

ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Εισαγωγή στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

για το μάθημα
‘Ηλιακή Τεχνική και Φωτοβολταϊκά Συστήματα’
του 9^{ου} εξαμήνου

Δ. Μπούρης
Επικ. Καθηγητής

1 Βασικές Αρχές

Οι φωτοβολταϊκοί μετατροπείς ενέργειας είναι συσκευές στις οποίες μέρος της ενέργειας της προσπιπτόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται απ'ευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω ειδικά διαμορφωμένων ημιαγωγών.

Από την ηλεκτρομαγνητική θεώρηση της ηλιακής ενέργειας σε κυματική μορφή έπεται ότι το γινόμενο της συχνότητας (ν) και του μήκους κύματος (λ) ισούται με την ταχύτητα του φωτός (C) :

(1.1)

$$C=\lambda \cdot \nu$$

Μπορεί όμως επίσης να θεωρηθεί ότι η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται σε διακριτή μορφή από τα φωτόνια. Η ενέργεια (E) του κάθε φωτονίου δίνεται τότε από:

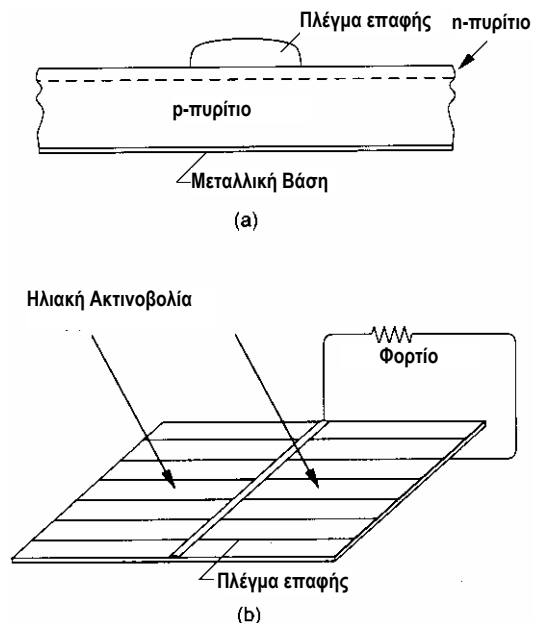
(1.2)

$$E=h \cdot \nu$$

όπου ($h=6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js) είναι η σταθερά του Planck. Από την (1.2) προκύπτει ότι τα φωτόνια με την περισσότερη ενέργεια θα προέρχονται από το φάσμα υψηλών συχνοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας και άρα, σύμφωνα με την (1.1), από τα μικρά μήκη κύματος. Η σημασία αυτής της παρατήρησης θα φανεί στη συνέχεια με την περιγραφή του μηχανισμού μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Όταν ένα άτομο πυριτίου (Si) εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία τότε, εφόσον το φωτόνιο που θα συγκρουστεί με το άτομο έχει την απαιτούμενη ενέργεια, ενεργοποιείται και ελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στοιβάδας. Η ενέργεια που πρέπει να έχει το φωτόνιο ονομάζεται ενεργειακό κατώφλι, ποικίλει από υλικό σε υλικό και για το πυρίτιο αντιστοιχεί σε μήκος κύματος $\lambda=1.15$ μm . Η ενέργεια των φωτονίων που δεν ξεπερνούν το ενεργειακό κατώφλι, καθώς και η περίσσεια ενέργεια αυτών που το ξεπερνούν, μετατρέπεται σε θερμότητα. Κατά την απελευθέρωση του ηλεκτρονίου δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου και κενής θέσης (οπής). Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών έχουν την τάση να συμπληρώνονται αυτόματα αλλά η διαδικασία μπορεί να αποφευχθεί ενσωματώνοντας στο υλικό ένα φράγμα διαφοράς δυναμικού κατά την κατασκευή του. Αυτό επιτυγχάνεται με εμπλουτισμό της άνω επιφάνειας του πυριτίου, η οποία εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, με μικρή ποσότητα ($1:10^6$) φωσφόρου (P) ή αρσενικού (As) που έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στην εξωτερική

