ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη συστήματος sun-tracking για μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία

Γιάννης Καντάρης

Εξεταστική επιτροπή: Κ.ΚΑΛΑΙΤΖΑΚΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ) Γ.ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ) Ε.ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ (ΔΙΔΑΣΚΩΝ Π407/80)

XANIA 2005

Πρόλογος

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα σύστημα suntracking 2 αξόνων το οποίο έχει σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο που μου ανέθεσε αυτή την εργασία αλλά και για την βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή κύριο Σταυρακάκη Γεώργιο για τον χρόνο που διέθεσε να μελετήσει την εργασία αυτή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ. Κουτρούλη Ευτύχη που παρακολούθησε όλη την πορεία της εργασίας και προσέφερε συνεχώς τις γνώσεις του και την εμπειρία του πάνω στο θέμα.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός συστήματος sun-tracking για την μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα το κέρδος της ενέργειας που παρουσιάζει το σύστημα sun-tracking δύο αξόνων που αναπτύχθηκε σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα με κλίση 35° προσανατολισμένο προς νότο είναι 38,4%. Ο αλγόριθμος κίνησης του συστήματος sun-tracking βασίζεται στην μεταβολή της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο έτσι ώστε το σύστημα κάθε φορά να κινείται προς το σημείο όπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μεγαλύτερη ακτινοβολία. Για την ανάπτυξη του συστήματος sun-tracking χρειάστηκαν εκτός από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, δύο βηματικοί κινητήρες, ένας για την κίνηση κάθε άξονα, ένας μικροελεγκτής στο οποίο προγραμματίστηκε ο αλγόριθμος κίνησης καθώς και ένα αισθητήριο ρεύματος με βάση το οποίο εξετάζεται η μεταβολή του ρεύματος άρα και η μεταβολή της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Περιεχόμενα

1.	Eic	σαγωγή	6
2.	Av	νασκόπηση μεθόδων sun-tracking	11
3.	Mε	ελέτη ηλιακής ακτινοβολίας	60
	3.1	Μετακίνηση μεταξύ του ήλιου και της γης	62
	3.2	Θέση του ήλιου σε σχέση με την επιφάνεια της γης	64
	3.3	Εκτίμηση των συστατικών της ηλιακής ακτινοβολίας	67
	3.4	Εξωγήινη ακτινοβόλιση σε μια οριζόντια επιφάνεια	68
	3.5 επιφά	Υπολογισμός της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζά άνεια δεδομένης της ολικής ακτινοβολίας	όντια 69
	3.6	Ακτινοβολία σε επιφάνειες αυθαίρετου προσανατολισμού	70
	3.6.	.1 Άμεση ακτινοβόλιση	71
	3.6.	.2 Διάχυτη ακτινοβόλιση	72
	3.6.	.3 Ανακλώμενη στο έδαφος ακτινοβολία(albedo radiation)	76
4.	Βη	ηματικοί κινητήρες	77
4.	Βη 4.1	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία	77 78
4.	Βη 4.1 4.2	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων	77 78 80
4.	Βη 4.1 4.2 4.2.	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων .1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet)	77 78 80 80
4.	Βη 4.1 4.2 4.2. 4.2.	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων .1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) .2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης	77 78 80 80 82
4.	Βη 4.1 4.2 4.2. 4.2. 4.2.	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων 1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) 2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης 3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες	77 78 80 80 82 84
4.	Β η 4.1 4.2 4.2. 4.2. 4.2. 4.2.	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων .1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) .2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης .3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες .4 Μονοπολικοί(unipolar) βηματικοί κινητήρες	77 78 80 80 82 84 86
4.	Β η 4.1 4.2 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2.	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων 1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) 2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης 3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες 4 Μονοπολικοί(unipolar) βηματικοί κινητήρες	77 78 80 80 82 84 86 89
4.	Β η 4.1 4.2 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2.	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων 1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) 2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης 3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες 4 Μονοπολικοί(unipolar) βηματικοί κινητήρες 5 Διπολικοί (bipolar) βηματικοί κινητήρες	77 78 80 80 82 84 86 89 91
4.	 Βη 4.1 4.2 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.3 	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων Bηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) Bηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης Bηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης Yβριδικοί βηματικοί κινητήρες Moνοπολικοί(unipolar) βηματικοί κινητήρες bifilar βηματικοί κινητήρες Eπιλογή Βηματικού κινητήρα	77 78 80 80 82 84 84 86 91 91
4.	Β η 4.1 4.2 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.2. 4.3 4.4 μαγνή	ηματικοί κινητήρες Λειτουργία Τύποι βηματικών κινητήρων .1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet) .2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης .3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες .3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες .4 Μονοπολικοί(unipolar) βηματικοί κινητήρες .5 Διπολικοί (bipolar) βηματικοί κινητήρες .6 Bifilar βηματικού κινητήρες Επιλογή Βηματικών κινητήρων Μεταβλητής αντίστασης-Μόν ήτη ή Υβριδικών	77 78 80 82 84 84 86 91 91 91

5.	Av	νάλυση του συστήματος που αναπτύχθηκε	94
	5.1	Υπολογισμός ταχύτητας του συστήματος	
	5.2	Θεωρητική απόδειξη του αλγόριθμου κίνησης του s	un- tracking
	συστŕ	ήματος	106
6.	Yλ	\οποίηση του συστήματος sun-tracking	125
	6.1	Block διάγραμμα	125
	6.2	Στοιχεία συστήματος	126
	6.2	.1 Φωτοβολταϊκό	126
	6.2	.2 Επιλογή βηματικών κινητήρων συστήματος	127
	6.2	.3 Κατασκευή συστήματος	132
	6.2	.4 Οδηγοί βηματικών κινητήρων	133
	6.2	.5 Αισθητήριο hall	138
	6.2	.6 Μικροελεγκτής	141
	6.2	2.7 Συσσωρευτής	142
	6.3	Το λογισμικό που αναπτύχθηκε	143
7.	Пε	ειραματικά αποτελέσματα	146
	7.1	Πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το σύστημα	sun-tracking
			147
	7.2	Αποτελέσματα συστήματος σταθερής κλίσης	150
	7.3	Σύγκριση των μετρήσεων	153
	7.3	.1 Απώλεια ενέργειας στο σύστημα sun-tracking	155
8.	Συ	ιμπεράσματα	157
9.	Bi	βλιογραφία	159
	9.1	Δημοσιευμένα Papers	159
	9.2	Βιβλία	159
	9.3	Τεχνικά κείμενα	160

1. Εισαγωγή

Sun-tracking ονομάζονται τα συστήματα που έχουν ως σκοπό να ακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα συστήματα sun-tracking αυξάνουν κατά πολύ την ενέργεια που συλλέγουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το ποσό της ισχύος που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από το πόσο αυτό εκτίθεται στο ηλιακό φως. Στη συνέχεια στα σχήματα 1-4 παρουσιάζονται διαγράμματα ρεύματος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου 10W/12V για διάφορα ποσά ακτινοβολίας που δέχεται αυτό.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκού που δέχεται ακτινοβολία 1000W/m²



Σχήμα 2. Διάγραμμα ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκού που δέχεται ακτινοβολία 700W/m²



Σχήμα 3. Διάγραμμα ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκού που δέχεται ακτινοβολία 500W/m²



Σχήμα 4. Διάγραμμα ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκού που δέχεται ακτινοβολία 100W/m²

Όπως φαίνεται όσο μεγαλύτερη ακτινοβολία δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο τόσο μεγαλύτερη τιμή ρεύματος παράγει στην έξοδό του. Έτσι τα συστήματα suntracking κινούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιούν κάθε φορά την ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο με αποτέλεσμα αυτό να παράγει στην έξοδό του όσον το δυνατόν μεγαλύτερη τιμή ρεύματος.

Τα συστήματα sun-tracking διαχωρίζονται σε αυτά που κινούνται κατά ένα άξονα και σε αυτά που κινούνται κατά δυο άξονες. Τα μονοαξονικά συστήματα suntracking είναι πιο εύκολα στην κατασκευή και αρκετά φθηνότερα, όμως η απόδοσή τους είναι χαμηλότερη από τα αντίστοιχα συστήματα sun-tracking 2-αξόνων.Σε πολλά sun-tracking συστήματα χρησιμοποιούνται μέθοδοι ελέγχου κλειστού βρόγχου με φωτοαισθητήρες οι οποίοι εντοπίζουν την θέση του ήλιου και στέλνουν τα αντίστοιχα ηλεκτρικά σήματα στον ελεγκτή της κίνησης. Σε άλλα σύστημα suntracking χρησιμοποιούνται μέθοδοι ελέγχου ανοιχτού βρόγχου και η θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της μέρας αποθηκεύεται και το σύστημα κινείται με βάση τη θέση αυτή.



Σχήμα 5. Block διάγραμμα του sun-tracking συστήματος.

Η κεντρική ιδέα λειτουργίας του συστήματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε δίνεται στο γενικό διάγραμμα του σχήματος 5. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Με βάση την ποσότητα αυτής της ηλιακής

ακτινοβολίας παράγει στην έξοδο του μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος η οποία είναι ανάλογη αυτής της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό φορτίζει τον συσσωρευτή. Ανάλογα με την τιμή ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού το αισθητήριο ρεύματος παράγει μια συγκεκριμένη τιμή τάσης. Ο μικροελεγκτής διαβάζει την τιμή αυτή με τη βοήθεια του μετατροπέα που διαθέτει on-chip και ανάλογα με την τιμή της αποφασίζει προς τα πού θα κινηθεί το σύστημα δίνοντας τους κατάλληλους παλμούς στους βηματικούς κινητήρες οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν το φωτοβολταϊκό. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το φωτοβολταϊκό να δεχτεί τη μέγιστη τιμή ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα εξόδου του.

To sun-tracking σύστημα δύο αξόνων που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας έχει κέρδος ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό 38,4% σε σχέση με την ενέργεια που παράγει το ίδιο το φωτοβολταϊκό αν βρίσκεται σε σταθερή θέση με κλίση 35° προσανατολισμένο προς νότο. Η συμβολή αυτής της εργασίας εστιάζεται στον αλγόριθμο κίνησης του φωτοβολταϊκού. Τα περισσότερα συστήματα αποθηκεύουν τη θέση του ήλιου κατά την διάρκεια όλου του χρόνου και απλά κινούν το φωτοβολταϊκό ανάλογα με την θέση αυτή έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα στο φωτοβολταϊκό. Η μέγιστη ακτινοβολία όμως δεν αντιστοιχεί πάντα στη προγραμματισμένη θέση διότι κάποιες φορές λόγω ιδιαίτερων καιρικών συνθηκών, όπως είναι η συννεφιά, η μέγιστη ακτινοβολία μπορεί να βρίσκεται σε κάποια άλλη θέση στον ορίζοντα. Για παράδειγμα μπορεί να υπάρχει ένα σύννεφο ανάμεσα στη προγραμματισμένη βέλτιστη θέση του φωτοβολταϊκού στοιχείου και στον ήλιο. Σε αυτή τη περίπτωση η μέγιστη ακτινοβολία που μπορεί να δεχτεί το φωτοβολταϊκό τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή μπορεί να αντιστοιχεί σε κάποια διαφορετική θέση από την προγραμματισμένη. Το σύστημα sun-tracking που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, σε αντίθεση με άλλα συστήματα έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει πάντα τη βέλτιστη θέση, όπου μεγιστοποιείται η ακτινοβολία, ακόμα και κάτω από αυτές τις ιδιαίτερες καιρικές συνθήκες αφού το σύστημα κινείται με βάση τη μεταβολή της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό και δεν έχει αποθηκευμένες προκαθορισμένες θέσεις του ήλιου όπως συμβαίνει σε άλλα συστήματα. Με αυτό τον τρόπο σε συνθήκες συννεφιάς το σύστημα sun-tracking που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα έχει μεγάλη διάφορα στο κέρδος ενέργειας σε σχέση με άλλα συστήματα sun-tracking. Επίσης

συμβολή θεωρείται ότι το σύστημα sun-tracking που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, δεν απαιτεί πρόσθετα αισθητήρια όπως για παράδειγμα φωτοαντιστάσεις. Το αισθητήριο ρεύματος υπάρχει ήδη σε όλους τους φορτιστές συσσωρευτών ή σε μετατροπείς DC/DC που κάνουν maximum power tracking. Τέλος το sun-tracking σύστημα που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία μπορεί να επεκταθεί χωρίς να χρειαστούν σημαντικές ηλεκτρονικές αλλαγές σε σύστημα maximum power tracking σύστημα του εκτός από το να βρίσκει τη βέλτιστη χαρακτηριστική I-V βρίσκει και το βέλτιστο σημείο λειτουργίας πάνω σε αυτή τη χαρακτηριστική

Στο κεφάλαιο 2 της εργασίας αυτής γίνεται μία αναφορά σε άλλα συστήματα suntracking που έχουν υλοποιηθεί στο παρελθόν. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία και στις εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του ήλιου. Στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται ο τρόπος λειτουργίας των βηματικών κινητήρων οι οποίοι θα χρησιμεύσουν στην κίνηση του συστήματος της εργασίας αυτής. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται θεωρητική απόδειξη του αλγορίθμου κίνησης του συστήματος. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αναλυτική παρουσίαση όλων των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα sun-tracking καθώς και του κώδικα με βάση τον οποίο προγραμματίστηκε ο μικροελεγκτής. Στο κεφάλαιο 7 γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και τα αποτελέσματα αυτής και στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διπλωματική εργασία.

2. Ανασκόπηση μεθόδων sun-tracking

Οι μηχανισμοί tracking μπορούν να χωριστούν σε 2 ευρείες κατηγορίες: Τα μηχανικά συστήματα και τα ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά συστήματα. Τα ηλεκτρονικά συστήματα δείχνουν αξιοπιστία και ακρίβεια tracking. Αυτά υποδιαιρούνται σε:

(1) μηχανισμοί που χρησιμοποιούν μηχανές ελεγχόμενες ηλεκτρονικά μέσω αισθητήρων που ανιχνεύουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

(2) μηχανισμοί που χρησιμοποιούν μηχανές με έλεγχο από υπολογιστή και έλεγχο ανάδρασης που παρέχεται από αισθητήρες που μετρούν την ηλιακή ροή επάνω στο δέκτη (μεγαλύτερο κόστος και μερικές φορές περιττό δεδομένου ότι ο ήλιος κινείται προς μια κατεύθυνση)

Υπάρχουν πολλές μελέτες οι οποίες πραγματεύονται την παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου (sun-tracking) από φωτοβολταϊκά στοιχεία με σκοπό την μέγιστη δυνατή απορρόφηση ηλιακής ενέργειας.

Μια σημαντική πειραματική μελέτη έγινε στο Αμμάν της Ιορδανίας [1] με σκοπό την έρευνα της επίδρασης διαφορετικών τύπων συστημάτων sun-tracking στη χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος και στην ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν 3 ηλεκτρομηχανικά συστήματα sun-tracking, ένα 2-αξόνων, ένα μονοαξονικό ανατολής-δύσης και ένα μονοαξονικό βορρά-νότου. Σε αυτά τα συστήματα και με τη χρήση διάφορων φορτίων (μεταβλητή αντίσταση) μελετήθηκαν οι τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος για κάθε περίπτωση. Οι τιμές κάθε συστήματος συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές συστήματος σταθερής επιφάνειας κλίσης 32° στο νότιο Αμμάν. Όπως αναμενόταν οι χαρακτηριστικές Ι-V και των 3 συστημάτων ήταν καλύτερες από αυτή της σταθερής επιφάνειας. Το κέρδος ισχύος σε σχέση με το σύστημα σταθερής επιφάνειας μετρήθηκε 43.87% για το σύστημα 2-αξόνων, 37.53% για το αντίστοιχο ανατολής-δύσης και 15.69% για το σύστημα βορρά-νότου.

Ο σχεδιασμός του συστήματος 2-αξόνων καθώς και των μονοαξονικών συστημάτων έγινε με χρήση μεθόδου ελέγχου ανοιχτού βρόχου βασισμένη σε προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC). Το γενικό διάγραμμα του μονοαξονικού συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Block διάγραμμα sun-tracking συστήματος 1 άξονα ανατολής-δύσης.

Το αντίστοιχο για το σύστημα 2-αξόνων φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7. Block διάγραμμα sun-tracking συστήματος 2 αξόνων.

Η λειτουργία τους βασίζεται στο ότι το PLC έχει προγραμματιζόμενη μνήμη με εντολές που αποθηκεύονται για να εφαρμόσουν τις διάφορες συναρτήσεις που ελέγχουν τους μηχανισμούς κίνησης. Δηλαδή έχουν αποθηκευτεί στο PLC οι θέσεις που πρέπει να παίρνει το φωτοβολταϊκό κάθε στιγμή της ημέρας. Οι γωνίες κλίσης β και αζιμουθίου γ αποτελούν εισόδους για το σύστημα, αποθηκεύονται στο PLC και χρησιμεύουν στον υπολογισμό της θέσης που πρέπει να έχει το φωτοβολταϊκό κάθε στιγμή. Το PLC ελέγχει τον κινητήρα και έτσι γίνεται κίνηση του μηχανισμού στις θέσεις που έχουν υπολογιστεί. Το μονοαξονικό σύστημα οδηγεί την επιφάνεια κίνησης με μηχανή 36V dc και με έναν μηχανισμό περιστροφής. Στο σύστημα 2-αξόνων η τάση του μηχανισμού κατακόρυφης κίνησης είναι 24V dc με μηχανισμό πίεσης και αποτελείται από 2 οδηγούς, έναν για την περιστροφή γύρω από τον κάθετο άξονα και έναν για την κίνηση ανατολήδύση Το πείραμα έγινε στις 27 Μαΐου 2002 από τις 7 το πρωί ως τις 5 το απόγευμα και χρησιμοποιήθηκαν πανομοιότυπα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτών δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

Rating power	35 W
Rating current	2.1 A
Rating voltage	17 V
Length	62 cm
Width	51 cm

Οι μηχανισμοί κίνησης μένουν ακίνητοι για 10 λεπτά και λειτουργούν για μερικά δευτερόλεπτα. Υπήρχε δηλαδή βηματική κίνηση έτσι ώστε κάθε μηχανισμός να δουλεύει λίγα λεπτά τη μέρα. Με αυτό τον τρόπο η ενέργεια που καταναλώνεται για την κίνηση είναι μόλις το 2% της ενέργειας που συλλέγεται. Στην έξοδο κάθε συστήματος είναι συνδεδεμένη η μεταβλητή αντίσταση η οποία μεταβάλλεται από 0 ως το άπειρο έτσι ώστε να υπολογιστεί το ρεύμα I_{sc} (short circuit current,V=0) και το V_{oc} (open circuit voltage,I=0) αντίστοιχα.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν στα σχήματα 8-17 δείχνουν τις χαρακτηριστικές V-Ι των συστημάτων κάθε μια ώρα από τις 7:30π.μ ως τις 4:30μ.μ.



