



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

“ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ”

Διπλωματική Εργασία

Ευάγγελος Α. Καρτσακλής

Επιβλέπων : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

“ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ”

Διπλωματική Εργασία

Ευάγγελος Α. Καρτσακλής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2013.

.....
Μ.Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ

Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013

Copyright © Καρτσακλής Ε. 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό επιθυμούμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες στην κ. Μαρία Ιωαννίδου καθηγήτρια ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος, την επιστημονική της καθοδήγηση, την ευχάριστη συνεργασία και πολύπλευρη συμπαράστασή της σ' ολόκληρη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένεια μου που με στηρίζει ηθικά αλλά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στην εργασία θα παρουσιαστεί η ανάπτυξη ενός απλού αυτόματου συστήματος ηλιοστάτη, που χρησιμοποιεί τεχνικές μηχανικής όρασης για την κατεύθυνση της αντανάκλασης του φωτός.

Ο ηλιοστάτης αποτελείται από μια μηχανική βάση η οποία έχει την δυνατότητα κίνησης σε δυο άξονες. Η βάση κινείται με την βοήθεια δυο βηματικών κινητήρων και την χρήση κατάλληλων κιβωτίων ταχυτήτων. Πάνω στην βάση του ηλιοστάτη υπάρχει καθρέπτης, ο οποίος αντανακλά το φως από την πηγή. Η σύνδεση του υπολογιστή με την βάση πραγματοποιείται μέσω παράλληλης θύρας και με την χρήση κατάλληλου υλικού διεπαφής. Το φως αντανακλάται από μια πηγή προς μια περιοχή. Κατόπιν, με την χρήση ενός ψηφιακού αισθητήρα CCD εντοπίζεται η αντανάκλαση.

Τέλος παρουσιάζονται όλες οι τεχνολογίες για την υλοποίηση του συστήματος και τα θεωρητικά μοντέλα που υπολογίζουν την θέση του ήλιου πάνω στη ουράνια σφαίρα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Κεφάλαιο 1 :Λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων	
1.1 : Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα	6
1.2 : Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	7
1.3 : Δομή φωτοβολταϊκών πλαισίων	10
1.4 : Το φωτοβολταϊκό σύστημα	13
1.5 : Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο	16
1.6 : Λειτουργικά προβλήματα	17
1.7 : Απόδοση φωτοβολταϊκών πλαισίων κ συστημάτων	
1.7.1 : Ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης	21
1.7.2 : Μη ιδανική ηλιακή κυψέλη	22
1.7.3 : Ιδανική ηλιακή κυψέλη	24
1.7.4 : Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου	28
1.7.5 : Απόδοση ηλιακής κυψέλης	34
1.7.6 : Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος	34
Κεφάλαιο 2 : Μελέτη θέσης ήλιου	
2.1 : Μετατόπιση του ήλιου και της γης	37
2.2 : Απόσταση του ήλιου από την επιφάνεια της γης	39
2.3 : Ηλιακή Ακτινοβολία	42
Κεφάλαιο 3 : Τεχνική περιγραφή PLC	
3.1 : Ιστορική αναφορά ανάπτυξης των PLC	45
3.2 : Χαρακτηριστικά των PLC	46
3.3.1: Πλεονεκτήματα προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών	46
3.3.2: Δομή των PLC	47
3.3.3: Χρόνος κύκλου	48
3.3.4: Λειτουργικό σύστημα PLC	48
3.3.5: Προσπέλαση προγράμματος	49
3.3.6: Δομή προγράμματος	50

3.3.7: Μορφές προγραμματισμού	52
3.3.8: Γλώσσες προγραμματισμού	54
3.3.9: Σύγκριση γλωσσών προγραμματισμού	54
3.3.9.1: Πλεονεκτήματα λίστας εντολών (STL) σε σχέση με τις γραφικές μορφές (LAD, FBD)	54
3.3.9.2: Μειονεκτήματα λίστας εντολών (STL) σε σχέση με τις γραφικές μορφές (LAD, FBD)	55

Κεφάλαιο 4 : Υλοποίηση Συστήματος

4.1 : Δομή Συστήματος	57
4.2 : Μηχανική Βάση Περιστροφής Κατόπτρου	58
4.3 : Υλικό Ελέγχου Βάσης	60
4.4 : Λογισμικό Υλικού	68
4.4.1 : Υλικό Διεπαφής	69
4.4.2 : Υλικό Ελέγχου Βηματικού Κινητήρα	69
4.5 : Έλεγχος συστήματος	70
4.6 : Διαγράμματα Ladder	71

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα 75

1.1 Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Ένα χαρακτηριστικό της σημερινής εποχής είναι η έντονη περιβαλλοντική και ενεργειακή κρίση. Η μείωση των φυσικών καυσίμων εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης των πόρων, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η καταστροφή του περιβάλλοντος είναι μερικά από τα προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών. Επιτακτική, πλέον, είναι η ανάγκη για την ανάπτυξη εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας με χαμηλή εκπομπή ρύπων και υψηλή αποδοτικότητα. Μόνη λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αποτελούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η γεωθερμία, η αιολική ενέργεια, η καύση φυτικών προϊόντων (βιομάζα) ή οργανικών αποβλήτων.

Ίσως η μοναδική πηγή ενέργειας που φαίνεται να συνδυάζει ιδανικά τις απαιτήσεις για νέες ενεργειακές αναζητήσεις και που η αξιοποίηση της βρήκε τεράστια αποδοχή στη διεθνή κοινή γνώμη, είναι η ηλιακή ενέργεια. Γι' αυτό, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτού του είδους έχουν την δυνατότητα να παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα μόνο με την έκθεση τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας στη γη, όπου το ετήσιο συνολικό ποσό ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης είναι περίπου ίσο με 10.000 φορές την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή με ικανοποιητική απόδοση μετατροπής. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο και δεν δημιουργεί απόβλητα ή άλλα άχρηστα προϊόντα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών με κριτήριο την απαίτηση ισχύος, από πολύ μικρές τιμές έως πολύ μεγάλες. Υπάρχει αφθονία πρώτων υλών για την κατασκευή των ηλιακών κυψελών και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και πολύ μικρό κόστος συντήρησης.

Όμως, αυτός ο τρόπος παραγωγής ενέργειας έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των ηλιακών κυψελών και η απαίτηση χρησιμοποίησης σχετικά μεγάλων επιφανειών για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. [2]

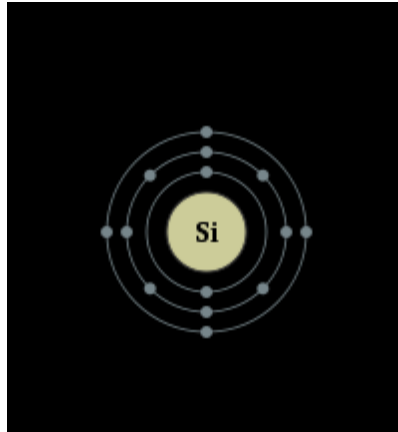
1.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η πρώτη καταγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Henri Becquerel. Ο Becquerel ανακάλυψε πως είναι δυνατόν να εμφανισθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν μια φωτεινή πηγή εφαρμοσθεί σε ορισμένα χημικά διαλύματα. Το 1883, η πρώτη ηλιακή κυψέλη κατασκευάστηκε από τον Charles Fritts, ο οποίος χρησιμοποίησε το σελήνιο με ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα χρυσού για την κατασκευή των ενώσεων. Η συσκευή ήταν περίπου 1% αποτελεσματική.

Η πρώτη ηλιακή κυψέλη με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (το ανακάλυψε ο Heinrich Hertz νωρίτερα το 1887) κατασκευάστηκε από το Ρώσο φυσικό Aleksandr Stoletov. Ενώ, το 1946 ο Russell Ohl κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την κατασκευή ενώσεων ηλιακών κυψελών. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο άρχισε να γίνεται παγκοσμίως γνωστή κυρίως με την ανακοίνωση της πρώτης κατασκευής ηλιακής κυψέλης πυριτίου από τους Fuller, Pearson και Chappin το 1954.[1]

Η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά (διαπερατότητα) είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

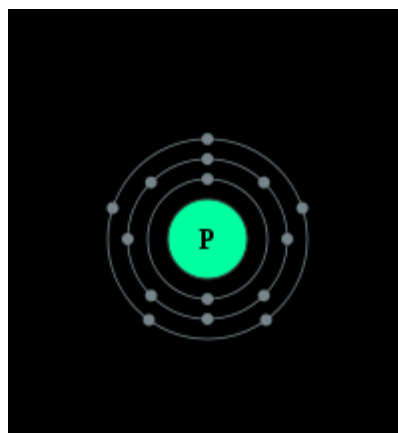
Το χαρακτηριστικό του ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός και το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής των ηλιακών κυψελών είναι το πυρίτιο (Si).



Σχήμα 1.1 Άτομο πυριτίου

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1, ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανομημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι πρώτες δύο στοιβάδες, αυτές που είναι πιο κοντά στο κέντρο, είναι συμπληρωμένες (2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα). Η εξωτερική στοιβάδα όμως έχει μόνο 4 ηλεκτρόνια ενώ θα έπρεπε να έχει 8. Γι' αυτό μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Έτσι, τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κρυσταλλική δομή του πυριτίου, που είναι πολύ σημαντική για τις ηλιακές κυψέλες.

Αυτό ακριβώς είναι το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο. Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού αφού κανένα ηλεκτρόνιο του δεν είναι ελεύθερο να μετακινηθεί όπως τα ηλεκτρόνια στους καλούς αγωγούς, σαν το χαλκό. Αντίθετα τα ηλεκτρόνια του είναι 'κλειδωμένα' στην κρυσταλλική δομή του. Το πυρίτιο σε μια ηλιακή κυψέλη τροποποιείται ελαφρά έτσι ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει σαν ηλιακή κυψέλη. Το κρυσταλλικό πυρίτιο αναμιγνύεται με άτομα φωσφόρου.



Σχήμα 1.2 Άτομο φωσφόρου

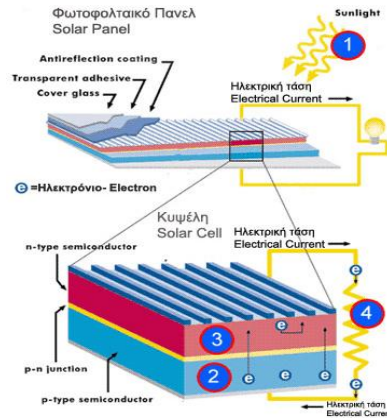
Στην εξωτερική του στοιβάδα ο φώσφορος έχει 5 ηλεκτρόνια και όχι 4 όπως το πυρίτιο. Πάλι συνδέεται με τα γειτονικά του άτομα πυριτίου αλλά ο φώσφορος έχει ένα ηλεκτρόνιο που δεν συνδέεται με κάποιο άλλο. Δεν σχηματίζει δεσμό, αλλά υπάρχει ένα θετικό πρωτόνιο στον πυρήνα του φωσφόρου που το συγκρατεί. Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο καθαρό πυρίτιο, για παράδειγμα με τη μορφή θερμότητας, μερικά ηλεκτρόνια σπάζουν τους δεσμούς τους και φεύγουν από τα άτομα τους. Τότε δημιουργείται μια κενή θέση στο άτομο. Αυτά τα ηλεκτρόνια περιφέρονται τυχαία μέσα στο κρυσταλλικό πυρίτιο αναζητώντας μια άλλη θέση. Έτσι μεταφέρουν την ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα). Είναι τόσο λίγα που δεν είναι πολύ χρήσιμα.

Το πυρίτιο, όμως, με άτομα φωσφόρου είναι κάτι διαφορετικό. Χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να ελευθερωθεί το επιπλέον ηλεκτρόνιο του φωσφόρου, αφού αυτό δεν σχηματίζει δεσμό με άλλο (τα γειτονικά ηλεκτρόνια δεν το συγκρατούν). Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η διαδικασία μίξης ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί πυρίτιο που ονομάζεται πυρίτιο τύπου N (Negative, Αρνητικό) εξαιτίας της υπεροχής του αριθμού των ηλεκτρονίων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος.

Όμως μόνο ένα μέρος της ηλιακής κυψέλης είναι πυρίτιο τύπου N. Το άλλο μέρος είναι ανάμειξη κρυσταλλικού πυριτίου με βόριο, το οποίο έχει μόνο 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα αντί για 4, και μετατρέπεται σε πυρίτιο τύπου P. Αντί να έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια, το πυρίτιο τύπου P (Positive, θετικό) έχει ελεύθερες θέσεις. Οι θέσεις αυτές είναι ουσιαστικά απουσία ηλεκτρονίων, και έτσι μεταφέρουν αντίθετο φορτίο (θετικό) και περιφέρονται όπως και τα ηλεκτρόνια. Όταν τοποθετηθούν μαζί πυρίτιο τύπου P και N, η ηλιακή κυψέλη έχει τουλάχιστον ένα ηλεκτρικό πεδίο. Χωρίς ηλεκτρικό πεδίο, η κυψέλη δεν θα λειτουργούσε. Ξαφνικά τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N ψάχνουν για ελεύθερες θέσεις και προσπαθούν να καλύψουν τις κενές θέσεις στο πυρίτιο τύπου P. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N αλλά όχι αντίστροφα. Έτσι, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, στο οποίο τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν μόνο προς μια κατεύθυνση.

Η λειτουργία των ηλιακών κυψελών βασίζεται στην δημιουργία ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. Όσο διαρκεί η ακτινοβολή της κυψέλης, δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη φορέων. Αν οι ελεύθεροι αυτοί φορείς δεν επανασυνδιαστούν αλλά βρεθούν στην περιοχή της ένωσης P-N, θα δεχτούν το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο της διόδου και θα διαχωριστούν. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου N και οι οπές μεταφέρονται προς το τμήμα τύπου P, με αποτέλεσμα η συσσώρευση αυτή του φορτίου στα δυο τμήματα να δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου. Η διάταξη, δηλαδή, λειτουργεί ως ορθά πολωμένη δίοδος και ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος για

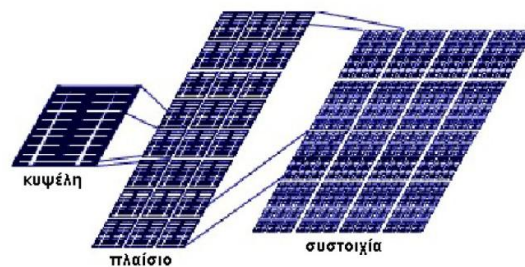
όσο διαρκεί η οπτική διέγερση. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις της ηλιακής κυψέλης σύμφωνα με την διαδικασία που προαναφέρθηκε ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.[1,2]



Σχήμα 1. 3: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

1.3 Δομή φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η ενέργεια που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη είναι περιορισμένη και προκειμένου να παραχθεί μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, πολλές ηλιακές κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρονικά, σχηματίζοντας έτσι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις, στις οποίες γίνεται παραγωγή μέσης ή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η ύπαρξη πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία συνδέονται και σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διατάσσονται με τέτοιο τρόπο, στο διαθέσιμο χώρο, ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα σκίασης μεταξύ των διαφορετικών σειρών των πλαισίων.



Σχήμα 1.3 Συστοιχία ηλιακών κυψέλων

Οι ηλιακές κυψέλες έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμα τους μεταλλικά ελάσματα αναδυσόμενου αλουμινίου και, για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγές κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό.

Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από:

- Μεταλλικά αγώγιμα ελάσματα
- Πυρίτιο τύπου N
- Πυρίτιο τύπου P
- Μεταλλική βάση
- Μη-ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης [3]

Οι ηλιακές κυψέλες μπορούν να διαφοροποιηθούν με βάση την κρυσταλλική τους δομή σε:

1. Άμορφο πυρίτιο

Το άμορφο πυρίτιο ανήκει σε μια από τις τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin film technology). Οι ηλιακές κυψέλες αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου που έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλη βάση. Σαν βάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη ποικιλία υλικών από δύσκαμπτα μέχρι ελαστικά με αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, ιδιαίτερα σε καμπύλες ή εύκαμπτες επιφάνειες. Ενώ το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση του φωτός, εντούτοις η φωτοβολταϊκή απόδοση του είναι η μικρότερη των κρυσταλλικών. Το φθινό τους κόστος κατασκευής τα κάνει ιδανικά σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλή απόδοση.



Σχήμα 1.4 Φωτοβολταϊκο πλαίσιο αμορφου πυριτιου

2. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

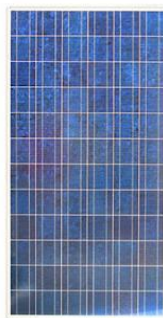
Οι ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους οι ηλιακές κυψέλες έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση. Η κατασκευή τους όμως είναι πιο πολύπλοκη γιατί απαιτεί την κατασκευή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα να αυξάνει το κόστος κατασκευής.



Σχήμα 1.5 φωτοβολταϊκο πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου




3. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Οι κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους, οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την διαδικασία χύτευσης. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών ηλιακών κυψελών με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Όμως, παρουσιάζουν μικρότερη απόδοση από τις ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου που οφείλεται στις ατέλειες στη δομή του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της διαδικασίας χύτευσης.



Σχήμα 1.6 Φωτοβολταϊκο πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Εκτός από αυτούς τους τρεις τύπους ηλιακών κυψελών από πυρίτιο που διατίθενται στην παγκόσμια αγορά, γίνονται έρευνες και προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση και άλλων στοιχείων (είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό) όπως γάλλιο-αρσενικό (GaAs), θείο-κάδμιο (CdS), φώσφορο-ίνδιο (InP). Ο Πίνακας 1.1 απεικονίζει την απόδοση των τριών συνηθέστερων τύπων ηλιακών κυψελών [1,15]

ΤΥΠΟΣ	'Λεπού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	a-Si: 4,5-6,5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²

Πίνακας 1.1 πίνακας απόδοσης των τριών συνηθέστερων τύπων ηλιακών κυψελών

1.4 Το φωτοβολταϊκό σύστημα

Ένα βασικό φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένα φορτίο και ένα καλώδιο σύνδεσης απεικονίζεται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7 Φωτοβολταϊκό σύστημα

Παρατίθενται οι διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και τα μέρη από τα οποία αποτελούνται και συμβάλλουν στην σωστή λειτουργία τους.

Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων αλλά και τα συμβαλλόμενα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτώνται από την απαιτούμενη ισχύ του συστήματος και το είδος της εφαρμογής.

Οι βασικοί τύποι των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι:

1. Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ηλεκτρική ενέργεια, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, αν υπάρχει, διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία, τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο.

Ακόμα, στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης. Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν διαθέτουν συσσωρευτή, λειτουργούν μόνο ταυτόχρονα με άλλη πηγή ρεύματος και δεν προσφέρουν αυτονομία σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.

Αποτελούνται από:

Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Συνδέονται στη σειρά σε ομάδες. Η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στον μετατροπέα του συστήματος.

Μετατροπέας δικτύου

Ο μετατροπέας σε αυτή την περίπτωση μετατρέπει το συνεχές ρεύμα των φωτοβολταϊκών σε εναλλασσόμενο και συνδέεται με το δίκτυο μέσω του ηλεκτρικού πίνακα.

Στην περίπτωση του αυτοπαραγωγού, η ενέργεια αυτοκαταναλώνεται από τις συσκευές της κατανάλωσης και αν υπάρχει περίσσεια ενέργειας, τότε διοχετεύεται στο δίκτυο. Στην περίπτωση του ανεξάρτητου παραγωγού, η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο.

Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίζονται σε κατηγορίες σε σχέση με τα συστήματα στήριξης:

- Στήριξη με σταθερό σύστημα στο έδαφος.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επικλινή στέγη.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επίπεδη οροφή κτιρίου

2. Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Υπάρχει μεγάλος αριθμός μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κεραιές τηλεπικοινωνιακών σταθμών, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα δηλαδή δεν είναι συνδεδεμένα με κάποιο δίκτυο. Βέβαια υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών, οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε περίπτωση που υπάρχουν φορτία εναλλασσομένου ρεύματος θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας στο σύστημα, ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση. Όταν τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδυασθούν και με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κ.λ.π.) τότε χαρακτηρίζονται σαν υβριδικά.

