

ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΙΑΚΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Πτυχιακή Εργασία
του φοιτητή του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων
και Περιβάλλοντος του ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

Κακαράντζα Δημήτρη του Αθανασίου
Αριθμός Μητρώου: 1378

Θέμα

**«Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού
Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο»**

Επιβλέπων

Επίκουρος Καθηγητής Καραπιδάκης Εμμανουήλ

Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας:

Χανιά, Ιούνιος 2014

Θέμα: «Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο»

Φοιτητής: Κακαράντζας Δημήτριος

Επιβλέπων: Καραπιδάκης Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Αρχικά γίνεται μια γενικότερη αναφορά στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σύγχρονος κόσμος και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ο σχεδιασμός των μονάδων που αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο χαμηλής τάσης καθώς και η εξομοίωση του συστήματος αυτού χρησιμοποιώντας ως εργαλείο το πρόγραμμα MATLAB/Simulink. Το πρώτο βασικότερο στοιχείο του συστήματος είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Αναλύεται διεξοδικά η λειτουργία της μέσα από τη θεωρία, και ο σχεδιασμός της μέσα από μια σειρά υπολογισμών των σε σειρά και παράλληλων κλάδων κυττάρων που την αποτελούν. Η δημιουργία του μοντέλου της στο Simulink περιγράφεται λεπτομερώς και η ορθή λειτουργία της επιβεβαιώνεται από τις κυματομορφές εξόδου του μοντέλου αυτού.

Abstract

Originally made a general reference to the energy problem facing the modern world and then become a reference to photovoltaic effect and the technology of photovoltaic systems

The purpose of this thesis is to design all units that constitute a photovoltaic system connected to low voltage grid, and also to run the simulation of this system using the program MATLAB/ Simulink. The first key element is the photovoltaic generator whose operation is discussed in detail through theory. In addition, the design of the photovoltaic generator takes place through calculations of the series and the parallel branches of cells that constitute it. The model of the generator is created in Simulink and its correct operation is confirmed by the characteristic waveforms of the model.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ανανεώσιμων Ενεργειακών Τεχνολογιών του τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ το ακαδημαϊκό έτος 2013- 2014.

Η διάρθρωση των κεφαλαίων είναι η εξής:

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στους λόγους που οδήγησαν στην χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στα πλεονεκτήματα που αυτά προσφέρουν έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας. Το δεύτερο κεφάλαιο εξηγεί λεπτομερώς την αρχή λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, την χαρακτηριστική εξίσωσή του και τα είδη των κυττάρων που χρησιμοποιούνται καθώς και την απόδοσή τους.

Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει την ομαδοποίηση των ηλιακών κυττάρων σε πλαίσια παραθέτοντας τα χαρακτηριστικά τους και τα είδη τους, καθώς και την διασύνδεσή τους για την συγκρότηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπλέον αναφέρονται τα είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων και οι τρόποι σύνδεσής τους στο δίκτυο, όταν πρόκειται για μη αυτόνομα συστήματα. Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει τον τρόπο λειτουργίας του αντιστροφέα και κυρίως την διαδικασία ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων του μέσω της γεννήτριας παλμών. Το πέμπτο κεφάλαιο ασχολείται με το σημαντικό κομμάτι της σύνδεσης με το δίκτυο. Αναφέρονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την πραγματοποίηση μιας σύνδεσης με το δημόσιο δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης και οι απαραίτητες ρυθμίσεις των διατάξεων προστασίας. Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή στο πρόγραμμα εξομοίωσης MATLAB/Simulink και αναφέρει τις αρχικές απόπειρες ανάπτυξης των μοντέλων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και του μονοφασικού

αντιστροφέα μέσα από τις οποίες καταλήγει στα τελικά μοντέλα.

Το έβδομο κεφάλαιο περιέχει παρατηρήσεις και συμπεράσματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη που μου έδωσε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ τους καθηγητές, τους συμφοιτητές μου και τη σχολή γενικότερα που μου έδωσε την ευκαιρία να παρουσιάσω τη διπλωματική μου εργασία.

Ευχαριστώ ξεχωριστά τον κύριο Καραπιδάκη Εμμανουήλ ο οποίος ήταν ο υπεύθυνος και επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας.

Σε όλη τη διάρκεια του έτους εκείνος επέβλεπε την εξέλιξή της, με συμβούλευε και με καθοδηγούσε τόσο σε θέματα θεωρίας και βιβλιογραφικής αναζήτησης, όσο και σε πρακτικά ζητήματα για την σωστή αναπαράσταση των μοντέλων στο πρόγραμμα εξομοίωσης. Ουσιαστικά από την αρχή έως και την ολοκλήρωση της εργασίας την ευθύνη είχε αναλάβει ο κύριος Καραπιδάκης Εμμανουήλ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή | |
| 1.1 Το Ενεργειακό Πρόβλημα- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..... | 8 |
| 1.2 Η Ηλιακή Ενέργεια..... | 9 |
| 1.3 Η Επικράτηση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων..... | 10 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Το Φωτοβολταϊκό Κύτταρο | |
| 2.1 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο..... | 12 |
| 2.1.1 Το πυρίτιο..... | 12 |
| 2.1.2 Η p-n επαφή..... | 14 |
| 2.1.3 Το φράγμα δυναμικού..... | 16 |
| 2.1.4 Βασικές εξισώσεις Δίοδος..... | 18 |
| 2.2 Το ηλιακό κύτταρο..... | 19 |
| 2.2.1 Βασικές εξισώσεις ηλιακού κυττάρου..... | 19 |
| 2.2.2 Είδη ηλιακών κυττάρων..... | 23 |
| 2.2.2α Μονοκρυσταλλικά Κύτταρα Si..... | 24 |
| 2.2.2β Πολυκρυσταλλικά Κύτταρα Si..... | 24 |
| 2.2.2γ Κύτταρα λεπτής μεμβράνης..... | 25 |
| 2.2.2δ Υβριδικά κύτταρα..... | 26 |
| 2.2.3 Απόδοση Ηλιακού Κυττάρου..... | 27 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Φωτοβολταϊκά συστήματα | |
| 3.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια..... | 28 |
| 3.1.1 Εισαγωγή..... | 28 |
| 3.1.2 Συστήματα Επίπεδων Φωτοβολταϊκών Πλαισίων..... | 29 |
| 3.1.3 Συστήματα Συγκεντρωτικών Φωτοβολταϊκών Πλαισίων..... | 29 |
| 3.1.4 Μηχανισμός Κίνησης..... | 30 |
| 3.1.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων..... | 30 |
| 3.1.6 Είδη Φωτοβολταϊκών Πλαισίων..... | 35 |
| 3.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα..... | 37 |
| 3.2.1 Το σύστημα..... | 37 |
| 3.2.2 Συσσωρευτές..... | 38 |
| 3.2.3 Συστήματα Ρύθμισης Ισχύος..... | 39 |
| 3.2.4 Είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων..... | 39 |
| 3.2.5 Τρόποι Σύνδεσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στο Δίκτυο Εναλλασσομένου Ρεύματος..... | 43 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Ο Αντιστροφέας | |
| 4.1 Εισαγωγή..... | 48 |
| 4.2 Μονοφασικός αντιστροφέας..... | 48 |
| 4.2.1 Δομή των αντιστροφέων πηγής τάσης..... | 49 |
| 4.3 Έλεγχος μονοφασικού αντιστροφέα με την ημιτονοειδή PWM τεχνική.... | 50 |
| 4.3.1 Ημιτονοειδής PWM τεχνική με διπολική τάση εξόδου..... | 51 |
| 4.3.2 Ημιτονοειδής PWM τεχνική με μονοπολική τάση εξόδου..... | 54 |

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Θέματα Σύνδεσης με το Δίκτυο | |
| 5.1 Ορισμοί και Βασικές Έννοιες..... | 56 |
| 5.2 Γενικές Προϋποθέσεις για τη Σύνδεση..... | 58 |
| 5.2.1 Τρόπος σύνδεσης..... | 59 |
| 5.2.2 Γενικά περί διατάξεων ζεύξης και προστασίας..... | 59 |
| 5.3 Διατάξεις Ζεύξης και Προστασίας..... | 60 |
| 5.3.1 Προϋποθέσεις για τις διατάξεις ζεύξης και προστασίας..... | 60 |
| 5.3.2 Ρυθμίσεις προστασιών..... | 61 |
| 5.3.3 Συνολική επισκόπηση των μέσων προστασίας και ζεύξης μέχρι το Σημείο Κοινής Σύνδεσης..... | 63 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Το πρόγραμμα εξομοίωσης (MATLAB/Simulink) και οι αρχικές προσεγγίσεις | |
| 6.1 Το MATLAB..... | 65 |
| 6.2 Το Simulink..... | 65 |
| 6.3 Δημιουργία νέου Μοντέλου..... | 66 |
| 6.4 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια..... | 69 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα..... | 76 |
| | |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 77 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Το Ενεργειακό Πρόβλημα- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας



Σχήμα 01.1 Αιολική Ενέργεια

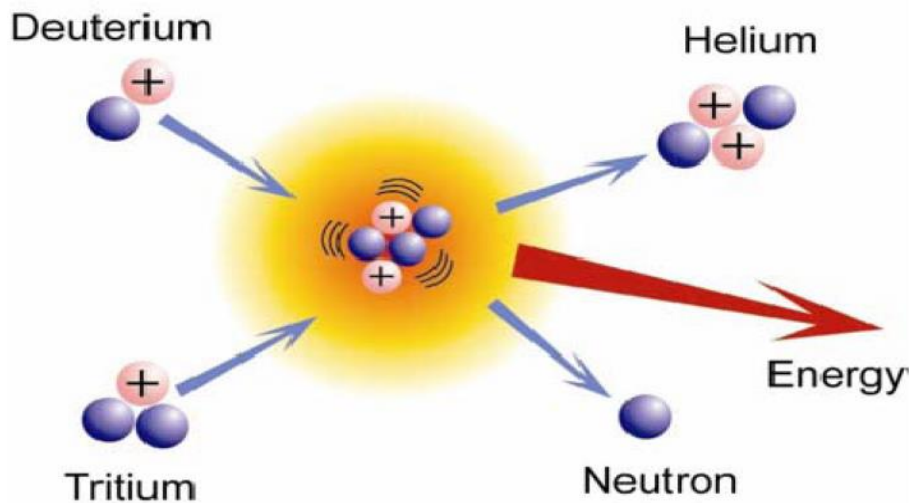
Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν προκύψει αυξανόμενες ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων και από τη δημιουργία ραδιενεργών αποβλήτων από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Η παγκόσμια οικονομία έχει γνωρίσει εδώ και δύο αιώνες μια σταθερή και πρωτοφανή ανάπτυξη που υποστηρίχθηκε από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων. Καθώς όμως οι ενεργειακές ανάγκες συνεχώς αυξάνουν υπάρχει ανησυχία για την επάρκεια των ενεργειακών πηγών που έχει ενισχυθεί τελευταία και λόγω των συνεχώς αυξανόμενων τιμών των καυσίμων. Τα τελευταία χρόνια οι τιμές του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του ουρανίου έχουν αυξηθεί σημαντικά όπως και οι τιμές του άνθρακα. Το γεγονός ότι τα ορυκτά καύσιμα είναι πεπερασμένα ενώ η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ολοένα και αυξάνεται οδήγησε πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες και διεθνείς οργανισμούς να εκπονήσουν μελέτες προς αναζήτηση και εκμετάλλευση άλλων ενεργειακών πηγών. Πόλο έλξης αποτέλεσαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (σχήμα 1.1, σχήμα 1.2) οι οποίες είναι «καθαρές», ανεξάντλητες και δεν χρησιμοποιούν καύσιμα. Στις εναλλακτικές πηγές που εξετάστηκαν από οργανισμούς και υπηρεσίες περιλαμβάνονται η ενέργεια του ήλιου, των ανέμων, η γεωθερμία, η καύση φυτικών προϊόντων (βιομάζα) ή οργανικών αποβλήτων. Από αυτές η επικρατέστερη είναι η ενέργεια που δίνει η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία συνδυάζει ιδανικά τις απαιτήσεις για νέους τρόπους παραγωγής ενέργειας.



1.2 Η ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος, ένα αστέρι ηλικίας πέντε δισεκατομμυρίων ετών, αποτελεί πηγή ζωής για τη γη. Χωρίς τον ήλιο, η ζωή δεν θα μπορούσε να υπάρξει, καθώς η απουσία αυτού συνεπάγεται και την απουσία θερμότητας με μια σειρά καταστροφικών αποτελεσμάτων. Η ύπαρξη ζωής στην γη οφείλεται στον ήλιο καθώς αυτός βρίσκεται στην αρχή της τροφικής αλυσίδας που συμπεριλαμβάνει και τον άνθρωπο ως τον τελευταίο κρίκο της. Όλα εξαρτώνται από τον ήλιο. Δεν υπάρχει σχεδόν τίποτα σημαντικότερο στη γη από αυτόν. Ο ήλιος δημιουργεί την ηλιακή ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως πυρηνική σύντηξη (σχήμα 1.3), όπου άτομα υδρογόνου ενώνονται για να δημιουργηθεί ένα άτομο ηλίου.



Σχήμα 1.3 Η πυρηνική σύντηξη

Κάθε δευτερόλεπτο, ο ήλιος μετατρέπει 500 εκατομμύρια μετρικούς τόνους υδρογόνου σε ήλιο. Λόγω της διαδικασίας της σύντηξης, 5 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια κάθε δευτερόλεπτο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε έτος, 157.680.000.000.000 μετρικοί τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια. Στη γη, λαμβάνουμε περίπου 2×10^{18} Watt (ενέργεια/ δευτερόλεπτο). Η ενέργεια που λαμβάνουμε σε ένα δευτερόλεπτο αντιστοιχεί σε αρκετή ενέργεια για την τροφοδότηση 100 κοινών λαμπτήρων φωτός για περίπου 5 εκατομμύρια έτη (περισσότερο από την ύπαρξη των ανθρώπων). Ισοδύναμα, η ενέργεια που στέλνει στη γη ο ήλιος, αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα παρήγαγαν περισσότεροι από 150 εκατομμύρια μεγάλοι σταθμοί παραγωγής. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται αυτή την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακά κύτταρα, πλαίσια ηλιακών κυττάρων και κάτοπτρα ώστε να δύναται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια καλύπτοντας μέρος των ενεργειακών του αναγκών. Αν και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε μόλις το 1839, το πρώτο ηλιακό κύτταρο κατασκευάστηκε πολύ αργότερα, το 1954 και στην αρχή μόνο για διαστημικές εφαρμογές. Στις μέρες μας καθώς το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων μειώνεται συνεχώς και σε συνδυασμό με την όλο και αυξανόμενη ευαισθητοποίηση του κοινωνικού συνόλου απέναντι στο περιβάλλον καθώς και τις νομικές δεσμεύσεις των κρατών (συνθήκη του Kyoto) για χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, η χρήση των

φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαπλώνεται ραγδαία καθιστώντας τα ανταγωνιστικά έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας. Επίσης, δεδομένου ότι ο ήλιος θα «πεθάνει» σε περίπου πέντε δισεκατομμύρια χρόνια και ότι η ενέργεια που προσφέρει είναι φιλική προς το περιβάλλον, συμπεραίνουμε ότι αυτός αποτελεί αέναη πηγή ηλιακής ενέργειας καθιστώντας την εκμετάλλευση αυτής ιδιαίτερα επωφελή συνοδευόμενη με πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι των υπολοίπων ενεργειακών πηγών και τα φωτοβολταϊκά συστήματα μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή τεχνολογία απαλλαγμένη από τις δυσμενείς περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις των υπολοίπων συμβατικών πηγών ενέργειας.

1.3 Η Επικράτηση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο ενεργειακό πόρο (ειδικά στη χώρα μας), που παρέχει ανεξαρτησία και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Υπάρχουν δύο τρόποι αξιοποίησης της: είτε για την παραγωγή θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση νερού, τη θέρμανση χώρων και πολλές οικιακές, γεωργικές ή βιομηχανικές χρήσεις όπου η διαδικασία αυτή μετατροπής εξαρτάται από την θερμότητα είτε με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών, όπου υπάρχει η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απ' ευθείας μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται με την βοήθεια των ηλιακών κυττάρων, των οποίων την αρχή λειτουργίας αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διαδικασία αυτή μετατροπής δεν εξαρτάται από την θερμότητα, απεναντίας η απόδοση των ηλιακών κυττάρων μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται.

Ο πίνακας του σχήματος 1.4 απαριθμεί μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών (φ/β) συστημάτων. Συχνά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φ/β συστημάτων είναι σχεδόν απολύτως αντίθετα του συμβατικού τρόπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα). Παραδείγματος χάριν, οι συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής έχουν τα μειονεκτήματα: ευρύ φάσμα περιβαλλοντικά επικίνδυνων εκπομπών, αλλοίωση – φθορά περιοχών, σταθερά αυξανόμενες δαπάνες καυσίμων, χαμηλή αποδοχή της κοινής γνώμης (κανένας δεν θέλει να καίγεται άνθρακας σε ένα εργοστάσιο παραγωγής που βρίσκεται στη γειτονιά του). Στα φ/β συστήματα δεν υφίσταται κανένα από αυτά τα προβλήματα. Το κοινό γνώρισμα και των δύο είναι ότι και τα φ/β συστήματα και οι συμβατικές πηγές ενέργειας στερούνται το πλεονέκτημα της αποθήκευσης. Στο σχήμα 1.4 αρκετά από τα μειονεκτήματα είναι μη τεχνικά αλλά αφορούν οικονομικά μεγέθη και την υποδομή. Αντισταθμίζονται μερικώς από μια πολύ υψηλή δημόσια αποδοχή καθώς δε μολύνουν το περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90, η μέση αύξηση στο ποσοστό παραγωγής από φ/β συστήματα ήταν πάνω από 33% το χρόνο.

| Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων | Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων |
|--|---|
| <p>Η πηγή «καυσίμου» είναι μεγάλη και ουσιαστικά άπειρη</p> <p>Καθόλου εκπομπές, ούτε καύσεις ή διάθεση ραδιενεργών καυσίμων (δεν συμβάλλει ουσιαστικά στην παγκόσμια ρύπανση ή την αλλαγή του κλίματος)</p> <p>Χαμηλό κόστος λειτουργίας</p> <p>Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη</p> <p>Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας</p> <p>Υψηλή αξιοπιστία (πάνω από 20 έτη)</p> <p>Γρήγορη εγκατάσταση</p> <p>Μπορεί να εγκατασταθεί σε υπάρχουσες κτιριακές εγκαταστάσεις</p> <p>Υψηλή αποδοχή του κοινού</p> <p>Υψηλά ποσοστά ασφαλείας</p> <p>Ημερήσια παραγωγή μπορεί να ευθυγραμμιστεί με ζήτηση</p> | <p>Υψηλό κόστος εγκατάστασης</p> <p>Φτωχότερα σε αξιοπιστία τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ισοζύγιο ενέργειας), περιλαμβανομένων των στοιχείων αποθήκευσης</p> <p>Έλλειψη ευρέως εμπορικά διαθέσιμων ολοκληρωμένων συστημάτων για εγκατάσταση μέχρι στιγμής</p> <p>Έλλειψη οικονομικά αποδοτικής αποθήκευσης ενέργειας</p> <p>Η πηγή «καυσίμου», ήλιος, δεν παρέχει συνεχώς την ίδια ακτινοβολία (χαμηλής αξιοπιστίας πηγή)</p> |

Σχήμα 1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης ενός περίπου κιλού διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα λοιπόν των Φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα και αποτελούν μια βιώσιμη λύση στο ενεργειακό πρόβλημα της εποχής μας. Ο πίνακας του σχήματος 1.5 συνοψίζει την ποσότητα των ρύπων (σε γραμμάρια) η έκλυση των οποίων αποφεύγεται για κάθε ηλιακή κιλοβατώρα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

| Υποκατάσταση | Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή κιλοβατώρα (λαμβάνοντας υπ' όψη και τις απώλειες του δικτύου) | | | |
|---|---|---|-----------------|------------------|
| | CO ₂ | SO ₂ | NO _x | PM ₁₀ |
| Λιγνίτη | 1.482 | 1-1,8 | 1,17-1,23 | 1,1 |
| Πετρελαίου (χαμηλού θείου) | 830 | 3,5 | 1,5 | 0,34 |
| Φυσικού αερίου | 475 | 0,017 | 0,6 | - |
| Μέσου ενεργειακού μείγματος χώρας (2008) | 1.017 | CO ₂ : διοξείδιο του άνθρακα, SO ₂ : διοξείδιο του θείου NO _x : οξείδια του αζώτου, PM ₁₀ : μικροσωματίδια | | |

Σχήμα 1.5 Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων σε gr ανά ηλιακή κιλοβατώρα

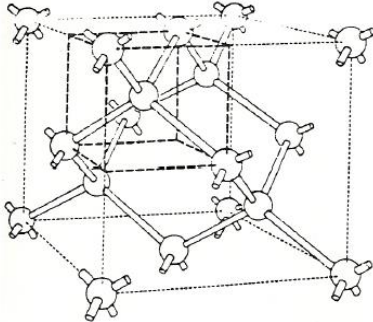
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Το Φωτοβολταϊκό κύτταρο

2.1 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

2.1.1. Το πυρίτιο

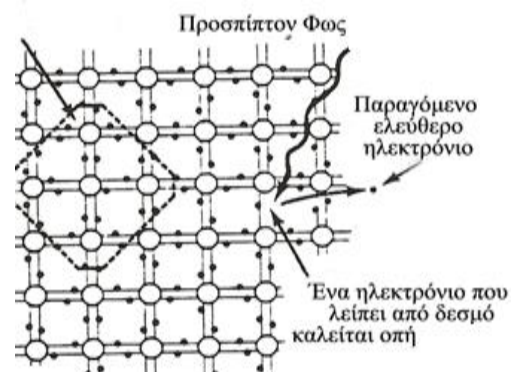
Η φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας στηρίζεται αφ' ενός μεν στην ηλιακή ακτινοβολία, αφ' ετέρου δε στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών. Το άτομο του πυριτίου (που αποτελεί τον κυριότερο εκπρόσωπο των ημιαγωγών) έχει 14 ηλεκτρόνια τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα 4 εξωτερικά, που λέγονται και ηλεκτρόνια σθένους μπορούν να δοθούν, να γίνουν αποδεκτά ή να μοιραστούν με ένα άλλο άτομο. Ένας μεγάλος αριθμός



Σχήμα 2. 1 Κρυσταλλική δομή του πλέγματος του πυριτίου

ατόμων, μέσω των ηλεκτρονίων σθένους, μπορούν να αλληλοσυνδεθούν με δεσμούς και να σχηματίσουν ένα κρυσταλλικό πλέγμα (σχήμα 2.1). Κάθε άτομο του πυριτίου είναι ενωμένο με 4 γειτονικά άτομα, μέσω ενός χημικού δεσμού που αποτελείται από ένα ζεύγος ηλεκτρονίων σθένους, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν ηλιακό φως πέσει σε κρυσταλλικό πυρίτιο, είναι δυνατόν να ανακλαστεί, να διαπεράσει τον κρύσταλλο ή να απορροφηθεί. Στη τελευταία περίπτωση αν το φως είναι χαμηλής ενέργειας τα άτομα του πυριτίου ταλαντώνονται περί την σταθερή θέση τους χωρίς να χαλαρώνουν οι δεσμοί μεταξύ τους, ενώ τα ηλεκτρόνια των δεσμών αποκτώντας μεγαλύτερη ενέργεια ανεβαίνουν σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες που δεν είναι ευσταθείς οπότε τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν σύντομα στις αρχικές χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες, αποδίδοντας υπό μορφή θερμότητας την ενέργεια που είχαν κερδίσει. Από την άλλη μεριά, αν το φως έχει αρκετή ενέργεια είναι δυνατόν να αλλάξει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κρυστάλλου. Έτσι, το ηλεκτρόνιο ενός δεσμού είναι δυνατόν να αποχωρισθεί της θέσης του στον κρύσταλλο και να μετακινηθεί στη ζώνη αγωγιμότητας (CONDUCTION BAND) αφήνοντας πίσω στη ζώνη σθένους (VALENCE BAND) ένα δεσμό από τον οποίον λείπει ένα ηλεκτρόνιο, που καλείται οπή (σχήμα 2.2).

Οπές στη ζώνη σθένους και ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερα να μετακινηθούν δια μέσω του κρυστάλλου και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ηλεκτρική συμπεριφορά των ηλιακών κυττάρων. Τα παραγόμενα, με την

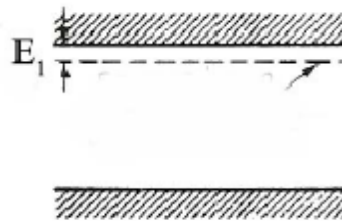
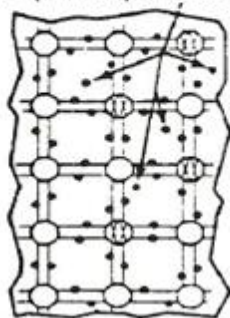


Σχήμα 2. 2 Δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων Παραγωγή οπών

βοήθεια του ηλιακού φωτός ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών αποτελούν τη βασική διαδικασία του φωτοβολταϊκού φαινομένου, χωρίς όμως να είναι σε θέση να δώσουν από μόνα τους ρεύμα. Εάν δεν υπήρχε και κάποιος άλλος μηχανισμός τα ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών θα εκτελούσαν, για σύντομο χρονικό διάστημα, τυχαίους ελιγμούς στον κρύσταλλο και τελικά θα επανέρχονταν στις αρχικές θέσεις τους στη ζώνη σθένους αποδίδοντας θερμική ενέργεια. Έτσι, για τη παραγωγή ρεύματος είναι απαραίτητος και ένας άλλος μηχανισμός, το φράγμα δυναμικού (POTENTIAL BARRIER). Κάθε ηλιακό κύτταρο περιέχει ένα φράγμα δυναμικού που διαχωρίζει τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών, στέλνοντας περισσότερα ηλεκτρόνια στη μια πλευρά του κυττάρου και περισσότερες οπές στην άλλη έτσι ώστε να υπάρχει μικρή πιθανότητα επανασύνδεσης μεταξύ των. Ο χωρισμός αυτός των φορτίων δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στα δυο άκρα του κυττάρου, που είναι δυνατόν να δώσει ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Όπως προαναφέρθηκε το άτομο του πυριτίου έχει 4 ηλεκτρόνια σθένους καθένα από τα οποία ανήκει σε ένα δεσμό με ένα άλλο άτομο πυριτίου. Εισάγουμε σε ένα καθαρό κρύσταλλο πυριτίου μια πρόσμιξη αντικαθιστώντας ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο από την πέμπτη ομάδα του περιοδικού συστήματος π.χ. φώσφορο, που έχει 5 ηλεκτρόνια σθένους. Το άτομο - πρόσμιξη θα αντικαταστήσει ένα άτομο πυριτίου προσφέροντας 4 ηλεκτρόνια για καθένα από τους 4 δεσμούς με 4 άλλα άτομα πυριτίου, ενώ θα υπάρχει περίσσεια ενός ηλεκτρονίου που δεν θα ανήκει σε δεσμό.

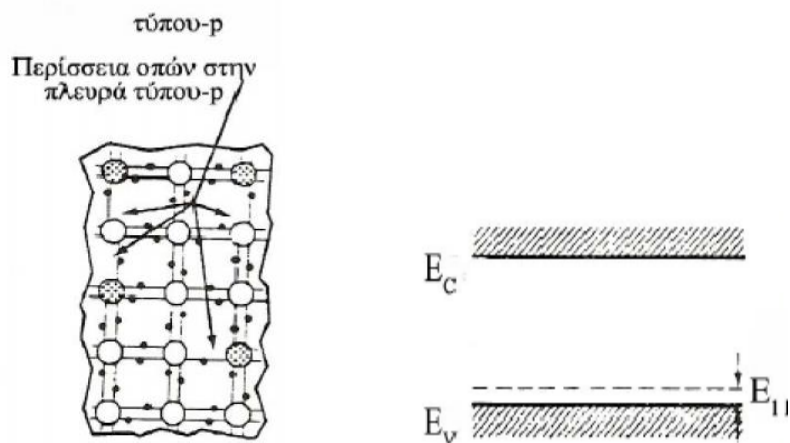
Το επί πλέον ηλεκτρόνιο δεν βρίσκεται ούτε στη ζώνη σθένους ούτε στη ζώνη αγωγιμότητας, αλλά σε μια ενδιάμεση στάθμη πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας που στη θερμοκρασία δωματίου υπάρχει αρκετή θερμική ενέργεια στον κρύσταλλο για να μετακινήσει αυτό το ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας, χωρίς το φόβο να επανασυνδεθεί με κάποια οπή αφού δεν έχει δημιουργήσει πίσω του κάποια οπή αλλά ένα θετικό ιόν φωσφόρου και είναι πάντα σε ετοιμότητα να συμβάλλει σε κάποιο ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι, ένας κρύσταλλος πυριτίου, όπου ένας μεγάλος αριθμός ατόμων του έχουν αντικατασταθεί με άτομα φωσφόρου θα έχει πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και ένα αντίστοιχο αριθμό θετικών ιόντων στη κρυσταλλική δομή (σχήμα 2.3). Έτσι, ενώ το σύνολο του κρυστάλλου παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερο, οι ηλεκτρικές ιδιότητες του κρυστάλλου έχουν αλλάξει δραστικά. Προσμίξεις αυτού του τύπου έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο σθένους καλούνται δότες (DONORS) και ο αντίστοιχος κρύσταλλος καλείται τύπου-n (n- TYPE). Τα παραπάνω αποτελούν ένα μέρος της διαδικασίας για τη δημιουργία του εσωτερικού φράγματος δυναμικού.

Περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων
στην πλευρά τύπου-n



Σχήμα 2.3 Αριστερά: Άτομα φωσφόρου έχουν αντικαταστήσει άτομα πυριτίου. Δεξιά: Επιτρεπόμενες στάθμες στο ενεργειακό χάσμα μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας για πρόσμιξη φωσφόρου.

