

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ**

Επιβλέπων : **ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ**

Σπουδαστές: **1) ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ** **ΑΜ:** **32182**
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

2) ΤΣΙΟΓΚΑΣ **ΑΜ:** **28310**
ΘΕΩΔΩΡΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ

ΟΚΤΩΜΒΡΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή	4
1.1.1 Συμβατικές Πηγές Ενέργειας	5
1.1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	6
1.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα	6
1.3 Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	8
1.3.1 Αιολική Ενέργεια	8
1.3.2 Βιομάζα	9
1.3.3 Γεωθερμική Ενέργεια	9
1.3.4 Υδραυλική Ενέργεια	10
1.3.5 Ηλιακή Ενέργεια	11
1.4 Προοπτικές	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

2.1. Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	15
2.2. Μαθηματικές Εξισώσεις Περιγραφής Φαινομένου	17
2.3. Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία	18
2.4. Δημιουργία του Φωτορεύματος	19
2.5. Ημιαγώγιμα Υλικά	21
2.6. Δημιουργία Ζευγών Ηλεκτρονίων-Οπών	22
2.7. Η Ένωση pn	25
2.7.1. Τάση Ανοιχτοκύκλωσης και Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	25
2.7.2. Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V και P-V	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Αντιστροφείς

3.1. Αντιστροφείς (inverters)	29
3.2. Λειτουργία αντιστροφέων	32
3.2.1. Αντιστροφείς Πολλαπλών Επιπέδων	40
3.3. Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)	42
3.3.1. Διαμόρφωση PWM μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας	42
3.3.2. Διαμόρφωση PWM μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου	45
3.3.3. Διαμόρφωση PWM μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου	46
3.3.4. Διαμόρφωση PWM σε τριφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Συσσωρευτές

4.1. Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές (μπαταρίες)	51
4.2. Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας συσσωρευτών	51

4.3 Τύποι συσσωρευτών.	53
4.4. Χαρακτηριστικά μεγέθη, όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών.	54
4.5. Υπολογισμός αερισμού	60
4.6. Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε φωτοβολταϊκό σύστημα.	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Ρυθμιστές Φόρτισης

5.1. Ρυθμιστής φόρτισης	63
5.2. Τι είναι και πως λειτουργούν οι ρυθμιστές φόρτισης των μπαταριών	63
5.3. Επιλογή του σωστού ρυθμιστή φόρτισης	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

6.1. Κάλυψη αναγκών με φωτοβολταϊκά	65
6.2. Διασυνδεδεμένα συστήματα	65
6.3. Η αυτονομία στα φωτοβολταϊκά.	67
6.4. Ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος .	68
6.5. Καταλληλότητα κτιρίου	69
6.6. Υβριδικά συστήματα	70

Μελέτη εγκατάστασης

1 Μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης	71
2 Η χρονική περίοδος	73
3 Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια	73
3.1 Η κλίση των συλλεκτών	73
3.2 Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής	76
3.3 Το πλήθος και είδος των φωτοβολταϊκών πλαισίων	79
4 Οι συσσωρευτές	81
5 Επιλογή ρυθμιστή φόρτισης	82
6 Επιλογή Inverter	84
7 Τρόπος σύνδεσης των πλαισίων	86
8 Εναλλακτικές προτάσεις	93

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	22
--------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Πριν από μερικές δεκαετίες, κανείς δεν μπορούσε να αντιληφθεί το μέγεθος των περιβαλλοντικών προβλημάτων, των κλιματικών μεταβολών και των διαταραχών στις ισορροπίες των οικοσυστημάτων του πλανήτη, που προκλήθηκαν από την υπερεκμετάλλευση και εξάντληση των φυσικών πόρων χωρίς κανένα μέτρο, για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενα ενεργειακών αναγκών μας. Με το πέρασμα των χρόνων και τη συνεχόμενη αύξηση της παραγωγής και των απαιτήσεων διαβίωσης του πληθυσμού των ανεπτυγμένων κρατών, ο ρυθμός επιβάρυνσης από την ανθρώπινη δραστηριότητα ξεπέρασε κατά πολύ τις φυσικές δυνατότητες του πλανήτη μας για την εξουδετέρωση της οποιασδήποτε περιβαλλοντικής όχλησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσεων που δεν επιτρέπουν την επάνοδο των οικοσυστημάτων του πλανήτη στην φυσική τους ισορροπία.

Τα τελευταία χρόνια, η ενεργειακή τροφοδότηση του πληθυσμού τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο είναι ένα θέμα που απασχολεί ολοένα και περισσότερο την επιστημονική κοινότητα. Κι αυτό γιατί, το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας. Υπολογίζεται, πως κάθε πολίτης των αναπτυγμένων κρατών καταναλώνει ημερησίως τόση ενέργεια όση παράγουν οι μύες 100 μεγαλόσωμων ανδρών ή 12 αλόγων. Η ενέργεια είναι σε τέτοιο βαθμό συνυφασμένη με την καθημερινή μας ζωή, που μόνο η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της.

Ο άνθρωπος πάντοτε χρησιμοποιούσε τους φυσικούς πόρους για την παραγωγή ενέργειας. Ξεκινώντας από τους νερόμυλους και τους ανεμόμυλους και φτάνοντας στα ορυκτά καύσιμα, η κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών ήταν άρρηκτα συνδεδεμένη με τη φύση. Η εκτενής και αλόγιστη, όμως, χρήση των ορυκτών καυσίμων που παρατηρήθηκε τους τελευταίους δύο τουλάχιστον αιώνες, είχε σημαντικές επιπτώσεις στη φυσική ισορροπία. Ο άνθρωπος υπερεκμεταλλεύτηκε φυσικούς πόρους, όπως το πετρέλαιο και το κάρβουνο, με αποτέλεσμα να γίνει εμφανής η ανάγκη για παραγωγή ενέργειας με άλλες μεθόδους, μη συμβατικές.

Έτσι, λοιπόν, άρχισαν να αναπτύσσονται και να εξελίσσονται άλλες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας. Το σύνολο των πηγών ενέργειας που έχει σήμερα στη διάθεσή του το ανθρώπινο είδος χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις πηγές εκείνες που βασίζονται στα υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο φλοιό της γης, το πετρέλαιο, οι γαιάνθρακες, το φυσικό αέριο και που δυστυχώς έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής. Οι πηγές αυτές ονομάζονται παραδοσιακές ή συμβατικές πηγές ενέργειας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις πηγές εκείνες που αναπληρώνονται μέσω των φυσικών κύκλων και που θεωρείται ότι είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Οι πηγές αυτές δε μολύνουν το περιβάλλον και καλούνται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

1.1.2 Συμβατικές Πηγές Ενέργειας



Εικόνα 1.1. Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση λιγνίτη στην Πτολεμαΐδα.

Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν πηγές ενέργειας που είναι γνωστές σε όλους μας, καθώς χρησιμοποιούνται σε καθημερινή σχεδόν βάση. Οι κυριότεροι εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι τα ορυκτά καύσιμα, που περιλαμβάνουν το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το κάρβουνο. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως καύσιμα για θέρμανση ή παραγωγή ενέργειας (π.χ. Ηλεκτρισμού). Ειδικά το πετρέλαιο χρησιμοποιείται και για την παραγωγή χημικών ή άλλων προϊόντων. Προέρχονται από υδρογονάνθρακες, δηλαδή οργανικές χημικές ουσίες, οι οποίες προκύπτουν από την αποσύνθεση φυτών και ζώων μέσα στο έδαφος. Συνήθως το φυσικό αέριο συναντάται μαζί με το πετρέλαιο, μέσα σε πόρους του υπεδάφους ψηλότερα από τις κοιλότητες όπου βρίσκεται παγιδευμένο το

πετρέλαιο. Ο τελευταίος μεγάλος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι η πυρηνική ενέργεια, που είναι η πλέον χαρακτηριστική μη ήπια μορφή ενέργειας.

1.1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ευρύτερη έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναφέρεται σε κάθε πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και, όπως προείπαμε, ανανεώνεται μέσω φυσικών φαινομένων μόνιμου κύκλου. Πρόκειται για καθαρές μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Για την εκμετάλλευσή τους, δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Αυτό σημαίνει πως πρόκειται για ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που βασίζονται σε διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι άνεμοι, οι υδατοπτώσεις κ.ά. Οι ΑΠΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση), είτε μετατρέπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ΑΠΕ είναι πολλαπλάσιο της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή, όμως, μέχρι πρόσφατα, τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής, καθώς και οι πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που συνδέονται με τη διατήρηση του παρόντος επιπέδου ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα, εμπόδισαν την εκτενέστερη εκμετάλλευση αυτού του δυναμικού.

Στο κεφάλαιο αυτό, αφού αναλύσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει η χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, θα αναφερθούμε πιο συγκεκριμένα στο ποιες είναι αυτές, δίνοντας περισσότερη έμφαση στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν οι προοπτικές που διαφαίνεται να έχει αυτός ο επιστημονικός κλάδος στο μέλλον.

1.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μεγάλη μερίδα της επιστημονικής κοινότητας απασχολείται στο ευρύτερο πεδίο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για μια διευρυμένη συμμετοχή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μιας χώρας. Επιπρόσθετα, οι επιβλαβείς επιπτώσεις που έχει η χρήση συμβατικών

μορφών ενέργειας στο περιβάλλον είναι άλλος ένας λόγος που συντέλεσε στην ανάπτυξη της έρευνας στο πεδίο αυτό και κατ' επέκταση στη βελτιστοποίηση των μεθόδων με τις οποίες μπορούμε να αξιοποιήσουμε τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας παράλληλα τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας ορθολογικότερη χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης διατίθενται σε μικρά μεγέθη, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας με επαναλαμβανόμενα συστήματα σε πολλές περιπτώσεις. Επιπλέον, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησής τους είναι κατά πολύ μειωμένο.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν πολλές νέες θέσεις εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη χρήση ενέργειας που έχει παραχθεί με μη συμβατικές μεθόδους. Ωστόσο, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας δεν είναι ευρέως διαδεδομένες, παρά τις επιτεύξεις και τις ανακαλύψεις επιστημόνων στον τομέα αυτό. Η επιστήμη έχει κάνει πολύ σημαντικά άλματα στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, αλλά υπάρχουν ακόμη κάποια χαρακτηριστικά τους που δυσχεραίνουν την

ευρεία ανάπτυξη και αξιοποίησή τους. Τα κυριότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένου ισχύος είναι ακόμα υψηλό.
- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλες ισχύεις απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας και που εξαρτώνται από την εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος αλλά και από το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μέθοδοι αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.

1.3 Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

1.3.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας, που δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργεί δηλαδή τους ανέμους.



Εικόνα 1.2. Αιολικό πάρκο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις που εκθέτουν ένα δρομέα (πτερωτή τύπου έλικας, με ένα ή περισσότερα πτερύγια) στο ρεύμα του ανέμου, λαμβάνοντας έτσι μέρος της κινητικής ενέργειάς του, με αποτέλεσμα την περιστροφική κίνηση του δρομέα. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται αεροκινητήρες ή ανεμογεννήτριες

Η σημαντικότερη οικονομικά εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας. Στην περίπτωση αυτή, ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μια συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής του στο ηλεκτρικό σύστημα. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται, μηχανικής ενέργειας για χρήση σε αντλιοστάσια καθώς και θερμότητας. Όμως, η ισχύς που παράγεται σε εφαρμογές αυτού του είδους είναι περιορισμένη, το ίδιο και η οικονομική τους σημασία.

1.3.2 Βιομάζα

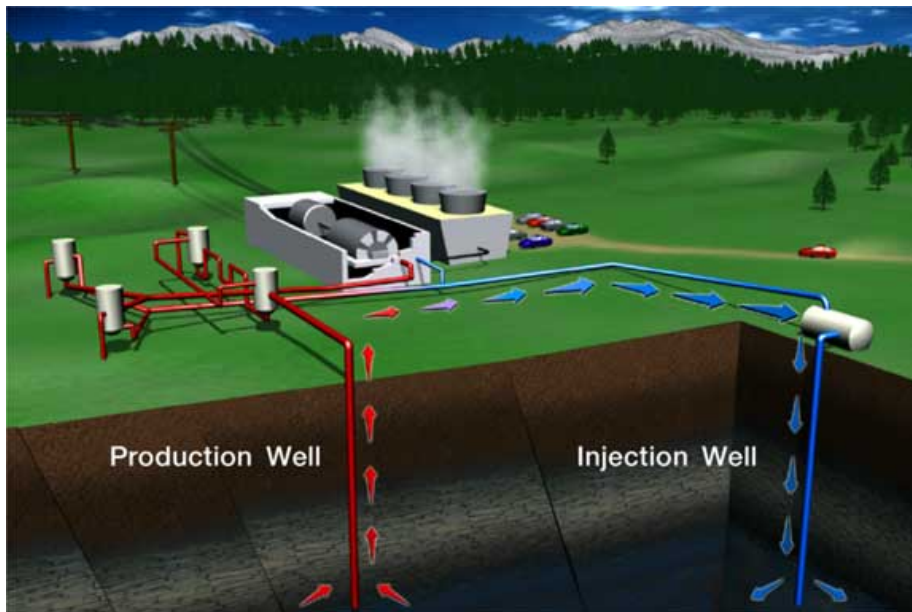
Γενικά, ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Πρακτικά, στον όρο βιομάζα εμπεριέχεται οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από το φυτικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, η οργανική αυτή ύλη περιλαμβάνει το ξύλο, τα υπολείμματα από αγροτικές και δασικές δραστηριότητες, τα υπολείμματα από τις αγροτικές βιομηχανίες, τα προϊόντα ενεργειακών καλλιεργειών, καθώς επίσης κάθε άλλο υλικό που διαθέτει οργανικό φορτίο, όπως είναι τα υπολείμματα κτηνοτροφικών ομάδων και ιλύς από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού.

Η βιομάζα συνήθως αξιοποιείται ενεργειακά για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Ανάλογα με την εκάστοτε διαθέσιμη πρώτη ύλη επιλέγεται και η κατάλληλη διεργασία που θα επιφέρει τη βέλτιστη ενεργειακή της αξιοποίηση.

1.3.3 Γεωθερμική Ενέργεια

Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται με την ηφαιστειότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Για την εκμετάλλευσή της, χρησιμοποιείται ένα μέσο μεταφοράς το οποίο υπάρχει στο υπέδαφος με μορφή ατμού ή ζεστού νερού. Μέσω ενός κυκλώματος, το μέσον

αυτό προωθείται στην επιφάνεια της γης, ψύχεται και επιστρέφει πάλι στο υπέδαφος.

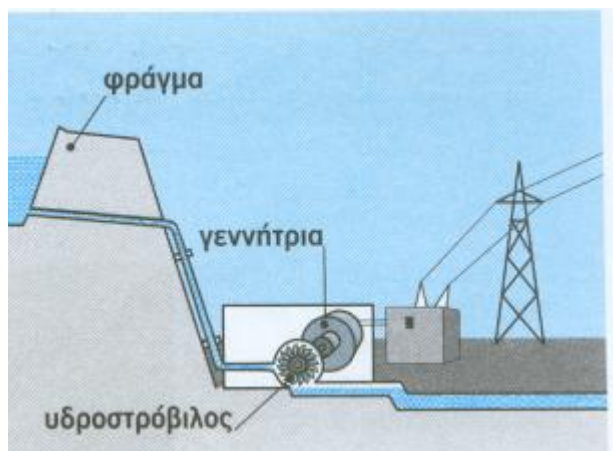


Εικόνα 1.3. Χρήση γεωθερμικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών βιομηχανικής μονάδας.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή, που μπορεί με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες να καλύψει ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης, στην περίπτωση που η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι χαμηλότερη των 150 βαθμών κελσίου. Επιπλέον, και όταν η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά υψηλότερη, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ιδιαίτερα υψηλή απόδοση.

1.3.4 Υδραυλική Ενέργεια

Υδραυλική ονομάζεται η ενέργεια που προέρχεται από υδατοπτώσεις ή τη ροή ποταμών. Είναι μια παραδοσιακή πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια από τον άνθρωπο. Η κινητική και δυναμική ενέργεια της ροής του νερού μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του υδροστρόβιλου και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, ένα πλήρες υδροηλεκτρικό σύστημα συμπεριλαμβάνει την πηγή ύδατος, τη σωλήνωση όδευσης του ύδατος από την πηγή στον υδροστρόβιλο, το σύστημα ελέγχου/ρύθμισης της ροής, τον υδροστρόβιλο, τη γεννήτρια ρεύματος, το ρυθμιστή της γεννήτριας και τέλος τις καλωδιώσεις για τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1.4. Σχηματική αναπαράσταση υδροηλεκτρικού εργοστασίου.

Μια εναλλακτική πηγή ενέργειας η οποία βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της έρευνας είναι η ενέργεια που μας δίνουν τα κύματα ή η παλίρροια. Τα κύματα μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας μαζί τους και η μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνότατα, είναι η δόμηση μικρών λεκανών που συλλέγουν το νερό στη διάρκεια υψηλών παλίρροιακών κυμάτων. Όταν τα νερά των κυμάτων υποχωρούν, το νερό απελευθερώνεται μέσα από ανοίγματα που περιέχουν τουρμπίνες και που δίνουν ώθηση στις ηλεκτρικές γεννήτριες.

1.3.5 Ηλιακή Ενέργεια

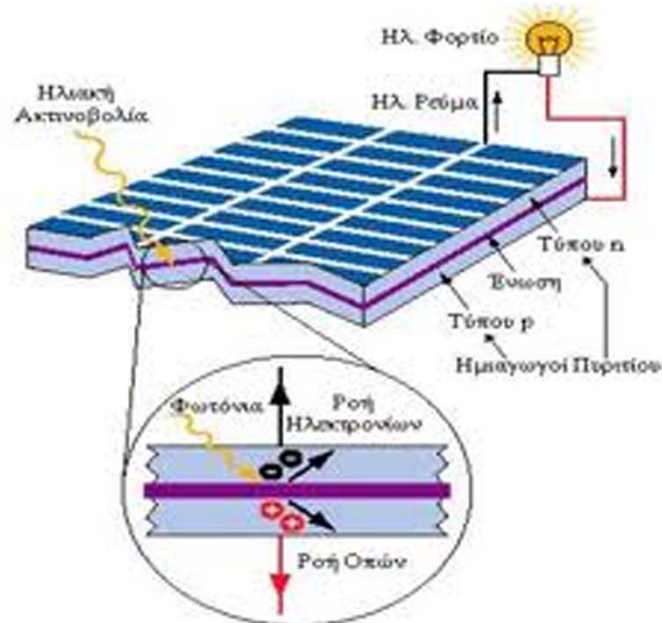
Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που μπορούν να δεσμεύσουν την ηλιακή ακτινοβολία και να τη μετατρέψουν σε κατάλληλη ενέργεια, ώστε με τη σειρά της να αξιοποιηθεί είτε σε επίπεδο ηλεκτροπαραγωγής είτε στον οικιακό τομέα για παραγωγή ηλεκτρισμού ή απλά για θέρμανση νερού και άλλες οικιακές χρήσεις. Ανάλογα με τη μετατροπή της για τελική χρήση της, τα συστήματα αξιοποίησής της διακρίνονται σε:

(α) **Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα**, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και ενσωματώνονται κατά κύριο λόγο στις κατασκευές κτιρίων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε οικιακές χρήσεις όσο και σε βιομηχανικές χρήσεις για την εξυπηρέτηση των θερμικών φορτίων του χειμώνα.

(β) **Παθητικά Ηλιακά και Υβριδικά Συστήματα** που αφορούν αρχιτεκτονικές λύσεις και στα οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλα δομικά υλικά για τη μεγιστοποίηση της απευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, κλιματισμό ή φωτισμό στα κτίρια.

(γ) **Φωτοβολταϊκά Συστήματα** που χρησιμοποιούνται για την άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε επίπεδο ηλεκτροπαραγωγής.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση στην παραγωγή, χρήση και αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ιδιαίτερα στη χώρα μας αλλά και στον ευρύτερο ευρωπαϊκό χώρο. Είναι διατάξεις ημιαγωγών ή οργανικών υλικών, που όπως προαναφέρθηκε μετατρέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (όπως το φως του ήλιου) σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς τάσης (DC). Διακρίνονται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία ημιαγωγών (ανόργανων, όπως πυριτίου), που έχουν υψηλή απόδοση και κυριαρχούν στην αγορά, και στα οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, που βρίσκονται ακόμη σε στάδιο έρευνας, με χαμηλή απόδοση.



Εικόνα 1.5. Η λειτουργία του φωτοβολταϊκού κυττάρου.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, που με τη σειρά του στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών. Πιο συγκεκριμένα, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ φωτοβολταϊκών στοιχείων (κυττάρων) που είναι φτιαγμένα από ημιαγωγικά υλικά. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο ημιαγωγών είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο ημιαγωγών σε επαφή, που όταν φωτίζεται παράγει στα δύο άκρα του, συνεχή ηλεκτρική τάση. Τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο βασικό υλικό, συνήθως Πυρίτιο (Si). Το ένα στρώμα είναι ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p (έχει δηλαδή ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους ανά άτομο). Η συνολική διάταξη λέγεται επαφή τύπου p-n. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα

ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. Όταν το στοιχείο αυτό φωτίζεται, ένα ποσοστό φωτονίων που απορροφούνται, κυρίως στην περιοχή της επαφής, παράγουν επιπλέον ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές. Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο της επαφής ωθεί τους φορείς αυτούς στους χώρους που επικρατούν οι όμοιοί τους φορείς, δηλαδή τα ηλεκτρόνια στη μεριά του ημιαγωγού τύπου n και τις οπές στη μεριά του ημιαγωγού τύπου p . Το συνολικό ρεύμα των φορέων αυτών αποτελεί το φωτόρευμα και είναι αυτό που εκμεταλλευόμαστε από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Όταν οι εξωτερικές επαφές του φωτοβολταϊκού στοιχείου συνδεθούν σε αντίσταση κατανάλωσης, διέρχεται μέσα απ' αυτήν μέρος του φωτορεύματος. Το ρεύμα μέσα από την εξωτερική αντίσταση και η τάση στα άκρα της έχουν τιμές που επιτρέπουν να θεωρήσουμε το φωτοβολταϊκό στοιχείο ως πηγή ενέργειας.



Εικόνα 1.5. Φωτοβολταϊκό πάρκο στη Νεβάδα των ΗΠΑ.

1.4 Προοπτικές

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, αυτό που μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα είναι ότι η ανάπτυξη και αξιοποίηση μεθόδων εκμετάλλευσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας βρίσκει ήδη πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή. Αντίθετα με ό,τι συνέβαινε παλαιότερα, που οι σημαντικότερες ανάγκες και χρήσεις ενέργειας

από τον άνθρωπο αφορούσαν τη θερμική ενέργεια, στη σύγχρονη εποχή, οι ενεργειακές εφαρμογές έχουν αυξηθεί δραματικά και, παράλληλα, έχουν αποκτήσει μεγάλη ποικιλία, με αποτέλεσμα η ποιότητα ζωής των ανθρώπων να εξαρτάται πλέον από το επίπεδο εξασφάλισης των ενεργειακών τους αναγκών και, κυρίως, από αυτό της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μεγάλα προβλήματα, όμως, που έχουν δημιουργηθεί στο περιβάλλον, με κυριότερα από αυτά το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τη μείωση του όζοντος στην ατμόσφαιρα, έχουν πλέον γίνει πολύ γνωστά και κατανοητά σε όλους.

Καθώς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες συμβατικών καυσίμων, όπως είναι το πετρέλαιο και ο λιγνίτης, αυτή ευθύνεται κατά μεγάλο μέρος για τα προαναφερθέντα περιβαλλοντικά προβλήματα. Εάν, μάλιστα, ληφθεί υπόψη ότι τα διαθέσιμα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων έχουν μειωθεί αισθητά τα τελευταία χρόνια, και το ότι σύμφωνα με τις πιο ευοίωνες προβλέψεις των ειδικών αυτά θα είναι διαθέσιμα για μόνο μερικές δεκαετίες ακόμη, προκύπτει ότι το ενεργειακό πρόβλημα ως το ζοφερότερο σύγχρονο πρόβλημα του πλανήτη, το οποίο μάλιστα χρήζει άμεσης επίλυσης.

Προς την κατεύθυνση αυτή, είναι κοινά αποδεκτό ότι οι προοπτικές που ανοίγονται από την ανάπτυξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα και είναι ύψιστης σημασίας, τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον. Ήδη έχουν υπογραφεί διεθνείς συμβάσεις και συμφωνίες για διακρατικές συνεργασίες

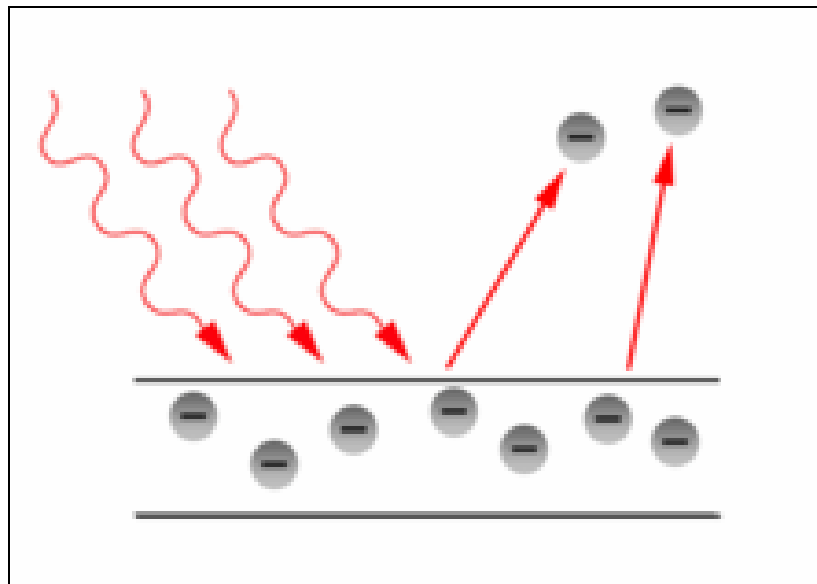
Αναμφίβολα, η τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί τις τελευταίες δεκαετίες, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο είναι εντυπωσιακή και αποτελεί ένδειξη του τι πρόκειται να επακολουθήσει στο άμεσο και απώτερο μέλλον στον ευρύ τομέα της Ενέργειας. Αν και δεν αναμένεται άμεσα να σταματήσει η παραγωγή ενέργειας με συμβατικές μεθόδους, ωστόσο είναι εμφανής η προσπάθεια που καταβάλλεται από την επιστημονική κοινότητα να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και να καταστούν κυρίαρχες στην κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

2.8. Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Τα φωτόνια της ηλιακής δέσμης διαθέτουν χαρακτηριστική ποσότητα ενέργειας η οποία είναι ανάλογη του μήκους κύματος του φωτός. Στη διαδικασία της φωτοεκπομπής, εάν ένα ηλεκτρόνιο απορροφήσει την ενέργεια ενός φωτονίου και αποκτήσει περισσότερη ενέργεια από την απαιτούμενη που χρειάζεται για να απομακρυνθεί από τη στιβάδα του, τότε αυτό εκτινάσσεται από το υλικό. Εάν η ενέργεια των φωτονίων είναι πάρα πολύ χαμηλή, το ηλεκτρόνιο είναι ανίκανο να δραπέτεύσει από την επιφάνεια του υλικού. Η αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας δεν αλλάζει την ενέργεια των αρχικών φωτονίων, παρά μόνο τον αριθμό τους, και έτσι η ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός.

Τα ηλεκτρόνια μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια από τα φωτόνια όταν ακτινοβολούνται, αλλά ακολουθούν την αρχή «όλα ή τίποτα». Όλη η ενέργεια ενός φωτονίου πρέπει να απορροφηθεί και να χρησιμοποιηθεί για να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο από την ατομική σύνδεση, αλλιώς η ενέργεια επανεκπέμπεται. Εάν όλη η ενέργεια του φωτονίου απορροφηθεί, μέρος της ενέργειας αυτής χρησιμοποιείται για να το ελευθερώσει από το άτομο, και το υπόλοιπο συμβάλλει στην κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου ως ελεύθερο μόριο.