τους στοιβάδα σε σχέση με το πυρίτιο. Δημιουργείται έτσι το n-πυρίτιο (n: negative). Αντίστοιχα, η κάτω επιφάνεια εμπλουτίζεται με μικρή ποσότητα βορίου (B) που έχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα σε σχέση με το πυρίτιο, δημιουργώντας έτσι το p-πυρίτιο (p: positive). Το φράγμα μεταξύ των δύο διαφορετικών υλικών δεν επιτρέπει την συμπλήρωση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών οπότε τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται κατά την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σχηματίζουν ένα περίσσειμα ηλεκτρονίων στο n-πυρίτιο και ένα έλλειμμα ηλεκτρονίων στο p-πυρίτιο. Αυτή η διαφορά τάσης που εμφανίζεται αποτελεί και την τάση ανοικτού κυκλώματος (U_{oc}) του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αν οι δύο πλάκες του στοιχείου ενωθούν με κατάλληλο τρόπο ώστε να σχηματιστεί κλειστό κύκλωμα τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρονίων από το n-πυρίτιο προς το p-πυρίτιο δημιουργώντας ένα ρεύμα, του οποίου η ένταση για μηδενική αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος ονομάζεται ένταση βραχυκυκλώσεως (I_{sc}). Πρακτικά το κύκλωμα επιτυγχάνεται ενσωματώνοντας στην κατασκευή μεταλλικά πλέγματα στην επιφάνεια του n-πυριτίου και μεταλλικών πλακών-βάσεων στο p-πυρίτιο. Φυσικά, τα μεταλλικά πλέγματα στην άνω επιφάνεια του στοιχείου θα πρέπει να επιτρέπουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας να είναι εκτεθειμένη στον ήλιο (βλ. Σχήμα 1.1)

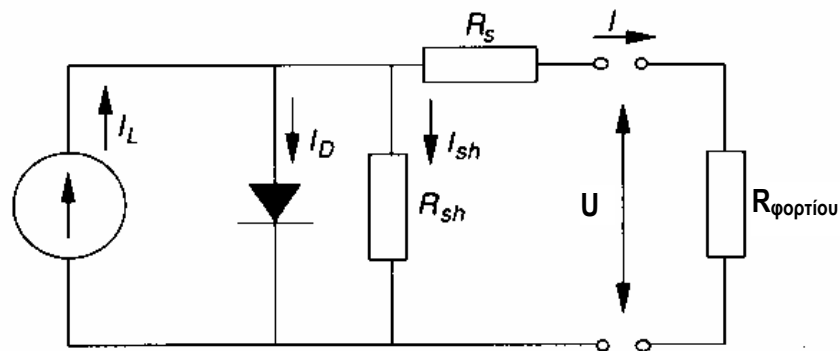


Σχήμα 1.1 a) Τομή επιφάνειας φωτοβολταϊκού στοιχείου με n-Si και p-Si. b) Φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από πολλά φ/β στοιχεία και συνδεδεμένο με φορτίο.

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ποικίλλουν, όπως και οι μέθοδοι κατασκευής τους. Συνηθισμένα υλικά είναι το μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο Si, το θειούχο κάδμιο CdS και το αρσενικούχο γάλλιο GaAs κ.α.

2 Απόδοση και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Είναι πολλοί οι παράγοντες οι οποίοι περιορίζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Καταρχήν το κατώφλι ενέργειας περιορίζει την εκμεταλλεύσιμη ηλιακή ενέργεια σε μήκη κύματος μικρότερα από π.χ. το $\lambda=1.15 \mu\text{m}$ για το πυρίτιο. Μήκη κύματος μεγαλύτερα από αυτό το όριο απλά θερμαίνουν το υλικό του στοιχείου όπως και η επι πλεόν ενέργεια των μικρότερων μηκών κύματος. Από αυτούς και μόνο τους περιορισμούς, η μέγιστη απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου είναι 23%. Επι πλεόν, υπάρχουν απώλειες λόγω ανακλώμενης ακτινοβολίας, παρά την επεξεργασία της άνω επιφάνειας για περιορισμό τους. Επίσης, το μεταλλικό πλέγμα στην άνω επιφάνεια περιορίζει την διαθέσιμη επιφάνεια του στοιχείου ενώ και το ίδιο το υλικό δημιουργεί απώλειες λόγω της αντίστασής του στη κίνηση των ηλεκτρονίων. Στην πράξη, οι τιμές του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι: Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο: 12-15%, Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο: 10-13%, Άμορφο Πυρίτιο: ~7%.