Σχήμα 8. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 7:30 π.μ.



Σχήμα 9. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 8:30 π.μ.



Σχήμα 10. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 9:30 π.μ.



Σχήμα 11. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 10:30 π.μ.



Σχήμα 12. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 11:30 π.μ.



Σχήμα 13. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 12:30 μ.μ.



Σχήμα 14. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 13:30 μ.μ.



Σχήμα 15. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 14:30 μ.μ.



Σχήμα 16. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 15:30 μ.μ.



Σχήμα 17. Η χαρακτηριστική I-V για διάφορα συστήματα tracking σε σύγκριση με σταθερό σύστημα στις 16:30 μ.μ.

Η μέγιστη ισχύς (P_{max}) μπορεί να υπολογιστεί από το μεγαλύτερο εμβαδόν ορθογωνίου που περικλείεται από την χαρακτηριστική κάθε συστήματος. Η στιγμιαία ισχύς δίνεται από τον τύπο P=I*V. Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές βρέθηκε ότι η αντίσταση στο μέγιστο σημείο ισχύς είναι περίπου 10Ω. Ο παρακάτω πίνακας 2 παρουσιάζει για αυτή την τιμή της αντίστασης το κέρδος ισχύς εξόδου κάθε συστήματος για κάθε ώρα.

Time	P _{out} (W)					
	2-axes	N–S	Vertical	E-W	Fixed	
7:30 am	29.6	10.4	20.7	26.6	6.7	
8:30 am	30.6	17.7	27.9	29.2	11.5	
9:30 am	30.3	24.6	29.6	28.9	19.6	
10:30 am	31.0	29.6	29.6	28.9	25.3	
11:30 am	30.6	28.9	28.9	28.9	27.6	
12:30 pm	30.6	29.6	29.9	29.2	26.2	
1:30 pm	31.0	30.3	31.3	30.0	27.2	
2:30 pm	29.2	27.9	28.2	28.6	25.9	
3:30 pm	29.6	25.9	28.2	29.2	21.3	
4:30 pm	29.2	17.7	27.6	28.9	18.4	
Average (W)	30.17	24.26	28.19	28.84	20.97	
Power gain (%)	43.8722	15.2891	34.4301	37.5298	-	

Πίνακας 2. Κέρδος ισχύος κάθε συστήματος για κά	άθε ώρα
---	---------

Συμπερασματικά από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα φαίνεται ότι η διαφορά της παραγόμενης ισχύος μεταξύ κινητών και σταθερών συλλεκτών είναι μεγαλύτερη όταν η θέση του ήλιου είναι κοντά στη δύση του ή τις πρώτες ώρες ηλιοφάνειας. Αυτό συνέβη γιατί ο σταθερός συλλέκτης ήταν προσανατολισμένος προς τη θέση που έχει ο ήλιος το μεσημέρι.

Μια άλλη μελέτη [2] εκπονήθηκε στη Δαμασκό της Συρίας. Σε αυτή παρουσιάζεται ένα μονοαξονικό σύστημα sun-tracking στο οποίο η μετακίνηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ελέγχεται για να ακολουθεί την πορεία του ήλιου χρησιμοποιώντας μια μονάδα προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών (PLC). Η μονάδα PLC χρησιμοποιήθηκε για να ελέγχει και να παρακολουθεί τη μηχανική μετακίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου και για να συλλέγει και να αποθηκεύει τα δεδομένα που αφορούν την ακτινοβολία του ήλιου. Διαπιστώθηκε ότι η καθημερινή ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου αυξήθηκε κατά περισσότερο από 20% σε σύγκριση με αυτήν ενός σταθερής θέσης φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα και θα μπορούσε να συνδεθεί με έναν προσωπικό υπολογιστή για να ελέγχεται ολόκληρη η διαδικασία σε μια

οθόνη υπολογιστή. Ένας ηλιακός συλλέκτης λαμβάνει τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα. Επομένως, η βέλτιστη γωνία κλίσης για ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και από την εφαρμογή για τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η χρήση κινητών ηλιακών συστημάτων είναι πολύπλοκη και πιο ακριβή από τα συστήματα σταθερής επιφάνειας. Παρόλα αυτά τα κινητά συστήματα μπορούν να γίνουν οικονομικά ελκυστικά αφού προσφέρουν περισσότερη ενέργεια που για διάστημα ενός έτους υπερβαίνει το 25% σε σχέση με σταθερά συστήματα. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα μονοαξονικό σύστημα sun-tracking. Το PLC που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου PS4-201 MM1 και ήταν η καρδιά του συστήματος sun-tracking.

Δύο συμμετρικές φωτοαντιστάσεις χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της θέσης του ήλιου. Η τοποθέτηση τους έγινε στο ίδιο σημείο του φωτοβολταϊκού και διαχωρίστηκαν από έναν σταθερό διαχωριστή ο οποίος παρείχε σκιά σε μια από τις αντιστάσεις. Οι τιμές των αντιστάσεων αυτών μειώνονται όταν πέφτει στην επιφάνειά τους ηλιακό φως.



Σχήμα 18. Τρόπος τοποθέτησης των φωτοαντιστάσεων.

Η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής της αντίστασης άρα και την πτώση τάσης στα άκρα της. Σαν αποτέλεσμα αυξάνεται η τάση στα άκρα της μεταβλητής αντίστασης που συνδέεται σε σειρά με την φωτοαντίσταση όπως φαίνεται στο σχήμα 18. Οι 2 έξοδοι αυτού του κυκλώματος συνδέονται με τις αναλογικές εισόδους του PLC οι οποίες επεξεργάζονται τα σήματα και παράγουν ένα κατάλληλο σήμα στην έξοδο για να

ενεργοποιήσουν την ηλεκτρομηχανική κίνηση. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος κίνησης είναι ο εξής: Όσο οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κάθετα και στις 2 φωτοαντιστάσεις τότε το σύστημα παραμένει ακίνητο. Με την κίνηση του ηλίου, σε μια από τις 2 φωτοαντιστάσεις θα δημιουργηθεί σκίαση οπότε θα δημιουργηθεί και πτώση τάσης στα άκρα της όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Το δεδομένο αυτό θα πάει στο PLC το οποίο θα κινήσει το φωτοβολταϊκό έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να πέφτουν κάθετα και στις 2 φωτοαντιστάσεις.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου SM50_18A2 της SIEMENS και αποτελούταν από 36 ηλιακά στοιχεία (solar cells) συνδεδεμένα σε σειρά. Η τάση εξόδου κάθε ηλιακού στοιχείου είναι 0.6V και παράγει περίπου στην έξοδο 17V-50W κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (ένταση ηλίου=1000W/m², θερμοκρασία ηλιακού στοιχείου 25°C). Στο σχήμα 19 δίνεται το block diagram του συστήματος.



Σχήμα 19. Το block διάγραμμα του συστήματος.

Το σύστημα μπορεί να ελεγχθεί χειροκίνητα (κουμπιά S1,S2) ή αυτόματα. Στην πρώτη περίπτωση το PLC οδηγεί σε μια κατάλληλη έξοδο Q0 ή Q1 οι οποίες συνδέονται με 2 σερβομοτέρ μέσω των οποίων πραγματοποιείται η κατάλληλη κίνηση του φωτοβολταϊκού. Στην αυτόματη κίνηση το PLC ελέγχει τις 2 αναλογικές εισόδους που έρχονται από τις φωτοαντιστάσεις και βγάζει τις κατάλληλες τιμές στην εξόδους Q0 ή Q1.

Η σχεδίαση βασίστηκε σε έναν διακοπτικό ρυθμιστή ισχύος ο οποίος παρέχει τάση εξόδου μεταξύ 5.1 και 40 Volt και ρεύμα εξόδου 2.5Α.

Το κύκλωμα παράγει σταθεροποιημένη DC τάση εξόδου μεταξύ 12 και 24 V, ανάλογα με τις τιμές των αντιστάσεων R3, R4 όπως φαίνεται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Έξοδος του συστήματος ανάλογα με τις τιμές των αντιστάσεων

Output voltage (V)	R 3	R4	
12	4K7	6K2	
15	4K7	9K1	
18	4K7	12K	
24	4K7	18K	

<u>Πρόγραμμα ελέγχου PLC</u>

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο, την παρακολούθηση και την συλλογή πληροφοριών εκτελεί τις παρακάτω λειτουργίες:

- 1. Ελέγχει το σύστημα κίνησης σύμφωνα με το σχήμα 20.
- 2. Παρακολουθεί τις εισόδους εξόδους του PLC.
- Αποθηκεύει τα δεδομένα που δειγματολειπτούνται από τις φωτοαντιστάσεις.



Σχήμα 20. Διαδικασία ελέγχου

.Η διαδικασία ξεκινά μόλις κάποια σκιά πέσει σε μια από τις 2 φωτοαντιστάσεις και προκληθεί διαφορά αντίστασης η οποία μεταφέρεται στις εισόδους του PLC.Το σύστημα διαγράφει καθημερινά και ως το ηλιοβασίλεμα τροχιά που έχει γωνία 120° ανατολικά-δυτικά. Το σύστημα αυτό συγκρίθηκε με σύστημα sun-tracking σταθερής βάσης και γωνίας 33° (ιδανικότερη για τη Δαμασκό) την καλοκαιρινή

περίοδο του 2000.Τα συστήματα λειτουργούσαν από τις 5 το πρωί ως τις 7:30 το απόγευμα. Στο παρακάτω σχήμα 21 φαίνεται το κέρδος ισχύς συναρτήσει του χρόνου για μία μέρα.



Σχήμα 21. Καμπύλη ισχύς φορτίου (για σταθερή και για κινητή επιφάνεια).

Όπως φαίνεται το κέρδος είναι μεγαλύτερο τις πρώτες και τις τελευταίες ώρες της μέρας. Η γενική βελτίωση για το κινητό σύστημα είναι 40% για τις ώρες 6-10 το πρωί και 3-5 το απόγευμα, ενώ η βελτίωση για τις ώρες του μεσημεριού είναι μόλις 2-4%. Αυτό αποδίδεται κυρίως στη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού που προκαλείται με την αύξηση της θερμοκρασίας εκείνες τις ώρες της μέρας.

Στο επόμενο διάγραμμα του σχήματος 22 φαίνεται η διαφορά ισχύος ανάμεσα στα 2 συστήματα.



Σχήμα 22. Βελτίωση ισχύς κατά τη διάρκεια διάφορων περιόδων της ημέρας.

Το κέρδος ισχύος για το σύστημα sun-tracking ήταν 66% από τις 6-8:45 το πρωί, 3% από τις 8:45-4:30 και περισσότερο από 45% από τις 4:30-6:30. Κατά μέσο όρο δηλαδή το σύστημα sun-tracking είναι 20% αποδοτικότερο από το σύστημα σταθερής βάσης με απόκλιση ±2%.

Σε μία άλλη έρευνα [3] σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Αμμάν ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα sun-tracking 2 αξόνων. Η κίνηση της επιφάνειας suntracking του συστήματος ελέγχεται με PLC. Για τον έλεγχο της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ελέγχου ανοιχτού βρόγχου με προγραμματιζόμενη μνήμη στην οποία αποθηκεύονται εντολές για την υλοποίηση των διάφορων συναρτήσεων. Ο προγραμματισμός της μνήμης βασίστηκε στην ανάλυση των ηλιακών γωνιών που είχε προηγηθεί και έτσι με αυτό τον τρόπο γίνεται η κίνηση του συστήματος. Η έρευνα έγινε πάνω στο πόσο αυξάνει το σύστημα 2-αξόνων τη συλλεγόμενη ενέργεια σε σχέση με ένα σύστημα σταθερής επιφάνειας με γωνία κλίσης 32° ως προς τον νότο.

Σε αυτή την έρευνα και προκειμένου το σύστημα να είναι αποδοτικό και σε περίπτωση συννεφιάς χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ελέγχου ανοιχτού βρόγχου και η θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της μέρας είχε αποθηκευτεί στο PLC. Δηλαδή ο αλγόριθμος κίνησης του συστήματος βασίζεται σε υπολογισμούς των γωνιών κλίσης και αζιμουθίου που είχαν προϋπολογιστεί και αποθηκευτεί στο PLC έτσι ώστε το σύστημα να ακολουθεί συνεχώς τη πορεία του ήλιου.

Μαθηματικά η θέση της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού καθορίζεται από 2 γωνίες β (γωνία κλίσης της επιφάνειας) και γ (γωνία αζιμουθίου της επιφάνειας). Το suntracking σύστημα 2 αξόνων καθορίζεται με βάση τις γωνίες: β=θ_z και γ=γ_s, όπου θ_z γωνία κλίσης του ήλιου και γ_s γωνία αζιμουθίου του ήλιου. Δύο μηχανές κίνησης χρησιμοποιήθηκαν, μία για την περιστροφή γύρω από τον οριζόντιο άξονα βορράνότου (έλεγχος της παραμέτρου β) και μία για την περιστροφή γύρω από τον κάθετο άξονα (έλεγχος της παραμέτρου γ).

Το ηλεκτρομηχανικό σύστημα αποτελείται από 2 οδηγούς, έναν για την περιστροφή γύρω από τον κάθετο άξονα όπως φαίνεται στο σχήμα 23 και έναν άλλο που χρησιμοποιείται για την κίνηση ανατολής-δύσης όπως φαίνεται στο σχήμα 24.



Σχήμα 23. Ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα για κάθετο έλεγχο.



Σχήμα 24. Ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα για έλεγχο κλίσης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα λογισμικό έχει αναπτυχθεί για να καθορίσει τις διαφορετικές ηλιακές γωνίες στο Αμμάν που απαιτούνται στην εργασία. Αυτό επέτρεψε τον υπολογισμό της βέλτιστης θέσης της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας της ημέρας. Αυτές οι ώρες της ημέρας διαιρέθηκαν σε τέσσερα ίδια χρονικά διαστήματα T1, T2, T3 και T4 (όπως φαίνεται στο σχήμα 25).



Σχήμα 25. Διαίρεση της ημέρας (της διάρκειας της ηλιοφάνειας) σε 4 χρονικά διαστήματα.

Κατόπιν, ο προγραμματισμός του PLC βασίστηκε στην ανάλυση των ηλιακών γωνιών και της ταχύτητας των μηχανών. Το PLC ελέγχει τις ενδιάμεσες θέσεις της μηχανής. Η μηχανή κίνησης ανατολής-δύσης μένει ακινητοποιημένη για 5-10 λεπτά σύμφωνα με τα παραπάνω χρονικά διαστήματα και έπειτα δουλεύει (κινείται) για μερικά δευτερόλεπτα. Η μηχανή για την κάθετη κίνηση μένει ακινητοποιημένη για 15-35 λεπτά και έπειτα δουλεύει (κινείται) για μερικά

Το πρόγραμμα PLC που οδηγεί τον κινητή ανατολικής-δύσης παρουσιάζεται στο σχήμα 26.



Σχήμα 26. Το πρόγραμμα του PLC που οδηγεί τον κινητή ανατολικής-δύσης.

Το πρόγραμμα PLC για το επίπεδο περιστροφής γύρω από τον άξονα νότουβορρά αποτελείται από δύο μέρη σχετικά με τους δύο τύπους κινήσεων, προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Από τις θεωρητικά υπολογισμένες τιμές γωνιών διαπιστώνεται ότι η β μειώνεται από τη μέγιστη τιμή στην ανατολή έως την ελάχιστη το μεσημέρι. Αυτό αντιπροσωπεύει την μπροστινή κίνηση, η οποία καλύπτει διαστήματα του χρόνου Τ1 και Τ2. Η κίνηση προς τα πίσω εμφανίζεται από το μεσημέρι μέχρι το ηλιοβασίλεμα όπου η β είναι μέγιστη. Αυτή η χρονική περίοδος καλύπτει τα διαστήματα Τ3 και Τ4. Τα B02, B05, B15 και B18 στο σχήμα είναι παραπάνω ρολόγια που αντιπροσωπεύουν τα τέσσερα προαναφερθέντα διαστήματα χρόνου. Τα ρολόγια ενεργοποιούν τα B08, B10, B22 και B24, τα οποία αντιπροσωπεύουν χρονόμετρα on-off. Τα ρολόγια πρέπει να ρυθμιστούν στην υπολογισμένη συνάρτηση θέσης του χρόνου. Για παράδείγμα το ρολόι B02 ρυθμίζεται για να είναι ενεργό από 6,30π.μ έως 9,30μ.μ, που σημαίνει ότι ο B08 θα είναι ενεργός κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Ο B08 ρυθμίζεται να είναι ανοικτός για 2 δευτερόλεπτα και κλειστός για 7 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι η μηχανή κίνησης ανατολής-δύσης θα είναι ανενεργή για 7 λεπτά και εργάζεται για 2 δευτερόλεπτα. Το πρόγραμμα PLC του κάθετου κινητού συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 27.



Σχήμα 27. Πρόγραμμα PLC κάθετου κινητή.