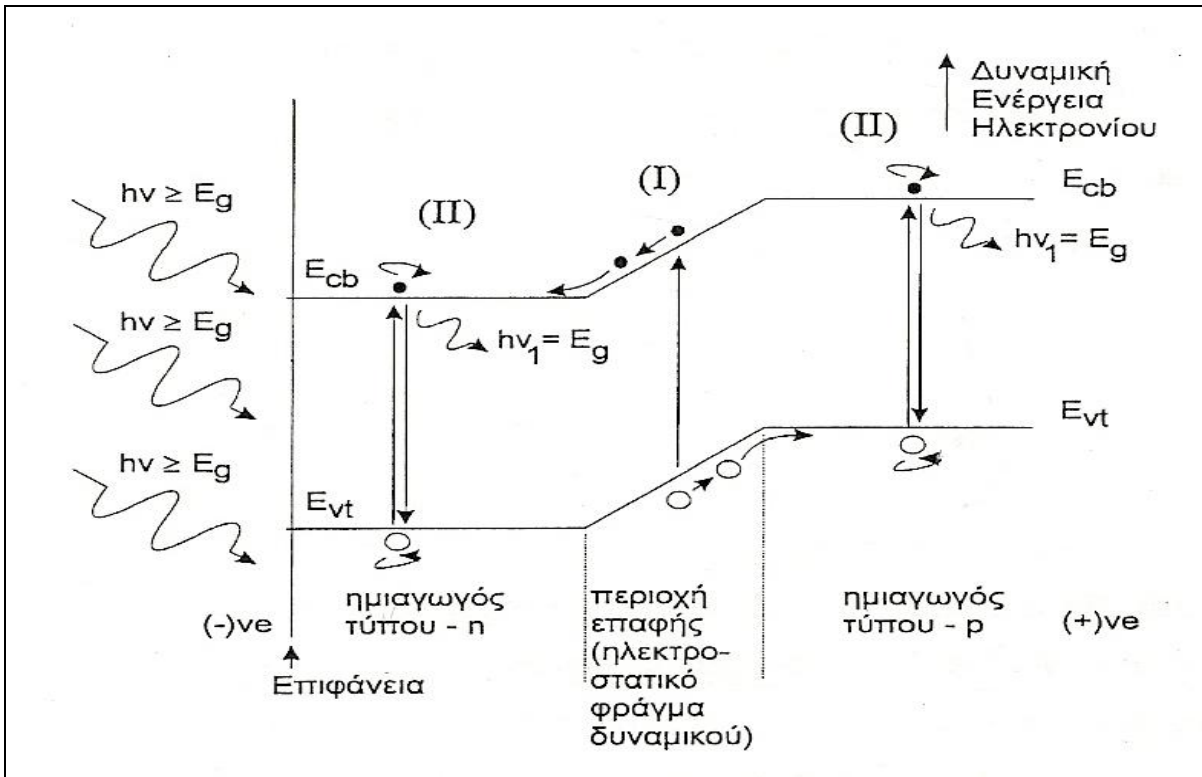


Σχήμα 2.1 Φωτοηλεκτρική επίδραση, όπου η εισερχόμενη ΗΜ ακτινοβολία διεγείρει τα ηλεκτρόνια απομακρύνοντάς τα από το υλικό.

Κατά την έκθεση μιας μεταλλικής επιφάνειας σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας υψηλότερης από τη συχνότητα κατώτατων ορίων ή το μήκος κύματος κατώτατων ορίων (τα οποία είναι συγκεκριμένα ανάλογα με τον τύπο επιφάνειας του υλικού), τα φωτόνια απορροφώνται και παράγεται ρεύμα. Κανένα ηλεκτρόνιο δεν εκπέμπεται ως ακτινοβολία με συχνότητα κάτω από αυτή του κατωφλιού, αφού τα ηλεκτρόνια είναι ανίκανα να κερδίσουν την απαιτούμενη ενέργεια για να υπερνικήσουν το ηλεκτροστατικό εμπόδιο που παρουσιάζεται στην άκρη της κρυστάλλινης επιφάνειας. Με βάση τη διατήρηση της ενέργειας, η ενέργεια του φωτονίου απορροφάται από το ηλεκτρόνιο και εάν αυτή είναι επαρκής, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να απομακρυνθεί από το υλικό με μια πεπερασμένη κινητική ενέργεια. Ένα φωτόνιο μπορεί να εκπέμψει ένα μόνο ηλεκτρόνιο, δεδομένου ότι η ενέργεια ενός φωτονίου μπορεί μόνο να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται καλούνται συχνά φωτοηλεκτρόνια.

Αναλυτικότερα, τα ηλιακά στοιχεία βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, το οποίο εκτίνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανεμημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ελεύθερων φορέων: δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και μια οπή στη ζώνη σθένους. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού φράγματος πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου και την συγκέντρωσή τους πάνω στις δυο όψεις του ηλιακού στοιχείου, δηλαδή τη φωτιζόμενη και την πίσω όψη τους. Συγκεκριμένα επειδή μερικά από τα ζεύγη των φορέων αυτών δημιουργούνται μέσα ή και δίπλα από την περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού διαχωρίζονται προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σα σφαίρες μάζας m που κυλούν πάνω σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, ενώ οι οπές συμπεριφέρονται σα φυσαλίδες που αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό. Στο μοντέλο αυτό, το ηλεκτρόνιο (σφαίρα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική του ενέργεια κινούμενο προς τα κάτω, ενώ η οπή (φυσαλίδα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική της ενέργειας κινούμενη προς τα άνω σε ένα διάφραγμα δυναμικής ενέργειας. Για παράδειγμα σε μια δίοδο $p-n$ τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p , με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται φορτία στις δυο αντικρινές επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δυο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, για όσο διάστημα υπάρχει η οπτική διέγερση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής

διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους π.χ. από διόδους Schottky που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.



Σχήμα 2.2. Ηλιακό στοιχείο που αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Διάγραμμα της δυναμική ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια.

Όπως παρατηρείται στο Σχ. 2.2, στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια τιμής $E = h\nu \geq E_g$. Όπου $E_g = E_{cb} - E_{vt}$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, E_{cb} ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και E_{vt} η κορυφή της ζώνης σθένους. Στην περιοχή (I) το δημιουργούμενο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής διαχωρίζεται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Στο σχήμα τα ηλεκτρόνια κυλούν πάνω στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και μεταφέρονται στην περιοχή τύπου-n. Κατ' αναλογία, οι οπές ολισθαίνουν μόλις κάτω από την περιοχή της ζώνης σθένους και μεταφέρονται προς την περιοχή τύπου-p για να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Στις περιοχές (II) δεν διαχωρίζονται χωρικά οι παραγόμενοι φορείς οπότε, αφού ζήσουν το χρόνο ζωής τους, επανασυνδέονται και χάνονται εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενέργειας:

$$E = h \cdot \nu = E_g \quad (1)$$

2.9. Μαθηματικές Εξισώσεις Περιγραφής Φαινομένου

Στην ανάλυση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες ισοδύναμες εξισώσεις:

$$hf = \phi + E_{k_{max}} \quad (2)$$

Όπου f: η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτονίου

$\phi = hf_0$ η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για να απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από το υλικό.

$$E_{k_{max}} = \frac{1}{2}mv_m^2 \quad : \text{ η μέγιστη κινητική ενέργεια ενός εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου}$$

f_0 : η συχνότητα κατωφλιού για να συμβεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

m : η μάζα του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου

v_m : η ταχύτητα του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου

Εάν η ενέργεια του φωτονίου (hf) δεν είναι μεγαλύτερη από τη ενέργεια κατωφλιού (ϕ), κανένα ηλεκτρόνιο δεν θα εκπεμφθεί. Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας του Einstein η σχέση μεταξύ της ενέργειας (E) και της ορμής (p) ενός μορίου είναι:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} \quad (3)$$

2.10. Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται πάνω στην επιφάνειά τους και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα για τα φωτόνια εκείνα με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενό του. Έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο εκείνο το μέρος της ενέργειας που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από το δεσμό και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα.

Η ενέργεια ενός φωτονίου E συνδέεται με την συχνότητα της ακτινοβολίας ν και με το μήκος κύματος λ με τις σχέσεις:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

Όπου: h: η σταθερά του Planck ($h=6,3 \times 10^{-34}$ Js)

c: η ταχύτητα του φωτός ($c=3 \times 10^8$ m/s)

Αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες eV και το μήκος κύματος σε μm τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό ενεργειακού διακένου E_g , θα είναι:

$$\lambda_g = \frac{1,238}{E_g} \quad (5)$$

Αν στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού διεισδύσει ακτινοβολία μονοχρωματικής δέσμης με φωτόνια ενέργειας $h\nu$ και έντασης H , τότε η ροή των φωτονίων Φ θα είναι:

$$\phi = \frac{H}{h\nu} = \frac{H\lambda}{hc} \quad (6)$$

Παρατηρούμε ότι για σταθερή ένταση H , η ροή Φ είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ενέργεια των φωτονίων.

Η ευκολία με την οποία απορροφούνται τα φωτόνια, δίνεται από το ρυθμό της μεταβολής της Φ με την αύξηση της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία. Ο ρυθμός αυτός έχει αρνητική τιμή, αφού η Φ μειώνεται με την αύξηση της απόστασης x που διανύει η ακτινοβολία και είναι ανάλογος με τη συγκεκριμένη τιμή της Φ στο βάθος x , δηλαδή την $\Phi(x)$. Θα ισχύει συνεπώς η σχέση:

$$-\frac{d\Phi}{dx} = a\Phi(x) \quad (7)$$

Όπου a ο συντελεστής απορρόφησης της υπόψη ακτινοβολίας, σε αντίστροφες μονάδες μήκους.

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης για $x=0$ και Φ_0 την αρχική τιμή της ροής των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού είναι:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp[-ax] \quad (8)$$

και ονομάζεται νόμος του Μπερ. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός απορρόφησης των φορέων είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού και εξασθενεί εκθετικά με την απόσταση από αυτή.

2.11. Δημιουργία του Φωτορεύματος

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{ph} , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Αν υποθέσουμε ότι έχουν εξασφαλιστεί οι βασικές

προϋποθέσεις για ένα καλό φ/β στοιχείο, τότε για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_{\phi} = e \cdot g \cdot (L_n + L_p) \quad (9)$$

Όπου: e: το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

g: ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας

L_n : το μέσο μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων

L_p : το μέσο μήκος διάχυσης των οπών

Ως φασματική απόκριση S, ορίζεται το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φ/β στοιχείου, σε σχέση με τη ροή Φ και αποτελεί χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορεύματος. Για ακτινοβολία μήκους κύματος λ, η φασματική απόκριση S(λ) θα είναι:

$$S(\lambda) = \frac{I_{\phi}(\lambda)}{e\Phi(\lambda)} \quad (10)$$

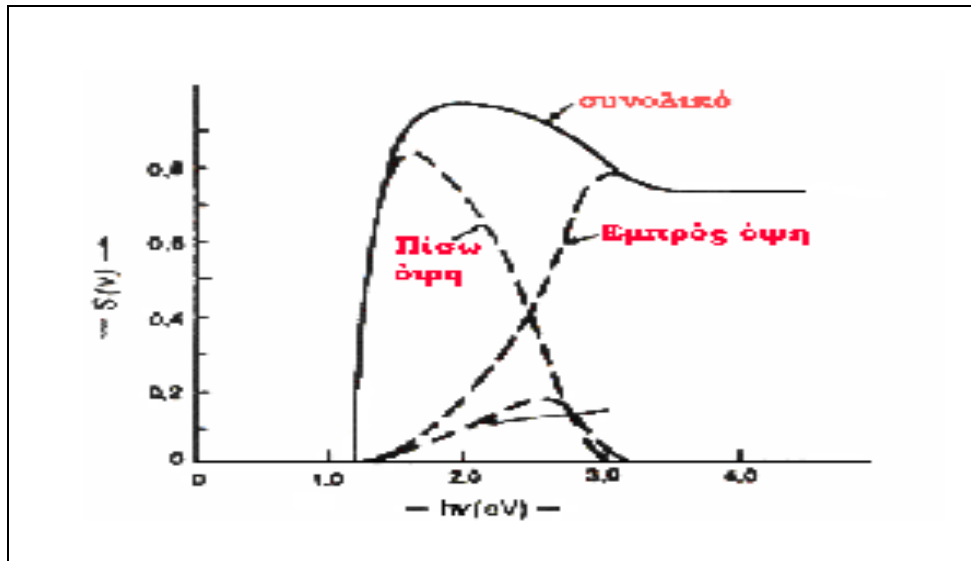
όπου Φ(λ): το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι λ+dλ.

Συνεπώς το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι :

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης και συνεπώς του φωτορεύματος ενός φ/β στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.

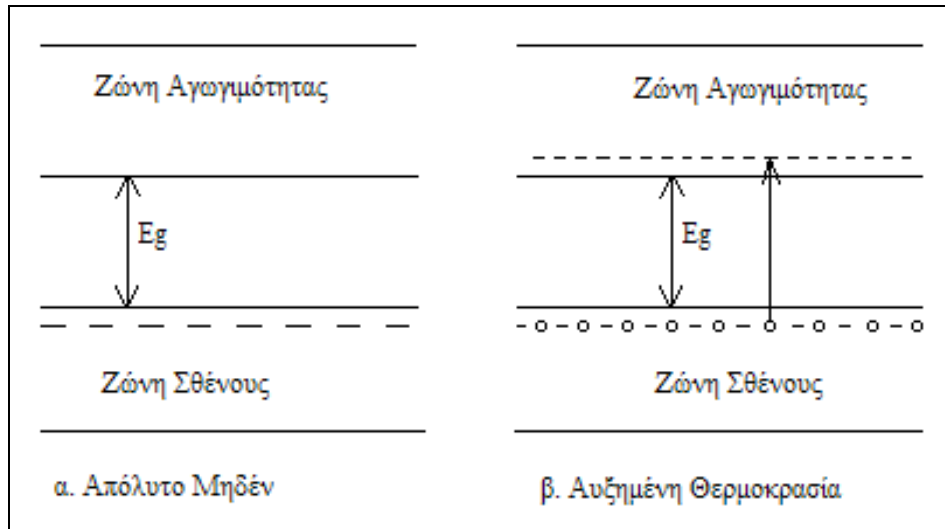


Σχήμα 2.3. Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης $S(\nu)$ σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας στις περιοχές ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου: εμπρός όψη τύπου n, πίσω όψη τύπου p.

2.12. Ημιαγώγιμα Υλικά

Τα ημιαγώγιμα υλικά χαρακτηρίζονται ως τέλειοι μονωτές σε θερμοκρασία απόλυτου μηδενός με τα ανιόντα ικανά για μετάδοση θερμότητας και ενέργειας μέσω επαφής καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του υλικού. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση τη κβαντική θεωρία, σημειώνοντας ότι τα ημιαγώγιμα υλικά έχουν ενεργειακό διάκενο μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας. Η ζώνη σθένους αντιπροσωπεύει τις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας των ηλεκτρονίων σθένους που αποτελούν τα όρια στα άτομα των δεκτών. Η ζώνη αγωγιμότητας αντιπροσωπεύει τις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας των ηλεκτρονίων που έχουν λάβει με κάποιο μηχανισμό ενέργεια και πλέον δεν αποτελούν τα όρια σε ένα συγκεκριμένο άτομο δέκτη.

Στη θερμοκρασία των 0°K , όλες οι επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας στη ζώνη σθένους ενός ημιαγώγιμου υλικού είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια ενώ στη ζώνη αγωγιμότητας οι επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας είναι κενές. Καθώς η διαδικασία μεταφοράς ενέργειας μέσω επαφής απαιτεί τα ανιόντα να κινούνται από τη μια στάθμη στην άλλη εντός του ενεργειακού διακένου καμία μεταφορά ενέργειας δε μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν όλες οι στάθμες είναι άδειες ή όταν όλες είναι γεμάτες.



Σχήμα 1.4. Καταστάσεις ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας για ημιαγωγίμο υλικό.

Καθώς η θερμοκρασία σε ένα δείγμα ημιαγωγού αυξάνεται, μεταδίδεται επαρκής ενέργεια στο ηλεκτρόνιο ώστε να μετακινηθεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Όταν το ηλεκτρόνιο εγκαταλείψει τη ζώνη σθένους τότε μια θέση μένει κενή, αυτή μπορεί να καταληφθεί πλέον από ένα άλλο ηλεκτρόνιο αν αυτό μετακινηθεί προς τη θέση αυτή. Φυσικά το ηλεκτρόνιο που μετακινήθηκε στη ζώνη σθένους για να καταλάβει τη κενή θέση άφησε κενή τη θέση από την οποία προήρθε. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το ηλεκτρόνιο που μετακινείται στη ζώνη σθένους θα πρέπει να έχει είτε αρνητική ενεργό μάζα μαζί με το αρνητικό του φορτίο είτε θετική ενεργό μάζα και θετικό φορτίο. Η τελευταία είναι η συνηθέστερη περιγραφή και η κίνηση του ηλεκτρονίου μέσα στη ζώνη σθένους καλείται κίνηση οπής, όπου οπή καλούνται τα θετικά φορτισμένα ιόντα. Αυτά τα ηλεκτρόνια και οι οπές εμφανίζονται πάντα σε ζεύγη. Συνεπώς όταν ένα ηλεκτρόνιο μετακινηθεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας μέσα σε ένα ημιαγωγό με οποιοδήποτε τρόπο συμβάλει στη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής.

2.13. Δημιουργία Ζευγών Ηλεκτρονίων-Οπών

Η ενέργεια του φωτονίου δίνεται όπως έχουμε ήδη αναφέρει από τη σχέση:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{J}) \quad (12)$$

όπου: h : η σταθερά του Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J/sec
 c : η ταχύτητα του φωτός $c = 2,998 \times 10^8$ m/sec
 ν : η συχνότητα του φωτονίου (Hz)
 λ : το μήκος κύματος του φωτονίου (m)

Καθώς σε ατομικό επίπεδο, η ενέργεια εκφράζεται σε eV ($1\text{eV}=1,6\times 10^{-19}\text{ J}$) και το μήκος κύματος σε μm , η ενέργεια μπορεί να εκφραστεί σε eV.

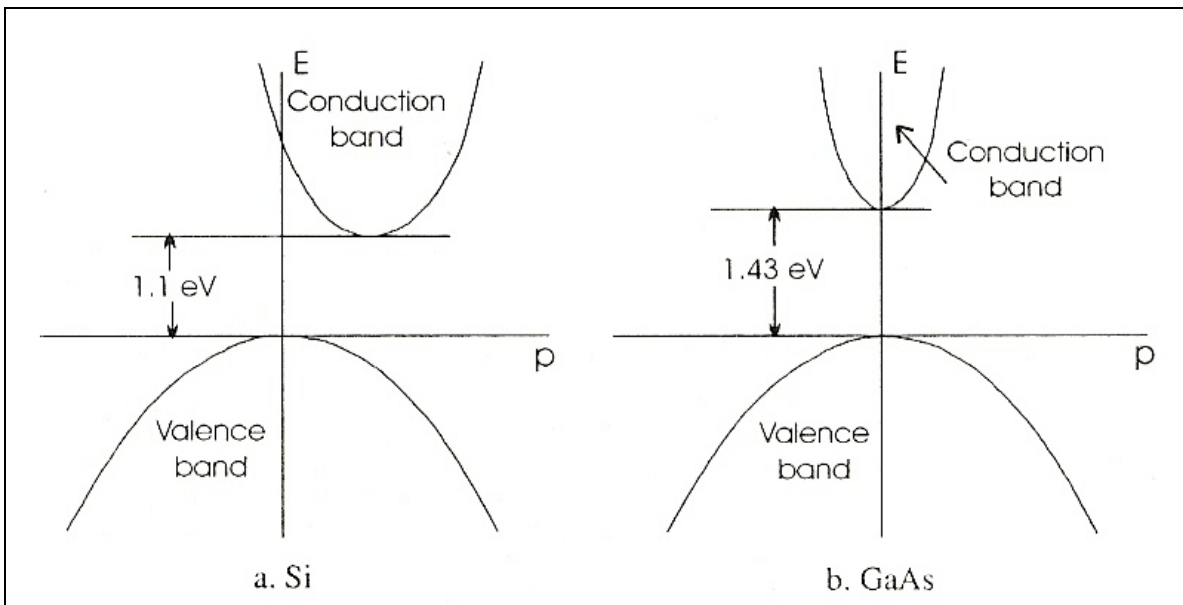
$$E = \frac{1,24}{\lambda} \text{ (eV)} \quad (13)$$

Η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να υπερβαίνει το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού E_g για να απορροφηθεί. Τα φωτόνια με ενέργεια ίση ή λίγο παραπάνω από την E_g είναι τα περισσότερο κατάλληλα να απορροφηθούν αφού αντιστοιχούν καλύτερα στο ενεργειακό διάκενο και στην αρχή διατήρησης της ορμής. Ακόμη και αν το φωτόνιο έχει περισσότερη ενέργεια από αυτή του διακένου, μπορεί να παράγει ένα μόνο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Το υπόλοιπο της ενέργειάς του χάνεται στο στοιχείο με τη μορφή θερμικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό ο αγωγός που χρησιμοποιείται για απορρόφηση του φωτός να έχει ενεργειακό διάκενο τέτοιο ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό του ηλιακού φάσματος να μπορεί να απορροφηθεί.

Γνωρίζοντας ότι το σημείο αιχμής του ηλιακού φάσματος είναι σε μήκος κύματος $\lambda = 0,5\mu\text{m}$, προκύπτει ενεργειακό διάκενο $E_g = 2,5\text{ eV}$.

Η φύση του διακένου επίσης επηρεάζει το βαθμό απορρόφησης σε ένα υλικό. Καθώς τα ηλεκτρόνια μετακινούνται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, λαμβάνει χώρα μεταφορά ενέργειας και ορμής έτσι ώστε να ισχύουν οι νόμοι της αρχής διατήρησης της ενέργειας και της ορμής.

Ορισμένα ημιαγώγιμα υλικά ταξινομούνται ως υλικά άμεσου διακένου ενώ άλλα ως υλικά έμμεσου διακένου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



Σχήμα 2.5. Ενεργειακό διάγραμμα της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας συναρτήσει της ορμής του α. πυριτίου (Si) και β. αρσενικού γαλλίου (GaAs).

Παρατηρούμε ότι για το πυρίτιο η βάση της ζώνης αγωγιμότητας είναι μετατοπισμένη στον άξονα της ορμής, απομακρυσμένη από τη κορυφή της ζώνης σθένους. Αυτό είναι ένα έμμεσο διάκενο. Αντίθετα το διάγραμμα του GaAs είναι ένα άμεσο διάκενο όπου η βάση της ζώνης αγωγιμότητας βρίσκεται σε ευθεία με τη κορυφή της ζώνης σθένους. Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν ότι οι επιτρεπόμενες ενέργειες ενός σωματιδίου μέσα στη ζώνη σθένους εξαρτάται από την ορμή του σωματιδίου. Η μετακίνηση του ηλεκτρονίου από ένα σημείο στη ζώνη σθένους σε ένα άλλο στη ζώνη αγωγιμότητας πρέπει να διέπεται από την αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Για παράδειγμα, στο πυρίτιο, η βάση της ζώνης αγωγιμότητας με την κορυφή της ζώνης σθένους διαφέρουν 1,1eV, είναι δύσκολο για ένα φωτόνιο με ενέργεια 1,1eV να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο σθένους ώστε αυτό να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, για τον λόγο ότι η μετάβαση αυτή απαιτεί να συνοδεύεται από την ανάλογη ορμή ώστε να επιτευχθεί μετατόπιση κατά μήκος του άξονα της ορμής, όμως το φωτόνιο φέρει μικρή ορμή. Το ηλεκτρόνιο σθένους πρέπει συνεπώς ταυτόχρονα να αποκτήσει ορμή από κάποια άλλη πηγή καθώς απορροφά ενέργεια από το αρχικό φωτόνιο. Επειδή όμως τέτοια φαινόμενα είναι αδύνατον να συμβούν, η απορρόφηση χαμηλών ενεργειακά φωτονίων στο ενεργειακό διάκενο του πυριτίου είναι πολλές τάξεις μεγέθους λιγότερη πιθανή από την απορρόφηση υψηλότερων ενεργειακά φωτονίων.

Καθώς τα φωτόνια διαθέτουν τόσο μικρή ορμή, καταλήγουμε ότι τα υλικά άμεσου διακένου, όπως το Αρσενικό Γάλλιο (GaAs) και το άμορφο πυρίτιο απορροφούν φωτόνια με ενέργεια κοντά στην ενέργεια διακένου του υλικού πολύ πιο εύκολα απ' ό τι τα υλικά έμμεσου διακένου. Συνεπώς, τα υλικά απορρόφησης άμεσου διακένου μπορούν να είναι πολλές τάξεις μεγέθους λεπτότερα από ότι τα υλικά με έμμεσο διάκενο και ακόμη μπορούν να απορροφήσουν ένα σημαντικό μέρος της αρχικής ακτινοβολίας.

Η διαδικασία απορρόφησης είναι παρόμοια με πολλές άλλες φυσικές διαδικασίες. Ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας του φωτός σε συνάρτηση με τη θέση είναι ανάλογος με την αρχική πυκνότητα:

$$\frac{dI}{dx} = -aI \tag{14}$$

η λύση της είναι: $I = I_0 \cdot e^{-ax}$

όπου I: πυκνότητα του φωτός σε βάθος x στο υλικό

I₀: πυκνότητα στην επιφάνεια

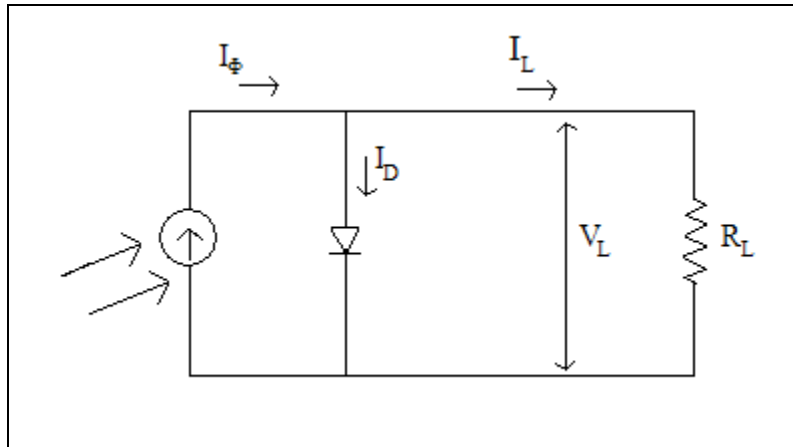
a: σταθερά απορρόφησης, εξαρτάται από το υλικό και από το μήκος κύματος.

Η εξίσωση $I = I_0 \cdot e^{-ax}$, διέπει την απορρόφηση των φωτονίων κοντά ή πάνω στην ένωση pn. Η τελευταία σχέση δείχνει ότι τα στοιχεία πρέπει να είναι επαρκώς παχιά για να απορροφήσουν την ακτινοβολία. Σε ορισμένες περιπτώσεις το μήκος της διαδρομής αυξάνεται προκαλώντας την ανάκλαση του φωτός από την εμπρός και πίσω επιφάνεια ενώ μέσα στο υλικό παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών.

2.14. Η Ένωση pn

2.14.1. Τάση Ανοιχτοκύκλωσης και Ρεύμα Βραχυκύκλωσης

Οι δυο σημαντικότερες παράμετροι περιγραφής την ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου φαίνεται στο Σχ. 2.6.



Σχήμα 2.6. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενου ηλιακού στοιχείου.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μετριέται βραχυκυκλώνοντας την έξοδο και μετρώντας το τελικό ρεύμα υπό πλήρη ακτινοβολία. Αγνοώντας τη μικρή διόδο και το ρεύμα γείωσης που διαφεύγει υπό μηδενική τάση, το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό αυτές τις συνθήκες είναι το φωτόρευμα I_Φ που είναι ανάλογο προς τα φωτόνια που απορροφά το ηλιακό στοιχείο, δηλαδή $I_{sc} = I_\Phi$.