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από:

Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Παράγουν απευθείας από τον ήλιο συνεχές ρεύμα (DC). Η τάση και η ισχύς τους συστήματος εξαρτώνται από τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συνδέθηκαν (στη σειρά ή παράλληλα).

Ανεμογεννήτρια

Στην περίπτωση που υπάρχει ανεμογεννήτρια το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι υβριδικό. Η ανεμογεννήτρια παράγει ρεύμα από την ταχύτητα του ανέμου. Συνεργάζεται με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια για την φόρτιση του συσσωρευτή του συστήματος. Τοποθετείται βοηθητικά σε περιοχές με μέτριο ή υψηλό αιολικό δυναμικό. Συνήθως συμπληρώνει με ενέργεια τις ημέρες με κακοκαιρία που τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν αποδίδουν την μέγιστη ισχύ τους.

Ρυθμιστής φόρτισης

Πρόκειται για μία ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου της φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Είναι απαραίτητη συσκευή για την μακροχρόνια χρήση του

συσσωρευτή και την σωστή λειτουργία του. Οι περισσότεροι ρυθμιστές φόρτισης διαθέτουν οθόνη με όλες τις πληροφορίες του συστήματος.

Συσσωρευτής

Αποθηκεύει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή τις ανεμογεννήτριες και την διαθέτει μόλις η κατανάλωση το απαιτήσει. Ανάλογα με την χωρητικότητα του εξαρτάται και η αυτονομία του συστήματος η οποία υπολογίζεται συνήθως για 3-4 ημέρες για τα δεδομένα της Ελλάδας. Ο συσσωρευτής αποτελείται από στοιχεία τα οποία, συνδεδεμένα στη σειρά ή παράλληλα, αποδίδουν την ονομαστική ισχύ και τάση του.

Μετατροπέας

Συνδέεται με τον συσσωρευτή και μετατρέπει το ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο για κάθε χρήση. Η ισχύς του μετατροπέα εξαρτάται από την ισχύ των συσκευών που θα τροφοδοτούνται. Δεν έχει σημασία πόσες συσκευές θα συνδεθούν ταυτόχρονα, αρκεί η ισχύς όλων των συσκευών που λειτουργούν ταυτόχρονα να μην ξεπερνά την επιτρεπόμενη ισχύ του μετατροπέα τάσης. [2,3]

1.5 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό ηλιακών κυψελών. Για να γίνει εφικτή η λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό να προστατεύονται οι ηλιακές κυψέλες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες είναι πολύ λεπτές και άρα επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες. Υπάρχουν όμως πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η δομή τους συχνά είναι διαφορετική για τα διάφορα είδη ηλιακών κυψελών ή για τις ποικίλες εφαρμογές τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των κυψελών
- Ηλιακές κυψέλες
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)

- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Οι ηλιακές κυψέλες περικλείονται από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή και συνδυασμένες προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα.

Οι ηλιακές κυψέλες πρέπει να είναι όμοιες, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. [2,3,15]

1.6 Λειτουργικά προβλήματα

Ο κύκλος ζωής των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι τα 30 χρόνια σύμφωνα με τους κατασκευαστές. Στη πράξη όμως η λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων για 30 χρόνια δεν είναι εφικτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορα σφάλματα που παρατηρούνται στην λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία όχι μόνο μειώνουν τον χρόνο ζωής αλλά μειώνουν και την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όταν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφέρεται ως αξιόπιστο, τότε αυτό σημαίνει ότι το πλαίσιο έχει μεγάλη πιθανότητα να λειτουργήσει επαρκώς για τον σκοπό που έχει σχεδιαστεί, στον αναμενόμενο χρόνο ζωής του και με την αναμενόμενη απόδοση όπως αυτή έχει οριστεί από τον κατασκευαστή. Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν είναι αξιόπιστο όταν εμφανίζει κάποια αστοχία και η απόδοση του μειώνεται για κάθε χρόνο χρήσης του.

Οι δυσλειτουργίες μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Η μια κατηγορία αφορά την ηλιακή κυψέλη, και η άλλη σχετίζεται με το περίβλημα της ηλιακής κυψέλης.

Η πρώτη κατηγορία αφορά σφάλματα που σχετίζονται με την ηλιακή κυψέλη και μπορεί να προκληθούν από μερικώς ή ολικώς κατεστραμμένες ηλιακές κυψέλες. Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες

όπως η θερμοκρασία, από την οποία η ηλιακή κυψέλη μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά και δεν είναι δυνατόν να προστατευτεί ανεξαρτήτως του περιβλήματος. Επίσης, στις ηλιακές κυψέλες μπορεί να υπάρχουν ρωγμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από την μηχανική κοπή των κυψελών κατά την δημιουργία τους. Ακόμα και από την κακή σύνδεση των ηλιακών κυψελών μπορεί να υπάρξει μείωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Τα σφάλματα που σχετίζονται με το περίβλημα της ηλιακής κυψέλης μπορεί να οφείλονται στην αστοχία υλικού (υλικά κακής ποιότητας) των δομικών στοιχείων του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επίσης, η έλλειψη ακεραιότητας της δομής του πλαισίου μπορεί να προκαλέσει την μείωση της αντοχής του σε φορτία ανέμου και την εύκολη στρέβλωση του. Με αποτέλεσμα ρυπασμένα αέρια ή υγρασία να εισχωρούν στο εσωτερικό του πλαισίου και να προκαλούν την μείωση της απόδοσης του πλαισίου σε ποσοστό ≥ 56 μεγαλύτερο του 1% για κάθε χρόνο χρήσης. Ιδιαίτερα, η υγρασία μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των ηλιακών κυψελών και των συνδέσεων τους. Η κακή ποιότητα ή η καταστροφή της μόνωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να προκαλέσει διαρροή ρεύματος, το οποίο με τη σειρά του να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα.

Εκτός από τα είδη των σφαλμάτων που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχει μια ξεχωριστή κατηγορία που είναι πολύ σημαντική και η οποία παρατηρείται συχνά. Η κατηγορία αυτή ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας (hot spot). Η ηλιακή κυψέλη είναι ουσιαστικά μια επαφή P-N. Όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, λειτουργεί σαν μια πηγή ρεύματος σε κλειστό κύκλωμα. Αν συνδεθούν σε σειρά ηλιακές κυψέλες, οι τάσεις στα άκρα τους αθροίζονται και συμπεριφέρονται σαν μια ενιαία πηγή. Όταν μια ηλιακή κυψέλη σκιάζεται, τότε αυτή δεν συμπεριφέρεται σαν μια πηγή ρεύματος αλλά σαν μια δίοδο που μάλιστα είναι πολωμένη ανάστροφα αφού η συνολική τάση των υπολοίπων κυψελών εφαρμόζεται πάνω της με αντίστροφη φορά. Η σκιασμένη ηλιακή κυψέλη με την σειρά της εμποδίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως η συνολική συμπεριφορά του πλαισίου καθορίζεται από την συγκεκριμένη ηλιακή κυψέλη.

Όταν μια ηλιακή κυψέλη σκιάζεται και δέχεται την ανάστροφη τάση των υπολοίπων, είναι δυνατόν να καταρρεύσει η επαφή P-N και να δημιουργηθεί το φαινόμενο zener. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού είναι δυνατόν να περάσει ρεύμα κατά την ανάστροφη φορά και με μικρή αύξηση της τάσης να διέλθει μεγάλο ρεύμα. Το ανάστροφο ρεύμα αυξάνει την θερμοκρασία της κυψέλης και μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή της. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας. [8,9]

Διαφέρουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά των ηλιακών κυψελών. Οι κυψέλες έχουν είτε υψηλή παράλληλη αντίσταση είτε χαμηλή παράλληλη αντίσταση. Καθένας από τους τύπους των ηλιακών κυψελών μπορεί να αντιμετωπίζει προβλήματα θερμής κηλίδας αλλά με διαφορετικούς τρόπους.

1. Χαμηλή παράλληλη αντίσταση

- Στις κυψέλες χαμηλής παράλληλης αντίστασης, το φαινόμενο θερμής κηλίδας δημιουργείται επειδή ένα υψηλό ποσό ρεύματος ρέει σε μια μικρή περιοχή. Επειδή αυτό είναι ένα τοπικό φαινόμενο, παρατηρείται διακύμανση στην τιμή της απόδοσης για αυτού του είδους τις κυψέλες. Οι ηλιακές κυψέλες με τη χαμηλότερη παράλληλη αντίσταση έχουν πιθανότητα να λειτουργούν σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες σε εντοπισμένες περιοχές.
- Επειδή η περιοχή που δημιουργείται η θερμότητα είναι μικρή, μπορεί να απαιτείται λίγος χρόνος για την θέρμανση του σημείου που έχει πρόβλημα.
- Η χειρότερη περίπτωση σκίασης είναι όταν ολόκληρη η ηλιακή κυψέλη είναι σκιασμένη.

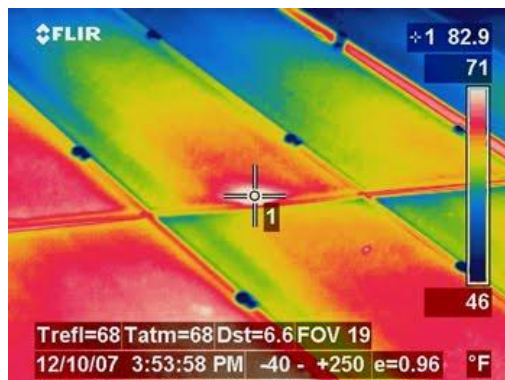
2. Υψηλή παράλληλη αντίσταση

- Οι κυψέλες υψηλής παράλληλης αντίστασης περιορίζουν την αντίστροφη ροή του ρεύματος στο κύκλωμα και γι' αυτό τον λόγο θερμαίνονται. Η ηλιακή κυψέλη με την υψηλότερη παράλληλη αντίσταση θα έχει την υψηλότερη διάχυση ενέργειας.
- Η χειρότερη περίπτωση σκίασης είναι όταν μια μικρή περιοχή της ηλιακής κυψέλης είναι σκιασμένη.
- Επειδή η θερμότητα είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρη την περιοχή της ηλιακής κυψέλης, μπορεί να απαιτείται πολύς χρόνος για την θέρμανση του σημείου που έχει πρόβλημα. [10]

Για την εξάλειψη των θερμών κηλίδων είναι απαραίτητο να τοποθετείται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η συγκράτηση σκόνης ή χιονιού και η σκίαση από αντικείμενα του περιβάλλοντος να μην εμποδίζει την ηλιακή κυψέλη. Έχουν αναπτυχθεί, τρόποι για τον έλεγχο των σφαλμάτων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Μερικοί από τους τρόπους ανίχνευσης σφαλμάτων είναι:

- P-Spice προσομοίωση
- Ανάλυση καμπύλης τάσης-ρεύματος
- Οπτική απεικόνιση
- Υπέρυθρη απεικόνιση
- AMPS προσομοίωση [7]

Για την ανίχνευση σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χρησιμοποιείται ευρέως η θερμογραφία. Ο όρος θερμογραφία αναφέρεται στο σύνολο των τεχνικών καταγραφής της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός αντικειμένου, ανεξάρτητα από το φυσικό φαινόμενο στο οποίο βασίζονται.



Σχήμα 1.8 παράδειγμα θερμογραφίας

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζονται και ερμηνεύονται οι θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει.

Με την θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας, το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια δισδιάστατη, μη-καταστροφική τεχνική η οποία χρησιμοποιεί την ακτινοβολία της υπέρυθρης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (κατά προσέγγιση 0.9–14 μm) για να παράγει εικόνες ενός συγκεκριμένου θερμοκρασιακού σχεδίου. Σύμφωνα με τον νόμο του Planck για το μέλαν σώμα, η υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπεται από όλα τα αντικείμενα και αυτό συμβαίνει ανάλογα με την θερμοκρασία τους. Επίσης, η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι δυνατόν να καθορίσει την επιφανειακή θερμοκρασία και, άρα, οποιοσδήποτε ανωμαλίες στο θερμοκρασιακό σχέδιο του προς εξέταση αντικειμένου.

Υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την υπέρυθρη ακτινοβολία, η παθητική και η ενεργητική προσέγγιση.

Στην ενεργητική θερμογραφία, είναι απαραίτητο να δοθεί ενέργεια στο αντικείμενο για να παρατηρηθούν θερμοκρασιακές διαφορές οι οποίες αποδεικνύουν την ύπαρξη υποεπιφανειακών αστοχιών.

Στην παθητική θερμογραφία, τα προς εξέταση αντικείμενα είναι σε υψηλότερη ή χαμηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον και ασυνήθιστα θερμοκρασιακά προφίλ υποδεικνύουν ένα πιθανό πρόβλημα. Γενικά, η παθητική θερμογραφία είναι ποιοτική μέθοδος γιατί ο στόχος είναι η ανίχνευση αστοχιών. [6,11,12]

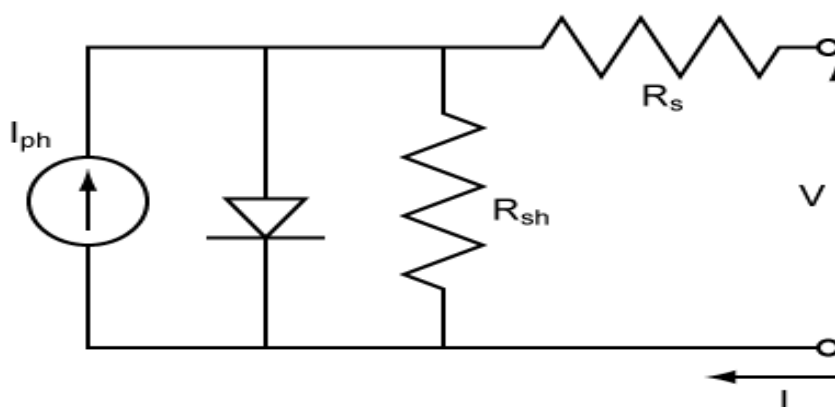
1.7.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης

Η ηλεκτρική συμπεριφορά των ηλιακών κυψελών βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή.

Ένα ιδανικό ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να διαμορφωθεί από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο. Στην πράξη καμία ηλιακή κυψέλη δεν είναι ιδανική, έτσι, μια παράλληλη αντίσταση και μια αντίσταση σε σειρά προστίθενται στο μοντέλο.

1.7.2 Μη ιδανική ηλιακή κυψέλη

Μία ηλιακή κυψέλη μπορεί να παρασταθεί σε ισοδύναμο ηλεκτρολογικό κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος, μια ιδανική δίοδο επαφής P-N, μια σε σειρά αντίσταση R_{sh} και μια παράλληλη αντίσταση.



Σχήμα 1.9: Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικής ηλιακής κυψέλης

όπου:

I_{ph} είναι το φωτόρρευμα, δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα της ηλιακής κυψέλης που οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από τον τύπο $(I_{ph} = \frac{(I_{ph,0} G)}{G_0})$ όπου το G αντιστοιχεί στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, το G_0 στην ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς και το $I_{ph,0}$ στο φωτόρρευμα αναφοράς.

I_d είναι το ρεύμα της διόδου,

I_{sh} είναι το ρεύμα που διέρχεται από την παράλληλη δίοδο,

I είναι το ρεύμα φορτίου,

R_s είναι η αντίσταση σειράς (συνήθως $< 5\Omega$),

R_{sh} είναι η παράλληλη αντίσταση (συνήθως $R_{sh} > 500\Omega$).

Από το ισοδύναμο κύκλωμα παρατηρούμε ότι το ρεύμα εξόδου I της ηλιακής κυψέλης είναι ίσο με την διαφορά του ρεύματος που παράγεται από την πηγή ρεύματος I_{ph} , του ρεύματος που ρέει μέσω της διόδου I_D και του ρεύματος που ρέει μέσω της παράλληλης αντίστασης I_{sh} :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (A)$$

(1.1)

Ή αλλιώς

$$I = I_{ph} - I_{sh} \left(e^{q(V + R_{sh}I)/nkT} - 1 \right) - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (A)$$

(1.2)

όπου:

V είναι η τάση στα άκρα της διόδου,.

T είναι η απόλυτη θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης σε $^{\circ}K$,

k είναι η σταθερά του Boltzmann,

n είναι ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου και παίρνει τιμές 1 ή 2.

Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Όταν η ηλιακή κυψέλη λειτουργεί στο ανοικτό κύκλωμα, τότε $I = 0$ και η τάση σε όλους τους ακροδέκτες εξόδου ορίζεται ως η τάση ανοιχτού

κυκλώματος. Η V_{oc} είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης και προκύπτει από την σχέση 1.2 για $I=0$. Όταν $I=0$, όλο το φωτόρρευμα περνά μέσα από τη δίοδο D και:

$$V_{oc} = \frac{(nkT)}{q} * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sh}} + 1\right) \quad (V)$$

(1.3)

Ομοίως, όταν η ηλιακή κυψέλη λειτουργεί σε βραχυκύκλωμα, τότε $V = 0$ και το ρεύμα I ορίζεται ως το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Το I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης της ηλιακής κυψέλης και προκύπτει από την σχέση 1.2 για $V=0$: [15]

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{sh}\left(e^{\frac{(q n s I_{sc})}{nkT}} - 1\right) - \frac{R_s * I_{sc}}{R_{sh}} \quad (A)$$

(1.4)

1.7.3 Ιδανική ηλιακή κυψέλη

Σε μια ιδανική ηλιακή κυψέλη, η αντίσταση R_s είναι περίπου ίση με το μηδέν και η R_{sh} είναι άπειρη. Το ρεύμα εξόδου τότε είναι:

$$I = I_{ph} - I_{sh} \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (A)$$

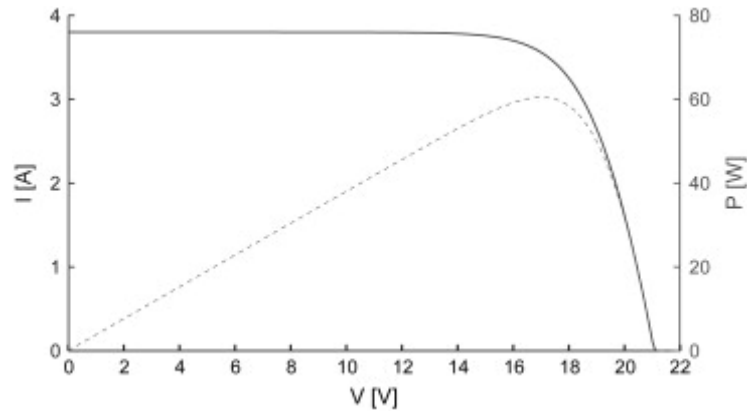
(1.5)

Στην περίπτωση της ιδανικής ηλιακής κυψέλης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το φωτόρρευμα I_{ph} και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} είναι ίδια με αυτή της μη ιδανικής:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sh}} + 1\right) \quad (V)$$

(1.6)

Η γραφική παράσταση μεταξύ του ρεύματος εξόδου (I) και της τάσης εξόδου (V) μιας ηλιακής κυψέλης ονομάζεται I - V χαρακτηριστική και παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Μια τέτοια αντιπροσωπευτική καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.10:



Σχήμα 1.10 Χαρακτηριστική I-V της ηλιακής κυψέλης

Η ισχύς που παράγει μια ηλιακή κυψέλη είναι:

$$P = V * I \quad (W)$$

(1.7)

όπου:

V είναι η τάση στην έξοδο,
I είναι το ρεύμα στην έξοδο.