Το πρόγραμμα PLC για το επίπεδο περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα αποτελείται από δύο μέρη που αφορούν τους δύο τύπους κινήσεων, προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Από θεωρητικούς υπολογισμούς της γωνίας γ, συνάγεται ότι η μπροστινή κίνηση καλύπτει τα διαστήματα του χρόνου T1, T2, T3 και T4. Τα B02, B07, B12 και B18 είναι ρολόγια που αντιπροσωπεύουν τα τέσσερα ανωτέρω αναφερθέντα διαστήματα του χρόνου. Τα ρολόγια ενεργοποιούν τα B05, B10, B15 και B21, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα χρονόμετρα on-off. Τα ρολόγια πρέπει να ρυθμιστούν στην υπολογισμένη συνάρτηση θέσης του χρόνου. Για παράδειγμα το ρολόι B02 ρυθμίζεται να είναι ενεργό από 6,30π.μ έως 9,30μ.μ, το οποίο σημαίνει ότι το B05 θα είναι ενεργό κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Το B05 ρυθμίζεται για να είναι οη για 5 δευτερόλεπτα και off για 23 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι η μηχανή της κάθετης κίνησης θα είναι ανενεργή για 23 λεπτά και έπειτα εργάζεται για 5 δευτερόλεπτα. Ο B32 θα ενεργοποιήσει την υπεύθυνη για την κάθετη κίνηση μηχανή που ακολουθεί την οπίσθια κατεύθυνση μετά από το ηλιοβασίλεμα. Αυτός ο σταδιακός τρόπος sun-tracking απλοποιεί την εργασία του συστήματος χωρίς μεγάλη απώλεια ισχύος. Η ενέργεια που καταναλώνεται από το ηλεκτρικό σύστημα μηχανών και ελέγχου δεν είναι μεγαλύτερη από το 3% της ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα. Δύο πυρανόμετρα τοποθετήθηκαν στις επιφάνειες των 2 υπό εξέταση συστημάτων (tracking και non-tracking). Τα δεδομένα από τα πυρανόμετρα στέλνονται σε έναν υπολογιστή. Οι αναγνώσεις των πυρανόμετρων καταγράφονταν κάθε 5 λεπτά. Οι αποθηκευμένες μετρήσεις επεξεργάζονταν με χρήση του Microsoft Excel, και οι μετρημένες ηλιακές τιμές ακτινοβολίας υπολογίζονταν κατά μέσο όρο και πολλαπλασιάζονταν με 3600 για να λάβουν την ωριαία συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε MJ/m². Μια συνεχής δοκιμή διάρκειας 4 ημερών, 7 ,10 ,11 και 12 Μαΐου 2001, έγινε στο εργαστήριο ανανεώσιμης ενέργειας στο εφαρμοσμένο πανεπιστήμιο επιστήμης στο Αμμάν. Το επόμενο σχεδιάγραμμα του σχήματος 28 δείχνει την συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε MJ/m² που μετρήθηκε στις 7 Μαΐου 2001.



Σχήμα 28. Το διάγραμμα ηλιακής ακτινοβολίας-Χρόνου.

Οι ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας προστίθενται για τη λήψη της συνολική καθημερινής ηλιακής ακτινοβολίας. Σε αυτές τις καθημερινές τιμές υπολογίζεται ο μέσος όρος για τη λήψη της μέσης καθημερινής συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας για εξεταζόμενη την περίοδο όπως φαίνεται στον πίνακα 4.

Date of day	Two axes tracking	Fixed @ 32 latitude	% Gain
07/05/2001	41.266	27.746	48.73
10/05/2001	27.49	20.73	32.61
11/05/2001	34.534	23.661	45.95
12/05/2001	36.057	26.11	38.09
Average	34.83675	24.56175	41.34

Πίνακας 4. Μέσος όρο για τη λήψη της μέσης καθημερινής συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χαμηλή συλλογή ενέργειας στις 10 Μαΐου οφείλεται στη συννεφιά που επικρατούσε τη συγκεκριμένη μέρα. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η χρήση sun-tracking συστήματος δύο αξόνων που ακολουθούν οδηγεί σε μια αύξηση της καθημερινής συλλογή ηλιακής ενέργειας περίπου 41,34% σε σχέση με το σύστημα σταθερής επιφάνειας.

Μία άλλη έρευνα [4] είχε ως θέμα τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός μονοαξονικού συστήματος sun-tracking ανατολής-δύσης. Η θέση και η "κατάσταση" του ήλιου εντοπίζονται με τη χρήση τριών φωτοαντιστάσεων (LDRs). Η μία εντοπίζει εάν ο συλλέκτης είναι εστιασμένος ενώ η δεύτερη διαπιστώνει εάν υπάρχει συννεφιά και η τρίτη διαπιστώνει εάν είναι μέρα ή νύχτα. Τα αποτελέσματα μεταφέρονται σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο χειρίζεται μια μηχανή χαμηλής ταχύτητας 12V dc η οποία περιστρέφει τον συλλέκτη μέσω ενός κιβώτιου ταχυτήτων μείωσης ταχύτητας. Η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το τελικό σύστημα που σχεδιάστηκε αποτελείται από μια μηχανή παραγωγής μικρών τιμών ρεύματος (dc) η οποία περιστρέφει τον συλλέκτη μέσω ενός κιβώτιου ταχυτήτων μείωσης ταχύτητας. Ένα σύστημα ελέγχου χρησιμοποιήθηκε για να εντοπίζει τη θέση του ήλιου και να λειτουργεί τη μηχανή. Το διάγραμμα του συστήματος μαζί με έναν πίνακα που δείχνει τις συναρτήσεις ελέγχου του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 29.



Σχήμα 29. Μηχανισμός tracking- Διάγραμμα συστήματος.

Ο αλγόριθμος ελέγχου του συστήματος είναι ο εξής:

Οι φωτοαντιστάσεις ανάλογα με τα ποσά ακτινοβολίας που δέχονται στέλνουν σήμα σε ένα σύστημα ελέγχου το οποίο ανοίγει ή κλείνει τη μηχανή κίνησης. Όσο το A LDR είναι εστιασμένο (ο ήλιος δηλαδή προσπίπτει κάθετα σε αυτό) το σύστημα ελέγχου έχει τη μηχανή ανενεργή. Αν το Α δεν είναι εστιασμένο (κατά την κίνηση του ηλίου ο αισθητήρας Α σκιάζεται) παρουσιάζεται πτώση τάσης σαν είσοδο στο σύστημα ελέγχου το οποίο δίνει σήμα στη μηχανή να κινηθεί ώσπου το Α να στείλει το κατάλληλο σήμα που θα σημαίνει ότι είναι και πάλι εστιασμένο. Τότε το σύστημα ελέγχου θέτει και πάλι τη μηχανή σε ανενεργή κατάσταση. Όταν το ποσό ακτινοβολίας πέσει κάτω από ένα επίπεδο (συννεφιά) τότε ο Β αισθητήρας στέλνει σήμα στο σύστημα ελέγχου το οποίο με τη σειρά του και για όσο η είσοδος του παραμένει η ίδια (αυτή που στέλνει το Β) ενεργοποιεί τη μηχανή για 7 δευτερόλεπτα κάθε 2 λεπτά. Σύμφωνα με υπολογισμούς που λαμβάνουν υπόψη την ταχύτητα κίνησης του ήλιου αλλά και την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής με αυτό τον τρόπο υπάρχει αρκετά καλή ακρίβεια στην ακολουθία του ήλιου. Σε αυτή την περίπτωση η τροχιά του ήλιου ακολουθείται προσεγγιστικά ώσπου να ξαναεμφανιστεί ο ήλιος και ο συλλέκτης να εστιαστεί σύμφωνα με το αισθητήριο Α. Τέλος το βράδυ όπου η ακτινοβολία του ήλιου είναι μηδενική Ο αισθητήρας C στέλνει το ανάλογο σήμα στο σύστημα ελέγχου το οποίο δίνει την κατάλληλη εντολή στη μηχανή κίνησης η οποία επαναφέρει το συλλέκτη στην αρχική του θέση όπου θα επαναλειτουργήσει το επόμενο πρωινό (ανατολή του ήλιου).

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος επιδεικνύεται στο επόμενο σχήμα 30 όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα ελέγχου.



Σχήμα 30. Μηχανισμός tracking- Διάγραμμα ελέγχου.

Όπως προαναφέρθηκε η μηχανή του συστήματος αλλάζει όταν κάποιος από τους τρεις αισθητήρες σκιάζεται. Ανάλογα με την σκίαση (υπάρχει κάποιο threshold σε κάθε αισθητήριο) ενεργοποιείται και ο αντίστοιχος μηχανισμός. Η λογική με την οποία συμπεριφέρεταί κάθε αισθητήριο παρουσιάζεται στα διαγράμματα ροής που παρουσιάζονται στο σχήμα 31.



Σχήμα 31. Διαγράμματα ροής αισθητήρων.

Στη συνέχεια στο σχήμα 32 παρουσιάζεται ένα block diagram του συστήματος ελέγχου που παρουσιάζει τους 3 αισθητήρες μαζί με ένα chip χρονομέτρου, με προς τα εμπρός και αντίστροφα σερβομοτέρ και διακόπτες ορίων (east-west L/S).



Σχήμα 32. Διάγραμμα κυκλώματος συστήματος ελέγχου.

Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από μετατροπείς και πύλες nand με σκοπό να "μεταφράσει" την αντίσταση των LDRs σε σήματα που ενεργοποιούν τα σερβομοτέρ. Ο μηχανισμός αποδείχθηκε πολύ αξιόπιστος κατά τη διάρκεια εξεταστικής περιόδου περίπου 4 ετών. Η λειτουργία που επέτρεπε στο μηχανισμό να ακολουθεί κατά προσέγγιση την πορεία του ήλιου όταν αυτός σκιάζεται πίσω από ένα σύννεφο ήταν πολύ αποτελεσματική αφού απαιτούνταν λιγότερο από 30 δευτερόλεπτα για να εστιάσουν εκ νέου το συλλέκτη μετά την επανεμφάνιση του ήλιου. Εκτενής δοκιμή του ηλιακού συλλέκτη καθόρισε ότι ο μηχανισμός του tracking ήταν πολύ αποτελεσματικός και ακριβής. Η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στη χειρότερη περίπτωση, με την ακτινοβολία της τάξης των 100 W /m², η ακρίβεια της θέσης του μηχανισμού ήταν 0,2 °. Αυτή η γωνία μειωνόταν σε 0,05 ° για ακτινοβολία της τάξης περίπου 600 W/m². Κατά συνέπεια η απόδοση του μηχανισμού με τον παραβολικό συλλέκτη ήταν ικανοποιητική ολόκληρο το έτος. Η ακρίβεια ήταν πολύ μεγαλύτερη από το προτεινόμενο 0,5° που εξαγόταν από την αποδεκτή γωνία δοκιμής των συλλεκτών. Η ακρίβεια του μηχανισμού μπορεί να αυξηθεί με την αλλαγή της τιμής της ρυθμιζόμενης αντίστασης που συνδέεται σε σειρά με τον αισθητήρα Α. Όμως μεγαλύτερη ακρίβεια έχει ως αποτέλεσμα πιο συχνές ενεργοποιήσεις της μηχανής με πιθανή συνέπεια τη μεγαλύτερη φθορά της.

Το κόστος όλου του μηχανισμού ήταν 250 δολάρια. Το σύστημα ελέγχου μαζί με τους 3 αισθητήρες κόστισε 160 δολάρια. Εντούτοις, το σύστημα ελέγχου του μηχανισμού παραμένει ο ίδιος ανεξάρτητα από το μέγεθος εγκαταστημένων συλλεκτών, ενώ ένας μεγαλύτερος συλλέκτης θα απαιτούσε μια ισχυρότερη μηχανή. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί επίσης να βρει την εφαρμογή και σε άλλα συστήματα που κατασκευάζονται για να ακολουθήσουν την πορεία του ήλιου, π.χ εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σε μια άλλη έρευνα [5] σχεδιάστηκε και κατασκευάσθηκε ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα sun-tracking στο Technical University Federico Santa Maria (UTFSM) που βρίσκεται στο Βαλπαραΐσο της Χιλής. Επιτρέπει την αυτόματη μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας με ένα αισθητήριο (pyrheliometer). Λειτουργεί αυτόματα, καθοδηγούμενο από έναν σέρβο-σύστημα κλειστού βρόγχου. Ένας φωτοανιχνευτής τεσσάρων τεταρτημορίων ανιχνεύει τη θέση του ήλιου και δύο μικρές dc μηχανές κινούν την πλατφόρμα οργάνων κρατώντας την εικόνα του ήλιου στο κέντρο των φωτοανιχνευτών. Κάτω από νεφελώδεις συνθήκες, όταν ο ήλιος δεν είναι ορατός, ένα πρόγραμμα υπολογισμού υπολογίζει τη θέση του ήλιου και αναλαμβάνει τον έλεγχο της κίνησης, έως ότου μπορέσει να ανιχνεύσει τον ήλιο και πάλι ο ανιχνευτής.

Το κατασκευαστικό σύστημα εξετάστηκε στις κλιματολογικές συνθήκες της πόλης Βαλπαραΐσο. Το παραπάνω σύστημα αποδεικνύει την αποτελεσματική εργασία ενός απλού και φτηνού μηχανισμού, ο οποίος μπορεί να προσαρμοστεί για να εργαστεί επίσης και με φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Η Χιλή βρίσκεται μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 18° και 55°. Η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία ποικίλλει μεταξύ 2,14 και 5,91 kWh/m², που είναι περισσότερο από επαρκής για να παρέχεται επαρκής ενέργεια για τις ηλιακές θερμικές εφαρμογές. Ο μηχανισμός sun-tracking για αυτόματη μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζεται στο σχήμα 33.



Σχήμα 33. Αυτόματο σύστημα Sun-tracking με αισθητήριο μέτρησης άμεσης ακτινοβολίας.

Ο ενεργοποιητής έχει δύο άξονες της κίνησης. Ένα πρόγραμμα υπολογισμού δημιουργήθηκε για να υπολογίσει τη θέση του ήλιου σε νεφελώδεις συνθήκες για να εξασφαλίσει σωστό προσανατολισμό στο αισθητήριο μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια εκείνων των ωρών.

Σχηματικά ο μηχανισμός δίνεται στο σχήμα 34.



Σχήμα 34.Μηχανισμός συστήματος.

Οι δύο άξονες της κίνησης είναι: άξονας HH, 1 (κίνηση –ανατολικής δύσης) και άξονας EE, 2 (ανύψωση). Η επαρκής ακολουθία της θέσης του ήλιου από το αισθητήριο μέτρησης άμεσης ακτινοβολίας (5,στο σχήμα) πραγματοποιείται από έναν συνδυασμό και των δύο κινήσεων των αξόνων. Τα πλαίσια 8 και 9 στο τέλος των αξόνων HH και ΕΕ περιέχουν ένα ποτενσιόμετρο και δύο διακόπτες ορίου το κάθε ένα. Το ποτενσιόμετρο αναμεταδίδει τη γωνιακή θέση και οι διακόπτες δείχνουν ότι ο μηχανισμός έχει φθάσει σε ±90°. Και οι δύο άξονες έχουν διαφορετικές ταχύτητες κίνησης: V_{EE} =3600°/h και του άξονα HH είναι από -20° σε 200°. Ο αισθητήρας, 11, είναι συνδεμένος με το αισθητήριο μέτρησης άμεσης ακτινοβολίας.

Ένας ανιχνευτής, 12, μετράει την ακτινοβολία από τον ουρανό και παράγει ένα δυαδικό σήμα που δείχνει την αρχή και το τέλος της ημέρας. Όλος ο μηχανισμός τοποθετείται επάνω στο πλαίσιο 13, το οποίο περιέχει ηλεκτρονικά κυκλώματα. Δύο dc μηχανές 3 W οι 6 και 7, χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση των αξόνων. Επίσης κατασκευάστηκε ένα ειδικό κύκλωμα ελεγχόμενου ανορθωτή με τη δυνατότητα να αντιστρέφει τη φορά περιστροφής των μηχανών. Η θέση του ήλιου

πρέπει να εξακριβωθεί για ένα γεωγραφικό σημείο, όπου θα γίνει η μέτρηση. Δύο γωνίες είναι σημαντικές ,το ύψος και το αζιμούθιο. Το σχήμα 35 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της κίνησης και των 2 αξόνων ΗΗ και ΕΕ για τις 2 ακραίες ημέρες (ισημερίες καλοκαιριού και χειμώνα).



Σχήμα 35. Θέσεις των αξόνων ΗΗ,ΕΕ κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο στο Βαλπαραΐσο της Χιλής.

Η ταχύτητα του άξονα ΗΗ είναι σχεδόν σταθερή το καλοκαίρι, ενώ υπάρχουν μερικές μεταβολές τον χειμώνα. Η κίνηση του άξονα ΕΕ είναι πιο πολύπλοκη και έχει όρια διακύμανσης 50°. Φθάνει στη μέγιστη τιμή του 120° το καλοκαίρι (21 Δεκεμβρίου —ανατολή και ηλιοβασίλεμα) και ελάχιστη περίπου 35° στη μεσημβρία στις 21 Ιουνίου τον χειμώνα της Χιλής. Ο αισθητήρας για τη μέτρηση της θέσης του ήλιου αποτελείται από μια φωτοδίοδο τεσσάρων-τεταρτημορίων και παρουσιάζεται στο σχήμα 36.



Σχήμα 36. Αισθητήρας 4 τεταρτημορίων.
Το διάγραμμα παρουσιάζει 4 βασικές ζώνες: βορειοανατολική (NE), βορειοδυτική (NW) ,νοτιοδυτική (SW) και νοτιοανατολική (SE). Μια ακτίνα του φωτός φωτίζει ένα μέρος των τεσσάρων ζωνών μέσω του ανοίγματος που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Όταν ο αισθητήρας κινείται (ή όταν η θέση του ήλιου αλλάζει), η ακτίνα φωτίζει διαφορετικά μέρη κάθε τεταρτημορίου και συνεπώς παράγει διαφορετικά ρεύματα στη δίοδο . Ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα χρησιμοποιείται για να μετρήσει το ρεύμα από τα τεταρτημόρια NE, NW, SW και SE. Αφού "βρει" τον ήλιο, το σύστημα αρχίζει να δουλεύει με τρόπο "κλειστού βρόγχου" όπως φαίνεται στο σχήμα 37.