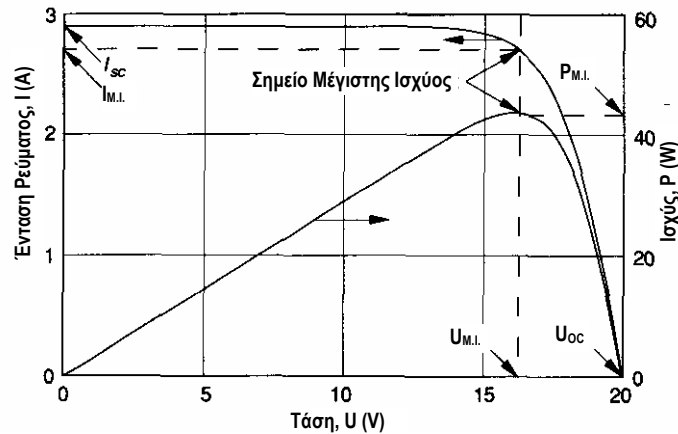
Σχήμα 2.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού συνδεδεμένου με φορτίο.

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (πλαίσιου ή ακόμη και συστοιχίας πλαισίων) συνδεδεμένου με κάποιο φορτίο. Για την πλήρη περιγραφή του κυκλώματος είναι απαραίτητη η γνώση των εξής πέντε παραμέτρων: το φωτόρευμα (I_L), το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (I_o), η αντίσταση σειράς (R_s), η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση του φ/β (R_{sh}) και η θερμική τάση σε V (α). Οι παράμετροι αυτοί εμφανίζονται στη σχέση που δίνει το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο (I):

(2.1)

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Η τάση (U) που αποδίδει το ϕ/β στο φορτίο θα μεταβάλλεται, ανάλογα με την τιμή της αντίστασης ($R_{\text{φορτίου}}$), από το μηδέν ως την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος (U_{oc}). Η σχέση έντασης ρεύματος και τάσης καθώς και η καμπύλη ισχύος $P=U \cdot I$ φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα έντασης ρεύματος, ισχύος – τάσης όπου φαίνεται και το σημείο μέγιστης ισχύος (M.I.).

Παρατηρείται στο Σχήμα 2.2 ότι η τιμή της έντασης φορτίου παραμένει σταθερή σε μεγάλο εύρος τιμών της τάσης και ότι για τιμές τάσης μεγαλύτερες από κάποιο όριο αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί για άπειρη αντίσταση φορτίου. Συνήθως η τιμή της αντίστασης (R_{sh}) είναι πολύ μεγάλη οπότε και τα ρεύματα I_D , I_{sh} μικρά αλλά για πολύ μεγάλη αντίσταση φορτίου αρχίζει να επηρεάζει σημαντικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου με επιφάνεια 1 cm^2 εκτεθειμένο σε ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2 έχει $U_{oc} \approx 0.6 \text{ V}$ και $I_{sc} \approx 20\text{-}30 \text{ mA}$.

Στο Σχήμα 2.2 παρατηρείται ότι το σημείο μέγιστης ισχύος εμφανίζεται για τιμές τάσης και έντασης λίγο μικρότερες από τις U_{oc} (περίπου στο $0.9U_{oc}$) και I_{sc} αντίστοιχα και αντιστοιχεί στο σημείο της καμπύλης $U-I$ όπου το περικλειόμενο εμβαδόν της είναι μέγιστο.

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται προς τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια:

(2.2)

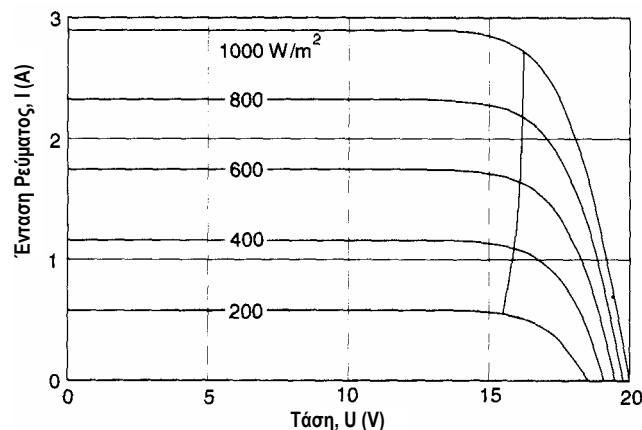
$$\eta = \frac{P}{G \cdot A} = \frac{I \cdot U}{G \cdot A}$$

με (G) την ισχύ ανά m^2 της προσπιπτόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και (A) την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού δεν επηρεάζεται