Η μέγιστη ισχύς P_{max} επιτυγχάνεται όταν το γινόμενο IV είναι μέγιστο:

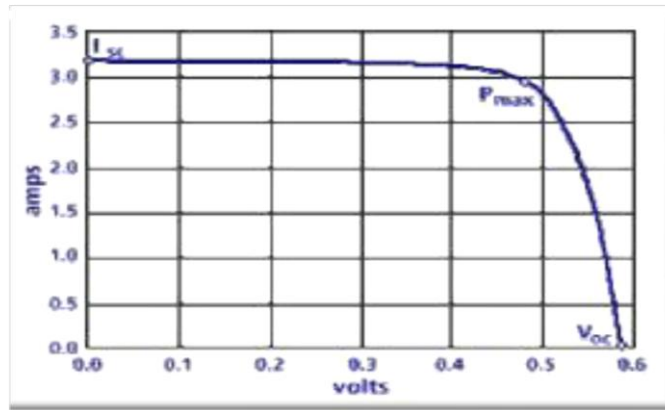
$$P_{max} = V_m * I_m \quad (W)$$

(1.8)

όπου:

V_m είναι η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος,
 I_m είναι το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται το σημείο μέγιστης ισχύος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Η μέγιστη ισχύς P_m προφανώς ισούται με το εμβαδό του ορθογωνίου $I_m V_m$ και αναφέρεται ως ονομαστική ισχύς της ηλιακής κυψέλης.



Σχήμα 1.11 Χαρακτηριστική I-V της ηλιακής κυψέλης με τις κυριότερες παραμέτρους

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_{max} προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF(Fill Factor). Συνήθως, οι τιμές, που λαμβάνει, κυμαίνονται από 0,7 και 0,85. Ο συντελεστής πλήρωσης είναι:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}}$$

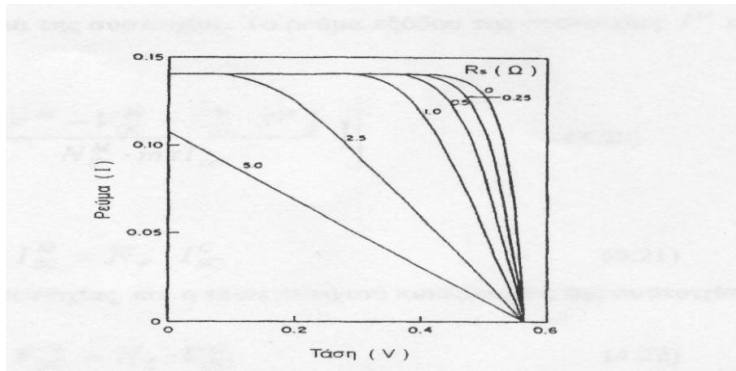
(1.9)

Η ισχύς εξόδου μιας ηλιακής κυψέλης επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

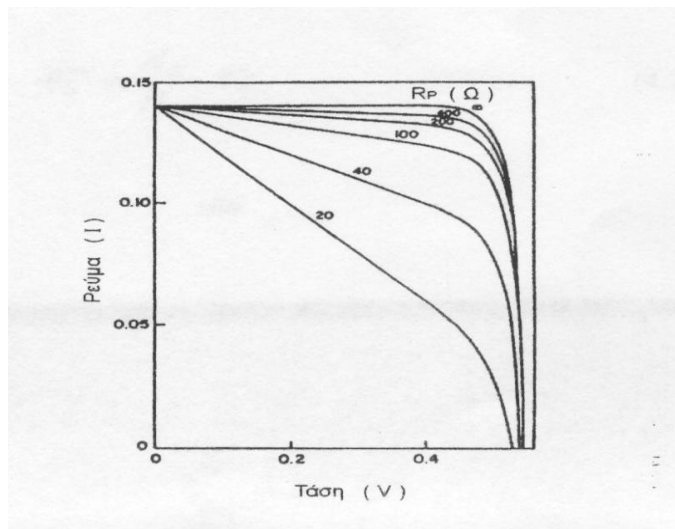
- Αντίσταση σειράς
- Παράλληλη αντίσταση
- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας
- Θερμοκρασία

Οι αντιστάσεις ονομάζονται εσωτερικές παράμετροι της ηλιακής κυψέλης διότι σχετίζονται με τον τρόπο κατασκευής της, ενώ η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία αποτελούν τις εξωτερικές παραμέτρους. Η αντίσταση σειράς αντιπροσωπεύει τις ωμικές απώλειες της κυψέλης λόγω των μεταλλικών επαφών της.

Αυξάνοντας την τιμή της αντίστασης σειράς, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται και άρα μειώνεται και η ισχύς εξόδου της ηλιακής κυψέλης (Σχήμα 1.12). Η παράλληλη αντίσταση οφείλεται στο ρεύμα διαρροής της επαφής. Αν αυξηθεί η τιμή της παράλληλης αντίστασης, το εμβαδό του ορθογωνίου της ισχύς εξόδου μεγαλώνει και άρα αυξάνεται η ισχύς εξόδου (Σχήμα 1.13).



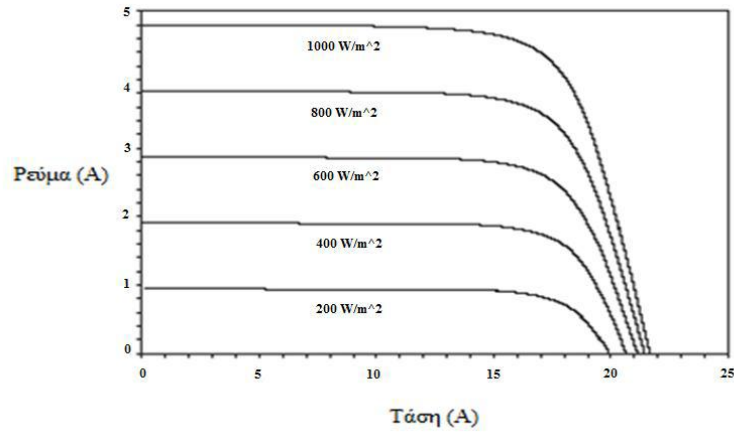
Σχήμα 1.12 Χαρακτηριστικές I-V σε συνάρτηση με την αντίσταση σειράς



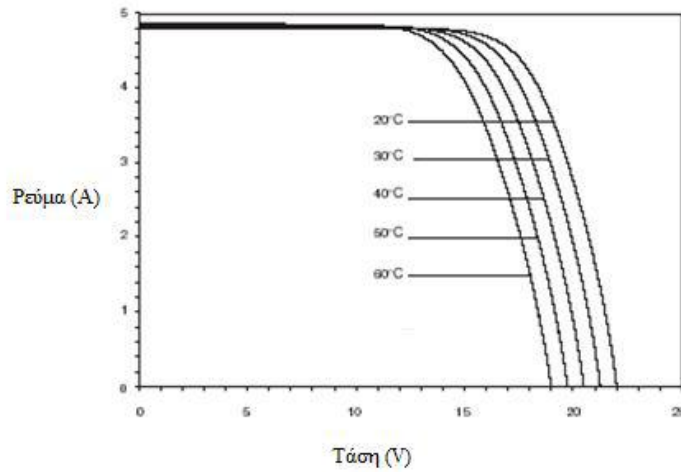
Σχήμα 1.13: Χαρακτηριστικές I-V σε συνάρτηση με την παράλληλη αντίσταση

Η ισχύς εξόδου της ηλιακής κυψέλης αποκτά υψηλότερες τιμές με την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, επειδή τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνονται (Σχήμα 1.14). Όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, παρατηρείται μια μικρή αύξηση του φωτορεύματος και μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Όμως, η ισχύς εξόδου της κυψέλης τελικά μειώνεται (Σχήμα 1.15).

Από τα Σχήματα 1.14 και 1.15 φαίνεται, ότι το σημείο μέγιστης ισχύος εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασιακή μεταβολή της ηλιακής κυψέλης. Επίσης, παρατηρείται ότι η παραγόμενη ισχύς από την ηλιακή κυψέλη είναι σχεδόν ευθέως ανάλογη προς την ένταση του ηλιακού φωτός. Ένα σημαντικό γνώρισμα των ηλιακών κυψελών είναι ότι η τάση της κυψέλης παραμένει σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της έντασης του φωτός. Εντούτοις, το ρεύμα σε μια διάταξη ηλιακής κυψέλης είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο προς την ένταση του φωτός.[2,15,16]



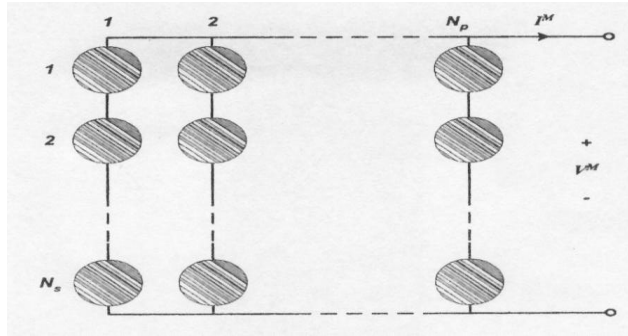
Σχήμα 1.14: Χαρακτηριστικές I-V σε συνάρτηση με την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 1.15: Χαρακτηριστικές I-V σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

1.7.4 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από N_p παράλληλους κλάδους με N_s ηλιακές κυψέλες, ο καθένας.



Σχήμα 1.16: Διάταξη φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για τα μεγέθη που αναφέρονται στις ηλιακές κυψέλες θα χρησιμοποιείται το γράμμα C (Cell) ενώ για το πλαίσιο το γράμμα M (Module). Το ρεύμα εξόδου του I^M πλαισίου τότε είναι:

$$I^M = I^{sc} (1 - e^{\frac{(qV^M - V_{oc} + R_s I^M)}{N_s M n k T}}) \quad (A)$$

(1.11)

όπου:

$I_{sc}^M = N_p I_{sc}^C$ είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου,

$V_{oc}^M = N_s V_{oc}^C$ είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος του πλαισίου,

$R_s^M = (\frac{N_s}{N_p}) R_s^C$ είναι ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά του πλαισίου.

Τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων που δίνονται από τους κατασκευαστές, αναφέρονται είτε στις ονομαστικές συνθήκες είτε στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς STC (Standard Test Conditions). Οι τιμές που αφορούν τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς STC (Standard Test Conditions) είναι:

- Θερμοκρασία = 25°C,
- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G_o = 1000 \text{ W/m}^2$.

Ο υπολογισμός του ρεύματος εξόδου I^M του πλαισίου για δεδομένη τάση V^M λειτουργίας, θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας G , γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Το φυλλάδιο προδιαγραφών του κατασκευαστή δίνει τα παρακάτω στοιχεία για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε STC:

Μέγιστη ισχύς $P_{\max,0}^M$

Αριθμός εν σειρά στοιχείων N_s

Αριθμός παράλληλων στοιχείων N_p

Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc,0}^M$

Τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc,0}^M$

2. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζονται τα $P_{max,0}^C$, $I_{sc,0}^C$, $V_{oc,0}^C$ και R_s^C (ο δείκτης 0 αναφέρεται σε STC) από τις μαθηματικές σχέσεις:

$$P_{max,0}^C = \frac{P_{max,0}^M}{N_s * N_p} \quad (W)$$

(1.12)

$$V_{oc,0} = \frac{V_{oc,0}^M}{N_s} \quad (V)$$

(1.13)

$$I_{sc,0}^C = \frac{I_{sc,0}^M}{N_p} \quad (A)$$

(1.14)

$$V_{t,0}^C = \frac{nkT}{q} \quad (V)$$

(1.15)

$$V_{oc,0} = \frac{V_{oc,0}^C}{V_{t,0}^C}$$

(1.16)

$$FF = \frac{(V_{oc,0} - \ln(V_{oc,0} + 0.72))}{(V_{oc,0} + 1)}$$

(1.17)

$$FF,0 = \frac{P_{max,0}}{V_{oc,0}^C * I_{oc,0}^C}$$

(1.18)

$$rs = 1 - \left(\frac{FF}{FF,o} \right)$$

(1.19)

$$Rs^c = \left(\frac{rs * Voc,o^c}{Isc,o^c} \right)$$

(1.20)

3. Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των μεγεθών $I_{sc,0}^c, Voc,0^c, T$ των ηλιακών κυψελών για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας (V^M, T_a, G). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται γραμμικά από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας:

$$I_{sc}^c = \left(\frac{I_{sc,0}^c}{G,0} \right) G \quad (A)$$

(1.21)

Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας με βάση τη σχέση:

$$T = T_a + (T_{ref} - T_{a,ref,o}) \frac{G}{G_{ref}}$$

(1.22)

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος των κυψελών εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία τους:

$$Voc^c = Voc,o^c + C (T - T_o) \quad (V)$$

(1.23)

όπου:

c είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης και συνήθως παίρνει την τιμή -2,3.

4. Μετά την ολοκλήρωση των βημάτων 2 και 3, ο υπολογισμός του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου γίνεται με τη σχέση:

$$I^M = Np * I_{sc}^C \left(1 - e^{-\frac{(V^M - N_s * V_{oc}^C + R_s^C * I^M * \frac{N_s}{NP})}{Vt^C * N_s}} \right) \quad (A)$$

(1.24)

όπου:

$$Vt^C = n * Km \frac{(2,73 + T)}{q} \quad (V)$$

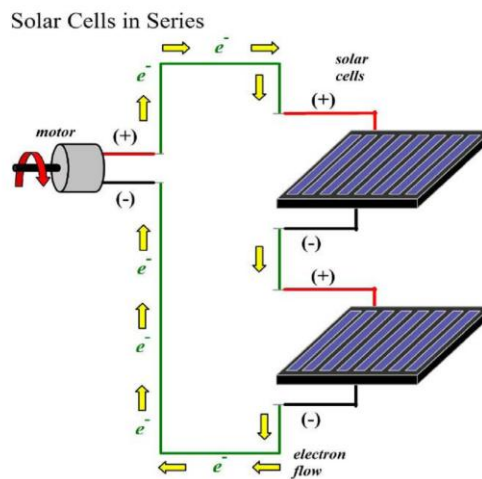
(1.25)

Η ισχύς εξόδου του πλαισίου επομένως είναι:

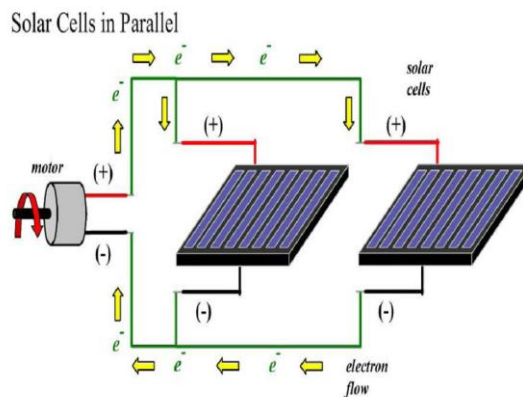
$$P_{out}^M = V^M * I^M \quad (W)$$

(1.26)

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα όπως φαίνεται από τα Σχήματα 1.17 και 1.18 αντίστοιχα:



Σχήμα 1.17: Σύνδεση ηλιακών κυψελών σε σειρά



Σχήμα 1.18: Σύνδεση ηλιακών κυψελών παράλληλα

Στο Σχήμα 1.17 όπου οι ηλιακές κυψέλες είναι συνδεδεμένες σε σειρά, τότε:

$$V = V_1 + V_2 \quad (V)$$

(1.27)

Και

$$I = I_1 + I_2 \quad (A)$$

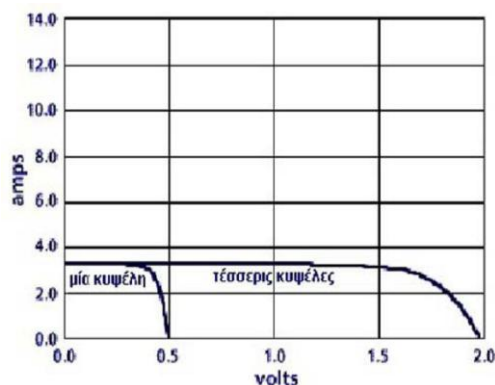
(1.28)

Το ρεύμα σε μία εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών είναι το ίδιο σε κάθε σημείο της συνδεσμολογίας, ίδιο με αυτό που παράγεται από μία κυψέλη. Εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος.

Η τάση σε μία εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας όμοιες κυψέλες, η τάση μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$V_{\text{σειράς}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * V_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}$$

Η παραγόμενη ισχύς από μία συνδεσμολογία κυψελών ισούται με το ρεύμα της συνδεσμολογίας πολλαπλασιαζόμενο με την τάση της. Οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, αλλά κάθε μία κυψέλη θα λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα όπως και οι άλλες στη συνδεσμολογία. Στο Σχήμα 1.19 φαίνεται πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της εν σειρά συνδεσμολογίας.



Σχήμα 1.19: Καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά

Για το Σχήμα 1.18 στο οποίο οι ηλιακές κυψέλες είναι συνδεδεμένες παράλληλα, τότε:

$$(1.29) \quad V = V_1 = V_2 \quad (V)$$

$$(1.30) \quad I = I_1 + I_2 \quad (A)$$

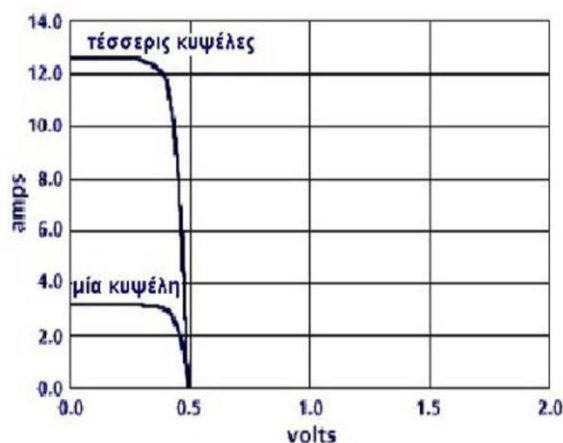
Το παραγόμενο ρεύμα από μια ομάδα κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα ισούται με το άθροισμα των μεμονωμένων ρευμάτων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας παρόμοιες κυψέλες, το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$I_{\text{παρα/λα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * I_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}$$

Η τάση μεταξύ δύο κόμβων μιας ομάδας κυψελών συνδεδεμένων εν παραλλήλω είναι ίση με την τάση κάθε κυψέλης:

$$V_{\text{παρα/λα}} = V_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}$$

Η παραγόμενη ισχύς από κυψέλες εν παραλλήλω είναι ίση με το παράλληλο ρεύμα πολλαπλασιασμένο με την παράλληλη τάση της. Όταν μια ομάδα κυψελών συνδέεται παράλληλα, οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, αλλά κάθε κυψέλη θα λειτουργεί στην ίδια τάση. Στο Σχήμα 1.20 φαίνεται πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της ομάδας των κυψελών εν παραλλήλω [1,3,4,5,14,15].



Σχήμα 1.20: Καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα

1.7.5 Απόδοση ηλιακής κυψέλης

Οι βασικές παράμετροι για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των ηλιακών κυψελών είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και η τάση V_{oc} ανοικτού κυκλώματος. Ο όρος βαθμός απόδοσης αναφέρεται στον βαθμό μετατροπής του εισερχόμενου φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια και ορίζεται ως το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος P_{max} που αποδίδει η ηλιακή κυψέλη προς την προσπίπτουσα ισχύ P_{in} στην επιφάνεια της:

$$\eta_c = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m * I_m}{G * A_c} = \frac{FF * V_{oc} * I_{sc}}{G * A_c}$$

(1.10)

όπου:

G είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία,

A_c είναι το εμβαδόν της επιφάνειας της ηλιακής κυψέλης.

1.7.6 Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος

Για να αξιολογηθεί η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να ελεγχθούν ορισμένοι παράγοντες όπως είναι η τελική απόδοση, η απόδοση αναφοράς και ο λόγος απόδοσης.

Η τελική απόδοση ενέργειας Y_F για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ορίζεται ως το πηλίκο της ολικής ενέργειας εξόδου E και της ονομαστικής ισχύος P_o όπως ορίζεται από το φυλλάδιο προδιαγραφών του κατασκευαστή. Η τιμή της ενέργειας μπορεί να δοθεί είτε σε AC είτε σε DC.