Η μέγιστη φωτοτάση παράγεται υπό συνθήκες τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Πάλι, αγνοώντας το ρεύμα γείωσης που διαφεύγει και θέτοντας $I_L = 0$ στην εξίσωση

$$I_L = I_\Phi - I_0 \left[e^{\frac{qV_{oc}}{KT}} - 1 \right] \quad (15)$$

παίρνουμε τη τάση ανοιχτοκύκλωσης :

$$V_{oc} = \frac{KT}{Q} \cdot \ln\left(\frac{I_{\Phi}}{I_0} + 1\right) \quad (16)$$

Όπου I_0 : το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

Q : το φορτίο του ηλεκτρονίου = $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb

K : η σταθερά Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ Joules/Kelvin

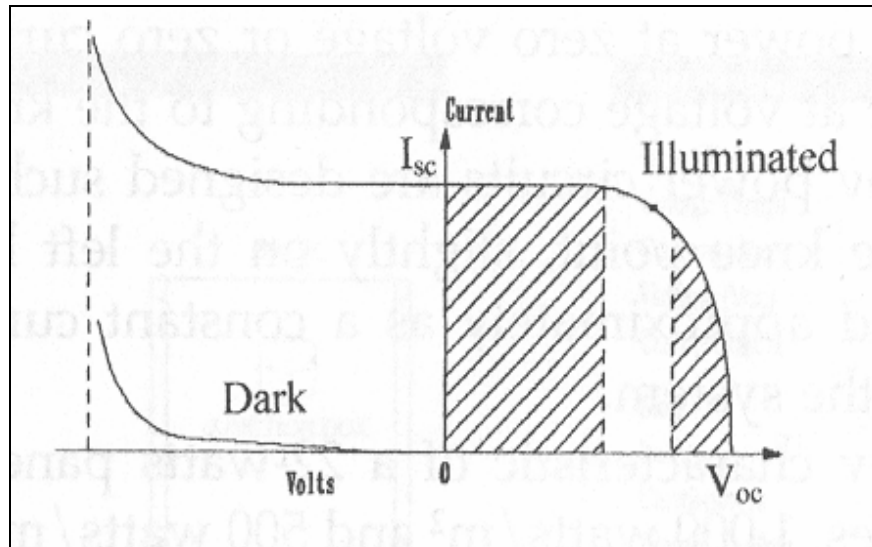
T : η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin

V_L : η τάση στα άκρα της διόδου από τη πρόσπτωση του φωτός

Η σταθερά KT/Q είναι η απόλυτη θερμοκρασία εκφρασμένη σε τάση $300^\circ\text{K} = 0.026$ volt. Στη πραγματικότητα, το φωτόρευμα είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το ανάστροφο ρεύμα κόρου. Για το λόγο αυτό, η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι πολλαπλάσιο της ποσότητας KT/Q . Υπό συνθήκες συνεχούς ακτινοβολήσης, ο λόγος I_{Φ}/I_0 αποτελεί επαρκή λειτουργία για τη θερμοκρασία της κυψέλης, και η ηλιακή κυψέλη συνήθως εμφανίζει έναν αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή στη τάση ανοιχτοκύκλωσης.

2.14.2. Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V και P-V

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης γενικά αναπαρίστανται από τη καμπύλη I-V. Το παρακάτω Σχ. 1.7 δείχνει τη I-V χαρακτηριστική ενός φωτοβολταϊκού πάνελ υπό δυο διαφορετικές συνθήκες, υπό σκοτάδι και υπό φως.



Σχήμα 2.7. Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού υπό φως και υπό σκοτάδι.

Στο πρώτο τεταρτημόριο, η αριστερή κορυφή της καμπύλης I-V υπό μηδενική τάση καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αυτό είναι το ρεύμα που μπορούμε να μετρήσουμε με τους ακροδέκτες εξόδου βραχυκυκλωμένους (μηδενική τάση). Το κάτω δεξιό μέρος της καμπύλης στο μηδενικό ρεύμα καλείται τάση ανοιχτοκύκλωσης. Πρόκειται για την τάση που μετρείται ανοιχτοκυκλώνοντας τους ακροδέκτες εξόδου (μηδενικό ρεύμα). Στην

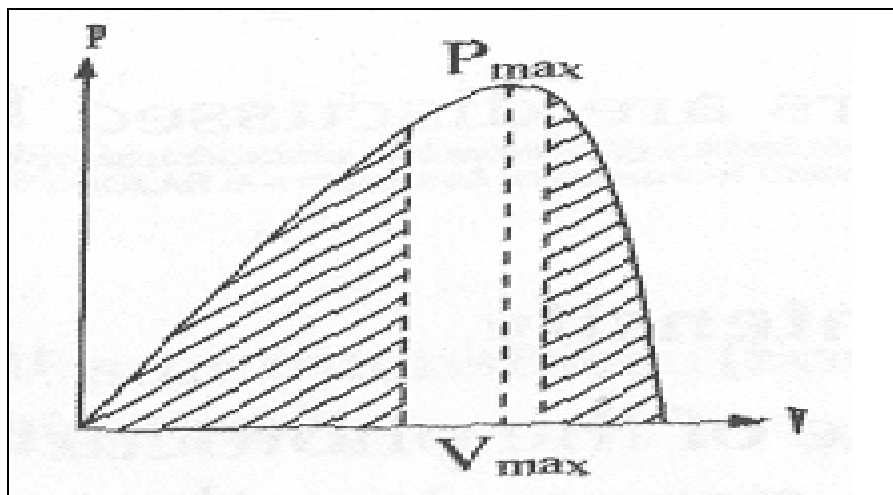
αριστερή γραμμοσκιασμένη περιοχή, η κυψέλη λειτουργεί σαν μια συνεχής πηγή ρεύματος, παράγοντας τάση για να αντιστοιχεί στην αντίσταση φορτίου. Στη δεξιά γραμμοσκιασμένη περιοχή, η ένταση μειώνεται απότομα με μια μικρή άνοδο της τάσης. Σε αυτή τη περιοχή η κυψέλη λειτουργεί σαν μια συνεχή πηγή τάσης με εσωτερική αντίσταση. Κάπου μεταξύ των δυο γραμμοσκιασμένων περιοχών υπάρχει το σημείο γονάτου.

Εάν η τάση επιβάλλεται εξωτερικώς με αντίθετη κατεύθυνση, το ρεύμα διατηρείται σταθερό και απορροφάται ισχύς από τη κυψέλη. Παρόλα αυτά, πέρα από μια συγκεκριμένη αρνητική τάση, η ένωση διασπάται όπως σε μια δίοδο, και η ένταση φθάνει μια υψηλή τιμή. Στο σκοτάδι, το ρεύμα είναι μηδέν για τάση μεγαλύτερη της τάσης διάσπασης η οποία είναι η ίδια όπως και στην περίπτωση με φως.

Η ισχύς εξόδου του πάνελ είναι το γινόμενο της τάσης και της έντασης εξόδου και γίνεται μέγιστη για τάση και ένταση που αντιστοιχούν στο σημείο γονάτου.

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (17)$$

Στο Σχ. 2.8 παριστάνεται η ισχύς συναρτήσει της τάσης.

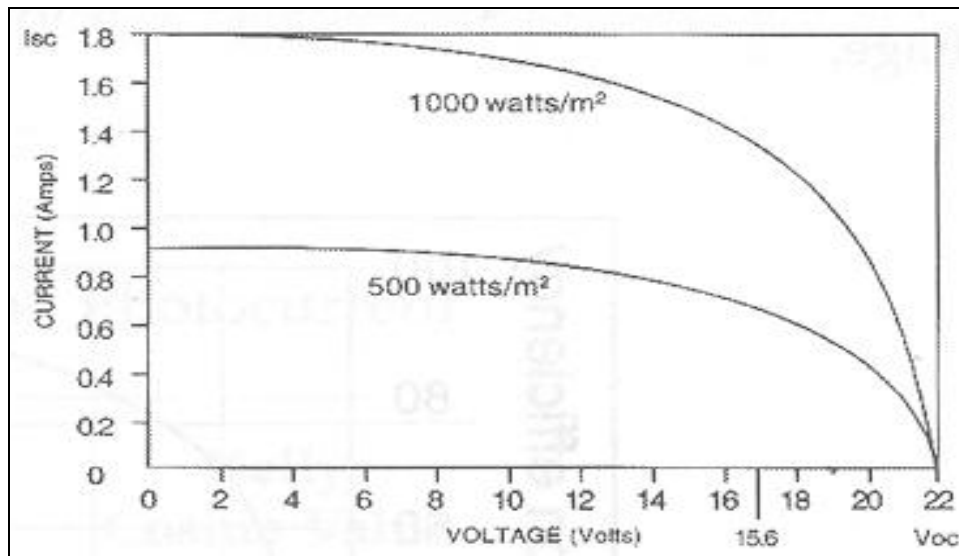


Σχήμα 2.8. Χαρακτηριστική P-V, φωτοβολταϊκού στοιχείου που ακτινοβολείται.

Παρατηρούμε ότι η κυψέλη παράγει μηδενική ισχύ για μηδενική τάση και ένταση, ενώ παράγει μέγιστη ισχύ για τάση που αντιστοιχεί στο σημείο γονάτου της I-V χαρακτηριστικής. Για το λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά συστήματα σχεδιάζονται να λειτουργούν κοντά στο σημείο γονάτου, ελαφρώς προς την αριστερή πλευρά. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μοντελοποιούνται ως μια συνεχής πηγή ρεύματος.

Το παρακάτω Σχ. 2.9 παριστάνει τη χαρακτηριστική ενός 22-watt πάνελ υπό δυο διαφορετικές πυκνότητες ακτινοβολίας, 1000 watt/m² και 500 watt/m² . Οι καμπύλες

αυτές είναι σε AM1.5 (air mass). Η μηδενική αέρια μάζα (AM0) αντιπροσωπεύει συνθήκες στο διάστημα όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι 1350 watt/m². Η μοναδιαία αέρια μάζα (AM1) αντιπροσωπεύει τις ιδανικές συνθήκες στη γη σε καθαρό αέρα με ξηρό αέρα το μεσημέρι όταν η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στη γη με τη μικρότερη αντίσταση. Ο αέρας μιας τυπικής ημέρας με υγρασία και μόλυνση είναι AM1.5, το οποίο λαμβάνεται ως τιμή αναφοράς. Η προσπίπτουσα ισχύς σε μια φυσιολογική επιφάνεια μια ηλιόλουστη μέρα με AM1.5 είναι περίπου 1000 watt/m². Μια συννεφιασμένη ημέρα θα είναι χαμηλή. Η ηλιακή πυκνότητα των 500 watt/m² αποτελεί μια διαφορετική κατάσταση αναφοράς για την αναπαράσταση της I-V χαρακτηριστικής.



Σχήμα 2.9. Χαρακτηριστική I-V για διαφορετικής έντασης ακτινοβολίας.

Η απόδοση της φωτομετατροπής μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης ορίζεται ως ακολούθως:
 $\eta = \text{ηλεκτρική ισχύς εξόδου} / \text{προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη κυψέλη}$

$$n = \frac{P_m}{H \cdot A} = \frac{I_m \cdot V_m}{H \cdot A} \quad (18)$$

όπου H: ένταση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φ/β στοιχείου

A: το εμβαδόν της επιφάνειας του φ/β στοιχείου

Προφανώς όσο υψηλότερη είναι η απόδοση τόσο μεγαλύτερη ισχύ εξόδου παίρνουμε υπό δεδομένη ακτινοβολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Αντιστροφείς

3.1. Αντιστροφείς (inverters)

Ένας αντιστροφέας μετατρέπει τη συνεχή τάση από τις μπαταρίες ή τα ηλιακά πλαίσια, στην τυποποιημένη τάση οικιακού εναλλασσόμενου ρεύματος έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα κοινά εργαλεία και τις συσκευές, αντίθετα με τους μετατροπείς που είναι ουσιαστικά φορτιστές μπαταριών ή και παροχές συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Το συνεχές ρεύμα δεν είναι χρησιμοποιήσιμο για διάφορες συσκευές, φώτα, αντλίες κλπ, έτσι τα περισσότερα συστήματα περιλαμβάνουν έναν αναστροφέα κάποιου τύπου. Υπάρχουν διαθέσιμες συσκευές συνεχούς ρεύματος, αλλά είτε είναι ακριβές ή υποδεέστερες έναντι αυτών εναλλασσόμενου ρεύματός. Οι πιο κοινές εισοδοί τάσης για τους αναστροφείς είναι 12 , 24 και 48 βολτ.

Με τον όρο αντιστροφέα νοείται η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος η οποία μετατρέπει τη συνεχή τάση των Φ/Β πάνελ σε εναλλασσόμενη ονομαστικών τιμών 230V (ανά φάση) /50 Hz. Οι αντιστροφείς αποτελούν πάντα ένα κομβικό σημείο σε μία Φ/Β εγκατάσταση καθώς όλη η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται μέσω αυτών. Κατά συνέπεια έχει ιδιαίτερη σημασία να χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και υψηλή απόδοση.

Υπάρχουν επίσης τύποι αντιστροφέων , οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν συνήθως μπαταρίες αλλά τα Φ/β πλαίσια ή οι ανεμογεννήτριες τροφοδοτούν άμεσα τον αναστροφέα και η έξοδος του αναστροφέα είναι συνδεδεμένη στις γραμμές μεταφοράς. Η παραγόμενη ενέργεια είτε πωλείται πίσω στην εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η χρησιμοποιείται απευθείας. Αυτοί οι αντιστροφείς απαιτούν συνήθως μια αρκετά υψηλή τάση εισόδου - 48 βολτ ή περισσότερα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με μπαταρίες, αλλά θα υπάρξουν απώλειες στη αποδοτικότητα τροφοδότησης των γραμμών μεταφοράς. Η απώλεια μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με τον αναστροφέα , το μέγεθος και τον τύπο μπαταριών.

Η ΔΕΗ, αναγνωρίζοντας το σημαντικό ρόλο των αντιστροφέων σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα θέτει συγκεκριμένες προδιαγραφές για αυτούς απαιτώντας την ύπαρξης σχετικών πιστοποιητικών. Επιπλέον κατά τη φάση παραλαβής του έργου, οι αντιστροφείς υποβάλλονται σε έλεγχο για να

διαπιστωθεί κατά πόσο τηρούνται αυτές οι προδιαγραφές. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν:

1. Την τάση και τη συχνότητα των αντιστροφών: οι προεπιλεγμένες τιμές ρυθμίσεων προστασιών ορίων τάσης και συχνότητας είναι από -20% έως +15% και +/-0,5Hz αντίστοιχα για σταθμούς στο διασυνδεδεμένο σύστημα και από -20% έως +15% και από 47,5Hz έως 51Hz για σταθμούς σε μη διασυνδεδεμένα νησιά. Σε περίπτωση ενεργοποίησης των παραπάνω προστασιών ο χρόνος αποσύνδεσης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0,5 sec και ο χρόνος επανασύζευξης τουλάχιστον 3 λεπτά.
2. Η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD) του ρεύματος των αντιστροφών δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5%. Ο συντελεστής THD ορίζεται ως:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (19)$$

όπου I_1 είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα και I_h η ενεργός τιμή της αρμονικής ρεύματος τάξης h και συχνότητας $50 \times h$ Hz.

3. Εφόσον οι αντιστροφείς δε διαθέτουν μετασχηματιστή απομόνωσης η έγχυση συνεχούς ρεύματος (dc injection current) δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 0,5% του ονομαστικού ρεύματος.
4. Προστασία έναντι του φαινομένου νησιδοποίησης κατά το πρότυπο VDE 0126. Το σημείο αυτό πρόκειται να αναλυθεί περαιτέρω στις επόμενες παραγράφους.

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της τάσης που παράγουν σε:

1. Μονοφασικούς αντιστροφείς, με τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10-11kW.
2. Τριφασικούς αντιστροφείς, με μεγέθη ισχύος από 6-7kW έως και 1MW.

Τονίζεται ότι η ΔΕΗ επιβάλλει τη σύνδεση των αντιστροφών σε τριφασικό σύστημα για εγκαταστάσεις άνω των 5kW, ενώ εγκαταστάσεις άνω των 100kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης (MT) της ΔΕΗ. Οι αντιστροφείς ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση (χαμηλής ή υψηλής συχνότητας) ανάμεσα στην DC είσοδο και την AC έξοδο χωρίζονται σε :

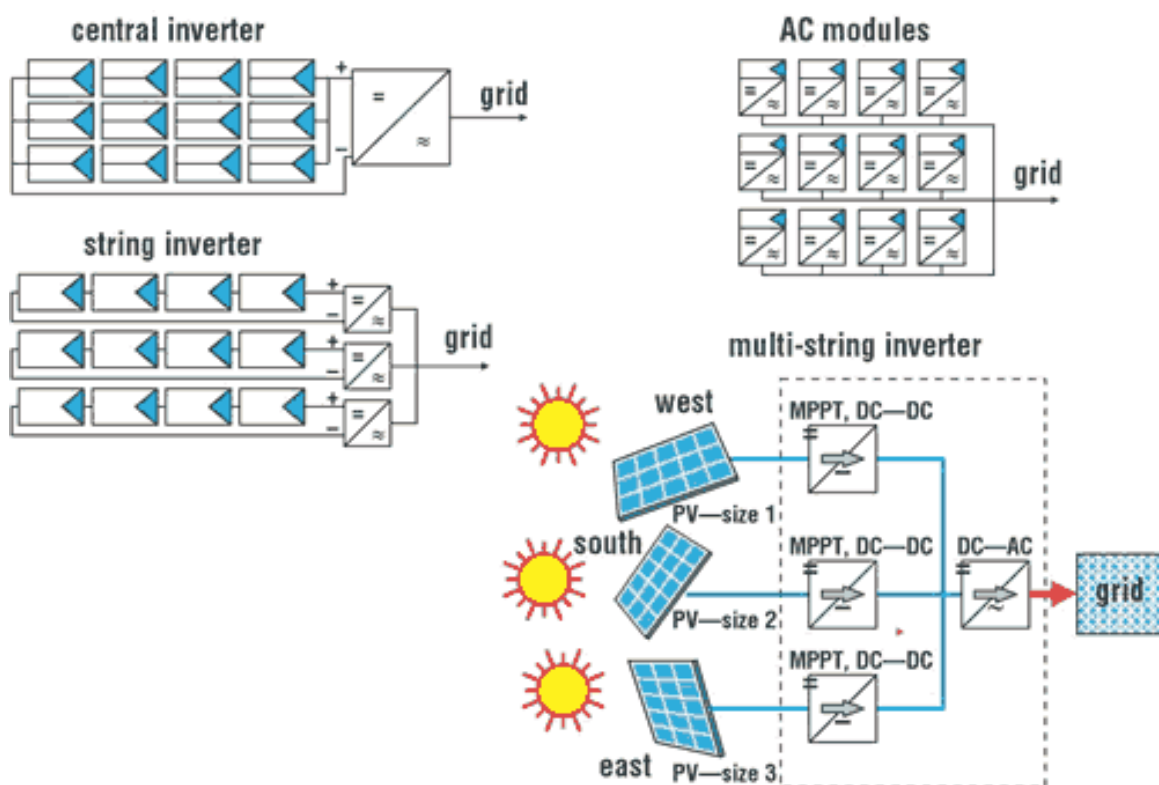
1. Αντιστροφείς με μετασχηματιστή (inverters with transformer)

2. Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (transformerless (TL) inverters)

Επιπλέον, ανάλογα της τεχνολογίας διασύνδεσης των Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιείται οι αντιστροφείς χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)
2. Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)
3. Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters)
4. Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (module integrated inverters).

Το παρακάτω Σχήμα παρουσιάζει σχηματικά τις παραπάνω οικογένειες αντιστροφέων:



Σχήμα 3.1 Κεντρικός μετατροπέας

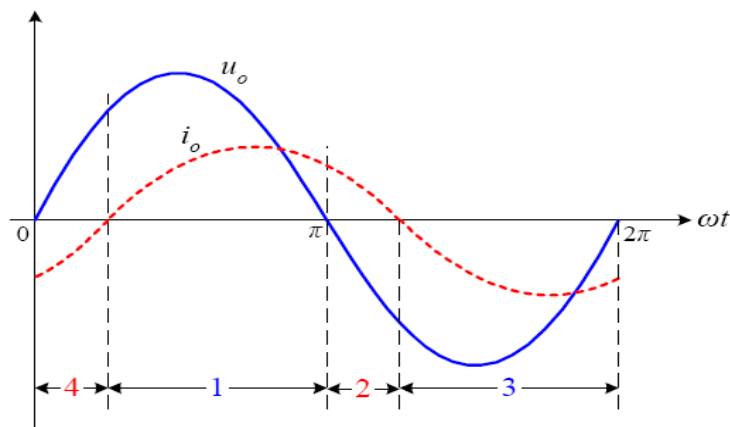
Οι αντιστροφείς είναι ένα είδος μετατροπέων, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος. Οι αντιστροφείς βρίσκουν εφαρμογή στις εξής περιοχές:

- Συστήματα ελέγχου AC μηχανών
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)
- Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες υδρογόνου

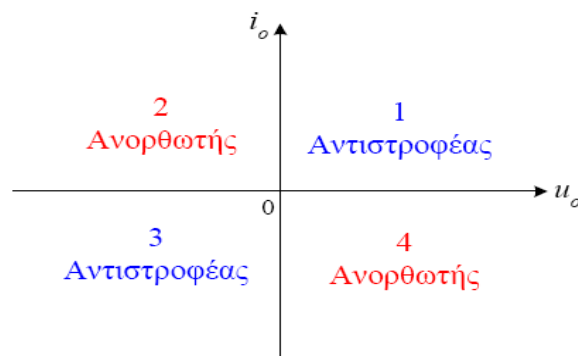
- Ενεργά φίλτρα για μείωση αρμονικών για την καλύτερευση της ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας
- Ενεργά συστήματα διόρθωσης συντελεστή ισχύος
- Συστήματα Αδιάκοπτης Παροχής Ισχύος (Uninterruptible Power Supplies, UPS)

Οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν κυρίως σε δύο κατηγορίες, στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης και σε αυτούς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος. Επίσης, οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν σε μονοφασικούς αντιστροφείς με συνδεσμολογία ημιγέφυρας, σε μονοφασικούς αντιστροφείς με συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας και σε τριφασικούς αντιστροφείς με συνδεσμολογία ημιγέφυρας.

3.2. Λειτουργία αντιστροφέων



(α)



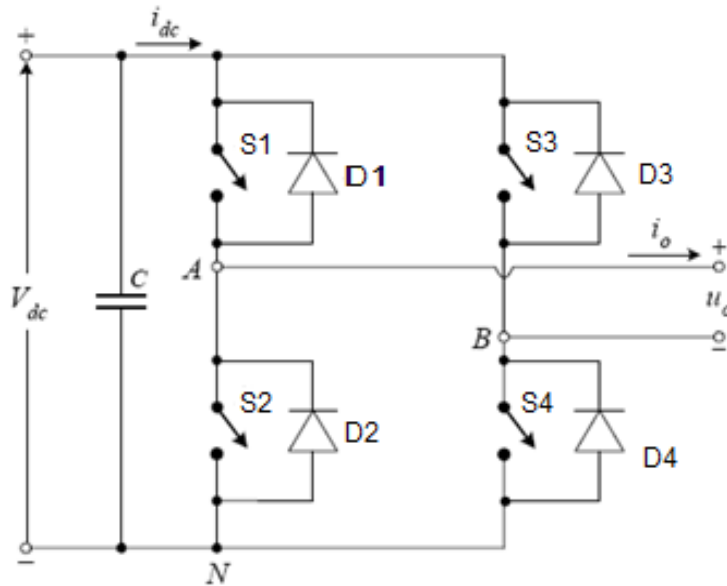
(β)

Σχήμα. 3.2 Κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα (α), οι οποίες απαιτούν τη λειτουργία του και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου $u_o - i_o$ (β)

Ως αντιστροφείς πηγής τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μετατροπείς τεσσάρων τεταρτημορίων. Αυτή η απαίτηση είναι φανερή από το Σχ. 3.2α όπου, εικονίζεται η φιλτραρισμένη τάση και το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου ενός μονοφασικού αντιστροφέα, ο οποίος τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο. Στα χρονικά διαστήματα 1 και 3, το γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος είναι θετικό. Επομένως, η στιγμιαία ισχύς ρέει από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα (λειτουργία αντιστροφέα). Αντίθετα, στα χρονικά διαστήματα 4 και 2, οι τιμές της τάσης και του ρεύματος είναι ετερόσημες και η στιγμιαία ισχύς είναι αρνητική. Στα διαστήματα 2 και 4 η ισχύς ρέει από την ac έξοδο προς τη dc είσοδο. Επομένως, ο μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής. Σε μια περίοδο της τάσης εξόδου ο μετατροπέας λειτουργεί δύο φορές ως αντιστροφέας και άλλες δύο ως ανορθωτής. Επειδή το χρονικό διάστημα όπου η ισχύς ρέει από τη dc είσοδο προς την ac έξοδο είναι μεγαλύτερο, ονομάζουμε το μετατροπέα αντιστροφέα. Η απαίτηση για λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου u_o-i_o (Σχ. 3.2β), επιβάλλει τη χρήση του μετατροπέα πλήρους γέφυρας στους μονοφασικούς αντιστροφείς (Σχ. 2.2). επίσης, ο μετατροπέας ημιγέφυρας παρουσιάζει κάποια σοβαρά μειονεκτήματα:

- i. Για την κατασκευή του χρειάζονται δύο πυκνωτές μέσης λήψης
- ii. Δε μπορεί να δημιουργήσει τάση εξόδου με διαστήματα μηδενικής τάσης για μη ωμικά φορτία
- iii. Το πλάτος της τάσης εξόδου έχει τη μισή τιμή της τάσης εισόδου

Στο Σχ. 3.3 παρουσιάζεται ένας αντιστροφέας σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (αποτελείται από δύο ημιγέφυρες), ο οποίος δεν παρουσιάζει κανένα από τα παραπάνω μειονεκτήματα. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από δύο σκέλη, καθένα από τα οποία φέρει δύο διακόπτες. Ο καθένας διακόπτης έχει συνδεδεμένη από μία αντιπαράλληλη δίοδο. Η συγκεκριμένη διάταξη προτιμάται σε σχέση με άλλες σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Με την ίδια dc τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι διπλάσια εκείνης του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα διακοπών είναι το μισό εκείνων με μισή γέφυρα.