Αν τώρα αντικαταστήσουμε ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο από την Τρίτη ομάδα του περιοδικού συστήματος π.χ. βόριο, που έχει 3 ηλεκτρόνια σθένους, το άτομο – πρόσμιξη θα προσφέρει τα 3 ηλεκτρόνια σε 3 δεσμούς με 3 άτομα πυριτίου, αλλά από τον τέταρτο δεσμό του αντικαθιστάμενου ατόμου πυριτίου θα λείπει ένα ηλεκτρόνιο δηλαδή θα υπάρχει μια οπή. Η οπή αυτή βρίσκεται σε μια ενδιάμεση στάθμη πολύ κοντά στη ζώνη σθένους που με αντίστοιχη θερμική ενέργεια μετακινείται στη ζώνη σθένους (σχήμα 2.4). Έτσι ένας κρύσταλλος πυριτίου "ντοπαρισμένος" με πολλά άτομα βόριου διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό οπών που είναι δυνατόν να θεωρηθούν σαν ελεύθερα θετικά φορτία και να μετακινηθούν μέσω του κρυσταλλικού πλέγματος. Προσμίξεις αυτού του τύπου (με 3 ηλεκτρόνια σθένους) καλούνται δέκτες (ACCEPTORS), διότι οι οπές τους δέχονται ηλεκτρόνια (ηλεκτρόνια σθένους που ανήκουν σε δεσμούς ή ηλεκτρόνια αγωγιμότητας) και ο αντίστοιχος κρύσταλλος καλείται τύπου-p (p-TYPE).

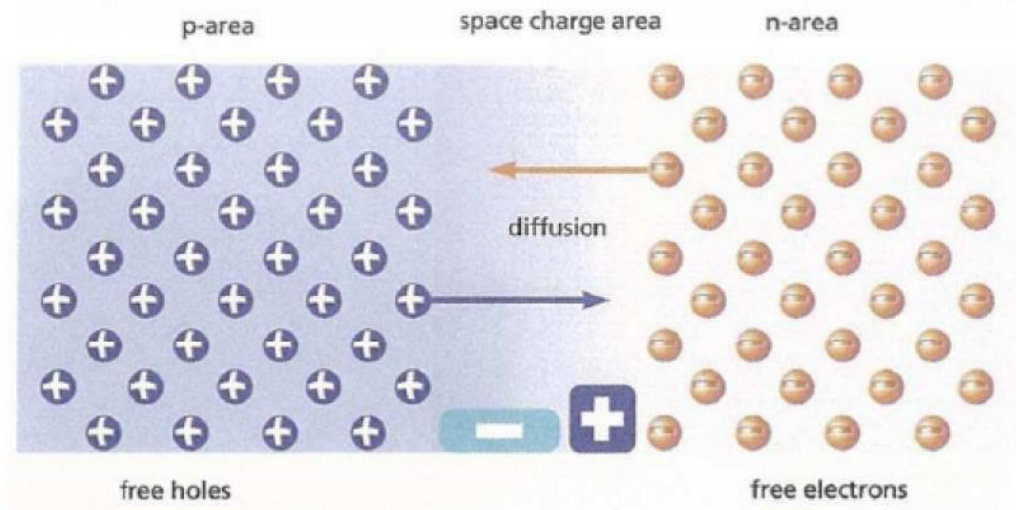


Σχήμα 2.4 Αριστερά: Άτομα βορίου έχουν αντικαταστήσει άτομα πυριτίου. Δεξιά: Επιτρεπόμενες στάθμες για πρόσμιξη βορίου.

Σε ένα υλικό τύπου-n τα ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτία) αποτελούν τους φορείς πλειονότητας (MAJORITY CARRIERS) ενώ οι οπές τους φορείς μειονότητας (MINORITY CARRIERS). Αντίστροφα, σε ένα υλικό τύπου-p τους φορείς πλειονότητας αποτελούν οι οπές (θετικά φορτία), ενώ τους φορείς μειονότητας τα ηλεκτρόνια.

2.1.2 Η p-n επαφή

Αν φέρουμε σε επαφή ένα υλικό τύπου n και ένα υλικό τύπου-p, η διαχωριστική γραμμή που καλείται επαφή (JUNCTION) αποτελεί την εστία δημιουργίας του φράγματος δυναμικού, που όπως είδαμε αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για την λειτουργία του ηλιακού κυττάρου.



Σχήμα 2.5 Το φαινόμενο της διάχυσης

Όταν λοιπόν τα δυο υλικά έλθουν σε επαφή, ελεύθερα ηλεκτρόνια από το υλικό τύπου-n μεταπηδούν (με τη διαδικασία της διάχυσης) μέσω της επαφής στο υλικό τύπου-p και συνδέονται με αντίστοιχες οπές, αφού το υλικό αυτό διαθέτει μεγάλο αριθμό οπών(σχήμα 2.5). Αν n είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων, dn/dx είναι η μονοδιάστατη βάρθρωση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων. Είναι προφανές ότι η ροή των ηλεκτρονίων είναι ανάλογη προς την αρνητική βάρθρωση της συγκέντρωσης. Επειδή το ρεύμα είναι ανάλογο προς τη ροή φορτισμένων σωματιδίων, το παραπάνω φαινόμενο συνίσταται σε ένα ρεύμα διάχυσης που η πυκνότητά του δίνεται από τη σχέση:

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx}$$

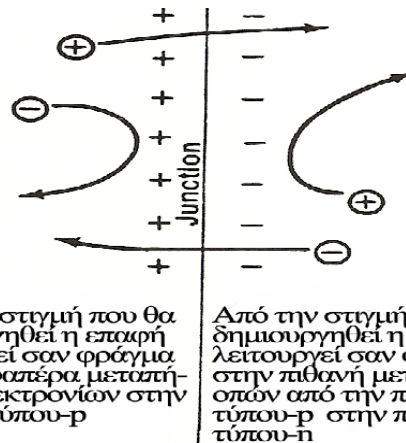
Όπου $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{Cb}$ (Electronic Charge), D_e : σταθερά διάχυσης ηλεκτρονίων

Από την άλλη μεριά, οπές από το υλικό τύπου-p μεταπηδούν (με τη διαδικασία της διάχυσης) στο υλικό τύπου-n (στην ουσία ηλεκτρόνια σθένους από το υλικό τύπου-n μεταπηδούν στο υλικό τύπου-p και συνδέονται με οπές) που συνιστούν ένα ρεύμα διάχυσης, η πυκνότητα του οποίου δίνεται από τη σχέση:

$$J_h = -qD_h \frac{dP}{dx}$$

Όπου D_h : σταθερά διάχυσης οπών, P : πυκνότητα οπών

Αυτή η διαδικασία μεταφοράς των φορτίων(σχήμα 2.6) δημιουργεί μια ανισορροπία φορτίων στις δυο πλευρές της επαφής: αρνητικά φορτία (επί πλέον ηλεκτρόνια) στην πλευρά τύπου-p της επαφής και θετικά φορτία (ιόντα) στην πλευρά τύπου-n της επαφής.



Σχήμα 2. 8 Η επίδραση του φράγματος δυναμικού

Αντίθετα μάλιστα, (χωρίς φωτισμό του κυττάρου) υπάρχει μικρός αριθμός φορέων μειονότητας, όπως ελεύθερα ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-p, τα οποία οδηγούνται από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής στην αντίθετη πλευρά δηλαδή στο υλικό τύπου-n και συνιστούν το ρεύμα ολίσθησης (DRIFT CURRENT) που δίνεται από τη σχέση:

$$J_e = q\mu_e nE$$

Όπου μ_e = ευκινησία (MOBILITY) των ηλεκτρονίων, E = ηλεκτρικό πεδίο. Το ίδιο ισχύει και για τις οπές που βρίσκονται στο υλικό τύπου-n, που συνιστούν ένα ρεύμα ολίσθησης:

$$J_h = q\mu_h pE$$

Όπου μ_h = ευκινησία (MOBILITY) των οπών. Το ολικό ρεύμα ολίσθησης προκύπτει σαν άθροισμα των δύο παραπάνω συνιστωσών, οπότε η αγωγιμότητα σ του ημιαγωγού προκύπτει:

$$\sigma = \frac{J}{E} = q\mu_e n + q\mu_h p$$

Επιπλέον οι διαδικασίες διάχυσης και ολίσθησης αλληλοσχετίζονται και οι ευκινησίες και οι σταθερές διάχυσης δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά συνδέονται με τις σχέσεις:

$$D_e = \frac{kT}{q} \mu_e \quad \text{και} \quad D_h = \frac{kT}{q} \mu_h$$

Όπου K : σταθερά BOLTZMANN (= 1.38×10^{-23} JOULE / K), T : απόλυτη θερμοκρασία [K]

Έτσι, σε συνθήκες ισορροπίας όταν το κύτταρο δεν φωτίζεται λίγοι φορείς πλειονότητας που αποκτούν τυχαία αρκετή ενέργεια ώστε να διασχίσουν το φράγμα συνιστούν ένα ρεύμα διάχυσης που αντισταθμίζεται από ίσο και αντίθετο ρεύμα ολίσθησης που οφείλεται σε φορείς μειονότητας, οπότε τελικά δεν υπάρχει ρεύμα στον κρύσταλλο.

2.1.4 Βασικές εξισώσεις- Η δίοδος

Τα παραπάνω αποτελούν την αρχή κατασκευής και κατ' επέκταση τη βάση για την αρχή λειτουργίας τόσο μιας διόδου επαφής p-n (όπως είναι ένα ηλιακό κύτταρο όταν δεν φωτίζεται) όσο και του ηλιακού κυττάρου όταν φωτίζεται. Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την πρώτη περίπτωση είναι οι ακόλουθες: α) Ο νόμος του Gauss σε διαφορική μορφή στην περιοχή της επαφής:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Όπου $\rho = q (p - n + N_D^+ - N_A^-)$ όπου $N_D^+ \approx N_D$: πυκνότητα στους δότες και $N_A^- \approx N_A$: πυκνότητα στους δέκτες.

β) Οι εξισώσεις πυκνότητας ρεύματος (διάχυσης και ολίσθησης):

$$J_e = q\mu_e nE + qD_e \frac{dn}{dx}$$

$$J_h = q\mu_h nE - qD_h \frac{dp}{dx}$$

γ) Οι εξισώσεις συνέχειας. Για ένα όγκο διατομής A και μήκους δx :

$$\begin{pmatrix} \text{Ρυθμός} \\ \text{εισόδου} \\ \text{ηλεκτρονίων(οπών)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Ρυθμός} \\ \text{εξόδου} \\ \text{ηλεκτρονίων(οπών)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Ρυθμός} \\ \text{παραγωγής} \\ \text{(λόγω- > φωτισμού)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Ρυθμός} \\ \text{επανασύνδεσης} \end{pmatrix}$$

που με σύμβολα μεταφράζονται στις δύο παρακάτω εξισώσεις για ηλεκτρόνια και οπές.

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_e}{dx} = U - G$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_h}{dx} = -(U - G)$$

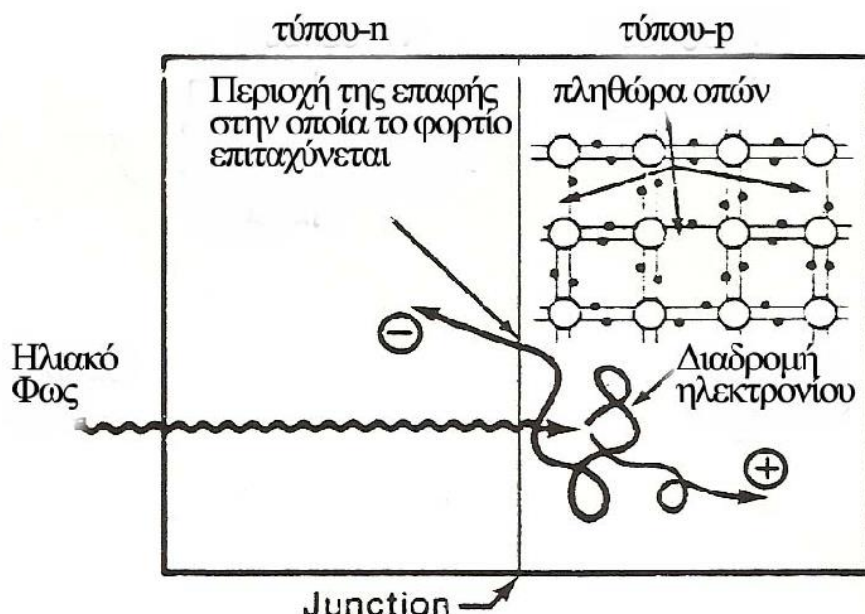
Όπου G : ρυθμός παραγωγής και U : ρυθμός επανασύνδεσης.

Αν και οι επί μέρους μηχανισμοί (φυσικοί και μαθηματικοί) είναι αρκετά πολύπλοκοι, εν τούτοις κάνοντας ορισμένες παραδοχές - προσεγγίσεις είναι δυνατόν να καταλήξει κανείς σχετικά εύκολα στη λύση των παραπάνω εξισώσεων.

Έτσι, στην περίπτωση ενός κυττάρου που δεν φωτίζεται ($G = 0$) το αποτέλεσμα μιας τέτοιας ανάλυσης δίνει την παρακάτω εξίσωση, που αποτελεί την βασική εξίσωση μιας διόδου επαφής p-n:

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

Όπου I : το ρεύμα του κυττάρου, V : η τάση του κυττάρου και I_0 : το ρεύμα κόρου της διόδου.



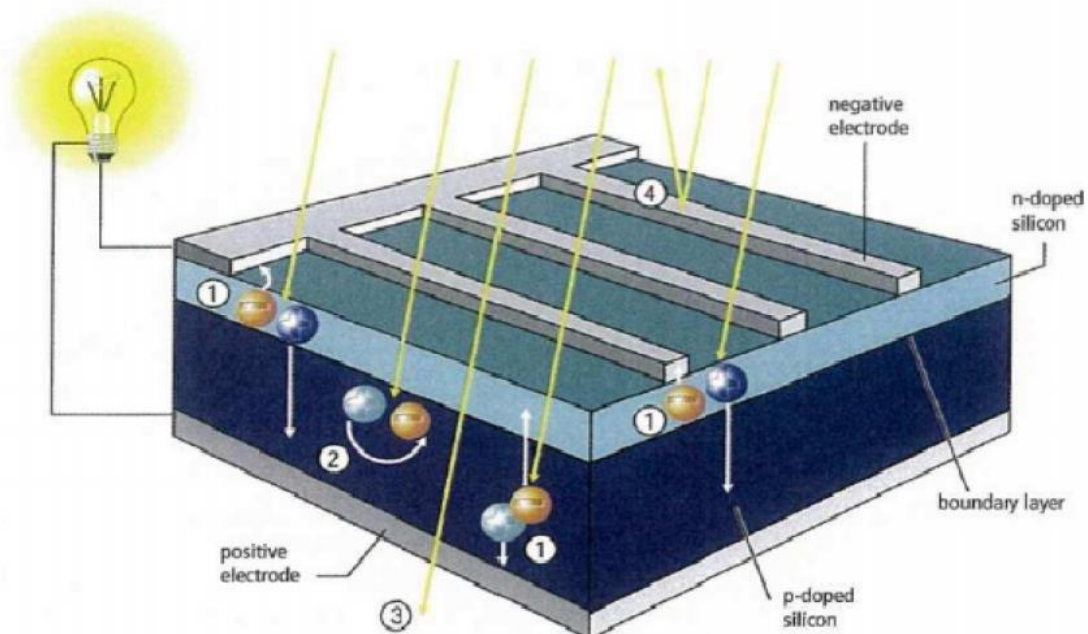
Σχήμα 2. 9 Το ηλιακό φως δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, ενώ το φράγμα δυναμικού στέλνει τα ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-n και τις οπές στο υλικό τύπου-p

2.2 Το ηλιακό κύτταρο

2.2.1 Βασικές εξισώσεις ηλιακού κυττάρου

Στη περίπτωση που το ηλιακό κύτταρο φωτίζεται ($G \neq 0$), φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα E_g του ημιαγωγού (ενεργειακό χάσμα είναι η διαφορά ενέργειας μεταξύ του πάνω μέρους της ζώνης σθένους και του κάτω μέρους της ζώνης αγωγιμότητας, είναι δε η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να ελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο, σταθερή για κάθε υλικό, μετράται σε μονάδες eV και στη περίπτωση του πυριτίου είναι $1.1eV$) δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών (σχήμα 2.9). Έστω ότι ένα τέτοιο ζεύγος δημιουργείται στο υλικό τύπου-p. Το ηλεκτρόνιο του ζεύγους έχει ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα που μπορεί να είναι ελεύθερο, διότι είναι πολύ πιθανό να επανασυνδεθεί με μια από τις πολυπληθείς οπές που υπάρχουν στο υλικό τύπου-p. Τα ηλιακά κύτταρα εν τούτοις σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ηλεκτρόνιο να φθάσει στην περιοχή της επαφής πριν του δοθεί η ευκαιρία επανασύνδεσης με κάποια οπή, οπότε θα αποδώσει την ενέργεια του υπό μορφή θερμότητας χωρίς να συμβάλλει στο φωτόρρευμα που μας ενδιαφέρει. Από τη στιγμή που το ελεύθερο ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στο πεδίο της επαφής, επιτυγχάνεται από το φράγμα δυναμικού προς το υλικό

τύπου-n, όπου υπάρχουν ελάχιστες οπές και δεν υπάρχει μεγάλος κίνδυνος επανασύνδεσης, επί πλέον δε υπάρχει μικρή πιθανότητα επιστροφής στο υλικό τύπου-p διότι πρέπει να υπερνικήσει το φράγμα δυναμικού. Από την άλλη πλευρά, η οπή του ζεύγους παραμένει στο υλικό τύπου-p, διότι απωθείται από το φράγμα της επαφής. Ανάλογα συμβαίνουν όταν το φως παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στο υλικό τύπου-n. Η διαδικασία αυτή διαχωρισμού των φορτίων που παράγονται σε ένα φωτιζόμενο ηλιακό κύτταρο, δημιουργεί πλεόνασμα αρνητικών φορτίων στο υλικό τύπου-n και θετικών φορτίων στο υλικό τύπου-p. Έτσι, αν συνδέσουμε την πλευρά τύπου-n με την πλευρά τύπου-p του κυττάρου μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος θα έχουμε ροή ρεύματος (σχήμα 2.10) μέσω του κυκλώματος. Αρνητικά φορτία ρέουν από το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο υλικό τύπου-n, μέσω του φορτίου (παράγοντας ωφέλιμο έργο στο φορτίο) στο υλικό τύπου-p, όπου επανασυνδέονται με οπές κοντά στο ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 2.10 Φως παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, το φράγμα δυναμικού διαχωρίζει τους φορείς στις δύο απέναντι πλευρές του κυττάρου, δημιουργώντας μια τάση που κυκλοφορεί ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα

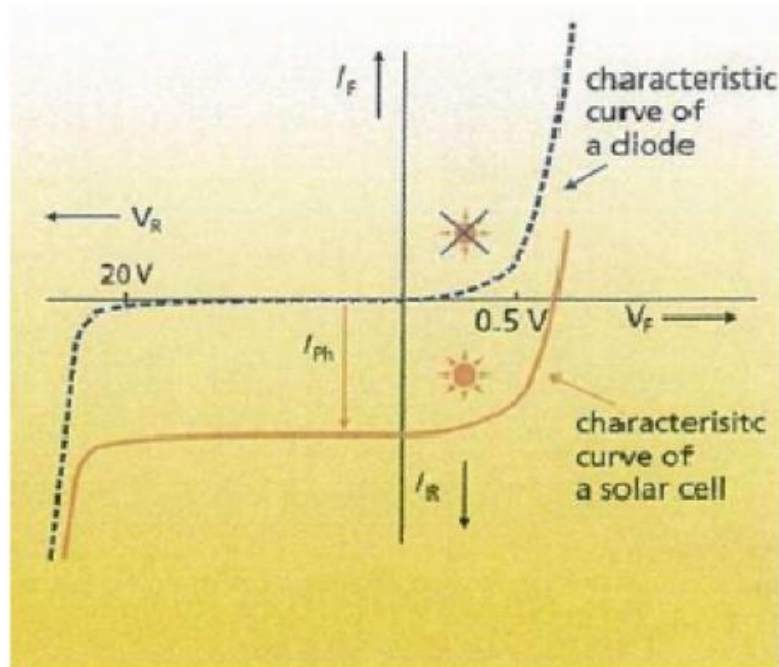
Η μαθηματική ανάλυση των φυσικών διεργασιών που αναπτύχθηκαν παραπάνω για την περίπτωση φωτιζόμενου ηλιακού κυττάρου στηρίζεται στις ίδιες εξισώσεις με τις οποίες προέκυψε η εξίσωση μιας διόδου p-n, με τη διαφορά ότι εδώ ο ρυθμός παραγωγής είναι $G \neq 0$.

Η επεξεργασία των εξισώσεων αυτών οδηγεί στη βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{ph}$$

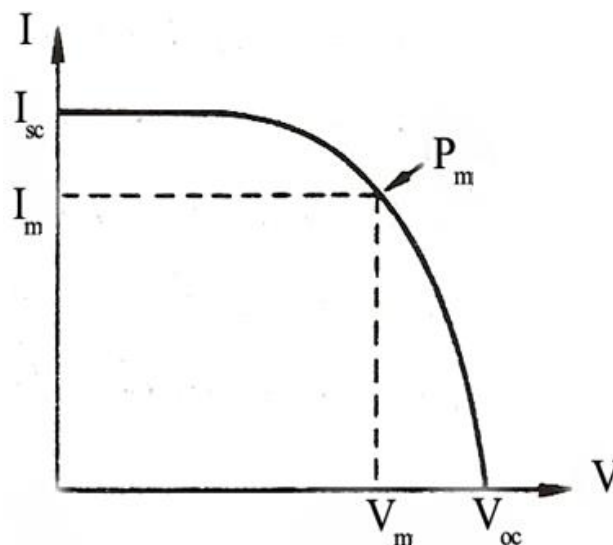
όπου I_{ph} είναι το φωτόρευμα, δηλαδή το ρεύμα που παράγεται λόγω του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός επί του κυττάρου.

Η γραφική παράσταση της παραπάνω εξίσωσης φαίνεται στο σχήμα 2.11, στο οποίο παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική καμπύλη στη περίπτωση που το κύτταρο φωτίζεται, είναι απλώς η χαρακτηριστική καμπύλη όταν το κύτταρο δεν φωτίζεται μετατοπισμένη προς τα κάτω κατά I_{ph} .



Σχήμα 2. 11 Η χαρακτηριστική εξόδο του ηλιακού κύτταρου και της διόδου.

Η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου που προέκυψε θεωρητικά δεν αντικατοπτρίζει, με ικανοποιητική ακρίβεια, την πραγματική V-I χαρακτηριστική καμπύλη ενός κυττάρου σε πρακτικούς σκοπούς. Πειραματικές παρατηρήσεις έχουν οδηγήσει στη βελτίωση της εξίσωσης αυτής με τη χρησιμοποίηση τριών πρόσθετων παραμέτρων N , R_s και R_p . Επί πλέον έχει επικρατήσει, για λόγους κυκλωματικής ανάλυσης, η αναπαράσταση της V-I χαρακτηριστικής του κυττάρου να γίνεται στο πρώτο τεταρτημόριο (σχήμα 2.12).



Σχήμα 2. 12 V-I Χαρακτηριστική

Οι δύο τελευταίες παρατηρήσεις οδηγούν στην παρακάτω εξίσωση για το ηλιακό κύτταρο:

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{NKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Όπου

I = ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου

I_{ph} = φωτόρευμα

I_o = ρεύμα κόρου διόδου

q = φορτίο ηλεκτρονίου

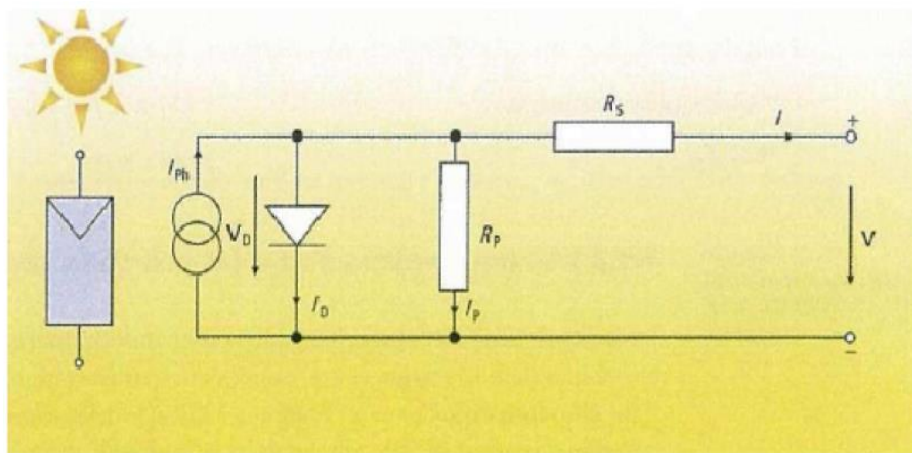
V = τάση στην έξοδο του κυττάρου

R_s = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου

N = σταθερά με τιμές μεταξύ 1 και 2(συνήθως συμβολίζεται με A , χρησιμοποιήσαμε το N γιατί αυτό χρησιμοποιεί και το MATLAB)

R_p = παράλληλη αντίσταση

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί το μοντέλο του ηλιακού κυττάρου, που υπό μορφή ισοδύναμου κυκλώματος φαίνεται στο σχήμα 2.13 που ακολουθεί.



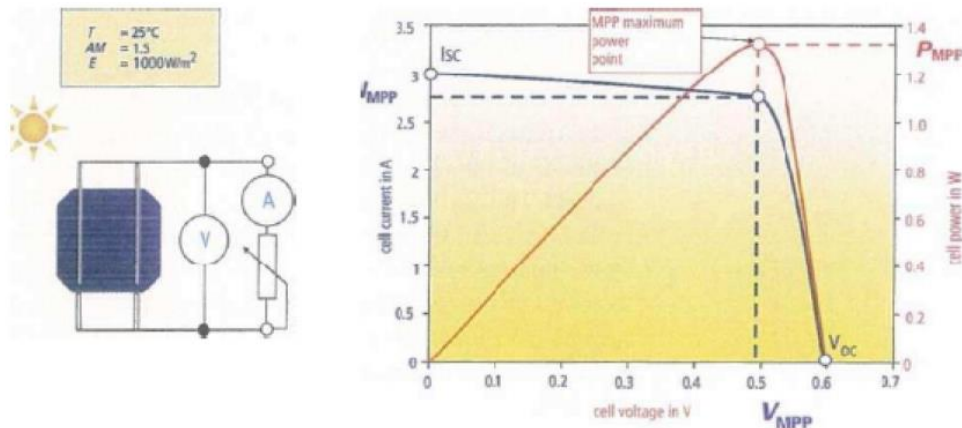
Σχήμα 2. 13 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού κυττάρου

Η χαρακτηριστική εξίσωση απλοποιείται σημαντικά αν θεωρήσουμε άπειρη την παράλληλη αντίσταση R_p , οπότε προκύπτει:

$$I = I_{ph} - I_o [e^{A(V+IR_s)} - 1]$$

όπου $A=q/NKT$.

Στο σχήμα 2.14 δίνεται η αναπαράσταση της V-I χαρακτηριστικής του κυττάρου στο πρώτο τεταρτημόριο μαζί με τη χαρακτηριστική της ισχύος (V-P):



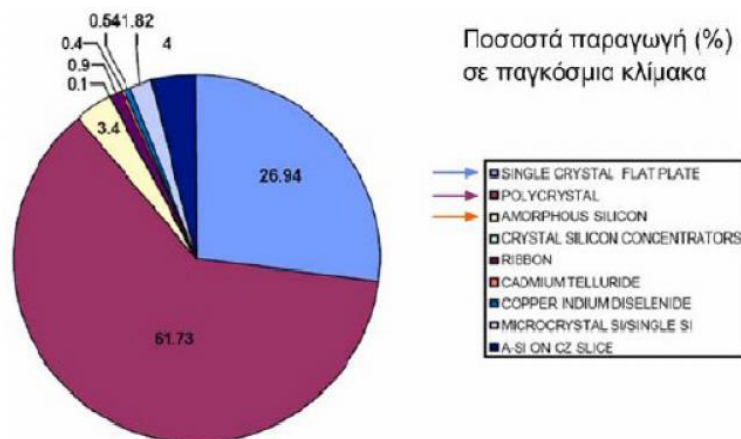
Σχήμα 2. 14 V-I και V-P χαρακτηριστική ηλιακού κυττάρου

2.2.2 Είδη ηλιακών κυττάρων

Η μεγάλη πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών κυττάρων αυτή τη στιγμή γίνεται από πυρίτιο, αλλά υπάρχουν και άλλα ημιαγωγικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως το GaAs και το CdTe. Τα είδη ηλιακών κυττάρων, που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αγορά είναι τα εξής:

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου.
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου.
- Λεπτής μεμβράνης (Thin-film).
- Υβριδικά

Αυτήν την περίοδο οι τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου (μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό) αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της γενικής παραγωγής ηλιακών κυττάρων όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2. 15 Υλικά κατασκευής φ/β κυττάρων σε παγκόσμια κλίμακα

2.2.2α Μονοκρυσταλλικά Κύτταρα Si



Η ονομασία τους προέρχεται από την μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος των ατόμων Si που πλησιάζει τον τέλειο κρύσταλλο (σχήμα 2.16). Το πυρίτιο και τα οξυγόνο – τα δύο πλέον άφθονα στοιχεία της γης – σχηματίζουν μια χημική ένωση, το SiO₂, που αποτελεί το πρωταρχικό υλικό, το οποίο με κατάλληλες βιομηχανικές

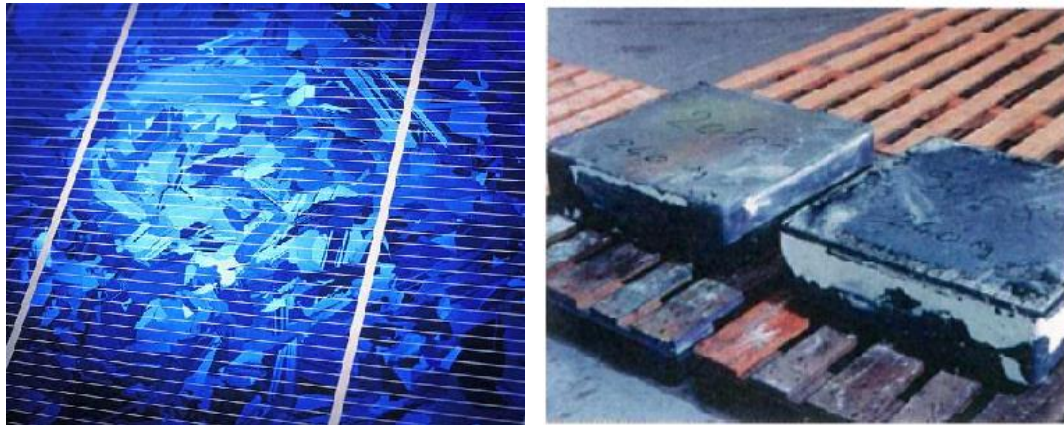
διεργασίες δηλαδή τήξη, αργή στερεοποίηση, πρόσθεση προσμίξεων, καθαρισμός, κοπή και στίλβωση, καταλήγει σε λεπτές πλάκες τα ηλιακά κύτταρα (σχήμα 2.17). Βασικό μειονέκτημα της όλης διαδικασίας είναι το κόστος κατασκευής του κυττάρου, που είναι σχετικά μεγάλο, λόγω της ανάγκης χρησιμοποίησης ιδιαίτερα καθαρού Si, η χρήση εξειδικευμένων μεθόδων τήξης και κοπής για την επίτευξη του μονοκρυσταλλικού πλέγματος αυξάνει το κόστος παραγωγής. Η εμπορική αποδοτικότητα τους όμως φτάνει μεταξύ 15% και 18 % δίνοντας τους τον καλύτερο βαθμό απόδοσης από όλες τις τεχνολογίες κατασκευής κυττάρων. Το ποσοστό αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα είναι πιο ευαίσθητα στην υπέρυθη ακτινοβολία που το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι σχετικά χαμηλό.



