργοποιείται αυτόματα σε έκτακτες περιπτώσεις για να υποβοηθήσει το φβ σύστημα. Αν το υβριδικό σύστημα είναι σε συνδυασμό με το κεντρικό δίκτυο, τότε το κεντρικό δίκτυο χρησιμοποιείται ως εφεδρική πηγή σε περίπτωση ανάγκης. Κυρίως χρησιμοποιούνται για την αδιάλειπτη λειτουργία στρατηγικής σημασίας ηλεκτρικών φορτίων ή ευαίσθητων φορτίων, σε περιοχές όπου το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει προβλήματα.

7.6 Ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος

Παρότι μπορεί κανείς να δώσει κάποια γενική κατεύθυνση όπως ότι *"ένα φωτοβολταϊκό σύστημα των 2-3 κιλοβάτ (KWp) μπορεί να καλύψει τις ανάγκες μιας τριμελούς οικογένειας"*, θα πρέπει να γίνει μια εμπειριστατωμένη μελέτη των αναγκών του σπιτιού. Ο χώρος, οι ηλεκτρικές συσκευές, το πόσοι και για πόσο χρόνο χρησιμοποιούνται, είναι παράγοντες καθοριστικοί για το μέγεθος των ενεργειακών αναγκών. Ενδεχομένως να χρειάζεται μόνο μισό κιλοβάτ για να καλυφθεί μέρος των αναγκών (π.χ. φωτισμό, ψυγείο, τηλεόραση). Παρακάτω κάνουμε μια εκλαϊκευμένη παρουσίαση των στοιχείων που χαρακτηρίζουν τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ.

Το άθροισμα της ισχύος όλων των ηλεκτρικών συσκευών του σπιτιού αποτελεί τη λεγόμενη *"εγκατεστημένη ισχύ"*. Αυτή είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί ποτέ να καταναλωθεί. Στην πραγματικότητα όμως, οι ενεργειακές ανάγκες είναι αρκετά μικρότερες. Είναι απίθανο να λειτουργούν όλες οι ηλεκτρικές συσκευές ταυτόχρονα, ενώ οι χρήσεις πολλών από αυτές είναι συχνά ασύμβατες μεταξύ τους, π.χ. το στερεοφωνικό συγκρότημα και η τηλεόραση.

Η ισχύς που καταναλώνεται όταν είναι αναμμένο το μέγιστο (πρακτικά) αριθμό συσκευών ονομάζεται "ισχύς αιχμής" και το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να την καλύψει όταν και για όσο χρειαστεί. Θα πρέπει επίσης να μπορεί να παρέχει συνέχεια τη "μέση ισχύ" που καταναλώνεται.

Ο χρόνος για τον οποίο παραμένουν αναμμένες οι συσκευές παίζει καθοριστικό ρόλο. Ένα ψυγείο, για παράδειγμα, καταναλώνει μεγάλη ισχύ όταν λειτουργεί ο κινητήρας του και πολύ μικρότερη όταν βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής. Με τη σειρά του, ο χρόνος που χρειάζεται να λειτουργήσει ο κινητήρας εξαρτάται από τη θέση του θερμοστάτη, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ακόμη και τη συχνότητα με την οποία ανοίγει η πόρτα του ψυγείου.

Έτσι, το ίδιο σπίτι θα έχει πολύ διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες αν χρησιμοποιείται ως κύρια κατοικία ή ως εξοχικό, ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρίσκεται, τον αριθμό των ατόμων και τις ώρες που μένουν εκεί, ακόμα και τις συνήθειές τους. Η εταιρία που θα εγκαταστήσει το φβ σύστημα θα πρέπει να υπολογίσει τη βέλτιστη ισχύ ώστε να καλυφθούν με ασφάλεια οι ανάγκες.

Στην περίπτωση εγκατάστασης συστήματος που συνδέεται με το δίκτυο της ΔΕΗ, τα πράγματα είναι πιο απλά. Το δίκτυο θα μπορεί πάντα να καλύψει τη ζήτηση αιχμής μιας κατοικίας. Το σύστημά τότε θα πρέπει να σχεδιαστεί με βάση τη μέση κατανάλωση ισχύος, η οποία προκύπτει άμεσα από τους λογαριασμούς της ΔΕΗ.