σημαντικά από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αφού, όπως θα φανεί παρακάτω, η μεταβολή της έντασης του παραγόμενου ρεύματος είναι περίπου ανάλογη με τη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

3 Επίδραση Εξωτερικών Παραμέτρων στη Λειτουργία

Η τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι καθοριστική για την ισχύ που θα αποδώσει το φ/β στο κύκλωμα. Είναι γνωστό ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια κεκλιμένη επιφάνεια μεταβάλλεται τόσο στη διάρκεια του έτους όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ ποικίλει επίσης ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου όπου θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό. Ο υπολογισμός της βέλτιστης γωνίας κλίσης για δεδομένη ημέρα του έτους και για κάποιο γεωγραφικό πλάτος γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στους επίπεδους ηλιακού συλλέκτες.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα έντασης ρεύματος – τάσης με παράμετρο την ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Διακρίνεται ο γεωμετρικό τόπος των σημείων μέγιστης ισχύος.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ότι με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, το μέγεθος που μεταβάλλεται περισσότερο είναι η ένταση (I), ενώ η τάση (U) έχει μικρότερη εξάρτηση. Φυσικά, και η ισχύς θα ακολουθεί ανάλογα την μεταβολή αυτή. Παρατηρείται μάλιστα ότι η γραμμή που ενώνει τα σημεία μέγιστης ισχύος για τις διάφορες τιμές έντασης ακτινοβολίας είναι σχεδόν κάθετη. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, ανεξάρτητα από την τιμή έντασης ακτινοβολίας, η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού εμφανίζεται για την ίδια περίπου τιμή της τάσης.

Άλλη εξωτερική παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών είναι η θερμοκρασία λειτουργίας τους. Πιο συγκεκριμένα, για χαμηλές θερμοκρασίες παρατηρείται αύξηση της αποδιδόμενης τάσης ανοικτού κυκλώματος (U_{oc}) ενώ αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα. Τα στοιχεία των φωτοβολταϊκών συνήθως δίνονται σε θερμοκρασία αναφοράς 25°C από τη οποία μπορούν να υπολογιστούν τα στοιχεία σε άλλες θερμοκρασίες από τις σχέσεις:

(3.1)

$$U_T = U_{25} \cdot [1 - 0.002 \cdot (T - 25)]$$

$$I_T = I_{25} \cdot [1 + 0.025 \cdot A \cdot (T - 25)]$$

όπου T η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και A το εμβαδό του σε cm^2 . Πάντως, η αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου ελαττώνει τελικά την αποδιδόμενη από αυτό μέγιστη ισχύ κατά περίπου $0.3\%/^{\circ}\text{C}$.

Τέλος, δεν θα πρέπει να παραβλέπονται και παράγοντες όπως η σκίαση ή η ρύπανση της επιφάνειας του πλαισίου. Και οι δύο αυτοί παράγοντες περιορίζουν την ηλιακή ακτινοβολία την οποία εκμεταλλεύεται τελικά το φωτοβολταϊκό και, ενώ για την σκίαση μπορούν να ληφθούν μέτρα για την ανεμπόδιστη έκθεση του φ/β στον ήλιο, η ρύπανση και η σκόνη που επικάθεται στη επιφάνεια του πλαισίου είναι πιο δύσκολο να αντιμετωπιστεί. Τελικά οι επιδράσεις αυτές μπορούν να ενσωματωθούν στον βαθμό απόδοσης του συστήματος:

(3.2)

$$\eta_{ολ} = \frac{P}{G \cdot A \cdot \sigma_T \cdot \sigma_p}$$

όταν είναι γνωστή η αποδιδόμενη ισχύς του (P). Εναλλακτικά, η επίδραση θερμοκρασίας μπορεί να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της αποδιδόμενης ισχύος (P) είτε μέσω των (3.1), είτε μέσω του παράγοντα (σ_T), ο οποίος μπορεί να δίνεται από τον κατασκευαστή ή, για φ/β πυριτίου, μπορεί να υπολογιστεί από την:

(3.3)

$$\sigma_T = 1 - \frac{\bar{T}_a + 10}{200}$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία αέρα. Στην ισχύ της (3.2) συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες του συστήματος ενώ το (σ_p) εκφράζει την επίδραση της ρύπανσης ή του σκονισμού της επιφάνειας και είναι ($\sigma_p=1$) για περιβάλλον χωρίς ρύπανση και ($\sigma_p=0.8$) για υψηλό επίπεδο ρύπανσης.