Σχήμα 2.17 Πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου

2.2.2β Πολυκρυσταλλικά Κύτταρα Si

Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα στο πλέγμα τους περιλαμβάνουν κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών. Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα που κατασκευάζονται συνήθως μετά από τήξη και διαδικασία στερεοποίησης, είναι λιγότερο ακριβές να παραχθούν διότι είναι μαζική και λιγότερο ελεγχόμενη η ψύξη του Si. Όπως και στην προηγούμενη τεχνολογία, μετά την ψύξη το πολυκρυσταλλικό πλέγμα πριονίζεται στα λεπτά φ/β κύτταρα (σχήμα 2.18). Η ύπαρξη διαφόρων κρυστάλλων μέσα στο πλέγμα αυξάνει την εσωτερική αντίσταση στα σημεία σύνδεσής τους, με αποτέλεσμα έναν βαθμό απόδοσης περίπου 14 %.



Σχήμα 2.18 Φωτοβολταϊκά κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου

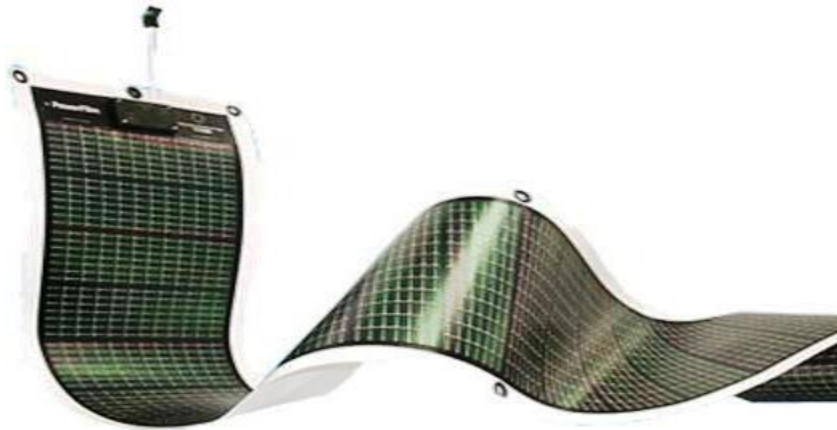
2.2.2γ Κύτταρα λεπτής μεμβράνης

Η τεχνολογία των λεπτών μεμβρανών χρησιμοποιεί πολύ λεπτά στρώματα (πάχους λίγων μικρών) του ημιαγωγού και με τον τρόπο αυτό μειώνεται το κόστος (σχήμα 2.19). Τα πιο γνωστά υλικά που χρησιμοποιούνται στα κύτταρα αυτά είναι :

- Άμορφο πυρίτιο (a-Si).
- Copper Indium Diselenide (CIS).
- Cadmium Telluride (CdTe).
- Gallium Arsenide (GaAs).

Με τα δυο πρώτα να είναι τα σημαντικότερα.

Το άμορφο πυρίτιο διαφέρει από το κρυσταλλικό στο ότι τα άτομα δεν είναι τοποθετημένα σε ακριβείς αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των δεσμών τους δεν είναι συγκεκριμένες. Σήμερα ένα εμπορικό φ/β πλαίσιο με κύτταρα άμορφου πυριτίου έχει απόδοση 6-8%, ενώ τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται στο 11-14%. Λεπτό στρώμα άμορφου πυριτίου τοποθετείται σε φύλλο γυαλιού, το οποίο έχει καλυφθεί από διάφανο οξειδίο του κασσιτέρου. Στην πίσω επιφάνεια τοποθετείται μεταλλικός αγωγός και στη συνέχεια η όλη διάταξη κόβεται με laser για την παραγωγή μιας σειράς ηλεκτρικά συνδεδεμένων άλλα ξεχωριστών στοιχείων και στο τέλος γίνεται η ενσωμάτωση τους σε μια φ/β μονάδα.



2.2.2δ Υβριδικά κύτταρα

Για να επιτευχθεί ουσιώδης βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων έπρεπε να γίνει κάποια σημαντική αλλαγή. Σε μια προσπάθεια να γίνει αυτό έγινε μελέτη στη χρήση υβριδικών δομών, στις οποίες κύτταρα με διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης φωτός συνδέονται μαζί. Αυτό επιτρέπει να πετύχουμε καλύτερα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα υλικά και διαδικασίες. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μιας δομής με πολλά στρώματα είναι τα εξής :

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

Στο σχήμα 2.20 γίνεται μια σύγκριση όλων των τεχνολογιών που περιγράφηκαν.

| Συγκριτικός Πίνακας Τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών Κυττάρων | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Τύπος | Λεπτές μεμβράνης | Πολυκρυσταλλικά | Μονοκρυσταλλικά | Υβριδικά |
| Απόδοση | Άμορφα : 5-7% CIS : 7-10% | 11-14% | 13-16% | 16-17% |
| Επιφάνεια ανά KWp | 10-20 m ² | 8-10 m ² | 7-8 m ² | 6-7 m ² |

Σχήμα 2.20 Σύγκριση της απόδοσης κα της επιφάνειας των διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών κυττάρων

2.2.3 Υπολογισμός απόδοσης ηλιακού κυττάρου

Όλα τα ηλιακά κύτταρα έχουν ένα βαθμό απόδοσης ο οποίος ονομάζεται ονομαστικός και αναφέρεται στην απόδοση του κυττάρου κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία αναφοράς. Σχεδόν ποτέ όμως ένα κύτταρο δεν λειτουργεί στην θερμοκρασία αναφοράς και ποτέ δε

λειτουργεί σε σταθερή θερμοκρασία. Άλλη είναι η θερμοκρασία το καλοκαίρι και άλλη το χειμώνα. Ακόμα και την ίδια ημέρα άλλη θερμοκρασία έχουμε αν συννεφιάσει και άλλη αν έχει ηλιοφάνεια. Για το λόγο αυτό πρέπει να υπολογίσουμε την απόδοση του

κυττάρου στην θερμοκρασία που έχουμε κάθε φορά. Οι σχέσεις που ακολουθούνται για τον υπολογισμό αυτό είναι οι ακόλουθες. Η μέση απόδοση ενός ηλιακού κυττάρου δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_c - T_a)]$$

όπου β_p είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας για την απόδοση του ηλιακού κυττάρου και δίνεται από τον κατασκευαστή, η_r είναι ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού κυττάρου στη θερμοκρασία αναφοράς T_r (25 °C) , T_c είναι η θερμοκρασία που συνδέεται με την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την θερμοκρασία T_c ισχύει ο τύπος του Evans:

$$T_c - T_a = (219 + 832\overline{K_T}) \frac{NOCT - 20}{800}$$

όπου NOCT (Normal Operation Cell Temperature) δίνεται από τον κατασκευαστή και $\overline{K_T}$ είναι ο μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας.

Τα ηλιακά κύτταρα τοποθετούνται κεκλιμένα ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση. Για κάθε μέρος, εποχή, μήνα, ημέρα και ώρα υπάρχει μια βέλτιστη κλίση στην οποία η ηλιακή ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική από το κύτταρο γίνεται μέγιστη. Αν η κλίση των ηλιακών κυττάρων είναι διαφορετική από τη βέλτιστη τότε γίνεται χρήση της σχέσης :

$$T_c - T_a = C_f (219 + 832\overline{K_T}) \frac{NOCT - 20}{800}$$

Όπου C_f διορθωτικός συντελεστής που είναι ίσος με :

$$C_f = 1 - 1.17 * 10^{-4} (\beta_m - \beta)^2$$

όπου β_m είναι η βέλτιστη κλίση συλλέκτη ανάλογα με τις συνθήκες (τόπος-καιρός).

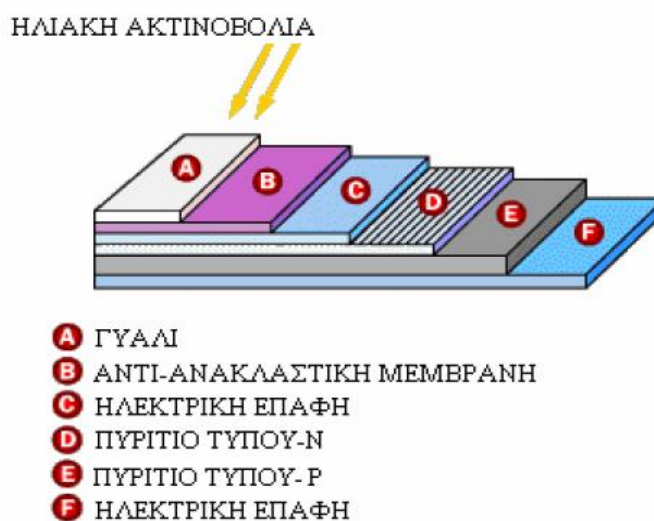
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Φωτοβολταϊκά συστήματα

3.1 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

3.1.1 Εισαγωγή

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο πυριτίου αποτελείται από 36 ηλιακά κύτταρα σε σειρά, έχει έξοδο με συνεχές ρεύμα και συνεχή τάση. Συνήθως τροφοδοτεί συσσωρευτή τάσης 12V. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 που ακολουθεί, η επιφάνεια που είναι στραμμένη προς τον ήλιο καλύπτεται από γυάλινο κάλυμμα που είναι ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες και στην υπεριώδη ακτινοβολία, προφυλάσσει τα κύτταρα και τις ηλεκτρικές επαφές από την βροχή, το χαλάζι και το χιόνι που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση. Κάτω από το γυάλινο κάλυμμα υπάρχει αντί-ανακλαστική μεμβράνη, ώστε να μειωθεί το ποσοστό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω και κάτω από την επιφάνεια του πυριτίου υπάρχουν ηλεκτρικές επαφές από υλικό μικρής θερμικής αντίστασης που το συνδέουν με το εξωτερικό κύκλωμα. Τέλος, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ασφαρίζεται μέσα σε μια μεταλλική θήκη αλουμινίου.



Σχήμα 3.1 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) στα κλασσικά επίπεδα συστήματα και β) στα συστήματα συγκεντρωτικών συλλεκτών.

3.1.2 Συστήματα Επίπεδων Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Πρόκειται για τον πιο κοινό τύπο φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα πλαίσια μπορούν είτε να είναι μόνιμα σε μια σταθερή γωνία κλίσης είτε να είναι κινητά και να ακολουθούν την κίνηση του ήλιου. Απορροφούν και την διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία. Η σημαντικότητα του παραπάνω φαίνεται από το γεγονός ότι ακόμα και με καθαρό ουρανό η διάχυτη ακτινοβολία είναι το 10 με 20% της συνολικής, σε επίπεδη επιφάνεια. Σε μερικώς συννεφιασμένες μέρες το ποσοστό αυτό φτάνει το 50% και σε τελείως συννεφιασμένες μέρες φτάνει το 100%. Τα πιο απλά επίπεδα πλαίσια είναι σε σταθερή θέση. Τα πλεονεκτήματα των σταθερών πλαισίων είναι ότι δεν έχουν κινητά μέρη, πρακτικά δεν υπάρχει ανάγκη για επιπλέον εξοπλισμό, και είναι σχετικά ελαφριά. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα κάνουν κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν σε μια σειρά από περιπτώσεις, όπως είναι και οι στέγες των σπιτιών. Ο προσανατολισμός των πλαισίων αυτών ώστε να αποδίδουν ικανοποιητικά πρέπει να είναι προς το Νότο και η κλίση $(\varphi+15^\circ)\pm 5^\circ$ όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Τα επίπεδα πλαίσια με μηχανισμό κίνησης επιτυγχάνουν μεγαλύτερη απορρόφηση ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας αφού μπορούν και έχουν την βέλτιστη γωνία κλίσης και προσανατολισμού κάθε χρονική στιγμή. Όμως έχουν επιπλέον κόστος και βάρος λόγω του μηχανισμού κίνησης. Βρίσκοντας μια ισορροπία μεταξύ των δύο μπορεί να γίνει η σωστή επιλογή για την κάθε περίπτωση.

3.1.3 Συστήματα Συγκεντρωτικών Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Ο κύριος λόγος χρήσης τέτοιων συστημάτων είναι η ικανότητά τους να χρειάζονται λιγότερα ηλιακά κύτταρα από τα επίπεδα συστήματα για την παραγωγή της ίδιας ισχύος. Τα κύτταρα αποτελούν το πιο ακριβό τμήμα ενός συστήματος μετρώντας το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας. Για το σύστημα συγκέντρωσης της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά, όπως είναι πλαστικά κάτοπτρα και μεταλλικές θήκες, που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια από μια συγκριτικά μεγάλη επιφάνεια και την εστιάζουν σε μια μικρότερη επιφάνεια στην οποία βρίσκεται το κύτταρο. Αρκετά είναι τα πλεονεκτήματα των συγκεντρωτικών συστημάτων έναντι των επίπεδων. Έχουν αυξημένη ισχύ εξόδου και η απόδοση του συστήματος είναι μεγαλύτερη έχοντας ταυτόχρονα μικρότερο μέγεθος κυττάρων ή μικρότερο αριθμό κυττάρων. Το πόσο θα αυξηθεί η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό απ' το σχήμα του ηλιακού κυττάρου και από το υλικό που είναι κατασκευασμένο. Ακόμα, η δυνατότητα χρήσης μικρών ηλιακών κυττάρων αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα διότι είναι πιο δύσκολο να παραχθούν κύτταρα μεγάλης επιφάνειας με μεγάλη απόδοση απ' ότι μικρής επιφάνειας. Απ' την άλλη πλευρά, υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στο μέλλον. Για παράδειγμα τα απαιτούμενα οπτικά του συστήματος είναι σημαντικά πιο ακριβά από τα καλύμματα των επίπεδων συστημάτων. Επιπλέον, δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν την διάχυτη ακτινοβολία, δηλαδή ακόμη και σε μία ηλιόλουστη μέρα χάνεται το 20% της ακτινοβολίας, οπότε χρειάζεται να ακολουθούν την κίνηση του ήλιου καθ' όλη την διάρκεια της μέρας και συνολικά του έτους. Άρα, για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης

πρέπει ο μηχανισμός κίνησης να είναι μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτούς που χρησιμοποιούνται στα επίπεδα συστήματα. Για την συγκέντρωση του φωτός χρησιμοποιούνται οι ανακλαστήρες και οι φακοί με πιο διαδεδομένο τον φακό FRESNEL που έχουν διατομή σαν δόντι πριονιού για να συγκεντρώσουν το εισερχόμενο φως. Όμως, δεν υπάρχει φακός που να μπορεί να μεταφέρει το 100% του προσπίπτοντος φωτός αλλά συνήθως μεταφέρεται 90-95% ή και λιγότερο (λόγω απορρόφησης και ανακλάσεως).

Ένα άλλο πρόβλημα είναι αυτό της υπερθέρμανσης των κυττάρων που παράγεται από την μεγάλη συγκέντρωση ακτινοβολίας που γενικά είναι επιθυμητή. Η θερμοκρασία των κυττάρων πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα διότι με την αύξηση όχι μόνο μειώνεται η απόδοσή τους αλλά και μακροπρόθεσμα μπορεί να διαταραχθεί η σταθερότητα στη λειτουργία τους ή ακόμα και να καταστραφούν πρόωρα. Μια από τις πιο σημαντικές προσπάθειες για διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας αποτελεί η ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης των επαφών που μεταφέρουν το ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας επαφές μεγαλύτερης επιφάνειας, το οποίο έχει όμως σαν αποτέλεσμα να προκαλείται σκίαση στο κύτταρο. Γι' αυτό υπάρχουν δύο λύσεις. Η μια είναι η τοποθέτηση πρισματικού καλύμματος πάνω από την επαφή οπότε το φως που θα προσέπιπτε στην επαφή, τώρα προσπίπτει στο πρίσμα, εκτρέπεται και διοχετεύεται στο κύτταρο. Η άλλη λύση είναι να τοποθετηθούν και οι δύο επαφές πίσω από το κύτταρο το οποίο όμως απαιτεί πολύ καλής ποιότητας υλικό πυριτίου.

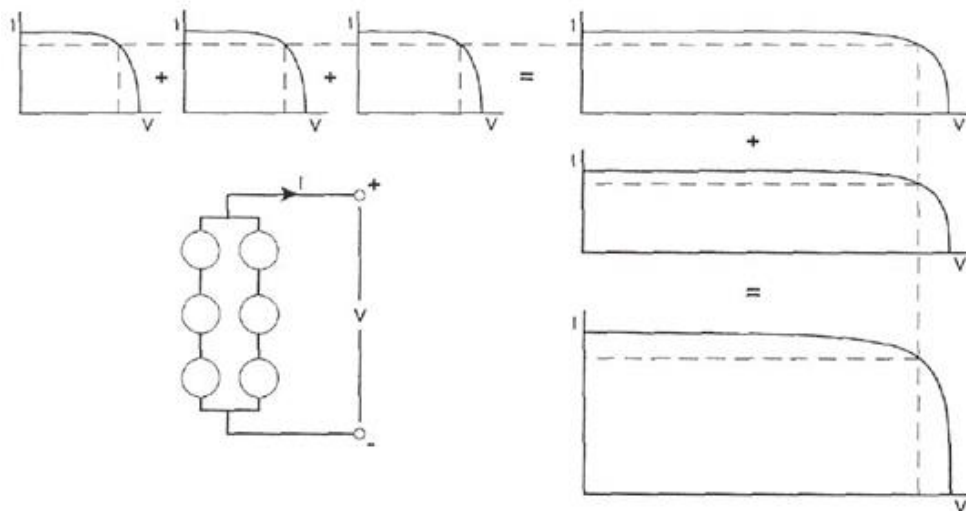
3.1.4 Μηχανισμός Κίνησης

Ο μηχανισμός κίνησης του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να επιτρέπει την κίνηση σε έναν ή σε δύο άξονες. Τα συστήματα ενός άξονα είναι σχεδιασμένα να ακολουθούν την πορεία του ήλιου από την ανατολή στη δύση. Χρησιμοποιούνται κυρίως με συστήματα επίπεδων φωτοβολταϊκών πλαισίων και μερικές φορές με συστήματα συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα συστήματα δύο αξόνων όχι μόνο κάνουν την παραπάνω λειτουργία, αλλά και παρακολουθούν την μεταβολή της απόκλισης του ήλιου κατά την διάρκεια του έτους. Χρησιμοποιούνται κυρίως με συγκεντρωτικά πλαίσια. Τα συστήματα δύο αξόνων είναι πιο πολύπλοκα, πιο ακριβά και χρειάζονται μεγαλύτερη συντήρηση σε σύγκριση με αυτά του ενός άξονα.

3.1.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η εξίσωση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου προκύπτει από τη βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου. Είναι γνωστό ότι υπό ιδανικές συνθήκες δύο ή περισσότερες ίδιες πηγές τάσης σε σειρά προστίθενται, όπως και δύο ή

περισσότερες ίδιες πηγές ρεύματος παράλληλα. Έτσι όταν τα ηλιακά κύτταρα έχουν τα ίδια ακριβώς ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η μέγιστη ισχύς που παίρνουμε από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει κάθε στοιχείο ξεχωριστά, επί τον αριθμό των στοιχείων. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου προσδιορίζεται από τον αριθμό συγκεκριμένων ηλιακών στοιχείων που συνδέονται σε σειρά και το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο (για κανονικά επίπεδα ηλιοφάνειας) προσδιορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων (ή ομάδα εν σειρά στοιχείων) που συνδέονται παράλληλα. Η χαρακτηριστική V-I καμπύλη ενός συνόλου ίδιων ηλιακών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα, προκύπτει με αντίστοιχο συνδυασμό των χαρακτηριστικών των επιμέρους στοιχείων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3. 2 V-I χαρακτηριστική φωτοβολταϊκού πλαισίου με στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και Παράλληλα

Στην περίπτωση ενός πλαισίου, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε N_s ίδια ηλιακά κύτταρα σε σειρά (αλυσίδα) και N_p ίδιες αλυσίδες παράλληλα, τότε η σχέση του κυττάρου γίνεται:

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{NKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

όπου:

$$n = N_s n_{cell}$$

$I = N_p \cdot I_{cell}$, το ρεύμα στην έξοδο του φ/β πλαισίου

$V = N_s \cdot V_{cell}$, η τάση στην έξοδο του φ/β πλαισίου

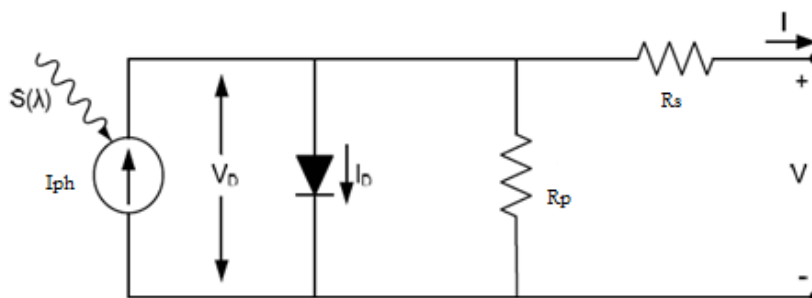
$I_{ph} = N_p \cdot I_{ph,cell}$, το συνολικό ισοδύναμο φωτόρρευμα του φ/β πλαισίου

$I_o = N_p \cdot I_{o,cell}$, το συνολικό ισοδύναμο ρεύμα κόρου της διόδου

$R_s = (N_s/N_p) \cdot R_{s,cell}$, η ισοδύναμη εν σειρά αντίσταση του φ/β πλαισίου

$R_p = (N_s/N_p) \cdot R_{p,cell}$, η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση του φ/β πλαισίου

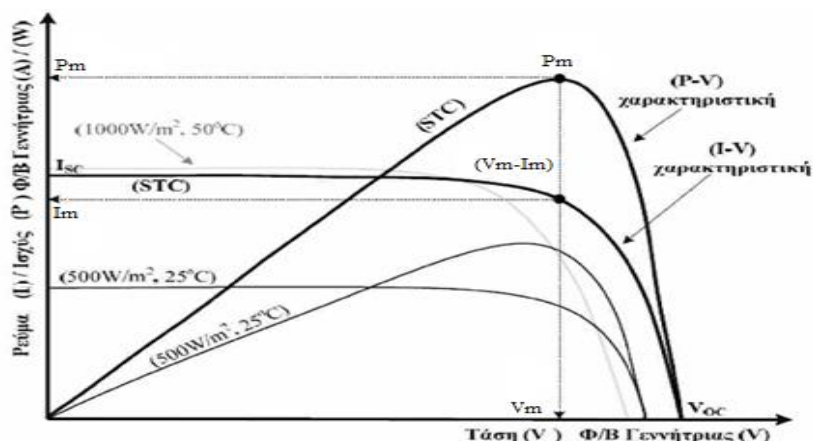
Η εξίσωση αυτή είναι μη γραμμική της μορφής $I = f(I, V)$ και είναι πεπλεγμένη. Αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την ηλεκτρική συμπεριφορά, σε στατικές καταστάσεις, ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επομένως το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου, μπορεί να παρασταθεί από το ηλεκτρικό κύκλωμα του σχήματος 3.3:



Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι τυπικές ποιοτικές χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος (χαρακτηριστική $V-I$) και τάσης- ισχύος (χαρακτηριστική $V-P$) ενός φ/β πλαισίου και πάνω σε αυτές σημειώνονται τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά ηλεκτρικά του μεγέθη, που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας του πλαισίου και καθορίζουν την απόδοση του.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος, I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης, V_{oc}), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα. Συνεπώς, στα δύο παραπάνω σημεία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (ζεύγος τιμών τάσης και ρεύματος), η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μηδενίζεται. Παράλληλα μεταβάλλεται ομαλά η ισχύς που παράγει το στοιχείο και η μέγιστη τιμή της P_m , επιτυγχάνεται για ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και ρεύματος I_m , για το οποίο η χαρακτηριστική ($V-P$) της ισχύος ως προς την τάση παρουσιάζει μέγιστο. Διαφορετικά μπορεί να ειπωθεί, ότι για τις τιμές αυτές των V_m , I_m , το εμβαδόν του ορθογωνίου που σχηματίζεται από την $V-I$ καμπύλη και τους άξονες τάσης και έντασης ρεύματος, γίνεται μέγιστο.



Σχήμα 3.4 Ποιοτικές καμπύλες τάσης-ρεύματος και τάσης- ισχύος ενός φ/β πλαισίου

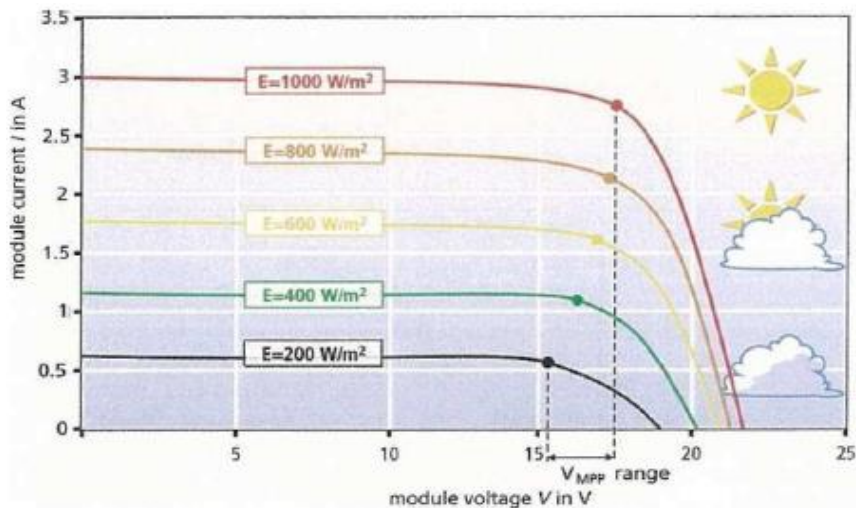
Από τη μελέτη του παραπάνω σχήματος, διαπιστώνεται ότι οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες παρουσιάζουν μια αρκετά ιδιόμορφη συμπεριφορά συγκριτικά με τις συνήθεις πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές, οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή την τιμή της τάση τους στην περιοχή κανονικής λειτουργίας τους, η τάση των φ/β γεννητριών μεταβάλλεται δραστικά και μάλιστα μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του

ρεύματος που παρέχουν σε κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, ακόμα και για σταθερές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Μια προσεκτικότερη μελέτη της χαρακτηριστικής V-I, αποδεικνύει ότι αριστερά από το γόνατο της καμπύλης, η ένταση του ρεύματος που παρέχεται από το φ/β πλαίσιο σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα μεταβάλλεται ελάχιστα για μεγάλες μεταβολές της τάσης, ενώ αντίθετα δεξιά από το γόνατο το ρεύμα μεταβάλλεται σημαντικά για μικρές μεταβολές της τάσης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα ενός ηλιακού κυττάρου καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής του, ενώ το ρεύμα που δύναται να παράσχει σε ένα εξωτερικό κύκλωμα είναι, σχεδόν, ευθέως ανάλογο προς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα για την εξάρτηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των φ/β γεννητριών από τις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας:

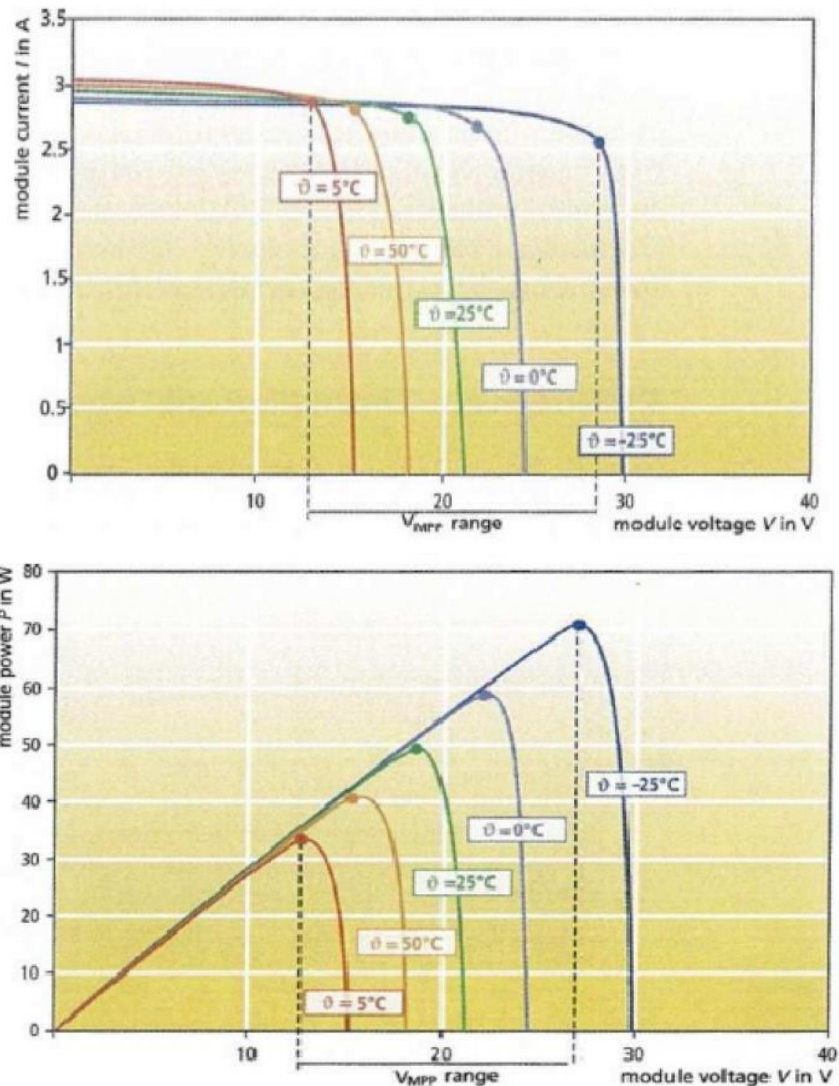
α) Εξάρτηση από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

Διατηρώντας σταθερή την θερμοκρασία και την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς όπως και η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η τιμή της V_{oc} δεν επηρεάζεται αξιοσημείωτα. Συνεπώς, η μορφή των χαρακτηριστικών V-I και V-P δεν εξαρτώνται από τις μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αλλά σημειώνεται παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών ως προς τον κατακόρυφο άξονα σύμφωνα με το σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 V-I Χαρακτηριστική φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές ακτινοβολίας E

β)Εξάρτηση από τη θερμοκρασία: Η αύξηση της θερμοκρασίας, υπό την προϋπόθεση ότι η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας διατηρείται σταθερή, επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγικού υλικού και αύξηση του αριθμού των επανασυνδεδεμένων φορέων φορτίου. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η αισθητή μείωση της V_{oc} και η ελαφριά αύξηση της τιμής του I_{sc} . Απόρροια αυτών των μεταβολών, είναι αφενός μεν η μείωση της ισχύος εξόδου της φ/β γεννήτριας αφετέρου δε η αλλοίωση της μορφής της χαρακτηριστικής V-I, δηλαδή το γόνατο της καμπύλης αποκτά πιο στρογγυλεμένη μορφή. Η επίδραση της θερμοκρασίας στις τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος εξόδου της φ/β γεννήτριας, προσδιορίζεται από τρεις συντελεστές. Οι δύο πρώτοι εκφράζουν σε απόλυτα μεγέθη τη μείωση της V_{oc} και την αύξηση του I_{sc} αντίστοιχα για μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας ανά βαθμό Κελσίου, ενώ ο τρίτος την επί της εκατό μεταβολή του P_m για ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι συντελεστές αυτοί παρέχονται συνήθως από τον κατασκευαστή μαζί με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φ/β πλαισίου. Το σχήμα 3.6 παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές εξόδου V-I ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας του πλαισίου. Επίσης στο ίδιο σχήμα (3.6) φαίνεται η καμπύλη τάσεως- ισχύος (V-P) του πλαισίου, για διαφορετικές θερμοκρασίες και σταθερή ακτινοβολία $1000W/m^2$.