Ο παράγοντας αυτός δίνει την δυνατότητα να συγκριθεί η ενέργεια που παράγεται όσον αφορά το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος με συστήματα διαφορετικού μεγέθους.

$$YF = \frac{E}{P_o}$$

(1.31)

Ένας ακόμη χρήσιμος παράγοντας είναι η απόδοση αναφοράς Y_R , η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας G και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αναφοράς G_{ref} του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Γενικά, η απόδοση αναφοράς επηρεάζεται από την γεωγραφική τοποθεσία της εγκατάστασης, τον προσανατολισμό του συστήματος και τις ετήσιες καιρικές συνθήκες.

$$YR = \frac{G}{G_{ref}}$$

(1.32)

Επιπρόσθετα με την παραγωγή ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, η απόδοση συνδεδεμένων συστημάτων χαρακτηρίζεται από τον λόγο απόδοσης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μετρούμενης απόδοσης του συστήματος και της ονομαστικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Ο λόγος απόδοσης PR ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η τιμή που δίνεται διαιρώντας την απόδοση ενέργειας Y_F με την απόδοση αναφοράς Y_R . Είναι ένας χρήσιμος τρόπος για να ποσοτικοποιηθεί η ολική επίδραση των απωλειών λόγω των συνδέσεων, της θερμοκρασίας, του μετασχηματιστή κ.α.

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R}$$

(1.33)

Αν και ο λόγος απόδοσης δίνει μια καθολική εικόνα για την συμπεριφορά του συστήματος, είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την αναγνώριση κυψελών οι οποίες δεν λειτουργούν κανονικά.[13]

Βιβλιογραφία

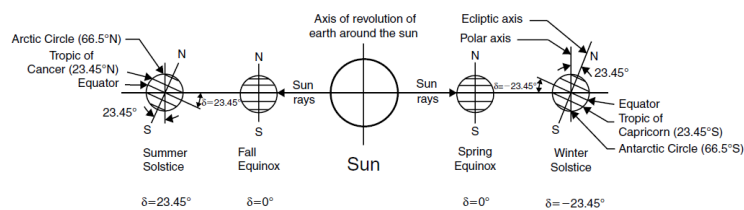
- [1] <http://www.selasenergy.gr/>
- [2] Καγκαράκη, Κ., (1992), *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία
- [3] Luque, A. & Hegedus, S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*
- [4] Duffie, J. A. & Beckman, W. A., (1991), *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2η Έκδοση, Wiley, New York
- [5] <http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_inspection
- [7] McMahon, T.J, (2008), *Solar Cell/ Module Degradation And Failure Diagnostics*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado
- [8] Molenbroek, E., Waddington, D.W. & Emery, K.A., *Hot Spot Susceptibility And Testing Of PV Modules*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado
- [9] Simon, M. & Meyer, E.L, (2010), 'Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells', *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **vol. 94**, pp. 106–113
- [10] Wohlgemuth, J. & Herrmann, W., (2005), *Hot Spot Tests For Crystalline Silicon Modules*, BP Solar International, Frederick, Maryland, US
- [11] Botsaris, P.N. & Tsanakas, J.A., (2010), *Infrared thermography as an estimator of a photovoltaic module performance via operating temperature measurements*, The 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia
- [12] cooperator.com/articles/1046/1/X-Ray_vision/page1.html
- [13] Kymakis, E., Kalykakis, S. & Papazoglou, T.M., (2009), 'Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete', *Energy Conversion and Management*, **vol. 50**, pp. 433-438
- [14] <http://www.elecnetsolar.gr/xrisima/tecnica/tecnica-fotovoltaika-susthmata/>
- [15] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHITES/OMADESERGA_SIAS/fwtovoltaika_ergwn.pdf
- [16] Δέρβος ,Κ. Θ., (2009) ,*Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις*, Εκδόσεις ΕΜΠ

2 Μελέτη Θέσης Ήλιου

2.1 Μετατόπιση του ήλιου και της γης

Η περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο γίνεται σε ελλειπτική τροχιά. Το επίπεδο που περιέχει αυτήν την τροχιά καλείται ελλειπτικό επίπεδο και ο χρόνος που χρειάζεται η γη για να ολοκληρώσει αυτήν την τροχιά οδηγεί στον καθορισμό του έτους. Ταυτόχρονα, η γη περιστρέφεται μία φορά την ημέρα γύρω από τον κεντρικό της άξονα, τον πολικό άξονα. Ο πολικός άξονας έχει τροχιά γύρω από τον ήλιο, διατηρώντας μια σταθερή γωνία 23.45° με το ελλειπτικό επίπεδο, έτσι ώστε η γωνία μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και μιας ευθείας γραμμής που σύρεται μεταξύ του κέντρου της γης και του κέντρου του ήλιου να αλλάζει συνεχώς. Αυτή η γωνία είναι γνωστή ως ηλιακή απόκλιση δ . Αυτή η γωνία μπορεί να θεωρηθεί περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια μιας οποιασδήποτε ημέρας.

Η μέγιστη μεταβολή της γωνίας ηλιακής απόκλισης σε 24 ώρες είναι λιγότερο από 0.5° . Στην ισημερία της άνοιξης (20/21 Μαρτίου) και στην φθινοπωρινή ισημερία (22/23 Σεπτεμβρίου), η γραμμή μεταξύ του ήλιου και της γης περνά μέσω του ισημερινού. Συνεπώς, η διάρκεια της ημέρας και της νύχτας είναι ίση σε όλη τη γη. Ο ήλιος ανατέλλει και δύει ακριβώς στην ανατολή και τη δύση αντίστοιχα. Στη καλοκαιρινή ισημερία (21/22 Ιουνίου) η γωνία ηλιακής απόκλισης δ είναι ίση με 23.45° και ο ήλιος είναι τοποθετημένος επάνω από τον τροπικό κύκλο του καρκίνου. Στο βόρειο ημισφαίριο, στη θερινή ισημερία είναι η μακρύτερη ημέρα και η πιο σύντομη νύχτα ολόκληρου του έτους. Στη χειμερινή ισημερία (21/22 του Δεκεμβρίου) η γωνία ηλιακής απόκλισης δ είναι ίση με -23.45° και ο ήλιος είναι άμεσα επάνω από τον τροπικό κύκλο του Αιγόκερου. Στο βόρειο ημισφαίριο τότε είναι η πιο σύντομη ημέρα και η μακρύτερη νύχτα ολόκληρου του έτους.



Σχήμα 2.1: Θέση του άξονα της γης ως προς τον ήλιο, ανάλογα με τις εποχές

Ο υπολογισμός της γωνίας ηλιακής απόκλισης δ δίνεται με μεγάλη ακρίβεια για οποιαδήποτε ημέρα του έτους από την σχέση:

$$\delta(^{\circ})=[0,006918-0,399912 \times \cos(\Gamma)+0,070257 \times \sin(\Gamma)+0,006758 \times \cos(2\Gamma)+0,000907 \times \sin(2\Gamma)-0,002697 \times \cos(3\Gamma)+0,00148 \times \sin(3\Gamma)] \times \frac{180}{\pi}$$

όπου το Γ (σε rad) δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma=2 \times \pi \times \frac{d_n-1}{365}$$

όπου d_n ο αριθμός της μέρας αρχίζοντας τη μέτρηση από την αρχή του έτους. Δηλαδή το d_n παίρνει τιμές από 1 στις 1 Ιανουαρίου ως 365 στις 31 Δεκεμβρίου. Σύμφωνα με την ελλειπτική τροχιά της γης η απόσταση μεταξύ του ήλιου και της γης παίρνει τιμές κατά τη διάρκεια του έτους σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221 \times \cos(\Gamma) + 0,001280 \times \sin(\Gamma) + 0,000719 \times \cos(2\Gamma) + 0,000077 \times \sin(2\Gamma)$$

όπου: r είναι η απόσταση μεταξύ του ήλιου και της γης, r_0 είναι η μέση τιμή του r και είναι ίση με 149.600.000Km.

Οι σχέσεις ισχύουν λαμβάνοντας υπόψη τη γωνιακή ταχύτητα της γης. Βέβαια σε πολλές εφαρμογές της εφαρμοσμένης μηχανικής η γωνιακή ταχύτητα θεωρείται προσεγγιστικά σταθερή. Η θεώρηση αυτή είναι αρκετά βολική και ακριβής. Σε αυτή τη περίπτωση οι εξισώσεις αντικαθίστανται από τις παρακάτω:

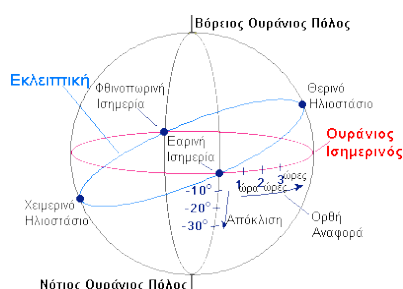
[1,2,6,7]

$$\delta(^{\circ})=23,45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (d_n+284)\right)$$

$$\varepsilon_0=1+0,033 \times \cos\left(360 \times \frac{d_n}{284}\right)$$

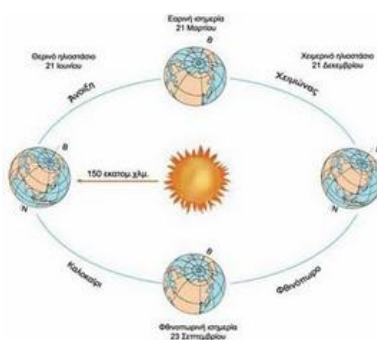
2.2 Απόσταση του ήλιου από την επιφάνεια της γης

Μια μέθοδος αναπαράστασης του ουρανού είναι ως σφαίρα που κεντροθετείται σε ένα καθορισμένο σημείο τη γης, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα που ακολουθεί. Αυτό το μοντέλο είναι γνωστό ως ουράνια σφαίρα. Κάθε ένα από τα σημεία του, αντιπροσωπεύει μια κατεύθυνση προς τον ουρανό όπως φαίνεται από τη γη. Η διατομή της ουράνιας σφαίρας με το ισημερινό επίπεδο καθορίζει τον ουράνιο ισημερινό. Τα σημεία της διατομής με τον πολικό άξονα ονομάζονται ουράνιοι πόλοι.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση του μοντέλου ουράνιας σφαίρας

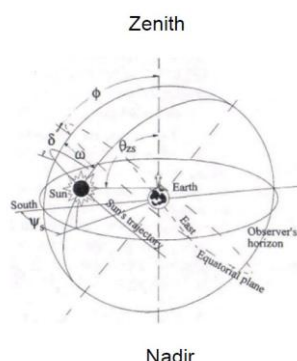
Η μετακίνηση της γης γύρω από τον ήλιο μπορεί να μετασχηματιστεί σε μια μετακίνηση του ήλιου σε σχέση με τη γη που λαμβάνεται ως σταθερή. Ο ήλιος σε αυτή τη περίπτωση ονομάζεται ελλειπτικός και σχηματίζει γωνία $23,45^\circ$ με τον ουράνιο ισημερινό. Ο ήλιος ολοκληρώνει αυτό το κύκλο μία φορά το χρόνο ενώ η ουράνια σφαίρα περιστρέφεται μία φορά την ημέρα γύρω από τη γη (που θεωρείται σταθερή). Κατ' αυτό τον τρόπο, ο ήλιος διαγράφει έναν κύκλο γύρω από τη γη. Η διάμετρος του κύκλου αλλάζει καθημερινά και γίνεται μέγιστη στις ισημερίες και ελάχιστη στα ηλιοστάσια.



Σχήμα 2.3: Θέση του ήλιου στον ουρανό, κατά την διάρκεια του έτους

Η κατακόρυφος που προέρχεται από οποιοδήποτε σημείο της γης τέμνει την ουράνια σφαίρα σε σημεία γνωστά ως ζενίθ και ναδίρ. Το συμπλήρωμα της γωνίας μεταξύ αυτής της κατακόρυφου και του πολικού άξονα είναι το

γεωγραφικό πλάτος ϕ . Λαμβάνεται ως θετικό στο βόρειο ημισφαίριο και ως αρνητικό στο νότιο ημισφαίριο. Ο τοπικός μεσημβρινός είναι ο μεγάλος κύκλος στη γη που περιέχει τους πόλους, ζενίθ και ναδίρ και παρουσιάζεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση του Ζενίθ και του Ναδίρ

Χρησιμοποιούμε δύο συντεταγμένες για να καθορίσουμε τη θέση ενός σημείου, παραδείγματος χάριν του ήλιου, στην ουράνια σφαίρα σχετικά με ένα σημείο στη γη.

Αυτές είναι:

1. η γωνία ζενίθ, θ_z , μεταξύ της κατακόρυφου και μιας γραμμής από τη γη στο εν λόγω σημείο
2. το αζιμούθιο ψ , μεταξύ των μεσημβρινών του σημείου και της θέσης του. Το συμπλήρωμα της γωνίας θ_z καλείται ανύψωση γ . Το αζιμούθιο ορίζεται ως θετικό προς τη δύση και αρνητικό προς την ανατολή. Ο ορίζοντας είναι ο κύκλος που αντιστοιχεί στο γεωμετρικό τόπο των σημείων που έχουν $\gamma = 0$.

Σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή, η γωνία ζενίθ (θ_{zs}) και το αζιμούθιο (Ψ_s) του ήλιου όσον αφορά ένα σημείο του γεωγραφικού πλάτους υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta \times \sin\phi + \cos\delta \times \cos\phi \times \cos\omega = \sin\gamma_s$$

$$\cos(\Psi_s) = \frac{(\sin\gamma_s \times \sin\phi - \sin\delta)}{(\cos\gamma_s \times \cos\phi)}$$

όπου το ω είναι μια νέα ποσότητα που ονομάζεται πραγματικός ηλιακός χρόνος ή ηλιακή ώρα. Στο μεσημέρι κάθε ημέρας το ω είναι ίσο με 0, το πρωί

μετριέται ως αρνητικό και το απόγευμα ως θετικό. Συσχετίζεται με τον τοπικό επίσημο χρόνο TO (ο χρόνος που δείχνει ένα ρολόι) από την εξίσωση:

$$\omega(\text{hours}) = \text{TO} - 12 + \text{ET} - \text{AO} - \frac{(\text{LL} - \text{LH})}{15}$$

όπου LL είναι το τοπικό γεωγραφικό μήκος και το LH είναι το αναφερόμενο γεωγραφικό μήκος στη ζώνη τοπικής ώρας (θετικό προς τη δύση και αρνητικό προς την ανατολή).

Αυτά τα γεωγραφικά μήκη μετριοούνται σε μοίρες. Το σύμβολο AO είναι ο χρόνος από τον οποίο τα ρολόγια τίθενται μπροστά από τη ζώνη τοπικής ώρας. Ο χρόνος ET δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση γνωστή ως εξίσωση του χρόνου:

$$\text{ET}(\text{minutes}) = (-0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) 229.18$$

Η γωνία ανατολής, ω_s μπορεί να βρεθεί, αφού στην ανατολή $\theta_{zS} = 90^\circ$. Η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$\omega_s = -\arccos(-\tan \delta \times \tan \varphi)$$

και η ω_s είναι πάντα αρνητική.

Η γωνία ηλιοβασιλέματος είναι ίση με $-\omega_s$ και το μήκος της ημέρας δίνεται από τη σχέση:

$$S_0 = 2|\omega_s|$$

Το παραπάνω σύστημα δίνει τις γωνίες θ_{zS} και Ψ_S σε σχέση με μια οριζόντια επιφάνεια. Επομένως, οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές απαιτούν να καθοριστεί τη θέση του ήλιου σχετικά με ένα κεκλιμένο επίπεδο.

Ο προσανατολισμός μιας επιφάνειας μπορεί να περιγραφεί από την κλίση β (η γωνία που διαμορφώνεται με το οριζόντιο επίπεδο) και το αζιμούθιο α της κάθετης στην επιφάνεια. Η γωνία της ηλιακής πρόσπτωσης μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης στην επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

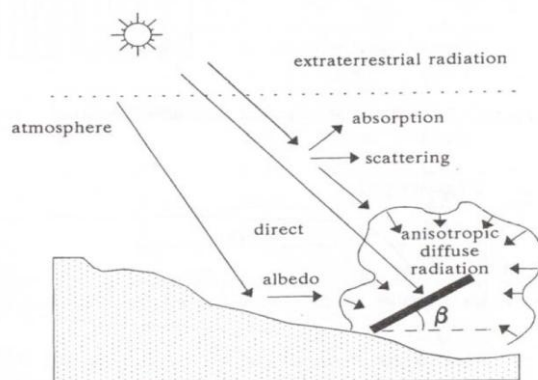
$$\cos\theta_s = \sin\delta \times \sin\varphi \times \cos\beta - \sin\delta \times \cos\varphi \times \sin\beta \times \cos\alpha + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\beta \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\varphi \times \sin\beta \times \cos\alpha \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\alpha \times \sin\omega \times \sin\beta$$

Αν και αυτή η έκφραση εμφανίζεται αρκετά περίπλοκη, είναι πολύ χρήσιμη στις περισσότερες περιπτώσεις. Στην περίπτωση των επιφανειών προσανατολισμένων προς το νότο η σχέση απλοποιείται στην παρακάτω: [3,4,6,7]

$$\cos\theta_s = \sin\delta \times \sin(\varphi-\beta) + \cos\delta \times \cos(\varphi-\beta) \times \cos\omega$$

2.3 Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ανάλυση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι αρκετά πολύπλοκη. Η μια είναι η συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων και η άλλη είναι η επιλογή με βάση τα δεδομένα της σωστής μεθόδου υπολογισμού της ακτινοβολίας. Στο σχήμα φαίνονται οι διαφορετικές συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα 2.5: Είδη ηλιακής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα δέκτη τοποθετημένο εκτός της ατμόσφαιρας της γης (εξωγήινη ακτινοβολία, extraterrestrial radiation) αποτελείται αποκλειστικά από την ακτινοβολία που ταξιδεύει σε μια ευθεία γραμμή από τον ήλιο στην επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει διότι το διάστημα δεν έχει υλικά, στα οποία η ακτινοβολία μπορεί να σκεδαστεί ή να ανακλαστεί. Καθώς η ακτινοβολία του ήλιου περνάει στη γήινη ατμόσφαιρα τροποποιείται από διάφορα στοιχεία που υπάρχουν σε αυτή. Μερικά από αυτά, όπως είναι τα

σύννεφα, προκαλούν ανάκλαση της ακτινοβολίας ενώ κάποια άλλα, όπως είναι το όζον, το οξυγόνο, ο άνθρακας και το εξατμισμένο νερό, την απορροφούν. Επίσης τα σταγονίδια του νερού και η σκόνη προκαλούν σκέδαση. Τέλος φτάνοντας στο έδαφος κάποια ποσότητα ακτινοβολίας απορροφάται και κάποια ανακλάται στην ατμόσφαιρα. Το αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η αποσύνθεση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφορετικά συστατικά:

1. Την απευθείας ακτινοβολία (direct radiation) που οφείλεται στις ακτίνες του φωτός που ταξιδεύουν σε μια ευθεία γραμμή από τον ήλιο στην επιφάνεια.
2. Την διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) που προέρχεται από τον ουρανό, εκτός από τον ηλιακό δίσκο, όπως είναι οι ακτίνες που έχουν σκεδαστεί στην ατμόσφαιρα.
3. Την ανακλώμενη στο έδαφος ακτινοβολία (albedo radiation)

Το άθροισμα αυτών των ειδών ακτινοβολίας δίνει την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια (global radiation). Οι κατευθυντήριες ιδιότητες της διάχυτης ακτινοβολίας εξαρτώνται σε μεγάλο ποσοστό από τη θέση, τη μορφή και τη σύνθεση των σύννεφων. Η γωνιακή κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας είναι επομένως μια σύνθετη λειτουργία που ποικίλλει με το χρόνο.