Σχήμα 3.3 Μονοφασικός αντιστροφέας με συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας

Εξετάζοντας το κύκλωμα του Σχ. 3.3 (συνυπολογίζοντας και το Σχ. 3.2) συμπεραίνουμε τα ακόλουθα:

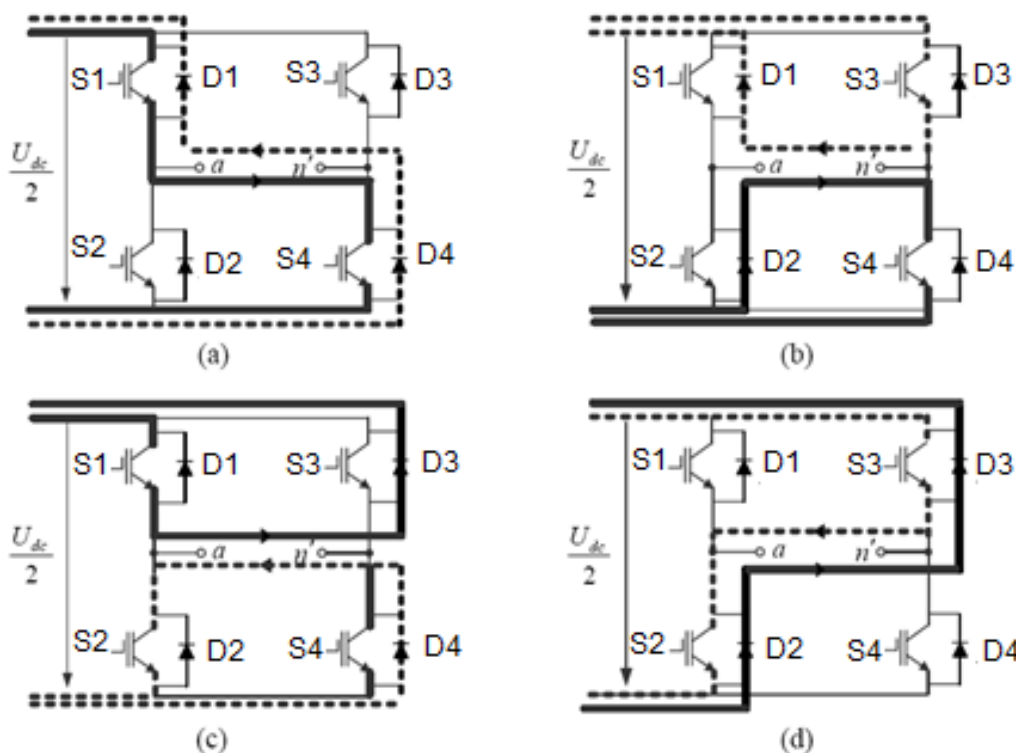
- i. Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου έχουν ταυτόχρονα θετικές τιμές (δηλ. το γινόμενο $i_o \cdot v_o$ είναι θετικό – διάστημα 1), τότε άγουν οι διακόπτες S1 και S4 και έτσι η ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την είσοδο του αντιστροφέα προς την έξοδο.
- ii. Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου έχουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές (δηλ. το γινόμενο $i_o \cdot v_o$ είναι θετικό – διάστημα 3), τότε άγουν οι διακόπτες S2 και S3 και έτσι η ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την είσοδο του αντιστροφέα προς την έξοδο.
- iii. Όταν η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλ. το γινόμενο $i_o \cdot v_o$ είναι μηδέν), τότε μπορεί να άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγών [S4, S2] [S1, S3] και έτσι επιτυγχάνεται η κυκλοφορία το ρεύματος εξόδου. Δηλαδή αν στην περίπτωση αυτή άγει ο διακόπτης S4 τότε το ρεύμα εξαναγκάζει τη δίοδο D2 να άγει και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί στο κύκλωμα S4 - φορτίο – D2. Το ρεύμα αυτό, το οποίο κυκλοφορεί στο υποκύκλωμα ονομάζεται ανακυκλούμενο ρεύμα. (circulating current).
- iv. Όταν η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλ. το γινόμενο $i_o \cdot v_o$ είναι μηδέν), τότε μπορεί να άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγών [S3, S1] [S2, S4] και έτσι επιτυγχάνεται η κυκλοφορία το ρεύματος εξόδου. Δηλαδή αν στην περίπτωση αυτή άγει ο διακόπτης S3 τότε το ρεύμα εξαναγκάζει τη δίοδο D1 να άγει και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί στο κύκλωμα S3 - φορτίο – D1. Το ρεύμα αυτό, το οποίο κυκλοφορεί στο υποκύκλωμα ονομάζεται επίσης ανακυκλούμενο ρεύμα.
- v. Όταν η τάση εξόδου έχει θετική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλ. το φορτίο είναι επαγωγικό και το γινόμενο $i_o \cdot v_o$ είναι αρνητικό – διάστημα 4), τότε οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης D1 και D4 εξαναγκάζονται να άγουν και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί μέσω του υποκύκλωματος πηγή – S1 - φορτίο – D4.

- vi. Όταν η τάση εξόδου έχει αρνητική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλ. το φορτίο είναι χωρητικό και το γινόμενο $i_o.v_o$ είναι αρνητικό – διάστημα 2), τότε οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης D2 και D3 εξαναγκάζονται να άγουν και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί μέσω του υποκυκλώματος πηγή – D2 - φορτίο – D3.

Όλα τα παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν στον παρακάτω Πίνακα 3.1 και στο Σχ. 3.4.

Κατάσταση	S1	S3	S2	S4	U_{ag}	$U_{n'g}$	$U_{an'}$
Θετική '+'	1	0	0	1	$U_{dc}/2$	0	$U_{dc}/2$
Μηδέν '0'	1	1	0	0	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	0
	0	0	1	1	0	0	0
Αρνητική '-'	0	1	1	0	0	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$

Πίνακας 3.1 Διακοπτικές καταστάσεις του μονοφασικού αντιστροφέα με σύνδεση πλήρους γέφυρας

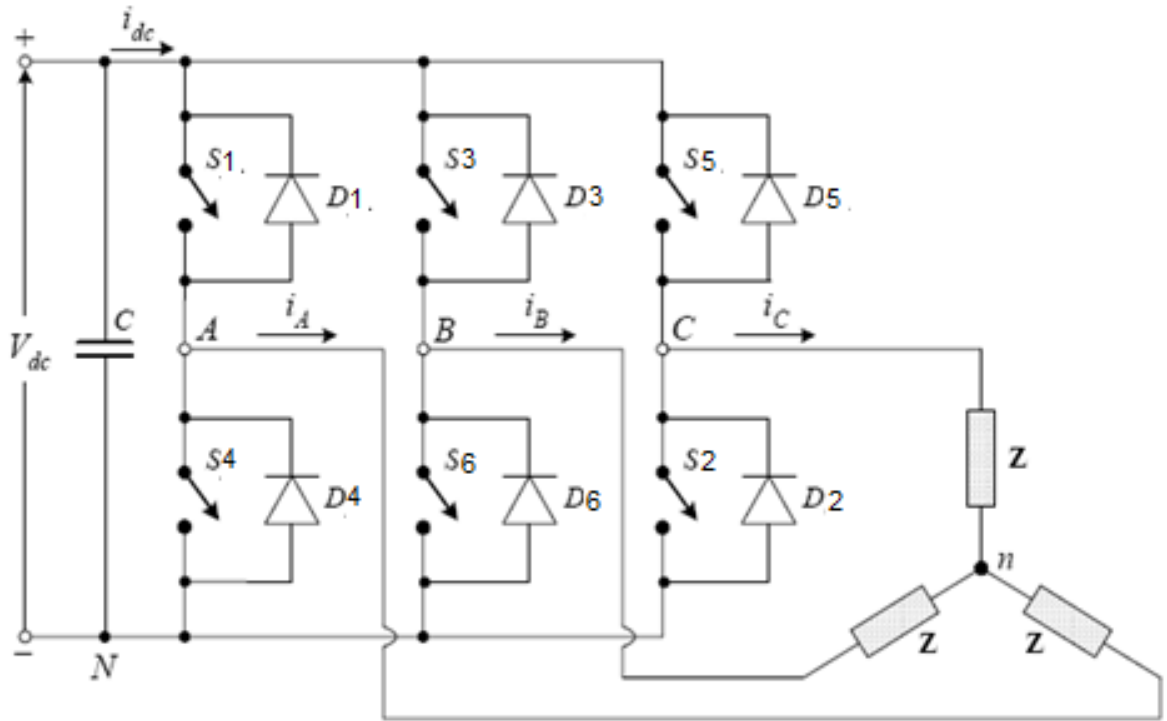


Σχήμα 3.4 Υποκυκλώματα του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για θετική κατάσταση (a), μηδενική (b, c) και αρνητική (d)

Το μπλοκ διάγραμμα ενός τριφασικού αντιστροφέα με αντιπαράλληλες διόδους στους διακόπτες όλων των κλάδων του αντιστροφέα φαίνεται παρακάτω στο Σχ. 3.5. Παράλληλα με τον πυκνωτή είναι συνδεδεμένη η διάταξη του αντιστροφέα με τους έξι διακόπτες. Σε κάθε διακόπτη υπάρχει συνδεδεμένη μια αντιπαράλληλη δίοδος ελεύθερης διέλευσης. Οι έξι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης αποτελούν τριφασική ανόρθωση. Η είσοδος αυτής της τριφασικής ανόρθωσης είναι η πλευρά που συνδέεται ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας και η έξοδος της είναι από την πλευρά των πυκνωτών. Όταν ο ασύγχρονος κινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια (π.χ. κατά την πέδη του κινητήριου συστήματος) ο κινητήρας επιστρέφει ενέργεια στον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή μέσω των αντιπαράλληλων διόδων ελεύθερης διέλευσης.

Οι διακόπτες s_1, s_3, s_5 ονομάζονται high side διακόπτες και οι διακόπτες s_2, s_4, s_6 ονομάζονται low side διακόπτες. Οι διακόπτες s_1 και s_4 αποτελούν την πρώτη ημιγέφυρα, οι διακόπτες s_3 και s_6 αποτελούν τη δεύτερη ημιγέφυρα και οι διακόπτες s_5 και s_2 αποτελούν την τρίτη ημιγέφυρα του αντιστροφέα.

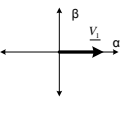
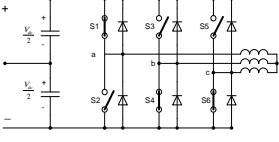
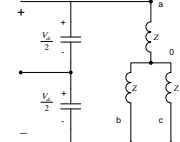
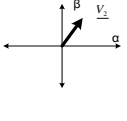
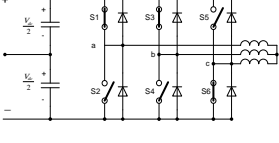
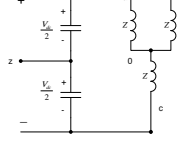
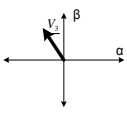
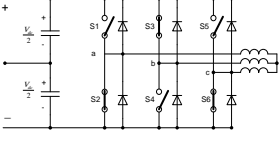
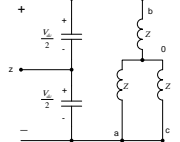
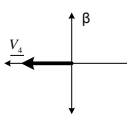
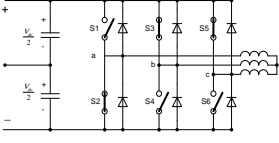
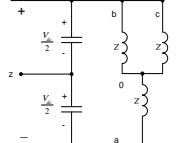
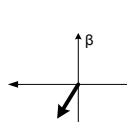
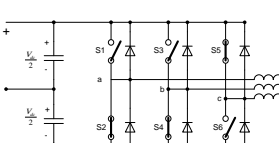
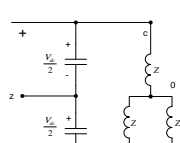
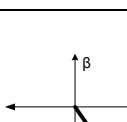
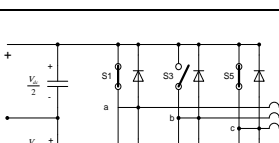
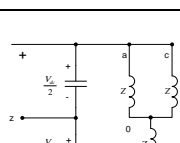
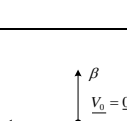
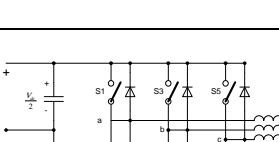
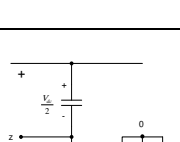
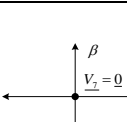
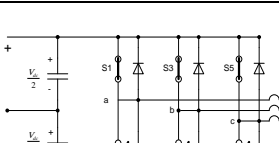
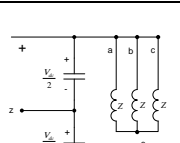
Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται κάθε στιγμή ο αντιστροφέας ανάλογα με το αν κάποιος από τους διακόπτες μιας ημιγέφυρας άγει ή δεν άγει είναι $2^3 = 8$. Για την περιγραφή αυτών των καταστάσεων υιοθετείται μια απλουστευμένη μέθοδος περιγραφής. Όταν άγει ο πάνω διακόπτης της πρώτης ημιγέφυρας η κατάσταση περιγράφεται με το 1 όταν άγει ο κάτω διακόπτης της ίδιας ημιγέφυρας η κατάσταση περιγράφεται με το 0. Το ίδιο ισχύει και για τις άλλες ημιγέφυρες. Έτσι όταν άγει ο πάνω διακόπτης της πρώτης ημιγέφυρας, ο κάτω διακόπτης της δεύτερης ημιγέφυρας και ο κάτω διακόπτης της τρίτης ημιγέφυρας η κατάσταση περιγράφεται ως εξής [100]. Οι οχτώ καταστάσεις της γέφυρας του αντιστροφέα είναι οι εξής [100], [110], [010], [011], [001], [101], [000], [111] (Πίνακας 3.2). Για τον υπολογισμό των πτώσεων τάσεων η σύνθετη αντίσταση της κάθε φάσης παρουσιάζεται να έχει την ίδια τιμή. Στον Πίνακα 3.2 φαίνεται ανάλογα με την κατάσταση του κάθε διακόπτη στις έξι μη μηδενικές και στις δυο μηδενικές καταστάσεις η συνδεσμολογία του συμμετρικού τριφασικού φορτίου. Παρατηρείται ότι οι τρεις φάσεις εναλλάσσονται κυκλικά. Όταν η σύνθετη αντίσταση της μιας φάσης είναι συνδεδεμένη με το θετικό ή το αρνητικό άκρο της ανορθωμένης τάσης τότε οι δύο σύνθετες αντιστάσεις των άλλων δύο φάσεων είναι συνδεδεμένες παράλληλα στο αντίθετο άκρο.



Σχήμα 2.4 Τριφασικός αντιστροφέας

Έτσι η απόλυτη τιμή της πτώσης τάσης στη σύνθετη αντίσταση της φάσης που είναι μόνη της είναι το $(2/3)V_{dc}$ και η απόλυτη τιμή της πτώσης στα άκρα των δύο φάσεων που οι σύνθετες αντιστάσεις τους είναι συνδεδεμένες παράλληλα είναι $(1/3)V_{dc}$ [1]. Το πρόσημο που θα έχει αυτή η τιμή εξαρτάται από το άκρο που είναι συνδεδεμένη η σύνθετη αντίσταση της κάθε φάσης. Όταν η σύνθετη αντίσταση της μιας φάσης ή ο συνδυασμός των συνθετών αντιστάσεων των άλλων δύο φάσεων είναι συνδεδεμένες στο θετικό άκρο της ανορθωμένης τάσης τότε το πρόσημο της απόλυτης τιμής της πτώσης τάσης είναι θετικό, όταν είναι συνδεδεμένες στο αρνητικό άκρο της ανορθωμένης τάσης είναι αρνητικό. Θεωρώντας την ακολουθία καταστάσεων $[000]$, $[100]$, $[110]$, $[010]$, $[011]$, $[001]$, $[101]$,

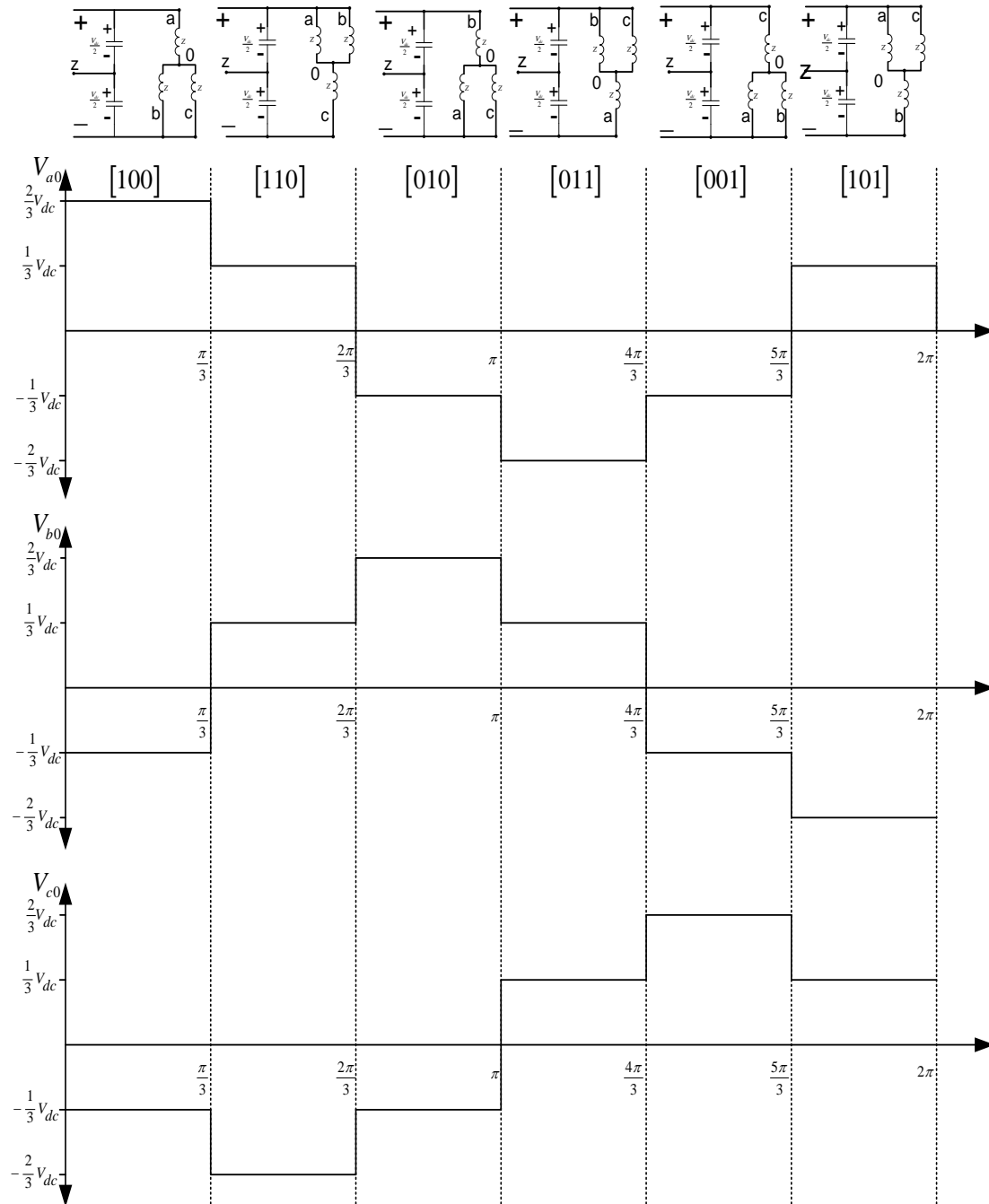
Λειτουργική κατάσταση	Κατάσταση αντιστροφή	στον	Απλοποιημένη κατάσταση αντιστροφή	στον	Φασικές τάσεις
-----------------------	----------------------	------	-----------------------------------	------	----------------

$\underline{V}_1 [100]$ 			$V_{a0} = \frac{2}{3}V_{dc}$ $V_{b0} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{c0} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ -1.1-
$\underline{V}_2 [110]$ 			$V_{a0} = \frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{b0} = \frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{c0} = -\frac{2}{3}V_{dc}$ -1.2-
$\underline{V}_3 [110]$ 			$V_{a0} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{b0} = \frac{2}{3}V_{dc}$ $V_{c0} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ 1.3-
$\underline{V}_4 [011]$ 			$V_{a0} = -\frac{2}{3}V_{dc}$ $V_{b0} = \frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{c0} = \frac{1}{3}V_{dc}$ 1.4-
$\underline{V}_5 [001]$ 			$V_{a0} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{b0} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{c0} = \frac{2}{3}V_{dc}$ 1.5-
$\underline{V}_6 [101]$ 			$V_{a0} = \frac{1}{3}V_{dc}$ $V_{b0} = -\frac{2}{3}V_{dc}$ $V_{c0} = \frac{1}{3}V_{dc}$ -1.6-
$\underline{V}_0 [000]$ 			$V_{a0} = 0$ $V_{b0} = 0$ $V_{c0} = 0$ -1.7-
$\underline{V}_7 [111]$ 			$V_{a0} = 0$ $V_{b0} = 0$ $V_{c0} = 0$ -1.8-

Πίνακας 3.2 Οι οχτώ λειτουργικές καταστάσεις του τριφασικού αντιστροφέα

[111] στον αντιστροφέα τότε προκύπτει η αναπαράσταση των φασικών τάσεων που φαίνεται στο Σχ. 3.6. Εκεί φαίνεται ότι οι φασικές τάσεις έχουν τρία επίπεδα

0 , $+\frac{2}{3}V_{dc}$ ή $-\frac{2}{3}V_{dc}$ και $\frac{1}{3}V_{dc}$ ή $-\frac{1}{3}V_{dc}$.

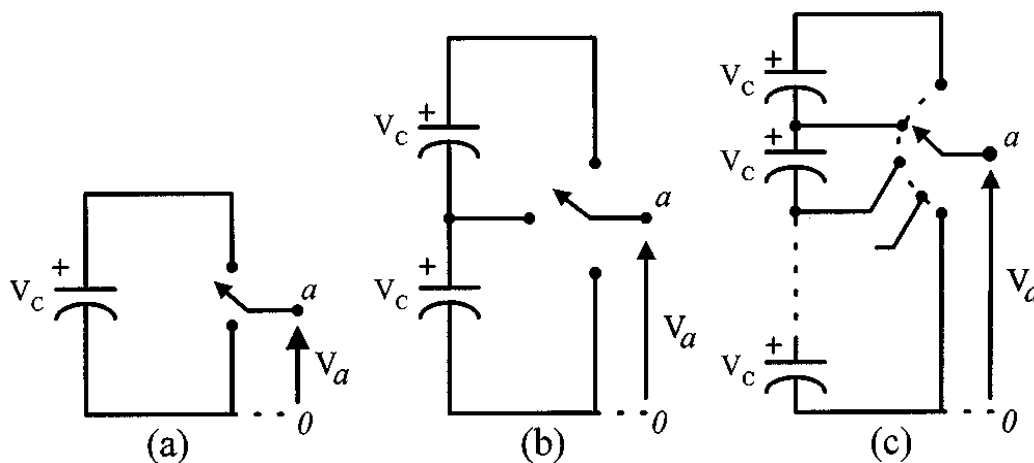


Σχήμα 3.6 Οι έξι διαδοχικές καταστάσεις του αντιστροφέα και οι φασικές τάσεις.

3.2.1. Αντιστροφείς Πολλαπλών Επιπέδων

Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία άρχισε να απαιτεί εξοπλισμό μεγαλύτερης ισχύος, που τώρα φτάνει το επίπεδο των μεγαβάτ. Ελεγχόμενοι AC οδηγοί της κλίμακας των μεγαβάτ συνδέονται συχνά στο δίκτυο μέσης τάσης. Σήμερα, είναι δύσκολο να συνδέσουμε ένα σκέτο ημιαγωγό ισχύος στο δίκτυο μέσης τάσης (2,3, 3,3, 4,16 ή 6.9 kV). Γι' αυτό το λόγο, μια νέα ομάδα αντιστροφέων πολλαπλών επιπέδων έχει έρθει στο προσκήνιο σα λύση για να μπορούμε να εργαζόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα τάσης.

Οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων περιέχουν μία διάταξη ημιαγωγών ισχύος και πυκνωτές για την παροχή της dc τάσης, η έξοδος των οποίων παράγει τάση με βηματική κυματομορφή. Η μεταγωγή των διακοπών επιτρέπει την πρόσθεση των τάσεων των πυκνωτών, οι οποίοι φτάνουν σε υψηλές τάσεις εξόδου, ενώ οι ημιαγωγοί ισχύος πρέπει να καταπονούνται με μειωμένες τιμές τάσης. Το Σχ. 3.7 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα του σκέλους της μίας φάσης από αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων, για τους οποίους η δράση των ημιαγωγών ισχύος αναπαρίστανται από ένα ιδανικό διακόπτη με αρκετές θέσεις. Ένας αντιστροφέας δύο επιπέδων παράγει μία τάση εξόδου με δύο τιμές (επίπεδα) σε σχέση με το αρνητικό άκρο του πυκνωτή. [βλ. Σχ. 3.7(α)], ενώ ο αντιστροφέας τριών επιπέδων παράγει τρεις τάσεις και ούτω καθ' εξής.



Σχήμα 3.7 Μία φάση αντιστροφέα με (α) δύο επίπεδα, (β) τρία επίπεδα και (c) η επίπεδα.

Θεωρώντας ότι m είναι ο αριθμός των βημάτων της φασικής τάσης σε σχέση με το αρνητικό άκρο του αντιστροφέα, τότε ο αριθμός των βημάτων της τάσης μεταξύ των δύο φάσεων του φορτίου k είναι

$$k = 2m + 1 \quad (20)$$

και ο αριθμός των βημάτων p της φασικής τάσης για τριφασικό φορτίο σε σύνδεση αστέρα είναι

$$p = 2k - 1 \quad (21)$$

Ο όρος 'πολλαπλά επίπεδα' ξεκίνησε με τον αντιστροφέα τριών επιπέδων τον οποίο παρουσίασε ο Nabae et al. Αυξάνοντας τον αριθμό των επιπέδων στον αντιστροφέα, η τάση εξόδου έχει περισσότερα βήματα δημιουργώντας μία κλιμακωτή κυματομορφή, η οποία παρουσιάζει μειωμένη αρμονική παραμόρφωση (THD). Εν τούτοις, ο μεγάλος αριθμός επιπέδων αυξάνει την πολυπλοκότητα του ελέγχου και εισάγει προβλήματα αστάθειας της τάσης.

Τρεις διαφορετικές τοπολογίες έχουν προταθεί για τους αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων: με διόδους περιορισμού (diode-clamped ή neutral-clamped), πλωτούς πυκνωτές (capacitor-clamped ή flying capacitors) και σειριακούς με πολλά κελιά και ξεχωριστή DC πηγή (ανά κελί). Επίσης, αρκετές στρατηγικές διαμόρφωσης και ελέγχου έχουν εξελιχθεί ή υιοθετηθεί για τους αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων συμπεριλαμβανομένων και των ακολούθων: ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) πολλαπλών επιπέδων, επιλεκτικός αρμονικός περιορισμός πολλαπλών επιπέδων και η διανυσματική διαμόρφωση (SVM).

Τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των αντιστροφέων πολλαπλών επιπέδων είναι τα ακόλουθα.

1. Μπορούν να παράγουν τάση εξόδου με εξαιρετικά χαμηλή παραμόρφωση και χαμηλότερο dv/dt .
2. Δίνουν ρεύμα εισόδου με πολύ χαμηλή παραμόρφωση.
3. Δημιουργούν χαμηλότερη τάση κοινού σημείου (common-mode CM), και έτσι μειωμένη καταπόνηση των στοιχείων. Επίσης, χρησιμοποιώντας εξεζητημένες μεθόδους διαμόρφωσης, μπορούν να εξαλειφθούν οι τάσεις CM.
4. Μπορούν να λειτουργήσουν με μικρότερη διακοπτική συχνότητα.