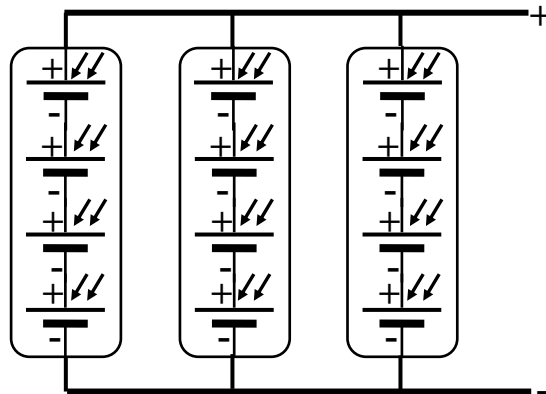
4 Συνδεσμολογία και Δομή Συστήματος για Φωτοβολταϊκή Παραγωγή Ενέργειας

Στη μέχρι τώρα ανάλυση έχει γίνει λόγος για φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία όμως αποδίδουν πολύ μικρές τιμές ισχύος για να είναι εκμεταλλεύσιμες στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Γι' αυτό το λόγο συνήθως γίνεται σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων έτσι ώστε να αποτελέσουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Οι εξισώσεις και τα σχήματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι τώρα μπορούν να θεωρηθούν ότι αναφέρονται τόσο σε φωτοβολταϊκά στοιχεία όσο και σε φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να θεωρηθούν ως βασικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες όμως συνδυαζόμενες αποδίδουν μεγαλύτερη τάση, ένταση ή/και ισχύ ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να αξιοποιηθούν. Προκύπτει λοιπόν ανάγκη σύνδεσής τους κατά τρόπο που να ικανοποιεί τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

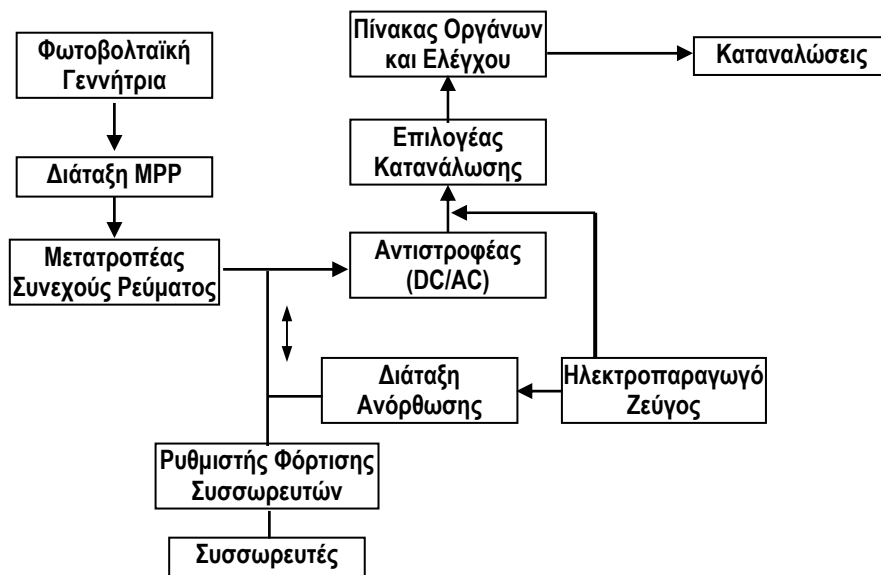
Οι συνδέσεις που μπορούν να προκύψουν είναι η σύνδεση σε σειρά, η παράλληλη σύνδεση και η μικτή σύνδεση. Στη σύνδεση σε σειρά συνδέεται ο αρνητικός πόλος του ενός πλαισίου με τον θετικό του επόμενου κ.ο.κ. Θα πρέπει όμως τα φ/β πλαίσια που θα συνδεθούν να έχουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης και το ίδιο ρεύμα μέγιστης ισχύος ενώ η τάση της συστοιχίας θα είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων όλων των πλαισίων που έχουν συνδεθεί. Στην παράλληλη σύνδεση ενώνονται όλοι οι θετικοί πόλοι των πλαισίων και χωριστά όλοι οι αρνητικοί πόλοι. Κατά τον τρόπο αυτό προκύπτει ρεύμα από τη συστοιχία με ένταση ίση με το άθροισμα των εντάσεων όλων των πλαισίων που έχουν συνδεθεί. Θα πρέπει όμως η τάση ανοικτού κυκλώματος όλων των πλαισίων που έχουν συνδεθεί να είναι η ίδια.