Σχήμα 37. Block διάγραμμα.

Το ολοκληρωμένο σύστημα ως έναν αυτόματο σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα 38.



Σχήμα 38. Το ολοκληρωμένο σύστημα ως έναν αυτόματο σύστημα.

Υπάρχουν πέντε block που παρουσιάζονται.Το Α αντιπροσωπεύει την επεξεργασία σήματος εισόδου. Λαμβάνει τις προηγούμενες οδηγίες, που δίνονται από το χειριστή με στόχο μια δεδομένη απόκριση (λειτουργία για να ενεργοποιήσει το σύστημα κ.λπ.), και πληροφορίες που προέρχονται από το φωτοτρανζίστορ (ανιχνεύοντας νύχτα –μέρα) ως δυαδικό σήμα, το ποτενσιόμετρο (το επίπεδό της τάσης είναι μια κωδικοποίηση της γωνίας) και των δύο διακοπτών ορίου (δυαδικών). Το Β παρουσιάζει τη φυσική επεξεργασία σήματος εισόδου όπου τα επίπεδα ακτινοβολίας μετασχηματίζονται σε τάση με τη βοήθεια του αισθητήρα. Το C αντιπροσωπεύει φυσική επεξεργασία σήματος εξόδου για να ενεργοποιήσει τις μηχανές και τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ακτινοβολίας που στέλνονται για εγγραφή. Το D εκτελεί την επεξεργασία σήματος εξόδου -ένα σήμα συναγερμού και ένα "bit" για να επιβεβαιωθεί εάν η εξερχόμενη μέτρηση ισχύει ή αντιστοιχεί σε λανθασμένη λειτουργία. Η κεντρική μονάδα επεξεργαστών (KME) είναι ένας επεξεργαστής Ζ 80 που ελέγχει τη λογική επεξεργασία όλων των πληροφοριών, αποφασίζει πότε ο βρόγχος ελέγχου πρέπει να κλείσει ή, εάν όχι, τι πρέπει να γίνει και δίνει τις πληροφορίες για την κατάσταση του μηχανισμού. Οι διαφορετικές ενέργειες ελέγχου παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 5.

Action	Loop	Operation
EXTERNAL	OPEN	The mechanism starts acting under the influence of external signal. It is possible to govern it from the table of operation
RETURN	OPEN	Axis HH reaches the west ($H = 0$). Subsequently, the mechanism returns to $H = 180^{\circ}$ to the east. Axis EE is kept in the position reached last.
WAITING	OPEN	The mechanism waits for signals from the regulation system.
SEEKING	OPEN	The sky is clouded (or the sun is not visible). The mechanism seeks the sky till it finds the sun's position. Axis HH moves with constant velocity and axis EE moves like a pendulum.
AUTOMATIC	CLOSED	The sun is in the visible cone of the sensor. Then the loop closes for automatic action.

Πίνακας 5. Είδη ελέγχου

Ο αλγόριθμος κίνησης έχει να κάνει με το αισθητήριο των 4 τεταρτημορίων. Σκοπός είναι να πέφτουν οι ακτίνες του ήλιου με τέτοιο τρόπο πάνω του ώστε να υπάρχει μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας. Όταν η ήλιος μετακινηθεί, το αισθητήριο στέλνει σήμα στην ΚΜΕ η οποία κινεί τη μηχανή έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν στο αισθητήριο με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνεται και πάλι η μέγιστη δυνατή ενέργεια. Όσο συμβαίνει αυτό το σύστημα είναι κλειστού βρόγχου. Όταν το ποσό ενέργειας που λαμβάνεται πέσει κάτω από ένα όριο τότε το σύστημα γίνεται ανοιχτού τύπου και κινείται (σαν εκκρεμές στον άξονα ΕΕ) ώσπου να εντοπιστεί και πάλι η θέση του ήλιου.

Επειδή νεφώσεις μπορούν να εμφανιστούν σε κάθε στιγμή, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ακριβώς ο άξονας ΕΕ χωρίς χρησιμοποίηση ενός μάλλον περίπλοκου συστήματος. Η λύση ήταν να κινηθεί ο άξονας ΕΕ ως εκκρεμές μεταξύ 20° και 100° μέχρι ο ήλιος να εντοπιστεί. Το πρόβλημα με τη διαφορά γωνίας στις ακραίες περιπτώσεις λύνεται με τη βοήθεια του αισθητήρα κώνου, ο οποίος έχει μια εμβέλεια περίπου 40°. Η κίνηση ως εκκρεμές πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το σήμα από το ποτενσιόμετρο του άξονα ΕΕ και εφαρμόζοντας το σε έναν συγκριτή με υστέρηση. Ο άξονας ΗΗ πρέπει να κινηθεί με περίπου 15°/ h (180° σε 12 ώρες, 1 ηλιακή ημέρα). Αυτό πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τους παλμούς από ένα ηλεκτρονικό ρολόι. Ένα παράδειγμα δύο ωρών ανάγνωσης του αισθητηρίου μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας, που οδηγείται από το σύστημα, παρουσιάζεται στο σχήμα 39.



Σχήμα 39. Παράδειγμα δύο ωρών ανάγνωσης του αισθητηρίου άμεσης ακτινοβολίας. Διάγραμμα ακτινοβολίας (W/m²)-ώρας

Το σύστημα ήταν στο καθεστώς "αυτόματο", ακολουθώντας τον ήλιο χωρίς αξιόλογη απόκλιση. Όταν η ακτινοβολία μειώθηκε σε λιγότερο από 140 W/m², η μέτρηση του κώνου προκαλεί μια αλλαγή από καθεστώς "αυτόματο" σε αυτό της "αναζήτησης". Αυτός ήταν ο λόγος που η ακτινοβολία μειώθηκε στο μηδέν για περίπου 14 ώρες, αλλά επέστρεψε μερικά λεπτά αργότερα. Λίγο πριν από τις 15 ώρες μια σκιά ενός κτηρίου έφθασε στο όργανο. Αυτό προκάλεσε αναζήτηση γύρω από το σημείο όπου ο ήλιος εξαφανίστηκε. Συμπερασματικά οι ταχύτητες των αξόνων είναι σχετικά χαμηλές, αλλά το σχέδιο του συστήματος εξασφαλίζει πολύ χρόνο λειτουργίας χωρίς ακριβή συντήρηση. Για ηλιακή ακτινοβολία κάτω από 140 W/m² οι εγγραφές πέφτουν ξαφνικά σε μηδέν, αλλά επάνω από αυτήν την τιμή το σύστημα λειτουργεί σταθερά. Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς είναι ένα αντικείμενο μελλοντικής εργασίας. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αυτός ο τύπος κινητή με μεγαλύτερα και βαρύτερα συστήματα, όπως ηλιακοί πίνακες και συμπυκνωτές. Για καλύτερη απόδοση και υψηλότερη ανάλυση θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ψηφιακός (DSP) έλεγχος.

Μια άλλη μελέτη [6] πραγματοποιήθηκε στο Ιράκ και συγκεκριμένα στη Βαγδάτη. Η πειραματική αυτή μελέτη εξέτασε την επίδραση της χρησιμοποίησης συστήματος sun-tracking 2 αξόνων στην θερμική απόδοση των σύνθετων παραβολικών συλλεκτών (compound parabolic concentrators, CPC). Ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα sun-tracking δύο-αξόνων και δύο ίδιοι συλλέκτες CPC σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για το σκοπό της έρευνας. Δύο περιπτώσεις εξετάστηκαν: στην πρώτη δεν επιτρεπόταν η ροή νερού μέσω του συλλέκτη, στη δεύτερη, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σταθερά ποσοστά ροής του νερού. Και στις δύο περιπτώσεις παρακολουθούνταν οι μεταβολές της θερμοκρασίας ύδατος στα συστήματα. Ο κινούμενος συλλέκτης CPC παρουσίασε καλύτερη απόδοση με αύξηση στη συλλεχθείσα ενέργεια μέχρι και 75% συγκρινόμενη με αυτή ενός ίδιου σταθερού συλλέκτη.

Η μελέτη στοχεύει στην έρευνα της βελτίωσης της απόδοσης ενός CPC συλλέκτη όταν χρησιμοποιείται σε σύστημα sun-tracking δύο-αξόνων . Για αυτό τον σκοπό ένα σύστημα sun-tracking δύο-αξόνων καθώς και δυο CPC συλλέκτες σχεδιάστηκαν κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν στη Βαγδάτη. Το σύστημα κίνησης αποτελείται από δύο ίδια υποσυστήματα, ένα για κάθε άξονα. Κάθε υποσύστημα αποτελείται από δυο πλαϊνά φωτοτρανζίστορ που χωρίζονται από ένα χώρισμα ενός ορισμένου ύψους. Ένας ενισχυτής διαφοράς τάσης ενεργοποιεί το κιβώτιο ταχυτήτων και τον μηχανισμό μιας dc μηχανής μέσω ενός κυκλώματος οδήγησης για να οδηγήσει το συλλέκτη γύρω από τον επιθυμητό άξονα μέχρι η διαφορά τάσης να εξαλειφθεί. Αυτό συμβαίνει όταν τα δυο πλαϊνά φωτοτρανζίστορ λαμβάνουν ίσο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας. Δηλαδή ο αλγόριθμος κίνησης βασίζεται στο ότι οι ακτίνες πρέπει να πέφτουν κάθετα στα 2 φωτοτρανζίστορ του

40

κάθε υποσυστήματος έτσι ώστε να μην δημιουργείται σκιά σε ένα από τα δυο. Όταν σκιαστεί ένα από τα δυο τότε σημαίνει ότι ο ήλιος μετακινήθηκε και το υποσύστημα κινείται μέχρι οι ακτίνες να ξαναπέσουν κάθετα στα 2 φωτοτρανζίστορ του κάθε υποσυστήματος (η διαφορά τάσης να εξαλειφθεί). Το σύστημα σχεδιάστηκε για να ακολουθεί τον ήλιο κάθε τρία έως τέσσερα λεπτά στο οριζόντιο επίπεδο και κάθε τέσσερα έως πέντε λεπτά στο κάθετο επίπεδο, το οποίο αντιστοιχεί σε μια γωνία κίνησης περίπου ενός βαθμού. Η κατανάλωση ισχύος του συστήματος βρέθηκε ότι είναι περίπου 0,5 Whr. To block diagram του συστήματος φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 40.



Σχήμα 40. Το block diagram του συστήματος.

Δύο ίδιοι συλλέκτες CPC κατασκευάστηκαν για λόγους σύγκρισης. Για να σιγουρευτεί ότι και οι δύο συλλέκτες έχουν την ίδια απόδοση όταν δεν χρησιμοποιείται σύστημα tracking, δόθηκε σε κάθε συλλέκτη ίσο ποσό ύδατος και έγιναν δοκιμές μη-ροής. Ο χρόνος μεταβολής της θερμοκρασίας ύδατος και στους δύο συλλέκτες βρέθηκε για να είναι σχεδόν ο ίδιος. Διάφορες δοκιμές εκτελέσθηκαν για να ερευνήσουν την επίδραση του sun-tracking συστήματος δύοαξόνων στο συλλέκτη. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών, ο σταθερός συλλέκτης ήταν προσανατολισμένος προς το νότο σε μια γωνία κλίσης 33°. Ο δεύτερος συλλέκτης χρησιμοποιήθηκε με το tracking σύστημα, το οποίο εξασφάλιζε κανονική ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη κατά τη διάρκεια των ωρών δοκιμής.

Το διάγραμμα του σχήματος 41 δείχνει τη μεταβολή της ενέργειας που συλλέγεται από τον κινητό και το σταθερό συλλέκτη σε σχέση με τα ποσοστά ροής νερού.



Σχήμα 41. Διάγραμμα ρυθμού ροής- συλλεγόμενης ενέργειας.

Το % ποσοστιαίο ενεργειακό κέρδος του κινητού συλλέκτη σε σχέση με τα ποσοστά ροής παρουσιάζεται στην γραφική του σχήματος 42.



Σχήμα 42. Το % ποσοστιαίο ενεργειακό κέρδος του κινητού συλλέκτη σε σχέση με τα ποσοστά ροής.

Τα συμπεράσματα από τις δοκιμές που έγιναν στους δυο συλλέκτες ότι ένα suntracking σύστημα δύο-αξόνων μπορεί να αυξήσει το ενεργειακό κέρδος ενός συλλέκτη CPC μέχρι και 75%. Η βελτίωση βρέθηκε να ποικίλλει ανάλογα με το ποσοστό ροής του νερού μέσα από το συλλέκτη. Η καλύτερη βελτίωση επιτεύχθηκε όταν ήταν το ποσοστό ροής κυμαινόταν 25 έως 45 kg/h. Η καλύτερη απόδοση του συστήματος sun-tracking δύο-αξόνων αντισταθμίζει το παραπάνω κόστος που αυτό έχει.

Μια επίσης σημαντική έρευνα [7] εκπονήθηκε στην Σανλιούρφα της Τουρκίας. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται από τον προσανατολισμό του και από την γωνία κλίσης με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτοί οι δύο παράμετροι αλλάζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται από την επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού. Οι βέλτιστες γωνίες κλίσης του συστήματος καθορίστηκαν από την έρευνα για τις τιμές των γωνιών στις οποίες η συνολική ακτινοβολία στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού ήταν μέγιστη για την περίοδο που μελετήθηκε. Η μελέτη ερεύνησε επίσης το κέρδος ενέργειας ενός 2-αξόνων συστήματος suntracking σε σχέση με ένα φωτοβολταϊκό που τοποθετείται σε σταθερή κλίση. Αυτή η μελέτη καθόρισε επίσης ότι η μηνιαία βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού μεταβάλλεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με την ελάχιστη τιμή στις 13° τον Ιούνιο και μέγιστη τιμή 61° το Δεκέμβριο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα κέρδη στο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους που παραλαμβάνεται από φωτοβολταϊκό που τοποθετείται στις βέλτιστες μηνιαίες γωνίες κλίσης ήταν 1,1% και 3,9%, αντίστοιχα. Επιπλέον, σημειώθηκε κέρδος του συστήματος sun-tracking 2 αξόνων 29,3% στον καθημερινό μέσο όρο της συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας και 34,6% στον καθημερινό μέσο όρο της παραγόμενης ισχύς σε σχέση με φωτοβολταϊκό σταθερής θέσης με γωνία κλίσης 14° ως προς το νότο. Το πείραμα έγινε μια συγκεκριμένη μέρα του Ιουλίου στην Τουρκία.

Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να καθορίσει τις βέλτιστες γωνίες κλίσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και η έρευνα για το κατά πόσο επηρεάζει αυτή συστήματα σταθερής επιφάνειας και συστήματα sun-tracking στο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που αυτά λαμβάνουν. Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε με θεωρητικούς υπολογισμούς και πειράματα. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στη στέγη μιας από τις ερευνητικές εγκαταστάσεις του ηλιακού κέντρου αναζήτησης ενεργειακών πόρων στο πανεπιστήμιο Harran που βρίσκεται στη Σανλιούφρα (37°N, 38°E). Δύο ενιαίες φωτοβολταϊκές μονάδες (μοντέλο AP- 120), κάθε μια με 120 W μέγιστη ισχύ, χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα. Ο παρακάτω πίνακας 6 παρουσιάζει τις παραμέτρους αυτών των φωτοβολταϊκών μονάδων.

Πίνακας 6. Παράμετροι των	ν φωτοβολταϊκών μονάδων
---------------------------	-------------------------

Typical electrical	parameters	for	experimental	PV	modules	
--------------------	------------	-----	--------------	----	---------	--

Peak power ^a (Wp)	W	120
Open circuit voltage (V_{∞})	v	21.0
Max. power voltage (V_{mp})	v	16.9
Short circuit current (Isc)	А	7.7
Max. power current (I_{mp})	А	7.1
Short circuit temp. coefficient	$mA \circ C^{-1}$	+3.5
Open circuit voltage coefficient	$V \circ C^{-1}$	-0.08
Max. series fuse	А	15

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το πρώτο φωτοβολταϊκό τοποθετήθηκε σε μια γωνία κλίσης 14° ως προς τον νότο ενώ στο δεύτερο φωτοβολταϊκό χρησιμοποιήθηκε σύστημα δύο-αξόνων με τις κατάλληλες γωνίες αζιμουθίου και ύψους του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Στο σχήμα 43 φαίνεται ο τρόπος τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 43. (α) Σταθερό σύστημα Sun-tracking (b) Σύστημα Sun-tracking 2-αξόνων

Οι μετρήσεις περιελάμβαναν τις αναγνώσεις ρευμάτων (Ι), τάσης (V) των φωτοβολταϊκών μονάδων, της θερμοκρασίας αέρα (T_a), ταχύτητας αέρα (V_a), θερμοκρασίας μονάδων (T_p), ακτινοβολίας (H_T) οριζόντιας επιφάνειας και κάθετης κατεύθυνσης και τις γωνίες κλίσης (S) των φωτοβολταϊκών μονάδων. Οι αναγνώσεις I–V μέσω των φωτοβολταϊκών μονάδων παρακολουθούνταν από 4 ψηφιακά πολύμετρα κάτω από τις ποικίλες αντιστάσεις φορτίων που εφαρμόζονται από δύο αντιστάτες φορτίων για να έχουν τις αναλυτικές πληροφορίες για την ισχύ εξόδου. Μετρήθηκε η θερμοκρασία αέρα, η ταχύτητα αέρα με ένα ανεμόμετρο και

ένα πυρανόμετρο χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ακτινοβολίας. Το σχήμα 44 επεξηγεί σχηματικά το σύστήμα μέτρησης.