Η διάχυτη ακτινοβολία είναι ουσιαστικά ανισοτροπική όπου σε μερικές ειδικές περιπτώσεις (παραδείγματος χάριν, σε ένα εντελώς συννεφιασμένο ουρανό) είναι σχεδόν ισοτροπική. Το ποσό της ανακλώμενης στο έδαφος ακτινοβολίας επηρεάζεται πολύ από τη φύση του εδάφους που εμφανίζει μεγάλη ποικιλία (π.χ. χιόνι, βλάστηση, νερό, κ.λ.π). Σε ορισμένες περιπτώσεις το έδαφος μπορεί να είναι σκόπιμα χρωματισμένο λευκό. Αυτό αυξάνει την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία και συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της ολικής ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολία (irradiance) συμβολίζει την πυκνότητα της ισχύος που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, δηλαδή την ενέργεια που προσπίπτει ανά μονάδα χρόνου. Η ακτινοβόλιση (irradiation) είναι η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κατά τη διάρκεια κάποιας χρονικής περιόδου, παραδείγματος χάριν ωριαία ακτινοβόλιση ή ημερήσια ακτινοβόλιση. Η ακτινοβολία μετριέται σε kW/m^2 ενώ η ακτινοβόλιση μετριέται σε kWh/m^2 . [2,5,6,7]

Βιβλιογραφία

[1] Chong, K.K.; Wong, C.W. General formula for on-axis sun tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector. Sol. Energ. 2009, 83, 298-305.

[2] Solar Energy Engineering - Processes and Systems 2009 S. Kalogirou

[3]http://www.tm.teiher.gr/Portals/23/Shmeioseis/anan_piges_enegreias/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%20%CE%B3%CE%B5%CF%89%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%AF%CE%B1.pdf

[4]<http://translate.google.gr/translate?hl=el&langpair=en|el&u=http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/azel.html>

[5] <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>

[6] Δέρβος, Κ. Θ., (2009) *,Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις*, Εκδόσεις ΕΜΠ

[7] Καγκκάρκη, Κ., (1992), *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία

3.1 : Ιστορική αναφορά ανάπτυξης των PLC

Ο **Programmable Logic Controller** (PLC) είναι ένα ψηφιακό υπολογιστικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται ως πλατφόρμα για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων εφαρμογών. Τα PLC έχουν ένα ιδιαίτερα ευρύ πεδίο εφαρμογών από την αυτοματοποίηση της βαριάς βιομηχανίας έως απλές χρήσεις όπως ο έλεγχος φωτισμού. Αντίθετα με τους υπολογιστές γενικής χρήσης το PLC έχει σχεδιαστεί με την λογική να ανταποκριθεί σε απαιτήσεις όπως:

- αντίσταση/αντοχή στην δόνηση και επαφή.
- πολλαπλές εισοδοι και έξοδοι,
- ανοσία στον ηλεκτρικό θόρυβο, και
- μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας,

Τα προγράμματα του PLC που χρησιμοποιεί αποθηκεύονται στην μνήμη. Το PLC αποτελεί ένα παράδειγμα συστήματος πραγματικού χρόνου (real-time system) με την λογική ότι οι έξοδοι του προκύπτουν ως απόκριση στις συγκεκριμένες εισόδους εντός προκαθορισμένων χρονικών ορίων. Αποτελούν την εξέλιξη των μεθόδων κλασικού αυτοματισμού (relay logic) που κυριαρχούσαν στην βιομηχανία έως και την δεκαετία του 80. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε στην ανάγκη για πιο ευφυή και αξιόπιστα συστήματα αυτοματοποίησης. Ταυτόχρονα η ίδια η τεχνολογία κατέστη ικανή να παρέχει την γνώση για την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος. Έτσι, την δεκαετία του 70 αρχίζουν να εμφανίζονται τα πρώιμα PLC και να χρησιμοποιούνται σε αυτοκινητοβιομηχανίες, όπως η General Motors, για την αυτοματοποίηση της γραμμής παραγωγής της. Οι ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της ηλεκτρονικής έδωσαν τεράστια ώθηση στην ανάπτυξη των μονάδων αυτοματισμού έως και σήμερα όπου τα PLC κυριαρχούν στην βιομηχανία παρέχοντας πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες στους χρήστες τους.

Υπήρχαν πάντα δύο γνώμονες πάνω στους οποίους κινείται η φιλοσοφία του σχεδιασμού ενός PLC. Ο πρώτος έχει να κάνει με την αξιοπιστία. Τα PLC είναι μια ακριβή τεχνολογία παρόλο που έχουν πολύ μικρότερη υπολογιστική ισχύ ακόμα και από έναν μέτριο προσωπικό Η/Υ της αγοράς. Αυτό συμβαίνει γιατί σχεδιάζονται ώστε να προσφέρουν υψηλή σταθερότητα και αξιοπιστία στην λειτουργία τους καθώς και στην εμφάνιση βλαβών ενώ δεν υπάρχει τόσο μεγάλη απαίτηση σε ταχύτητα αφού οι αναγκαίοι χρόνοι απόκρισης είναι

εύκολα επιτεύξιμοι με την παρούσα τεχνολογία. Ο δεύτερος γνώμονας είναι η ευελιξία. Ένα PLC πρέπει να μπορεί να προγραμματίζεται, να συναρμολογείται και να εγκαθίσταται εύκολα, αποδοτικά και γρήγορα. [8,9]

3.2 Χαρακτηριστικά των PLC

Η διαφορά μεταξύ άλλων υπολογιστικών συστημάτων και του PLC, προκύπτει από το γεγονός ότι τα τελευταία είναι εξοπλισμένα έτσι ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν ακραίες καταστάσεις όπως σκόνη, υγρασία, ζέστη, κρύο. Επίσης τα PLC έχουν την δυνατότητα χρήσης σχετικά εκτεταμένου αριθμού εισόδων/ εξόδων. Οι έξοδοι ενός PLC μπορούν να ελέγχουν ηλεκτρικούς κινητήρες, υδραυλικούς και πνευματικούς κυλίνδρους, μαγνητικά relay και σωληνοειδή. Οι εισοδοί και έξοδοί του PLC μπορεί να είναι τοποθετημένες πάνω στο ίδιο το PLC ή να είναι συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο υπολογιστών το οποίο επικοινωνεί με αυτό.

Στην ουσία, το PLC αναγνωρίζει την κατάσταση ενός συστήματος, διαβάζοντας διάφορες μεταβλητές στις εισόδους του, και καθορίζει μέσα από μία διαδικασία, η οποία έχει προγραμματιστεί από τον χρήστη, τις επιθυμητές εξόδους.

Στόχος του PLC, σύμφωνα με τον "πατέρα" του PLC *Dick Morley*, είναι "να απαλλάξει την ανθρώπινη κοινωνία, από την ανάγκη διεκπεραίωσης επικίνδυνων για την υγεία των μελών της, εργασιών. Τέτοιες εργασίες υπάρχουν είτε στην αυτοκινητοβιομηχανία είτε στην τομέα της παρασκευής φαρμάκων, όπου ορισμένες θέσεις εργασίας χαρακτηρίζονται από υψηλό επίπεδο επικινδυνότητας ο οποίος απορρέει από την φύση των χημικών διεργασιών. [1,10]

3.3.1. Πλεονεκτήματα Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών.

Τα PLC έχουν σχεδόν απεριόριστη διάρκεια ζωής λόγω των ασθενών ρευμάτων που χρησιμοποιούν. Ταυτόχρονα συμβάλουν στην οικονομικότερη, από πλευράς κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργία της εγκατάστασης. Η γλώσσα προγραμματισμού είναι προσαρμοσμένη στο βιομηχανικό αυτοματισμό και άρα είναι προσιτή στο προσωπικό που μέχρι σήμερα συντηρούσε τους κλασσικούς πίνακες αυτοματισμού.

Στο στάδιο της μελέτης δεν υπάρχει πρόβλημα αν επαρκούν ή όχι οι επαφές των ρελέ, των χρονικών ή των εξωτερικών τερματικών. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει χωρίς κίνδυνο και μέσα σε πεδία ισχύος.

Επίσης η λειτουργία του αυτοματισμού μπορεί να αλλάξει πολύ εύκολα σε οποιοδήποτε στάδιο (μελέτη, κατασκευή, θέση σε λειτουργία ή αργότερα). Έχουν τη δυνατότητα επέκτασης. Δηλαδή αν προστεθεί κάποια καινούρια διαδικασία ή χρειάζεται κάποιος επιπλέον έλεγχος, μπορεί με την προσθήκη των κατάλληλων καρτών εισόδων/εξόδων (I/O), το ίδιο το PLC να την πραγματοποιήσει.

Σημαντικό είναι ότι μεγιστοποιούν την ταχύτητα της διαδικασίας παραγωγής και κατά συνέπεια μειώνουν πολύ γρήγορα το χρόνο απόσβεσης της εγκατάστασης. Ο αυτοματισμός παραδίνεται συντομότερα σε λειτουργία, επειδή η μελέτη μπορεί να γίνεται παράλληλα με την τοποθέτηση και συρμάτωση του ελεγκτή. Δεν υπάρχει το γνωστό πρόβλημα των «μη ενημερωμένων» σχεδίων του πίνακα αυτοματισμού μετά από λίγο καιρό. Ο ελεγκτής έχει πάντα κρατημένο «μέσα του» το τελευταίο πρόγραμμα, το οποίο μπορεί να διαβαστεί με μία συσκευή προγραμματισμού ή να εκτυπωθεί σε χαρτί.

Υπάρχει σημαντική οικονομία στο χώρο, τη συντήρηση (δεν υπάρχουν μηχανικές επαφές) και την κατανάλωση ενέργειας. Ο εντοπισμός βλαβών διευκολύνεται γιατί για κάθε εξωτερική εντολή υπάρχει αντίστοιχο LED. Επίσης, η ροή του αυτοματισμού μπορεί να παρακολουθείται άνετα, με τη βοήθεια μιας συσκευής προγραμματισμού.

Ένας ελεγκτής μπορεί να συνδεθεί με περιφερειακές μονάδες για επιτήρηση - έλεγχο της εγκατάστασης (οθόνη, εκτυπωτής, πληκτρολόγιο), καταργώντας το κλασικό μιμικό διάγραμμα και τον πίνακα χειρισμών. Επίσης, μπορεί να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή για ανταλλαγή στοιχείων. Όλες οι κάρτες είναι τοποθετημένες στον ίδιο δίαυλο επικοινωνίας (bus), πράγμα που επιταχύνει την διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών. [2,8]

3.3.2 Δομή των PLC.

Ένας ελεγκτής προγραμματιζόμενης λογικής εξαρτάται κυρίως από το πλήθος των στοιχείων που δίνουν εντολή σ' αυτόν (είσοδοι) και το πλήθος των στοιχείων που δέχονται εντολή απ' αυτόν (έξοδοι), καθώς και από το πλήθος των λειτουργιών που απαιτείται να κάνει ο αυτοματισμός (μέγεθος προγράμματος, απαιτούμενη μνήμη και δυνατότητες της κεντρικής μονάδας).

Ανεξάρτητα από τον τύπο και το μέγεθος, σε κάθε ελεγκτή συναντάμε τα εξής απαραίτητα στοιχεία:

- Μονάδες εισόδων
- Μονάδες εξόδων
- Κεντρική μονάδα (CPU) με τον μικροεπεξεργαστή και την μνήμη για το πρόγραμμα
- Πλαίσιο για τοποθέτηση των μονάδων
- Μονάδα τροφοδοσίας
- Κάρτα επικοινωνίας [2,3]

3.3.3. Χρόνος κύκλου

Ως χρόνος κύκλου ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία και εκτέλεση (μία φορά) των εντολών που είναι γραμμένες στην μνήμη, από την πρώτη μέχρι την τελευταία. Είναι αυτονόητο, ότι όσο πιο μεγάλο είναι το πρόγραμμα τόσο μεγαλύτερος είναι και ο χρόνος κύκλου.

Για να μπορούν να συγκριθούν διαφορετικοί τύποι ελεγκτών, οι κατασκευαστές δίνουν συνήθως τον μέσο χρόνο κύκλου για 1 K (= 1024) εντολές προγράμματος. Όσο μικρότερος είναι αυτός ο χρόνος, τόσο ταχύτερος είναι ο ελεγκτής. Η έννοια μέσος χρόνος κύκλου οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι εντολές δεν απαιτούν ίδιο χρόνο για την επεξεργασία τους. Έτσι, ανάλογα με τις εντολές που θα χρησιμοποιήσουμε, διαφοροποιείται και ο χρόνος αυτός. Συνήθως ο χρόνος κύκλου για ένα 1 K εντολές είναι της τάξεως μερικών msec. [2,8]

3.3.4. Λειτουργικό σύστημα PLC

Αρκετές ενέργειες του ελεγκτή γίνονται αυτόματα, χωρίς καμία απολύτως εντολή από το χρήστη, π.χ. όταν επανέρχεται η τάση μετά από μία διακοπή του δικτύου γίνεται μηδενισμός των βοηθητικών που ανήκουν στην περιοχή μνήμης χωρίς συγκράτηση. Ή πριν από την έναρξη κάθε κύκλου προγράμματος γίνεται μεταφορά σημάτων από τις κλέμες των μονάδων εισόδων στη μνήμη απεικόνισης καταστάσεων εισόδων (Process - Image Input Register). Επίσης μετά το τέλος κάθε κύκλου προγράμματος γίνεται μεταφορά της μνήμης απεικόνισης καταστάσεων εξόδων (Process - Image Output Register) στις αντίστοιχες κλέμες των μονάδων εξόδων.

Όλες αυτές οι απαραίτητες ενέργειες, οι οποίες προσδιορίζουν τι άλλο πρέπει να κάνει ο ελεγκτής παράλληλα με το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη, το οποίο εμείς προγραμματίζουμε, αποτελούν το λειτουργικό πρόγραμμα του ελεγκτή. Το πρόγραμμα αυτό είναι συνήθως αποθηκευμένο σε μια μνήμη ROM μέσα στην κεντρική μονάδα και περιέχει εντολές που δεν μπορούν να διαβαστούν από εμάς, και οι οποίες καθορίζουν τις παραπάνω αντιδράσεις. [2,8]

Το λειτουργικό σύστημα αποτελεί το σύνολο που περιέχει όλες τις εντολές και τις δηλώσεις που ελέγχουν τις πηγές του συστήματος, τις διαδικασίες που χρησιμοποιούν αυτές τις πηγές, καθώς και περιοχές λειτουργίας όπως αποθήκευση δεδομένων στην περίπτωση πτώση της τάσης του δικτύου, ενεργοποίηση τάξεων προτεραιότητας, κλπ.

Το λειτουργικό σύστημα αποτελεί ένα μέρος της κεντρικής μονάδας, στο οποίο ο χρήστης δεν έχει πρόσβαση γραφής. Εντούτοις, μπορούμε να φορτώσουμε ξανά το σύστημα αυτό από μια μονάδα μνήμης, π.χ. στην περίπτωση της ενημέρωσης με τις τελευταίες αλλαγές του προγράμματος. Το πρόγραμμα του χρήστη αποτελεί το σύνολο όλων των εντολών και δηλώσεων, στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία του προγράμματος, για την οδήγηση των σημάτων, μέσα από την οποία η όλη διαδικασία επηρεάζεται ανάλογα με τη προκαθορισμένη εργασία ελέγχου. [4,8]

3.3.5 Προσπέλαση προγράμματος

Το πρόγραμμα του χρήστη αποτελείται από διάφορα μέρη τα οποία η CPU εκτελεί ανάλογα με το αν λαμβάνουν χώρα κάποια συγκεκριμένα γεγονότα. Ένα τέτοιο γεγονός μπορεί να είναι η εκκίνηση του αυτόματου συστήματος, μια διακοπή ή η ανίχνευση σφάλματος. Τα προγράμματα που εξαρτώνται από τέτοια γεγονότα χωρίζονται σε τάξεις προτεραιότητας που καθορίζουν την σειρά εκτέλεσης των μερών του προγράμματος όταν συμβαίνουν συγκεκριμένα γεγονότα.

Το χαμηλής τάξης προτεραιότητας πρόγραμμα είναι το κυρίως πρόγραμμα, το οποίο προσπελαίνεται κυκλικά από την κεντρική μονάδα ενώ όλα τα άλλα γεγονότα μπορούν να διακόψουν το κυρίως πρόγραμμα σε οποιοδήποτε σημείο. Η CPU τότε εκτελεί την ρουτίνα διακοπής ή ρουτίνα αποσφαλμάτωσης και επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα. Ένα συγκεκριμένο μπλοκ οργάνωσης (organization block OB) συναντάται σε κάθε γεγονός. Τα μπλοκ οργάνωσης αναπαριστούν τις τάξεις προτεραιότητας στο πρόγραμμα του χρήστη.

Πριν ακόμα ξεκινήσει η CPU να εκτελεί το κυρίως πρόγραμμα, εκτελεί μια ρουτίνα εκκίνησης. Αυτή η ρουτίνα μπορεί να ενεργοποιηθεί με το άνοιγμα της κεντρικής τάσης τροφοδοσίας, από τον επιλογέα διακόπτη που υπάρχει

στην CPU ή μέσω ενός προγραμματιστή. Το κυρίως πρόγραμμα βρίσκεται μέσα στο μπλοκ οργάνωσης OB1, το οποίο η κεντρική μονάδα επεξεργασίας εκτελεί.

Αφού έχει τελειώσει η εκτέλεση του OB1 (τέλος προγράμματος), η CPU επιστρέφει στο λειτουργικό σύστημα και μόλις καλέσει για εκτέλεση διάφορες λειτουργίες του συστήματος, όπως ενημέρωση του πίνακα διευθύνσεων των εξόδων, καλεί, ξανά, για άλλη μια φορά το OB1. Γεγονότα που μπορούν να διακόψουν το πρόγραμμα είναι οι αιτήσεις διακοπών και τα σφάλματα. Οι διακοπές μπορούν να ζητηθούν από την διαδικασία (hardware interrupts) ή από την CPU (διακοπές εποπτείας).

Όσον αφορά τα σφάλματα, υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ συγχρονισμένων και ασύγχρονων σφαλμάτων. Το ασύγχρονο σφάλμα είναι ανεξάρτητο από τον κύκλο του προγράμματος, για παράδειγμα διακοπή τροφοδοσίας σε μια μονάδα επέκτασης ή διακοπή που έχει προκληθεί από την αντικατάσταση της μονάδας. Το σύγχρονο σφάλμα προκαλείται από την εκτέλεση του προγράμματος, όπως η αναφορά σε μη υπαρκτή διεύθυνση ή η δημιουργία σφάλματος μετατροπής τύπων δεδομένων. Ο τύπος και ο αριθμός των καταχωρημένων γεγονότων, καθώς και τα ανάλογα μπλοκ οργάνωσης εξαρτώνται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. [3,4]

3.3.6. Δομή προγράμματος

Χωρίζουμε το πρόγραμμα σε όσα μέρη θέλουμε με σκοπό να το διαβάζουμε και να το αντιλαμβανόμαστε καλύτερα και ευκολότερα. Κάθε μέρος του προγράμματος πρέπει να έχει τεχνολογική και λειτουργική βάση. Αυτού του είδους τα μέρη ονομάζονται «Μπλοκ». Ένα μπλοκ αποτελεί ένα μέρος του προγράμματος του χρήστη που καθορίζεται από τις λειτουργίες του, τη δομή και τον σκοπό της ύπαρξης του.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μπλοκ για διάφορους σκοπούς:

- Μπλοκ συστήματος. Τα μπλοκ αυτά περιέχουν το πρόγραμμα και τα δεδομένα του συστήματος.
- Στάνταρτ μπλοκ. Τα μπλοκ αυτά αποτελούν το κλειδί λειτουργίας των οδηγών (drivers) των ειδικών καρτών.
- Μπλοκ χρήστη. Τα μπλοκ αυτά περιέχουν το πρόγραμμα και τα δεδομένα του χρήστη.

Μπλοκ συστήματος

Τα μπλοκ συστήματος αποτελούν μέρος του λειτουργικού συστήματος. Μπορούν να περιέχουν προγράμματα (λειτουργίες συστήματος) ή μπλοκ λειτουργιών ή δεδομένα(μπλοκ δεδομένων συστήματος). Τα μπλοκ συστήματος πραγματοποιούν έναν αριθμό από σημαντικές λειτουργίες του συστήματος, προσβάσιμες στο χρήστη, όπως είναι ο χειρισμός του εσωτερικού ρολογιού της CPU, ή οι διάφορες λειτουργίες επικοινωνίας. Μπορούμε να καλέσουμε τις λειτουργίες του συστήματος και τα μπλοκ λειτουργιών του συστήματος, αλλά δεν μπορούμε να τα διαμορφώσουμε ή να τα προγραμματίσουμε. Τα μπλοκ από μόνα τους δεν διατηρούν χώρο στην μνήμη.