Τα οφέλη από τη χρήση ηλιακής ενέργειας θα είναι πολύ πιο εμφανή αν εφαρμοστεί παράλληλα μεθόδους εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας. Η εξοικονόμηση είναι η φθηνότερη και καθαρότερη μορφή ενέργειας.

Η οικονομικότερη προσέγγιση επομένως για να αξιοποιηθεί η ηλιακή ενέργεια, είναι να μειωθούν οι ενεργειακές ανάγκες και κατόπιν να καλυφθούν οι ανάγκες αυτές με την παραγωγή ηλεκτρισμού από τον ήλιο ή άλλες καθαρές πηγές ενέργειας.

7.7 Καταλληλότητα κτιρίου.

Τα περισσότερα κτίρια είναι κατάλληλα. Αρκεί να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

1. Να υπάρχει επαρκής ελεύθερος και ασκίαστος χώρος. Ως ένα πρόχειρο κανόνα χρειάζεται περίπου 0,8 τετραγωνικά μέτρα για κάθε 100 Watt (αν χρησιμοποιούνται τα συνηθισμένα κρυσταλλικά φβ του εμπορίου). Αν πάλι τοποθετηθούν άμορφα φβ, το συνολικό κόστος θα είναι περίπου το ίδιο ή και μικρότερο, θα απαιτηθεί όμως 2-2,5 φορές μεγαλύτερη επιφάνεια. Ο χώρος πρέπει να είναι κατά το δυνατόν 100% ασκίαστος καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Διαφορετικά, το σύστημά σας θα λειτουργεί με μικρότερη απόδοση.
2. Τα φβ έχουν τη μέγιστη απόδοση όταν έχουν νότιο προσανατολισμό. Αποκλίσεις από το Νότο έως και 45° είναι επιτρεπτές, μειώνουν όμως την απόδοση.
3. Η σωστή κλίση του φβ σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Σχεδόν πάντα επιλέγεται μια κλίση που να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι η βέλτιστη κλίση είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου. Επειδή βέβαια κάθε κανόνας έχει τις εξαιρέσεις του, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Τη βέλτιστη κλίση θα την αποφασίσει ο τεχνικός που θα κάνει την εγκατάσταση.

4. Ύπαρξη κατάλληλου χώρου για τα ηλεκτρονικά συστήματα και τις μπαταρίες (αν αυτόνομο σύστημα).
5. Υπ' όψιν ότι μαζί με τις βάσεις, ένα πλήρες φβ σύστημα ζυγίζει περίπου 15-20 κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο. Αυτό σχεδόν πάντα δεν συνιστά πρόβλημα.

7.8 Δυνατότητες εφαρμογής φβ σε κτίρια

Τα ΦΒ μπορούν να τοποθετηθούν σε οικόπεδα, στέγες(επίπεδες ή κεκλιμένες)ή και σε προσόψεις κτιρίων. Παρέχονται σε διάφορα μεγέθη και μπορούν π.χ. να υποκαταστήσουν τμήμα μιας κεραμοσκεπής (μειώνοντας αντίστοιχα και το κόστος) ή τα υαλοστάσια σε μια πρόσοψη ή να χρησιμοποιηθούν σαν φωταγωγοί (skylights). Ήδη παράγονται και ΦΒ κεραμίδια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των κανονικών κεραμιδιών. Τα ΦΒ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως σκίαστρα πάνω από παράθυρα(βοηθώντας έτσι και στη μείωση των εξόδων κλιματισμού).Επίσης σε πέργκολες και στέγαστρα χώρων στάθμευσης.

Παρέχονται σε διάφορα χρώματα(κατόπιν παραγγελίας)και σε διάφορα πάχη διαφάνειας για ειδικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Διατίθενται επίσης σήμερα διαφανή ΦΒ, για προσόψεις εμπορικών κτιρίων, με θερμομονωτικές ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές των υαλοστασίων χαμηλής εκπεμφιμότητας(low-e) που επιτυγχάνουν πέραν της ηλεκτροπαραγωγής και εξοικονόμηση ενέργειας 15-30% σε σχέση με κτίριο με συμβατικά υαλοστάσια.