Σχήμα 44. Διάγραμμα κυκλώματος συστήματος μέτρησης της φωτοβολταϊκής μονάδας.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μια ηλιόλουστη ημέρα από τις 6 π.μ. μέχρι τις 6 μ.μ. με ένα χρονικό διάστημα 1 ώρας στις 18.06.2003. Όλες οι μετρήσεις ήταν συγχρονισμένες και καταγράφονταν για την διαδικασία της επεξεργασίας δεδομένων. Οι ηλιακές μετρήσεις ακτινοβολίας γίνονταν στο οριζόντιο επίπεδο. Σε μια χωριστή πειραματική δοκιμή, η επίδραση της γωνίας κλίσης στο ποσό ακτινοβολίας και ηλεκτρικής παραγωγής ερευνήθηκε μεταβάλλοντας τη γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού σταθερής επιφάνειας από 0° ως 60°.

Η επίδραση της γωνίας κλίσης από 0° ως 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο παρουσιάζεται στο σχήμα 45.



Σχήμα 45. Επίδραση της γωνίας κλίσης στη μέγιστη τιμή ακτινοβολίας μιας επιφάνειας τοποθετημένης ως προς τον νότο.

Από αυτήν την σύγκριση, καθορίστηκε ότι η μέγιστη ακτινοβολία επιφάνειας ως προς το νότο το ηλιακό μεσημέρι λήφθηκε με γωνίες κλίσης 30°–40° και 50° από τον Ιανουάριο ως το Μάρτιο, 0°-10°-20° από τον Απρίλιο ως τον Αύγουστο και 40°–50° και 60° από τον Σεπτέμβριο ως το Δεκέμβριο. Με άλλα λόγια οι υψηλότερες γωνίες κλίσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα και οι χαμηλότερες γωνίες κλίσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα και οι χαμηλότερες γωνίες κλίσης κατά του καλοκαιριού επιτρέπουν τη μέγιστη ακτινοβολία να παραληφθεί από την επιφάνεια. Σε μια διαφορετική ανάλυση η βέλτιστη μηνιαία γωνία κλίσης βρέθηκε για τις τιμές για τις οποίες η ολική ακτινοβολία που λαμβάνεται από την κεκλιμένη επιφάνεια είναι μέγιστη και παρουσιάζεται στο σχήμα 46.





Μηνιαίες ρυθμίσεις περίπου 10° από τον Ιανουάριο μέχρι το Μάιο, 4°-7° από το Μάιο μέχρι τον Ιούλιο και 10° από τον Ιούλιο μέχρι τον Νοέμβριο βρέθηκαν ότι είναι απαραίτητες για να λάβει η κεκλιμένη επιφάνεια τη μέγιστη ακτινοβολία. Οι ερευνητές έχουν αναφέρει ότι το να μεταβάλλεις τη γωνία κλίσης καθημερινά και μηνιαία στις βέλτιστες τιμές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους δεν φαίνεται να είναι πρακτικό. Μια άλλη δυνατότητα είναι η αλλαγή της γωνίας κλίσης μία φορά σε μια εποχή. Έχει αναφερθεί ότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 20-25% σχεδόν χωρίς καμία επένδυση εάν θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε μια κλίση ίση με τη μέση μηνιαία κλίση για την περιοχή της εφαρμογής και η κλίση αυτή ρυθμίζεται μία φορά το μήνα. Κατά συνέπεια, μια ανάλυση έγινε για να καθορίσει το % ποσοστιαίο κέρδος ή την απώλεια ηλιακής ακτινοβολίας συγκρίνοντας το ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που παραλήφθηκε από την κεκλιμένη επιφάνεια όσον αφορά τις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης (HTopt), τις εποχιακές βέλτιστες γωνίες κλίσης (HTs) (ως μέσους όρους των μηνιαίων βέλτιστων γωνιών για την περίοδο τεσσάρων μηνών), τη γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (ΗΤφ), την οριζόντια επιφάνεια (HTh), και τέλος γωνία κλίσης είναι ίση με μηδέν. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται στο σχήμα 47.



Σχήμα 47. Σύγκριση ποσού ακτινοβολίας που λαμβάνει επιφάνεια τοποθετημένη:σε μηνιαία βέλτιστη γωνία κλίσης, σε εποχιακή βέλτιστη γωνία κλίσης και σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται.

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ένα κέρδος στο ποσό της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια που τοποθετείται στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες

κλίσης της τάξης του 2.4–47,7% (μέσος όρος 21,8% για ολόκληρο το έτος). Αυτό δείχνει ότι η επίδραση της ηλιακής συλλογής στη βέλτιστη γωνία κλίσης αυξάνεται έναντι της οριζόντιας θέσης. Μπορεί να επισημανθεί ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης αυξάνεται στην αρχή και στο τέλος κάθε έτους. Η εγκατάσταση των ηλιακών μονάδων στις εποχιακές βέλτιστες γωνίες κλίσης και η γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος αντιπροσωπεύει μια αύξηση περίπου 20,9% και 18,6%, αντίστοιχα, για ολόκληρο το έτος στο ποσό της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα κέρδη στα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους από την επιφάνεια που τοποθετείται στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης και στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης και στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης και στο λαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους από την επιφάνεια που τοποθετείται στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης και στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης και στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης και στις μηνιαίες βέλτιστες γωνίες κλίσης δαλαφικό πλάτος ήταν 1,1% και 3,9%, αντίστοιχα.

Επιπλέον, η εγκατάσταση στις εποχιακές βέλτιστες γωνίες αύξησε το ποσό της ηλιακή ακτινοβολία που παραλήφθηκε από την επιφάνεια κατά περίπου 2,8% σε σύγκριση με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Προκειμένου να φανεί η επίδραση του συστήματος sun-tracking στην ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό έγινε το πείραμα στις 18.06.2003 από τις 6 π.μ. ως τις 6 μ.μ. με ένα σύστημα σταθερής γωνίας κλίσης 14° ως προς το νότο ενώ παράλληλα λειτουργούσε και ένα δεύτερο σύστημα δύο-αξόνων που ακολουθούσε τις γωνίες αζιμουθίου και ύψους του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Το σχεδιάγραμμα του σχήματος 48 επεξηγεί το ποσό συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που μετρήθηκε στην κάθετη κατεύθυνση των επιφανειών των 2 συστημάτων στις 18.06.2003.



Σχήμα 48. Ωριαία λαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία από σύστημα σταθερής θέσης και από σύστημα 2-αξόνων.

Είναι σαφές ότι υπάρχει ένα ουσιαστικό ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια των πρώτων ωρών του πρωινού και των τελευταίων ωρών του απογεύματος. Το κέρδος στο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που παραλαμβάνεται από το σύστημα κινητής επιφάνειας δύο-αξόνων σε σχέση με αυτό της σταθερής επιφάνειας ποικίλει από 0,25% σε 84,6% καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας που αντιστοιχεί σε κέρδος παραγόμενης ισχύς 2,5 με 81,4%. Επιπλέον, ο καθημερινός μέσος όρος 29,3% του κέρδους στη συνολική ηλιακή ακτινοβολία οδήγησε σε έναν καθημερινό μέσο όρο κέρδους στην παραγόμενη ισχύ της τάξης του 34,6% αυτήν την συγκεκριμένη πειραματική ημέρα όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα του σχήματος 49.



Σχήμα 49. Το κέρδος της παραγόμενης ισχύς σε σχέση με το κέρδος ολικής λαμβανόμενης ακτινοβολίας.

Οι βέλτιστες τιμές των γωνιών κλίσης και ο προσανατολισμός μιας φωτοβολταϊκής μονάδας στη Σανλιούρφα της Τουρκίας, καθορίστηκε χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό πρότυπο και από ένα πακέτο υπολογιστών. Αυτή η μελέτη καθόρισε ότι η μηνιαία βέλτιστη γωνία κλίσης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας αλλάζει καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με την ελάχιστη τιμή της στις 13° τον Ιούνιο και μέγιστη τις 61° το Δεκέμβριο. Το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιείται σε αυτήν την μελέτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει τη βέλτιστη γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός μιας φωτοβολταϊκής μονάδας αλλάζει καθ' όλη το μεγιστο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας σε μια φωτοβολταϊκή μονάδα που

εγκαθίσταται και σε άλλες περιοχές (εκτός της Σανλιούρφας της Τουρκίας). Έτσι ο αλγόριθμος κίνησης είχε να κάνει και πάλι με αποθηκευμένες βέλτιστες θέσεις του φωτοβολταϊκού βάση των οποίων κινούνταν το σύστημα.

Μια επίσης σημαντική μελέτη εκπονήθηκε στην Κίνα [8]. Το θέμα της μελέτης αυτής είναι οι μαθηματικοί τύποι για τον υπολογισμό του ωριαίας και καθημερινής ακτινοβολίας σε επίπεδα αζιμουθίου tracking τριών βημάτων και ωριαίας γωνίας tracking τριών βημάτων. Με βάση τα δεδομένα της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας μιας μέσης ημέρας σε κάθε μήνα στην πόλη Er-Lian-Hao-Te, υπολογίζεται η ωριαία και μηνιαία ακτινοβολία που λαμβάνεται από τα δυο αυτά είδη tracking. Επίσης γίνεται σύγκριση στα ποσά ακτινοβολίας που μπορούν να συγκεντρώσουν αυτά τα 2 είδη tracking σε σχέση με ένα σύστημα σταθερής επιφάνειας. Δηλαδή και σε αυτή τη περίπτωση ο αλγόριθμος κίνησης έχει να κάνει με συγκεκριμένες θέσεις που υπολογίζονται από πριν.

Έχει υπολογιστεί από διάφορες μελέτες ότι το tracking τριών βημάτων λαμβάνει σχεδόν την ίδια ποσότητα ακτινοβολίας με το συνεχές tracking. Λόγω των πολλών προβλημάτων (κυρίως η πολυπλοκότητα, το κόστος, η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, η μικρότερη αξιοπιστία) του συνεχούς tracking έναντι του βηματικού, η χρήση του τελευταίου είναι πιο πρακτική. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 2 από τα πιο διαδεδομένα συστήματα tracking τριών βημάτων. Αυτά έχουν ένα κοινό στοιχείο: το μήκος της μέρας, σε ένα κεκλιμένο, νότια προσανατολισμένο επίπεδο, το οποίο αντιστοιχεί στη θέση του επιπέδου χωρίζεται σε 3 ίσα μέρη. Σε κάθε μέρος (χρονικό διάστημα) το κινητό επίπεδο τοποθετείται στη μέση θέση από τις θέσεις που παίρνει ένα αντίστοιχο συνεχές tracking σύστημα για το ίδιο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια με βάση την φόρμουλα του Klein παράχθηκαν οι τύποι που υπολόγιζαν την καθημερινή ακτινοβολία σε ένα 3 βημάτων σύστημα tracking. Οι τύποι για τον υπολογισμό της ωριαίας ακτινοβολίας σε τέτοιου είδους συστήματα δίνονται λαμβάνοντας υπόψη την ισοτροπική διασπορά του ουρανού και την αντανάκλαση του εδάφους. Τέλος, ένα παράδειγμα υπολογισμού δίνεται με τη χρησιμοποίηση των ωριαίων στοιχείων ακτινοβολίας όσον αφορά μια οριζόντια επιφάνεια στην πόλη Er-Lian-Hao- Te. Το αζιμούθιο tracking τριών βημάτων σημαίνει ότι το αζιμούθιο του κινούμενου επιπέδου ρυθμίζεται τρεις φορές ημερησίως για να ακολουθεί τον ήλιο. Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα 50 το μήκος ημέρας είναι διαιρεμένο σε τρία ίσα μέρη.



Σχήμα 50. Σχηματικό διάγραμμα του αζιμούθιο tracking 3 βημάτων.

Σε κάθε χρονικό διάστημα (ΔΤ), το επίπεδο προσανατολίζεται στη θέση του ήλιου που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχέδιο, δηλαδή το αζιμούθιο του επιπέδου τίθεται ίσο με τη γωνία ώρας στο μεσαίο σημείο της γωνίας ώρας του διαστήματος (ΔΤ). Σύμφωνα με το εάν η γωνία κλίσης μπορεί να ρυθμιστεί ή όχι, αυτός ο τρόπος tracking διαιρείται περαιτέρω σε δύο τύπους tracking: κατά ένα-άξονα (one axis azimuth tracking) και κατά δυο-άξονες (two axis azimuth tracking). Στον επόμενο πίνακα 7 παρατίθεται μια λίστα του κανονικοποιημένου χρόνου (παίρνουν τον ηλιακό χρόνο ως μονάδα), του διαστήματος γωνίας ώρας Δω και του αντίστοιχου αζιμουθίου γ_c αυτού του είδους tracking

Πίνακας 7.Κανονικοποιημένοι παράμετροι ενός συστήματος tracking αζιμουθίου 3 βημάτων

Regulation time (solar time)	Hour angle interval (deg)	Azimuth (deg)	
$12 - \frac{1}{15} \omega_{st} $	$\omega_{tr} \rightarrow -\frac{1}{3} \omega_{st} $	$-\frac{2}{3}\omega_{st}$	
$12 - \frac{1}{45} \omega_{st} $	$-\frac{1}{3} \omega_{st} \rightarrow \frac{1}{3} \omega_{st} $	0	
$12 + \frac{1}{45} \omega_{st} $	$\frac{1}{3} \omega_{st} \rightarrow \omega_{ts}$	$\frac{2}{3}\omega_{st}$	

Για τις γωνίες ωρών ω_{tr} (γωνία ανατολής ηλίου) και ω_{ts} (γωνία δύσης ηλίου) του κεκλιμένου επιπέδου ισχύει γc= -2/3|ω_{st}| και γc= +2/3|ω_{st}| αντίστοιχα με |ω_{st}| την απόλυτη τιμή της γωνίας ώρας ανατολής ή δύσης σε επιφάνεια νότιας κλίσης.

Λαμβάνοντας υπόψη το διάστημα γωνίας ώρας και το αζιμούθιο για το tracking αζιμουθίου τριών βημάτων μπορεί να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία του tracking αζιμουθίου τριών βημάτων. Ο υπολογισμός της διάχυσης του ουρανού και της ανάκλασης του εδάφους που παραλαμβάνεται από το σύστημα δεν θα ληφθεί υπόψη επειδή το σύστημα λαμβάνει την ίδια ποσότητα διάχυσης ουρανού και ανάκλασης του εδάφους κατά τη διάρκεια μιας ημέρας με ένα αντίστοιχο σύστημα νότια προσανατολισμένο με την ίδια γωνία κλίσης

Στη συνέχεια θα εξεταστεί το tracking 3 βημάτων γωνίας ώρας όπως φαίνεται στο σχήμα 51. Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα το κεκλιμένο ως προς το νότο επίπεδο περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα.



Σχήμα 51. Σχηματικό διάγραμμα tracking 3 βημάτων γωνίας ώρας.

Η προβολή του άξονα αυτού στο έδαφος βρίσκεται πάνω στην διεύθυνση βορράςνότος, με τη γωνία κλίσης να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (β=Φ).Η γωνία περιστροφής του κινητού επιπέδου ρυθμίζεται 3 φορές την ημέρα σύμφωνα με τη γωνία ώρας του ήλιου. Η κανονικοποίηση του χρόνου (ο ηλιακός χρόνο λαμβάνεται ως μονάδα), η γωνία ώρας το διάστημα Δω και η γωνία περιστροφής Ω (θετική κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, αρνητική κατά την αντίθετη φορά) δίνονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8. Κανονικοποιημένοι παράμετροι ενός συστήματος tracking γωνίας ώρας 3 βημάτων

Regulation time (solar time)	Hour angle interval (deg)	Rotation angle (deg)	
$12 - \frac{1}{15} \omega_{st}$	$- \omega_{st} \rightarrow -\frac{1}{3} \omega_{st} $	$-\frac{2}{3} \omega_{st} $	
$12 - \frac{1}{45} \omega_{st} $	$-\frac{1}{3} \omega_{st} \rightarrow \frac{1}{3} \omega_{st} $	0	
$12 + \frac{1}{45} \omega_{st} $	$\frac{1}{3} \omega_{st} \rightarrow \omega_{st} $	$\frac{2}{3} \omega_{st} $	

Για τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας στο tracking 3 βημάτων γωνίας ώρας. Πρέπει να είναι γνωστή η γωνία β΄ μεταξύ του κινητού επιπέδου και του εδάφους μετά την περιστροφή του επιπέδου κατά τη γωνία Ω.

Σε κάθε ένα από τα 3 διαστήματα υπολογίζεται η ακτινοβολία που δέχεται το κινητό επίπεδο και στο τέλος αθροίζοντας υπολογίζεται η ολική ακτινοβολία. Εκτός από τις διαφορετικές γωνίες σε κάθε διάστημα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διάχυτη ακτινοβολία από τον ουρανό αλλά και η ακτινοβολία αντανάκλασης του εδάφους που μεταβάλλονται συνεχώς. Το επόμενο σχεδιάγραμμα στο σχήμα 52 παρουσιάζει τις καμπύλες της άμεσης ακτινοβολίας μια μέση ημέρα το Μάρτιο, τον Ιούνιο, το Σεπτέμβριο και το Δεκέμβριο σε αυτήν την περιοχή.



Σχήμα 52. Ωριαία μεταβολή της άμεσης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια για μια μέση μέρα στο Er-Lian-Hao.

Όπως φαίνεται, η μεταβολή της άμεσης ακτινοβολίας σε σχέση με το χρόνο θυμίζει γκαουσιανή καμπύλη. Ο Ιούνιος έχει το μέγιστο επίπεδο άμεσης ακτινοβολίας συνολικά, ενώ ο Δεκέμβριος έχει το ελάχιστο επίπεδο ακτινοβολίας, με το Μάρτιο και το Σεπτέμβριο που έχουν συγκρίσιμα μεταξύ τους επίπεδα ακτινοβολίας. Η διάρκεια της ηλιοφάνειας αυξάνεται από τις 7 ώρες το Δεκέμβριο μέχρι τις 11 ώρες το Μάρτιο και το Σεπτέμβριο και έπειτα σε 13 ώρες τον Ιούνιο. Ο πίνακας 9 που ακολουθεί απαριθμεί τη μηνιαία ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια σε αυτήν την περιοχή. Η μέγιστη ακτινοβολία είναι 913,2 MJ/m² το Μάιο, η επόμενη μεγαλύτερη είναι 895,1 MJ/ m² τον Ιούνιο και η ελάχιστη ακτινοβολία είναι 258,6 MJ/ m² το Δεκέμβριο.

	Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Direct radiation	214.8	270.2	425.8	536.0	642.9	652.4	571.1	553.1	480.8	365.6	234.4	193.7
Diffusion radiation	74.21	111.5	152.3	199.6	270.3	242.7	199.2	149.2	114.9	100.0	80.14	64.84
Total radiation	289.0	381.7	578.1	735.6	913.2	895.1	770.3	702.3	595.7	465.6	314.5	258.6

Πίνακας 9. Μηνιαία ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια

Σύμφωνα με τα ηλιακά στοιχεία ακτινοβολίας που καταγράφηκαν στο Er-Lian-Hao-Te, η ωριαία και μηνιαία ακτινοβολία στα επίπεδα αυτών των δύο ειδών tracking τριών βημάτων θα υπολογιστεί με τη χρησιμοποίηση τύπων που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Τρεις πτυχές πρέπει να αναφερθούν: κατά τη διάρκεια του υπολογισμού, η ωριαία ακτινοβολία αντικαθίσταται από τη στιγμιαία ένταση της ακτινοβολίας στο μέσο σημείο του ωριαίου διαστήματος, ο χρόνος ρολογιών μετατίθεται στον ηλιακό χρόνο και η αντανάκλαση εδάφους, ρ, τίθεται στην τιμή 0.2. πρόβλημα То της βέλτιστης γωνίας κλίσης ενός συστήματος προσανατολισμένο προς το νότο που δεν αναπτύχθηκε σε αυτή τη μελέτη. Όλες τις γωνίες κλίσης του αζιμουθίου tracking κατά ένα άξονα και του σταθερού κεκλιμένου επιπέδου παίρνουν τιμή ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, β=Φ. Τα αποτελέσματα υπολογισμού δείχνουν ότι το ένα αζιμούθιο δηλαδή tracking σύστημα μονοαξονικό τριών βημάτων με το β=Φ έχει ίδιο κανονικοποιημένο χρόνο με ένα γωνίας ώρας με tracking σύστημα μονοαξονικό τριών βημάτων. Ο κανονικοποιημένος χρόνος (που παίρνει τον ηλιακό χρόνο σαν μονάδα) και το αζιμούθιο γ_c (ή η γωνία περιστροφής Ω) παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα 10.

Month	Regulation time and azimuth (or rotation angle)							
3	6:06	10:00	14:00					
	-60°	0°	60°					
6	4:24	10:00	14:00					
	-60°	0°	60°					
9	5:48	10:00	14:00					
	-60°	0°	60°					
12	7:48	10:30	13:30					
	-45°	0°	45°					

Πίνακας 10. Κανονικοποιημένος χρόνος-αζιμούθιο

Για tracking τριών βημάτων, το αζιμούθιο (ή γωνία περιστροφής) πάντα αλλάζει από –γ_c (-Ω) το πρωί σε 0 το μεσημέρι και έπειτα σε γ_c (Ω) το απόγευμα. Από τον πίνακα , το αζιμούθιο (ή οι γωνίες περιστροφής) το Μάρτιο, τον Ιούνιο και το Σεπτέμβριο είναι όλες ίσες με 60°, και ομοίως για το δεύτερο και τρίτο κανονικοποιημένο χρόνο με τις τιμές ίσες στις 10:00 π.μ και 14:00 μ.μ. Επειδή ο χρόνος της ανατολής σε μια οριζόντια επιφάνεια σε κάθε μήνα είναι διαφορετικός, οι κανονικοποιημένο χρόνοι είναι 6:06 π.μ, 4:24π.μ, 5:48 π.μ, αντίστοιχα. Λόγω του περιορισμένου μήκους της ημέρας το Δεκέμβριο, το αζιμούθιο (ή η γωνία περιστροφής) αλλάζουν σε 45°, και οι 3 κανονικοποιημένοι χρόνοι είναι 7:48 π.μ, 10:30 π.μ και 13:30 μ.μ., αντίστοιχα. Τα επόμενα σχεδιαγράμματα στα σχήματα 53-54 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα υπολογισμού της ακτινοβολίας στα επίπεδα ενός αζιμουθίου μονοαξονικού tracking τριών βημάτων και ενός συστήματος γωνίας ώρας μονοαξονικό tracking τριών βημάτων σε 4 μήνες.



Σχήμα 53. Σύγκριση της υπολογισμένης ακτινοβολίας(irradiance MJ/m²h) επιπέδου για tracking αζιμουθίου 3 βημάτων και ακτινοβολίας οριζόντιας επιφάνειας για μέση μέρα.B,C,D και Ε-Υπολογισμένη ακτινοβολία για tracking αζιμουθίου 3 βημάτων τον Μάρτιο, τον Ιούνιο, το Σεπτέμβριο και το Δεκέμβριο.F,G,H και Ι μετρημένη ακτινοβολία για tracking αζιμουθίου 3 βημάτων τον Μάρτιο, τον Ιούνιο, το Σεπτέμβριο και το Δεκέμβριο.



Σχήμα 54. Σύγκριση της υπολογισμένης ακτινοβολίας (irradiance MJ/m²h) επιπέδου για tracking γωνίας ώρας 3 βημάτων και ακτινοβολίας οριζόντιας επιφάνειας για μέση μέρα.B,C,D και Ε-Υπολογισμένη ακτινοβολία για tracking γωνίας ώρας 3 βημάτων τον Μάρτιο, τον Ιούνιο, το Σεπτέμβριο και το Δεκέμβριο.F,G,H και Ι μετρημένη ακτινοβολία για tracking γωνίας ώρας 3 βημάτων τον Μάρτιο, τον Ιούνιο, το Σεπτέμβριο και το Δεκέμβριο. Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των 2 συστημάτων στη λήψη της ακτινοβολίας. Η αύξηση λήψης της ακτινοβολίας στο tracking τριών βημάτων είναι μέγιστη το Δεκέμβριο, όταν λαμβάνει 103–694% υψηλότερη ακτινοβολία από μια οριζόντια επιφάνεια. Η διαφορά αυτή μειώνεται στο ελάχιστο τον Ιούνιο, όταν λαμβάνει η οριζόντια επιφάνεια σχεδόν την ίδια ποσότητα ακτινοβολίας με την κινητή επιφάνεια 3 βημάτων στο χρονικό διάστημα του μεσημεριού. Όμως στα άλλα δύο χρονικά διαστήματα, η ακτινοβολία στην κινητή επιφάνεια 3 βημάτων είναι 11–290% υψηλότερη από αυτή στην οριζόντια επιφάνεια. Η μηνιαία ακτινοβολία λαμβάνεται με τον πολλαπλασιασμό του αριθμού των ημερών κάθε μήνα με την ακτινοβολία μιας μέσης ημέρας σε εκείνο τον μήνα. Ο παρακάτω πίνακας 11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από tracking σύστημα αζιμουθίου 2- αξόνων και 3 βημάτων. Για αυτή τη μέθοδο βελτιστοποιείται κάθε μήνα και η γωνία αζιμουθίου αλλά και η γωνία κλίσης προκειμένου να λαμβάνεται το μέγιστο κέρδος ενέργειας. Η γωνία αζιμουθίου αλλάζει από 44° το Δεκέμβρη σε 61.4° τον Ιούνη και η ακτινοβολία μεταβάλλεται από 792.7 MJ/m² το Δεκέμβρη σε 1206.6 MJ/m² τον Μάιο όπως φαίνεται στο πίνακα 11.

Πίνακας 11. Υπολογισμένα αποτελέσματα επιπέδου για tracking αζιμουθίου 3 βημάτων

	Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tilt angle	72.65°	67.65°	60.65°	51.65°	42.65°	38.65°	40.65°	49.65°	58.65°	65.65°	71.65°	73.65°
Azimuth	45.8°	51.1°	58.5°	59.1°	60.2°	61.4°	60.8°	59°	59.6°	53.8°	47.3°	44°
Radiation	815.6	843.6	1042.2	1103.4	1206.6	1143.2	1008.4	1031.3	1046.5	1003.2	833.4	792.7

Το σχεδιάγραμμα του σχήματος 55 που ακολουθεί συνοψίζει τα αποτελέσματα υπολογισμού της μηνιαίας ακτινοβολίας για τα διαφορετικά tracking.



Σχήμα 55. Καμπύλες υπολογισμένης μηνιαίας ακτινοβολίας για διαφορετικά είδη tracking: B οριζόντια επιφάνεια. C με κλίση ως προς το νότο. D μονοαξονικό επίπεδο tracking αζιμουθίου 3 βημάτων. E επίπεδο 2-αξόνων tracking αζιμουθίου 3 βημάτων. F επίπεδο tracking γωνίας ώρας 3 βημάτων.

Για τη σύγκριση, δίνεται και η μηνιαία ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια. Η ομοιομορφία της ακτινοβολίας στα tracking επίπεδα σε ολόκληρη τη διάρκεια έτους βελτιώνεται πολύ. Στους χειμωνιάτικους μήνες (από το Νοέμβριο μέχρι τον Μάρτιο), η ακτινοβολία σε κεκλιμένη ως προς το νότο επιφάνεια είναι 40–160% υψηλότερη από αυτή στην οριζόντια επιφάνεια, αλλά τον Μάιο, τον Ιουνίου και τον Ιούλιο η ακτινοβολία στην οριζόντια επιφάνεια είναι υψηλότερη από την κεκλιμένη ως προς το νότο επιφάνεια. Η ακτινοβολία των tracking συστημάτων τριών βημάτων είναι υψηλότερη σε κάθε μήνα από την αντίστοιχη οριζόντιας επιφάνειας. Το δυο-αξόνων tracking αζιμουθίου τριών βημάτων λαμβάνει περισσότερη ενέργεια από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο που έχει αναφερθεί σε αυτή τη μελέτη. Η λαμβανόμενη ενέργεια είναι 27% τον Ιούνιο και 206% το Δεκέμβριο υψηλότερη από αυτή στην οριζόντια επιφάνεια. Δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στη λήψη της ακτινοβολίας μεταξύ του ενός-άξονα αζιμουθίου tracking 3-βημάτων και του συστήματος tracking γωνίας ώρας 3-βημάτων. Τον Απρίλιο, το Μάιο, τον Ιούνιο, τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, το πρώτο λαμβάνει ελαφρώς περισσότερη ενέργεια από το δεύτερο, αλλά σε άλλους μήνες, αυτά τα δύο είδη tracking τριών βημάτων λαμβάνουν σχεδόν η ίδια ποσότητα ενέργειας. Ένα σύστημα ενός-άξονα αζιμουθίου tracking 3-βημάτων λαμβάνει 27% περισσότερη ενέργεια τον Ιούνιο και 167% περισσότερη ενέργεια το Δεκέμβριο από την σταθερή οριζόντια επιφάνεια. Με την υπόθεση της ισοτροπικής διάχυσης του ουρανού έχούν εξαχθεί οι μαθηματικοί τύποι για τον υπολογισμό της ωριαίας και της καθημερινής ακτινοβολίας σε συστήματα 3 βημάτων. Η απλότητα του ισοτροπικού προτύπου διάχυσης του ουρανού είναι η αιτία της ευρείας χρησιμοποίησης του από τους μηχανικούς στο σχεδιασμό συστημάτων ηλιακής ενέργειας μέχρι τώρα. Βέβαια και το ισοτροπικό μοντέλο έχει τις ανεπάρκειές του, όπως η ακρίβεια πρόβλεψης αυτής της μεθόδου δεν είναι τόσο καλή όσο στα ανισότροπικά μοντέλα. Εντούτοις, το ισοτροπικό πρότυπο μπορεί να θεωρηθεί ως σωστή μέθοδος εκτίμησης που μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις.

Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής Er-Lian-Hao- Te, έχει υπολογιστεί η ωριαία και μηνιαία ακτινοβολία στα διάφορα tracking επίπεδα. Η ομοιομορφία της ακτινοβολίας σε ολόκληρο το έτος μπορεί να βελτιωθεί προφανώς με χρήση κεκλιμένης επιφάνειας. Η ακτινοβολία σε αυτή τη περίπτωση με βελτιστοποιημένη γωνία κλίσης είναι 30,2% μεγαλύτερη από αυτή της οριζόντιας επιφάνειας για ολόκληρο το έτος. Δεν υπάρχει καμιά προφανής διαφορά μεταξύ ενός αζιμουθίου συστήματος tracking τριών βημάτων και του tracking συστήματος γωνίας ώρας τριών βημάτων στην ακτινοβολίας που μπορούν να λάβουν η οποία είναι υψηλότερη κατά 66,5% και 63,3% από την οριζόντια επιφάνεια, αντίστοιχα. Το σύστημα αζιμουθίου δύο αξόνων τριών βημάτων μπορεί να λάβει 72% περισσότερη ακτινοβολίας από την οριζόντια επιφάνεια. Επομένως, η χρήση tracking τριών βημάτων είναι ευνοϊκή για φωτοβολταϊκές μονάδες για την ικανοποίηση ορισμένων ενεργειακών απαιτήσεων και μείωση του κόστους της παραγωγής ενέργειας σε σχέση με συστήματα συνεχούς κίνησης.

3. Μελέτη ηλιακής ακτινοβολίας

Η ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας [9] που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού είναι αρκετά πολύπλοκη. Υπάρχουν δυο ειδών προβλήματα στην εκπόνηση της εργασίας αυτής. 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 56 φαίνονται οι διαφορετικές συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα 56. Είδη 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:

- Την απευθείας ακτινοβολία (direct radiation) που οφείλεται στις ακτίνες του φωτός που ταξιδεύουν σε μια ευθεία γραμμή από τον ήλιο στην επιφάνεια.
- 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 των 3 αυτών ειδών ακτινοβολίας δίνει την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια (global radiation).

Οι κατευθυντικές 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. Εντούτοις, 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/m² ενώ η ακτινοβόλιση μετριέται σε kWh/m².

Η απόκριση των φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται πολύ από το μήκος κύματος του φωτός. Αυτό έχει μελετηθεί σε βάθος από πολλούς συγγραφείς και στη σύγχρονη εποχή είναι εφικτό να υπολογιστεί με ουσιαστική ακρίβεια η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη, ειδικά μια ηλιόλουστη ημέρα. Η επίδραση του μήκους κύματος είναι πολύ σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις, εντούτοις για τη μεγάλη πλειοψηφία των ηλιακών εφαρμογών εφαρμοσμένης μηχανικής είναι επαρκές να εξεταστούν ολικές ποσότητες, όπως είναι οι μέσοι όροι σε ολόκληρο το φάσμα.

3.1 Μετακίνηση μεταξύ του ήλιου και της γης

Αν και η μετακίνηση του ήλιου σχετικά με ένα σταθερό σημείο στη γη φαίνεται πολύ γνωστή, τα μαθηματικά που ορίζουν αυτή τη μετακίνηση είναι πολύ σύνθετα. Στη συνέχεια θα εισαχθούν μερικές έννοιες και εκφράσεις που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στη εφαρμοσμένη μηχανική φωτοβολταϊκών.

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε μια 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 σποιασδήποτε 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 άμεσα επάνω από τον τροπικό κύκλο του καρκίνοι. Το σύντομη γύχτα ολόκληροι του έτους. Στη χειμερινή ισημερία (21/22 του Δεκεμβρίου) η γωνία ηλιακής απόκλισης δ είναι ήμακρύτερη του έτους.

Ο υπολογισμός της γωνίας ηλιακής απόκλισης δ δίνεται με μεγάλη ακρίβεια για οποιαδήποτε ημέρα του έτους από την σχέση 1 [9]:

$$\delta(^{\circ}) = [0,006918 - 0,399912 \times \cos(\Gamma) + 0,070257 \times \sin(\Gamma) \times 0,006758 \times \cos(2\Gamma) + 0,000907 \times \sin(2\Gamma) - 0,002697 \times \cos(3\Gamma) + 0,00148 \times \sin(3\Gamma)] \times \frac{180}{\pi}$$
(1)

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

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

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:

$$\varepsilon_0 = (\frac{r_0}{r})^2 = 1,00011 + 0,034221 \times \cos(\Gamma) + 0,001280 \times \sin(\Gamma) + 0,000719 \times \cos(2\Gamma) + 0,00077 \times \sin(2\Gamma)$$
(3)

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

Οι σχέσεις 1 και 3 λαμβάνουν 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 1 και 3 αντικαθίστανται από τις παρακάτω:

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \times \sin(\frac{360}{365} \times (d_n + 284))$$
(4)
$$\varepsilon_0 = 1 + 0,033 \times \cos(360 \times \frac{d_n}{284})$$
(5)

Ένας κλασικός τρόπος αναπαράστασης του ουρανού είναι ως σφαίρα που κεντροθετείται σε ένα καθορισμένο σημείο τη γης, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 57. 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 57. Η ουράνια σφαίρα.

Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο αναπαράστασης, 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° 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.

3.2 Θέση του ήλιου σε σχέση με την επιφάνεια της γης

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 58.



Nadir

Σχήμα 58. Ανάλυση της ουράνιας σφαίρας.