Τα αποτελέσματα έρευνας δείχνουν ότι τα κυκλώματα του αντιστροφέα πολλαπλών επιπέδων υπάρχουν για περισσότερα από 25 χρόνια. Μια πρώιμη

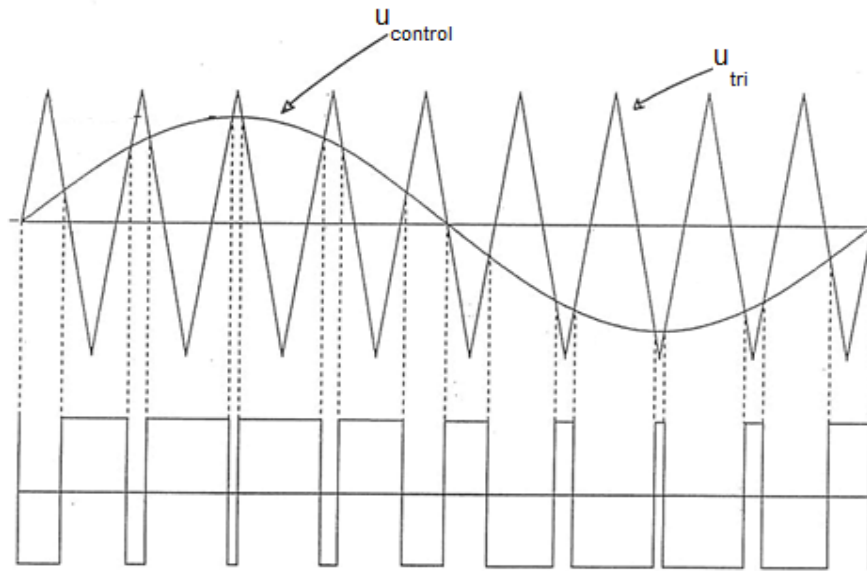
μορφή εμφανίστηκε το 1975, στην οποία ο σειριακός αντιστροφέας είχε αρχικά σχεδιαστεί με μία διάταξη που περιείχε ξεχωριστά κελιά πλήρους γέφυρας σε σειρά με dc πηγή (τα κελιά) για να δημιουργήσουν μια κλιμακωτή ac τάση εξόδου. Μέσω της τροποποίησης του σειριακού αντιστροφέα με διόδους στη θέση των πηγών πήραμε τον diode-clamped αντιστροφέα πολλαπλών επιπέδων. Ο αντιστροφέας diode-clamped λεγόταν και neutral-point clamped (NPC) αντιστροφέας όταν αρχικά χρησιμοποιούταν σε αντιστροφείς τριών επιπέδων όπου το μεσαίο επίπεδο τάσης οριζόταν ως το ουδέτερο σημείο. Επειδή ο αντιστροφέας NPC διπλασιάζει το επίπεδο τάσης της συσκευής αποτελεσματικά χωρίς να απαιτείται ακριβής αντιστοίχιση της τάσης η τοπολογία αυτή επικράτησε μέχρι τα μέσα του '80. Παρ' όλο που ο σειριακός αντιστροφέας εφευρέθηκε νωρίτερα, οι εφαρμογές του δεν εδραιώθηκαν μέχρι τα μέσα του '90. Δύο σημαντικές πατέντες εμφανίστηκαν για να υποδηλώσουν την ανωτερότητα του σειριακού αντιστροφέα στην οδήγηση των μηχανών και σε εφαρμογές του δικτύου. Εξ' αιτίας της μεγάλης ζήτησης σε αντιστροφείς μέσης τάσης και μεγάλης ισχύος, ο σειριακός αντιστροφέας παρουσιάζει τρομερό ενδιαφέρον. Αρκετές πατέντες έχουν βρεθεί για εφαρμογές σε οδήγηση μηχανών αναγεννητικού τύπου. Η τελευταία καταχώρηση για τους αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων των ΗΠΑ, που αναφέρονται ως capacitor-clamped αντιστροφείς ήταν το '90. Σήμερα, οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος στη μέση τάση. Στις εφαρμογές εμπεριέχεται η χρήση σε πλαστικοποιητές, ελαιοτριβεία, μεταφορείς, αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές κλπ.

3.3. Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)

3.3.1. Διαμόρφωση PWM μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας

Η διαμόρφωση εύρους παλμού για τους αντιστροφείς βασίζεται στη σύγκριση ενός ημιτονοειδούς σήματος με μία τριγωνική κυματομορφή (βλ. Σχ. 3.8), προκειμένου η τάση εξόδου να είναι κι αυτή ημιτονοειδής. Η ημιτονοειδής τάση ελέγχου (u_{control})¹ έχει συχνότητα ίδια με την επιθυμητή συχνότητα της τάσεως εξόδου. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα και διατηρείται γενικά σταθερή, όπως και το πλάτος της \hat{V}_{tri} .

¹ Στη βιβλιογραφία ο όρος *τάση ελέγχου* (u_{control}) μπορεί να αναφέρεται και ως *τάση αναφοράς* (u_{ref}).



Σχήμα 3.8 Διαμόρφωση πλάτους παλμών με $m_a = 0.8$ και $m_f = 9$

Πριν όμως εξετάσουμε τη συμπεριφορά της διαμόρφωσης PWM, είναι απαραίτητο να οριστούν μερικοί όροι. Η συχνότητα f_s της τριγωνικής κυματομορφής u_{tri} του Σχ. 3.8 καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency). Ακόμη, ονομάζεται και φέρουσα συχνότητα (carrier frequency). Το σήμα ελέγχου $u_{control}$ χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει μια συχνότητα f_1 , η οποία είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα (η f_1 ονομάζεται και συχνότητα διαμόρφωσης, modulating frequency). Η τάση εξόδου του αντιστροφέα δε θα είναι μία τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή, αλλά θα περιέχει αρμονικές της f_1 . Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους (amplitude modulation ratio) m_a ορίζεται ως:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (22)$$

όπου $\hat{V}_{control}$ είναι το πλάτος του σήματος ελέγχου. Το πλάτος \hat{V}_{tri} του τριγωνικού σήματος διατηρείται γενικά σταθερό.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας (frequency modulation ratio) m_f ορίζεται ως:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (23)$$

Το ζεύγος των διακοπών λειτουργεί με βάση τη σύγκριση των δύο κυματομορφών και προκύπτουν οι εξής καταστάσεις²:

$$V_{\text{control}} > V_{\text{tri}} \leftrightarrow \text{ο S1 άγει, } v_{\text{out}} = 1/2V_{\text{dc}}$$

$$V_{\text{control}} < V_{\text{tri}} \leftrightarrow \text{ο S2 άγει, } v_{\text{out}} = -1/2V_{\text{dc}}$$

Εφόσον οι δύο διακόπτες δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα ανοιχτοί, η τάση εξόδου v_{out} κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών ($V_{\text{dc}}/2$ και $-V_{\text{dc}}/2$).

Μελετώντας περεταίρω τα αποτελέσματα της διαμόρφωσης μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής:

1. Το πλάτος θεμελιώδους συχνότητας (\hat{V}_{A0})₁ είναι m_a φορές το ($V_{\text{dc}}/2$). Αυτό εξηγείται θεωρώντας αρχικά ένα σταθερό v_{control} . Έτσι προκύπτει μια κυματομορφή εξόδου v_{A0} . Η μέση τάση εξόδου V_{A0} (στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης $T_s=1/f_s$) εξαρτάται από το λόγο του v_{control} προς τη \hat{V}_{tri} για δεδομένη V_{dc} :

$$V_{A0} = \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} \cdot \frac{V_{\text{dc}}}{2} \quad v_{\text{control}} \leq \hat{V}_{\text{tri}} \quad (24)$$

2. Οι αρμονικές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο τη συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιες αυτής συχνότητας, δηλαδή γύρο από τις αρμονικές m_f , $2m_f$, $3m_f$ κ.ο.κ.. Αυτό το γενικό πρότυπο ισχύει για όλες τις τιμές του m_a στην περιοχή από 0 μέχρι 1. Για ένα συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας $m_f \geq 9$ (που πάντα συμβαίνει, εκτός από τις περιπτώσεις όπου έχουμε μεγάλες απαιτήσεις ισχύος), τα πλάτη των αρμονικών είναι σχεδόν ανεξάρτητα από τον m_f , αν και ο m_f καθορίζει τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται (οι αρμονικές). Θεωρητικά, οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές μπορούν να εκφραστούν ως

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \quad (25)$$

δηλαδή η αρμονική τάξης h αντιστοιχεί στην k -τάξης πλευρική της ζώνη, j -φορές το συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f :

² Η λειτουργία των διακοπών του ζεύγους είναι συμπληρωματική.

$$h = j(m_f) \pm k \quad (26)$$

όπου η θεμελιώδης συχνότητα αντιστοιχεί στο $h=1$. Για περιττές τιμές του j , οι αρμονικές υπάρχουν μόνο για άρτιες τιμές του k . Για άρτιες τιμές του j , οι αρμονικές υπάρχουν μόνο για άρτιες τιμές του k .

3. Ο συντελεστής m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος. Η επιλογή μιας περιττής ακέραιης τιμής για τον m_f έχει ως αποτέλεσμα μια περιττή συμμετρία [$f(-t) = -f(t)$], όπως επίσης μια συμμετρία μισού κύματος [$f(t) = -f(t+T_s/2)$]. Επομένως υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές, ενώ οι άρτιες δεν υπάρχουν στην κυματομορφή της u_{A0} (επίσης, στην ανάλυση Fourier μόνο οι συντελεστές της σειράς των ημιτόνων είναι μη μηδενικοί, ενώ αυτοί της σειράς των συνημιτόνων είναι μηδενικοί).

3.3.2. Διαμόρφωση PWM μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου

Η διαμόρφωση PWM για τον αντιστροφέα με σύνδεση πλήρους γέφυρας (Σχ. 3.3) για διπολική τάση εξόδου παρουσιάζει πάρα πολλές ομοιότητες με τη διαμόρφωση για τον αντιστροφέα με σύνδεση ημιγέφυρας. Εδώ έχουμε δύο ζεύγη διακοπών. Το ζεύγος που αποτελείται από τον πάνω διακόπτη του πρώτου κλάδου και τον κάτω διακόπτη του δεύτερου κλάδου και το ζεύγος που αποτελείται από τον κάτω διακόπτη του πρώτου κλάδου και τον πάνω διακόπτη του δεύτερου κλάδου. Και πάλι, έχουμε μια ημιτονοειδή $u_{control}$ και μια τριγωνική u_{tri} από τη σύγκριση των οποίων καθορίζονται οι μεταβάσεις των διακοπών. Για την τάση εξόδου ισχύουν τα εξής. Όταν ο S_{A+} είναι κλειστός και η u_{A0} ισούται με $+V_{dc}/2$, ο S_4 είναι επίσης κλειστός και η $u_{B0} = -V_{dc}/2$. Επομένως,

$$u_{B0}(t) = -u_{A0}(t) \quad (27)$$

και

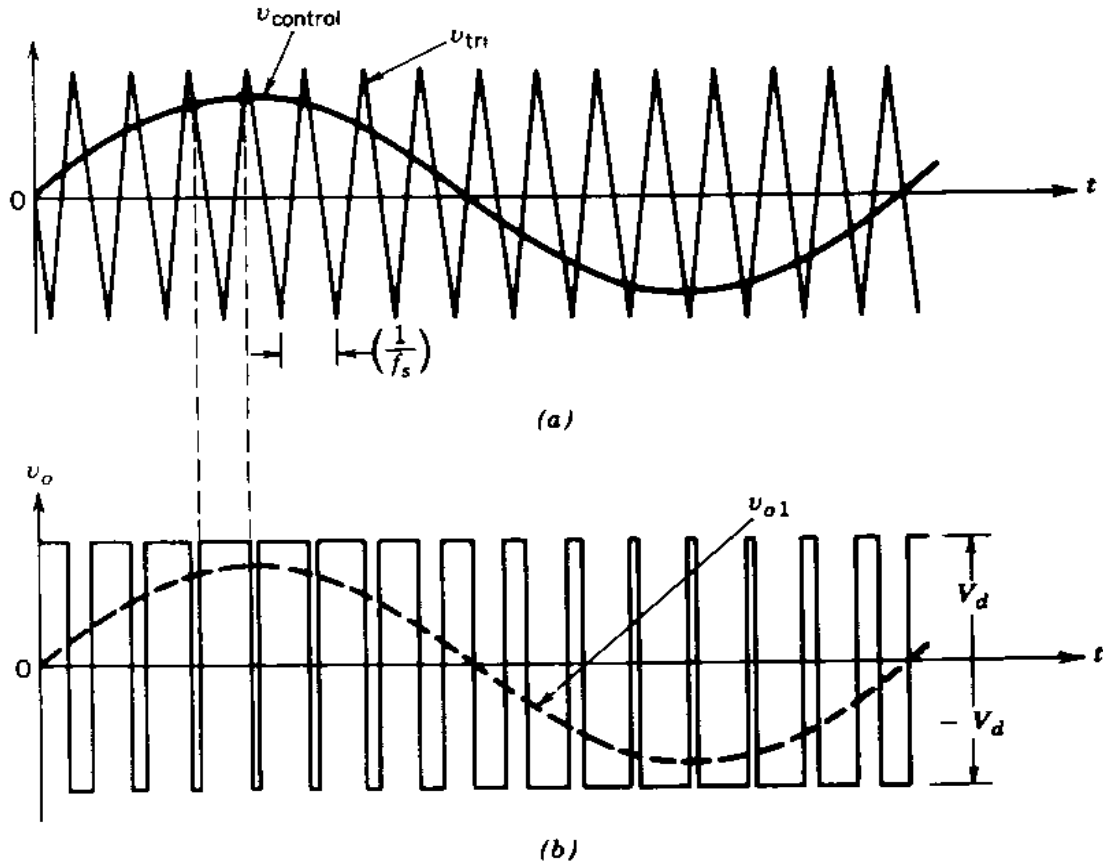
$$u_0(t) = u_{B0}(t) - u_{A0}(t) = 2u_{A0}(t) \quad (28)$$

Η κυματομορφή της u_0 φαίνεται στο Σχ. 3.9 και όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η τάση μεταβαίνει μεταξύ των επιπέδων $-V_{dc}$ και V_{dc} . Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου $(\hat{V}_0)_1$ δίνεται από τις σχέσεις:

$$\hat{V}_{01} = m_a \cdot V_{dc} \quad (29)$$

και

$$V_{dc} < \hat{V}_{01} < \frac{4}{\pi} V_{dc} \quad (30)$$



Σχήμα 3.9 Διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου.

3.3.3. Διαμόρφωση PWM μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου

Στη διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου οι διακόπτες στους δύο κλάδους του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα, όπως προηγουμένως. Εδώ οι δύο κλάδοι, A και B, του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της τριγωνικής u_{tri} με τη $u_{control}$ και τη $-u_{control}$ αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10, η σύγκριση του $u_{control}$ με την τριγωνική κυματομορφή έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα λογικά σήματα για τον έλεγχο του κλάδου A:

$$\begin{aligned} u_{control} > u_{tri} & \quad S1 \text{ άγει και } u_{AN} = V_{dc} \\ u_{control} < u_{tri} & \quad S2 \text{ άγει και } u_{AN} = 0 \end{aligned}$$

Για τον έλεγχο των διακοπών του κλάδου B, το $-u_{control}$ συγκρίνεται με την ίδια κυματομορφή, δίνοντας τα ακόλουθα:

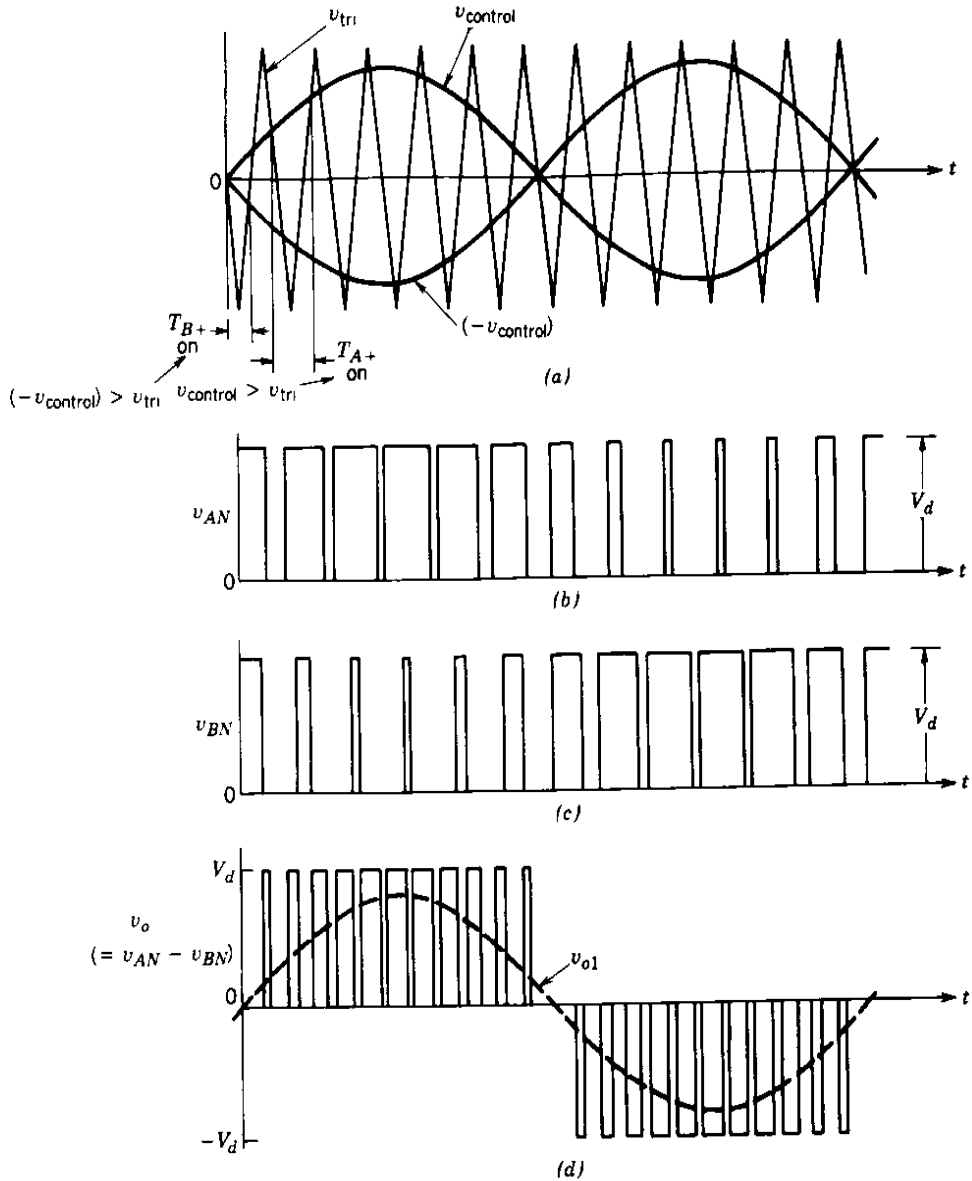
$$\begin{aligned}
 -U_{\text{control}} > u_{\text{tri}} & \quad \text{S3 άγει και } u_{\text{BN}} = V_{\text{dc}} \\
 -U_{\text{control}} < u_{\text{tri}} & \quad \text{S4 άγει και } u_{\text{BN}} = 0
 \end{aligned}$$

Λόγω της ύπαρξης των αντιπαράλληλων διόδων, οι τάσεις αυτές είναι ανεξάρτητες από τη φορά του ρεύματος εξόδου.

Ο συνδυασμός των παραπάνω περιπτώσεων μας δίνουν τέσσερεις δυνατές περιπτώσεις:

1. S1 και S4 κλειστοί: $u_{\text{AN}} = V_{\text{dc}}, u_{\text{AN}} = 0, u_{\text{AN}} = V_{\text{dc}}$
2. S2 και S4 κλειστοί: $u_{\text{AN}} = 0, u_{\text{AN}} = V_{\text{dc}}, u_{\text{AN}} = -V_{\text{dc}}$
3. S1 και S3 κλειστοί: $u_{\text{AN}} = V_{\text{dc}}, u_{\text{AN}} = V_{\text{dc}}, u_{\text{AN}} = 0$
4. S2 και S4 κλειστοί: $u_{\text{AN}} = 0, u_{\text{AN}} = 0, u_{\text{AN}} = 0$

Σε αυτή τη διάταξη PWM, όταν συμβαίνει μία μετάβαση, η τάση εξόδου αλλάζει μεταξύ δύο επιπέδων τάσης 0 και $+V_{\text{dc}}$ ή μεταξύ 0 και $-V_{\text{dc}}$. Για το λόγο αυτό, αυτή η μορφή διαμόρφωσης PWM ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμού με μονοπολική τάση εξόδου, σε αντίθεση με τη διάταξη PWM με διπολική τάση εξόδου (μεταξύ $-V_{\text{dc}}$ και $+V_{\text{dc}}$). Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα του “ουσιαστικού” διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου, σε σύγκριση με τη διάταξη διπολικής μετάβασης τάσης. Επίσης, τα άλματα της τάσης εξόδου σε κάθε μετάβαση μειώνονται σε V_{dc} από $2V_{\text{dc}}$. Τα πλεονεκτήματα αυτά εμφανίζονται στο φάσμα της τάσης εξόδου, όπου οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους. Αυτό είναι εύκολο να γίνει κατανοητό σ’ ένα μονοφασικό αντιστροφέα, αν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f (ο m_f πρέπει να είναι περιττός στη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου). Οι κυματομορφές της τάσης u_{AN} και u_{BN} μετατοπίζονται κατά 180° από τη θεμελιώδη συχνότητα f_1 , η μία με την άλλη. Επομένως, οι αρμονικοί όροι στη συχνότητα μετάβασης στις u_{AN} και u_{BN} έχουν την ίδια φάση (φ_{AN}



Σχήμα 3.10 Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου.

– $\varphi_{BN} = 180^\circ$ ($m_f=0$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαλοιφή του αρμονικού όρου στη συχνότητα μετάβασης στην τάση εξόδου $v_o = v_{AN} - v_{BN}$. Επίσης, εξαλείφονται οι πλευρικές ζώνες των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης. Κατά τρόπο παρόμοιο, εξαλείφεται η άλλη κύρια αρμονική με συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους, ενώ οι πλευρικές ζώνες της παραμένουν. Εδώ επίσης ισχύει

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_{dc} \quad (m_a \leq 1) \quad (31)$$

και

$$V_{dc} < \hat{V}_{o1}, \frac{4}{\pi} V_{dc} \quad (m_a > 1) \quad (32)$$

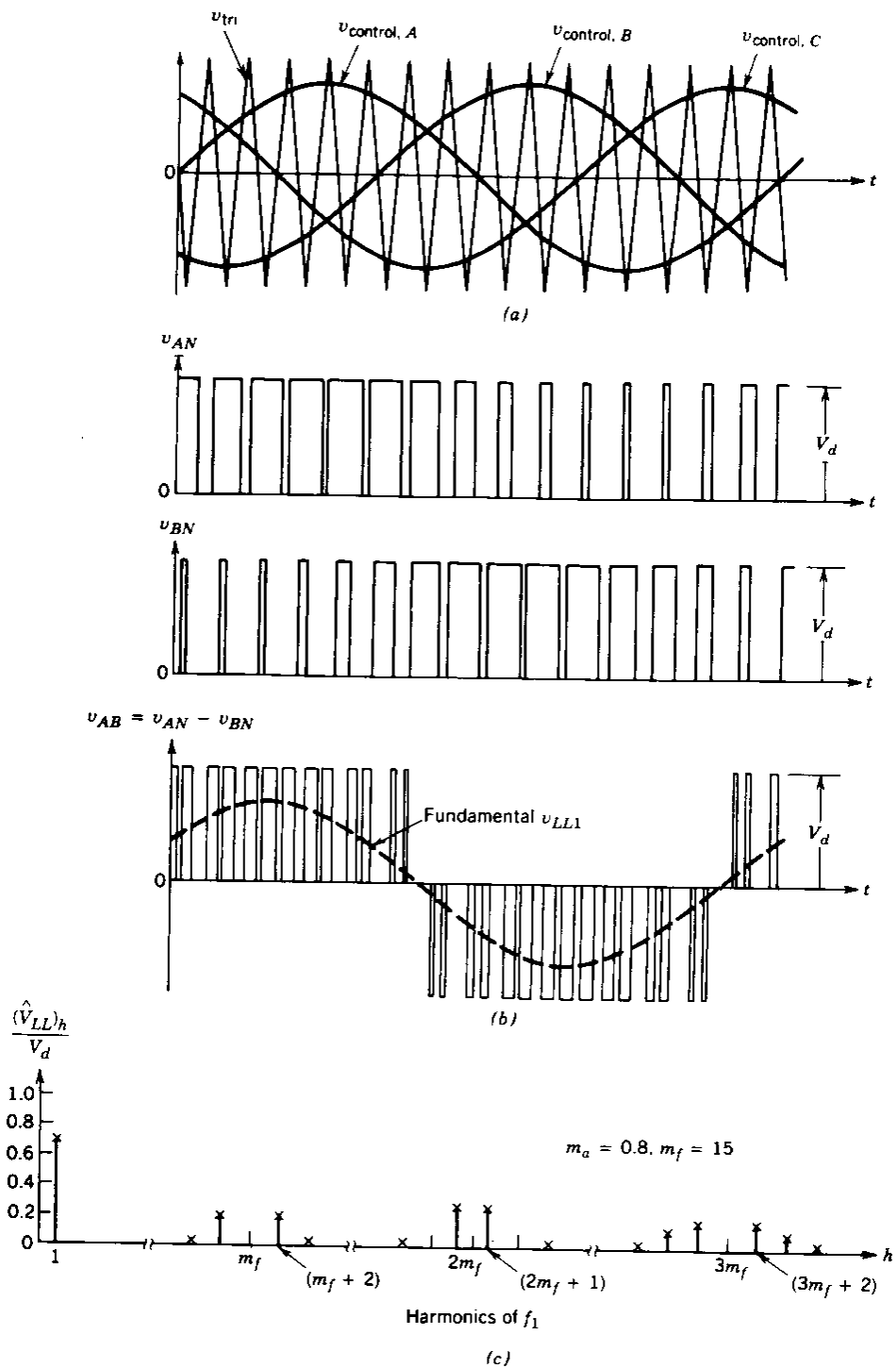
3.3.4. Διαμόρφωση PWM σε τριφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης

Παρόμοια με τους μονοφασικούς αντιστροφείς, ο αντικειμενικός σκοπός στους τριφασικούς αντιστροφείς με διαμόρφωση PWM είναι η μορφοποίηση και ο έλεγχος των τριφασικών τάσεων εξόδου κατά πλάτος και συχνότητα, με μία ουσιαστικά σταθερή τάση εισόδου V_{dc} . Για την επίτευξη συμμετρικών τριφασικών τάσεων εξόδου, συγκρίνεται η ίδια τριγωνική κυματομορφή με τρεις ημιτονοειδείς τάσεις ελέγχου, οι οποίες είναι κατά 120° εκτός φάσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 3.11, στις τάσεις εξόδου u_{AN} και u_{BN} , οι οποίες μετρούνται σε σχέση με τον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση, υπάρχει η ίδια ακριβώς dc συνιστώσα. Οι dc συνιστώσες απαλείφονται στις πολικές τάσεις, για παράδειγμα στην u_{AB} που φαίνεται στο Σχ. 3.11. Αυτό είναι παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει σ' ένα μονοφασικό αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα που λειτουργεί με διαμόρφωση PWM. Στους τριφασικούς αντιστροφείς, ενδιαφέρουν μόνο οι αρμονικές των πολικών τάσεων. Οι αρμονικές εξόδου οποιουδήποτε κλάδου, για παράδειγμα του u_{AN} , είναι ίδιες με τις αρμονικές του u_{AO} , όπου εμφανίζονται μόνο οι περιττές αρμονικές ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο τον m_f και τα πολλαπλάσιά του, με την προϋπόθεση ότι ο m_f είναι περιττός. Θεωρώντας μόνο την αρμονική στο m_f (το ίδιο ισχύει και στα περιττά πολλαπλάσιά του), η διαφορά φάσης μεταξύ της αρμονικής στο m_f των u_{AN} και u_{BN} είναι $(120m_f)^\circ$. Αυτή η διαφορά φάσης θα ισοδυναμεί με μηδέν, αν ο m_f είναι περιττός και πολλαπλάσιος του 3. Κατά συνέπεια, η αρμονική στον m_f δεν εμφανίζεται στην πολική τάση u_{AB} . Το ίδιο ισχύει και για τις αρμονικές στα περιττά πολλαπλάσια του m_f , αν ο m_f επιλέγεται περιττό πολλαπλάσιο του 3 (όπου ο λόγος επιλογής περιττού πολλαπλάσιου του 3 για τον m_f είναι η διατήρηση του m_f περιττού και, έτσι, η εξάλειψη των άρτιων αρμονικών). Έτσι, κάποιες από τις κύριες αρμονικές στον αντιστροφέα ενός κλάδου μπορούν να εξαλειφθούν από την πολική τάση ενός τριφασικού αντιστροφέα.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε για τη διαμόρφωση PWM:

1. Για χαμηλές τιμές του m_f , για την απαλοιφή των άρτιων αρμονικών, πρέπει να χρησιμοποιηθεί συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM και ο m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος. Επίσης, ο m_f πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του 3 για την απαλοιφή των κυριότερων αρμονικών από την πολική τάση.
2. Για μεγάλες τιμές του m_f , ισχύει ότι και για την περίπτωση της μονοφασικής διαμόρφωσης PWM.
3. Κατά την υπερδιαμόρφωση ($m_a > 1$), ανεξάρτητα από την τιμή του m_f , πρέπει να τηρηθούν οι συνθήκες που ισχύουν για μικρό m_f .