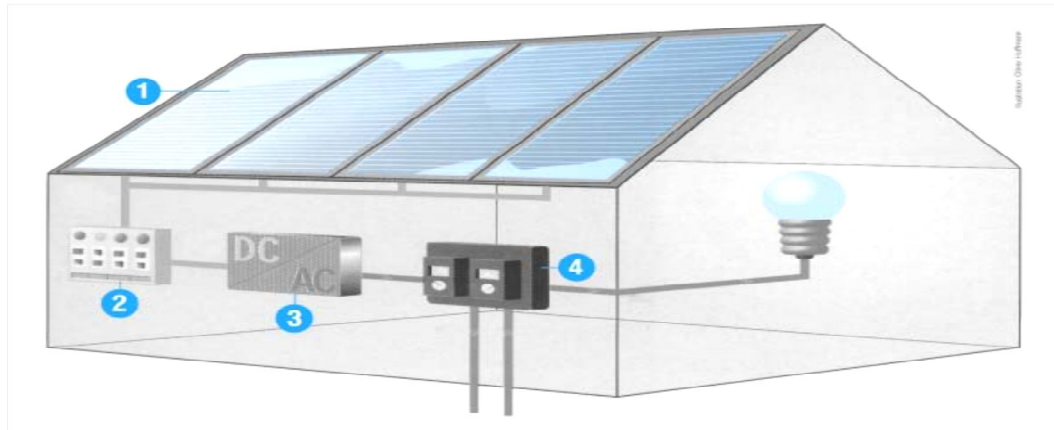
Για την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων σε ένα κτίριο, υπάρχουν 4 βασικοί τρόποι:

- α) Τοποθέτηση σε κεκλιμένα στηρίγματα,
- β) Τοποθέτηση σε ειδική βάση προσαρμοζόμενη στο εξωτερικό του κελύφους,
- γ) Απ' ευθείας τοποθέτηση και
- δ) Ενσωμάτωση των ΦΒ στο κέλυφος του κτιρίου.

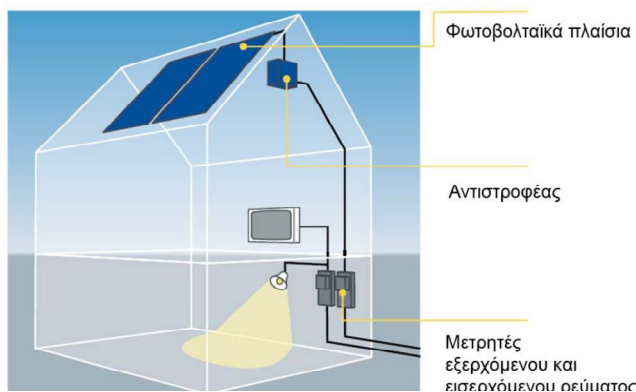
Τα ΦΒ μπορεί να είναι με ή χωρίς πλαίσιο(συνήθως από αλουμίνιο).Τα πρώτα χρησιμοποιούνται σε κεκλιμένες στέγες(ενσωματωμένα ή πρόσθετα) ή σε επίπεδες οροφές, ενώ τα δεύτερα σε προσόψεις(σαν κοινός υαλοπίνακας) ή τοιχώματα.

7.9 Φωτοβολταϊκά σε πρόσοψη κτιρίου

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα φβ πλαίσια (φβ γεννήτρια που ακουμπά σε κάποια μεταλλική βάση στήριξης), και τον αντιστροφέα (inverter) που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγουν τα φβ σε εναλλασσόμενο της ίδιας ποιότητας με το ρεύμα της ΔΕΗ. Το ρεύμα αυτό περνά από ένα μετρητή και διοχετεύεται στο δίκτυο.



Σχήμα 7.9.4: 1 – Φωτοβολταϊκά πλαίσια, 2 – Πίνακας ελέγχου, 3 – Αντιστροφέας (inverter), 4 – Μετρητής ΔΕΗ



Σχήμα 7.9.5: Κύκλωμα εγκατάστασης φβ στη στέγη κτιρίου



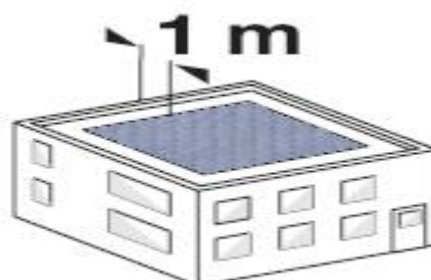
Σχήμα 7.9.6: Κύκλωμα με μετρητή για την ΔΕΗ

Σε περίπτωση τοποθέτησης των φβ σε υπάρχουσες στέγες, θα πρέπει αυτή να γίνεται εντός του όγκου της στέγης ακολουθώντας την κλίση τους και να απέχει μισό μέτρο από τη περιγράμμά της.