Δύο συντεταγμένες χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη θέση ενός σημείου, παραδείγματος χάριν του ήλιου, στην ουράνια σφαίρα σχετικά με ένα σημείο στη γη. Αυτές είναι: (α) η γωνία ζενίθ, θ_z, μεταξύ της κατακόρυφου και μιας γραμμής από τη γη στο εν λόγω σημείο (β) 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 γ = 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:

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta \times \sin\varphi + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\omega = \sin\gamma_s$$
 (6)

$$\cos(\Psi_{s}) = \frac{(\sin\gamma_{s} \times \sin\varphi - \sin\delta)}{(\cos\gamma_{s} \times \cos\varphi)}$$
(7)

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 ΤΟ (ο χρόνος που δείχνει ένα ρολόι) από την εξίσωση:

$$\omega(\text{hours}) = \text{TO-12}+\text{ET-AO-}\frac{(\text{LL-LH})}{15} \quad \textbf{(8)}$$

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 μετριούνται σε μοίρες. Το σύμβολο ΑΟ είναι ο χρόνος από τον οποίο τα ρολόγια τίθενται μπροστά από τη ζώνη τοπικής ώρας. Ο χρόνος ΕΤ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση γνωστή ως εξίσωση του χρόνου:

$$ET(minutes) = (-0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma) -0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) 229.18$$
(9)

Η εξίσωση (6) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρει τη γωνία ανατολής, $ω_s$, αφού στην ανατολή $θ_{zs}$ = 90°. Ως εκ τούτου:

$$\omega_{\rm s} = -\arccos(-\tan\delta \times \tan\phi)$$
 (10)

και η ω_S είναι πάντα αρνητική.

Η γωνία ηλιοβασιλέματος είναι ίση με - ω_s και το μήκος της ημέρας δίνονται από τη σχέση:

$$S_0 = 2|\omega_s| \qquad (11)$$

Το παραπάνω σύστημα δίνει τις γωνίες θ_{ZS} και Ψ_S σε σχέση με μια οριζόντια επιφάνεια. Εντούτοις, οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές απαιτούν να καθοριστεί τη θέση του ήλιου σχετικά με ένα κεκλιμένο επίπεδο. Ο προσανατολισμός μιας επιφάνειας μπορεί γενικά 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 ακτινών του ήλιου και της κάθετης στην επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\cos\theta_{s} = \sin\delta \times \sin\varphi \times \cos\beta - \sin\delta \times \cos\varphi \times \sin\beta \times \cos\alpha + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\beta \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\varphi \times \sin\beta \times \cos\alpha \times \cos\varphi + \cos\delta \times \sin\alpha \times \sin\varphi \times \sin\beta$$
(12)

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:

$$\cos\theta_{s} = \sin\delta \times \sin(\varphi \cdot \beta) + \cos\delta \times \cos(\varphi \cdot \beta) \times \cos\omega \quad (13)$$

3.3 Εκτίμηση των συστατικών της ηλιακής ακτινοβολίας

Για να σχεδιαστεί ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι τιμές των διαφορετικών συστατικών της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν μια επιφάνεια. Μια καθαρά θεωρητική προσέγγιση στο πρόβλημα μπορεί μόνο να βγάλει χρήσιμα αποτελέσματα για αμιγώς ηλιόλουστες μέρες. Οι υπολογισμοί αυτοί που είναι γενικότερα εφαρμοσμένοι απαιτούν ορισμένα μετεωρολογικά στοιχεία για να χρησιμοποιηθούν. Η φύση της μεθόδου πρέπει να ποικίλει σύμφωνα με τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα και τις λεπτομέρειες της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Για να εξαλειφθούν τα αποτελέσματα των πολύ τοπικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, όπως είναι οι τοπικές σκιάσεις και ο τύπος του εδάφους, η ηλιακή ακτινοβολία μετριέται σε οριζόντιες επιφάνειες χωρίς εμπόδια. Για ουσιαστικά οικονομικούς λόγους, το δίκτυο των μετεωρολογικών σταθμών περιορίζει τις μετρήσεις του σε μερικές απλές όπως είναι η ολική ακτινοβολία, ο αριθμός ωρών ηλιοφάνειας κ.λπ.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το πρόβλημα του υπολογισμού των διαφορετικών συστατικών της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια θίγει τέσσερα κύρια προβλήματα:

α) Τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια έχοντας παραμέτρους όπως ο αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας, ο βαθμός σκίασης της επιφάνειας, διάφορα φωτογραφικά στοιχεία από τους δορυφόρους, κ.λ.π.

β) Τον υπολογισμός των άμεσων και διάχυτων συνιστωσών της ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη την ολική ακτινοβολία.

γ) Τον υπολογισμό των συστατικών της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια με κλίση, λαμβάνοντας υπόψη τα συστατικά της ακτινοβολίας που αφορούν μια αντίστοιχη οριζόντια επιφάνεια.

Αυτές οι ερωτήσεις μπορούν να τεθούν για διαφορετικά χρονικά διαστήματα, όπως είναι η καθημερινή ακτινοβολία, η ωριαία ακτινοβολία, κ.λ.π. Επίσης στους υπολογισμούς επιδιώκονται οι στιγμιαίες ή κατά μέσο όρο υπολογισμένες τιμές. Οι χρονικά υπολογισμένες κατά μέσο όρο τιμές μπορεί να είναι, παραδείγματος χάριν, ο ετήσιος μέσος όρος της ημερήσιας ακτινοβολίας ή ο μηνιαίος μέσος όρος της ωριαίας ακτινοβολίας. Για πολλές εφαρμογές (όπως φωτοβολταϊκές γεννήτριες για απομονωμένες κατοικίες) ο μηνιαίος μέσος όρος της ημερήσιας ακτινοβολίας είναι ικανοποιητικός, ενώ σε άλλες εφαρμογές όπως η βελτιστοποίηση των γεννητριών μεγάλης ισχύος, είναι απαραίτητο να εισαχθούν περισσότερες μεμονωμένες τιμές της ωριαίας ακτινοβολίας. Εντούτοις, από τη διαθεσιμότητα της ωριαίας ακτινοβολίας όπου οι τιμές είναι περιορισμένες προκύπτει ένα άλλο πρόβλημα:

δ) Ο υπολογισμός της ωριαίας ακτινοβολίας δεδομένης της ημερήσιας ακτινοβολίας.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να υιοθετηθούν συσχετισμοί μεταξύ των διαφορετικών παραμέτρων. Αυτοί οι συσχετισμοί εξάγονται από τη σύγκριση δύο ταυτόχρονων μετρήσεων που εκτελούνται σε συγκεκριμένα μέρη. Εφαρμόζονται έπειτα σε άλλα μέρη για να υπολογίσουν μια παράμετρο όταν η άλλη δεν είναι διαθέσιμη. Φυσικά, η φύση του συσχετισμού εξαρτάται από το μέρος στο οποίο λαμβάνεται η μέτρηση. Επομένως, είναι συνηθισμένο να βρεθούν διαφορετικοί συσχετισμοί για τις ίδιες παραμέτρους. Στη συνέχεια θα περιγραφούν μόνο εκείνοι οι συσχετισμοί που μπορούν να θεωρηθούν γενικά εφαρμόσιμοι.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι (με μερικές σπάνιες εξαιρέσεις) αυτοί οι συσχετισμοί μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στις μετρήσεις που υπολογίζονται κατά μέσο όρο κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων. Κατά συνέπεια δεν είναι χρήσιμο να εφαρμοστεί ένας τέτοιος συσχετισμός στον υπολογισμό της ημερήσιας ακτινοβολίας.

3.4 Εξωγήινη ακτινοβόλιση σε μια οριζόντια επιφάνεια

Είναι συχνά απαραίτητο να γίνεται γνωστό πόση ακτινοβολία παραλαμβάνεται από μια οριζόντια επιφάνεια έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, προκειμένου να υπολογιστούν τα διαφορετικά συστατικά της ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια στο έδαφος.

Για την ακτινοβόλιση για μία χρονική περίοδο μιας ώρας ισχύει ότι:

 $\mathbf{B}_{\mathrm{Oh}}(0) = \mathbf{BO} \times \varepsilon_0 \times \cos\theta \mathbf{z}_{\mathrm{s}} \qquad (14)$

όπου θ_{zs} είναι η γωνία ζενίθ που αντιστοιχεί στο σημείο της εν λόγω μέσης ώρας, το ε₀ δίνεται από την εξίσωση (5) και το BO είναι η ηλιακή σταθερά, που ορίζεται

68

ως η εξωγήινη ακτινοβόλιση σε μια κανονική επιφάνεια στις ακτίνες του ήλιου σε μια αστρονομική μονάδα από τον ήλιο, BO = 1367 W/m². Η ημερήσια ακτινοβόλιση δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{B}_{\mathrm{Od}}(0) = \frac{24}{\pi} \times \mathbf{B}_{o} \varepsilon_{o} \times (\cos\varphi \times \cos\delta) \times (\omega_{\mathrm{s}} \cos\omega_{\mathrm{s}} - \sin\omega_{\mathrm{s}})$$
(15)

όπου το $ω_S$ μετριέται σε rad.

Ο μηνιαίος μέσος όρος της ωριαίας και ημερήσιας ηλιακής ακτινοβόλιση όπως αποδεικνύεται από τα παρακάτω είναι:

$$\mathbf{B}_{\rm Ohm}(0) = \frac{1}{\mathbf{d}_{\rm n2} - \mathbf{d}_{\rm n1}} \sum_{d_{\rm n1}}^{d_{\rm n2}} \mathbf{B}_{\rm Oh}(0) \qquad (16)$$

και

$$B_{Odm}(0) = \frac{1}{d_{n2} - d_{n1}} \sum_{d_{n1}}^{d_{n2}} B_{od}(0) \quad (17)$$

όπου το d_{n1} και d_{n2} είναι οι αριθμοί της πρώτης και τελευταίας ημέρας του μήνα που εξετάζεται.

3.5 Υπολογισμός της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια δεδομένης της ολικής ακτινοβολίας

Ο προσδιορισμός της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια είναι μια εργασία που είναι πάντα απαραίτητη πριν τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτή που διατυπώθηκε αρχικά από τους Liu και Jordan. Αυτοί υπολόγισαν μια σχέση που συνδέει το "διάχυτο κλάσμα" της οριζόντιας ακτινοβολίας (διάχυτη ακτινοβολία/ολική ακτινοβολία) και το δείκτη καθαρότητας (ολική ακτινοβολία /εξωγήινη ακτινοβολία). Αυτή η σχέση επιτρέπει τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας αρχίζοντας από τη ολική ακτινοβολία. Η διαφορά προφανώς αντιστοιχεί στην άμεση ακτινοβολία.

Πολλοί διαφορετικοί συσχετισμοί μεταξύ της ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας έχουν προταθεί. Μόνο μερικοί από τους πιο χρήσιμους θα παρουσιαστούν εδώ. Για να διευκολύνει την εξήγηση, αυτοί διαιρούνται σε τέσσερις ομάδες: Συσχετισμοί μεταξύ των μεμονωμένων τιμών της ημερήσιας ακτινοβόλισης σε οριζόντιο επίπεδο, G_d(0), και της αντίστοιχης άμεσης ακτινοβόλισης D_d(0).

2. Συσχετισμοί μεταξύ των μέσων μηνιαίων τιμών της ημερήσιας ακτινοβόλισης σε οριζόντιο επίπεδο, G_{dm}(0) και της αντίστοιχης διάχυτης ακτινοβόλισης D_{dm}(0).

 Συσχετισμοί μεταξύ των μεμονωμένων τιμών της ωριαίας ακτινοβόλισης σε οριζόντιο επίπεδο, G_h(0) και της αντίστοιχης άμεσης ακτινοβόλισης, D_h(0).

4. Συσχετισμοί μεταξύ των μέσων μηνιαίων τιμών της ωριαίας ακτινοβόλισης σε οριζόντιο επίπεδο, G_{hm} (0), και της αντίστοιχης διάχυτης ακτινοβόλισης D_{hm}(0).

Ο συσχετισμός μεταξύ του $G_d(0)$ και $D_d(0)$ που χρησιμοποιείται πολύ συχνά είναι αυτός που διατυπώθηκε από τους Collares-Pereira και Rabl. Εκφράζεται ως εξής:

$$K_{\rm d} = 0.99$$
 yia $K_{\rm d} \le 0.17$

 $K_{D} = 1.188 - 2.272 K_{T} + 9.473 K_{T}^{2} - 21.856 K_{T}^{3} + 14.648 K_{T}^{4}$

 $\gamma \alpha \ 0.17 \le K_T \le 0.8$ (18)

$$K_{\rm D} = \frac{D_{\rm d}(0)}{G_{\rm d}(0)}$$
(19)

και

$$K_{\rm T} = \frac{G_{\rm d}(0)}{B_{\rm od}(0)}$$
(20)

Το K_D είναι το ''διάχυτο κλάσμα'' της οριζόντιας ακτινοβολίας και το K_T είναι ο δείκτης καθαρότητας.

3.6 Ακτινοβολία σε επιφάνειες αυθαίρετου προσανατολισμού

Οι ηλιακοί συλλέκτες είτε τοποθετούνται σε οριζόντιο επίπεδο είτε έχουν μια ορισμένη κλίση. Αυτή η παράγραφος προσεγγίζει το πρόβλημα για το πώς θα υπολογιστούν τα διάφορα συστατικά της ωριαίας ακτινοβόλισης σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Τα δεδομένα εισόδου είναι η άμεση [B_h(o)] και η διάχυτη ακτινοβόλιση [D_h(o)] της ολικής ωριαίας ακτινοβόλισης σε μια οριζόντια επιφάνεια. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέσες μηνιαίες τιμές τους B_{hm}(o) και D_{hm}(o).

Η επιλογή ενός ωριαίου χρονικού διαστήματος οδηγεί στην ευκολότερα κατανοητή αντιμετώπιση του προβλήματος από οποιοδήποτε άλλο χρονικό διάστημα. Για αυτόν τον υπολογισμό, είναι κατάλληλο να υποτεθεί ότι η ακτινοβόλιση κατά την διάρκεια μιας ώρας (σε kWh/m²) είναι αριθμητικά ίση με τη μέση ακτινοβολία κατά τη διάρκεια αυτής της ώρας και επίσης ίση με την ακτινοβολία στη μέση αυτής της ώρας. Αυτή η υπόθεση δεν εισάγει σημαντικά λάθη και απλοποιεί πολύ τους υπολογισμούς με την εξάλειψη της ανάγκης να υπολογιστούν τα ολοκληρώματα όσον αφορά το χρόνο, διαδικασία που μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη.

Η προφανέστερη διαδικασία υπολογισμού της ολικής ακτινοβόλισης σε μια κεκλιμένη επιφάνεια, G(β,α), είναι να υπολογιστεί ξεχωριστά η αντίστοιχη άμεση [B(β,α)], διάχυτη [D(β,α)] και ανακλώμενη στο έδαφος(R(β,α)) ακτινοβόλιση αφού:

$$G(\beta,\alpha) = B(\beta,\alpha) + D(\beta,\alpha) + R(\beta,\alpha)$$
(21)

Για να υπολογιστούν τα παραπάνω είναι απαραίτητη η γνώση των ακόλουθων στοιχείων: ολική ακτινοβόλιση σε οριζόντιο επίπεδο,G(0), διάχυτη ακτινοβόλιση σε οριζόντιο επίπεδο, D(0), άμεση ακτινοβόλιση σε οριζόντιο επίπεδο [B(0)=G(0)-D(0)], τοπικό γεωγραφικό πλάτος, αζιμούθιο α και κλίση β της επιφάνειας συλλεκτών, αριθμός ημέρας d_n καθώς και ο αληθινός ηλιακό χρόνος ω.

3.6.1 Άμεση ακτινοβόλιση

Απλές γεωμετρικές εκτιμήσεις οδηγούν στην σχέση:

$$B(\beta,\alpha) = B \times max(0,\cos\theta s) \qquad (22)$$

όπου το Β είναι η άμεση ακτινοβόλιση που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου και το cosθ_s υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$B = \frac{B(0)}{\cos \theta_{zs}} \quad (23)$$

όπου το cosΘzs υπολογίζεται από τη σχέση 6.

3.6.2 Διάχυτη ακτινοβόλιση

Η διάχυτη ακτινοβόλιση που λαμβάνεται από οποιαδήποτε επιφάνεια σχετίζεται με την κατανομή της ακτινοβολίας στην ουράνια σφαίρα. Επομένως σε μια φανταστική αναπαράσταση του ουρανού (σχήμα 59), θεωρείται ένα στοιχείο dΩ από το οποίο προέρχεται η διάχυτη ακτινοβολία L(Θ_z, ψ).



Σχήμα 59. Η ουράνια σφαίρα.

Μια οριζόντια επιφάνεια στο κέντρο αυτής της ουράνιας σφαίρας λαμβάνει την εξής ακτινοβολία:

$$dD = L(\theta_z, \psi) \times d\Omega \times \cos\theta_z$$
(24)

με

$$d\Omega = \sin\theta_z \times d\psi \times d\theta_z \tag{25}$$

Η ολική διάχυτη ακτινοβολία πάνω σε οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση 26:

$$D(0) = \int_{0}^{2\pi} d\psi \int_{0}^{\pi/2} L(\theta_z, \psi) \times \sin\theta_z \times \cos\theta_z \times d\theta_z$$
(26)

Όταν εξετάζεται μια κεκλιμένη επιφάνεια, είναι καλύτερη η αναφορά στο dΩ σε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων(x',y',z'). Αυτό το σύστημα ορίζεται έτσι ώστε ο άξονας z' να είναι κάθετος στην επιφάνεια (ο άξονας z' σχηματίζει γωνία β με τον άξονα z) και η προβολή του άξονα x' στο οριζόντιο επίπεδο να σχηματίζει γωνία α
με το νότο (άξονα x). Οι γωνίες ζενίθ και αζιμουθίου σε αυτό το σύστημα είναι οι θ' και ψ' αντίστοιχα.