Σχήμα 3.11 Τριφασικές κυματομορφές με διαμόρφωση PWM και φάσμα αρμονικών (με $m_f=15$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Συσσωρευτές

4.1. Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές (μπαταρίες)

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 φωτοβολταϊκά συστήματα.

4.1. Αρχή λειτουργίας και είδη συσσωρευτών

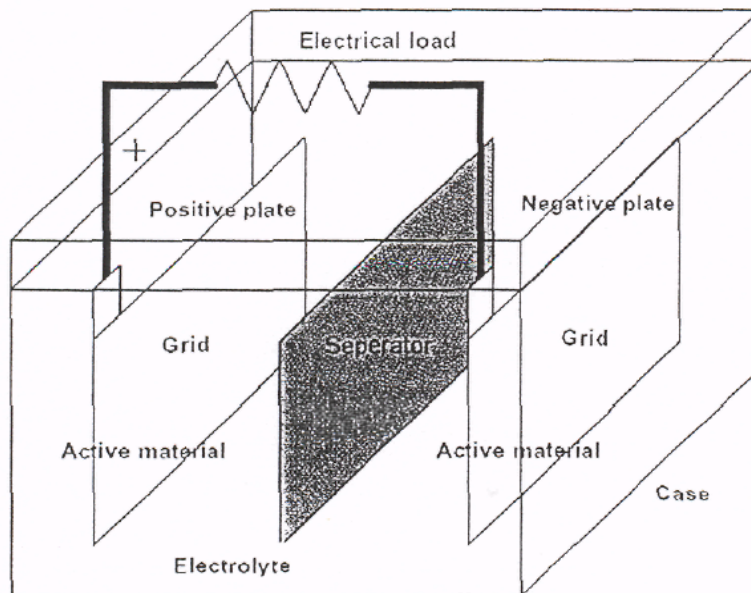
Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και, συνήθως, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα να αποταμιεύουν ενέργεια ανά πάσα 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 φωτοβολταϊκά 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 φωτοβολταϊκά συστήματα και ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι μπαταρίες μολύβδου.

4.2. Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας συσσωρευτών

Δομική μονάδα του συσσωρευτή είναι η κυψελίδα (cell), και μία εποπτική παρουσίαση της μονάδας αυτής δίνεται κατωτέρω σχήμα. 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 παρακάτω σχήματος θα γίνει μία περιγραφή των συστατικών μερών της κυψελίδας ώστε να γίνεται στη συνέχεια, πιο εύκολα και κατανοητά η αναφορά σε σχετικά θέματα.

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 θειικού οξέος (H_2SO_4) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.



Σχήμα. 4.1 Κυψελίδα συσσωρευτή

Ηλεκτρολύτης: Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγωγίμο 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 θειικού 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/cell 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 αγωγή 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.

4.3 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 gelled ή absorbed glass material (AGM).

Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου οι ανάγκες κατανάλωσης πολύ σπάνια συμβαδίζουν με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, περισσότερο κατάλληλοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν τη δυνατότητα να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς να αλλοιώνεται η 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 η κατανάλωση να παρέχεται με αξιοπιστία και για μεγάλες χρονικές περιόδους και άλλες φορές ο τόπος της εγκατάστασης είναι τόσο δυσπρόσιτος που προτιμώνται συσσωρευτές με μικρές ανάγκες συντήρησης και επίβλεψης.

Ιδιαίτερα για αυτόνομα φωτοβολταϊκά 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 φωτοβολταϊκά 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 φωτοβολταϊκά 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 οπλισμένα θετικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται το συνοδευτικό OpzS, το οποίο είναι και η περίπτωση του φωτοβολταϊκού που χρησιμοποιούμε. Έτσι, το συνοδευτικό 5OpzS, υποδεικνύει κυψελίδα με 5 θετικές πλάκες, τύπου OpzS.

4.4. Χαρακτηριστικά μεγέθη, 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.

A. 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 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. Έτσι, μία μπαταρία με χωρητικότητα C—375 Ah 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 $\frac{3}{4}$ της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% SOC. Μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί το SOC 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.

B. 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 εκφορτίσης και από τον ρυθμό εκφορτίσης. Στα τυπικά φωτοβολταϊκά συστήματα, προβλέπεται μία τάση αποκοπής του φορτίου από τη συσκευή του ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και έτσι καθορίζεται το επιτρεπόμενο βάθος εκφορτίσης για δεδομένο ρυθμό εκφορτίσης. Οι τιμές του επιτρεπόμενου DOD μπορούν να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας.

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 DOD στις θερμοκρασίες αυτές. Η τάση του βάθους εκφόρτισης σχετίζεται με τον ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

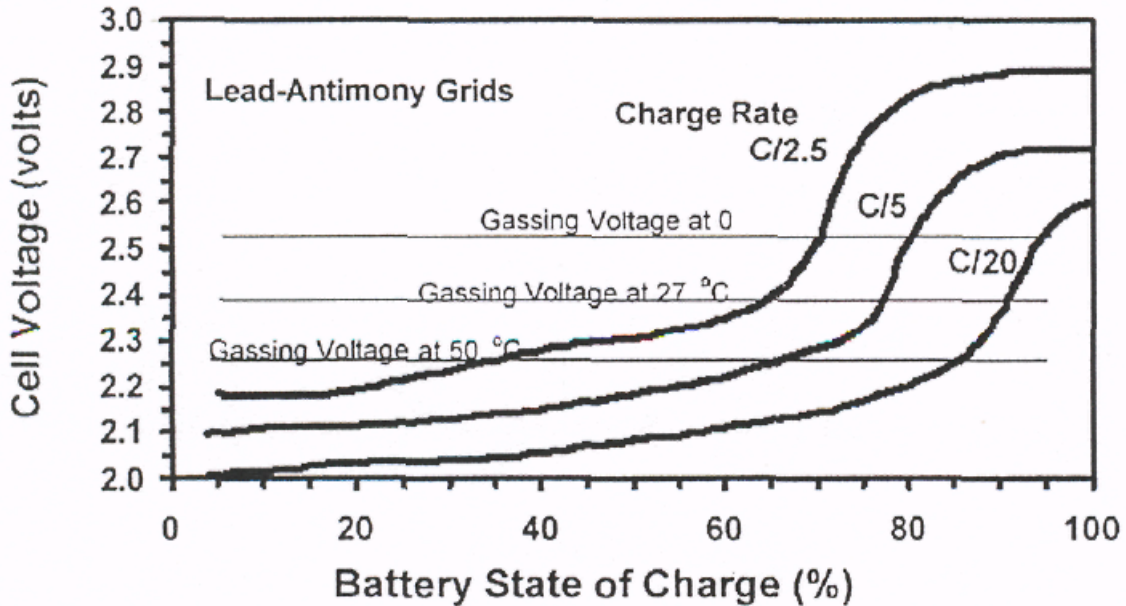
Γ. Αυτοεκφόρτιση.

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση του SOC (state of charge), χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποια κατανάλωση. Τα αίτια 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% του SOC ανά ημέρα και για τον λόγο αυτό, οι συσσωρευτές πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει κατανάλωση.

Δ. 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 φωτοβολταϊκά συστήματα (και που αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο), 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 το επιδιωκόμενο SOC είναι η - θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή, μειώνεται όμως η τάση εκλύσεως αερίων. Έτσι, το μέγιστο SOC που μπορεί να επιτευχθεί σε δεδομένη θερμοκρασία, κατά κάποιο τρόπο φράσσεται από την τάση εκλύσεως αερίων. Στο διάγραμμα του σχήματος που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σχέση της τάσης ανά κυψελίδα και του 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 4.2 Διάγραμμα 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.

Ε. Συντελεστής φόρτισης και απόδοση ισχύος.

Τα αμπερώρια (Ah) που είναι απαραίτητα για τη φόρτιση ενός συσσωρευτή και την αύξηση του SOC κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό είναι, κατά κανόνα, περισσότερα από τα Ah που αποδίδει όταν εκφορτιστεί κατά το ίδιο ποσοστό του SOC. Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής φόρτισης ως το κλάσμα της εισερχόμενης ποσότητας Ah προς την εξερχόμενη ποσότητα Ah, δηλαδή ισχύει:

$$\text{Συντελεστής φόρτισης} = \frac{\text{εισερχόμενη ποσότητα Ah}}{\text{εξερχόμενη ποσότητα Ah}} \quad (33)$$

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:

$$\text{Απόδοση ισχύος} = \frac{\text{εξερχόμενη ενέργεια (KW)}}{\text{εισερχόμενη ενέργεια (KW)}} \quad (34)$$

ΣΤ. 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 φωτοβολταϊκά 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 συντόμηση 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 φωτοβολταϊκά 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.

4.5. Υπολογισμός αερισμού

Όπως ήδη αναφέραμε, οι συσσωρευτές κατά τη λειτουργία τους εκλύουν αέρια. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμού εξαερισμού όταν οι συσσωρευτές αποθηκεύονται σε κλειστούς χώρους.

Ο υπολογισμός γίνεται για την περίπτωση μέγιστης έκλυσης αερίων που είναι η κατάσταση συντήρησης. Εάν θεωρήσει κανείς ρεύμα συντήρησης I σε (A), τότε το ποσοστό του αέρα που πρέπει να κυκλοφορεί σε λίτρα ανά ώρα είναι:

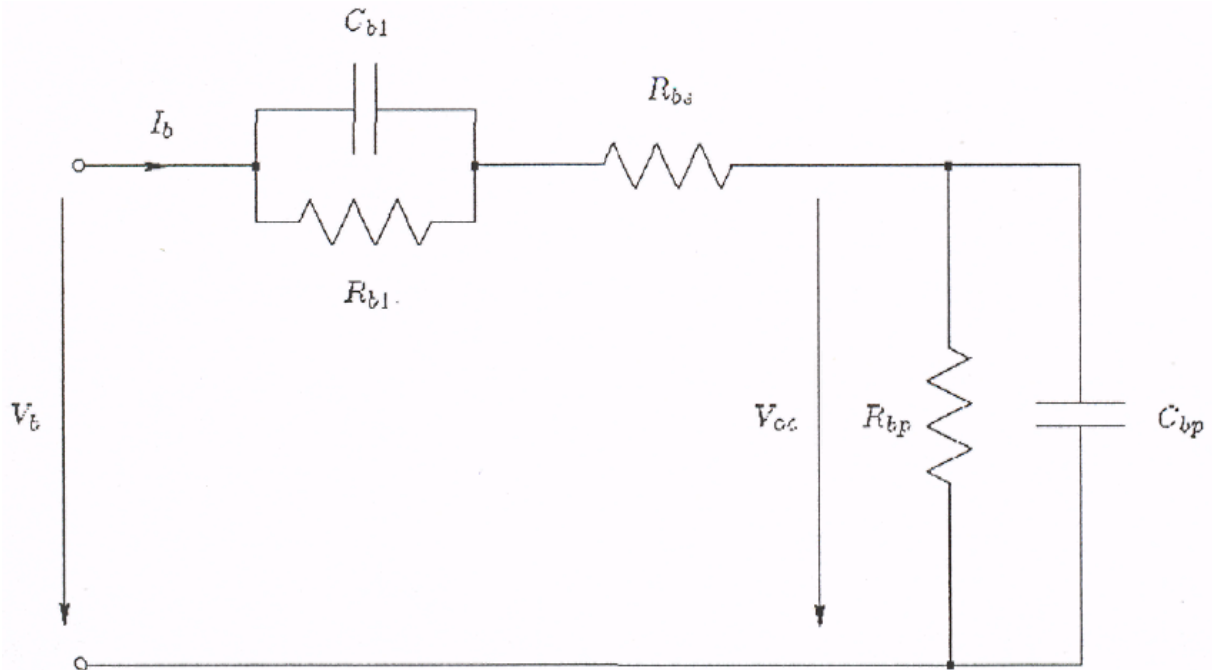
$$V=55 \cdot n \cdot I \text{ (l/h)} \quad (35)$$

όπου n ο αριθμός των στοιχείων.

Το ρεύμα συντήρησης I είναι 1% της χωρητικότητας σε Ah, για 2,23V και 2% για 2,4V.

4.6. Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε φωτοβολταϊκό σύστημα.

Από όσα έχουν ήδη αναφερθεί και θα αναφερθούν στα επόμενα κεφαλαία, οι συσσωρευτές είναι αναπόσπαστο μέρος των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για να βελτιστοποιηθεί η συνεργασία τους με τις φωτοβολταϊκές 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 4.3 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 φωτοβολταϊκού συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Ρυθμιστές Φόρτισης

5.1. Ρυθμιστής φόρτισης

Οι τεχνικές με τις οποίες οι μπαταρίες φορτίζονται μέσω των Φ/Β συστημάτων είναι πολλές. Ο πιο απλός-απλοϊκός και λιγότερο ακριβός τρόπος είναι η κατευθείαν σύνδεση της Φ/Β γεννήτριας με την μπαταρία.

Αυτή είναι μία μέθοδος που τα αποτελέσματα της "κοστίζουν ακριβά", γιατί το Φ/Β σύστημα λειτουργεί σαν μονοπάτι στο οποίο διαχέεται η ενέργεια και έτσι η μπαταρία μπορεί να ξεφορτιστεί σταδιακά κατά τη διάρκεια της νύχτας από την ενέργεια που έχει συσσωρευτεί την προηγούμενη μέρα. Για να αποφευχθεί αυτή η διαρροή συνδέεται μία δίοδος παρεμπόδισης ανάμεσα στο Φ/Β σύστημα και την μπαταρία. Έτσι πετυχαίνουμε να φορτίζουμε από το Φ/Β την μπαταρία την ημέρα και με τη δίοδο εμποδίζουμε την διαρροή τη νύχτα.

Αλλά παρ' όλα αυτά, είναι απαραίτητη η χρήση ρυθμιστών (regulators). Ρυθμιστής λέγεται το σύστημα που καθορίζει τη μέγιστη τάση που φορτίζεται η μπαταρία και που συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή της. Εάν η ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας ήταν σταθερή, οι ρυθμιστές δεν θα χρειάζονται. Αλλά παράγοντες όπως ο καιρός, οι εποχιακές διαφορές, οι συννεφίες και οι αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος τείνουν να κάνουν τα Φ/Β συστήματα περισσότερο δυναμικές πηγές ενέργειας. Ας υποθέσουμε ότι ένα Φ/Β σύστημα υπολογίζεται για χειμερινές συνθήκες όπου η ακτινοβολία είναι 50% λιγότερη από τις τιμές του καλοκαιριού. Τότε κατά τους καλοκαιρινούς μήνες θα παράγεται ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας. Αν αυτή η αύξηση της ενέργειας δεν διοχετευτεί σ' ένα πρόσθετο φόρτο τότε μπορεί να προκληθεί σημαντικά μεγάλη ζημιά στη μπαταρία. Όταν τα Φ/Β παράγουν περισσότερη ενέργεια σ' ένα 24ωρο απ' όσο έχει υπολογιστεί, τότε οι μπαταρίες μπορεί σε κάποιο πρωινό να φτάσουν στο μέγιστο σημείο φόρτισης. Το μεσημέρι η υπερβολική ενέργεια απ' τα Φ/Β θα προκαλέσουν στις μπαταρίες υπερφόρτωση. Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπάρχει υπερβολική εξαέρωση και ταυτόχρονα απώλεια του ηλεκτρολύτη. Επίσης άλλα φυσιολογικά αποτελέσματα είναι το στράβωμα των ηλεκτροδίων ή η καταστροφή της επίστρωσης των πλακών.

Άρα λοιπόν σ' ένα Φ/Β σύστημα όπου οι συνθήκες φόρτισης είναι απρόβλεπτες και είναι ρυθμισμένο να λειτουργεί είτε σε συνθήκες με μέση ηλιοφάνεια ή πολύ ηλιοφάνεια και σε διαφορετικές εποχές, οι ρυθμιστές είναι απαραίτητοι για να προστατεύουν τις μπαταρίες.

5.2. Τι είναι και πως λειτουργούν οι ρυθμιστές φόρτισης των μπαταριών

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια απλή ηλεκτρονική συσκευή που φροντίζει για τη σωστή φόρτιση των συσσωρευτών (μπαταριών) του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ελέγχει τη διαδικασία φόρτισης και σταματά τη φόρτιση όταν διαπιστώσει ότι η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως. Αλλιώς θα υπήρχε ο σοβαρός κίνδυνος να καταστραφεί η μπαταρία.

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.

5.3. Επιλογή του σωστού ρυθμιστή φόρτισης

Το μέγεθος του ρυθμιστή φόρτισης εξαρτάται από το μέγεθος των φωτοβολταϊκών που θα συνδέουμε πάνω του. Πρέπει να υπερκαλύπτει την συνολική ένταση σε Ampere των φωτοβολταϊκών. Αν, για παράδειγμα, η ονομαστική ένταση σε Ampere των φωτοβολταϊκών είναι 10A, τότε πρέπει να επιλέξουμε ένα ρυθμιστή φόρτισης 12A.

Επίσης, πρέπει να είναι κατάλληλος και για την τάση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αν τα φωτοβολταϊκά βγάζουν συνολική τάση 12V, επιλέγουμε ρυθμιστή για φωτοβολταϊκά 12V. Αν τα φωτοβολταϊκά μας βγάζουν συνολική τάση 24V, επιλέγουμε ρυθμιστή για φωτοβολταϊκά 24V.

Καλό είναι να προβλέπουμε και για το μέλλον. Αν έχουμε σκοπό να επεκτείνουμε το φωτοβολταϊκό μας σύστημα με περισσότερα φωτοβολταϊκά πάνελ στο μέλλον,

τότε καλό είναι να επιλέξουμε ένα μεγαλύτερο ρυθμιστή φόρτισης για να καλύπτει και τις μελλοντικές ανάγκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

6.1. Κάλυψη αναγκών με φωτοβολταϊκά .

Φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη, ηχητική κάλυψη... οποιαδήποτε ουσιαστικά ενεργειακή ανάγκη μπορεί να καλυφθεί, με ένα κατάλληλα σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να ξέρει κανείς για τα φωτοβολταϊκά είναι ότι παράγουν συνεχές ρεύμα. Αυτό σημαίνει είτε ότι τα χρησιμοποιούμε με συσκευές συνεχούς ρεύματος είτε μετατρέπουμε αυτό το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο 230 V (σε ρεύμα ίδιο με της ΔΕΗ δηλαδή) με τη βοήθεια κάποιων ηλεκτρονικών συσκευών.

Για λόγους απόδοσης και οικονομίας πάντως, δεν συνιστάται η χρήση φωτοβολταϊκών 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.

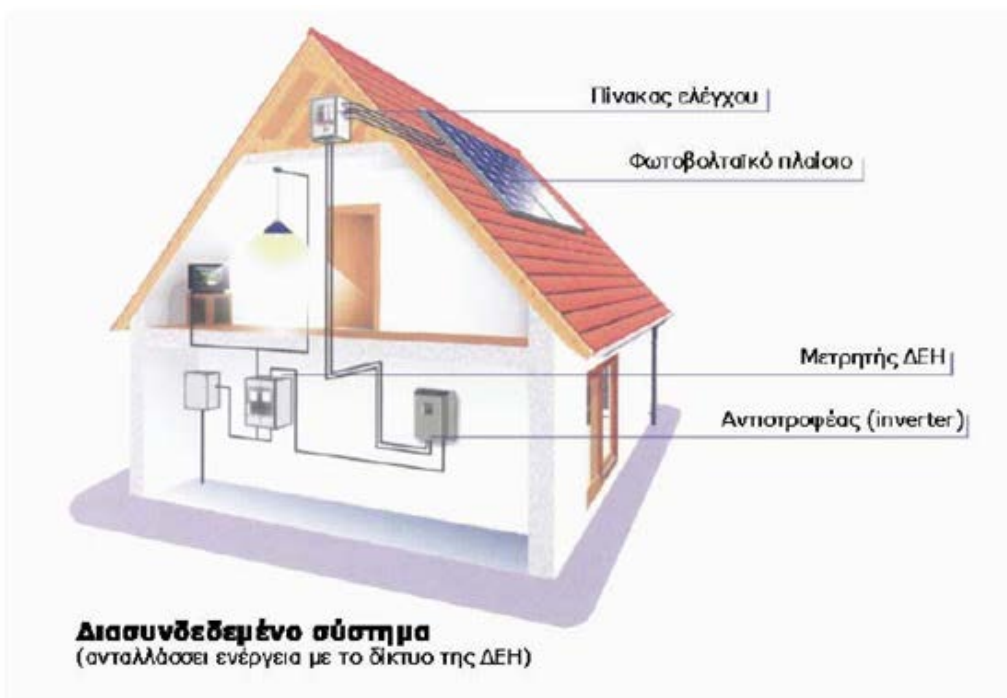
Από την άλλη μεριά, ο φωτισμός με λάμπες εξοικονόμησης και η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών (υπολογιστές, ηχητικά συστήματα, ψυγεία, τηλεοράσεις, τηλεπικοινωνίες κ.λπ) αποτελούν ανάγκες που μπορούν να καλυφθούν εύκολα και οικονομικά με φωτοβολταϊκά.

6.7. Διασυνδεδεμένα συστήματα

Μια φωτοβολταϊκή 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 φωτοβολταϊκά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ –διασυνδεδεμένο (grid-connected system) , δηλ. φωτοβολταϊκά 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.



Έτσι το σύστημα, καταναλώνει ρεύμα από το δίκτυο όταν το φωτοβολταϊκό 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 φωτοβολταϊκά 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.

6.8. Η αυτονομία στα φωτοβολταϊκά.

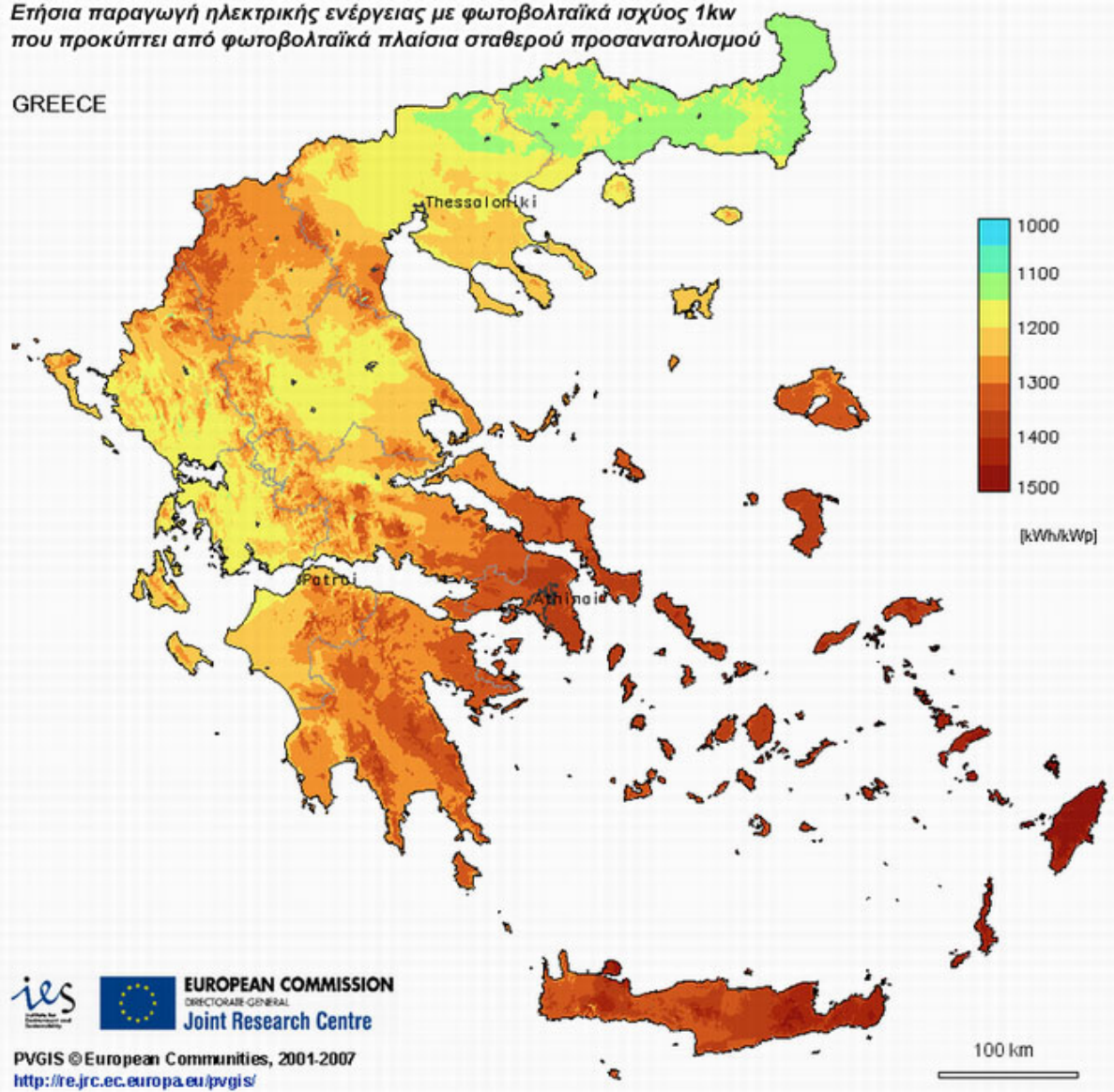
Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τον ήλιο με φωτοβολταϊκά χρειάζεται το φως της ηλιακής ακτινοβολίας, όχι τη θερμότητά της. Ακόμη και μια συννεφιασμένη χειμωνιάτικη μέρα θα υπάρχει άφθονο διάχυτο φως και τα φωτοβολταϊκά θα συνεχίσουν να παράγουν ηλεκτρισμό, έστω και με μειωμένη απόδοση (π.χ. ακόμα και με απόλυτη συννεφιά, το φωτοβολταϊκό 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 φωτοβολταϊκών 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.

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.

Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά ισχύος 1kw που προκύπτει από φωτοβολταϊκά πλαίσια σταθερού προσανατολισμού

GREECE



Σε γενικές γραμμές, ένα φωτοβολταϊκό 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 φωτοβολταϊκό παράγει περισσότερο ηλιακό ηλεκτρισμό απ' ότι στις βόρειες. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως ένα φωτοβολταϊκό 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.

6.9. Ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος .

Παρότι μπορεί κανείς να δώσει κάποια γενική κατεύθυνση όπως ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μερικών κιλοβάτ (KWp) μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ενός κτιρίου , θα πρέπει να γίνει μια εμπειριστατωμένη μελέτη των αναγκών του. 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 κτιρίου 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 σύστημά 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.

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 εγκατάστασης. 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 καλυφτούν οι ανάγκες αυτές με την παραγωγή ηλεκτρισμού από τον ήλιο ή άλλες καθαρές πηγές ενέργειας.

6.10. 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 φωτοβολταϊκά του εμπορίου). Αν πάλι τοποθετηθούν άμορφα φωτοβολταϊκά, 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 φωτοβολταϊκά 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 φωτοβολταϊκού 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 είναι αυτόνομο το σύστημα).
5. Υπόψη ότι μαζί με τις βάσεις, ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα ζυγίζει περίπου 15-20 κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο. Αυτό σχεδόν πάντα δεν συνιστά πρόβλημα.

6.11. Υβριδικά συστήματα .

Συνδυάζουν ηλεκτρικό ρεύμα που προέρχεται από πετρελαιογεννήτριες, ανεμογεννήτριες, μικρές υδροηλεκτρικές γεννήτριες και φωτοβολταϊκά 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 καί 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 H/Z, συνήθως ενεργοποιείται αυτόματα σε έκτακτες περιπτώσεις για να υποβοηθήσει το φωτοβολταϊκό 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

Μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

1. Μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Λόγω της αδυναμίας να προμηθευτούμε τα κατάλληλα έγγραφα και μελέτες μιας ήδη υπάρχουσας ξενοδοχειακής μονάδας, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα μελετηθεί για ένα ιδεατό ξενοδοχείο το οποίο λειτουργεί κυρίως την καλοκαιρινή σεζόν. Από Απρίλιο μέχρι Οκτώβρη και τοποθετείται σε έναν οικισμό κοντά στα Χανιά της Κρήτης.