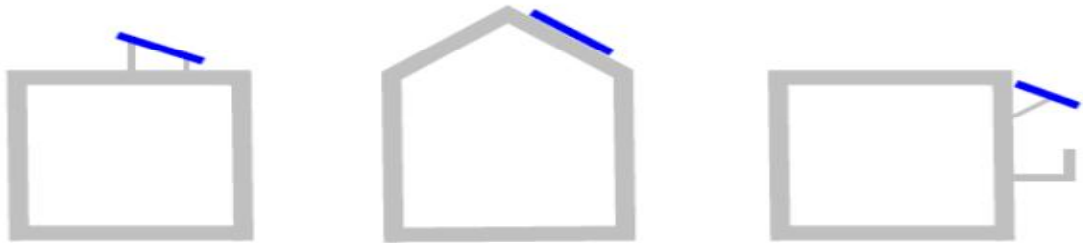
Σχήμα 7.9.7: Απαραίτητη απόσταση ενσωματωμένων φβ σε στέγη από το περιγράμμά της

Αν τα φβ τοποθετούνται σε δώμα, θα πρέπει η απόσταση από το στηθαίο του δώματος να είναι ένα (1) μέτρο εσωτερικά αυτού για λόγους ασφαλείας



Σχήμα 7.9.8: Απόσταση φβ από το στηθαίο του δώματος

Η πράσινη στέγη δροσίζει το φβ και αυξάνει την απόδοσή του, το δε φβ εμποδίζει τη γρήγορη εξάτμιση και απαιτείται λιγότερο νερό για την πράσινη στέγη. Επιπλέον, μετρήσεις έδειξαν ότι αυξάνει και η βιοποικιλότητα της πράσινης στέγης στα σημεία που σκιάζεται από τα φβ.



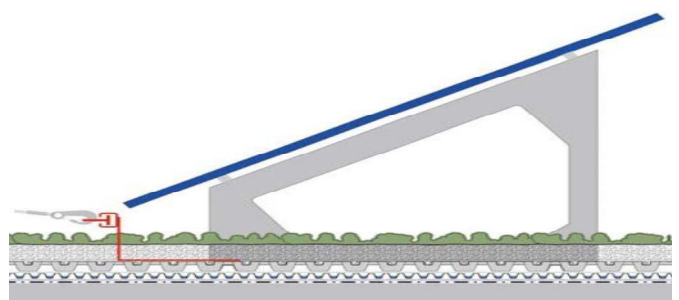
Σχήμα 7.9.9: Τυπολογίες που επιλέγονται για το νέο πρόγραμμα στις στέγες



Εικόνες 7.9.10: Φωτοβολταϊκά σε στέγες κτηρίων



Εικόνες 7.9.11: Φβ σε προσόψεις κτιρίων



Εικόνες 7.9.12: Συνδυασμός φωτοβολταϊκών με πράσινη στέγη

7.10 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών

Όταν τα φβ εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ένα 5-17% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το πόσο ακριβώς είναι αυτό το ποσοστό εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε. Υπάρχουν όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2 τα λεγόμενα μονοκρυσταλλικά φβ, τα πολυκρυσταλλικά φβ, και τα άμορφα. Τα τελευταία έχουν χαμηλότερη απόδοση είναι όμως σημαντικά φθηνότερα. Η επιλογή του είδους των φβ είναι συνάρτηση των αναγκών, του διαθέσιμου χώρου ή ακόμα και της διαθέσιμης οικονομικής ευχέρειας. Όλα τα φβ πάντως μοιράζονται τα παρακάτω μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα:

Μειονεκτήματα

- υψηλό κόστος αγοράς
- μεγάλες επιφάνειες εγκατάστασης
- μικρό βαθμό απόδοσης
- αδυναμία διάθεσης σε 24 βάση
- αναγκαστική μετατροπή συνεχής σε εναλλασσόμενη τάση

Το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και η έλλειψη επιδοτήσεων στον οικιακό καταναλωτή (κάτι που ισχύει σήμερα στην Ελλάδα, όχι όμως και σε άλλες χώρες).