Μόνο οι κλήσεις των μπλοκ και τα στιγμιαία μπλοκ δεδομένων των μπλοκ λειτουργιών του συστήματος είναι στην μνήμη.

Μπλοκ χρήστη

Τα μεγάλα και περίπλοκα προγράμματα «δομούνται» (διαχωρίζονται) σε μπλοκ τα οποία εν μέρη είναι απαραίτητα. Μπορούμε να διαλέξουμε μεταξύ των διαφόρων τύπων των μπλοκ, ανάλογα με την εφαρμογή:

- Μπλοκ οργάνωσης (OB).

Τα προαναφερόμενα μπλοκ συμβάλουν στην επικοινωνία μεταξύ του λειτουργικού συστήματος και του προγράμματος του χρήστη. Οι κεντρικές μονάδες επεξεργασίας καλούν τα μπλοκ οργάνωσης όταν συγκεκριμένα γεγονότα λαμβάνουν χώρα. π.χ. στην περίπτωση διακοπής. Το κυρίως πρόγραμμα βρίσκεται στο μπλοκ οργάνωσης OB1. Τα άλλα μπλοκ οργάνωσης έχουν συγκεκριμένους αριθμούς βασισμένους στο είδος των γεγονότων, τα οποία καλούνται να χειριστούν.

- Μπλοκ λειτουργίας (FB).

Αποτελούν μέρος του προγράμματος του οποίου οι κλήσεις μπορούν να προγραμματιστούν μέσω παραμέτρων του μπλοκ. Οι μεταβλητές μνήμης που περιέχονται σε ένα μπλοκ δεδομένων το οποίο με την σειρά του περιλαμβάνεται στην κλήση του μπλοκ λειτουργίας. Επίσης είναι δυνατόν σε κάθε κλήση να περιέχεται και διαφορετικό μπλοκ δεδομένων (με την ίδια δομή δεδομένων άλλα διαφορετικές τιμές μεταβλητών).

- Μπλοκ δεδομένων (DB).

Αυτά τα μπλοκ περιέχουν τα δεδομένα του προγράμματος μας. Προγραμματίζοντας τα καθορίζουμε σε ποια μορφή θα σωθούν τα δεδομένα (σε ποιο μπλοκ, με ποια σειρά και με τι τύπο δεδομένων). Υπάρχουν δύο τρόποι χρήσης των μπλοκ

δεδομένων: ως καθολικά και ως στιγμιαία μπλοκ. Ένα καθολικό μπλοκ δεδομένων είναι ένα «ελεύθερο» μπλοκ μέσα στο πρόγραμμα του χρήστη και δεν περιέχεται σε ένα κωδικοποιημένο μπλοκ.

Ένα στιγμιαίο μπλοκ δεδομένων όμως, περιέχεται σε ένα μπλοκ λειτουργίας και αποθηκεύει μέρος των δεδομένων του μπλοκ λειτουργίας. Ο αριθμός των μπλοκ ανά τύπο μπλοκ και το μήκος τους εξαρτάται από την CPU. Οι αριθμοί των μπλοκ οργάνωσης και το πλήθος τους είναι καθορισμένα. Αναθέτονται από το λειτουργικό σύστημα της κεντρικής μονάδας όπου μπορούμε να ορίσουμε μόνοι μας τον αριθμό του μπλοκ των άλλων ειδών των μπλοκ, αρκεί αυτός να βρίσκεται μέσα σε καθορισμένα όρια. Επίσης έχουμε την επιλογή να ονομάσουμε κάθε μπλοκ μέσω του πίνακα συμβόλων και στη συνέχεια να αναφερόμαστε σ' αυτά με το όνομα τους. [5,8]

3.3.7. Μορφές προγραμματισμού

Για την περαιτέρω ανάλυση ενός περίπλοκου αυτοματισμού θα πρέπει να χωρίσουμε την εφαρμογή σε μικρότερα μέρη ανάλογα με την δομή της διαδικασίας που πρέπει να ελεγχθεί. Μετά μπορούμε να διαμορφώσουμε τα επιμέρους κομμάτια καθορίζοντας τις λειτουργίες και διοχετεύοντας τα εσωτερικά σήματα προς την διαδικασία ή άλλα μέρη. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να εφαρμοστεί και στον προγραμματισμό μας. Μ' αυτόν τον τρόπο η δομή του προγράμματος μας ανταποκρίνεται στον διαχωρισμό της εφαρμογής.

Ένα τέτοιο πρόγραμμα μπορεί να διαμορφωθεί πιο εύκολα και να προγραμματιστεί σε μέρη, ακόμα και από διαφορετικά άτομα, στην περίπτωση που το πρόγραμμα είναι πολύ μεγάλο. Τέλος, χωρίζοντας το πρόγραμμα σε μέρη είναι πιο εύκολη η δοκιμή και η αποσφαλμάτωση του. Η δομή του προγράμματος του χρήστη εξαρτάται από το μέγεθος και τις λειτουργίες του.

Οι μορφές προγραμματισμού είναι οι εξής:

- Μερικός προγραμματισμός.

Ο μερικός προγραμματισμός βασίζεται στον γραμμικό προγραμματισμό μόνο που το πρόγραμμα χωρίζεται σε μπλοκ. Οι αιτίες για τον διαχωρισμό του προγράμματος σε μικρότερα μέρη είναι είτε το γεγονός ότι το πρόγραμμα είναι πολύ μεγάλο για το OB1, είτε επειδή θέλουμε να διαβάζεται πιο εύκολα. Τα μπλοκ τότε καλούνται με την σειρά. Μπορούμε επίσης να χωρίσουμε το πρόγραμμα ενός μπλοκ σε άλλα μπλοκ όπως κάναμε με το OB1. Αυτή η μέθοδος μας επιτρέπει να καλούμε συσχετισμένες λειτουργίες της διαδικασίας μέσα από ένα και το αυτό μπλοκ. Το πλεονέκτημα αυτής της μορφής

προγραμματισμού είναι ότι αν και το πρόγραμμα είναι γραμμικό μπορούμε να το αποσφαλματώσουμε σε μέρη (απλά μόνο καλώντας τα μπλοκ).

- Γραμμικός προγραμματισμός.

Εδώ όλο το κυρίως πρόγραμμα είναι το μπλοκ οργάνωσης OB1. Κάθε τρέχον μονοπάτι είναι σε ξεχωριστό network. Όταν διορθώνουμε και αποσφαλματώνουμε, μπορούμε να αναφέρουμε το κάθε network απευθείας από τον αριθμό του.

- Δομημένος προγραμματισμός.

Ο δομημένος προγραμματισμός χρησιμοποιείται όταν το επινοημένο σχέδιο είναι εξαιρετικά ακριβό, όταν θέλουμε να δημιουργήσουμε λειτουργίες προγράμματος και όταν πρέπει να λυθούν περίπλοκα προβλήματα. Μ' αυτήν την μέθοδο χωρίζουμε το πρόγραμμα σε κομμάτια (μπλοκ) με ενσωματωμένες λειτουργίες ή σε μπλοκ που εξυπηρετούν έναν συγκεκριμένο σκοπό λειτουργίας και τα οποία ανταλλάσσουν όσο το δυνατόν λιγότερα σήματα με τα άλλα μπλοκ.

Αναθέτοντας σε κάθε κομμάτι μια συγκεκριμένη λειτουργία δημιουργούμε ευανάγνωστα μπλοκ με απλούστερη επικοινωνία με τα άλλα μπλοκ. Τέλος, η οργάνωση του προγράμματος καθορίζει την σειρά με την οποία η κεντρική μονάδα επεξεργασίας θα εκτελέσει τα μπλοκ που έχουμε δημιουργήσει. Για να οργανώσουμε το πρόγραμμά μας, προγραμματίζουμε τις κλήσεις των μπλοκ με την σειρά που επιθυμούμε. Η σειρά αυτή θα πρέπει να είναι ανάλογη με την σειρά των επιμέρους λειτουργιών της διαδικασίας που θέλουμε να ελέγξουμε. [3,6,7,8]

3.3.8. Γλώσσες προγραμματισμού

Οι ελεγκτές προγραμματίζονται συνήθως σε μια από τις παρακάτω πια διεθνώς τυποποιημένες μορφές γλωσσών:

- Λίστα εντολών (STATEMENTLIST = STL)
- Σχέδιο επαφών (LADDER DIAGRAM = LAD)
- Λογικό διάγραμμα (FUNCTION BLOCK DIAGRAM = FBD)

Οι μορφές αυτές έχουν τυποποιηθεί κατά DIN και IEC και αποτελούν κατά κάποιο τρόπο τη «γλώσσα» στον προγραμματιζόμενο αυτοματισμό. Μπορούμε να πούμε από την αρχή, ότι οι μορφές σχεδιασμού επαφών (LAD) και λογικού διαγράμματος (FBD) είναι γραφικές μορφές παράστασης, δηλ. το

πρόγραμμα «ζωγραφίζεται» πάνω στην οθόνη μιας συσκευής προγραμματισμού.

Το σχέδιο επαφών χρησιμοποιεί λίγο πολύ σύμβολα του κλασσικού συνδεσμολογικού σχεδίου, π.χ. επαφές, πηνία, κτλ. Αντίθετα, το λογικό διάγραμμα χρησιμοποιεί σύμβολα λογικών πυλών, π.χ. πύλη AND, πύλη OR. κλπ.[8,11]

3.3.9. Σύγκριση γλωσσών προγραμματισμού

Η «μητρική» γλώσσα κάθε ελεγκτή είναι αναμφίβολα η λίστα εντολών, η οποία έχει και τις μεγαλύτερες δυνατότητες και ευελιξία. Οπωσδήποτε, και οι δύο γραφικές μορφές (σχέδιο επαφών, λογικό διάγραμμα) έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα της καλύτερης εποπτείας «με μία ματιά».

3.3.9.1. Πλεονεκτήματα λίστας εντολών (STL) σε σχέση με τις γραφικές μορφές (LAD, FBD)

Ο χειρισμός κατά την πληκτρολόγηση του προγράμματος είναι πολύ απλούστερος. Αντίθετα, για την πληκτρολόγηση ενός στοιχείου στις γραφικές μορφές, π.χ. μιας επαφής, πρέπει ο δείκτης (cursor) στην οθόνη να βρίσκεται στη σωστή θέση. Γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια τη σειρά, με την οποία ο μικροεπεξεργαστής επεξεργάζεται το πρόγραμμα (τη μία εντολή ύστερα από την άλλη).

Είναι πολύ προσιτή στην χρήση σε όποιον έχει ασχοληθεί ήδη με προγραμματισμό κάθε είδους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικροί, φτηνοί, φορητοί προγραμματιστές χειρός (ενώ αντίθετα για τη «σχεδίαση» μιας γραφικής μορφής απαιτείται οθόνη, αν θέλουμε να έχουμε εποπτεία).

Επίσης έχει τις μεγαλύτερες δυνατότητες, γιατί υπάρχουν εντολές, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να παρασταθούν γραφικά, αν και στο κοντινό μέλλον αυτό θα διορθωθεί. Πρέπει να τονιστεί, ότι ένα ηλεκτρολογικό συνδεσμολογικό σχέδιο, πολύ σπάνια μπορεί να προγραμματιστεί όπως είναι, χωρίς μετατροπές, σε σχέδιο επαφών. Αν σαν βάση για τον προγραμματισμό χρησιμοποιηθεί ένα κλασσικό συνδεσμολογικό σχέδιο με ρελέ ή ένα λογικό διάγραμμα (flow-chart), τότε η «μετάφραση» τους σε λίστα εντολών είναι το ίδιο εύκολη με την «μετάφραση» τους σε σχέδιο επαφών ή λογικό διάγραμμα αντίστοιχα (αν όχι ευκολότερη πολλές φορές).

Τέλος καταλαμβάνει μικρότερο χώρο στη μνήμη για την αποθήκευση του προγράμματος.

3.3.9.2. Μειονεκτήματα λίστας εντολών (STL) σε σχέση με τις γραφικές μορφές (LAD, FBD)

Ένα πρόγραμμα γραμμένο σε λίστα εντολών δεν έχει την ίδια εποπτεία «με μια ματιά», την οποία έχουν οι γραφικές μορφές. Με τις δυνατότητες όμως σχολιασμού προγράμματος, που παρέχουν οι σύγχρονες συσκευές προγραμματισμού, το μειονέκτημα αυτό παύει να είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Η παρακολούθηση του αυτοματισμού σε λειτουργία (πάνω σε μια συσκευή προγραμματισμού οθόνης συνδεδεμένη στον ελεγκτή) είναι απλούστερη και πιο εποπτική, αν το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε κάποια από τις δύο γραφικές μορφές. [7,9]

Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.ccontrols.com/pdf/Extv4n3.pdf>
- [2] Jay F. Hooper, "Introduction to PLCs", Carolina Academic Press, second edition, 2006, p. 108
- [3] http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Programmable_Controllers_3E.pdf
- [4] E. A. Parr, "Programmable Controllers : an engineer's guide", Newnes, third edition, 2003, p. 429
- [5] Peter Rohner, "Automation with Programmable logic Controllers", KNSW Press, 1996, p. 226
- [6] John R. Hackworth and Frederick D. Hackworth, Jr., "Programmable logic Controllers: Programming methods and Applications", Pearson/Prentice Hall, 2004, p. 303
- [7] Kelvin T. Erickson, "Programmable Logic Controllers : an emphasis on design and application", Dogwood Valley Press, 2005, p. 1460
- [8] <http://www.plcmanual.com/>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller
- [10] <http://www.barn.org/FILES/historyofplc.html>
- [11] http://www.eod.gvsu.edu/~jackh/books/plcs/pdf/plcbook5_0.pdf

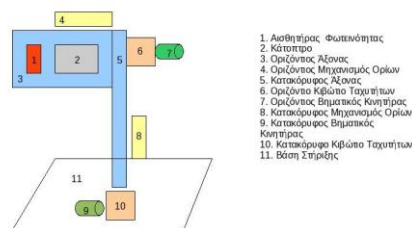
4.1 Δομή Συστήματος

Το σύστημα αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- **Υλικό ελέγχου της βάσης :** Το υλικό ελέγχου της βάσης παρέχει την δυνατότητα λήψης εντολών, από την παράλληλη θύρα του υπολογιστή, και την μετάδοση τους στο υλικό οδήγησης βηματικών κινητήρων. Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα λήψης των μετρήσεων από τους αισθητήρες.
- **Υλικό οδήγησης Βηματικών Κινητήρων :** Το υλικό οδήγησης βηματικών κινητήρων λαμβάνει εντολές, από τον υπολογιστή, μέσω του υλικού ελέγχου βάσης και τις μετατρέπει στους κατάλληλους παλμούς για την κίνηση των βηματικών κινητήρων.
- **Βάση περιστροφής κατόπτρου :** Η βάση περιστροφής κατόπτρου παρέχει την δυνατότητα περιστροφής του κάτοπτρου σε δυο άξονες.
- **Οδηγούς για την επικοινωνία με το υλικό :** Ο οδηγός για την επικοινωνία με το υλικό, είναι το λογισμικό, που αναλαμβάνει όλη την διεπαφή με το υλικό του συστήματος.
- **Αισθητήρες :** Οι αισθητήρες λαμβάνουν την φωτεινότητα και της μετατρέπουν σε μετρήσιμη τάση (0-5V).
- **Εφαρμογή ανίχνευσης φωτεινών πηγών και κατεύθυνσης αντανάκλασης :** Η εφαρμογή ανίχνευσης φωτεινών πηγών αποτελεί το κεντρικό λογισμικό τους συστήματος και υλοποιεί τους αλγόριθμους για την εύρεση των φωτεινών πηγών και την κατεύθυνση της αντανάκλασης του ηλιοστάτη στην επιθυμητή περιοχή.
- **Εφαρμογή αποσφαλμάτωσης του συστήματος :** Η εφαρμογή αποσφαλμάτωσης του συστήματος προσφέρει διάφορες διαδικασίες, σχετικά με την ορθή λειτουργία τόσο του υλικού όσο και του λογισμικού.
- **Εφαρμογή λήψης και απεικόνισης μετρήσεων:** Η εφαρμογή λήψης και απεικόνισης μετρήσεων προσφέρει φιλτραρίσματα και απεικονίσεις των μετρήσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων.
[1,8]

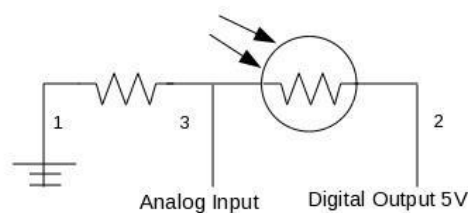
4.2 Μηχανική Βάση Περιστροφής Κατόπτρου

Η βάση περιστροφής έχει την δυνατότητα περιστροφής του κατόπτρου σε δυο άξονες. Η σχηματική αναπαράσταση της βάσης φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.2: Βάση περιστροφής κατόπτρου

Ο αισθητήρας φωτεινότητας μετράει τη φωτεινότητα που δέχεται το κάτοπτρο. Αποτελείται από δυο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά. Η μια αντίσταση είναι φωτοαντίσταση ενώ η άλλη είναι η φωτοαντίσταση η οποία έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την αντίσταση της ανάλογα με το φως στο οποίο εκτίθεται. Το κύκλωμα του αισθητήρα αντίστασης παρουσιάζεται παρακάτω:



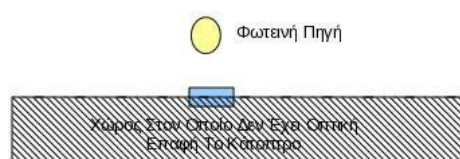
Σχήμα 4.3: Αισθητήρας φωτεινότητας με φωτοαντίσταση

Το κύκλωμα έχει τρεις ακροδέκτες. Ο πρώτος ακροδέκτης γειώνεται ενώ ο δεύτερος συνδέεται με ψηφιακή έξοδο από το υλικό ελέγχου βάσης. Η ψηφιακή έξοδος βγάζει έξοδο 5 V κάθε φορά που ενεργοποιείται. Για να μην υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, τροφοδοτείται με τάση ο αισθητήρας, μόνο όταν είναι επιθυμητή η μέτρηση της τιμής του. Η τρίτη έξοδος βρίσκεται ανάμεσα στις δυο αντιστάσεις.

Ανάλογα με το φως που δέχεται η φωτοαντίσταση μεταβάλλεται και η τάση που έχει η τρίτη έξοδος. Όσο περισσότερο φως δέχεται τόσο μικρότερη γίνεται η αντίσταση της όπου σαν επακόλουθο μεγαλώνει και η τάση στον τρίτο ακροδέκτη. Αυτή οδηγείται σε μια αναλογική είσοδο του υλικού ελέγχου βάσης με την οποία είναι εφικτή η μέτρηση της. Ο βασικός σκελετός της βάσης πρέπει να είναι κατασκευασμένος από δύο κομμάτια ελαφριάς λαμαρίνας.

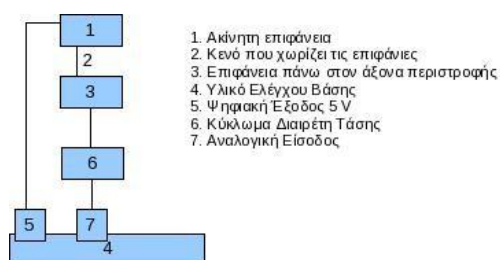
Το πρώτο κομμάτι (5) αποτελεί τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής και το δεύτερο τον οριζόντιο (3). Στόχος είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύς, έτσι ώστε να είναι εφικτή η περιστροφή του από τους βηματικούς κινητήρες. Επιπλέον το κόστος της λαμαρίνας είναι πολύ μικρό και είναι ένα υλικό το οποίο μπορεί κάποιος να του δώσει το σχήμα που θέλει εύκολα.