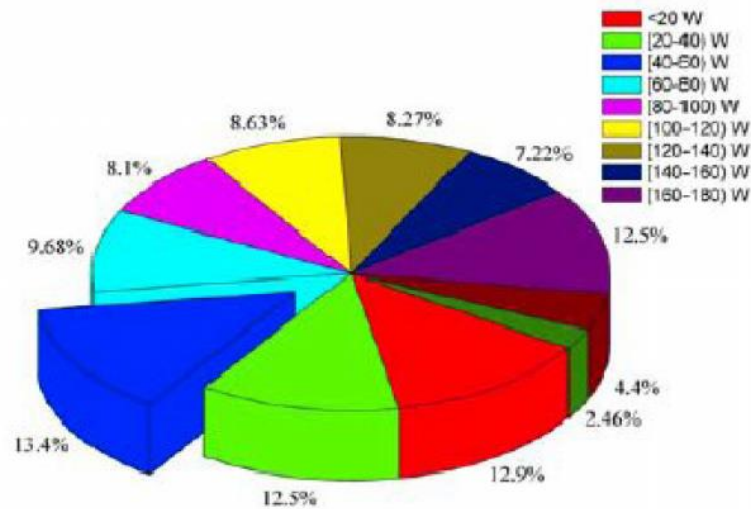


Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστικές εξόδου V-I και V-P ενός πλαισίου για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας του πλαισίου

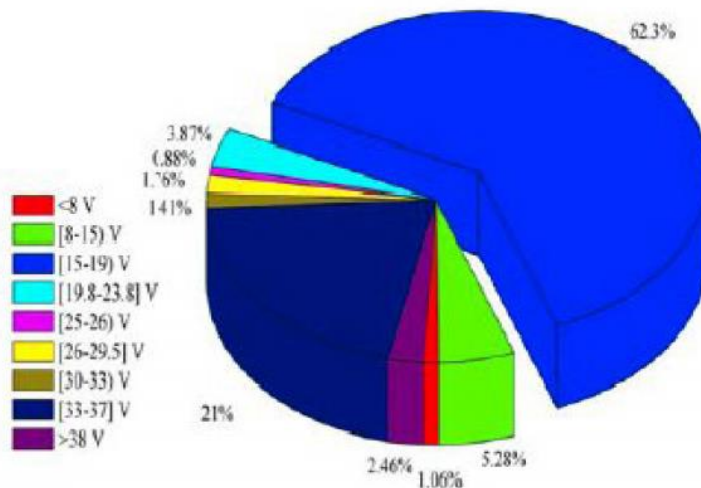
3.1.6 Είδη Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η διαφοροποίηση των φωτοβολταϊκών (φ/β) πλαισίων πέρα από το υλικό κατασκευής τους, συντελείται βάσει των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα όλοι οι κατασκευαστές δίνουν για κάθε φ/β πλαίσιο ένα πίνακα στον οποίο αναφέρονται οι τιμές της μέγιστης δυνατής αποδιδόμενης ισχύος P_m , της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} , του ρεύματος βραχυκυκλώματος I_{sc} καθώς επίσης και οι τιμές της τάσης V_m και του ρεύματος I_m στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Τα μεγέθη αυτά μετρούνται για συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (θερμοκρασία 25 °C και ακτινοβολία 1000/m²). Από αυτά, εκείνα που θεωρούνται ιδιαίτερης σημασίας προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη φ/β γεννήτρια για την εκάστοτε εφαρμογή είναι η μέγιστη δυνατή αποδιδόμενη ισχύς και η τιμή της τάσης εξόδου αυτής στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Ο αριθμός των φ/β

πλαισίων που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα καθορίζει την μέγιστη παραγόμενη ισχύ ενώ η εν σειρά και παράλληλα σύνδεση τους καθορίζει την τιμή της τάσης και του ρεύματος που μπορεί να δώσει το φ/β σύστημα. Στο σχήμα 3.7 πραγματοποιείται ομαδοποίηση των πλαισίων βάσει της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος αυτών (P_m). Ενώ στο αμέσως επόμενο σχήμα 3.8 γίνεται κατηγοριοποίηση των πλαισίων βάσει της τιμής της τάσης στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, βλέπουμε ότι στη βιομηχανία των φ/β υπερτερούν τα πλαίσια με τιμή τάσης $V_m[15-19)V$.



Σχήμα 3.7 Κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων βάσει της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_m)



Σχήμα 3.8 Κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων βάσει της τάσης στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (V_m)

3.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα

3.2.1 Το σύστημα

Το βασικό δομικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το ηλιακό κύτταρο (solar cell). Ένα κύτταρο παράγει μικρή ποσότητα ισχύος που είναι ίση με 1 έως 2W. Για να αυξηθεί η ισχύς στην έξοδο των κυττάρων, τοποθετούμε πολλά κύτταρα μαζί (ενώνοντας την θετική επαφή του ενός με την αρνητική του επόμενου, δηλαδή εν σειρά, αυξάνουμε την τάση, ενώ ενώνοντας τις θετικές μεταξύ τους και τις αρνητικές μεταξύ τους, δηλαδή παράλληλα, αυξάνουμε το ρεύμα) και έτσι δημιουργούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με την συνένωση πολλών πλαισίων μαζί δημιουργούνται μονάδες μεγαλύτερης ισχύος που λέγονται συστοιχίες. Συνεχίζοντας αυτήν την διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε ηλεκτρική ισχύς μας χρειάζεται όσο μικρή ή μεγάλη κι αν είναι. Το βασικό στοιχείο στο εμπόριο είναι το φωτοβολταϊκό (φ/β) πλαίσιο (module). Το μέγεθος ενός φ/β πλαισίου χαρακτηρίζεται από την ισχύ που μπορεί να παράγει και συγκεκριμένα με βάση την ισχύ που δίνει υπό καθορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας φ/β κυττάρου (25 °C) και ακτινοβολίας (1000W/m²) και είναι γνωστή ως «ισχύς αιχμής» (peak Watt, Wp). Για παράδειγμα, όταν μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια δύναται να παράγει 10 Wp αυτό σημαίνει ότι παράγει 10W για ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία κυττάρου 25 °C.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν ένα μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο είναι κάθε φορά σχεδιασμένο για συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι άλλες συσκευές που προστίθενται στο πλαίσιο μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- **Συσσωρευτές**, που χρησιμεύουν στην αποθήκευση ενέργειας και στην απόδοσή της όταν αυτό απαιτείται (το βράδυ ή τις βροχερές μέρες).
- **Αντιστροφείς**, που απαιτούνται για την αντιστροφή του συνεχούς ρεύματος (DC) που παράγεται στο φωτοβολταϊκό σε εναλλασσόμενο (AC).
- **Ρυθμιστές**, που διαχειρίζονται την αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή και διοχετεύουν ενέργεια στο φορτίο.
- **Μηχανικές Κατασκευές**, που απαιτούνται για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και των λοιπών συσκευών.

Πρακτικά δεν είναι απαραίτητο να υπάρχουν όλες οι παραπάνω συσκευές σε όλα τα συστήματα. Για παράδειγμα, σε συστήματα συνεχούς ρεύματος δεν χρειάζεται αντιστροφέας. Για συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο δεν είναι απαραίτητος ο συσσωρευτής διότι το δίκτυο χρησιμεύει και για αποθήκευση. Δηλαδή, όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας στο σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων-φορτίου, τότε αυτή διοχετεύεται στο δίκτυο, ενώ σε περίπτωση έλλειψης ενέργειας, η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται λαμβάνεται από το δίκτυο. Κάποια συστήματα απαιτούν συσκευές που δεν σχετίζονται άμεσα με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όπως για παράδειγμα είναι μερικά απομονωμένα συστήματα που έχουν ντιζελογεννήτρια για την παροχή ρεύματος όταν εξαντληθεί η ενέργεια των συσσωρευτών.

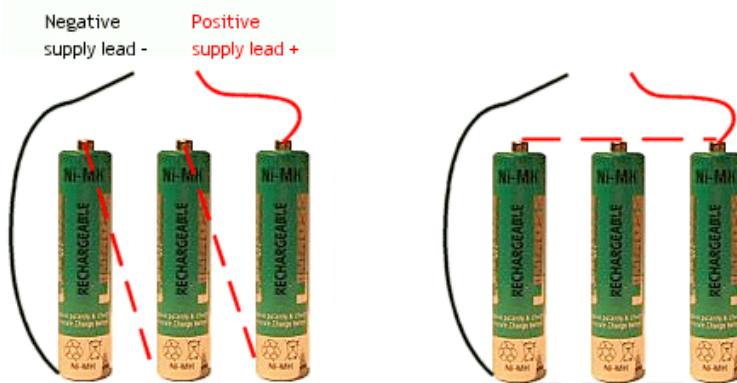
3.2.2 Συσσωρευτές



Σχήμα 3.9 Συσσωρευτές

Σε συστήματα απομονωμένα από το δίκτυο, το φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να παρέχει κάθε φορά την ενέργεια που απαιτείται ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες (συννεφιά ή ηλιοφάνεια). Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συσσωρευτές που αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας (σχήμα 3.9). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι μπαταριών είναι οι μολύβδου-ασβεστίου και μολύβδου-αντιμονίου (σχήμα 3.10). Για περιπτώσεις όπου ο συσσωρευτής είναι εκτεθειμένος σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών

χρησιμοποιούνται οι νικελίου-καδμίου. Εξαιτίας της συνεχώς μεταβαλλόμενης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας και του φορτίου, οι συσσωρευτές πρέπει να περνούν από πολλούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς να χάνουν τις ιδιότητές τους γρήγορα. Το ποσοστό της χωρητικότητας του συσσωρευτή που μπορεί να εκφορτιστεί χωρίς να καταστραφεί ονομάζεται βάθος εκφόρτισης και εξαρτάται από τον τύπο του. Οι μολύβδου-ασβεστίου είναι μικρού βάθους εκφόρτισης και αντέχουν 20% εκφόρτιση σε κάθε κύκλο. Οι νικελίου-καδμίου είναι μεγάλου βάθους εκφόρτισης και αντέχουν 80% εκφόρτιση σε κάθε κύκλο. Οι συσσωρευτές χρειάζονται αλλαγή κάθε 5 με 10 χρόνια ανάλογα με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που κάνουν. Οι συσσωρευτές παρέχουν αυτονομία στο σύστημα από μερικές μέρες μέχρι δύο βδομάδες. Η χρονική διάρκεια εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος, δηλαδή από την τοποθεσία του και την ύπαρξη ή όχι γεννήτριας. Οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από την τάση τους, η οποία συνήθως είναι πολλαπλάσιο των 12 V, και από την χωρητικότητά τους, που μετριέται σε αμπερώρια (Ah). Για παράδειγμα συσσωρευτής 50Ah, 48V θα αποθηκεύσει υπό ονομαστικές συνθήκες 2400Wh. Οι συσσωρευτές, πέραν της μείωσης της απόδοσης που προκαλούν, χρειάζονται περιοδική συντήρηση (έλεγχο υγρών) και έναν μεγάλο χώρο για να αποθηκευτούν. Ο σωστός υπολογισμός του μεγέθους του συσσωρευτή του συστήματος είναι καθοριστικός για την επίτευξη μεγάλης διάρκειας ζωής του, για την ιδανική απόδοση και για την επίτευξη ονομαστικού κόστους κύκλου ζωής του συστήματος (LCC).



Σχήμα 3.10 Είδη συσσωρευτών

3.2.3 Συστήματα Ρύθμισης Ισχύος

Υπάρχουν αρκετά ηλεκτρονικά συστήματα (σχήμα 3.11) που χρησιμεύουν στον έλεγχο και στην ρύθμιση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα είναι:

- **Οι ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών** για την ρύθμιση των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης της συσσωρευτή. Όταν ο συσσωρευτής είναι τελείως φορτισμένος, ο ρυθμιστής δεν αφήνει άλλο ρεύμα να εισρεύσει από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στον συσσωρευτή. Ομοίως, όταν ο συσσωρευτής έχει αδειάσει σε ένα προαποφασισμένο επίπεδο, το οποίο ελέγχεται με μέτρηση της τάσης του συσσωρευτή, ο ελεγκτής δεν επιτρέπει να δώσουν άλλο ρεύμα οι συσσωρευτές προτού επαναφορτιστούν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου ζωής του συσσωρευτή.
- **Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)**, η οποία είναι μια συσκευή που επεξεργάζεται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή το σύστημα, να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ισχύ από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια.
- **Οι αντιστροφείς**, οι οποίοι μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.



Σχήμα 3.11 Συστήματα ρύθμισης ισχύος

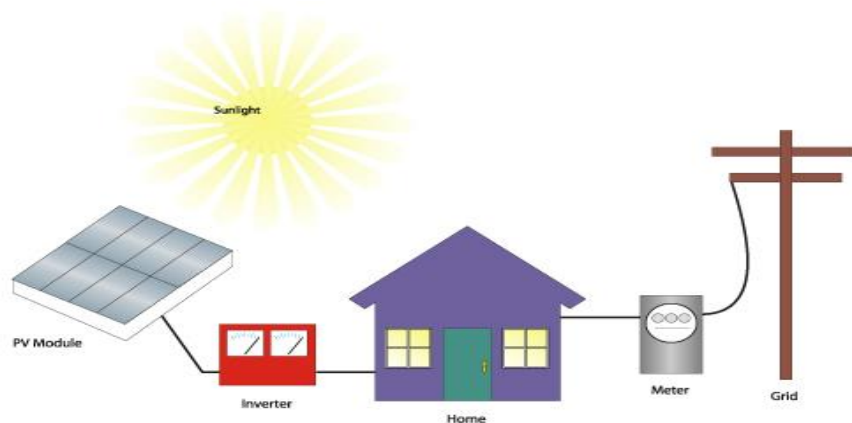
3.2.4 Είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε μία ποικίλες περιπτώσεις. Οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται είναι δύο:

1. Συστήματα που είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο.
2. Συστήματα που είναι απομονωμένα από το δίκτυο.

1. Συστήματα Συνδεδεμένα στο Δίκτυο

Στα συνδεδεμένα συστήματα η φωτοβολταϊκή συστοιχία τροφοδοτεί απευθείας με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο (σχήμα 3.12), οπότε δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη συσσωρευτή.



Σχήμα 3.12 Φωτοβολταϊκό Σύστημα Συνδεδεμένο στο Δίκτυο

Τα συστήματα αυτά μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Στα συστήματα με καταναλωτή φωτοβολταϊκές συστοιχίες όπου οι συστοιχίες είναι τοποθετημένες στις σκεπές σπιτιών και εμπορικών κέντρων.
- Στις κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας όπου οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες συνδέονται με υποσταθμούς και μετά με το δίκτυο.

Στην πρώτη περίπτωση ο καταναλωτής-ιδιοκτήτης που έχει τη συστοιχία, μπορεί να αγοράζει και να πουλάει ενέργεια κάθε χρονική στιγμή. Είναι σε θέση να παίρνει την ενέργεια που χρειάζεται από τη συστοιχία και να χρησιμοποιεί το δίκτυο μόνο όταν είναι απαραίτητο (κατά την διάρκεια της νύχτας ή σε πολύ συννεφιασμένες μέρες). Αυτό γίνεται εφικτό με την χρήση κατάλληλου μετρητή που έχει την ιδιότητα να είναι αμφίδρομος (διπλό ρολόι). Όταν η συστοιχία τροφοδοτεί το φορτίο του κτιρίου και της περισσεύει ενέργεια, την δίνει στο δίκτυο. Όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παραγωγή της συστοιχίας τότε η ζήτηση ικανοποιείται με εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο. Έτσι, το δίκτυο δρα σαν μονάδα αποθήκευσης για το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τυπικές τιμές για οικιακά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι 2 με 4 kWp ενώ για μεγάλα δημόσια κτίρια είναι 100kWp ή και περισσότερο. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε ολόκληρες μονάδες παραγωγής που αποτελούνται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Οι μονάδες αυτές εγκαθίστανται και συνδέονται εύκολα με το δίκτυο, οπότε κατασκευάζονται πολύ πιο γρήγορα από τις συμβατικές. Ακόμα, μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στα σημεία του δικτύου όπου υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη και μπορεί να αυξηθεί το μέγεθός τους προσθέτοντας συστοιχίες όταν αυξηθεί η ζήτηση. Τέλος, έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν καταναλώνουν καύσιμα, δεν παράγουν καυσαέρια ή απόβλητα και επιπλέον είναι αθόρυβες. Τέτοιου είδους μονάδες δεν είναι ακόμα διαδεδομένες παρόλο που έχουν μηδενικά έξοδα καυσίμου διότι το συνολικό κόστος της παραγόμενης ισχύος ευρώ/Wh παραμένει αυξημένο σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες ορυκτών καυσίμων, οπότε οι εταιρίες παραγωγής δεν τις προτιμούν. Τέλος, πρόβλημα δημιουργεί το ότι η παραγωγή δεν μπορεί να ακολουθήσει την ζήτηση την νύχτα ή όταν δεν έχει ηλιοφάνεια. Τα πλεονεκτήματα των παραπάνω συστημάτων είναι η προβλεπόμενη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας και η προστασία του περιβάλλοντος. Με την παραγωγή ενέργειας κοντά στο σημείο ζήτησης μειώνεται η απόσταση που πρέπει να διανύσει το ρεύμα και επιτυγχάνεται μείωση των ενεργειακών απωλειών και των

απωλειών ισχύος στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αποφευχθεί ή να αργήσει σημαντικά η ανάγκη για αναβάθμιση το δικτύου μεταφοράς αφού σε πολλές περιπτώσεις οι ώρες αυξημένης ζήτησης ταυτίζονται με τις ώρες του μεσημεριού για παράδειγμα που η φωτοβολταϊκή συστοιχία δύναται να παράγει μεγάλη ισχύ. Επίσης, γίνεται προσπάθεια μείωσης του κόστους δομικών υλικών κτιρίων όπως είναι κεραμίδια με προσαρμογή πάνω τους φύλλων φωτοβολταϊκών πλαισίων, ώστε να γίνουν ανταγωνιστικά των συμβατικών δομικών υλικών και να χρησιμοποιηθούν ευρέως.

2. Συστήματα Απομονωμένα από το Δίκτυο

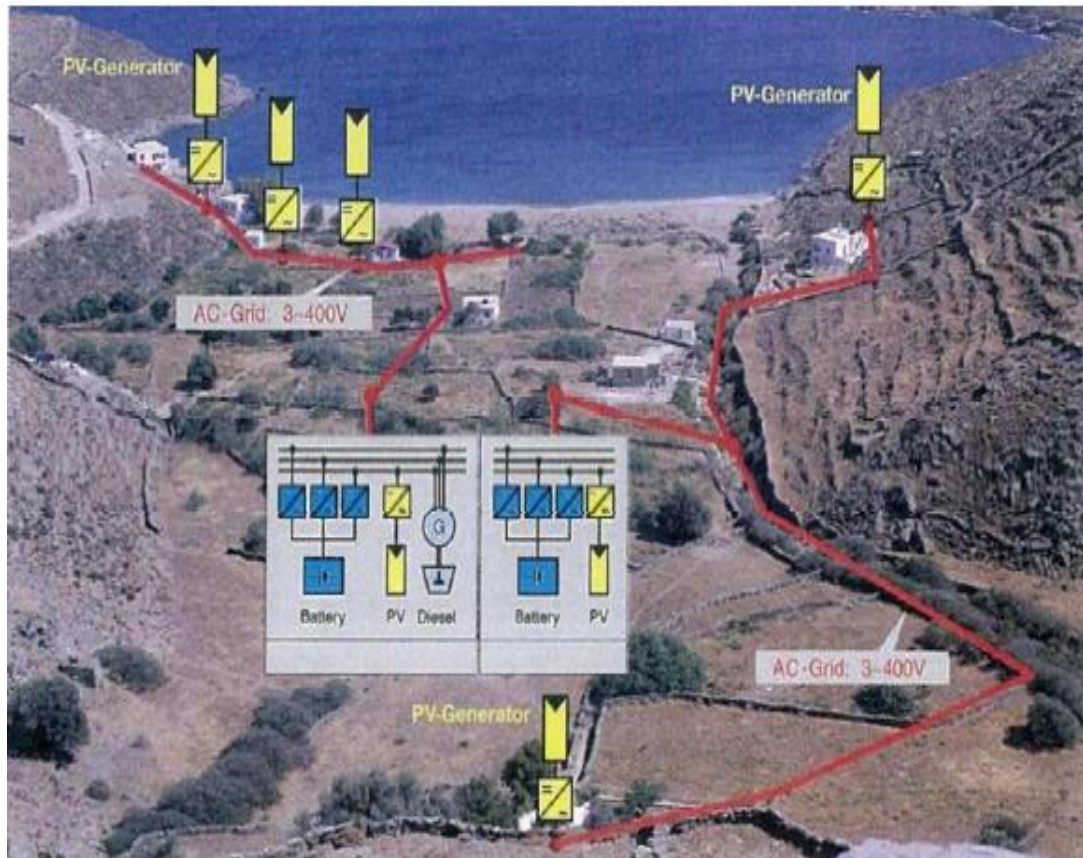
Στα απομονωμένα συστήματα το φωτοβολταϊκό δεν συνδέεται με το δίκτυο. Τέτοιου είδους φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει AC δίκτυο, είτε επειδή έχει μεγάλο κόστος να εγκατασταθεί γραμμή σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος μεταξύ της περιοχής και του AC δικτύου είτε τέλος η σύνδεση δεν είναι εφικτή λόγω μεγάλης απόστασης από τις μονάδες παραγωγής. Τα συστήματα αυτά είναι μικρής ισχύος, συνήθως λιγότερο από 10 kWp. Μπορεί να αποτελούνται μόνο από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ή να έχουν και συσσωρευτή ή αντλία νερού ή ακόμα και γεννήτρια. Τα συστήματα που αποτελούνται μόνο από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι συστήματα που δεν χρειάζονται μόνιμως ενέργεια. Εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι οι ηλιόλουστες μέρες που κάνουν το σύστημα να έχει μεγάλη παραγωγή ισχύος παράλληλα προκαλούν αυξημένες ανάγκες για ψύξη και εξαερισμό χώρων. Έτσι, συνδέοντας τη συστοιχία με ανεμιστήρες εξαερισμού βελτιώνονται οι συνθήκες του

χώρου. Ακόμα, η μεγάλη ηλιοφάνεια αυξάνει τις ανάγκες σε νερό για ύδρευση και άρδευση οπότε η συστοιχία συνδέεται με αντλία νερού για την άντληση νερού από κάποιο χαμηλότερο σημείο και την μεταφορά του είτε εκεί που υπάρχει ανάγκη, είτε για αποθήκευση σε κάποιο ψηλότερο σημείο (δεξαμενή). Στη περίπτωση αυτή η δεξαμενή αποτελεί την αποθήκη ενέργειας.

Στη περίπτωση ύπαρξης συσσωρευτή το φωτοβολταϊκό σύστημα παρέχει την ενέργεια κάθε φορά που απαιτείται ανεξαρτήτως αν έχει ήλιο ή όχι διότι οι συσσωρευτές αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας όταν αυτή υπάρχει και την επιστρέφουν όταν χρειάζεται. Το πόση ενέργεια θα επιστρέψει εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος του συσσωρευτή. Χρησιμοποιούνται για φωτισμό ή και για άλλες συσκευές, κυρίως σε τροχόσπιτα και ιστιοφόρα.

Όταν υπάρχει άλλου είδους γεννήτρια τότε το σύστημα είναι υβριδικό. Η γεννήτρια μπορεί να είναι πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Στα συστήματα αυτά η γεννήτρια και η φωτοβολταϊκή συστοιχία αλληλοσυμπληρώνονται. Το πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι για να έχουμε επάρκεια σε χρονικές περιόδους μικρής ηλιοφάνειας αντί να βάλουμε φωτοβολταϊκή συστοιχία μεγαλύτερης επιφάνειας και συσσωρευτή μεγαλύτερης χωρητικότητας, παίρνουμε την ισχύ από την γεννήτρια. Επίσης, η κατανάλωση της γεννήτριας και το κόστος συντήρησής της είναι μικρότερο σε σχέση με ένα ίδιας ισχύος σύστημα παραγωγής με μια μόνο γεννήτρια.

Στο σχήμα 3.13 που ακολουθεί δίνεται μια φωτογραφία του αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής της Κύθνου. Με τη βοήθεια ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και τεράστιων μπαταριών το σύστημα παράγει 600kW ισχύ, βελτιώνοντας σημαντικά τη ποιότητα του δικτύου τροφοδοσίας του νησιού.

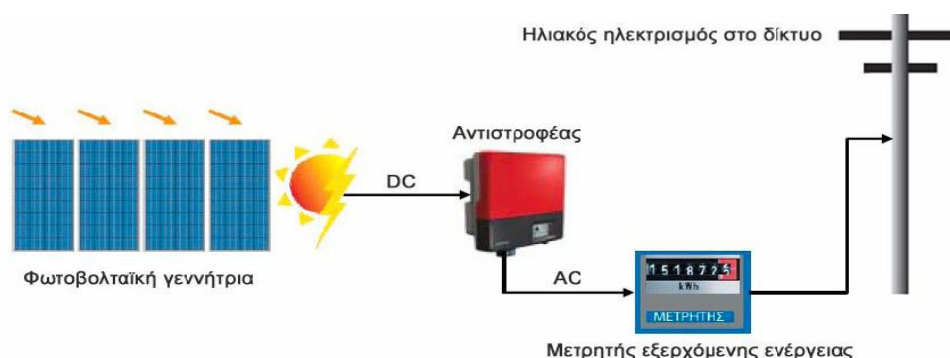


Σχήμα 3.13 Το Αυτόνομο Υβριδικό Σύστημα της Κύθνου

3.2.5 Τρόποι Σύνδεσης Φωτοβολταϊκών συστημάτων στο Δίκτυο Εναλλασσομένου Ρεύματος

Η ισχύς από τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί είτε να εισαχθεί μέσα στο δίκτυο είτε σε ένα συσσωρευτή. Για να συνδεθεί λοιπόν στο δίκτυο η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (σχήμα 3.14), η μικρή συνεχής τάση που παράγεται πρέπει να ενισχυθεί σε μια υψηλότερη εναλλασσόμενη τάση, το οποίο συνήθως γίνεται από έναν μετατροπέα. Επίσης ο μετατροπέας τοποθετείται για να ελέγχει συνέχεια το σημείο λειτουργίας των πλαισίων όπως μεταβάλλεται στη καμπύλη V-P, δηλαδή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του σημείου βέλτιστης ισχύος των πλαισίων (Maximum Power Point Tracking-MPPT). Εφόσον η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία μεταβάλλονται διαρκώς κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι χαρακτηριστικές εξόδου (V-I) μετατοπίζονται διαρκώς. Το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα δε θα πρέπει απλά να μπορεί να κινηθεί πάνω στις καμπύλες εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αλλά θα πρέπει να εντοπίζει και να σταθεροποιείται στο εκάστοτε σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, για δεδομένη ακτινοβολία και θερμοκρασία.