Τα φβ, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη.

Παρόλα αυτά, ήδη το κλίμα φαίνεται να αλλάζει. Πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φβ, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της αγοράς και εγκατάστασης φβ, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

Ένα άλλο μειονέκτημα των φβ είναι ότι απαιτούν σχετικά μεγάλες επιφάνειες εγκατάστασης και έχουν ακόμη και σήμερα σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης. Επίσης, η αναγκαστική αποθήκευση της ενέργειας που παράγουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, για να είναι διαθέσιμη το βράδυ, δημιουργεί πολλά τεχνικά και οικονομικά προβλήματα. Δηλαδή υπάρχει αδυναμία στη συνεχή επί εικοσιτετραώρου βάσεως παραγωγή ενέργειας. Και κάτι τελευταίο το ρεύμα που παράγεται είναι σταθερής τάσης ενώ οι συσκευές που χρησιμοποιούμε εργάζονται με εναλλασσόμενη.

Πλεονεκτήματα

- μηδενική ρύπανση
- αθόρυβη λειτουργία
- αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (που φθάνει τα 30 χρόνια)
- απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές
- δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες
- ελάχιστη συντήρηση

Τα φβ συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οφέλη για τον καταναλωτή, για τις αγορές ενέργειας και για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Μιας νέας εποχής που θα χαρακτηρίζεται ολοένα και περισσότερο από τις μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς.

Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (όπως π.χ. τα φβ, τα μικρά συστήματα συμπαραγωγής, οι μικροτουρμπίνες και οι κυψέλες καυσίμου) αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στα χρόνια που έρχονται. Ένα επιπλέον κοινό αυτών των νέων τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον.

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία.

Τα φβ είναι λειτουργικά καθώς προσφέρουν επεκτασιμότητα της ισχύος τους και δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (στο δίκτυο ή σε συσσωρευτές) αναιρώντας έτσι το μειονέκτημα της ασυνεχούς παραγωγής ενέργειας. Δίνοντας τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή, και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια, τον καθιστούν πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια και συμβάλλουν έτσι στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας.

Για τις επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρισμού, υπάρχουν ευδιάκριτα τεχνικά και εμπορικά πλεονεκτήματα από την εγκατάσταση μικρών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο περισσότερα συστήματα παραγωγής ενέργειας εγκατασταθούν και συνδεθούν με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, τόσο περισσότερα είναι τα οφέλη για τις επιχειρήσεις, όπως π.χ. η βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος, η σταθερότητα της ηλεκτρικής τάσης και η μείωση των επενδύσεων για νέες γραμμές μεταφοράς.

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.

Οι διάφοροι μικροί παραγωγοί πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ιδανική λύση για τη μελλοντική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις όπου αμφισβητείται η ασφάλεια της παροχής. Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν δοκιμάζεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο (απώλειες, οι οποίες στην Ελλάδα ανέρχονται σε 12% κατά μέσο όρο). Από την άλλη, η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες), βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου και στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Τα φβ, εκτός από καθαρή ενέργεια, παρέχουν ακόμη προσέλευση πελατών και αξιοπιστία σε ένα απελευθερωμένο περιβάλλον. Σε ένα υψηλά ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρισμού χρειάζονται κίνητρα για να προσελκύσουν και να διατηρήσουν τους πελάτες τους. Τα προγράμματα καθαρής ενέργειας μπορούν να είναι ελκυστικά σε αρκετά μεγάλο αριθμό καταναλωτών που ενδιαφέρονται γενικά για το περιβάλλον και ειδικότερα για τις κλιματικές αλλαγές. Σήμερα οι καταναλωτές στις απελευθερωμένες ενεργειακές αγορές δεν αγοράζουν απλά τη φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς υπάρχει πλέον θέμα τόσο ποιότητας όσο και υπηρεσιών.