Η βάση διαθέτει μηχανισμούς ελέγχου ορίων περιστροφής τόσο για τον κατακόρυφο όσο και για τον οριζόντιο άξονα. Οι μηχανισμοί αυτοί επιτρέπουν στο υλικό ελέγχου της βάσης να αναγνωρίζει, τότε κάποιος άξονας της έχει φτάσει στο όριο που έχει καθοριστεί. Η βάση δεν επιτρέπεται να κάνει πλήρη περιστροφή καθώς θεωρείται ότι το κάτοπτρο έρχεται σε επαφή με την πηγή φωτός, μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος θέσεων των αξόνων, όπως δείχνει το σχήμα.



Σχήμα 4.6: Όρια περιστροφής βάσης

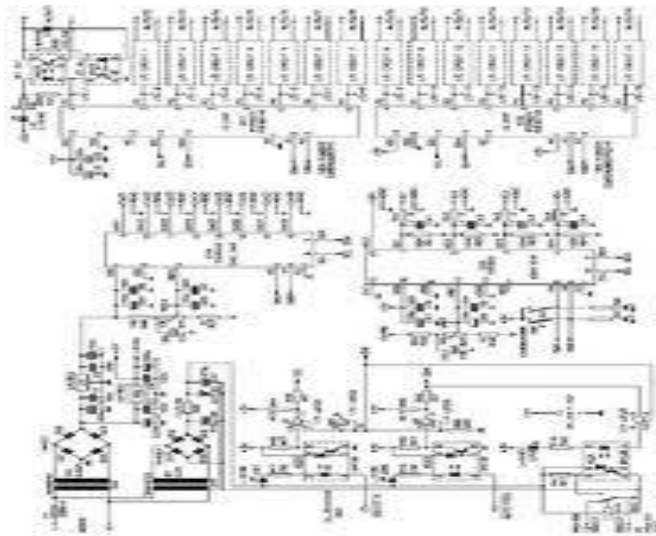
Ο μηχανισμός ελέγχου ορίου, αποτελείται από δυο μεταλλικές επιφάνειες όπου η μια επιφάνεια είναι ακίνητη στην θέση του ορίου, που έχει καθοριστεί, και η άλλη κινείται. [1,2,8]



Σχήμα 4.7: Αισθητήρας ανίχνευσης ορίων

4.3 Υλικό Ελέγχου Βάσης

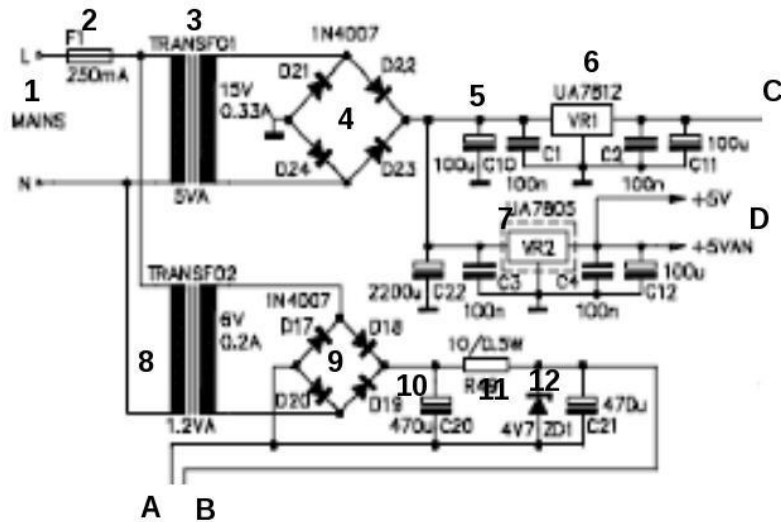
Στο υλικό ελέγχου της βάσης γίνεται η λήψη εντολών, από την παράλληλη θύρα του υπολογιστή, και η μετάδοση τους στο υλικό οδήγησης βηματικών κινητήρων. Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα λήψης των μετρήσεων από τους αισθητήρες. Για παράδειγμα να χρησιμοποιήσουμε την πλακέτα διεπαφής K8000.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα πλακέτας υλικού διεπαφής

Η πλακέτα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα 220V και 50Hz. Έχει μια θύρα η οποία επικοινωνεί με την παράλληλη του υπολογιστή και είναι οπτικά μονωμένη (optocoupler). Επιπλέον διαθέτει 16 ψηφιακές εισόδους – εξόδους οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν να είναι είτε εισοδοί είτε εξοδοί και είναι και αυτές οπτικά μονωμένες. Επίσης διαθέτει 8 αναλογικές εξόδους των 6 bit και 1 αναλογική έξοδο των 8 bit. Πέρα από αυτά προσφέρει 4 αναλογικές εισόδους των 8 bit.

Τέλος παρέχει την μια έξοδο των 5 V DC, μια έξοδο γείωσης, μια έξοδο SLC, μια έξοδο SDA και μια έξοδο DIS για επικοινωνία με το πρωτόκολλο I2C. Η πλακέτα χωρίζεται σε πέντε μέρη. Σε αυτό που μετασχηματίζει το οικιακό ρεύμα σε κατάλληλη μορφή για τα κυκλώματα. Στο κύκλωμα που αναλαμβάνει την επικοινωνία με την παράλληλη, σε αυτό που ελέγχει τις ψηφιακές εισόδους-εξόδους, στο τμήμα που ελέγχει τις αναλογικές εξόδους των 6 bit και τέλος σε αυτό με τις αναλογικές εισόδους.



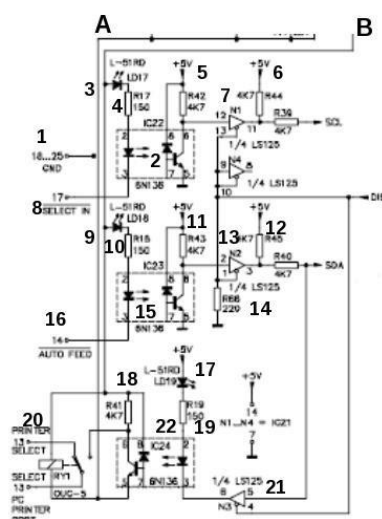
Σχήμα 4.9: Τμήμα μετασχηματισμού

Αναλυτικότερα το τμήμα μετασχηματισμού αποτελείται από:

1. Η κύρια πηγή τροφοδοσίας. Για την Ελλάδα είναι 220 V στα 50 Hz.
2. Ασφάλεια 250mA. Προστατεύει το σύστημα από βραχυκυκλώματα.
3. Πυκνωτές οι οποίοι εξομαλύνουν την τάση και αφαιρούν τους θορύβους υψηλών συχνοτήτων.
4. Αυτή είναι μια γέφυρα η οποία μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε θετικό με παλμούς. Η τάση εξόδου είναι μέχρι 19.8 V
5. Μετασχηματιστής σε 15 V / 0.33 A.
6. Το UA7512 είναι ένας ρυθμιστής τάσης 12V ο οποίος παράγει πολύ σταθερή τάση και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του DAC ελεγκτή εξόδων.
7. Ο UA7805 είναι ένας ρυθμιστής τάσης 5V ο οποίος παράγει πολύ σταθερή τάση και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των ψηφιακών κυκλωμάτων.
8. Μετασχηματιστής σε 6V / 0.2A.
9. Αυτή είναι μια γέφυρα η οποία μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε θετικό με παλμούς. Η τάση εξόδου είναι μέχρι 7 V.
10. Πυκνωτές οι οποίοι εξομαλύνουν την τάση.

11. Αντίσταση η οποία μειώνει το ρεύμα, που περνάει από την zener δίοδο. Αυτή η αντίσταση δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλη γιατί η δίοδος μπορεί να καταστραφεί, ούτε πολύ μικρή γιατί δεν θα μπορεί να σταθεροποιηθεί.

12. Zener δίοδος 4.7 V που χρησιμοποιείται για σταθεροποίηση της τάσης.



Σχήμα 4.10: Τμήμα επικοινωνίας με την παράλληλη

Αναλυτικότερα το τμήμα επικοινωνίας με την παράλληλη αποτελείται από:

1. Οι γραμμές 8-25 της παράλληλης θύρας συνδέονται στην γείωση διότι δεν χρησιμοποιούνται.
2. Το ολοκληρωμένο IC22 είναι ένας οπτικός μονωτής που χρησιμοποιείται για να περάσουν τα SCL σήματα από τον υπολογιστή στην πλακέτα. Όταν το Select IN της παράλληλης είναι χαμηλό τότε το εσωτερικό Led του οπτικού μονωτή θα ανάψει και η έξοδος του θα συνδεθεί. Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος SCL του K8000 θα είναι και αυτή χαμηλή.
3. Το Led 17 φανερώνει την κατάσταση της SCL γραμμής, η οποία καθορίζεται από την Select In γραμμή της παράλληλης. Το Led θα ανάψει όταν η γραμμή είναι χαμηλά. Αυτό σημαίνει ότι το Led δεν ανάβει όταν η κάρτα δεν χρησιμοποιείται καθώς το I2C απαιτεί τις γραμμές ψηλά όταν δεν είναι ενεργές.
4. Η R17 αντίσταση χρησιμοποιείται για να περιορίζει το ρεύμα του Led 17 και του εσωτερικού Led του οπτικού μονωτή IC22.

5. Η αντίσταση αυτή χρησιμοποιείται για ανύψωση τάσης. Όταν ο μονωτής IC22 επιτρέπει την διέλευση τότε η έξοδος θα είναι 0. Αντίθετα όταν δεν άγει θα είναι 1.
6. Αυτή η αντίσταση χρησιμοποιείται για την ανύψωση τάσης για την γραμμή SCL (serial clock). Απαιτείται για την ορθή λειτουργία του I2C.
7. Είναι ένας buffer στον οποίο η ψηφιακή έξοδος είναι η ίδια με την ψηφιακή είσοδο. Ο buffer αυτός μπορεί να απενεργοποιηθεί εφαρμόζοντας 1 στην είσοδο ενεργοποίησης. Ο buffer αυτός χρησιμοποιείται για την γραμμή SCL.
8. Η γραμμή select in της παράλληλης χρησιμοποιείται για την μετάδοση των SCL σημάτων από τον υπολογιστή στην K8000 πλακέτα.
9. Το Led 18 φανερώνει την κατάσταση της SDA γραμμής στην K8000 πλακέτα, η οποία καθορίζεται από την γραμμή Auto Feet της παράλληλης θύρας. Το Led θα ανάψει όταν η γραμμή είναι χαμηλά. Αυτό σημαίνει ότι το Led δεν ανάβει όταν η κάρτα δεν χρησιμοποιείται καθώς το I2C απαιτεί τις γραμμές ψηλά όταν δεν είναι ενεργές.
10. Η αντίσταση R18 χρησιμοποιείται για να περιορίζει το ρεύμα του Led 18 και του εσωτερικού Led του οπτικού μονωτή IC23.
11. Αυτή είναι μια αντίσταση που χρησιμοποιείται για ανύψωση τάσης. Όταν ο οπτικός μονωτής IC23 άγει τότε η έξοδος θα είναι 0. Διαφορετικά όταν δεν άγει η έξοδος θα είναι 1.
12. Αυτή η αντίσταση χρησιμοποιείται για την ανύψωση τάσης για την γραμμή SDA (serial data). Απαιτείται για την ορθή λειτουργία του I2C.
13. Είναι ένας buffer στον οποίο η ψηφιακή έξοδος είναι η ίδια με την ψηφιακή είσοδο. Ο buffer αυτός μπορεί να απενεργοποιηθεί εφαρμόζοντας 1 στην είσοδο ενεργοποίησης. Ο buffer αυτός χρησιμοποιείται για την γραμμή SDA.
14. Αυτή η αντίσταση χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι η είσοδος ενεργοποίησης των buffers είναι πάντα 0 εκτός αν εφαρμοστεί 1 στην γραμμή DIS (Disable).
15. Το ολοκληρωμένο IC23 είναι ένας οπτικός μονωτής που χρησιμοποιείται για να περάσουν τα SDA σήματα από τον υπολογιστή στην πλακέτα. Όταν το AUTO FEET της παράλληλης είναι χαμηλό τότε το εσωτερικό Led του οπτικού μονωτή θα ανάψει και η έξοδος του θα συνδεθεί. Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος SDA του K8000 θα είναι και αυτή χαμηλή.
16. Η γραμμή AUTO FEED της παράλληλης χρησιμοποιείται για την μετάδοση των SDA σημάτων από τον υπολογιστή στην K8000 πλακέτα.

17. Το Led αυτό φανερώνει την κατάσταση της SDA γραμμής στον υπολογιστή. Το Led αυτό θα ανάψει όταν η SDA γραμμή είναι χαμηλά.

18. Αυτή η αντίσταση χρησιμοποιείται για ανύψωση τάσης, η οποία επιτρέπει στον οπτικό μονωτή IC24 να είναι ψηλά όταν το εσωτερικό τρανζίστορ εξόδου δεν άγει. Διαφορετικά το IC24 είναι χαμηλά.

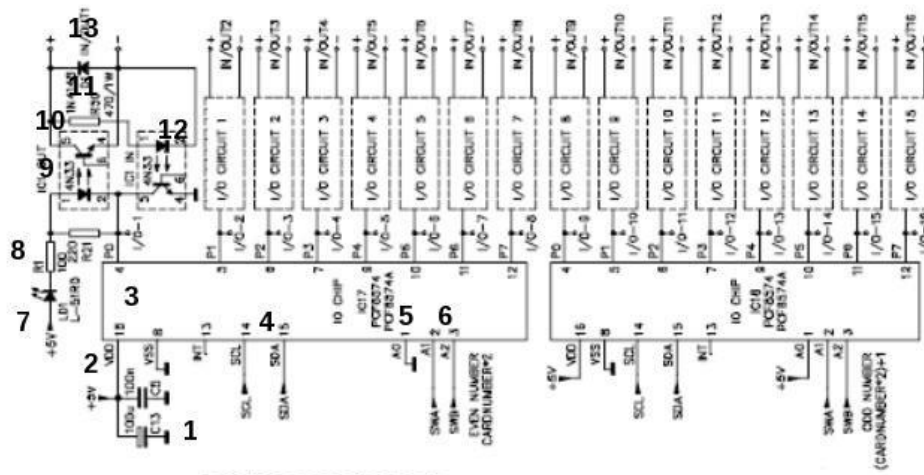
19. Η αντίσταση χρησιμοποιείται για να περιορίζει το ρεύμα του Led 19 και του εσωτερικού Led του οπτικού μονωτή IC24.

20. Όταν η K8000 δεν χρησιμοποιείται τότε μπορεί η παράλληλη να χρησιμοποιείται για την οδήγηση εκτυπωτή.

21. Είναι ένας buffer στον οποίο η ψηφιακή έξοδος είναι η ίδια με την ψηφιακή είσοδο. Ο buffer αυτός μπορεί να απενεργοποιηθεί εφαρμόζοντας 1 στην είσοδο ενεργοποίησης. Ο buffer αυτός χρησιμοποιείται για την γραμμή SDA.

22. Το ολοκληρωμένο IC24 είναι ένας οπτικός μονωτής που χρησιμοποιείται για να περάσουν τα SDA σήματα από την πλακέτα στον υπολογιστή. Ένας ξεχωριστός οπτικός μονωτής πρέπει να χρησιμοποιηθεί γιατί μπορεί να διοχετεύσει την πληροφορία μόνο ως προς την μια κατεύθυνση, ενώ το I2C λειτουργεί και προς τις δυο κατευθύνσεις. Η έξοδος επηρεάζει την γραμμή SELECT της παράλληλης.

Το τμήμα που ελέγχει τις ψηφιακές εξόδους- εισόδους φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



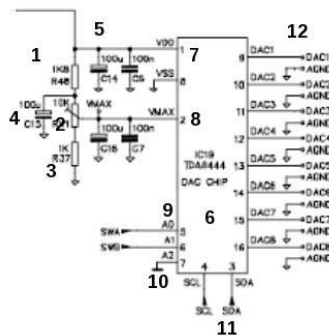
Σχήμα 4.11: Τμήμα ψηφιακών εξόδων και εισόδων

Αναλυτικότερα το τμήμα που ελέγχει τις ψηφιακές εξόδους- εισόδους αποτελείται από:

1. Οι πυκνωτές αυτοί χρησιμοποιούνται για περαιτέρω μείωση των κυματισμών της τάσης και για να αφαιρούν ρεύματα υψηλών συχνοτήτων, τα οποία επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του ολοκληρωμένου PCF8574.
2. Η τάση τροφοδοσίας του PCF8574 είναι 5 V DC.
3. Το PCF8574 είναι ένα ολοκληρωμένο που ελέγχεται με την βοήθεια του πρωτοκόλλου I2C. Προσφέρει ψηφιακές I/O λειτουργίες. Διαθέτει 8 I/O επομένως η πλακέτα για να προσφέρει 16 ψηφιακές I/O χρησιμοποιεί δυο τέτοια κυκλώματα.
4. Οι SCL και SDA είναι οι γραμμές επικοινωνίας του I2C πρωτοκόλλου. Εφαρμόζονται σε όλα τα ολοκληρωμένα της πλακέτας που ελέγχονται με το I2C.
5. Η διεύθυνση A0 του πρωτοκόλλου I2C για το ολοκληρωμένο IC17 είναι πάντα 0. Αντίθετα για το ολοκληρωμένο IC18 είναι 1. Αυτό εφαρμόζεται για να έχει κάθε ολοκληρωμένο I2C, μοναδική διεύθυνση.
6. Οι SWA και οι SWB είναι οι ψηφιακές γραμμές διευθύνσεων για την πλακέτα και επιτρέπουν την διευθυνσιοδότηση κάθε ολοκληρωμένου I2C. Οι γραμμές αυτές μπορούν να καθοριστούν με ένα DIP διακόπτη που διαθέτει η πλακέτα.
7. Το Led φανερώνει την κατάσταση του I/O καναλιού. Η άνοδος έχει συνδεθεί στα 5 V και επομένως το Led θα ανάψει μόνο όταν η κάθοδος έχει χαμηλότερη τάση, δηλαδή μόνο όταν το PCF5473 ή το Icx – IN άγει.
8. Αυτή η αντίσταση περιορίζει το ρεύμα που διατρέχει το LED και το PCF8574.
9. Ο οπτικός μονωτής IC-OUT μεταφέρει την πληροφορία από την PCF8574 έξοδο στην έξοδο I/O της πλακέτας.
10. Η αντίσταση αυτή περιορίζει το ρεύμα που διέρχεται από το εσωτερικό Led του οπτικού μονωτή, έτσι ώστε να μην καταστραφεί από πιθανές υψηλές τιμές του.
11. Η δίοδος χρησιμοποιείται στην ψηφιακή είσοδο και προστατεύει τον οπτικό μονωτή από μεγάλες αντίθετες τάσεις.
12. Είναι ένας οπτικός μονωτής που χρησιμοποιείται για τις ψηφιακές εισόδους/εξόδους. Το ολοκληρωμένο αυτό περιέχει ένα εσωτερικό Led και ένα φωτο-τρανζίστορ τα οποία δεν συνδέονται. Το τρανζίστορ θα άγει όταν θα εφαρμοστεί τάση στο Led. Το κύκλωμα χρησιμοποιείται για να αποφεύγονται ζημιές από υψηλά ρεύματα.
13. Αποτελούν τις ακίδες εισόδου/εξόδου. Όταν χρησιμοποιούνται σαν είσοδο πρέπει να εφαρμόζεται τάση η οποία πρέπει να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε

η πλακέτα να την αντιλαμβάνεται. Όταν χρησιμοποιείται σαν έξοδο η αντίσταση μεταξύ των ακίδων είναι χαμηλή όταν η έξοδος είναι ON. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ρεύμα που περνάει δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλό και επίσης θα πρέπει να γίνεται σεβαστή η πολικότητα.