Τα πλεονεκτήματα της σύνδεσης στο δίκτυο, είναι ότι μπορεί η ισχύς να “αποθηκευτεί” όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση.



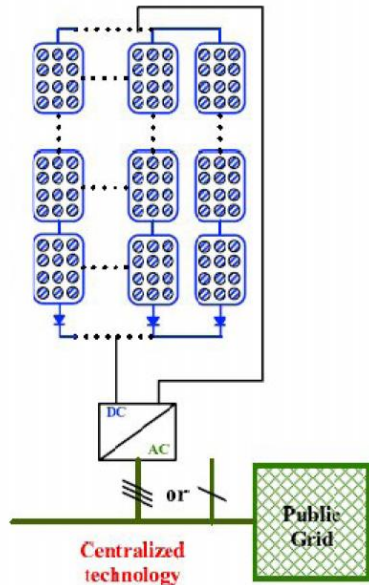
Σχήμα 3.14 Σύστημα φωτοβολταϊκής γεννήτριας με αντιστροφέα συνδεδεμένο στο δημόσιο δίκτυο μέσω μετρητή

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων για τη σύνδεση στο δίκτυο (συνδεδεμένο σύστημα). Η διαφοροποίηση των τεχνολογικών τάσεων έγκειται, αφενός μεν στον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συνδέονται ανά ηλεκτρονικό μετατροπέα (επίπεδο ισχύος του μετατροπέα), αφετέρου δε στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (εν σειρά σύνδεση, παράλληλη σύνδεση ή συνδυασμός αυτών). Οι τεχνολογίες που αναλύονται είναι οι εξής:

1. Η Κεντροποιημένη Τεχνολογία (Centralized Technology)
2. Η Τεχνολογία Αλυσίδας (String Technology)
3. Η Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων (Multistring Technology)
4. Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Πλαισίων Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC- PV Modules)

1. Η Κεντροποιημένη Τεχνολογία

Η κεντροποιημένη τεχνολογία είναι από τις παλαιότερες που εφαρμόστηκαν



και αποσκοπεί στην παραγωγή μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία μεταφέρονται στο δίκτυο μέσω ενός μόνο αντιστροφέα ο οποίος συνδέει έναν μεγάλο αριθμό φ/β πλαισίων (σχήμα 3.15). Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από ένα πλέγμα φ/β πλαισίων, τα οποία χωρίζονται σε εν σειρά ομάδες εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή τιμή συνεχούς τάσης, χωρίς να απαιτείται επιπλέον ενίσχυση, αυτές οι αλυσίδες των εν σειρά συνδεδεμένων φ/β πλαισίων συνδέονται παράλληλα, για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή εντάσεως. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας, αποτελεί η χρήση ενός μόνου ελέγχου

ανίχνευσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (M.P.P.T. ελεγκτής) και η χρήση διόδων ισχύος ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία ορισμένων εν σειρά ομάδων ως φορτία λόγω σκίασης. Αν εξαιρέσουμε τα υψηλά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να παραχθούν από ένα μόνο φ/β σύστημα και το ότι δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω ενίσχυση της τάσης του συστήματος είτε με μετατροπέα συνεχούς τάσης είτε με μετασχηματιστή(M/Σ), υπάρχουν πολλά σημαντικά μειονεκτήματα.

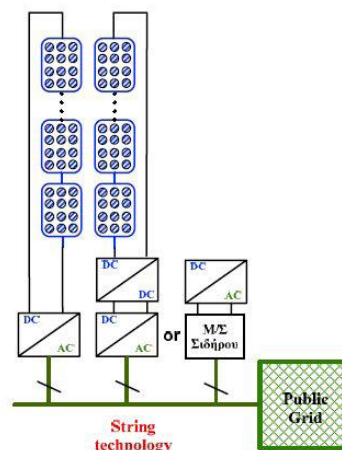
Καταρχήν υπάρχουν υψηλές τιμές τάσης σύνδεσης μεταξύ φωτοβολταϊκού πλέγματος και αντιστροφέα, πράγμα που επιβάλλει την εγκατάσταση ειδικών συστημάτων προστασίας και την εφαρμογή ειδικών τεχνικών γειώσεως των επιμέρους τμημάτων του φ/β συστήματος, αυξάνοντας έτσι το κόστος της όλης εγκατάστασης. Επίσης στη περίπτωση που γίνει μερική ή ολική σκίαση ενός ή περισσότερων κυττάρων ή ολική θραύση ενός κυττάρου, θα έχουμε κύτταρα με ανόμοια χαρακτηριστικά να συνδέονται σε σειρά, η μη προσαρμογή όμως των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας επιφέρει απώλειες ισχύος και καταστροφή κάποιου μέρους του φ/β συστήματος. Στη περίπτωση που ένα κύτταρο ή ομάδα παράλληλων κυττάρων βρίσκονται υπό σκιά, το ολικό ρεύμα εξόδου της συστοιχίας μειώνεται. Το σκιασμένο κύτταρο περιορίζει την έξοδο της αλυσίδας, αλλά και είναι δυνατόν να προκαλέσει το φαινόμενο hotspot, το οποίο οφείλεται στην ανάστροφη πόλωση ενός ή περισσότερων κυττάρων και συνεπάγεται υπερθέρμανσή τους, που μπορεί να είναι καταστροφική για όλη την εγκατάσταση. Όταν μια αλυσίδα από κύτταρα βραχυκυκλωθεί η τάση στο σκιασμένο κύτταρο πρέπει να είναι ίση και αντίθετη με την τάση στα υπόλοιπα κύτταρα. Το κύτταρο αυτό πολώνεται ανάστροφα και καταναλώνει (αντί να παράγει) ισχύ και είναι δυνατόν να καταναλώνεται ισχύς ίση με τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να παράγουν τα υπόλοιπα κύτταρα της αλυσίδας.

Τέτοια φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά (hotspot) στο κύτταρο με πιθανό αποτέλεσμα θραύση του πλαισίου ή ακόμη και πλήρη καταστροφή του.

Για να μειώσουμε την επίδραση του φαινομένου hotspot στην λειτουργία της συστοιχίας συνδέουμε διόδους παράκαμψης για την παράλληλη σύνδεση των εν σειρά ομάδων. Οι διόδοι ισχύος που χρησιμοποιούνται όμως επιβαρύνουν τον βαθμό απόδοσης του όλου συστήματος με τις απώλειές τους. Επίσης η εφαρμογή κεντρικού M.P.P.T. ελέγχου δεν επιτρέπει σε όλα τα πλαίσια να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ισχύος, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης και ο σχεδιασμός τους δεν αφήνει περιθώρια τεχνικών προσαρμογών και επέκτασης. Τέλος ο χαμηλός βαθμός απόδοσης και το υψηλό κόστος κατασκευής ήταν η αφορμή για το σχεδιασμό άλλων τεχνολογιών.

2. Η Τεχνολογία Αλυσίδας

Στα συστήματα βασισμένα στην τεχνολογία αλυσίδας, η οποία διαδέχτηκε την κεντροποιημένη τεχνολογία, κάθε μονάδα αποτελείται από μία αλυσίδα εν σειρά συνδεδεμένων φ/ω πλαισίων που καταλήγει σε έναν αντιστροφέα (σχήμα 3.16). Η τάση που παράγεται μπορεί να είναι αρκετά υψηλή και να αποφευχθεί η ενίσχυση τάσης. Ο M.P.P.T. έλεγχος είναι αποδοτικότερος σε σχέση με αυτόν της κεντροποιημένης τεχνολογίας, μιας και εφαρμόζεται σε



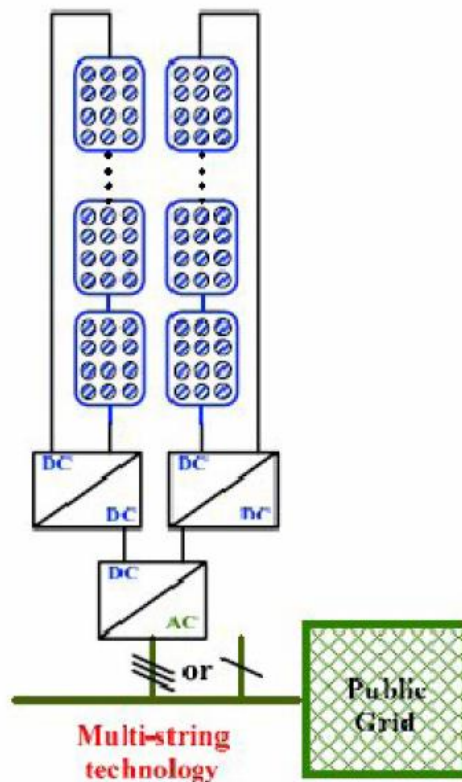
Σχήμα 3.16 Τρόπος διασύνδεσης με χρήση τεχνολογίας αλυσίδας

μικρότερο αριθμό πλαισίων. Δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή διόδων ισχύος. Υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της εγκατάστασης με χρήση περισσότερων μονάδων. Οι απώλειες είναι λιγότερες και έτσι υπάρχει υψηλότερος βαθμός απόδοσης σε σχέση με την κεντροποιημένη τεχνολογία, συνεπώς μειώνεται το κόστος κατασκευής λόγω της μαζικής παραγωγής. Βέβαια παραμένουν τα προβλήματα που επιφέρουν οι υψηλές τάσεις στα σημεία σύνδεσης, καθώς επίσης και ο κίνδυνος εμφάνισης φαινομένου hotspot. Αν χρησιμοποιείται μικρό πλήθος φ/β πλαισίων απαιτούνται πιο πολύπλοκες τοπολογίες για την ενίσχυση της τάσης και έτσι η τιμή/watt αυξάνεται μειώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση.

3. Η Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων

Η τεχνολογία πολλαπλών αλυσίδων αποτελεί μια επέκταση της τεχνολογίας αλυσίδας, όπου πολλές αλυσίδες εν σειρά συνδεδεμένων φ/β πλαισίων συνδέονται σε έναν κεντρικό αντιστροφέα μέσω ανεξάρτητων μετατροπών συνεχούς τάσης σε συνεχή (σχήμα 3.17). Το πλεονέκτημα της συγκρινόμενη με την κεντροποιημένη τεχνολογία είναι ότι κάθε αλυσίδα μπορεί να ελέγχεται ξεχωριστά. Έτσι γίνεται πιο εύκολη η επέκταση του συστήματος απλά συνδέοντας στον αντιστροφέα περισσότερες αλυσίδες πλαισίων με τους μετατροπείς τους. Προσφέρει λοιπόν ανάλογη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αυτήν της κεντροποιημένης τεχνολογίας περιορίζοντας ταυτόχρονα αρκετά από τα μειονεκτήματα που συναντώνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα κεντροποιημένης δομής.

Το μειονέκτημα που παρουσιάζεται σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι ο αντιστροφέας δεν μπορεί να δεχθεί άπειρο αριθμό αλυσίδων σε περίπτωση που θέλουμε να επεκτείνουμε το σύστημα, καθώς επίσης μπορεί να παρουσιαστεί ο κίνδυνος ολικής διακοπής της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας, σε περίπτωση που ο αντιστροφέας παρουσιάσει βλάβη.

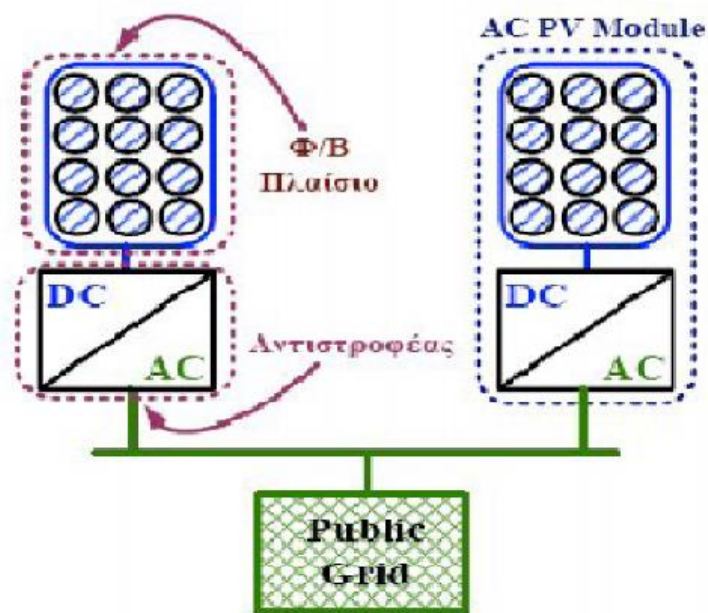


Σχήμα 3.17 Φωτοβολταϊκά συστήματα multistring τεχνολογίας

4. Η Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Πλαισίων Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι και η νεότερη στο χώρο των φωτοβολταϊκών εφαρμογών, στην οποία ένα μεγάλο φ/β πλαίσιο συνδέεται σε έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα συνεχούς τάσης σε μονοφασική εναλλασσόμενη και στη συνέχεια συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο χαμηλής τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.18. Η απουσία συνδέσεων τύπου πλέγματος (βλέπε κεντροποιημένη τεχνολογία) ή αλυσίδας μεταξύ φ/β πλαισίων, καθώς και η δυνατότητα καλύτερου ελέγχου κάθε αυτόνομης διάταξης (φ/β πλαίσιο και αντιστροφέας), οδηγούν σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα του όλου συστήματος. Ο αντιστροφέας μπορεί να είναι ενσωματωμένος είτε στο πίσω μέρος των πλαισίων, είτε στο μηχανισμό στήριξης τους. Σε σχέση με τις παραπάνω τεχνολογίες τα AC PV Modules έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: η αντιστοιχία ενός αντιστροφέα ανά πλαίσιο επιτρέπει τον βέλτιστο

M.P.P.T. έλεγχο, οι τάσεις στα σημεία σύνδεσης είναι αρκετά χαμηλές, το κόστος κατασκευής είναι μικρό, δεν απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την εγκατάσταση του συστήματος, οι απαιτήσεις επιφανείας ανά μονάδα είναι ελάχιστες, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα ακόμα και για αστικές εφαρμογές, και παρουσιάζει καλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για διατάξεις χαμηλής ισχύος και ότι η τεχνολογία δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη όσον αφορά το είδος του μετατροπέα που θα δίνει την απαραίτητη τιμή τάσης για τη σύνδεση τους στο δίκτυο ενώ ταυτόχρονα θα επιτυγχάνεται και υψηλή απόδοση.



Σχήμα 3.15 Φωτοβολταϊκά συστήματα AC PV Module τεχνολογίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ο Αντιστροφέας

4.1 Εισαγωγή

Οι αντιστροφείς τάσης είναι ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούνται σε συνδεδεμένα με το δίκτυο φ/β συστήματα αλλά και σε αυτόνομα συστήματα με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Ο σχεδιασμός ενός συνδεδεμένου με το δίκτυο φ/β συστήματος αρχίζει με την επιλογή ενός κατάλληλου αντιστροφέα τάσης. Αυτό καθορίζει την τάση του συνεχούς ρεύματος που θα έχει το σύστημα και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα επιλέγονται και οι κατάλληλοι συλλέκτες. Ο αντιστροφέας είναι η δεύτερη σημαντικότερη μονάδα του συστήματος μετά τους συλλέκτες. Δουλειά του είναι να μετατρέπει την συνεχή τάση που παράγεται στους συλλέκτες σε εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 50Hz. Σε αντίθεση με τους αντιστροφείς των αυτόνομων συστημάτων, αυτοί των συνδεδεμένων πρέπει να αντιδρούν το ίδιο στις μεταβολές των χαρακτηριστικών του δικτύου ηλεκτροδότησης και στις μεταβολές της απόδοσης των συλλεκτών. Αφού όλο το παραγόμενο ρεύμα περνά από τον αντιστροφέα τα χαρακτηριστικά του επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Εκτός από την απόδοση στη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, τα ηλεκτρονικά του αντιστροφέα περιλαμβάνουν συστήματα που είναι υπεύθυνα για την ημερήσια λειτουργία του συστήματος. Φροντίζουν η λειτουργία να ξεκινά την κατάλληλη στιγμή το πρωί, όταν οι συλλέκτες παράγουν αρκετή ενέργεια. Ανεπιτυχής έναρξη της λειτουργίας απαιτεί ενέργεια από το δίκτυο και πρέπει να αποφεύγεται. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας στην καμπύλη V-I μεταβάλλεται ανάλογα με τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των συλλεκτών. Ο «έξυπνος» έλεγχος του μετατροπέα περιλαμβάνει παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος και συνεχή ρύθμιση στο βέλτιστο κάθε φορά σημείο λειτουργίας. Επίσης υπάρχουν συστήματα που αυτόματα αποσυνδέουν το σύστημα αν εμφανισθούν ανωμαλίες στο δίκτυο ή στους συλλέκτες. Σήμερα τα περισσότερα μοντέλα αντιστροφέων τάσης είναι εξοπλισμένα με συστήματα που επιτρέπουν τη συνεχή μέτρηση της ισχύος, της τάσης, του ρεύματος και άλλων λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος. Τα δεδομένα αυτά μπορούν στη συνέχεια να συλλεχθούν και να αναλυθούν με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y).

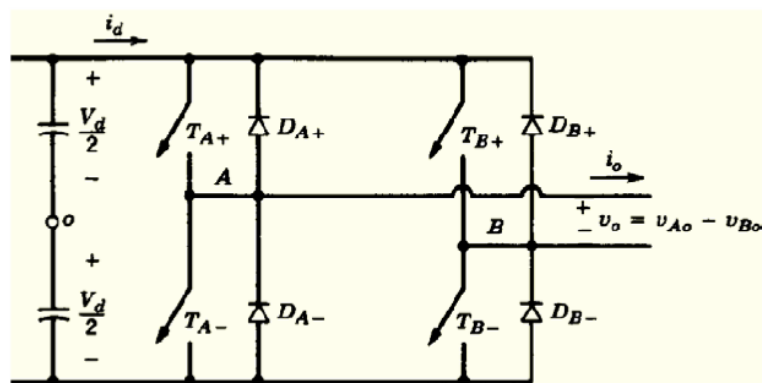
4.2 Μονοφασικός αντιστροφέας

Οι μονοφασικοί αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την τοπολογία τους σε αντιστροφείς ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας. Οι πρώτοι υστερούν σαφώς για αυτό και σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιούνται οι αντιστροφείς πλήρους γέφυρας. Όταν η είσοδος των αντιστροφέων είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (Voltage Source Inverters VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (Current Source Inverters CSI). Ο χαρακτηρισμός του αντιστροφέα δεν έχει να κάνει απαραίτητα με την ενεργειακή πηγή του συστήματος, αλλά με την τοπολογία. Έτσι είναι δυνατόν να αλλάξει η

μορφή της πηγής χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν έναν πυκνωτή παράλληλα συνδεδεμένο με την πηγή, ενώ οι αντιστροφείς πηγής έντασης ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή.

4.2.1 Δομή των αντιστροφών πηγής τάσης

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης τροφοδοτούνται από μία πηγή συνεχούς τάσης (ή συνεχής τάση εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων) η οποία έχει ιδανικά μηδενική εσωτερική σύνθετη αντίσταση. Στο σχήμα 4.1 εικονίζεται ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας με χρήση του οποίου υλοποιείται ο μονοφασικός αντιστροφέας.



Σχήμα 4.1 Μονοφασικός Αντιστροφέας πηγής τάσης

Αποτελείται από δύο ζεύγη διακοπών και διόδων τα οποία λειτουργούν ως εξής (δύο σκέλη): Όταν T_{A+} , T_{B-} βρίσκονται σε αγωγή οι T_{A-} και T_{B+} βρίσκονται σε αποκοπή. Στην περίπτωση αυτή η τάση εξόδου είναι ίση με V_d , ενώ το ρεύμα ρέει από το σημείο A στο B. Αντίστροφα, όταν T_{A-} , T_{B+} βρίσκονται σε αγωγή οι T_{A+} , T_{B-} βρίσκονται σε αποκοπή. Η τάση εξόδου τότε αλλάζει πολικότητα, δηλαδή γίνεται ίση με $-V_d$ και το ρεύμα ρέει από το B στο A. Όσον αφορά τις διόδους στην περίπτωση ωμικού φορτίου δεν έχουν ενεργό ρόλο στο κύκλωμα (το ρεύμα εξόδου έχει παρόμοια μορφή με την τάση). Στην περίπτωση επαγωγικού φορτίου όμως έχουμε το εξής φαινόμενο:

Δεν είναι δυνατή η αντιστροφή του ρεύματος αμέσως μετά το κλείσιμο των διακοπών T_{A-} , T_{B+} και το άνοιγμα των T_{A+} , T_{B-} λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το επαγωγικό φορτίο (όπως και κατά το άνοιγμα των T_{A-} , T_{B+}). Έτσι υπάρχει ένα χρονικό διάστημα που το ρεύμα ρέει μέσω των διόδων D_{A-} και D_{B+} όταν T_{A-} , T_{B+} κλειστοί και μέσω των διόδων D_{A+} και D_{B-} όταν T_{A+} , T_{B-} κλειστοί επιστρέφοντας ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας.

Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας του σχήματος δεν πρέπει να είναι ταυτόχρονα κλειστοί οι διακόπτες του ίδιου σκέλους, γιατί τότε προκύπτει βραχυκύκλωμα στη DC πλευρά. Δηλαδή πρέπει να αποφευχθεί η κατάσταση στην οποία οι T_{A+} και T_{A-} είναι κλειστοί ταυτόχρονα και αντίστοιχα η κατάσταση στην οποία οι T_{B+} και T_{B-} είναι κλειστοί. Στη συνδεσμολογία του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα παρατηρούμε στα άκρα της DC εισόδου δύο ίδιους πυκνωτές σε σειρά. Οι πυκνωτές αυτοί πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλη χωρητικότητα ώστε να εξασφαλίσουμε σταθερή τάση εισόδου.

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \Rightarrow \frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C} \Rightarrow C \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{du_c}{dt} = 0 \Rightarrow u_c = \text{σταθ.}$$

Όσον αφορά την αξιοποίηση των διακοπών στους μετατροπείς με πλήρη γέφυρα ανεξάρτητα από το είδος ελέγχου και τη διάταξη μετάβασης που χρησιμοποιείται, οι μέγιστες προδιαγραφές τάσης και ρεύματος των διακοπών που απαιτούνται σ' έναν αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι:

$$V_T = V_d$$

$$I_T = i_{\text{peak}}$$

Αν στην έξοδο του αντιστροφέα υπάρχει μετασχηματιστής δεν δημιουργείται πρόβλημα στους διακόπτες από το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή καθώς αυτό βρίσκει διέξοδο μέσω των διόδων του.

4.3 Έλεγχος μονοφασικού αντιστροφέα με την ημιτονοειδή PWM τεχνική

Η διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation) είναι μία τεχνική ελέγχου των διακοπών και είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη σε όλους τους τύπους διακοπτικών μετατροπέων. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή η διακοπτική συχνότητα του διακόπτη παραμένει σταθερή, ενώ ελέγχονται τα χρονικά διαστήματα αγωγής και αποκοπής του διακόπτη και άρα ο κύκλος λειτουργίας του (duty cycle) ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$$

,όπου T_s είναι η διακοπτική περίοδος και t_{on} ο χρόνος αγωγής του διακόπτη. Η διακοπτική περίοδος είναι ίση με το άθροισμα του χρόνου αγωγής (t_{on}) συν το χρόνο αποκοπής του διακόπτη (t_{off}):

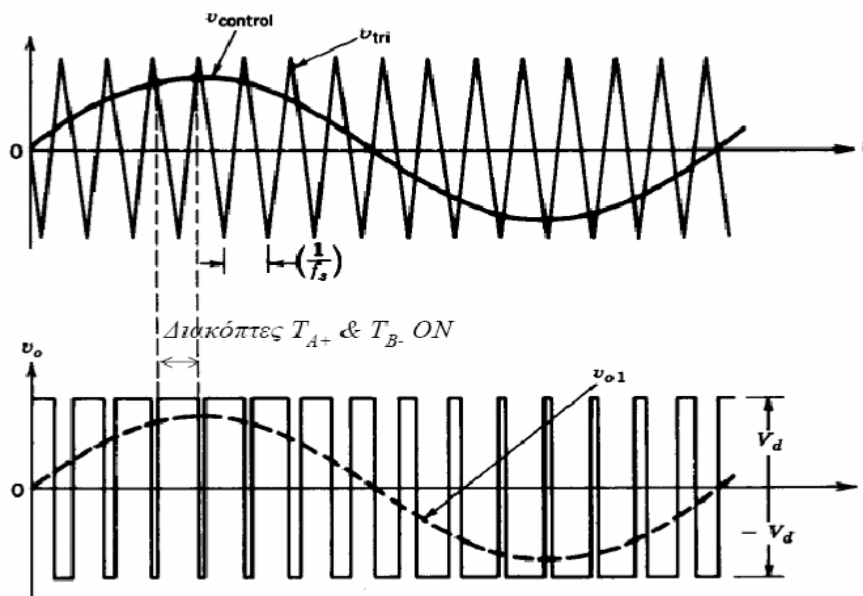
$$T_s = t_{on} + t_{off}$$

Η PWM των διακοπών του αντιστροφέα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του πλάτους και της συχνότητας των ac τάσεων και για την επίτευξη ημιτονοειδούς εξόδου του αντιστροφέα. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης PWM μεταξύ αυτών η ημιτονοειδής διαμόρφωση. Για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα, συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου στην επιθυμητή συχνότητα (αφού στόχος είναι η έξοδος να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το ημίτονο) με μια τριγωνική κυματομορφή. Η ημιτονοειδής κυματομορφή ονομάζεται κυματομορφή αναφοράς, η συχνότητα της f_1 είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα ή συχνότητα διαμόρφωσης (modulation frequency) και χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής

διάρκειας αγωγής. Η τριγωνική κυματομορφή ονομάζεται κυματομορφή φορέα και η συχνότητα της f_s καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency).

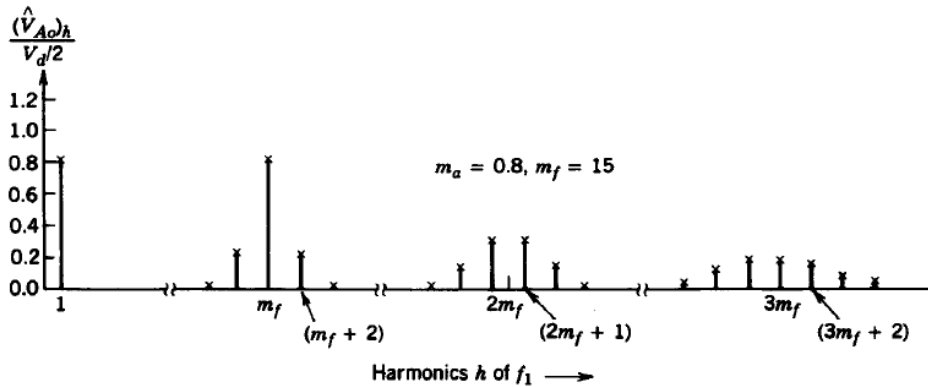
4.3.1 Ημιτονοειδής PWM τεχνική με διπολική τάση εξόδου

Στην περίπτωση της ημιτονοειδούς PWM με διπολική τάση εξόδου (sinusoidal PWM with bipolar voltage switching) συγκρίνοντας τις δύο κυματομορφές (την κυματομορφή αναφοράς και την τριγωνική) έχουμε αποτέλεσμα $-V_d$, όταν η τριγωνική είναι μεγαλύτερη της ημιτονοειδούς κυματομορφής και V_d στην αντίθετη περίπτωση όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.2. Από το ίδιο σχήμα παρατηρούμε ακόμη ότι η τάση εξόδου έχει παλμική μορφή. Επομένως δεν είναι τέλειο ημίτονο αλλά περιέχει αρμονικές της f_1 .



Σχήμα 4.2 Κυματομορφές στο μονοφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης με την ημιτονοειδή PWM τεχνική με διπολική τάση εξόδου

Στο σχήμα 4.3 έχουν σχεδιασθεί οι αρμονικές τάσεις, όπου $m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}}$ ($\hat{V}_{control}$ είναι το πλάτος του σήματος ελέγχου και \hat{V}_{tri} το πλάτος του τριγωνικού σήματος που διατηρείται γενικά σταθερό) ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους και $m_f = \frac{f_s}{f_1}$ ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας.



Σχήμα 4.3 Αρμονικές τάσεις με διπολικό έλεγχο PWM

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

- Σε μια ημιτονοειδή διαμόρφωση PWM το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον m_a (με την προϋπόθεση ότι $m_a \leq 1$). Δηλαδή: $V_{AO} = m_a * V_d$
- Στα περιττά πολλαπλάσια της συχνότητας του τριγώνου υπάρχει τόσο μια κεντρική αρμονική (στα σημεία $(2 * k + 1) * m_f$, k ακέραιος) καθώς και ένα σύνολο αρμονικών δεξιά και αριστερά της. Στα άρτια πολλαπλάσια δεν υπάρχει κεντρική αρμονική.
- Θα πρέπει ο συντελεστής διαμόρφωσης να είναι περιττός ακέραιος. Έτσι υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές στην τάση εξόδου.

Όσον αφορά την επιλογή της συχνότητας μετάβασης και του συντελεστή διαμόρφωσης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι οι αρμονικές με υψηλή συχνότητα φιλτράρονται πιο εύκολα (υψηλή συχνότητα \rightarrow μικρότερο L,C \rightarrow μικρότερο φίλτρο). Άρα θα πρέπει να επιλέξουμε μεγάλη συχνότητα μετάβασης το οποίο όμως σημαίνει και μεγαλύτερες απώλειες. (η επιλογή της διακοπτικής συχνότητας λαμβάνοντας υπόψη τις δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της PWM που θα χρησιμοποιηθεί) Στις περισσότερες περιπτώσεις η διακοπτική συχνότητα επιλέγεται μικρότερη από 6kHz ή μεγαλύτερη από 20kHz, ώστε να είναι πάνω από την ακουστική περιοχή συχνοτήτων.