Η συγκεκριμένη μονάδα, λοιπόν, αποτελείται από δύο υπέργειους ορόφους και διαθέτει 20 πανομοιότυπα (από πλευράς ηλεκτρικής εγκατάστασης – ηλεκτρικών καταναλωτών) δωμάτια. Δε διαθέτει κουζίνα, ανελκυστήρα ή πισίνα. Επίσης, η ανάγκες για ζεστό νερό καλύπτονται από ηλιακό θερμοσίφωνα. Είναι, δηλαδή, μια μικρή μονάδα.

Ο σχεδιασμός πάντα ξεκινά με την εκτίμηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων του συστήματος. Ύστερα από προσεκτική έρευνα, απαριθμούνται οι διάφορες ενδεχόμενες χρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και καταγράφονται όλες οι ηλεκτρικές συσκευές, η ισχύς τους και ο πιθανός χρόνος λειτουργίας τους στην διάρκεια του 24ώρου. Συχνά είναι χρήσιμο να καταγράφεται η πιθανότητα ταυτόχρονης λειτουργίας περισσοτέρων συσκευών, ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς στην ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην περίπτωση μας, επιλέχθηκαν μοντέρνες οικιακές συσκευές, ενεργειακής κλάσης A, δηλαδή χαμηλότερης ηλεκτρικής κατανάλωσης. Για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κρίνεται αναγκαία η αποφυγή ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη θερμική κατανάλωση. Τέτοιες συσκευές αποτελούν οι ηλεκτρικές κουζίνες, τα ηλεκτρικά καλοριφέρ, τα αερόθερμα, οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες, οι σταθεροί υπολογιστές (τύπου desktop) κ.ά. και μπορούν να αντικατασταθούν από κουζίνες και θερμάστρες υγραερίου, ηλιακούς θερμοσίφωνες και φορητούς υπολογιστές (laptop). Στον πίνακα που ακολουθεί καταχωρήσαμε τα στοιχεία ημερήσιας κατανάλωσης κατά την διάρκεια των θερινών μηνών.

Πίνακας 1. Ηλεκτρικές καταναλώσεις δωματίου				
Περιγραφή φορτίου	Αριθμός συσκευών	Ισχύς	Ώρες λειτουργίας	Ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση
Ψυγείοκαταψύκτης	1	800 W	3 h	4800 Wh
Τηλεόραση (έγχρωμη)	1	41 W	4 h	164 Wh
Αναμονή τηλεόρασης	1	8 W	20 h	160 Wh
Στεγνωτήρας μαλλιών	1	1800 W	0.25 h	450 Wh
Αναδευτήρας καφέ	1	15 W	0.05 h	0.75 Wh
Φωτισμός (εσωτερικός)	2	40 W	6 h	480 Wh
Φωτισμός (εσωτερικός)	3	20 W	6 h	360 Wh
Φωτισμός (εξωτερικός)	2	40 W	3 h	240 Wh
Κλιματιστικό (7000Btu)	1	875 W	3 h	2625 Wh
Σύνολο		3751 W		6879.75 Wh

Πίνακας 2. Λοιπές καταναλώσεις ξενοδοχείου				
Περιγραφή φορτίου	Αριθμός συσκευών	Ισχύς	Ώρες λειτουργίας	Ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση
Ψυγείοκαταψύκτης	1	800 W	3 h	2400 Wh
Τηλεόραση (έγχρωμη)	1	41 W	4 h	164 Wh
Αναμονή τηλεόρασης	1	8 W	20 h	160 Wh
Laptop	1	50 W	24 h	1200 Wh
Εκτυπωτής	1	20 W	0.005 h	0.1 Wh
Φωτισμός (εσωτερικός)	40	20 W	13 h	10400 Wh
Φωτισμός (εξωτερικός)	10	40 W	10 h	4000 Wh
Κλιματιστικό (7000Btu)	1	875 W	10 h	8750 Wh
Ηλεκτρική σκούπα	1	1400 W	3 h	4200 Wh
Αυτόματος τηλεφωνητής	1	3 W	24 h	72 Wh
Σύνολο		3751 W		31346.1 Wh

Οπότε, η ημερήσια μέση κατανάλωση του ξενοδοχείου είναι:

$$20 \times 6879,75 + 31346,1 = 168941,1 \text{ Wh} = 168,9411 \text{ kWh}$$

Όπως προέκυψε από τα παραπάνω δεδομένα, η μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση είναι 168,94 kWh. Ωστόσο, ποτέ δεν μπορούμε να είμαστε πλήρως ακριβείς στις προβλέψεις μας επειδή είναι πολύ πιθανό να προκύψουν και πρόσθετες ηλεκτρικές καταναλώσεις κατά την διάρκεια της ημέρας, όπως η φόρτιση ενός κινητού τηλεφώνου, η χρήση κάποιας μικροσυσκευής ή ακόμη και η κατανάλωση ενέργειας από κάποια συσκευή που βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να συνεχίσουμε την μελέτη μας θεωρώντας ότι η μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση είναι 180 kWh.

Από τους Πίνακες 1 και 2 παρατηρούμε ότι η ενέργεια που καταναλώνεται από τα κλιματιστικά είναι ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό της συνολικής της τάξης του 36%. Στην περίπτωση που δεν είναι σε χρήση τα κλιματιστικά απαιτείται ενέργεια 107,691 kWh, προσεγγιστικά 110 kWh.

2. Η χρονική περίοδος

Είναι προφανές ότι το σύστημα πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου, αφού το ξενοδοχείο που μελετάμε είναι τουριστική μονάδα. Συνεπώς, τα μεγέθη του φωτοβολταϊκού συστήματος (μέγεθος συλλεκτών, συσσωρευτών και λοιπών διατάξεων) πρέπει να προσαρμόζονται στις συνθήκες ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και την κατανάλωση, ανάλογα με την κλίση των συλλεκτών που θα επιλέξουμε.

Θα ήταν σωστό να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ενέργεια για δύο περιπτώσεις. Πρώτον, για το μήνα Ιούλιο όταν η κατανάλωση ενέργειας αλλά και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία βρίσκονται στο μέγιστο. Δεύτερον, κατά το μήνα Απρίλιο όταν η ακτινοβολία βρίσκεται στο μικρότερο επίπεδο αλλά δεν είναι απαραίτητη η χρήση των κλιματιστικών και έτσι η εγκατάσταση απαλλάσσεται από ένα μεγάλο φορτίο.

3. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια

3.1. Η κλίση των συλλεκτών

Η ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί μια επιφάνεια εξαρτάται από την κλίση και τον προσανατολισμό της. Για μια επιφάνεια σε έναν συγκεκριμένο τόπο, η

αύξηση της κλίσης της έχει σαν αποτέλεσμα να δέχεται περισσότερη ακτινοβολία τον χειμώνα από ότι το καλοκαίρι. Έτσι, είναι σύνηθες σε ηλιακές εφαρμογές που απαιτείται να γίνει χρήση της ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες τον χειμώνα, η κλίση τους να είναι μεγάλη ενώ αν οι συλλέκτες χρησιμοποιούνται το καλοκαίρι η κλίση τους να είναι μικρή.

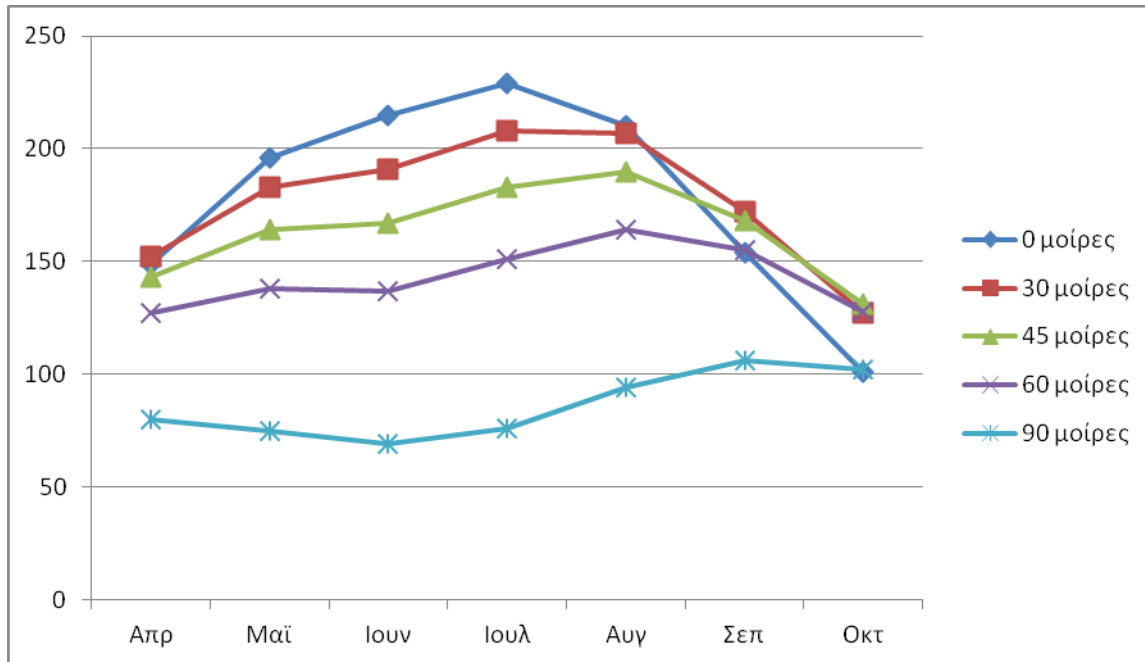
Το μέρος που θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα, όπως ήδη αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, είναι ένας οικισμός κοντά στα Χανιά. Δηλαδή πρόκειται για τόπο γεωγραφικού πλάτους 35° . Στον Πίνακα 1, που ακολουθεί, αναγράφεται η συνολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε συλλέκτες διαφόρων κλίσεων στον προς μελέτη τόπο. Κατόπιν, στον Πίνακα 2 υπολογίστηκε, μέσω του Πίνακα 1, η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε συλλέκτες διαφόρων κλίσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Συνολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία (KWh/m^2) με διάφορα επίπεδα κλίσης στα Χανιά.

	0°	30°	45°	60°	90°
Απρίλιος	149	152	143	127	80
Μάιος	196	183	164	138	75
Ιούνιος	215	191	167	137	69
Ιούλιος	229	208	183	151	76
Αύγουστος	210	207	190	164	94
Σεπτέμβριος	154	172	168	155	106
Οκτώβριος	101	127	131	128	102
Σύνολο	1254	1240	1146	1000	602

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (KWh/m^2) με διάφορα επίπεδα κλίσης στα Χανιά.

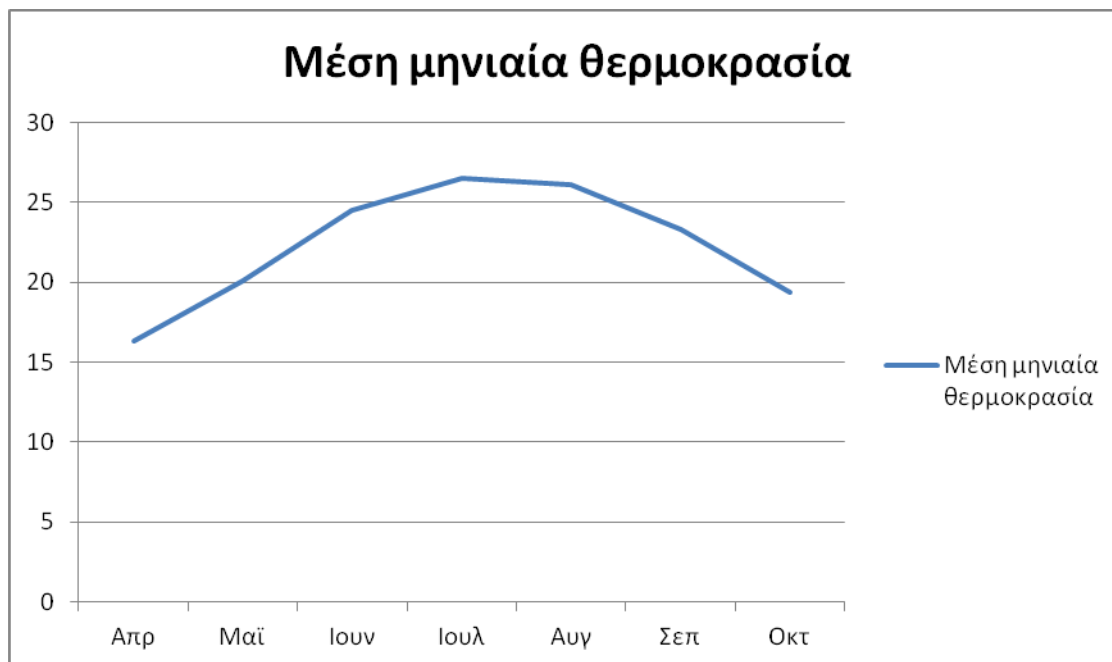
	0°	30°	45°	60°	90°
Απρ	4,966	5,066	4,766	4,233	2,666
Μαϊ	6,322	5,903	5,290	4,451	2,419
Ιουν	7,166	6,366	5,566	4,566	2,3
Ιουλ	7,387	6,709	5,903	4,870	2,451
Αυγ	6,774	6,677	6,129	5,290	3,032
Σεπ	5,133	5,733	5,6	5,166	3,533
Οκτ	3,258	4,096	4,225	4,129	3,290
Μέσος όρος	5,858	5,793	5,354	4,672	2,813



Σχήμα 1

Μελετώντας το διάγραμμα του Σχήματος 1, παρατηρούμε ότι η χρήση επίπεδων συλλεκτών (κλίση 0°) παρουσιάζει μεγάλη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτούς μετά το μήνα Αύγουστο σε σχέση με τις υπόλοιπες κλίσεις. Είναι ολοφάνερο, όμως, πως κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης περιόδου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι η μεγαλύτερη. Επίσης, η συνολική ακτινοβολία κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών είναι η μεγαλύτερη με τη χρήση της κλίσης των 0° .

Παρότι μετά τον Αύγουστο η κλίση 30° των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι πιο αποδοτική δε θα την επιλέξουμε διότι κατά τους θερινούς μήνες μεγιστοποιείται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της χρήσης των κλιματιστικών.

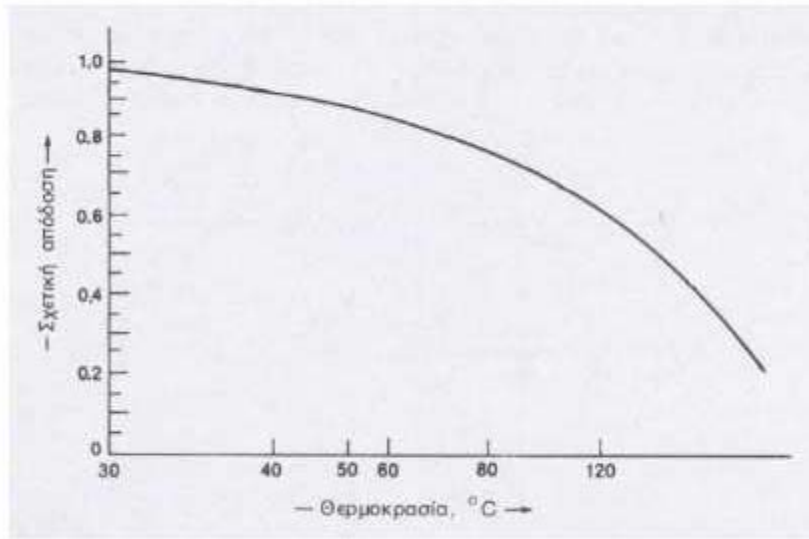


Σχήμα 2

3.2. Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής

Περίπτωση Α

Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε ότι την μικρότερη μέση τιμή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έχει ο μήνας Απρίλιος και η μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας είναι 16,3°C (Πίνακας 4). Δεχόμενοι ότι η θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων είναι κατά 30^ο μεγαλύτερη, καταλήγουμε στους 46,3^ο για τον μήνα Απρίλιο. Επομένως, από το διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 3) εύκολα βρίσκουμε τον συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ} :



Σχήμα 3. Σχετική απόδοση-θερμοκρασία

Άρα,

$$\sigma_{\theta} = 0,90.$$

Όσο αφορά την ρύπανση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, προβλέπουμε ότι λόγω των ανέμων και της σκόνης, θα γίνεται επιθεώρηση κι ενδεχομένως καθαρισμός της επιφάνειάς τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Έτσι, δεχόμαστε για τον συντελεστή καθαρότητας την τιμή 0,9 για όλες τις εποχές του έτους:

$$\sigma_{\rho} = 0,90$$

$$P_a(kW_p) = \frac{E \left(\frac{kWh}{d} \right) \times 1 \left(\frac{kW}{m^2} \right)}{\Pi \left(\frac{kWh}{m^2 \cdot d} \right) \times \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho}} \rightarrow$$

$$P_a(kW_p) = \frac{110 \left(\frac{kWh}{d} \right) \times 1 \left(\frac{kW}{m^2} \right)}{3,258 \left(\frac{kWh}{m^2 \cdot d} \right) \times 0,90 \times 0,90} = 41,68 kW$$

Στην συνέχεια, προχωράμε σε μια χονδρική εκτίμηση των απωλειών του συστήματος. Παίρνοντας ως συντελεστή απόδοσης 85% για τους συσσωρευτές, 97% για τον αναστροφέα DC/AC και 97% για τους αγωγούς του συστήματος, καταλήγουμε σε συνολικό συντελεστή απόδοσης:

$$a = 0.85 \times 0.97 \times 0.97 = 0.799$$

Επομένως, η ελάχιστη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας πρέπει να είναι:

$$P'_a = \frac{P_a}{a} = \frac{41,68 \text{ kW}}{0,799} = 52,16 \text{ kW}$$

Άρα:

$$\underline{\text{Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκής γεννήτριας} = 52.16 \text{ kW}}$$

Περίπτωση Β

Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε ότι την μεγαλύτερη μέση τιμή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έχει ο μήνας Ιούλιος και η μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας είναι 26,5°C (Πίνακας 4). Δεχόμενοι ότι η θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων είναι κατά 30^ο μεγαλύτερη, καταλήγουμε στους 56,5^ο για τον μήνα Ιούλιο. Επομένως, από το διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 3) εύκολα βρίσκουμε τον συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_θ :

Άρα,

$$\sigma_\theta = 0,85.$$

Όσο αφορά την ρύπανση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, προβλέπουμε ότι λόγω των ανέμων και της σκόνης, θα γίνεται επιθεώρηση κι ενδεχομένως καθαρισμός της επιφάνειάς τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Έτσι, δεχόμαστε για τον συντελεστή καθαρότητας την τιμή 0,9 για όλες τις εποχές του έτους:

$$\sigma_\rho = 0,90$$

$$P_a (\text{kW}_p) = \frac{E \left(\frac{\text{kWh}}{\text{d}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)}{\Pi \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right) \times \sigma_\theta \times \sigma_\rho} \rightarrow$$

$$P_{\alpha}(kW_p) = \frac{180 \left(\frac{kWh}{d}\right) \times 1 \left(\frac{kW}{m^2}\right)}{7,387 \left(\frac{kWh}{m^2 \cdot d}\right) \times 0,85 \times 0,90} = 31,85 kW$$

Στην συνέχεια, προχωράμε σε μια χονδρική εκτίμηση των απωλειών του συστήματος. Παίρνοντας ως συντελεστή απόδοσης 85% για τους συσσωρευτές, 97% για τον αναστροφέα DC/AC και 97% για τους αγωγούς του συστήματος, καταλήγουμε σε συνολικό συντελεστή απόδοσης:

$$a = 0.85 \times 0.97 \times 0.97 = 0.799$$

Επομένως, η ελάχιστη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας πρέπει να είναι:

$$P'_{\alpha} = \frac{P_{\alpha}}{a} = \frac{31,85 kW}{0,799} = 39,86 kW$$

Άρα:

$$\underline{\text{Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκής γεννήτριας} = 39,86 kW}$$

Είναι προφανές ότι το σύστημα θα πρέπει να έχει ισχύ αιχμής που να καλύπτει την πιο δυσμενή περίπτωση. Δηλαδή τη λειτουργία της ξενοδοχειακής μονάδας κατά το μήνα Απρίλιο.

3.3. Το πλήθος και είδος των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Επιλέξαμε να εγκαταστήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρείας Siliken ονομαστικής ισχύος 255 Wp.

Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου που επιλέξαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Τύπος κυψελών	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο
	Ονομαστική ισχύς (Pmax)	255 W
	Μέγιστη τάση ισχύος (VmDD)	29,8 V
	Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc)	37,1 V
	Μέγιστο ρεύμα ισχύος (Imp)	8,56 A
	Ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc)	9,02 A
	Απόδοση κυψέλης	15,7 %
	Διαστάσεις	1640×990×40 mm
Πίνακας 5. Siliken SLK60P6L 255 Wp		

Προκειμένου να καλύψουμε τις συγκεκριμένες ανάγκες, ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα χρειαστούμε είναι:

$$\frac{52,16}{255} = 204,55 \Rightarrow 205 \text{ πλαίσια}$$

Επειδή έχουμε επιλέξει να τοποθετήσουμε τα πλαίσια με κλίση 0°, η συνολική επιφάνεια του χώρου εγκατάστασής των θα είναι η ίδια με την επιφάνεια των πλαισίων.

Έτσι, η επιφάνειά τους είναι:

$$205 \text{ πλαίσια} \times (1,64 \times 0,99) = 332,838 \text{ m}^2$$

Εκτιμούμε ότι η ταράτσα του ξενοδοχείου είναι αρκετά μεγάλη ούτως ώστε να δεχτεί το σύνολο των πλαιδίων.

4. Οι συσσωρευτές

Με γνώμονα τα χαρακτηριστικά που δίνουν οι κατασκευαστές, επιλέξαμε να εγκαταστήσουμε συσσωρευτές Rolls διότι υπερέχουν έναντι πολλών άλλων συσσωρευτών. Πιο συγκεκριμένα, έχουν μεγάλο βάθος εκφόρτισης, έως και 80%, κι επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής, πάνω από 10 έτη.

Τύπος	Σειρά	Μήκος	Πλάτος	Ύψος	Volt	Χωρητικότητα (Ah) – C20	Βάρος με ηλεκτρολύτη
T12250	4000	391	178	365	12	200	57,50 Kg

Πίνακας 6. Συσσωρευτές Rolls

Δεδομένου ότι επιλέξαμε ως τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και των συσσωρευτών τα 48V θα πρέπει να συνδέσουμε 4 συσσωρευτές σε σειρά, για κάθε κλάδο συσσωρευτών, αφού η ονομαστική τάση των συσσωρευτών Rolls είναι 12V. Συνεπώς, θεωρούμε ότι το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών είναι $\beta=80\%$, ο συντελεστής απόδοσής τους είναι $\alpha=85\%$ και η τάση τους 48V.

Επιπλέον, επειδή πρόκειται για σύστημα που δε θα λειτουργεί καθ' όλη την διάρκεια του έτους δε χρειάζεται να λάβουμε υπ' όψη μας τις πιθανές διαδοχικές ημέρες συννεφιάς καθ' όλη την διάρκεια του έτους διότι είναι αρκετά σπάνιο για αυτήν την περίοδο το. Αρκεί να σχεδιάσουμε το σύστημά μας ώστε να παρέχει ενέργεια στην ξενοδοχειακή μονάδα για μία ημέρα συννεφιάς, κατά τους εαρινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Η ικανότητα αποθήκευσης των συσσωρευτών $E(\text{kWh})$ πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με:

$$E = 1 \text{ days} * 110 \text{ kWh/day} = 110 \text{ kWh}$$

Η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών πρέπει να είναι:

$$C = E / \alpha * \beta * V = 110 \text{ kWh} / (0.85 * 0.8 * 48 \text{ V}) = 3.370 \text{ Ah}$$

Άρα, είναι προφανές ότι θα χρειαστούμε $3370 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah} = 16,85 = 16$ παράλληλους κλάδους συσσωρευτών, καθένας από τους οποίους θα αποτελείται από 4 εν σειρά συνδεδεμένους συσσωρευτές. Δηλαδή, συνολικά, η συστοιχία των συσσωρευτών θα αποτελείται από 10 μπαταρίες, ονομαστικής χωρητικότητας:

$$16 \times 200Ah = 3200Ah$$

που είναι ελαφρώς μικρότερη από την ζητούμενη. Αυτό όμως δεν μας ενοχλεί διότι αφενός η απώλεια σε αμπερώρια είναι πολύ μικρή και αφετέρου δεν θέλουμε να αυξήσουμε το κόστος της εγκατάστασης τοποθετώντας επιπλέον συσσωρευτές.

5. Επιλογή ρυθμιστή φόρτισης

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια απλή ηλεκτρονική συσκευή που φροντίζει για την σωστή φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος. Ελέγχει την διαδικασία φόρτισης και την διακόπτει όταν διαπιστωθεί ότι η μπαταρία έχει φορτισθεί πλήρως. Εάν η φόρτιση συνεχιστεί ελλοχεύει ο κίνδυνος καταστροφής των συσσωρευτών. Επειδή οι μπαταρίες έχουν την τάση να εκφορτίζονται σταδιακά, ακόμη και όταν δεν τροφοδοτούν με ρεύμα κάποια συσκευή (αυτοεκφόρτιση), ο ρυθμιστής φόρτισης φροντίζει να ξαναρχίσει αυτόματα η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας όταν διαπιστωθεί ότι η τάση της έπεσε κάτω από το επίπεδο πλήρους φόρτισης.

Στην παρούσα μελέτη, για τη δουλειά αυτή έχουμε επιλέξει τη συσκευή Sunny Island 5048 της SMA. Στον Πίνακα 6 φαίνονται στα στοιχεία του συγκεκριμένου αντιστροφέα. Η συγκεκριμένη συσκευή επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας δια μέσου των στοιχείων της και επιτελεί διπλό έργο. Πρώτον, παίρνοντας ενέργεια από την AC πλευρά την ανορθώνει σε DC και τροφοδοτεί τις μπαταρίες. Ταυτόχρονα ελέγχει το επίπεδο φόρτισής τους και «αποφασίζει» πότε πρέπει να σταματήσει ή να επανεκκινήσει τη διαδικασία. Δεύτερον, παίρνει ενέργεια από τη DC πλευρά (τις μπαταρίες), την αντιστρέφει και τροφοδοτεί την AC πλευρά.

Ο αριθμός των μετατροπέων που θα χρειαστούμε που θα χρειαστούμε είναι:

$$\frac{P_{max}}{P_{30min}} = \frac{52,16 kW}{6,5 kW} = 8,02 \rightarrow 9$$

Όταν έχουμε τριφασικά δίκτυα ο αριθμός των μετατροπέων πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του τρία για λόγους συμμετρίας.