Με την σύνδεση σε σειρά και την παράλληλη σύνδεση επιτυγχάνεται αύξηση της τιμής τάσης ή της τιμής έντασης αντίστοιχα. Η μικτή σύνδεση επιτρέπει την ταυτόχρονη αύξηση της τιμής της τάσης και της έντασης έτσι ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην ουσία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, γίνεται παράλληλη σύνδεση συστοιχιών που έχουν συνδεθεί σε σειρά έτσι ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές τιμές τάσης και έντασης ρεύματος. Προφανώς μπορούν να προκύψουν μόνο πολλαπλάσια των χαρακτηριστικών τιμών του ενός φ/β πλαισίου ή των ομάδων των πλαισίων. Σε όλα τα είδη των συνδέσεων η συνολική ισχύς της συστοιχίας θα είναι ίση με το άθροισμα της ισχύος του κάθε φ/β πλαισίου χωριστά ενώ

θα πρέπει τα φ/β πλαίσια να λειτουργούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί για τις παράλληλες και σε σειρά συνδέσεις.



Σχήμα 4.1 Μικτή σύνδεση 12 όμοιων φ/β πλαισίων που αποδίδει τετραπλάσια τάση και τριπλάσια ένταση ρεύματος σε σχέση με το ένα φ/β.



Σχήμα 4.2 Τυπική διάταξη συστήματος μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χρειάζονται και επί πλέον συσκευές, εκτός των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όλα μαζί αποτελούν ένα ενιαίο λειτουργικά σύστημα χαρακτηριστική διάταξη του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Τα επιμέρους στοιχεία περιγράφονται παρακάτω:

Διάταξη MPP: Ηλεκτρονικό κύκλωμα που ρυθμίζει τα φωτοβολταϊκά ώστε να εργάζονται στο σημείο μέγιστης απόδοσης. Εμφανίζεται κυρίως σε μεγάλες εγκαταστάσεις.

Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος: Ηλεκτρονικό κύκλωμα που μετατρέπει τα χαρακτηριστικά της συνεχούς τάσης των φωτοβολταϊκών ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου κυκλώματος. Διατηρεί επίσης σταθερή την τάση εξόδου τους.

Ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών: Αυτοματισμός για την ομαλή φόρτιση-εκφόρτιση των συσσωρευτών. Προστατεύει από υπερφόρτιση ή/και βαθιά εκφόρτισή τους.

Διάταξη ανόρθωσης: μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα που προέρχεται από εξωτερική πηγή σε συνεχές, κατάλληλο για φόρτιση των συσσωρευτών.

Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος: Συνδυασμός κινητήρα diesel και ηλεκτρογεννήτριας προκειμένου να εξασφαλίζεται το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα όταν για οποιοδήποτε λόγο διακοπεί η παροχή ρεύματος από το φωτοβολταϊκό κύκλωμα.

Αντιστροφέας συνεχούς-εναλλασσόμενου ρεύματος: Ηλεκτρονική διάταξη που μετατρέπει τη συνεχή τάση των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενη με κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε να λειτουργούν οι συσκευές εμπορίου αλλά και να μειώνει τις απώλειες που προκύπτουν από τη μεταφορά συνεχούς ρεύματος σε σχέση με τη μεταφορά εναλλασσόμενου.

Επιλογέας κατανάλωσης: Φροντίζει για την ιεράρχηση των καταναλώσεων ώστε να παίρνουν προτεραιότητα οι κατάλληλες συσκευές και να θέτονται εκτός δικτύου οι υπόλοιπες όταν δεν επαρκεί το παραγόμενο ρεύμα.

Πίνακας οργάνων και ελέγχου: Ηλεκτρικές ασφάλειες, διακόπτες, βολτόμετρα, αμπερόμετρα, μετρητές κατανάλωσης και όλα τα απαραίτητα όργανα μετρήσεων και ελέγχου που είναι απαραίτητα για την παρακολούθηση και σωστή λειτουργία του συστήματος.

Σημειώνεται ότι όλος αυτός ο εξοπλισμός έχει και κάποιες απώλειες οι οποίες και περιορίζουν ο βαθμό απόδοσης του όλου συστήματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο βαθμός απόδοσης του επιπλέον των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξοπλισμού μπορεί να είναι της τάξης του 60%.