Οι επιθυμητές σχέσεις μεταξύ του σήματος τριγωνικής κυματομορφής και του σήματος της τάσης έλεγχου καθορίζονται από το πόσο μεγάλος είναι ο m_f . Θεωρώντας την τιμή $m_f=21$ σαν το όριο μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις :

ΜΙΚΡΗ ΤΙΜΗ m_f :

- Συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM. Η συγχρονισμένη διαμόρφωση (συγχρονισμένα σήματα έλεγχου και τριγωνικής κυματομορφής) απαιτεί ακέραια τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης. Η ασύγχρονη διαμόρφωση (m_f δεν είναι ακέραιος) έχει σαν αποτέλεσμα υποαρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας, ανεπιθύμητο στις περισσότερες εφαρμογές.
- Ο συντελεστής m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος.

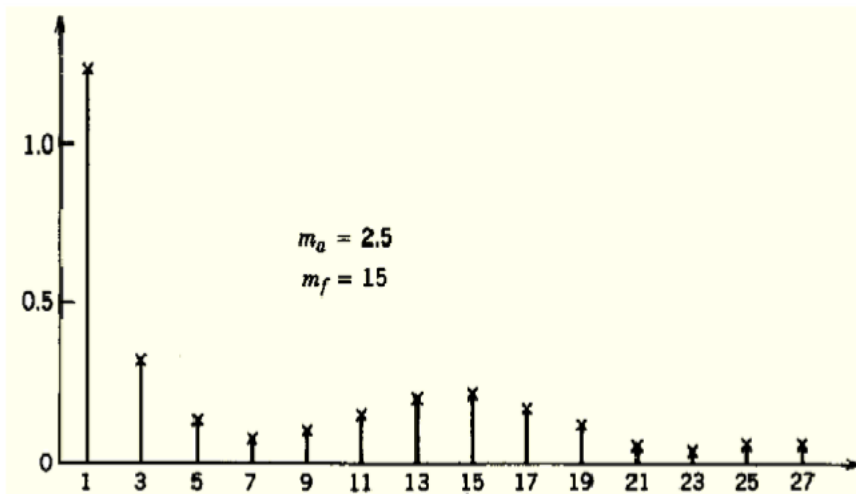
ΜΕΓΑΛΗ ΤΙΜΗ m_f :

Στην περίπτωση μεγάλου συντελεστή διαμόρφωσης τα πλάτη των υποαρμονικών της ασύγχρονης διαμόρφωσης είναι μικρά. Ωστόσο σε ορισμένες εφαρμογές ακόμη και αυτά τα μικρά πλάτη δημιουργούν προβλήματα, όπως στην περίπτωση τροφοδότησης DC κινητήρα.

ΥΠΕΡΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ($m_a > 1$):

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις έχουμε υποθέσει συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους μικρότερο του 1 επιτυγχάνοντας γραμμική μεταβολή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου με τον m_a , ενώ οι αρμονικές οδηγούνται σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιες της. Το μειονέκτημα που έχει αυτή η περιοχή τιμών του m_a είναι το μικρό μέγιστο πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας. Για την αύξηση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου ο m_a γίνεται μεγαλύτερος από την τιμή 1 (υπερδιαμόρφωση). Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αύξηση των αρμονικών στις πλευρικές ζώνες (σχήμα 4.4) και παύει να ισχύει η γραμμικότητα της τάσης εξόδου με τον m_a . Στην περιοχή αυτή ισχύει:

$$V_d < V_{01} < \frac{4}{\pi} * V_d$$



Σχήμα 4.4 Αρμονικές λόγω υπερδιαμόρφωσης

4.3.2 Ημιτονοειδής PWM τεχνική με μονοπολική τάση εξόδου

Σε αντίθεση με την διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου, τα δύο σκέλη του αντιστροφέα δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα. Τα δύο σκέλη ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της u_{tri} με τα $u_{control}$ και $-u_{control}$ αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των σημάτων u_{tri} και $u_{control}$ προκύπτουν οι παλμοί οδήγησης των παλμών του σκέλους A:

$$u_{control} > u_{tri}: T_{A+} \rightarrow ON, T_{A-} \rightarrow OFF$$

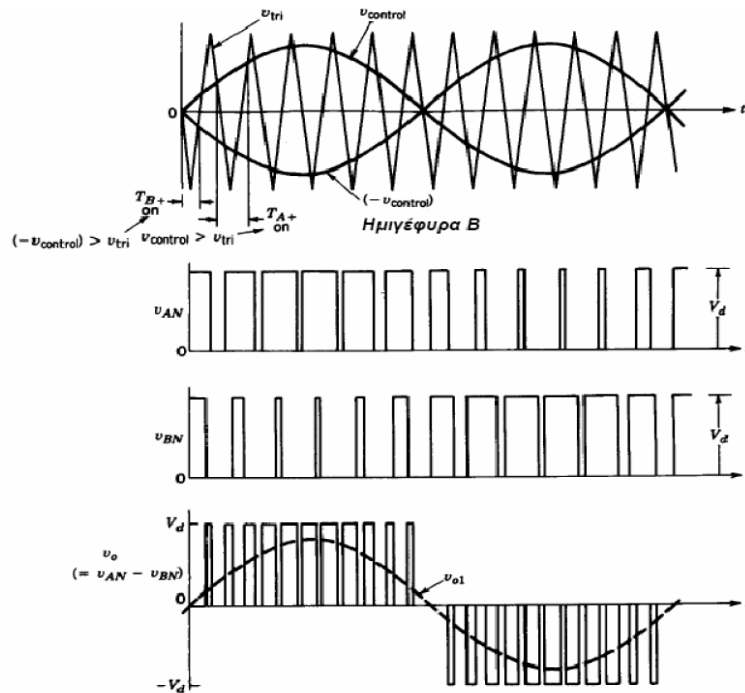
$$u_{control} < u_{tri}: T_{A+} \rightarrow OFF, T_{A-} \rightarrow ON$$

Από τη σύγκριση των σημάτων u_{tri} και $-u_{control}$, προκύπτουν οι παλμοί οδήγησης των παλμών του σκέλους B:

$$-u_{control} > u_{tri}: T_{B+} \rightarrow ON, T_{B-} \rightarrow OFF$$

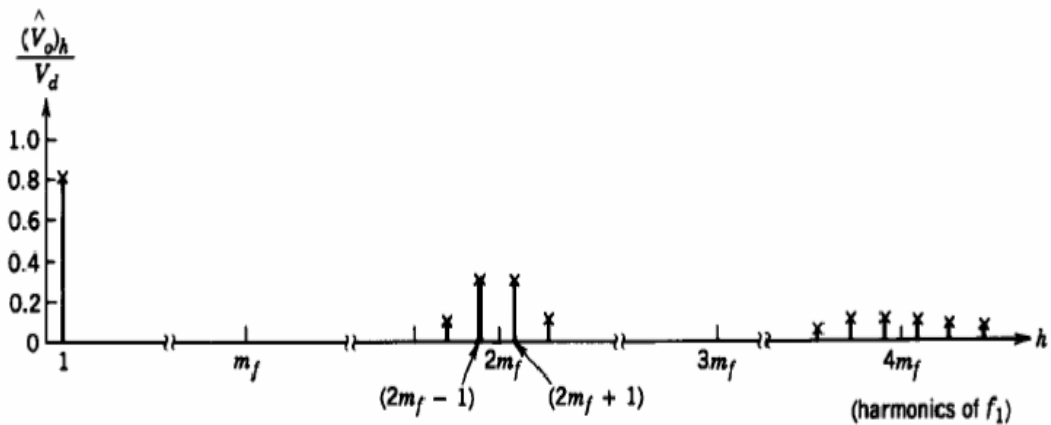
$$-u_{control} < u_{tri}: T_{B+} \rightarrow ON, T_{B-} \rightarrow ON$$

Η τάση εξόδου καθώς και το φάσμα αρμονικών απεικονίζονται στο σχήμα 4.5. Στα χρονικά διαστήματα όπου η τάση εξόδου είναι μηδέν, άγουν οι διακόπτες T_{A+} και T_{B+} , T_{A-} και T_{B-} . Οι διακόπτες αυτοί βραχυκυκλώνουν το φορτίο.



Σχήμα 4.5 Κυματομορφές στο μονοφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης με την ημιτονοειδή PWM τεχνική με μονοπολική τάση εξόδου

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης σε σύγκριση με τη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου είναι η μείωση των αλμάτων εξόδου της τάσης στο μισό καθώς η τάση εξόδου αλλάζει μεταξύ των επιπέδων τάσης 0 και $+V_d$ ή μεταξύ των 0 και $-V_d$ και ο διπλασιασμός της συχνότητας μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές. Ο διπλασιασμός έχει σαν αποτέλεσμα βελτίωση του φάσματος της τάσης εξόδου καθώς οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους όπως επιβεβαιώνεται από το σχήμα 4.6 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.6 Αρμονικές τάσεις με μονοπολικό έλεγχο PWM

Ισχύει και εδώ ότι και στη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου

$$V_{AO} = m_a * V_d \quad m_a \leq 1$$

$$V_d < V_{01} < \frac{4}{\pi} * V_d \quad m_a \geq 1$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Θέματα Σύνδεσης με το Δίκτυο

5.1 Ορισμοί και Βασικές Έννοιες

Σημείο Σύνδεσης στο Δίκτυο (ΣΣΔ)

Είναι το σημείο του δικτύου Μέσης Τάσης(MT) όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του παραγωγού και βρίσκεται πάντα στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών. Στο ΣΣΔ εγκαθίσταται η διάταξη μέτρησης της ενέργειας την οποία απορροφούν οι εγκαταστάσεις του παραγωγού από το δίκτυο. Η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο δίκτυο και αυτή που απορροφά από το δίκτυο για τις ιδιοκαταναλώσεις του υποσταθμού του μεταφέρονται πάντα μέσω της ίδιας παροχής. Το ΣΣΔ αποτελεί το φυσικό όριο διαχωρισμού αρμοδιοτήτων και ευθύνης μεταξύ ΔΕΗ και παραγωγού.

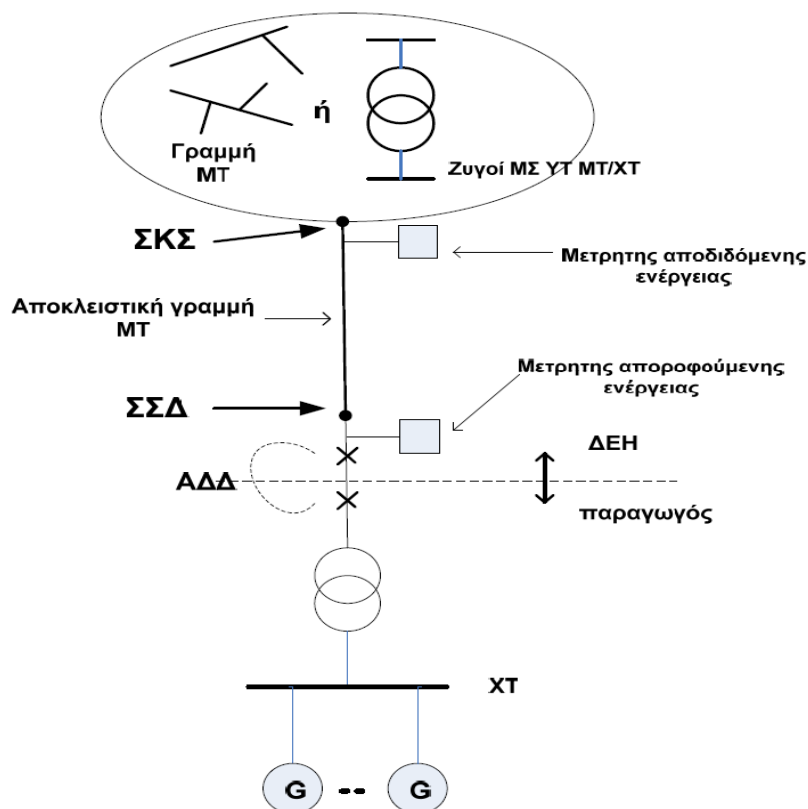
Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ)

Είναι το πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο σύνδεσης του δικτύου, στο οποίο συνδέεται (ή μπορεί να συνδεθεί μελλοντικά) άλλος χρήστης (καταναλωτής ή παραγωγός). Είναι δηλαδή το σημείο στο οποίο το διασυνδεδετικό δίκτυο του παραγωγού συναντά το κοινόχρηστο δίκτυο. Το ΣΚΣ αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό των προκαλούμενων επιπτώσεων στη λειτουργία του δικτύου από την εγκατάσταση παραγωγής. Γενικά το ΣΚΣ και το ΣΣΔ μπορεί να συμπίπτουν αλλά μπορεί να είναι και διαφορετικά. Για παράδειγμα στην περίπτωση παραγωγών που συνδέονται στη MT μέσω αποκλειστικής γραμμής το ΣΣΔ και το ΣΚΣ είναι διαφορετικά. Το ΣΣΔ λαμβάνεται στο πλησιέστερο προς τον παραγωγό άκρο της γραμμής ενώ το ΣΚΣ λαμβάνεται στο άλλο άκρο της γραμμής.

Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης (ΑΔΔ)

Είναι το στοιχείο εκείνο που επιτρέπει τη ζεύξη ή απομόνωση των εγκαταστάσεων παραγωγής από το δίκτυο. Ο ΑΔΔ ελέγχεται μέσω κατάλληλου εξοπλισμού (πχ ηλεκτρονόμων προστασίας). Να πούμε εδώ ότι ο ΑΔΔ μπορεί να εμπίπτει είτε στην αρμοδιότητα της ΔΕΗ με έξοδα του παραγωγού, κάτι που συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις, είτε στην αρμοδιότητα του παραγωγού με τις ρυθμίσεις που απαιτεί η ΔΕΗ.

Στο σχήμα 5.1 αποσαφηνίζονται οι έννοιες του ΣΣΔ και του ΣΚΣ σε περίπτωση διαμόρφωσης σύνδεσης με αποκλειστική γραμμή. Φαίνονται επίσης τα όρια ευθύνης παραγωγού και ΔΕΗ.



Σχήμα 5.1 Οι έννοιες του ΣΣΔ και του ΣΚΣ σε περίπτωση διαμόρφωσης σύνδεσης με αποκλειστική γραμμή και τα όρια ευθύνης παραγωγού και ΔΕΗ.

Εγκατάσταση Παραγωγής

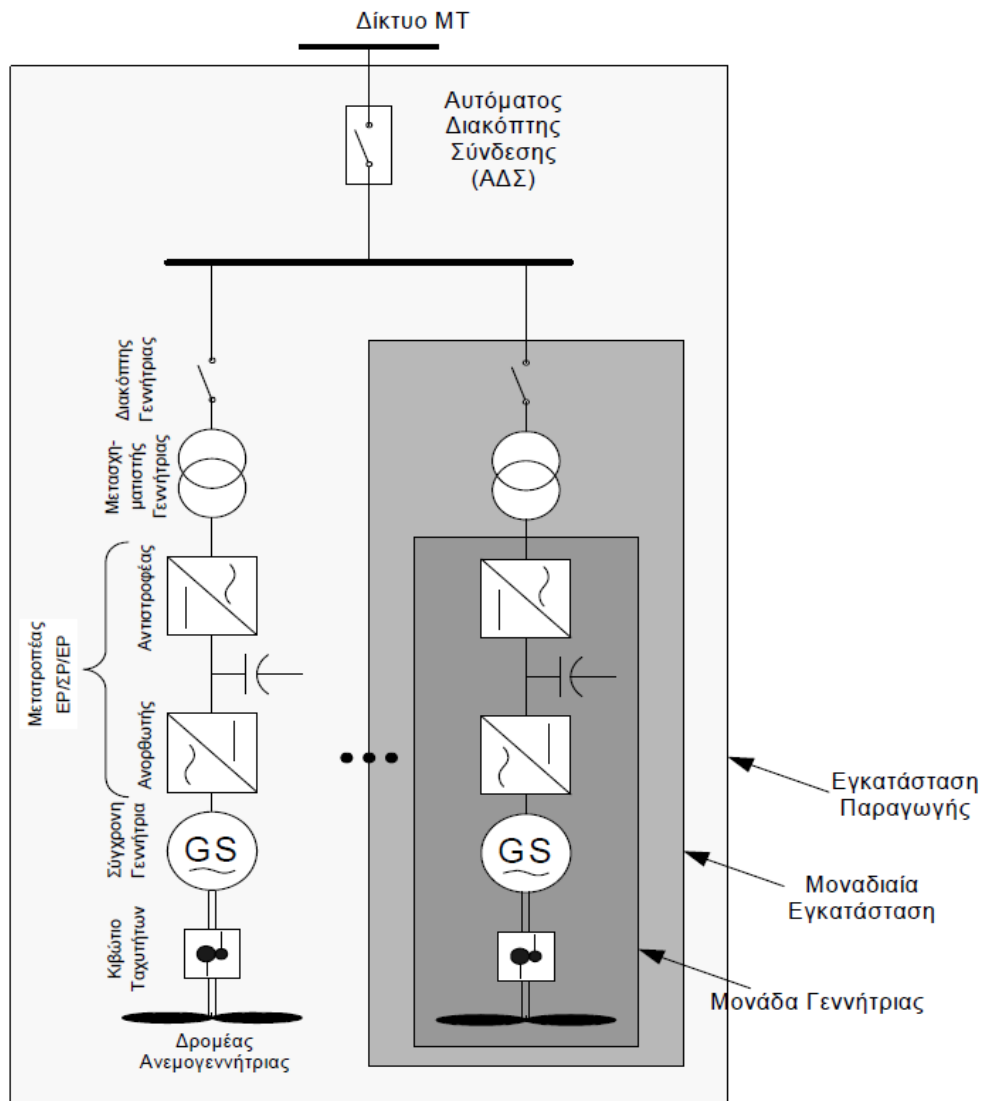
Είναι το τμήμα της εγκατάστασης στο οποίο υπάρχουν μια ή περισσότερες μονάδες γεννητριών για παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Μια εγκατάσταση χρήστη του δικτύου μπορεί να αποτελείται αποκλειστικά από την εγκατάσταση παραγωγής ή να περιλαμβάνει και άλλα φορτία.

Μοναδιαία Εγκατάσταση

Το τμήμα της εγκατάστασης παραγωγής που περιλαμβάνει μια μονάδα γεννήτριας συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων για τη λειτουργία της ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Όρια της μοναδιαίας εγκατάστασης είναι το σημείο στο οποίο είναι συνδεδεμένη με άλλη μοναδιαία εγκατάσταση ή με την υπόλοιπη εγκατάσταση του χρήστη ή με το δίκτυο. Η εγκατάσταση παραγωγής είναι δυνατόν να αποτελείται αποκλειστικά από μια μοναδιαία εγκατάσταση.

Μονάδα Γεννήτριας

Το τμήμα της μοναδιαίας εγκατάστασης το οποίο παράγει ενέργεια συμπεριλαμβανομένου και του μετατροπέα ισχύος. Στο σχήμα 5.2 διακρίνονται τα όρια της εγκατάστασης παραγωγής, της μοναδιαίας εγκατάστασης και της μονάδας γεννήτριας σε ένα σύστημα με ανεμογεννήτριες συνδεδεμένο στη μέση τάση.



Σχήμα 5.2 Εγκατάσταση Ανεμογεννήτριας που συνδέεται με το Δίκτυο ΜΤ.

5.2 Γενικές Προϋποθέσεις για τη Σύνδεση

Σε γενικές γραμμές σε ότι αφορά κατασκευαστικά ζητήματα αλλά και σε ζητήματα διαμόρφωσης της σύνδεσης των εγκαταστάσεων διανεμημένης παραγωγής, εφαρμόζονται κανόνες ανάλογοι εκείνων που ισχύουν στη σύνδεση καταναλωτών αντίστοιχου ισχύος.

5.2.1 Τρόπος σύνδεσης

Βασική αρχή για την επιλογή του τρόπου σύνδεσης μιας εγκατάστασης καταναλωμένης παραγωγής είναι ότι αυτή θα πρέπει να γίνεται με τον οικονομικότερο τρόπο χωρίς όμως να παραβιάζονται τα όρια διαταραχών όπως αυτά καθορίζονται από τους αντίστοιχους κανονισμούς της ΔΕΗ όπως αντίστοιχα ισχύει και για τις εγκαταστάσεις των καταναλωτών. Γενικά για τις εγκαταστάσεις καταναλωμένης παραγωγής (ΚΠ) ενδείκνυται να συνδέονται κατά το δυνατόν πιο κοντά προς τις καταναλώσεις, ώστε να περιορίζονται οι ροές επί των γραμμών και των μετασχηματιστών (Μ/Σ) του δικτύου, χωρίς βέβαια να δημιουργούνται καταστάσεις εκτός των επιτρεπόμενων ορίων αλλά αντίθετα να υπάρχει βελτίωση των τάσεων και ελαχιστοποίηση των απωλειών. Βασικό κριτήριο για την επάρκεια του δικτύου και του τρόπου σύνδεσης αποτελεί το μέγεθος της εγκατάστασης καθώς και οι υφιστάμενες συνθήκες της περιοχής όπως για παράδειγμα κατοικημένη ή όχι περιοχή, προοπτική σύνδεσης και άλλων εγκαταστάσεων στο προσεχές μέλλον κλπ. Έτσι για ισχύς μεγαλύτερες των 100 kW ως 20 MW η εγκατάσταση θα πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης. Η εξέταση για τον προσδιορισμό του ΣΚΣ πρέπει να αρχίζει από το πιο κοντινό στην εγκατάσταση σημείο του δικτύου και βαθμιαία να εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης σε σημεία πλησιέστερα προς τον υποσταθμό (Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης, ΥΤ/ΜΤ), δηλαδή σε σημεία με υψηλότερη στάθμη βραχυκύκλωσης. Τέτοιου είδους μελέτη είναι εκτός των ορίων της παρούσας διπλωματικής. Για μικρές σχετικά ισχύς μέχρι 5MW θα πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης σε υφιστάμενη γραμμή. Εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος μέχρι 8MW μπορεί να συνδέονται με αποκλειστική γραμμή στους ζυγούς ΜΤ του πλησιέστερου υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Για εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος μέχρι 20MW πρέπει αρχικά να εξετάζεται από τη ΔΕΗ η δυνατότητα σύνδεσης σε υφιστάμενο ή νέο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ μέσω αποκλειστικού δικτύου. Η εγκατάσταση ιδιαίτερου μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ (σε υφιστάμενο ή νέο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ) θα επιδιώκεται για ισχύεις άνω των 10 MW.

5.2.2 Γενικά περί διατάξεων ζεύξης και προστασίας

Οι βασικές αρχές για τον καθορισμό και επιλογή των διατάξεων ζεύξης και προστασίας είναι οι ακόλουθες. Το προσωπικό της ΔΕΗ θα πρέπει να έχει δυνατότητα εύκολης πρόσβασης και να μπορεί να πραγματοποιείται η εξασφαλισμένη απομόνωση της εγκατάστασης από το δίκτυο, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής και απρόσκοπτη εκτέλεση των εργασιών σε αυτό. Τα εγκαθιστάμενα μέσα προστασίας πρέπει να εξασφαλίζουν την απομόνωση της εγκατάστασης σε περίπτωση ανωμαλιών στο δίκτυο ώστε αφενός να αποφεύγονται βλάβες του εξοπλισμού της εγκατάστασης αφετέρου να εξασφαλίζεται ότι δε θα δημιουργηθούν επικίνδυνες καταστάσεις για τους λοιπούς χρήστες του δικτύου. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να εξετάζονται οι λειτουργίες των προστασιών στις συνηθέστερες περιπτώσεις ανωμαλιών όπως βραχυκυκλώματα στο εσωτερικό της εγκατάστασης και στο δίκτυο, η απομονωμένη λειτουργία της εγκατάστασης κλπ.. Τα συγκεκριμένα θα αναλυθούν παρακάτω πιο εμπειριστωμένα.

5.3 Διατάξεις Ζεύξης και Προστασίας

5.3.1 Προϋποθέσεις για τις διατάξεις ζεύξης και προστασίας

Γενικά οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας πρέπει να εξασφαλίζουν τα ακόλουθα:

A. Τη δυνατότητα χειροκίνητης ζεύξης απόζευξης ολόκληρης της εγκατάστασης από το δίκτυο ή επιμέρους τμημάτων αυτής. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού αρκεί η διάταξη ζεύξης να διαθέτει κατάλληλο στοιχείο ζεύξης δηλαδή τουλάχιστον διακόπτη φορτίου.

B. Την αυτόματη απομόνωση από το δίκτυο ολόκληρης της εγκατάστασης ή τμημάτων αυτής, σε περίπτωση σφάλματος στοιχείων του δικτύου ή της εγκατάστασης. Για το σκοπό αυτό πρέπει να υπάρχει αυτόματος διακόπτης διασύνδεσης ο οποίος να είναι εφοδιασμένος με κατάλληλες διατάξεις ελέγχου και προστασίας. Αυτές πρέπει ρυθμίζονται έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να συνεργάζονται επιλογικά με προηγούμενα μέσα προστασίας του δικτύου. Πρέπει για παράδειγμα να υπάρχει επιλογική προστασία με τα διακοπτικά στοιχεία της ΔΕΗ στη αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Η ΔΕΗ προτείνει για το σκοπό αυτό τον εφοδιασμό των αυτόματων διακοπών με κατάλληλους ηλεκτρονόμους υπερέντασης. Κατά κανόνα το ρεύμα σφάλματος από τη μεριά του δικτύου είναι αρκετά μεγάλο ώστε το άνοιγμα των αντίστοιχων διακοπών να είναι εξασφαλισμένο. Αντίθετα το ρεύμα σφάλματος από τη μεριά της εγκατάστασης είναι συχνά ανεπαρκές για να εξασφαλίσει το άνοιγμα των διακοπών. Για το λόγο αυτό η απόζευξη της εγκατάστασης για σφάλματα του Δικτύου επιτυγχάνεται συνήθως μέσω των προστασιών που σχετίζονται με τις απαιτήσεις Γ, Δ, Ε. Αυτό έχει να κάνει και με προστασία έναντι ασύμμετρων σφαλμάτων.

Γ. Την πρόληψη ανώμαλων λειτουργικών καταστάσεων και βλαβών στοιχείων της εγκατάστασης σε περίπτωση διαταραχών του δικτύου (πχ βυθίσεις και επαναφορά της τάσης). Η επίτευξη του Γ εξασφαλίζεται συνήθως με την προστασία κάθε μονάδας.

Δ. Την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης και τμήματος του δικτύου απομονωμένου από το υπόλοιπο Σύστημα (αποφυγή δηλαδή νησιδοποιημένης λειτουργίας) ή και μόνης της εγκατάστασης εφόσον δεν προβλέπεται από το σχεδιασμό της. Για το σκοπό αυτό απαιτείται τουλάχιστον η εγκατάσταση ηλεκτρονόμων ορίων τάσης και συχνότητας στον διακόπτη διασύνδεσης. Οι ηλεκτρονόμοι ορίων τάσης συμβάλλουν και στην απομόνωση της εγκατάστασης από το δίκτυο σε περιπτώσεις σφαλμάτων στη μεριά του δικτύου αφού τότε παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις των τάσεων από τις ονομαστικές τους τιμές. Οι ηλεκτρονόμοι ορίων συχνότητας-σε συνδυασμό με την επιτήρηση των ορίων τάσης-αφορούν κυρίως την ανίχνευση της νησιδοποίησης αφού μετά την αποσύνδεση παρουσιάζονται έντονες μεταβολές της συχνότητας. Σε ειδικές περιπτώσεις ιδίως μεγάλων εγκαταστάσεων αν κριθεί αναγκαίο μπορεί να είναι σκόπιμη και η εγκατάσταση προστασιών που να εξασφαλίζουν πληρέστερα την απομόνωση της εγκατάστασης σε περίπτωση μόνιμου

σφάλματος στο δίκτυο, έστω και σε σχετικά μεγάλους χρόνους. Κάτι τέτοιο αποφασίζεται σε συνεργασία του παραγωγού κα της ΔΕΗ.

Ε. Τον κατά το δυνατόν περιορισμό της άσκοπης αποσύνδεσης της εγκατάστασης από το δίκτυο, η οποία αποσύνδεση, εκτός από οικονομικές επιπτώσεις στον παραγωγό, μπορεί να δημιουργεί και προβλήματα ευστάθειας στο Σύστημα. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η κατάλληλη ρύθμιση ορίων και χρόνων διέγερσης όλων των παραπάνω προστασιών για να υπάρχει η ορθή επιλογική συνεργασία με προηγούμενα μέσα προστασίας του Δικτύου.

5.3.2 Ρυθμίσεις προστασιών

Οι παρακάτω ρυθμίσεις αφορούν στο μέσο προστασίας που επιφορτίζεται με τον ρόλο του ΑΔΔ και καθορίζονται από τη ΔΕΗ με κριτήριο την προστασία του Δικτύου από ανώμαλες λειτουργικές καταστάσεις. Οι επιλογές και ρυθμίσεις των μέσων που αφορούν την προστασία της εγκατάστασης κατανεμημένης παραγωγής καθορίζονται από τον ίδιο τον παραγωγό (σχήμα 5.3).

1. Το σύστημα προστασίας του ΑΔΔ πρέπει να περιλαμβάνει και προστασίες ορίων τάσεως και συχνότητας, δηλαδή προστασίες έναντι υπότασης/υπέρτασης και υποσυχνότητας/ υπερσυχνότητας. Η επιτήρηση τάσης πρέπει να γίνεται και στις τρεις φάσεις ώστε να ανιχνεύονται ακόμα και μονοφασικές διαταραχές. Η επιτήρηση της συχνότητας αρκεί να γίνεται σε μια μόνο φάση. Στον πίνακα του σχήματος 5.3 που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά περιοχές ρύθμισης των ορίων τάσης και συχνότητας καθώς και τυπικές ρυθμίσεις αυτών. Οι ρυθμίσεις μπορούν να τροποποιούνται με βάση τις εκάστοτε συνθήκες.

| Προστασίες της διασύνδεσης με το δίκτυο της ΜΤ | | | | | |
|--|--------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| Τύπος ηλεκτρονόμου | Περιοχή ρύθμισης τιμής διέγερσης | Συνιστώμενη ρύθμιση | | | |
| | | Τύπου Α | | Τύπου Β | |
| | | Τιμή Διέγερσης | Χρονική Καθυστέρηση | Τιμή Διέγερσης | Χρονική Καθυστέρηση |
| Υπότασης | $0.70 \cdot U_n \div 1.00 \cdot U_n$ | $0.85 \cdot U_n$ | 0.8 s | $0.80 \cdot U_n$ | 1.2s |
| Υπέρτασης | $1.00 \cdot U_n \div 1.15 \cdot U_n$ | $1.10 \cdot U_n$ | 0.8 s | $1.15 \cdot U_n$ | 1.2 s |
| Υποσυχνότητας | $47 \div 50$ Hz | 49.5 Hz | 0.8 s | 47.5 Hz | 1.2 s |
| Υπερσυχνότητας | $50 \div 52$ Hz | 50.5 Hz | 0.8 s | 51.5 Hz | 1.2 s |

Σχήμα 5.3 Ρύθμιση των διατάξεων προστασίας σε σύνδεση με την Μ.Τ.