	Δεδομένα εισόδου		
	Όνομαστική τάση εισόδου (εύρος τιμών)	$U_{AC,ext}$	230 V (172.5–264.5 V)
	Συχνότητα	f_{ext}	50 Hz / 60 Hz (40 Hz–70 Hz)
	Μέγιστο AC ρεύμα	$I_{AC,ext}$	56 A (0–56 A)
	Μέγιστη συνεχόμενη ισχύς	$P_{AC,ext}$	12.8 kW
	Δεδομένα μπαταριών		
	Τάση μπαταριών (εύρος τιμών)	$U_{Bat,nom}$	48 V (41–63 V)
	Μέγιστο ρεύμα φόρτισης	$I_{Bat,max}$	120 A
	Συνεχές ρεύμα φόρτισης	$I_{Bat,nom}$	100 A
	Χωρητικότητα μπαταριών	C_{Bat}	100–10000 Ah
	Δεδομένα εξόδου		
	Όνομαστική AC τάση (εύρος)	$U_{AC,nom}$	230 V (202–253 V)
	Όνομαστική συχνότητα (εύρος)	F	50 Hz / 60 Hz (45 Hz–65 Hz)
	Συνεχόμενη ισχύς εξόδου (25 °C)	P_{nom}	5000 W
	Συνεχόμενη ισχύς εξόδου (45 °C)	P_{nom}	4000 W
AC ισχύς εξόδου για 30 min στους 25 °C	P_{30min}	6500 W	

	Όνομαστικό AC ρεύμα	$I_{AC,nom}$	21.7 A
	Μέγιστο ρεύμα (κορυφή/δραστικό)	I_{max}	120 A (approx. 60 ms) / 52 A (3 s)
	THD τάσεως εξόδου	K_{VAC}	< 3 %
Πίνακας 6. Sunny Island 5048			

6. Επιλογή Inverter

Ο inverter είναι η συσκευή που μετατρέπει το συνεχές (DC) ρεύμα του φωτοβολταϊκού συστήματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Έτσι, από τους συσσωρευτές του συστήματος μπορούμε να τροφοδοτήσουμε όλες τις οικιακές συσκευές που απαιτούν 220V. Δεν έχει σημασία πόσες συσκευές θα συνδέσουμε ταυτόχρονα, αρκεί η ισχύς όλων αυτών των συσκευών που λειτουργούν συγχρόνως να μην ξεπερνά την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ του μετατροπέα. Ένας μετατροπέας καλής ποιότητας κλείνει αν από λάθος συνδεθεί μια συσκευή μεγαλύτερης ισχύος από αυτήν που μπορεί να αντέξει, προστατεύοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, τις ηλεκτρικές συσκευές. Το ίδιο γίνεται και σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι οι μπαταρίες του συστήματος τείνουν να αδειάσουν.

Επειδή το μέγεθος της εγκατάστασης είναι αρκετά μεγάλο δε μπορούμε να συνδέσουμε όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε έναν αντιστροφέα. Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε ομάδα αντιστροφέων που θα λειτουργούν παράλληλα. Επιλέγουμε τον αντιστροφέα Sunny Tripower 17000TL της SMA. Στον Πίνακα 7 φαίνονται τα στοιχεία του συγκεκριμένου αντιστροφέα. Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας έχει τη δυνατότητα μέγιστης ισχύος 17410 W. Συνολικά θα χρησιμοποιήσουμε τρεις αντιστροφείς. Αυτός ο αριθμός επαρκεί για να καλύψουμε τις ανάγκες της εγκατάστασης.

$$3 \times 17,41 \text{ kW} = 52,23 \text{ kW} > 52,16 \text{ kW}$$

Η συνολική ισχύς των 205 φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι :

$$205 \times 255 = 52.275 \text{ W}$$

Είναι προφανές ότι οριακά υπερβαίνουμε τη δυνατότητα μέγιστης ισχύος των αντιστροφέων. Προκειμένου να αποφύγουμε τη χρήση ενός επιπλέον


αντιστροφέα και τη συνεπαγόμενη αύξηση του κόστους θα χρησιμοποιήσουμε ένα λιγότερο πλαίσιο. Έτσι η ισχύς τους θα είναι:

$$204 \times 255 = 52020 \text{ W}$$

Αυτή μας η απόφαση δεν προκαλεί σημαντική διαφορά στην εγκατάσταση. Δεδομένου ότι ήδη έχουμε προβλέψει την ενδεχόμενη χρήση επιπλέον καταναλωτών και ότι είναι μάλλον απίθανο να λειτουργούν όλοι ταυτόχρονα, η απόρριψη τους ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (δηλαδή 255 W) δε θα έχει καμία αρνητική επίδραση.

Η απόφασή μας να εγκαταστήσουμε τρεις αντιστροφείς έχει επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Σε περίπτωση βλάβης σε μια από τις τρεις συσκευές, η παροχή ρεύματος στην ξενοδοχειακή μονάδα δεν θα χρειαστεί να σταματήσει εντελώς, αφού οι άλλες δύο συσκευές μπορούν να λειτουργούν κανονικά. Σίγουρα, οι ηλεκτρικές καταναλώσεις θα πρέπει να περιοριστούν. Ωστόσο, θα μπορούμε να καλύψουμε τις βασικές ανάγκες της μονάδας μέχρι να αποκατασταθεί η βλάβη στο σύστημα.

Θα μπορούσαμε να κάνουμε χρήση περισσότερων μικρότερων αντιστροφέων προκειμένου να αξιοποιήσουμε στο έπακρο αυτό το πλεονέκτημα αλλά τότε θα είχαμε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας και του κόστους της εγκατάστασης.

	Είσοδος (DC)	
	Μέγιστη ισχύς DC (@ cos φ= 1)	17410 W
	Μέγιστη τάση DC	1000 V
	Εύρος τάσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPP)	400 V – 800 V
	Ονομαστική τάση DC	600 V
	Ελάχιστη. τάση DC / Τάση εκκίνησης	150 V / 188 V
	Μέγιστο ρεύμα εισόδου / ανά στοιχειοσειρά	A: 33 A, B: 11 A / 33 A
	Αριθμός ανιχνευτών MPP / Στοιχειοσειρές ανά ανιχνευτή MPP	2 / A: 5, B: 1


Έξοδος (AC)	
Ονομαστική ισχύς AC (@ 230 V, 50 Hz)	17000 W
Μέγιστη φαινόμενη ισχύς AC	17000 VA
Ονομαστική τάση, περιοχή τάσεων AC	3 / N / PE, 230 V / 400 V, 160 V – 280 V
Συχνότητα δικτύου, εύρος AC	50, 60 Hz, –6 Hz, +5 Hz
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	24,6 A
Συντελεστής ισχύος (cos φ)	0,8 υπερδιέγερση 0,8 υποδιέγερση
Φάσεις τροφοδοσίας / Φάσεις σύνδεσης / Power Balancing	3 / 3 /—
Βαθμός απόδοσης	
Μέγιστος βαθμός απόδοσης / Euro-Eta (EBA)	98,1 % / 97,7 %
Πίνακας 7. Sunny TRIPOWER 17000TL	

7. Τρόπος σύνδεσης των πλαισίων

Ο κάθε αντιστροφέας θα συνδεθεί με 68 πλαίσια. Στην πρώτη είσοδο του αντιστροφέα θα συνδεθούν τρεις σειρές (strings) με είκοσι πλαίσια η κάθε μία. Στη δεύτερη είσοδο θα συνδεθεί μία σειρά με οχτώ πλαίσια.

Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία επαληθεύεται και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Sunny Design 2.2 της εταιρίας SMA. Με το συγκεκριμένο λογισμικό έγινε και ο υπολογισμός των καλωδιώσεων. Όλοι αυτοί οι υπολογισμοί φαίνονται παρακάτω στις Εικόνες 1 έως 8.

Φ/Β γεννήτρια 1 × +



Θερμοκρασία
κυψέλης
10 ... 62 °C

Ευθυγράμμιση: Αζιμούθιο: 0°; Κλίση: 0°

Τρόπος τοποθέτησης: Ελεύ... Αλλαγή Προτάσεις σχεδιασμού ...

Όνομασία: Φ/Β γεννήτρια 1

Κατασκ.: Siliken 🔍


Φ/Β δομολογία: SLK60P6L 255Wp (EU) i

Προεπιλογή: Αρ. φ/β μονάδων 204 ⬆️⬇️⬆️

ή: Μέγιστη ισχύς 52,02 kWp ⬆️⬇️⬆️

Εικόνα 1. Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

3 x STP 17000TL-10 + Προσθήκη μετατροπέα



Μετατροπέας: STP 17000TL-10


Αριθμός μετατροπέων: 3 i

Μέγ. ισχύς DC (cos φ = 1):	17,41 kW
Μέγ. ισχύς AC:	17,00 kVA
Μέγ. ενεργή ισχύς AC (cos φ = 0,99):	16,83 kW
Σύνδεση AC:	τριφασική
Μέγ. αποδοτικότητα:	98,2 %
Τάση δικτύου:	230V (230V / 400V)

Συντελεστής μετατόπισης cos φ: + 0,99 ⬆️⬇️⬆️

Εικόνα 2. Αντιστροφείας.

▼ Επισκόπηση μετατροπέων

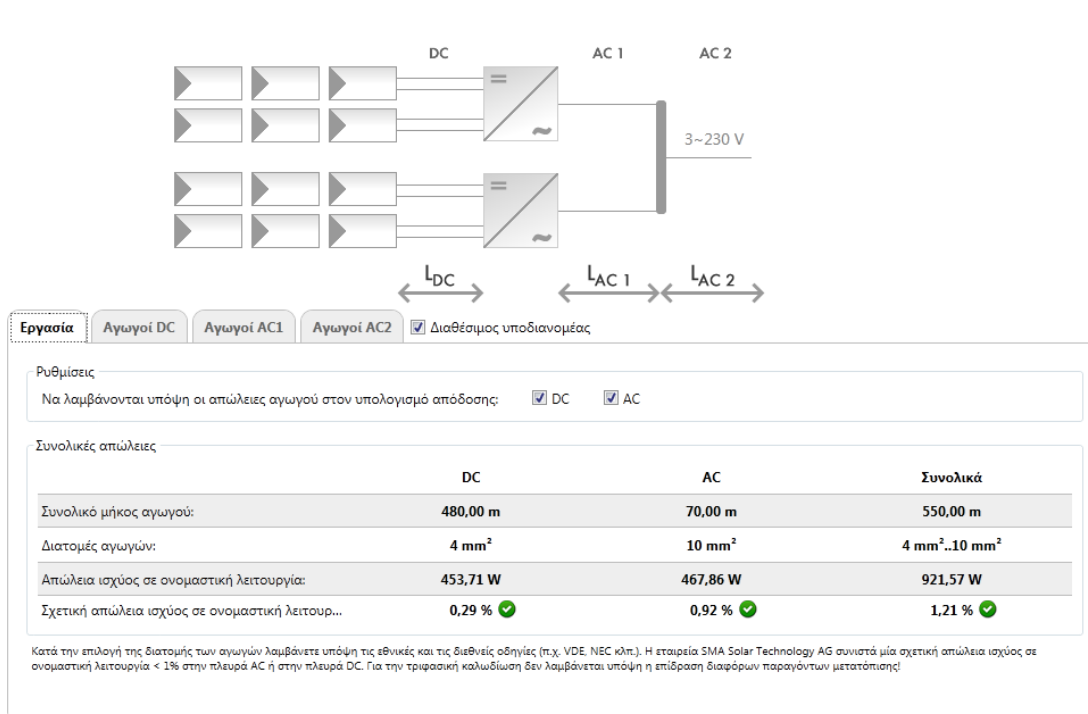
	Φ/Β γεννήτρια 1 204 / 204	Μέγιστη ισχύς	Λόγος ονομ. ισχύος	Συντ.ενεργ. χρήσης
✓ 3 x STP 17000TL-10	3 x 20 (Α) 1 x 8 (Β)	52,02 kWp	99 %	100 % 

▼ ✓ Φ/Β ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΜΒΑΤΟΣ

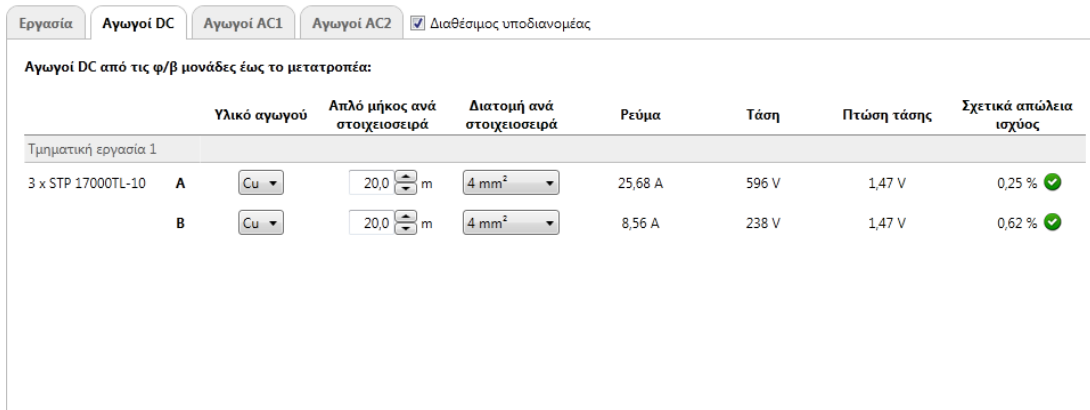
Διαμόρφωση

	Είσοδος Α	Είσοδος Β
Μετατροπέας:	Φ/Β γεννήτρια 1	Φ/Β γεννήτρια 1
Ανεξάρτητες εισοδοί:	2	8
Μέγ. ισχύς DC ($\cos \varphi = 0,99$):	17,24 kW	15,30 kWp
Ελάχ. τάση DC:	150 V	221 V ✓
(Τάση δικτύου 230 V)	Χαρακτηριστική φ/β τάση:	498 V ✓
	Ελάχ. φ/β τάση:	782 V ✓
Μέγ. τάση DC (φωτοβολταϊκό (Φ/Β)):	Μέγ. φ/β τάση:	313 V ✓
Μέγ. ρεύμα DC (Α/Β):	Μέγ. ρεύμα φ/β γεννήτρ.:	25,7 A ✓
	Μέγ. φωτοβολταϊκό ρεύμα βραχυκύκλωσης:	27,1 A ✓
		8,6 A ✓
		9,0 A ✓

Εικόνα 3. Διάταξη αντιστροφέων και πλαισίων.



Εικόνα 4. Διαστασιολόγηση καλωδίωσης.



Εικόνα 5. Διαστασιολόγηση Αγωγών DC πλευράς.

Εργασία | Αγωγοί DC | **Αγωγοί AC1** | Αγωγοί AC2 | Διαθέσιμος υποδιανομέας

Αγωγοί AC από το μετατροπέα έως τον υποδιανομέα:

Υλικό αγωγού	Απλό μήκος	Διατομή	Ρεύμα	Τάση	Πτώση τάσης	Σχετικά απώλεια ισχύος	
Τμηματική εργασία 1							
3 x STP 17000TL-10	Cu	20,0 m	10 mm ²	73,76 A	3~230 V	0,85 V	0,37 % ✓

Εικόνα 6. Διαστασιολόγηση αγωγών AC πλευράς πριν τον υποδιανομέα.

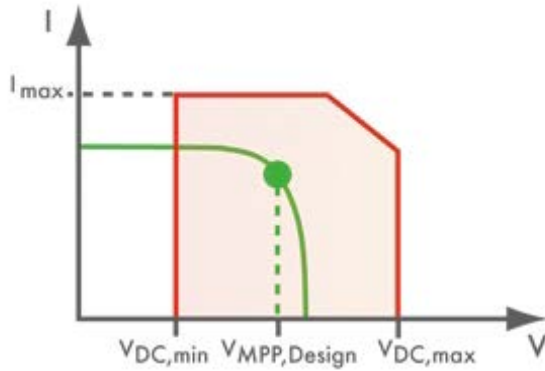
Εργασία | Αγωγοί DC | Αγωγοί AC1 | **Αγωγοί AC2** | Διαθέσιμος υποδιανομέας

Αγωγοί AC από τον υποδιανομέα έως το σημείο τροφοδοσίας:

Υλικό αγωγού	Απλό μήκος	Διατομή	Ρεύμα	Τάση	Πτώση τάσης	Σχετικά απώλεια ισχύος
Cu	10,0 m	10 mm ²	---	3~230 V	---	0,55 % ✓
			L1 73,76 A	230 V	1,27 V	0,55 %
			L2 73,76 A	230 V	1,27 V	0,55 %
			L3 73,76 A	230 V	1,27 V	0,55 %
			N 0,00 A	230 V	0,00 V	0,00 %

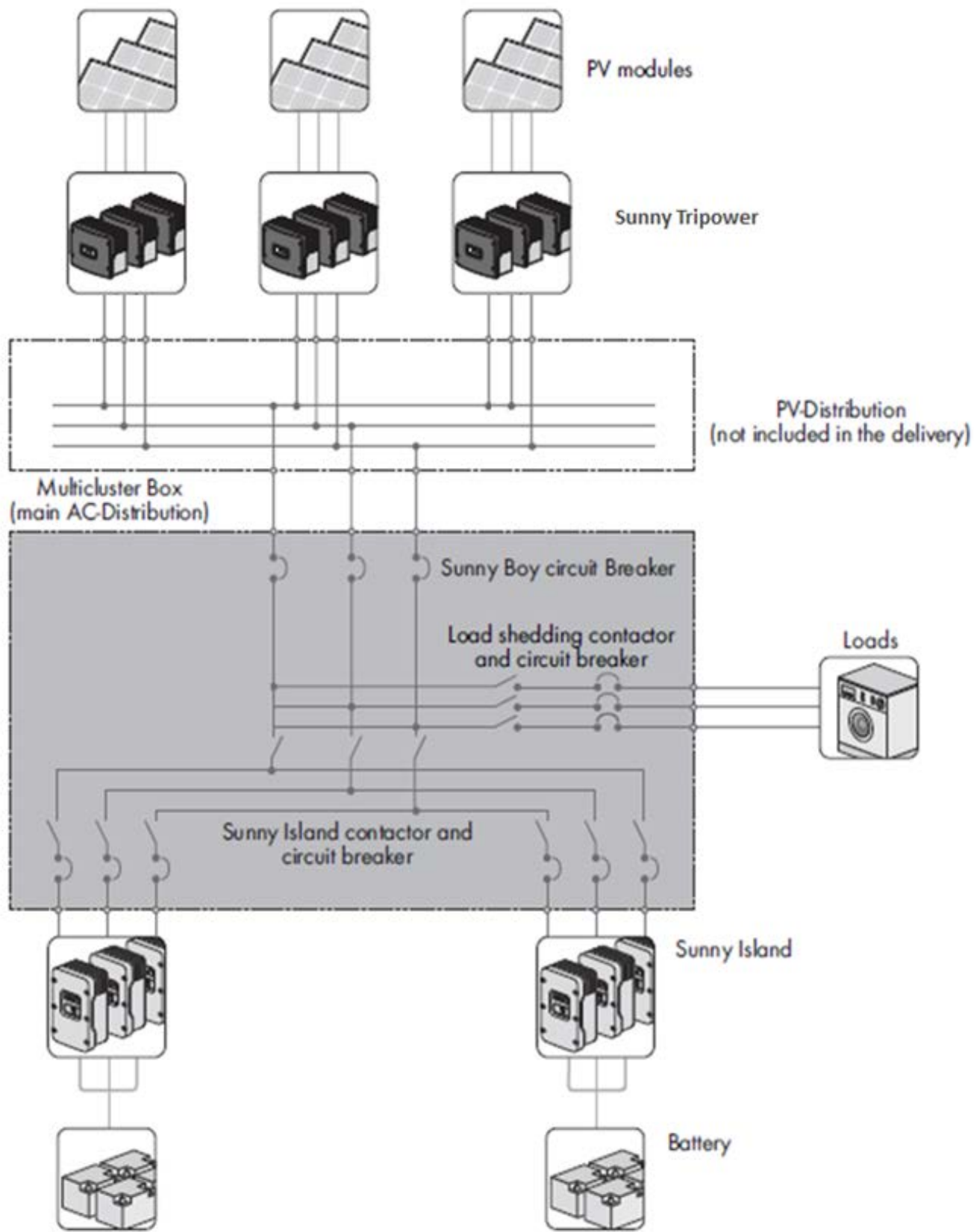
Εικόνα 7. Διαστασιολόγηση αγωγών AC πλευράς μετά τον υποδιανομέα.

Τέλος, μέσω του λογισμικού, επιβεβαιώνεται ότι ο χρησιμοποιούμενος αντιστροφέας είναι συμβατός με το σχεδιασμό της εγκατάστασης έχει γίνει έτσι ώστε να αξιοποιείται το έπακρο. Δηλαδή, το σημείο μέγιστης ισχύος των πλαισίων «βρίσκεται» εντός της περιοχής βέλτιστης λειτουργίας τους αντιστροφέα.



Εικόνα 8. Αποδοτικός σχεδιασμός της εγκατάστασης.

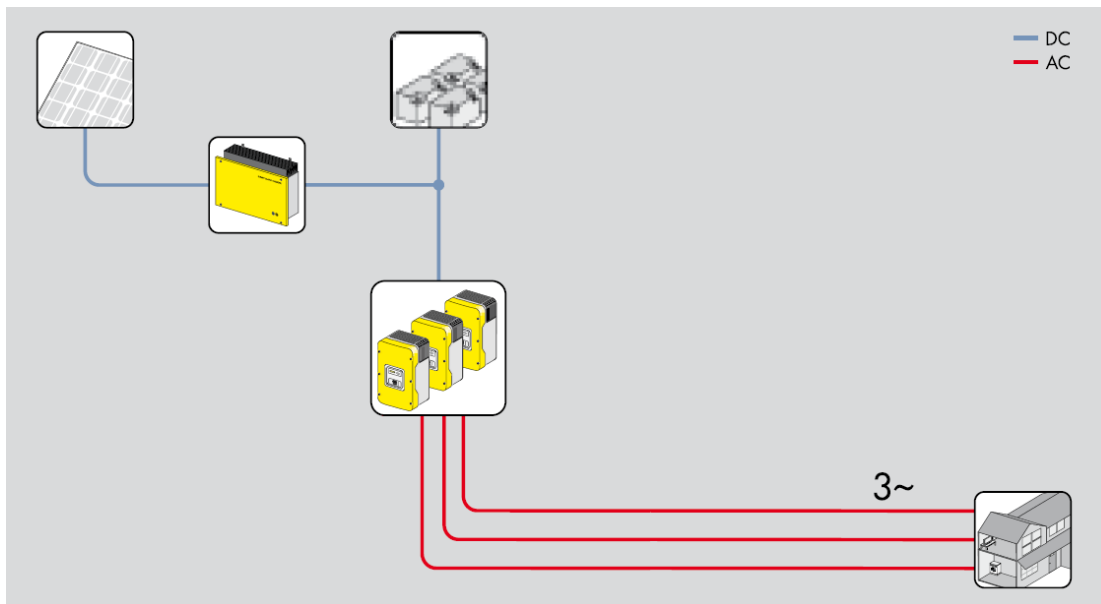
Η συνολική διάταξη της εγκατάστασης φαίνεται στο Σχήμα 4. Δηλαδή η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με τους αντιστροφείς, των μπαταριών με τους μετατροπείς και όλων μαζί σε ένα κοινό ζυγό απ' όπου τροφοδοτούνται και οι καταναλωτές.



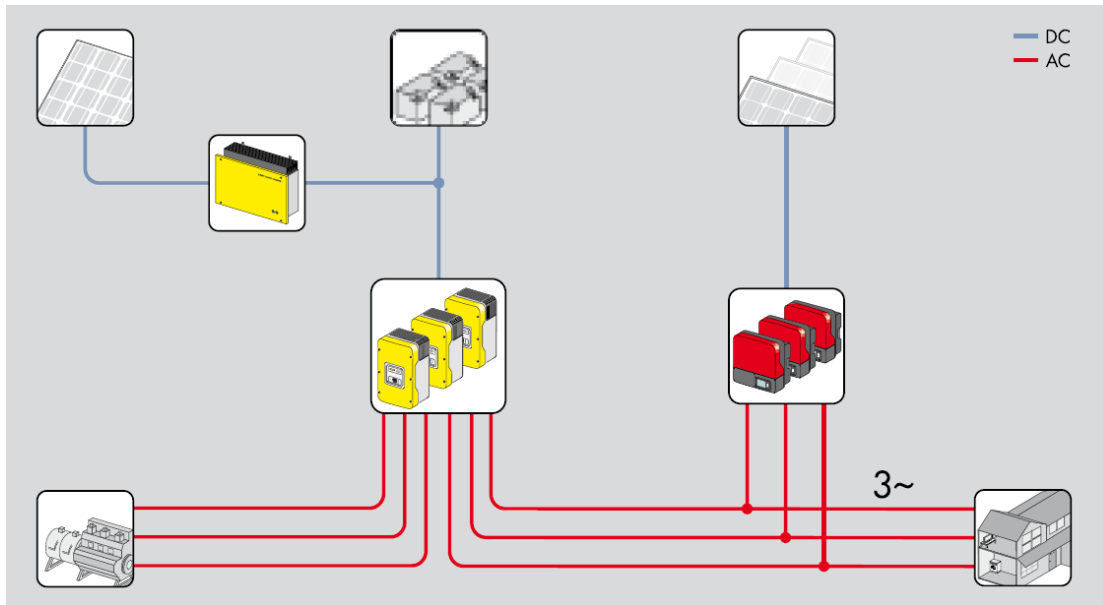
Σχήμα 4. Η συνολική διάταξη της εγκατάστασης.

8. Εναλλακτικές προτάσεις

Μία εναλλακτική επιλογή για τη μορφή του δικτύου που θα μπορούσαμε να επιλέξουμε είναι η αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα . Έτσι, θα μπορούσαμε να τροφοδοτήσουμε τμηματικά την ξενοδοχειακή μονάδα από «ανεξάρτητα» δίκτυα. Αυτό θα μας έδινε το πλεονέκτημα της αδιάλειπτης λειτουργίας της υπόλοιπης εγκατάστασης στο ενδεχόμενο διακοπής της λειτουργίας ενός από αυτά τα δίκτυα λόγω βλάβης ή εργασιών συντήρησης. Λόγω του μεγέθους της εγκατάστασης όμως δεν επιλέχθηκε διότι θα απαιτούνταν ένας αρκετά μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων, περισσότερες εργατοώρες για την εγκατάσταση και τελικά θα είχαμε μια αρκετά πολύπλοκη εγκατάσταση.



Σχήμα 5. Εναλλακτική διάταξη της εγκατάστασης.



Σχήμα 6. Εγκατάσταση με τη χρήση εφεδρικής πηγής ενέργειας.

Στις περιπτώσεις τόσο μεγάλων απαιτήσεων σε ενέργεια, όπου η εγκατάσταση και συνεπώς το κόστος της είναι αρκετά υψηλά, είναι προτιμότερο (τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής σκοπιάς) να έχουμε μια πρόσθετη (εφεδρική) πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε τη μείωση του κόστους της εγκατάστασης αλλά και την αύξηση της αξιοπιστίας του. Αυτόν το ρόλο, συνήθως, τον αναλαμβάνει ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z), δηλαδή μια ντιζελογεννήτρια.

Τότε, η εγκατάστασή μας θα είχε τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα . Στο Σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εγκατάστασης.



Αντιστροφές
συνδεδεμένος με
τα φωτοβολταϊκά
πλαίσια

Μετατροπέας
Sunny Island
της SMA για
αυτόνομο
δίκτυα

Εικόνα 9. Παράδειγμα εγκατάστασης με εφεδρική ντιζελογεννήτρια.

Μπαταρίες

Ντιζελογεννήτρια

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Planning and Installing Photovoltaic Systems- A guide for installers, architects and engineers», second edition, Earthscan
2. «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007
3. Mohan, Undeland, Robbins: 'Power Electronics – Converters, Applications and Design' WILEY Third Edition 2003
4. Γεώργιος Χ. Μπάκος: *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, Ξάνθη, 2004.
5. Ιωάννης Καραφυλλίδης: *Φωτοβολταϊκά στοιχεία και εφαρμογές*, Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, Ξάνθη, 1999.
6. Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng: 'Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls and Applications' IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 49, No. 4, August 2002
7. ΤΕΕ-ΤΚΜ, Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας: "Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων", Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2011
8. **Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών** (ΣΕΦ – <http://www.helapco.gr/>): «Ένας πρακτικός οδηγός για επενδύσεις στα φωτοβολταϊκά» (Σεπτέμβριος 2010)
9. **Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών** (ΣΕΦ – <http://www.helapco.gr/>): «Ηλιακές Στέγες – Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στον οικιακό – κτιριακό τομέα» (Σεπτέμβριος 2010)
10. «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)», Στρατιωτική Επιθεώρηση, Απρίλιος 2008
http://www.army.gr/files/File/epitheorisi/200804_ANANEΩΣΙΜΕΣ%20ΠΗΓΕΣ%20ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.pdf
11. «Αξιολόγηση Συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Προβλέψεις με Εναλλακτικά Σενάρια σε Περιφερειακό και Εθνικό Επίπεδο», Διδακτορική Διατριβή Παπαζή Στυλιανού, Αθήνα 1998.
12. «Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
http://www.cres.gr/kape/education/web_dynitikoiki%20xristes.pdf
13. www.greenpeace.org
14. www.sma-hellas.com
15. www.abb.gr
16. www.google.com