Όσον αφορά στην ποιότητα του ηλεκτρισμού, τα θέματα είναι ξεκάθαρα: η ενέργεια που χρησιμοποιείται προέρχεται από θερμοηλεκτρικό σταθμό που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα και καταστρέφει το περιβάλλον, ενώ μπορεί να προέλθει από μια μονάδα που δεν ρυπαίνει το περιβάλλον;

Αυτά αποτελούν θέματα που απασχολούν οπωσδήποτε τις έξυπνες επιχειρήσεις παραγωγής ενέργειας. Η επιχείρηση που αποδέχεται τα φβ συστήματα θα προσελκύσει πελάτες-παραγωγούς που θα χρησιμοποιούν φβ και θα πωλούν στη συνέχεια σε αυτή καθαρή ενέργεια. Σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς, τέτοιοι πελάτες-παραγωγοί μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε.

Τα φβ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά παρέχοντας τη δυνατότητα για καινοτόμους αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς, καθώς διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών, σχημάτων και μπορούν να παρέχουν ευελιξία και πλαστικότητα στη φόρμα, ενώ δίνουν και δυνατότητα διαφορικής διαπερατότητας του φωτός ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού. Αντικαθιστώντας άλλα δομικά υλικά συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού κόστους μιας κατασκευής (ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των ηλιακών προσόψεων σε εμπορικά κτίρια).

Και άλλα Πλεονεκτήματα

- Παράγουν «δωρεάν» ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο.
- Μηδενική ρύπανση (Όχι μόνο δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με αέρια ή άλλα κατάλοιπα, αλλά αποτρέπουν κατά μέσο όρο την έκλυση 1,5 tn CO₂ κατ' έτος, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν περίπου δύο στρέμματα δάσους.)
- Ελάχιστη συντήρηση γιατί δεν έχουν κινούμενα μέρη και λειτουργούν αθόρυβα.
- Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (που φθάνει τα 30 χρόνια)
- Δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες σε φορτίο και δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας(σε δίκτυο ή συσσωρευτές).
- Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα, χωρίς την παρουσία χειριστή.
- Μπορούν να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν σε απομονωμένες περιοχές.
- Μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Λειτουργούν χωρίς προβλήματα κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες.
- Δεν ελέγχονται από κανένα(ή καμία εταιρεία) και αποτελεί ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο που δίνει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία.
- Βοηθούν στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση ενέργειας, κάνοντας τον καταναλωτή που διαθέτει φβ πιο προσεκτικό και ενήμερο στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια, αλλά και στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια.
- Βοηθούν στην αποκέντρωση της ενέργειας σε μικρές τοπικές μονάδες που δεν έχουν τις μεγάλες ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο(~12% στην Ελλάδα). Η εφαρμογή τους σε νησιά με αδύναμα δίκτυα είναι ιδιαίτερα σημαντική.

- Βοηθούν στην αποφυγή black out, εφ' όσον η μέγιστη παραγωγή γίνεται καλοκαίρι και μεσημέρι, ώρες δηλαδή που έχουμε τις ημερήσιες αιχμές ζώνης, βοηθώντας στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου(μέχρι και 20%) και τη μείωση του συνολικού κόστους ηλεκτροπαραγωγής από την ΔΕΗ, δεδομένου ότι η κάλυψη των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.
- Δίνουν κύρος στον χρήστη τους και βελτιώνουν το «πρόσωπο» των επιχειρήσεων που τα χρησιμοποιούν. Στις πιο ανεπτυγμένες αγορές η εγκατάσταση ΦΒ αποτελεί πλέον τον κανόνα σε κάθε νέα κτιριακή εφαρμογή.
- Δημιουργούν σήμερα περισσότερες θέσεις εργασίας ανά MW ή /και ανά επενδυμένο € από οποιαδήποτε άλλη ενεργειακή τεχνολογία. Η εγχώρια παραγωγή ΦΒ συνεπάγεται εκατοντάδες θέσεις εργασίας.
- Συμβάλουν στην Περιφερειακή Ανάπτυξη και την τοπική απασχόληση, λόγω του αποκεντρωμένου χαρακτήρα της.
- Αποτελούν μέσο εισόδου ξένων επενδύσεων στην Ελλάδα.