5 Σχεδίαση Συστήματος για Φωτοβολταϊκή Παραγωγή Ενέργειας

Για τη σχεδίαση συστήματος για φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας πρέπει να ληφθούν υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής, ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος, η αυτοδυναμία του συστήματος, ο διαθέσιμος χώρος εγκατάστασης, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τα παραπάνω είναι απαραίτητοι ορισμένοι υπολογισμοί προκειμένου να βρεθεί τελικά ο απαιτούμενος αριθμός

των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα εγκατασταθούν. Από τα μετεωρολογικά δεδομένα μπορεί να γίνει εκτίμηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στο σύστημα ανά περίοδο λειτουργίας. Οι ενεργειακές απαιτήσεις θα καθορίσουν την ενέργεια που θα πρέπει να καλυφθεί από το σύστημα ενώ ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος και η αυτοδυναμία του θα καθορίσουν τις ανάγκες σε αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αυτοδυναμία του συστήματος έχει την έννοια της κάλυψης ενεργειακής ζήτησης ακόμη και σε περίοδο κατά την οποία οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν επιτρέπουν την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Η αυτοδυναμία εκφράζεται σε διαστάσεις χρόνου και η επιλογή που θα γίνει για την τιμή της επηρεάζει κυρίως το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνηθισμένος τρόπος ορισμού της απαιτούμενης αυτοδυναμίας ενός συστήματος είναι :

(5.1)

$$S_p = \frac{5}{17} \times \left[\frac{N_s \times d_{om} - N_{so}}{N_s} \right] + \frac{12}{17}$$

όπου N_s είναι οι ώρες ηλιοφάνειας για τελείως ανέφελο ουρανό την μέση ημέρα του μήνα, N_{so} είναι ο πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας του μήνα και d_{om} είναι οι ημέρες του μήνα. Από τη (5.1) προκύπτουν οι ημέρες αυτοδυναμίας του συστήματος, με βάση τις οποίες θα πρέπει να σχεδιαστεί και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης ενέργειας σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι οι συσσωρευτές μολύβδου, κυρίως λόγω του μικρού τους κόστους και της ευρείας χρήσης τους (π.χ. αυτοκίνητα). Αποτελούνται από πλήθος κυψελίδων που είναι εμβαπτισμένες σε ηλεκτρολύτη και συσκευασμένες σε μονωτική θήκη. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η ονομαστική τάση (U_σ) που μπορούν να παρέχουν σε 20h λειτουργία με ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης. Οι συσσωρευτές μπορούν να εκμεταλλευτούν συνδεδεμένοι ανάλογα μεταξύ τους ώστε να προκύψει τελικά τάση πολλαπλάσια της ονομαστικής τους. Ορίζεται πάντως και η μέγιστη τάση φόρτισης καθώς και η τάση συντήρησης ως η μέγιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης του συσσωρευτή για λόγους ασφαλείας και η απαιτούμενη τάση στην οποία πρέπει να βρίσκεται ο συσσωρευτής ώστε να παραμένει φορτισμένος. Αντίστοιχα, η τελική τάση εκφόρτισης (U_τ) είναι η ελάχιστη τιμή τάσης του συσσωρευτή χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του. Αυτή καθορίζει ουσιαστικά και το ποσό της εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που μπορεί να αντληθεί από τον συσσωρευτή. Τέλος ορίζονται και τα ρεύματα φόρτισης και

εκφόρτισης ως το ρεύμα με το οποίο συνιστάται η φόρτιση του συσσωρευτή και το ρεύμα κατανάλωσης που εξαντλεί την αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή σε 20 ώρες. Πρακτικά το ρεύμα φόρτισης είναι, αριθμητικά, το 1/10 της χωρητικότητας του συσσωρευτή και το ρεύμα εκφόρτισης το 1/20 της. Η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή καθορίζει και το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει. Συνήθως μετράται σε αμπερώρια (Ah) και υπολογίζεται ως το γινόμενο του ρεύματος με το οποίο θα τροφοδοτήσει μια κατανάλωση επί τις ώρες λειτουργίας του μέχρι να εκφορτιστεί πλήρως. Π.χ. συσσωρευτής 120 (Ah) θα δίνει ρεύμα 12 A για 10 ώρες μέχρι να εξαντληθεί, ανεξάρτητα από την τάση που θα επικρατεί στα άκρα του στο διάστημα αυτό. Τελικά, η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε έναν συσσωρευτή δίνεται ως το γινόμενο της χωρητικότητάς του επί την τάση και επί τον συντελεστή απόδοσής του (0.8-0.9) και το βάθος εκφόρτισής του:

(5.2)

$$E_{\sigma} = Q \times U_{\sigma} \times \beta \times \eta_{\sigma}$$

Το βάθος εκφόρτισης δηλώνει το ποσοστό της αποθηκευμένης στο συσσωρευτή ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί ($\beta=0.1-0.8$). Στην (5.2), U_{σ} είναι η ονομαστική τάση και η_{σ} ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος εκφόρτισης των συσσωρευτών. Από την (5.2), αν E_{σ} θεωρηθεί ως η απαιτούμενη ενέργεια για να καλύψει την (γνωστή) κατανάλωση για το διάστημα S_p των ημερών αυτοδυναμίας του συστήματος, μπορεί να υπολογιστεί η χωρητικότητα Q του συσσωρευτή. Η μέση ισχύς που θα πρέπει να καλύψει για διάστημα S_p ημερών θα είναι:

(5.3)

$$P = \frac{Q \times U_{\sigma} \times \eta_{\sigma}}{24 \times S_p}$$

Άλλες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας τους, η οποία επηρεάζει και τα χαρακτηριστικά τους, και ο μέγιστος αριθμός κύκλων φορτίσεων-εκφορτίσεων, ο οποίος επηρεάζει τη διάρκεια ζωής τους. Για συσσωρευτές μολύβδου, ο μέγιστος αριθμός κύκλων φορτίσεων-εκφορτίσεων θα πρέπει είναι μικρότερος από το $1200/\beta$.

Τέλος, μπορεί να υπολογιστεί και η συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια (A) φωτοβολταϊκών πλαισίων και άρα ο αριθμός των τυποποιημένων πλαισίων που θα πρέπει να συνδεθούν:

(5.4)

$$A = \frac{E_{\phi}}{H_T \times \eta_{ολ} \times \sigma_T \times \sigma_p}$$

όπου H_T η ολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και A η συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια για να καλυφθούν οι μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις E_{ϕ} . Το $\eta_{ολ}$ είναι ο βαθμός απόδοσης όλου του συστήματος (ηλεκτρικό κύκλωμα, συσκευές και ϕ/β πλαίσια). Διαιρώντας το αποτέλεσμα της (5.4) με το εμβαδόν του τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, με βάση το οποίο έγινε η σύνδεση της συστοιχίας, προκύπτει και ο αριθμός των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτούνται για να καλυφθούν οι ανάγκες.

Συνοπτικά η διαδικασία υπολογισμού είναι η εξής:

- καταγράφονται οι μήνες κατά τους οποίους θα γίνουν οι υπολογισμοί
- καταγράφεται η γωνία κλίσης των πλαισίων για κάθε μήνα (βέλτιστη ή σταθερή)
- υπολογίζεται η ολική μηνιαία ακτινοβολία που προσπίπτει σε πλαίσιο υπό τη δεδομένη κλίση και για κάθε μήνα
- υπολογίζονται οι σ_T και σ_p είτε από την (3.1) είτε από την (3.2) και από δεδομένα κατασκευαστών για τιμές θερμοκρασίας αέρα και επίπεδα ρύπανσης κάθε μήνα.
- καταγράφονται οι ενεργειακές ανάγκες για κάθε μήνα
- υπολογίζεται από την (5.4) η συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια ϕ/β πλαισίων και στη συνέχεια ο αριθμός τυποποιημένων πλαισίων. Ο βαθμός απόδοσης προκύπτει από το γινόμενο της (2.2) και του βαθμού απόδοσης των υπολοίπων εξαρτημάτων.
- υπολογίζονται οι ελάχιστες ημέρες αυτονομίας από την (5.1) και από τις μηνιαίες ενεργειακές ανάγκες υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες κατά τη περίοδο αυτονομίας, τις οποίες καλούνται να καλύψουν οι συσσωρευτές.

6 Βιβλιογραφία

- J. A. Duffie and W. A. Beckman. 'Solar Engineering of Thermal Processes', 2nd Ed., J. Wiley and Sons, Inc, (1991).
- I. Καλδέλλης και Κ. Καββαδίας. 'Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας'. Εκδ. Σταμούλης, (2001).
- B. Μαλαμής. 'Αυτόνομες Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας Μικρού και Μεσαίου Μεγέθους'. Εκδ. Ίων, (1999).