2. Για τον καθορισμό επιλογής του ΑΔΔ και τον καθορισμό και ρύθμιση των προστασιών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η απόκριση τους στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Για σφάλματα εντός της εγκατάστασης ο ΑΔΔ θα πρέπει να ανοίγει πριν από την οριστική θέση εκτός λειτουργίας του προηγούμενου μέσου του δικτύου.

Για παράδειγμα ο ΑΔΔ πρέπει να ανοίξει πριν από το διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής αν υπάρξει σφάλμα στην εγκατάσταση παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της χρονικής καθυστέρησης του στοιχείου ελέγχου του ΑΔΔ για προστασία έναντι υπερέντασης βραχυκύκλωσης.

- Για σφάλματα επί της γραμμής σύνδεσης της εγκατάστασης παραγωγής τα οποία πρέπει να απομονώνονται και από την πλευρά της εγκατάστασης με το άνοιγμα του ΑΔΔ (αναφέρεται κυρίως σε αποκλειστικές γραμμές σύνδεσης).

- Για σφάλματα σε άλλα σημεία του δικτύου οπότε θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο ανεπιθύμητων λειτουργιών των προστασιών.

3. Για εγκαταστάσεις των οποίων η ισχύς δεν είναι αρκετά μεγάλη, και γενικά συνδέονται σε γραμμές ΜΤ που τροφοδοτούν και καταναλωτές, η σύνδεση της εγκατάστασης παραγωγής δεν επιβάλλει την τροποποίηση των υφιστάμενων ρυθμίσεων των προστασιών του Δικτύου, αν και πάντα πρέπει να γίνεται σχετικός έλεγχος. Σε περιπτώσεις αποκλειστικών γραμμών σύνδεσης η προστασίες επιλέγονται προφανώς με βάση την προστασία της γραμμής σύνδεσης και της εγκατάστασης παραγωγής. Στην Ελλάδα, τουλάχιστον προς το παρόν, το ποσοστό της συνολικής ισχύος της διανεμημένης παραγωγής είναι σχετικά μικρό. Έτσι η απόζευξη της διανεμημένης παραγωγής, λόγω κάποιου σφάλματος ή άλλης διαταραχής της συχνότητας ή της τάσης του Δικτύου, δεν έχει ουσιαστική επίπτωση στο Δίκτυο. Ωστόσο η συχνή θέση εκτός λειτουργίας των εγκαταστάσεων διανεμημένης παραγωγής εκτός των δυσμενών οικονομικών επιπτώσεων για τον παραγωγό συνεπάγεται αυξημένες καταπονήσεις των μονάδων αλλά και αύξηση του εύρους των διαταραχών στο Δίκτυο. Μπορούμε έτσι να διακρίνουμε τις 2 ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εγκαταστάσεις κατανεμημένης παραγωγής μικρής ισχύος, μέχρι 5MW, που συνδέονται συνήθως σε υφιστάμενες γραμμές και μπορούν να επιλέγονται οι ρυθμίσεις του τύπου Α του πίνακα του σχήματος 5.3 για τις προστασίες του ΑΔΔ. Τα βασικά χαρακτηριστικά της προστασίας έναντι υπερέντασης του διακόπτη ισχύος (ΔΙ) ΜΤ στην αναχώρηση της γραμμής από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ, θα επιδιώκεται να μην τροποποιούνται. Πρέπει όμως να εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία του ΑΔΔ με τον ΔΙ. Αυτό γίνεται με την εξασφάλιση της συνεργασίας των Ηλεκτρονόμων Η/Ν υπερέντασης του ΑΔΔ και των Η/Ν Χρονικής Καθυστέρησης (ΧΚ) του ΔΙ της γραμμής ή οποιουδήποτε άλλου μέσου παρεμβάλλεται. Ειδικότερα για την καθυστέρηση ορίων τάσης και συχνότητας η τιμή 0.8 sec προτείνεται για να μην υπάρξει άνοιγμα του ΑΔΔ ακόμα και σε περίπτωση παροδικών σφαλμάτων που εκκαθαρίζονται με την πρώτη ταχύτατη επαναφορά του ΔΙ. Τροποποιήσεις των ρυθμίσεων μπορούν να γίνουν μετά από αίτημα των παραγωγών. Επίσης τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των προστασιών της γραμμής θα πρέπει να τίθενται υπόψη του παραγωγού.

- Εγκαταστάσεις μεγάλης σχετικά ισχύος (>5MW): Συνδέονται με αποκλειστικές γραμμές ΜΤ ή και μέσω ιδιαίτερου μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ. Οι προστασίες του ΑΔΣ μπορεί να ρυθμίζονται σε ευρύτερα όρια, όπως τα Τύπου Β στον πίνακα του σχήματος 5.3. Έτσι περιορίζεται η πιθανότητα αποζεύξεως της εγκατάστασεως λόγω διαταραχών στο σύστημα ή σε άλλες γραμμές του δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί (και γενικά ενδείκνυται) να τίθενται εκτός, ή να ρυθμίζονται σε πολύ υψηλές τιμές, οι ηλεκτρονόμοι

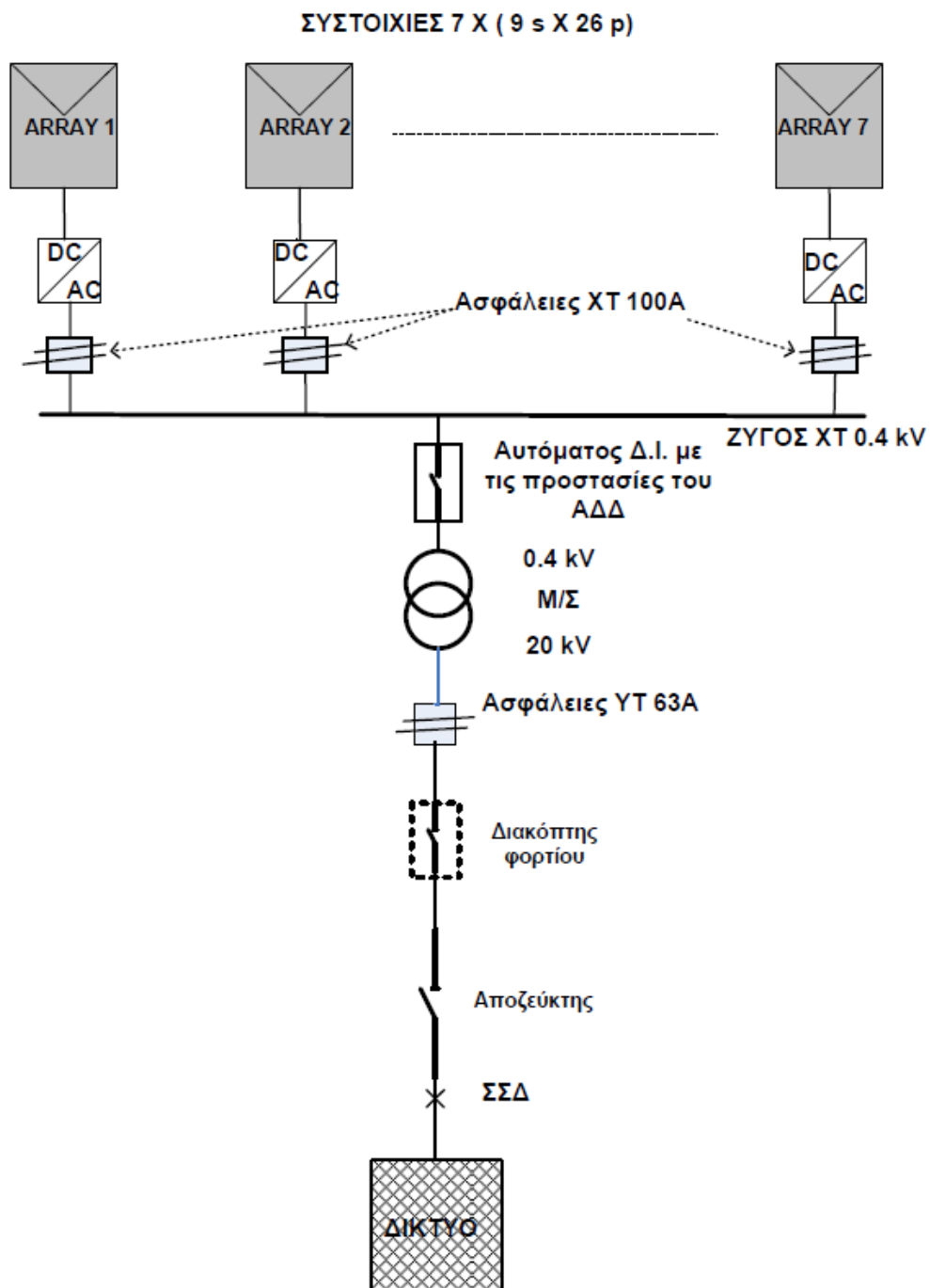
στιγμιαίας λειτουργίας του ΔΙ στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ στην οποία συνδέεται η εγκατάσταση παραγωγής. Οποσδήποτε όμως θα εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία των Η/Ν υπερεντάσεως του ΑΔΔ με τους Η/Ν ΧΚ του Δ/Ι στην αναχώρηση της Γραμμής. Με τα παραπάνω επιτυγχάνεται μείωση της συχνότητας των άνευ λόγου αποζεύξεων του ΑΔΔ ή και η μη διακοπή της παραγωγής, εφόσον και οι μηχανές που εγκαθιστά ο παραγωγός έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια ανάλογων διαταραχών (και βεβαίως έχουν επιλεγεί αντίστοιχα διευρυμένα όρια και χρόνοι διέγερσης για τις ίδιες προστασίες των γεννητριών).

4. Για την ανίχνευση της απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης μπορεί να χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις ειδικοί ηλεκτρονόμοι, οι οποίοι π.χ. ελέγχουν τον ρυθμό μεταβολής του ανύσματος της τάσης, του φορτίου, της συχνότητας κλπ. Τα μέσα αυτά είναι αποδεκτά κατόπιν εγκρίσεως από τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ, αλλά δεν μπορούν να υποκαταστήσουν τις βασικές λειτουργίες που παρουσιάζονται στον πίνακα του σχήματος 5.3 για την προστασία της διασύνδεσης, χωρίς ειδική εξέταση. Επίσης, σε ειδικές περιπτώσεις εγκαταστάσεων παραγωγής μεγάλου μεγέθους, μπορεί να εφαρμοστεί η αλληλένδεση (transfer trip) του ΑΔΔ της εγκατάστασης με τον διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται η άμεση απόζευξη της εγκατάστασης για οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί το άνοιγμα του διακόπτη της γραμμής και αποκλείεται η ασύγχρονη επανάζευξή του.

5. Μετά από λειτουργία απόζευξης του ΑΔΔ, η ζεύξη του μπορεί να γίνεται είτε μετά από συνεννόηση με τη ΔΕΗ, αν υπάρχουν ειδικοί λόγοι, ή συνηθέστερα αυτόματα. Σε κάθε περίπτωση η επανάζευξη πρέπει να καθυστερεί μέχρι να επανέλθει η τάση και η συχνότητα του δικτύου εντός της προβλεπόμενης ζώνης κανονικής λειτουργίας, ή και άλλους λόγους. Για την προστασία της εγκατάστασης παραγωγής, συνιστάται να προβλέπεται χρονική καθυστέρηση της τάξης των λεπτών της ώρας μεταξύ της επανόδου του δικτύου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και της ζεύξης της εγκατάστασης, ώστε να έχουν ολοκληρωθεί ενδεχόμενοι χειρισμοί στο δίκτυο. Για εγκαταστάσεις με δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας, η ζεύξη αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται από αυτόματο σύστημα συγχρονισμού ακριβείας.

5.3.3 Συνολική επισκόπηση των μέσων προστασίας και ζεύξης μέχρι το Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ)

Στην παρούσα εργασία έχουμε ήδη παρουσιάσει σχετική μελέτη προστασίας της εγκατάστασης παραγωγής έναντι υπερεντάσεων (εξαιτίας πιθανών υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων) που μπορεί να παρουσιαστούν στο εσωτερικό της εγκατάστασης(ΧΤ) αλλά και στις 2 πλευρές του ΜΣ ανύψωσης. Η εκτίμηση των διατάξεων προστασίας και των ρυθμίσεων τους αφορούν πρωτίστως στην εξασφάλιση των στοιχείων της εγκατάστασης απέναντι σε υπερεντάσεις του παραπάνω τύπου. Με βάση το παρόν κεφάλαιο στο σχήμα 5.4 παρουσιάζουμε το σύνολο των διατάξεων ζεύξης και προστασίας μέχρι και το σημείο κοινής σύνδεσης της εγκατάστασης με το δίκτυο της ΔΕΗ.



Σχήμα 5.4 Διατάξεις Προστασίας και Ζεύξης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Το πρόγραμμα εξομοίωσης(MATLAB/SIMULINK) και οι αρχικές προσεγγίσεις

6.1 Το MATLAB

Το MATLAB είναι ένα διαδραστικό σύστημα που επιτρέπει τη λύση πολλών τεχνικών προβλημάτων υπολογισμού και ιδίως εκείνων με μορφή πινάκων και διανυσμάτων, σε ένα κλάσμα του χρόνου που θα απαιτούνταν για να γραφεί ένα πρόγραμμα σε μια μονοδιάστατη μη διαδραστική γλώσσα όπως η C ή η Fortran. Η υψηλής απόδοσης γλώσσα που χρησιμοποιεί το MATLAB ενσωματώνει τον υπολογισμό, την απεικόνιση και τον προγραμματισμό σε ένα εύχρηστο περιβάλλον, όπου τα προβλήματα και οι λύσεις εκφράζονται σε οικεία μαθηματική σημειογραφία. Το όνομα MATLAB αντιπροσωπεύει τη φράση Matrix Laboratory και αρχικά δημιουργήθηκε για να παρέχει εύκολη πρόσβαση στο λογισμικό μητρών (πινάκων- matrix) το οποίο είχε αναπτυχθεί σε πρότζεκτ των LINPACK και EISPACK. Σήμερα το MATLAB περιλαμβάνει τις βιβλιοθήκες LAPACK και BLAS ενσωματώνοντας έτσι την τεχνολογία αιχμής στο λογισμικό μητρών. Το MATLAB έχει εξελιχθεί σε μια περίοδο ετών με τη συμβολή πολλών χρηστών. Στην πανεπιστημιακή κοινότητα είναι το πρότυπο εκπαιδευτικό εργαλείο τόσο για εισαγωγικά όσο και για προχωρημένα μαθήματα μαθηματικών και μηχανικής. Στη βιομηχανία, το MATLAB αποτελεί εργαλείο επιλογής όταν πρόκειται για έρευνα υψηλής παραγωγικότητας, ανάπτυξης, και ανάλυσης. Επιπλέον το MATLAB διαθέτει μια οικογένεια από συγκεκριμένες εφαρμογές λύσεων που ονομάζονται εργαλειοθήκες. Το σημαντικό για τους περισσότερους χρήστες του MATLAB είναι ότι οι εργαλειοθήκες μας επιτρέπουν να μάθουμε και να εφαρμόσουμε εξειδικευμένες τεχνολογίες. Οι εργαλειοθήκες είναι ολοκληρωμένες συλλογές συναρτήσεων του MATLAB, που επεκτείνουν το περιβάλλον του, για την επίλυση κάποιων ειδικών κατηγοριών προβλημάτων. Μπορούμε να προσθέσουμε εργαλειοθήκες για επεξεργασία σήματος, συστήματα ελέγχου, νευρωνικά δίκτυα, ασαφή λογική, για προσομοίωση και πολλούς άλλους τομείς. Μια επέκταση του περιβάλλοντος του MATLAB αποτελεί και το Simulink, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εργασία αυτή, και το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση δυναμικών συστημάτων.

6.2 Το Simulink

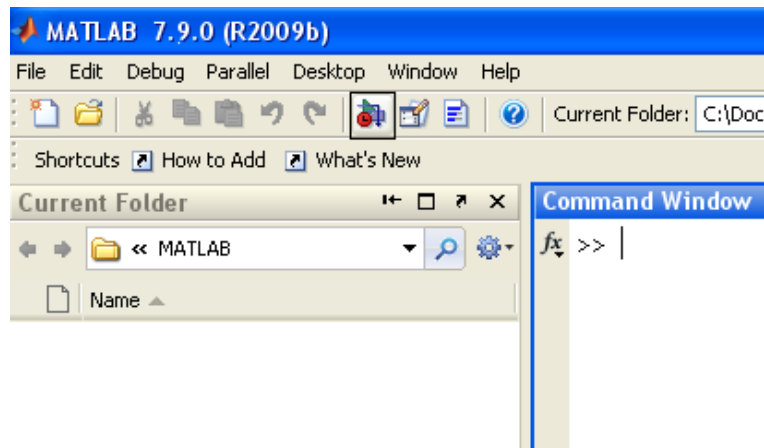
Το λογισμικό Simulink εξομοιώνει και αναλύει μοντέλα δυναμικών συστημάτων. Μας δίνει τη δυνατότητα να θέσουμε μια ερώτηση σχετικά με ένα σύστημα, να φτιάξουμε το μοντέλο του συστήματος, και να δούμε τι συμβαίνει. Με το Simulink, μπορούμε εύκολα να δημιουργήσουμε μοντέλα από το μηδέν, ή να τροποποιήσουμε τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες μας. Επίσης το Simulink υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, τα οποία μοντελοποιούνται σε συνεχή χρόνο, σε δείγματα χρόνου ή σε συνδυασμό των δύο. Τα συστήματα μπορούν επίσης να

χωρίζονται σε διαφορετικά τμήματα, το καθένα από τα οποία δείγματοληπτείται ή ενημερώνεται με διαφορετικούς ρυθμούς. Με το Simulink, μπορούμε να προχωρήσουμε πέρα από εξιδανικευμένα γραμμικά μοντέλα σε μια πιο ρεαλιστική εξερεύνηση μη γραμμικών μοντέλων, που λαμβάνουν υπόψη τα διάφορα μεγέθη που περιγράφουν τον πραγματικό κόσμο των φαινομένων, όπως τη τριβή, την αντίσταση του αέρα, την ολίσθηση τις απότομες μεταβολές κ.α.. Θα έλεγε κανείς πως το Simulink μετατρέπει τον υπολογιστή σε ένα εργαστήριο για την μοντελοποίηση και ανάλυση συστημάτων που δεν θα ήταν δυνατή ή πρακτική με άλλο τρόπο. Είτε μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά ενός αυτοκινούμενου συστήματος συμπλέκτη, ή η ταλάντωση του φτερού του αεροπλάνου, ή η επίδραση της νομισματικής προσφοράς στην οικονομία, το Simulink παρέχει τα εργαλεία για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση σχεδόν οποιουδήποτε προβλήματος του πραγματικού κόσμου. Το Simulink παρέχει μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) για την κατασκευή μοντέλων ως διαγράμματα-μπλοκ και επιτρέπει τη σχεδίαση μοντέλων όπως με μολύβι και χαρτί. Επίσης, περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη με μπλοκ πηγών (τάσεως, ρεύματος), γραμμικών και μη γραμμικών στοιχείων, και συνδέσεων. Αν αυτά τα τμήματα δεν ανταποκρίνονται στις ανάγκες του συστήματός μας, ωστόσο, μπορούμε επίσης να δημιουργήσουμε μπλοκ. Το διαδραστικό γραφικό περιβάλλον απλοποιεί τη διαδικασία μοντελοποίησης, εξαλείφοντας την ανάγκη για τη διαμόρφωση διαφορικών εξισώσεων σε μια γλώσσα ή πρόγραμμα. Αφού φτιάξουμε ένα μοντέλο, μπορούμε να το προσομοιώσουμε, επιλέγοντας μια από τις μαθηματικές μεθόδους ολοκλήρωσης, είτε από το μενού Simulink ή πληκτρολογώντας εντολές στο MATLAB Command Window. Χρησιμοποιώντας τηλεσκόπια και άλλα μπλοκ απεικόνισης, μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ η προσομοίωση τρέχει. Μπορούμε ακόμη στη συνέχεια να αλλάξουμε παραμέτρους και να εξερευνήσουμε την επιρροή κάθε μίας από αυτές στη λειτουργία του μοντέλου μας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να τοποθετηθούν στο χώρο εργασίας του MATLAB για περαιτέρω επεξεργασία. Το λογισμικό του Simulink είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το περιβάλλον του MATLAB. Απαιτείται το MATLAB να τρέχει το μοντέλο που φτιάξαμε, καθορίζοντας και αξιολογώντας συνολικά το μοντέλο και τις επιμέρους παραμέτρους κάθε χρησιμοποιούμενου μπλοκ. Σημειώνουμε ότι το Simulink μπορεί να χρησιμοποιεί πολλά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του MATLAB. Πιο συγκεκριμένα το Simulink χρησιμοποιεί το MATLAB για:

- Τον ορισμό των εισόδων του μοντέλου.
- Την αποθήκευση των εξόδων του μοντέλου για επεξεργασία.
- Την εκτέλεση των λειτουργιών μέσα σε ένα μοντέλο, μέσω κλήσεων τελεστών και συναρτήσεων του MATLAB.

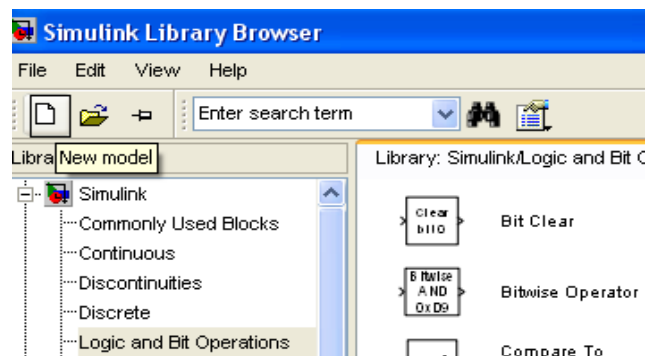
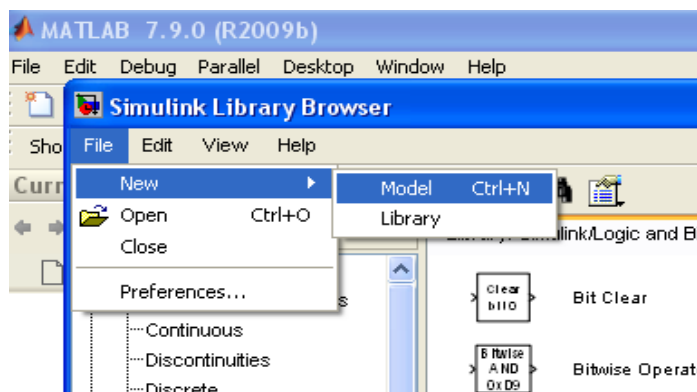
6.3 Δημιουργία νέου Μοντέλου

Προκειμένου να χτίσουμε ένα καινούριο μοντέλο πρέπει, αφού πρώτα ανοίξουμε το MATLAB, να κάνουμε αριστερό κλικ στο όγδοο εικονίδιο της δεύτερης γραμμής εντολών(σχήμα 6.1), ώστε να ανοίξουμε τις βιβλιοθήκες με τα έτοιμα μπλοκ του Simulink.



Σχήμα 6.1 Άνοιγμα του προγράμματος

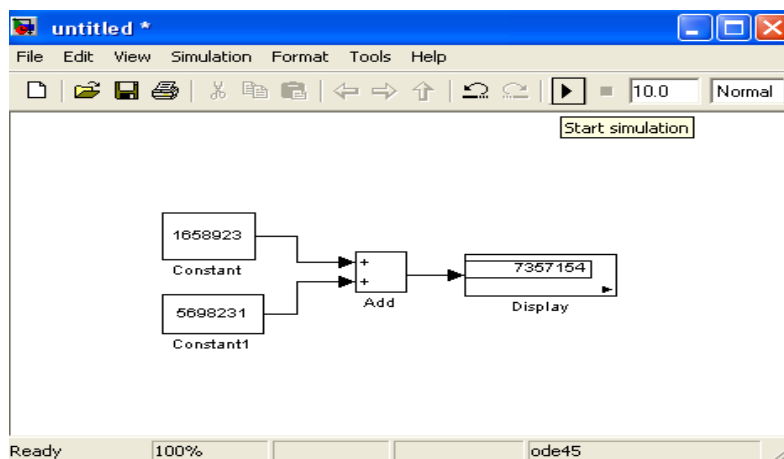
Στην οθόνη μας θα πρέπει να εμφανιστεί λοιπόν σε νέο παράθυρο το "Simulink Library Browser" (σχήμα 6.2), στο οποίο όπως φαίνεται παρακάτω επιλέγουμε File- New-Model(σχήμα 6.2) και έτσι έχουμε ανοίξει ένα νέο παράθυρο την περιοχή εργασίας μας, με τίτλο "Untitled" στο οποίο θα χτίσουμε το μοντέλο μας. Θα μπορούσαμε με πιο απλό τρόπο να ανοίξουμε το νέο παράθυρο κάνοντας αριστερό κλικ στο πρώτο εικονίδιο δεύτερης γραμμής εντολών (new model,σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Δημιουργία νέου μοντέλου

Το παράθυρο Simulink Library Browser περιέχει πολλές βιβλιοθήκες χωριζόμενες σε επιμέρους κατηγορίες και αυτές σε υποκατηγορίες (αριστερή στήλη) οι οποίες περιέχουν τα αντίστοιχα μπλοκ (δεξιά στήλη). Για να

επιλέξουμε-ανοίξουμε μία βιβλιοθήκη απλά κάνουμε διπλό αριστερό κλικ πάνω της και ομοίως για κάθε επιμέρους κατηγορία ή υποκατηγορία αυτής. Στη δεξιά στήλη εμφανίζονται τα μπλοκ με τα ονόματά τους που μπορούν με απλό κλικ και σύροντας το ποντίκι στο χώρο εργασίας (παράθυρο untitled) να μεταφερθούν εκεί, αποτελώντας κομμάτι του μοντέλου μας. Επίσης μπορούμε να μεταφέρουμε ένα μπλοκ, κάνοντας δεξί κλικ πάνω του και επιλέγοντας “add to untitled”. Αυτή η διαδικασία θα μεταφέρει ένα αντίγραφο της συγκεκριμένης συνάρτησης (μπλοκ) στο παράθυρο εργασίας. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε να προσθέσουμε δύο σταθερούς αριθμούς χρειαζόμαστε το μπλοκ “Add” της πρώτης βιβλιοθήκης (Simulink) της κατηγορίας “Math Operations” και για τους αριθμούς δύο μπλοκ “Constant” της ίδιας βιβλιοθήκης που βρίσκονται στην κατηγορία “Commonly Used Blocks”. Μπορούμε επίσης να βάλουμε ένα μπλοκ εμφάνισης του αποτελέσματος όπως είναι το “Display” της κατηγορίας “Sinks” της ίδιας βιβλιοθήκης (σχήμα 6.3). Αφού μεταφέρουμε με τη προαναφερθείσα μέθοδο και τα τέσσερα μπλοκ στο παράθυρο εργασίας, θα πρέπει να ορίσουμε τις παραμέτρους για κάθε ένα από αυτά. Εάν κάνεις διπλό κλικ σε οποιοδήποτε μπλοκ (άνοιγμα μπλοκ) ανοίγει ένα παράθυρο με τις παραμέτρους του. Το παράθυρο περιέχει σύντομη πληροφορία για το μπλοκ. Υπάρχει η επιλογή HELP για πιο λεπτομερείς πληροφορίες. Τα περισσότερα μπλοκ έχουν κάποιες default παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν. Επιστρέφοντας στο παράδειγμά μας, για κάθε μία από τις σταθερές μας ορίζουμε μία τιμή έστω 1658923 για τη πρώτη και 5698231 για τη δεύτερη. Τώρα μένει μόνο να ενώσουμε τα μπλοκ μεταξύ τους και να τρέξουμε το μοντέλο μας. Για να συνδέσουμε δυο μπλοκ κάνουμε κλικ στην έξοδο του ενός μπλοκ και σύρουμε το ποντίκι προς την είσοδο του άλλου μπλοκ. Θα εμφανιστεί μια γραμμή με βέλος που θα ενώνει τα δυο μπλοκ και θα δείχνει από την έξοδο του ενός (Constant) προς την είσοδο του άλλου (Add). Για να τρέξουμε το μοντέλο που φτιάξαμε απλά κάνουμε κλικ στο δέκατο τρίτο στοιχείο της δεύτερης γραμμής εντολών (Start simulation) και περιμένουμε το χαρακτηριστικό ήχο ολοκλήρωσης της προσομοίωσης που εξαρτάται από το χρόνο για τον οποίο έχουμε επιλέξει να τρέξει (εδώ 10'', το δέκατο πέμπτο στοιχείο στη δεύτερη γραμμή εντολών). Στο μπλοκ “Display” εμφανίζεται το αποτέλεσμα(σχήμα 6.3).