8 Βιβλιογραφία:

- Ελληνική

- [1]. **Ιωάννης Ε. Φραγκιαδάκης** – “*Φωτοβολταϊκά Συστήματα*” (2^η Έκδοση)
Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2007, ISBN 960 - 456 - 007 - 7
- [2]. **Σταμάτης Δ. Πέρδιος** – “*Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις*”
Εκδόσεις Τεκδοτική, Αθήνα 2007, ISBN 978 - 960 - 8257 - 53 - 5
- [3]. **Αναστάσιος Δ. Τζιόλας** – “*Ηλεκτρονική*” (Albert P. Malvino)[6^η έκδοση]
Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη 2003, ISBN 960 – 8129 - 07- 9
- [4]. **Χρήστος Χάλαρης και Πολυτίμη Κολοβού** – “*Εργαστηριακό μικροδίκτυο με φωτοβολταϊκή γεννήτρια και συσσωρευτές*”
- [5]. **Καγκαράκη Κ.** – “*Φωτοβολταϊκή τεχνολογία*”
- [6]. **Καπλάνης Σ.** – “*Μηχανική των Φωτοβολταϊκών συστημάτων*”,
Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 2004
- [7]. **Καγκαράκης Κ.** – “*Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, Ημιαγωγοί 2*”,
Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1987

- Ξενόγλωσση

- [1]. **Mapset Ltd, Gateshead, UK** – “*Planning and installing Photovoltaic Systems*”,
[2nd edition], Printed and bound in Croatia by Zrinski, Cover design by
Yvonne Booth, USA 2008, ISBN 978 -1- 84407- 442- 6
- [2]. **N Martin and J M Ruiz** – “*Optical losses analysis of PV modules in real operating conditions*”, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria,
6–10 July 1998, pp. 2380–2383
- [3]. **A Parretta, H Yakubu, F Ferrazza** – “*Method for measurement of the hemispherical/hemispherical reflectance of photovoltaic devices*”,
Optical Communications 194 (2001), pp. 17–32
- [4]. **Zweibel, K, von Roedern, B and Ullal, H, 2004** – “*Finally: Thin-film PV*”,
Photon International, 8 (10)

- [5]. **A Parretta, A Sarno, P Tortora, H Yakubu, P Maddalena, J Zhao, A Wang** – *“Angledependent reflectance measurements on photovoltaic materials and solar cells”* Optical Communications 172 (1999), pp. 139–151
- [6]. **A Parretta, A Samo, H Yakubu.** – *“A novel apparatus for the optical characterization of solar cells and PV modules”* ,
2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 6–10 July 1998, pp. 2306–2311.
- [7]. **Alsema, E A, 2000** – *“Energy payback time and CO₂ - emissions of PV systems”* ,
Progress in Photovoltaics: Research and Applications 8, S. 17-25
- [8]. **Basore, P A, 2004** – *“Simplified processing and improved efficiency of crystalline silicon on glass modules”* , in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June, Paris, France
- [9]. **Baumgartner, F, NTB, 2004** – *“MPP voltage monitoring to optimize grid connected system design rules, Beitrag zur 19”* , European Photovoltaic Solar Energy Conference, June, Paris
- [10]. **Green, M A, 2004** – *“Third generation photovoltaics: Theoretical and experimental progress”* , in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June, Paris, France
- [11]. **Hoffmann, W et al, 2004** – *“Towards an effective European industrial policy for PV solar electricity”* , in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June, Paris, France
- [12]. **Knapp, K E and Jester, T L, 2000** – *“An empirical perspective on the energy payback time for photovoltaic modules”* ,
Solar 2000 Conference, Madison, WI
- [13]. **Pehnt, M, Bubenzer, A and Rauber, A, 2003** – *“Life cycle assessment of photovoltaic systems - Trying to fight deep-seated prejudices”* ,
Photovoltaics Guidebook for Decision Markers. Status and Potential Role in Energy Technological Economy; Achim Bubenzer, Joachim Luther (eds) Springer-Verlag, pp179-213
- [14]. **Scharmer, K and Greif, J (eds), 2000** – *“The European Solar Radiation Atlas”* ,
Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris

Για την συγγραφή της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και πολλές πληροφορίες από το διαδίκτυο. Συνοψίζονται ορισμένοι δικτυακοί τόποι απ' τους οποίους αντλήθηκαν πληροφορίες καθώς και άλλοι σχετικοί με το θέμα της εργασίας.

- 1. <http://www.dei.gr>**
- 2. <http://www.sma.de>**
- 3. <http://www.rae.gr>**
- 4. <http://www.desmie.gr>**
- 5. <http://www.ypan.gr>**
- 6. <http://www.bpsolar.com>**
- 7. <http://www.helapco.gr>**
- 8. <http://www.greenpeace.com>**