Το τμήμα ελέγχου των αναλογικών εξόδων των 6 bit φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



Σχήμα 4.12: Τμήμα ελέγχου αναλογικών εξόδων 8 bit

Αναλυτικότερα το τμήμα που ελέγχει τις αναλογικές εξόδους 6 bit αποτελείται από:

1. Η αντίσταση αυτή εξασφαλίζει ότι η τάση στο VMAX θα είναι πάντα πιο χαμηλή από την τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου IC19.
2. Αυτή η μεταβλητή αντίσταση επιτρέπει την ρύθμιση της τιμής του VMAX. Η VMAX είναι η μέγιστη τιμή τάσης που μπορεί το ολοκληρωμένο να δώσει.
3. Η αντίσταση αυτή εξασφαλίζει ότι η τάση VMAX είναι υψηλότερη από 0.
4. Ο πυκνωτής αυτός χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τους κυματισμούς τάσης που μπορεί να εμφανιστούν στο VMAX.
5. Αυτοί οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν τους κυματισμούς τάσης από την τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου IC19.
6. Το ολοκληρωμένο αυτό είναι το TDA8444, το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο 8 bit εξόδων με το πρωτόκολλο I2C. Είναι ένας μετατροπέας από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα.
7. Η τάση τροφοδοσίας του IC19.
8. Η VMAX είναι η μέγιστη τιμή τάσης που μπορεί το ολοκληρωμένο να δώσει.

5. Αυτοί οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν τους κυματισμούς τάσης από την τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου IC20.
6. Αυτοί οι διακόπτες χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την διεύθυνση της κάρτας. Όταν είναι ανοιχτοί τότε στις γραμμές διευθύνσεων όλων των ολοκληρωμένων της πλακέτας εφαρμόζεται 0. Διαφορετικά εφαρμόζεται 1.
7. Οι SWA και οι SWB είναι οι ψηφιακές γραμμές διευθύνσεων για την πλακέτα και επιτρέπουν την διευθυνσιοδότηση κάθε ολοκληρωμένου IC. Οι γραμμές αυτές μπορούν να καθοριστούν με ένα DIP διακόπτη που διαθέτει η πλακέτα.
8. Το ολοκληρωμένο IC8591 χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο I2C και προσφέρει 4 αναλογικές εισόδους και μια αναλογική έξοδο υψηλής ακρίβειας.
9. Η τάση τροφοδοσίας του IC20.
10. Η διεύθυνση A2 του ολοκληρωμένου τίθεται πάντα 0.
11. Η αντίσταση Rb1 και Ra1 χρησιμοποιούνται σαν διαιρέτες τάσης για την είσοδο. Χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν την τιμή της τάσης εισόδου στην επιθυμητή από την πλακέτα.
12. Οι γραμμές εισόδου για την αναλογική είσοδο 1.
13. Οι γραμμές εξόδου για την αναλογική έξοδο 1.

[9,11]

4.4 Λογισμικό Υλικού

Η επικοινωνία με το υλικό γίνεται μέσω του λογισμικού, που αναλαμβάνει όλη την διεπαφή με το υλικό του συστήματος. Με το λογισμικό είναι εφικτή η αποστολή εντολών προς το υλικό του συστήματος, όπως και η λήψη πληροφοριών από αυτό.

Το λογισμικό αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αναλαμβάνει την επικοινωνία με το υλικό διεπαφής και το δεύτερο την επικοινωνία με το υλικό ελέγχου των βηματικών κινητήρων. Η υλοποίηση του χωρίζεται σε δυο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι η υλοποίηση του οδηγού σε γλώσσα C και το δεύτερο είναι η επέκταση του έτσι ώστε να είναι εφικτή η χρήση του από την γλώσσα προγραμματισμού Java.

Η επέκταση του οδηγού έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από java είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς παρέχει την δυνατότητα χρήσης σύγχρονων τεχνολογιών. [10]

4.4.1 Υλικό Διεπαφής

Το υλικό διεπαφής επικοινωνεί μέσω του οδηγού υλικού διεπαφής, και μας παρέχει τη δυνατότητα αποστολής εντολών όπως επίσης και την λήψη δεδομένων.

Ο οδηγός παρέχει συναρτήσεις ανάγνωσης των ψηφιακών θυρών όταν λειτουργούν σαν θύρες εξόδου, και προσφέρει διαδικασίες για τον μηδενισμό των τιμών που ήδη έχουν. Ήδη έχουν εκτελεστεί συναρτήσεις οι οποίες καθορίζουν την λειτουργία των ψηφιακών θυρών, δηλαδή αν η λειτουργία τους θα είναι σαν ψηφιακές εισοδοί ή σαν ψηφιακές εξοδοί. Ο καθορισμός αυτός μπορεί να γίνει συνολικά, είτε μπορεί να επιλεγμένα. Ακόμα διαθέτει συναρτήσεις για τον έλεγχο των αναλογικών εξόδων των θυρών. Με την χρήση του οδηγού αποστέλλονται δεδομένα στις αναλογικές εξόδους και τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται από το υλικό στις αντίστοιχες τάσεις.

Ακόμα ο οδηγός έχει την δυνατότητα να μηδενίσει τις αναλογικές εξόδους από τα δεδομένα που έχουν ήδη. Με τον οδηγό γίνεται η ανάγνωση των στοιχείων που συλλέγουν οι αναλογικές εισοδοί του υλικού επιπλέον επίσης ο οδηγός διαθέτει συναρτήσεις που καθορίζουν την συχνότητα που έχει το ρολόι στην πλακέτα διεπαφής και συναρτήσεις που επικοινωνούν με άλλες κάρτες συνδεδεμένες με αυτήν.[4,11,12]

4.4.2 Υλικό Ελέγχου Βηματικού Κινητήρα

Το υλικό ελέγχου βηματικών κινητήρων επικοινωνεί μέσω του οδηγού του υλικού αυτού και μας δίνει την δυνατότητα αποστολής εντολών και την λήψη δεδομένων από αυτό.

Ο οδηγός διαθέτει συναρτήσεις περιστροφής του κινητήρα δεξιόστροφα με πλήρες βήμα. Οι συναρτήσεις αυτές με την κατάλληλη παραμετροποίηση επιτρέπουν την επιλογή του κινητήρα που θα κινηθεί. Διαθέτει παραμέτρους που καθορίζουν το πλήθος των βημάτων που θα εκτελέσει ο κινητήρας, καθώς και τον χρόνο που χρειάζεται για να εκτελεστεί η κίνηση αυτή. Υπάρχουν συγκεκριμένες συναρτήσεις που επιτρέπουν την κίνηση του κινητήρα αριστερόστροφα, όπως επίσης και συναρτήσεις που επιτρέπουν την κίνηση του με μισό βήμα.

Διαθέτει συναρτήσεις που έχουν την δυνατότητα κίνησης όλων των κινητήρων που είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα. Ακόμα διαθέτει συναρτήσεις που διαβάζουν τα στοιχεία από τους κινητήρες.[4,11,12]

4.5 Έλεγχος Συστήματος

Η χρήση και η ανάπτυξη εργαλείων, ώστε να είναι αποτελεσματική η ανίχνευση και η αντιμετώπιση των σφαλμάτων είναι απαραίτητη. Η εφαρμογή αποσφαλμάτωσης του συστήματος διαθέτει εφαρμογές και διάφορες διαδικασίες σχετικές με την ορθή λειτουργία τόσο του υλικού όσο και του λογισμικού. Αποτελείται από συναρτήσεις και εφαρμογές που ελέγχουν την ορθότητα κάθε ενός τμήματος του συστήματος.

Αναλυτικότερα το τμήμα της αποσφαλμάτωσης συστήματος περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

1. Java διαδικασία ελέγχου κίνησης κάθετου και οριζόντιου άξονα . Η κίνηση των αξόνων είναι απαραίτητη για το σύστημα και πολλές φορές αντιμετωπίζει προβλήματα. Για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας των αξόνων. Το σύστημα επιτρέπει μέσα από το γραφικό περιβάλλον την κίνηση της βάσης προς όλες τις κατευθύνσεις.

2. C++ εφαρμογή ελέγχου οδηγού κίνησης βηματικών κινητήρων . Πριν την χρησιμοποίηση της Java εφαρμογής για την αποσφαλμάτωση του συστήματος των αξόνων, ήταν σημαντική η ύπαρξη μιας εφαρμογής που θα ελέγχει την κίνηση των κινητήρων. Η εφαρμογή αυτή, λέγεται [hirule](#), τρέχει από την γραμμή εντολών και με την βοήθεια αρχείων ελέγχου επιτρέπει την παραμετροποίηση της κίνησης των αξόνων. Χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των προβλημάτων κίνησης, σε χαμηλότερα επίπεδα στην αρχιτεκτονική του συστήματος.

Η κλήση της φαίνεται παρακάτω:

[hirule rules.steppermotor](#)

Η παράμετρος ([rules.steppermotor](#)) είναι το αρχείο που περιέχει τις εντολές για την κίνηση και για παράδειγμα έχει την μορφή

```
if ad 1 < 400 then sendstepcwfll 1 40 500
```

όπου το πρώτο σκέλος αποτελεί την συνθήκη κάτω από την οποία θα εκτελεστεί η ενέργεια. Π.χ. ελέγχει αν η πρώτη αναλογική είσοδος έχει τιμή μικρότερη από 400 . Η ενέργεια του παραδείγματος κινεί τον κινητήρα 1, κατά

την φορά του ρολογιού, σε 40 μονάδες χρόνου και πραγματοποιεί 500 βήματα. Μόλις εκτελεστεί η τελευταία εντολή του αρχείου ο έλεγχος επιστρέφει στην αρχή του.

3. Java διαδικασία ελέγχου τιμών αισθητήρων . Η λήψη των τιμών των αισθητήρων είναι σημαντική για το σύστημα και πολλές φορές αντιμετωπίζει προβλήματα. Για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας των αισθητήρων.

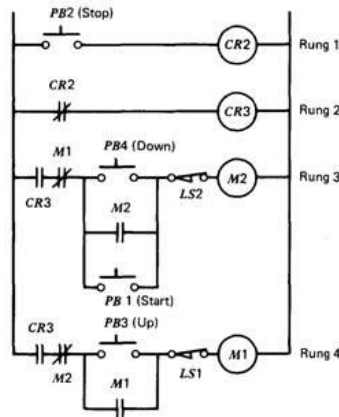
Το σύστημα επιτρέπει μέσα από το γραφικό περιβάλλον την λήψη των τιμών και την εμφάνιση τους. Στην βάση αποθηκεύονται οι τιμές που έχουν οι αισθητήρες , η ώρα και τα διάφορα σχόλια που καταχωρούνται.

4. C++ εφαρμογή ελέγχου αισθητήρων όπου χρησιμοποιείται η εφαρμογή *hirule*. Η εφαρμογή αυτή σε κάθε εντολή που εκτελεί εμφανίζει στον χρήστη τις τιμές των αναλογικών και ψηφιακών εισόδων.

5. Διαδικασίες δημιουργίας αρχείων αποσφαλμάτωσης . Η δημιουργία αρχείων που αποθηκεύουν την λειτουργία του προγράμματος είναι απαραίτητη για όλες τις εφαρμογές. Ο λόγος είναι το μεγάλο πλήθος διαφορετικών τιμών που πρέπει να ελέγχονται προκειμένου να εξακριβωθεί η ορθή λειτουργία του συστήματος. Η ανάγκη αυτή δεν μπορεί να καλυφθεί από την καταγραφή των ενεργειών στην βάση και αυτό γιατί τα στοιχεία, πέρα από το πλήθος τους, έχουν εξαιρετικά διαφορετική δομή.

4.6 Διαγράμματα LADDER

Ο προγραμματισμός με τη χρήση διαγραμμάτων Ladder εξελίχτηκε από τη από το σχεδιασμό των ρελέ ηλεκτρικών κυκλωμάτων αφού και η ίδια είναι μια σχεδιαστική προγραμματιστική γλώσσα. Κάθε στοιχείο του κυκλώματος αναπαριστάται από μια γραμμή που ονομάζεται rung (σκαλοπάτι ή βαθμίδα) όπου η είσοδος του βρίσκεται στα αριστερά του ενώ η έξοδος στα δεξιά. Η έξοδος ενεργοποιείται μόνο όταν το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει από την αριστερή πλευρά του rung ενώ αν μια συσκευή δεν είναι ενεργοποιημένη μπλοκάρει τη ροή του ρεύματος. Κατά την εκτέλεση του διαγράμματος Ladder το PLC διαβάζει τις εισόδους της κάθε βαθμίδας και στη συνέχεια προσδιορίζει την έξοδο της κάθε μιας διαβάζοντας τις από τη κορυφή προς το πάτο. Μόλις διαβάσει και τη τελευταία βαθμίδα τότε ανανεώνει τη κατάσταση των συσκευών εξόδου.



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα Ladder

Κατά την ανάπτυξη ενός προγράμματος θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη ονοματοδότηση για να γίνει η σωστή αναγνώριση ανάμεσα στις εισόδους, εξόδους, μετρητές, χρονομετρητές και μνήμες. Η πιο κοινή ονοματοδότηση γίνεται χρησιμοποιώντας το I (input) ή το O (output) ακολουθούμενα από ένα μονοψήφιο που αντιστοιχεί στον αριθμό της θύρας και από έναν διψήφιο που αντιστοιχεί στη θέση της θύρας εισόδου ή εξόδου αντίστοιχα (π.χ. το I1:00 αντιστοιχεί στην πρώτη είσοδο της θύρας 1 και το O2:00 στη πρώτη έξοδο της θύρας 2).

Βασικές εντολές εισόδου

Ανοιχτή επαφή :



Κλειστή επαφή :

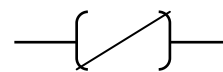


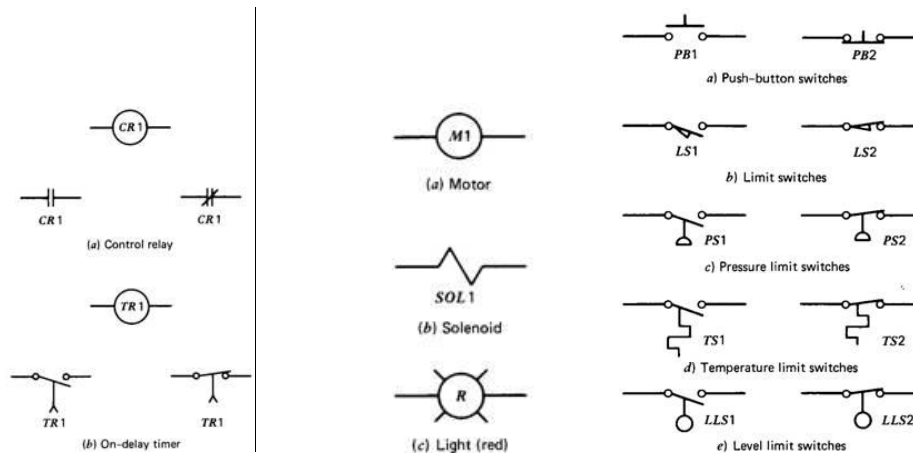
Βασικές εντολές εξόδου

Ανοιχτή επαφή :

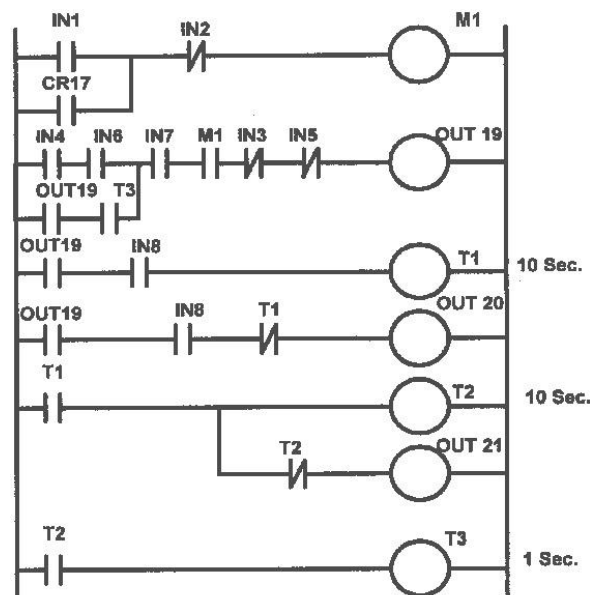


Κλειστή επαφή :





Σχήμα 4.14 Διαγράμματα Ladder



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα Ladder

Τα διαγράμματα Ladder μεταγλωττίζονται σε κώδικα που «καταλαβαίνει» το PLC κάτι το οποίο του δίνει τη δυνατότητα να κάνει διάφορες διεργασίες όπως boolean logic ,αριθμητικές πράξεις ,μετρήσεις και άλλες διάφορες συναρτήσεις.

[13,14,15]

Βιβλιογραφία

[1] http://www.infopl.net/files/descargas/delta/infoPLC_net_Delta_Seguidor_Solar.pdf

[2] Yousef, H.A. Design and implementation of a fuzzy logic computer-controlled sun tracking system. In Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bled, Slovenia, Jul. 12-16, 1999.

[3] Al-Mohamad, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a suntracking system. Appl. Energ. 2004, 79, 345-354.

[4] http://micro-kosmos.uoa.gr/gr/magazine/ergasies_foititon/ettap/2010-11/h-taxi/var/SAE_B_TOMOS_SEL9_106.PDF

[5] Chen, F.; Feng, J.; Hong, Z. 2006 Digital sun sensor based on the optical vernier measuring principle. Meas. Sci. Technol. 2006, 17, 2494-2498.

[6] Grena, R. An algorithm for the computation of the solar position. Sol. Energy 2008, 82, 462-470.

[7] Chen, Y.T.; Lim, B.H.; Lim, C.S. General sun tracking formula for heliostats with arbitrarily oriented axes. J. Sol. Energ. Eng. 2006, 128, 245-250.

[8] <http://www.esr.co.uk/manuals/k8000.pdf>

[9] <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>

[10] <http://bvsystems.be/k8000.php>

[11] <http://www.asl.ethz.ch/education/master/mechatronic/V3.1.pdf>

[12] <http://www.elsevierdirect.com/companions/9781856176217/appendices/01~Ch11.pdf>

[13] http://www.slideshare.net/plc_course/ladder-intro-tutorial

[14] <http://www.slideshare.net/jakahamedali/plc-programming-methods-and-applications>

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Ladder_logic

5 Συμπεράσματα

Το αυτοελεγχόμενο ηλιακό σύστημα είναι πλέον απαραίτητο στη σύγχρονη εποχή που χαρακτηρίζεται από μαζική κατανάλωση του ορυκτού πλούτου και τα επακόλουθα της εκτεταμένης χρήσης του με αποτέλεσμα ουσιαστικά την δηλητηρίαση του πλανήτη. Οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας έχουν δώσει τη δυνατότητα και την ελπίδα για την αναγκαία και απαραίτητη απαγκίστρωση από τη χρήση φυσικών καυσίμων.

Το αυτοελεγχόμενο ηλιακό σύστημα αποτελείται από μια βάση, με τοποθετημένο έναν καθρέπτη, η οποία μπορεί να κινείται ως προς τους δυο άξονες. Το σύστημα ελέγχεται από προσωπικό υπολογιστή, μέσω παράλληλης θύρας.

Εν γένει, μπορούμε να πούμε ότι ενδεχομένως ο σχεδιασμός του PLC σε χαμηλό επίπεδο λύνει πολλά προβλήματα επειδή προσφέρει την δυνατότητα καθορισμού των προδιαγραφών του. Η συνεργασία διαφορετικών modules όπως μονάδων εισόδων/ εξόδων, επεξεργαστών και μετατροπέων με στόχο την συναρμολόγηση μιας επαρκούς μονάδας αυτοματισμού είναι ο βασικός λόγος για την τόσο ευρεία χρήση των PLC.

Τα PLC (Programmable logic controller) δίνουν την δυνατότητα σωστής λειτουργίας του συστήματος χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία ανθρώπινου δυναμικού. Ειδικά η χρήση τους σε περιοχές με υψηλό υψόμετρο και ακραίες καιρικές συνθήκες, όπου θα κινδύνευαν ανθρώπινες ζωές, αποδεικνύει ότι αποτελεί τη «καρδιά» του συστήματος και χωρίς τα PLC τίποτα δεν θα ήταν εφικτό.

Η γλώσσα προγραμματισμού Ladder των Plc αποτελεί μια γλώσσα χαμηλού επιπέδου που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη άμεσης αλληλεπίδρασης με τον μικρο-επεξεργαστή του συστήματος. Στην αγορά υπάρχουν επίσης διάφορα προγράμματα που μεταγλωττίζουν από τη γλώσσα Java σε ladder για προγραμματιστές που επιθυμούν τη χρήση γλωσσών υψηλού επιπέδου.