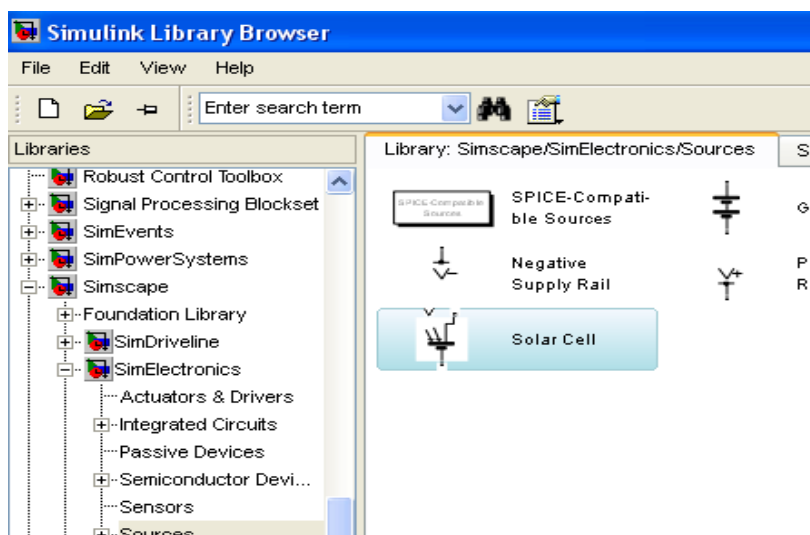


Σχήμα 6.3 Το μοντέλο του παραδείγματος

Αφού δόθηκαν κάποιες γενικές οδηγίες δημιουργίας μοντέλων στο SIMULINK στη συνέχεια θα αναλύσουμε και θα εκθέσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκεκριμένων μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

6.4 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

Η συγκεκριμένη έκδοση του MATLAB που χρησιμοποιήθηκε, MATLAB 7.9.0(R2009b), περιέχει ένα έτοιμο μπλοκ που ονομάζεται “Solar Cell” και βρίσκεται στη βιβλιοθήκη “Simscape”, στην κατηγορία “SimElectronics”, υποκατηγορία “Sources” του Simulink (σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4 Η βιβλιοθήκη που περιέχει το μπλοκ Solar Cell

Μεταφέρουμε το συγκεκριμένο μπλοκ στο χώρο εργασίας μας και ορίζουμε τις απαιτούμενες παραμέτρους. Από τα τρία κυκλώματα που προτείνονται στο “Block Parameters” επιλέχθηκε το πρώτο, των πέντε παραμέτρων, που σύμφωνα με το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις τιμές: ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} , ακτινοβολία S (στις παραμέτρους του προγράμματος αναφέρεται ως I_r), παράγοντας ποιότητας N (ή A κυμαίνεται από 1 έως 2 για ένα ηλιακό κύτταρο) και εν σειρά αντίσταση R_s , για να υπολογίσει κάθε στιγμή την απόκριση του κυττάρου από την απλοποιημένη εξίσωση που φαίνεται και παρακάτω:

$$I = I_{ph} - I_0 [e^{A(V+IR_s)} - 1]$$

όπου $A=q/NKT$.

Έχουμε ήδη αναφέρει (κεφάλαιο 2) ότι q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, K είναι η σταθερά Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία. Οι τρεις αυτές σταθερές στο MATLAB για το μπλοκ solar cell εκφράζονται από μία, την $V_t=KT/q=25mV$. Δηλαδή στον ορισμό των παραμέτρων το πρόγραμμα ζητάει να δώσουμε μια τιμή για το N το οποίο ονομάζει παράγοντα ποιότητας και το

οποίο στη συνέχεια το πολλαπλασιάζουμε την σταθερά V_t . Στην απλοποιημένη εξίσωση λοιπόν δεν υπάρχει Λ για το πρόγραμμα αλλά $1/NV_t$. Η εξίσωση λοιπόν με τους νέους συμβολισμούς γίνεται:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{NV_t}} - 1 \right]$$

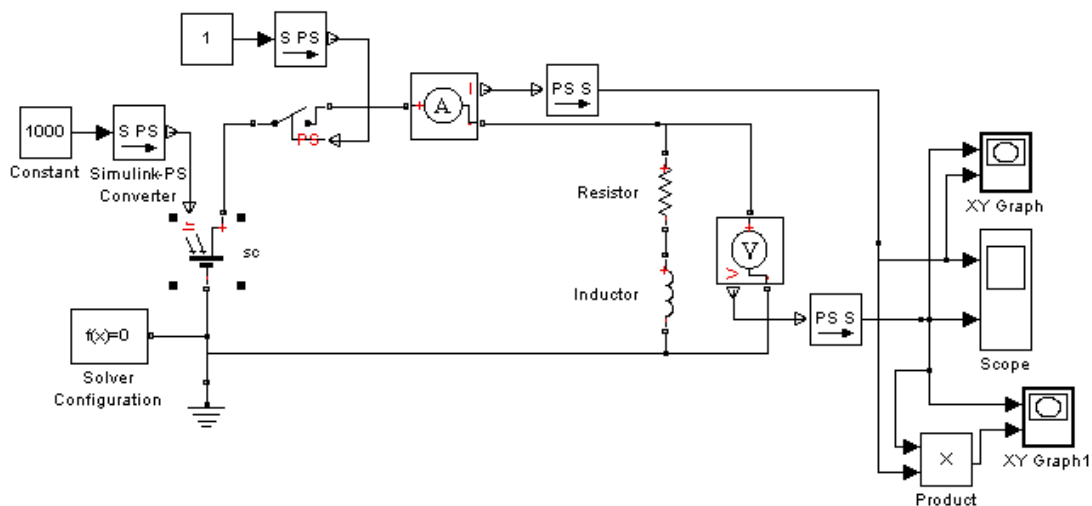
Στη βιβλιογραφία όπου αναζητήσαμε παραμέτρους για ηλιακά κύτταρα, δίνονται το ρεύμα κόρου της διόδου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης που χρησιμοποιείται και ως φωτόρευμα, η τάση ανοιχτού κυκλώματος, η εν σειρά αντίσταση και τέλος ο παράγοντας Λ . Σε κάθε περίπτωση λοιπόν έπρεπε από την τιμή του Λ να υπολογίζουμε την τιμή του παράγοντα N από τη σχέση $\Lambda=1/NV_t$ συνεπώς $N=1/\Lambda V_t$. Σε πρώτη φάση, οι παράμετροι για ένα κύτταρο που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

$I_0=0.0045$ A
 $I_{sc}=I_{ph}=I_{ph0}=0.756$ A
 $V_{oc}=0.54321$ V
 $\Lambda=13,68$ V⁻¹
 $R_s=0.05$ Ω

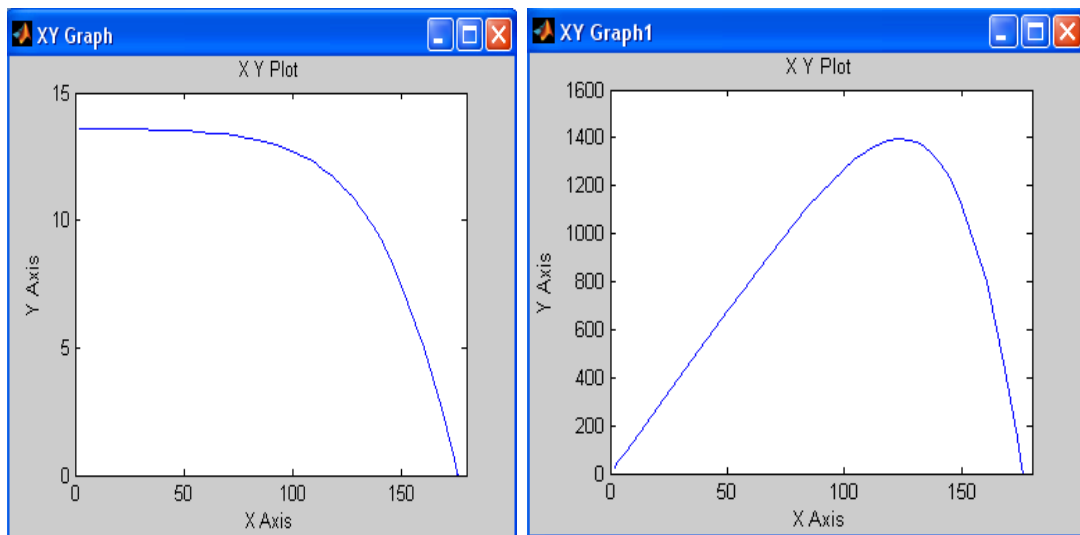
και προέκυψαν από μια δημοσίευση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια σύμφωνα με την δημοσίευση αποτελούνταν από 18 παράλληλους κλάδους των 324 κυττάρων σε σειρά ο καθένας. Δηλαδή οι τελικές τιμές των παραμέτρων που τοποθετήθηκαν στο μπλοκ ήταν:

$I_0=0.0081$ A
 $I_{sc}=I_{ph}=I_{ph0}=13.615$ A
 $V_{oc}=176$ V
 $\Lambda=0.042$ V⁻¹ (οπότε $N=1/(\Lambda*V_t)=926.441$)
 $R_s=0.9$ Ω

Αφού ορίσαμε τις παραμέτρους η φωτοβολταϊκή μας γεννήτρια είναι έτοιμη. Στη συνέχεια την συνδέουμε με ένα R-L φορτίο, μέσω ενός αμπερομέτρου και ενός βολτομέτρου προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα για να δούμε τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης που δίνει η γεννήτρια. Το τελικό κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 6.5, και οι χαρακτηριστικές τάσεως- ρεύματος και τάσεως- ισχύος στο σχήμα 6.7. Ο ρόλος κάποιων επιπλέον μπλοκ που εμφανίζονται στο κύκλωμα αναλύεται παρακάτω.



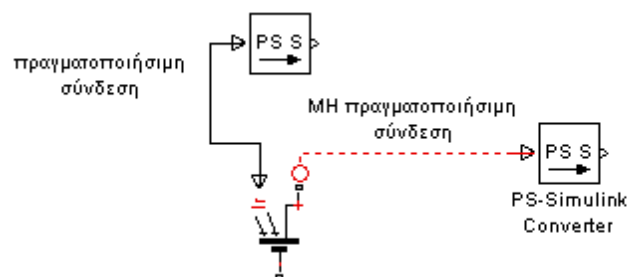
Σχήμα 6.5 Το συνολικό κύκλωμα του Solar Cell



Σχήμα 6.6 Οι χαρακτηριστικές εξόδου $V(V)$ - $I(A)$, $V(V)$ - $P(W)$

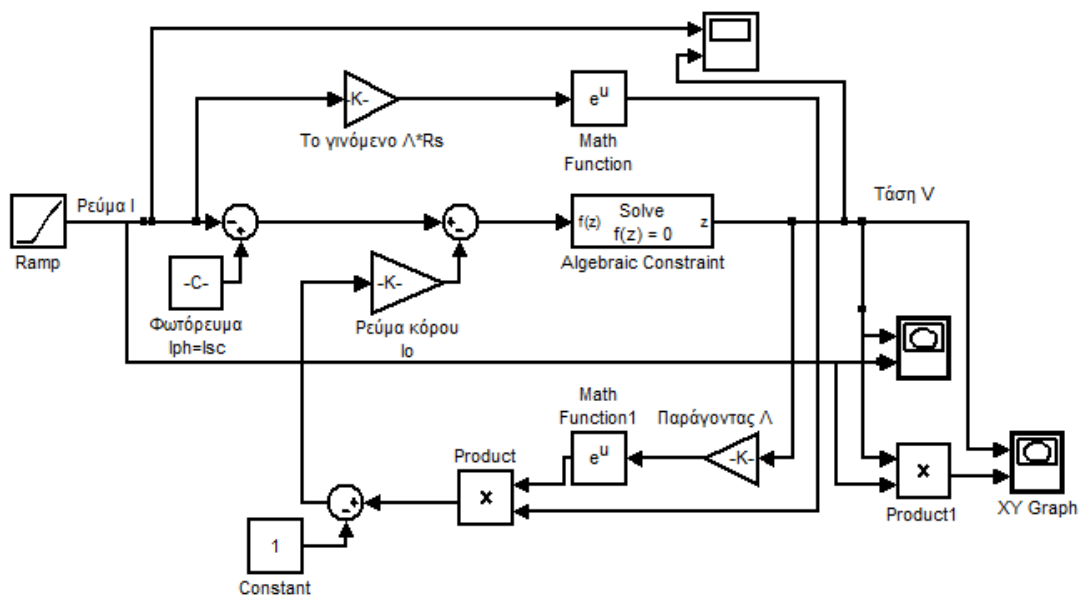
Τα τέσσερα μπλοκ με όνομα “Simulink-PS Converter” και “PS-Simulink Converter” είναι απαραίτητα για τη μετατροπή ενός σήματος Simulink σε φυσικό σήμα αποδεκτό από τα στοιχεία της βιβλιοθήκης Simscape και ανάποδα. Εάν επιχειρήσουμε να συνδέσουμε απευθείας τη σταθερά που δίνει την ακτινοβολία στην είσοδο του κυττάρου S ή I_r , θα εμφανιστεί μια κόκκινη γραμμή αντί για μαύρη και η σύνδεση δεν θα υφίσταται. Ομοίως, για να απεικονίσουμε στο Scope και τα XY Graph τις μετρήσεις ρεύματος και τάσης που πραγματοποιούν το αμπερόμετρο και το βολτόμετρο, χρειάζεται η μετατροπή των φυσικών σημάτων σε σήματα Simulink. Άλλο ένα μπλοκ που είναι απαραίτητο για την προσομοίωση χωρίς να προσφέρει άμεσα στο κύκλωμά μας κάποια πληροφορία είναι αυτό με το όνομα “Solver Configuration” που συνδέεται πάντα στη γείωση, η οποία με τη σειρά της είναι επίσης απαραίτητη για να τρέξει χωρίς λάθη το μοντέλο μας. Κάθε συσκευή που αναπαριστάται από ένα μπλοκ διάγραμμα που ανήκει στη βιβλιοθήκη

Simscape απαιτεί συνολικές πληροφορίες για το περιβάλλον προσομοίωσης. Το μπλοκ “Solver Configuration” προσδιορίζει αυτή την συνολική πληροφορία και παρέχει παραμέτρους για την επίλυση, απαραίτητες στο μοντέλο πριν να αρχίσει η προσομοίωση. Κάθε διαφορετική τοπολογία με μπλοκ της Simscape απαιτεί ακριβώς ένα μπλοκ “Solver Configuration” να συνδέεται με αυτήν. Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι σωστά καθώς συμφωνούν με αυτά των πηγών από τις οποίες πήραμε τα χαρακτηριστικά του κυττάρου, και έτσι παραμένουν και για άλλα χαρακτηριστικά κυττάρων που βρήκαμε σε σχετικές δημοσιεύσεις. Παρόλα αυτά όμως, όταν ήρθε η στιγμή να ενωθεί η γεννήτρια με τον αντιστροφέα και τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος, προέκυψαν προβλήματα στη σύνδεση των μπλοκ διαφορετικών βιβλιοθηκών. Πιο συγκεκριμένα, η παραπάνω φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από μπλοκ της βιβλιοθήκης Simscape, ενώ όλα τα υπόλοιπα μέρη που θα αναλυθούν στη συνέχεια, απαρτίζονται κυρίως από μπλοκ της βιβλιοθήκης SimPowerSystems. Κάθε βιβλιοθήκη μπορεί να επικοινωνεί με την βασική του Simulink για απεικόνιση σημάτων εξόδου, αλλά δεν υπάρχει τρόπος απευθείας σύνδεσης του ρευματοφόρου αγωγού του solar cell με στοιχεία άλλης βιβλιοθήκης ούτε και με της βασικής, ακόμη και αν παρεμβάλλουμε το PS-Simulink μπλοκ. Στάθηκε αδύνατον να συνδεθεί η γεννήτρια με άλλα μπλοκ, είτε ανήκαν στη βασική βιβλιοθήκη, είτε στην βιβλιοθήκη SimPowerSystems (σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7 Αδυναμία σύνδεσης του έτοιμου μπλοκ με το υπόλοιπο κύκλωμα

Συνεπώς, το αμέσως επόμενο βήμα ήταν να δημιουργηθεί από την αρχή μια νέα γεννήτρια από μπλοκ που θα μπορούσαν να επικοινωνήσουν με αυτά της βιβλιοθήκης SimPowerSystems. Χρησιμοποιώντας ως βάση την απλοποιημένη εξίσωση του ηλιακού κυττάρου που δίνεται και παραπάνω, χτίσαμε τη νέα γεννήτρια με έτοιμα μπλοκ από τις κατηγορίες CommonlyUsedBlocks και MathOperations της βασικής βιβλιοθήκης. Στο σχήμα 6.8 εικονίζεται η νέα φωτοβολταϊκή γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε και στο τελικό σύστημα του επόμενου κεφαλαίου.

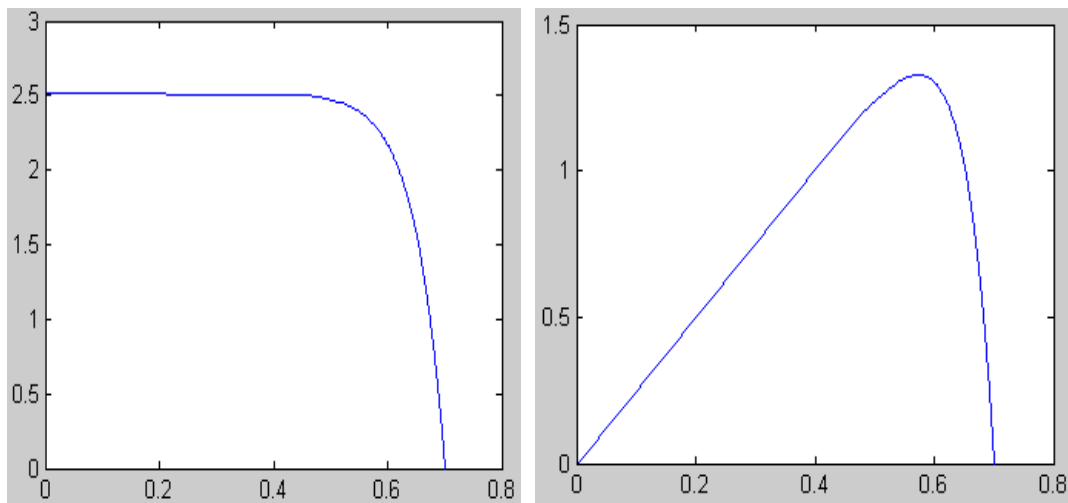


Σχήμα 6.8 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια από μπλοκ της βασικής βιβλιοθήκης

Στο καινούριο μοντέλο της γεννήτριας ορίζουμε τις παραμέτρους: ρεύμα κόρου I_0 , ρεύμα βραχυκύκλωσης ή φωτόρευμα $I_{sc}=I_{ph}$, παράγοντας Λ και το γινόμενο $\Lambda \cdot R_s$ (σχήμα 6.8). Χρησιμοποιούμε τις τιμές που φαίνονται παρακάτω.

$I_0=0.00000199693 \text{ A}$
 $I_{sc}=I_{ph}=I_{ph0}=2.52 \text{ A}$
 $\Lambda=20.05 \text{ V}^{-1}$
 $R_s=0.001 \text{ } \Omega$

Το νέο μοντέλο ουσιαστικά λύνει την χαρακτηριστική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου και στα σημεία του σχήματος 6.8 που δίνεται το ρεύμα I και η τάση V (σχήμα 6.8) συνδέουμε μπλοκ απεικόνισης της βασικής βιβλιοθήκης για να απεικονίσουμε τις κυματομορφές $V-I$, $V-P$. Σημειώνουμε ότι, στο σημείο που δίνεται το ρεύμα I έχουμε βάλει μια ράμπα προκειμένου η τιμή του ρεύματος να μεταβάλλεται, διαφορετικά το μοντέλο υπολογίζει μόνο μία τιμή ρεύματος τάσης και δεν προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες (σχήμα 6.9), αλλά μόνο ένα σημείο αυτών. Τελικά, οι χαρακτηριστικές $V-I$, $V-P$ εικονίζονται στο σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9 Χαρακτηριστικές εξόδου V(V)- I(A), V(V)- P(W) του νέου κυκλώματος γεννήτριας

Ανάλογα με το μέγεθος που θέλουμε να έχει η εγκατάστασή μας συνδέουμε σε σειρά και παράλληλα τον απαιτούμενο αριθμό κυττάρων, ώστε να προκύψει η επιθυμητή ισχύς. Οι μικρές τιμές, σε επίπεδο ενός κυττάρου που χρησιμοποιήθηκαν έδωσαν σωστές τις χαρακτηριστικές καμπύλες. Στη συνέχεια εξετάσαμε τη λειτουργία του μοντέλου για τιμές πολύ μεγαλύτερες, που αντιστοιχούν σε μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια των 500kW.

Για ένα σύστημα μεγάλης ισχύος, που θα συνδέονταν απευθείας στη μέση τάση, όπως των 500kW, με μέγιστη dc τάση εξόδου 820V, θα χρησιμοποιήσουμε: $N_s=820/0.7=1172$, διαλέγουμε $N_s=1000$ κύτταρα σε σειρά και $N_p=500.000/(1.33*1000)=376$ παράλληλους κλάδους. Με βάση τα χαρακτηριστικά ενός κυττάρου υπολογίζουμε για 376 κλάδους των 1000_{ων} κυττάρων ο καθένας, τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (κεφάλαιο 3.1.5, σελ. 30).

Τελικά τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας που προκύπτει είναι:

$$I_0=0.00075085 \text{ A}$$

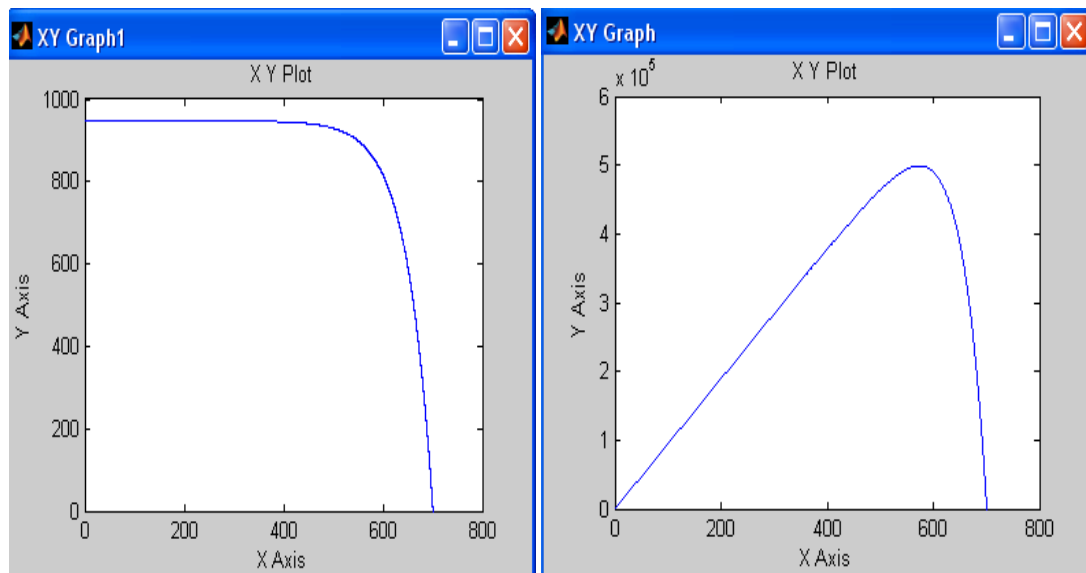
$$I_{sc}=I_{ph}=I_{ph0}=947.52 \text{ A}$$

$$V_{oc}=700 \text{ V}$$

$$\Lambda=0.02005 \text{ V}^{-1}$$

$$R_s=0.00266 \text{ } \Omega$$

Και αν τρέξουμε το μοντέλο με τις καινούριες ρυθμίσεις οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης είναι αυτές του σχήματος 6.10.



Σχήμα 6.10 Χαρακτηριστικές εξόδου V(V)- I(A), V(V)-P(W) για γεννήτρια 500kW

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το παραπάνω μοντέλο φωτοβολταϊκής γεννήτριας που δημιουργήσαμε, λειτουργεί το ίδιο ικανοποιητικά για οποιοδήποτε μέγεθος συστήματος ισχύος. Επιπλέον, μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγχουμε καλύτερα τη λειτουργία της γεννήτριας, εφόσον μπορούμε να αλλάζουμε τις παραμέτρους των μπλοκ της μεμονωμένα και να παίρνουμε μετρήσεις και σε εσωτερικά σημεία, πλεονεκτήματα που δεν τα έχει ένα έτοιμο μπλοκ, όπως αυτό του Solar Cell. Τέλος, το πιο πρακτικό πλεονέκτημα του τελικού μας μοντέλου, είναι ότι συνδέεται, αν και όχι απευθείας, με τα υπόλοιπα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος, και πιο συγκεκριμένα με τον αντιστροφέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Παρατηρήσεις- Συμπεράσματα

Στις μέρες μας η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί το πιο επίκαιρο ζήτημα και όπως φαίνεται θα βρίσκεται για καιρό σε έξαρση, καθώς δεν είναι λίγοι αυτοί που έσπευσαν να επενδύσουν στον τομέα παραγωγής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Γενικά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής προσφέρουν αδιαμφισβήτητα οφέλη για το περιβάλλον και την ισορροπία του. Παρέχουν μια αίσθηση ασφάλειας λόγω του ηλίου και του γεγονότος ότι όσο υπάρχουν άνθρωποι ο ήλιος θα ανατέλλει και θα δύνει παρέχοντας ανιδιοτελώς την ενέργεια του, που ανήκει σε όλους και σε κανέναν ταυτόχρονα. Επίσης, η μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελεί φυσικό φαινόμενο το γνωστό φωτοβολταϊκό φαινόμενο, πράγμα που συνεπάγεται την αξιοπιστία, όσα χρόνια και αν περάσουν, των φωτοβολταϊκών κύτταρων, καθώς το φυσικό φαινόμενο δεν πρόκειται να πάψει να συμβαίνει. Το ηλιακό κύτταρο όπως είδαμε είναι το μικρότερο στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο μπορεί να παράγει ενέργεια και από αυτό ξεκινούν όλα. Η τεχνολογία κατασκευής ηλιακών κυττάρων δεν σταματά, συνεχώς μέσω νέων ερευνών βελτιώνεται και νέα υλικά κατασκευής εξετάζονται όπως και νέες μορφές κυττάρων. Συνδέοντας περίπου 36 κύτταρα σε σειρά φτιάχνουμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο που είναι το έτοιμο για χρήση προϊόν που βρίσκουμε στην αγορά. Στη μελέτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, από την δημιουργία του πλαισίου και μετά, ο ρόλος του ηλεκτρολόγου μηχανικού γίνεται βασικός και πιο καθοριστικός. Ανάλογα με την ισχύ που επιθυμεί να παράγει ο ιδιώτης παραγωγός, ο μηχανικός αναλαμβάνει να συνδέσει σε σειρά και παράλληλα τον απαιτούμενο αριθμό πλαισίων χωρίς να παραλείψει κανέναν από τους παράγοντες που επηρεάζουν την μελέτη αυτή και κυρίως τον οικονομικό. Πολύ σημαντικό παράγοντα αποτελεί και ο αντιστροφέας που όπως είδαμε έχει βασικό ρόλο τόσο στην σχεδίαση του συστήματος όσο και στην λειτουργία του. Η επιλογή του σωστού αντιστροφέα για κάθε περίπτωση συστήματος καθώς και του σωστού τρόπου σύνδεσης όλης της εγκατάστασης στο δίκτυο είναι ευθύνη του μηχανικού. Σημαντικό κομμάτι της μελέτης και σχεδίασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελεί και ένα πολύ πρακτικό ζήτημα όπως αυτό των προϋποθέσεων για την σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο. Ο ορισμός των ορίων υπευθυνότητας του ιδιώτη παραγωγού και της ΔΕΗ πέρα από την τυπική διαδικασία περιλαμβάνει και οικονομικούς παράγοντες. Επίσης οι κανονισμοί της ΔΕΗ προκειμένου να μην παραβιάζονται προσδιορίζουν και θέματα ρύθμισης διατάξεων προστασίας. Οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν την ασφαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, του δικτύου στο σημείο σύνδεσης αλλά κυρίως και πάνω από όλα την προστασία των ανθρώπων και εργαζομένων που μπορεί να πλησιάσουν την εγκατάσταση. Στην εξομοίωση που περιγράφηκε, η λειτουργία της γεννήτριας και του αντιστροφέα εξετάστηκε λεπτομερώς, χωρίς διατάξεις προστασίας και διακόπτες σύνδεσης με το δίκτυο. Περισσότερη προσοχή δόθηκε στην σωστή λειτουργία στην μόνιμη κατάσταση όπου οι απαραίτητες ρυθμίσεις αφορούσαν κυρίως τον πυκνωτή C_d , τον συντελεστή διαμόρφωσης m_a και το φίλτρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Glenn W. Stagg Ahmed H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", International Student Edition, McGraw Hill 1968
- [2] Mohan N., Undeland T.M. And Robbins, 'Ηλεκτρονικά Ισχύος', Α. Τζιόλα Εκδόσεις, 1996
- [3] Ιωάννης Μήλιας-Αργεΐτης, "Ενεργειακά Κυκλώματα", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών 2004
- [4] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος- Νικόλαος Α. Βοβός, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών 2007
- [5] Θ.Ζαχαρίας, "Ήπιες Μορφές Ενέργειας 1", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών (2008)
- [6] Θ.Ζαχαρίας, "Ήπιες Μορφές Ενέργειας 2", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών (2008)
- [7] Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers, Earthscan, 2005
- [8] Ιωάννης Μήλιας-Αργεΐτης, "Συστήματα Μεταφοράς με Συνεχές Ρεύμα", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008
- [9] Σταύρος Α. Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας- Σύνδεση Εγκαταστάσεων Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής", ΕΜΠ- Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2003
- [10] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, "Οδηγός για τη σύνδεση Φωτοβολταϊκών Σταθμών στο Δίκτυο ΧΤ, 2006
- [11] Mehmet Akbaba, Mohammed A. A. Alattawi, "A new model for V-I characteristic of solar cell generators and its applications", Elsevier Solar Energy Materials and Solar Cells 37 (1995)123-132
- [12] Mehmet Akbaba, "Performance Analysis of Solar Cell Arrays Loaded with Passive Loads", Elsevier Applied Energy 52(1995)209-218
- [13] Th.Zacharias, J. Miliias-Argitis and V. Makios, "First-order circuits driven by a photovoltaic generator", Elsevier Sequoia Solar Cells, 31 (1991) 57-75
- [14] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης "Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών (2003)
- [15] Κ. Καγκαράκη Καθηγητή Ε.Μ. Πολυτεχνείου, 'ΦωτοΒολταϊκή Τεχνολογία.' Εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα 1992
- [16] Ι.Ε.Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", 2006
- [17] www.sma-hellas.com
- [18] Colin Davies, Eric Fournier, "Photovoltaic Design and Installation", Bucknell University Solar Scholars Program 2008