Η εξίσωση που υπολογίζει τη διάχυτη ακτινοβολία στο πάνω μέρος της επιφάνειας είναι:

$$D(\beta,\alpha) = \int_{0}^{2\pi} d\psi \int_{0}^{\theta'_{L}} L(\theta',\psi') \times \sin\theta' \times d\theta' \qquad (27)$$

Οι γωνίες θ' και ψ' σχετίζονται με τις γωνίες θ_z και ψ με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\cos\theta' = \cos\beta \times \cos\theta_z + \sin\beta \times \sin\theta_z \times \cos(\psi - \alpha)$$
(28)

και

$$\tan\psi' = \frac{\sin\theta_z \times \sin(\psi - \alpha)}{\cos\beta \times \sin\theta_z \times \cos(\psi - \alpha) - \sin\beta \times \sin\theta_z}$$
(29)

Επίσης:

$$θ'_{\rm L} = \pi / 2$$
 για $\pi / 2 \le \psi' \le 3\pi / 2$

και:

$$\cos \theta'_{\rm L} = \sin \beta \times \cos(\psi - \alpha) \quad \gamma \tan 0 \le \psi' \le \pi/2 \, \operatorname{kal} 3\pi/2 \le \psi' \le 2\pi$$
(30)

Οι κατευθυντικές ιδιότητες της διάχυτης ακτινοβολίας επηρεάζονται έντονα από τα σύννεφα, των οποίων η μορφή, η φωτεινότητα και η θέση ποικίλλουν με το χρόνο. Αυτό το γεγονός, συνδεμένο με τη σύνθετη διαδικασία της σκέδασης του φωτός στα σύννεφα, έχει ως αποτέλεσμα η κατανομή της ακτινοβολίας στον ουρανό να είναι ανόμοια και χρονικά εξαρτημένη. Η κατανομή της ακτινοβολίας στον ουρανό συνήθως δεν υπολογίζεται. Εντούτοις έχουν αναπτυχθεί όργανα για να τη μετρήσουν και έχουν παρουσιαστεί αποτελέσματα για διαφορετικές συνθήκες ουρανού. Με ουρανούς χωρίς σύννεφα, οι μέγιστες τιμές της ακτινοβολίας που ουρανού κοντά στον ήλιο ή κοντά στον ορίζοντα. Οι ελάχιστες τιμές της ακτινοβολίας προέρχονται από τα μέρη του ουρανού κοντά στον ήλιο ή κοντά στον ορίζοντα. Οι καλείται περιήλια (circumsolar) ακτινοβολία και οφείλεται κυρίως στη διασπορά των αερολυμάτων. Η γωνιακή έκταση της περιοχής αυτής εξαρτάται κυρίως από τη θολότητα της ατμόσφαιρας και από τη γωνία ζενίθ του ήλιου. Η αύξηση στην

ακτινοβολία κοντά στον ορίζοντα οφείλεται στην ανάκλαση του εδάφους της γης και καλείται πυράκτωση οριζόντων (horizon glow).

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα όργανα που χρησιμοποιούνται προς το παρόν για να μετρήσουν την άμεση ακτινοβολία συλλέγουν το φως από μια περιοχή του ουρανού γωνιακής έκτασης ίσης με ±5°. Εκτός από τον ηλιακό δίσκο, αυτή η περιοχή περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της περιήλιας περιοχής. Συνεπώς, τα στοιχεία που μετριούνται για την άμεση ακτινοβολία περιλαμβάνουν όχι μόνο την πραγματικά άμεση ακτινοβολία αλλά και ένα μέρος της περιήλιας ακτινοβολίας.

Το σχήμα 60 παρουσιάζει μερικές χαρακτηριστικές κατανομές της ακτινοβολίας του ουρανού για διαφορετικές καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 60. Κατανομές των ακτινοβολιών του ουρανού για διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

Ο ακριβής υπολογισμός της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια απαιτεί προφανώς τη γνώση της κατανομής της ακτινοβολίας του ουρανού. Εντούτοις, είναι δύσκολο να βρεθούν θεωρητικά μοντέλα γενικής

αποδοχής που μπορεί να προβλέψουν αυτήν την κατανομή, εν μέρει λόγω της εγγενούς πολυπλοκότητάς τους και εν μέρει λόγω της έλλειψης στερεότυπων παρατηρήσεων. Είναι πιθανό ότι το να πραγματοποιηθούν τέτοιες παρατηρήσεις στους υπάρχοντες μετεωρολογικούς σταθμούς θα ήταν δαπανηρότερο και δυσκολότερο από το να μετρηθεί άμεσα η ακτινοβολία στις κεκλιμένες επιφάνειες. Και οι δύο τύποι μετρήσεων είναι, εν πάση περιπτώσει, δύσκολο να διεξαχθούν. Επομένως, είναι επιτακτική η προσφυγή σε μοντέλα που δίνουν αποδεκτά

Το απλούστερο μοντέλο χρησιμοποιεί την υπόθεση ότι η ηλιακή ακτινοβολία του ουρανού είναι ισοτροπική, δηλαδή κάθε σημείο της ουράνιας σφαίρας εκπέμπει φως ίσης ακτινοβολίας,L(θ',ψ')= σταθερά. Η εξίσωση (27) έπειτα από αυτή την υπόθεση γίνεται:

$$D(\beta,\alpha) = (1 + \cos\beta) \times D(0)/2 \qquad (31)$$

Λόγω της απλότητάς του, αυτό το πρότυπο έχει επιτύχει μεγάλη δημοτικότητα. Εντούτοις υπάρχουν τώρα πολλές μελέτες πολύ πιο ακριβείς. Το ισοτροπικό αυτό μοντέλο 'υποτιμά' συστηματικά το ποσό διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες κατά τουλάχιστον 50%.

Η αντίθετη προσέγγιση στις κατευθυντικές ιδιότητες της διάχυτης ακτινοβολίας υποθέτει ότι η ακτινοβολία προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου. Αυτή είναι μια περίπτωση μεταχείρισης της διάχυτη ακτινοβολίας σαν ήταν άμεση, και οδηγεί στην ακόλουθη λύση της εξίσωσης (27):

$$D(\beta,\alpha) = \frac{D(0)}{\cos\theta_{zs}} \times \max(0,\cos\theta_{s})$$
(32)

Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ απλή στη χρήση αλλά οδηγεί σε χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με το ισοτροπικό μοντέλο. Εν γένει τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας ανισοτροπικά μοντέλα για τη διάχυτη ακτινοβολία τα οποία όμως αυξάνουν κατά πολύ την πολυπλοκότητα της εφαρμογής.

3.6.3 Ανακλώμενη στο έδαφος ακτινοβολία(albedo radiation)

Η ανακλαστικότητα των περισσότερων τύπων εδαφών είναι χαμηλή. Συνεπώς, η συμβολή αυτής της ακτινοβολίας στην ολική ακτινοβολία που λαμβάνει ένας δέκτη είναι γενικά μικρή. Μια εξαίρεση εμφανίζεται στην περίπτωση του χιονιού όπου η ανακλαστικότητα είναι μεγάλη. Δεν υπάρχει επομένως ανάπτυξη πολύ περίπλοκων μοντέλων για την albedo ακτινοβολία. Είναι συνηθισμένη η υπόθεση ότι το έδαφος είναι οριζόντιο και ότι αντανακλά ισοτροπικά. Με βάση τα στοιχεία αυτά, η albedo ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

 $R(\beta,\alpha) = G(0)(1 - \cos\beta) \times \rho / 2$ (33)

όπου το ρ είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους και εξαρτάται από τη σύνθεση του εδάφους. Όταν η τιμή του ρ είναι άγνωστη συνήθως θεωρείται ότι ρ = 0,2

4. Βηματικοί κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι στον τομέα της ηλεκτρομηχανικής κίνησης [10]. Οι βηματικοί κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Συγκεκριμένα μετατρέπουν έναν ηλεκτρικό παλμό στην ισοδύναμή του κυκλική κίνηση. Η κίνηση αυτή είναι ακριβής, ιδιότητα που κάνει τους βηματικούς κινητήρες πολύ αποτελεσματικούς σε εργασίες που απαιτούν ακρίβεια στον έλεγχο θέσης μιας μηχανής.

Ο ακριβής έλεγχος της θέσης του βηματικού κινητήρα γίνεται με βάση τις παρακάτω ιδιότητες:

- Η γωνία περιστροφής του βηματικού κινητήρα είναι ανάλογη του αριθμού των παλμών εισόδου,
- Η γωνιακή ταχύτητα του βηματικού κινητήρα είναι ανάλογη του ρυθμού των παλμών εισόδου(pulse frequency) και
- Το λάθος γωνίας (positioning error) είναι αμελητέο.

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς σερβοκινητήρες

- Συνδυάζονται με επεξεργαστές ψηφιακής λογικής,
- Έχουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ελέγχου ανοιχτού βρόγχου ο οποίος ελαχιστοποιεί προβλήματα ευστάθειας που σχετίζονται με κλειστού βρόγχου σερβομηχανές,
- Το λάθος βήματος είναι πολύ μικρότερο (αμελητέο) και
- Η σχεδίαση παρέχει εύκολη συντήρηση.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω ιδιοτήτων και πλεονεκτημάτων οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία σε εφαρμογές όπως ως οδηγοί για κεραίες τηλεόρασης, οδηγοί για υδραυλικές βαλβίδες θέσης, οδηγοί για υπολογιστές καθώς και σε άλλα υψηλής απόδοσης ανατροφοδοτούμενα συστήματα ελέγχου. Στον αντίποδα των παραπάνω, οι βηματικοί κινητήρες έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα που δεν είναι άλλο από τη χαμηλή τους απόδοση η οποία δρα απαγορευτικά στη χρησιμοποίηση τους σε εφαρμογές μικρής ιπποδύναμης.

4.1 Λειτουργία

Η αρχή λειτουργίας ενός βηματικού κινητήρα παρουσιάζεται από τη μονής στοίβας, μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, τριών φάσεων κινητήρα που παρουσιάζεται στο σχήμα 61.



Σχήμα 61. Βηματικός κινητήρας 3 φάσεων μεταβλητής αντίστασης.

Ο στάτης έχει 6 πόλους που είναι τυλιγμένοι σε συνδεσμολογία 3 φάσεων. Ο ρότορας έχει 4 πόλους. Όταν η φάση 1 του στάτορα τροφοδοτηθεί από dc τάση ένα ζευγάρι από τους πόλους του ρότορα θα ευθυγραμμιστεί με τους πόλους του στάτορα που αντιστοιχούν στη φάση 1. Όταν η φάση 1 σταματήσει να τροφοδοτείται από τάση και αρχίσει η φάση 2 να τροφοδοτείται τότε ο ρότορας θα μετακινηθεί 30° μέχρι ένα ζευγάρι από τους πόλους του να ευθυγραμμιστεί με τους πόλους της φάσης 2. Αντίστοιχη λειτουργία θα γίνεται και όταν κλείσει η φάση 2 και ανοίξει η φάση 3. Σε αυτή δηλαδή τη περίπτωση θα υπάρξει και νέα μετακίνηση του ρότορα κατά 30°. Φαίνεται δηλαδή ότι ο συγκεκριμένος βηματικός κινητήρας έχει βήμα ή γωνία βήματος 30°. Η φορά της κίνησης μπορεί να αντιστραφεί αλλάζοντας τη σειρά ενεργοποίησης των φάσεων από 1-2-3-1-2-3 σε 1-3-2-1-3-2. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα όπου μόνο ένα τύλιγμα (μια φάση) του κινητήρα ενεργοποιείται κάθε φορά γίνεται εναλλαγή μονής φάσης. Μια άλλη εναλλαγή είναι η εναλλαγή διπλής φάσης στην οποία ενεργοποιούνται 2 τυλίγματα ταυτόχρονα. Σε αυτή την περίπτωση στον παραπάνω κινητήρα ενεργοποιούνται 2

φάσεις κάθε φορά με τις εξής εναλλαγές: 12-23-31-12 κ.ο.κ και ο ρότορας θα κινείται με τη φορά του ρολογιού 30° σε κάθε βήμα, δηλαδή δεν αλλάζει το βήμα του συγκεκριμένου βηματικού κινητήρα. Εάν όμως αλλάξει η σειρά ενεργοποίησης φάσεων σε έναν βηματικό κινητήρα 4 φάσεων και μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης σε 1-12-2-23-3-34-4-41-1 κ.ο.κ τότε το βήμα μειώνεται στο μισό. Τα αποτελέσματα μισού βήματος παράγουν 41% περισσότερη ροπή στρέψης σε σύγκριση με του μονού βήματος για ένα κινητήρα 4 φάσεων. Αλλάζοντας το πλάτος της τροφοδοτούμενης τάσης στα τυλίγματα μπορεί να περιστραφεί ο ρότορας σε μικρότερα διαστήματα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται microstepping. Όταν ενεργοποιείται ο κινητήρας η συγκρατούμενη ροπή (holding torque) θεωρητικά μεταβάλλεται με τη θέση του ρότορα ημιτονοειδώς. Το σχήμα 62 δείχνει την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για έναν βηματικό κινητήρα.



Σχήμα 62. Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για έναν βηματικό κινητήρα.

Η ροπή πάνω από την οποία ο βηματικός κινητήρας χάνει βήματα ονομάζεται pullout torque. Η ροπή κάτω από την οποία ο βηματικός κινητήρας δεν χάνει ποτέ βήματα ονομάζεται pull-in torque. Το εύρος ταχυτήτων μεταξύ της pull-out torque και της pull-in torque ονομάζεται slew range και αναπαριστά μια ασταθή περιοχή λειτουργίας.

4.2 Τύποι βηματικών κινητήρων

Υπάρχουν 3 τύποι βηματικών κινητήρων [12]:

- 1. Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent –magnet)
- 2. Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης
- 3. Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες

4.2.1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent – magnet)

Η λειτουργία των βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη βασίζεται στην αντίδραση που έχει ένας ρότορας μόνιμου μαγνήτη σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο [12].Το σχήμα 63 δείχνει έναν βηματικό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη δυο πόλων.



Σχήμα 63. Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη δυο πόλων.

Το σχήμα (α) δείχνει τον ρότορα ο οποίος έχει έναν μόνιμο μαγνήτη. Το σχήμα (β) δείχνει τον στάτορα. Τα "δόντια" στην επιφάνεια του ρότορα και στους αντίστοιχους πόλους του στάτορα είναι αντίθετα έτσι ώστε να υπάρχει μόνο ένας συγκεκριμένος αριθμός από δόντια ρότορα που ευθυγραμμίζονται κάθε φορά με τον ενεργοποιημένο πόλο του στάτορα. Ο αριθμός των δοντιών του ρότορα και του στάτορα καθορίζουν τη γωνία βήματος με την οποία κινείται ο βηματικός κινητήρας κάθε φορά που αλλάζει η πολικότητα των τυλιγμάτων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός δοντιών τόσο μικρότερη είναι η γωνία βήματος. Η συγκρατούμενη ροπή (holding torque) ορίζεται σαν το ποσό της ροπής που απαιτείται για να κινηθεί ο ρότορας ένα ολόκληρο βήμα με τον στάτορα να είναι ενεργοποιημένος. Ένα χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας των βηματικών κινητήρων είναι ότι διατηρούν την συγκρατούμενη ροπή αμετάβλητη όταν ο ρότορας είναι σταματημένος. Όταν δεν παρέχεται τάση στα τυλίγματα μια μικρή μαγνητική δύναμη που ονομάζεται residual ή detent torque αναπτύσσεται ανάμεσα στον μόνιμο μαγνήτη και τον στάτορα. Η detent torque μπορεί να παρατηρηθεί όταν στραφεί ο βηματικός κινητήρας με το χέρι και ποσοτικά συνήθως είναι περίπου το 1/10 της συγκρατούμενης ροπής. Στο σχήμα 64 παρουσιάζεται ένας βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη με 4 τυλίγματα στάτορα.



Σχήμα 64. Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη με 4 τυλίγματα στάτορα.

Στο παραπάνω σχήμα 71(α) παρουσιάζεται ένας βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη με 4 τυλίγματα στάτορα. Τροφοδοτώντας τα άκρα του στάτορα με κατάλληλη ακολουθία παλμών είναι δυνατόν να ελεγχθεί η ταχύτητα και η φορά στρέψης του βηματικού κινητήρα. Στο σχήμα 71(β) διακρίνεται το χρονικό διάγραμμα των παλμών που απαιτούνται για να περιστραφεί ο συγκεκριμένος βηματικός κινητήρας. Αυτή η ακολουθία θετικών και αρνητικών παλμών προκαλεί την κίνηση του κινητήρα κατά τη φορά του ρολογιού με βήμα 90°.Το σχήμα 71(γ) δείχνει πως οι παλμοί οδήγησης μπορούν να συμπίπτουν προκειμένου ο κινητήρας να περιστραφεί κατά τη φορά του ρολογιού με βήμα 45°.

Μια πιο πρόσφατη εξέλιξη στους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι ο ρότορας λεπτού δίσκου (thin-disk rotor). Αυτός ο τύπος βηματικού κινητήρα καταναλώνει πολύ λιγότερη ισχύ από τους κυλινδρικούς ρότορες σε απώλειες όπως η θερμότητα και σαν αποτέλεσμα έχει μεγαλύτερη απόδοση. Η απόδοση είναι πρώτη προτεραιότητα σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως η ρομποτική διότι όσο καλύτερη απόδοση έχει ένας κινητήρας παράγει περισσότερη ροπή στρέψης και μεγαλύτερη ταχύτητα. Οι ρότορες λεπτού δίσκου είναι ικανοί να παράγουν τα διπλά βήματα ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με συμβατικούς βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Το σχήμα 65 δείχνει ένα βηματικό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη λεπτού δίσκου.



Σχήμα 65. Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη λεπτού δίσκου.

4.2.2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Οι βηματικοί κινητήρες της συγκεκριμένης κατηγορίας διαφέρουν από αυτούς του μόνιμου μαγνήτη στο ότι ο ρότορας τους δεν έχει μόνιμο μαγνήτη και παραμένουσα ροπή (residual torque) για να τον συγκρατεί σε μια θέση όταν απενεργοποιείται. Όταν τα τυλίγματα του στάτορα ενεργοποιούνται, τα δόντια του ρότορα ευθυγραμμίζονται με τους ενεργοποιημένους πόλους του στάτορα. Αυτός ο τύπος κινητήρα λειτουργεί με βάση την αρχή της ελαχιστοποίησης της αντίστασης δημιουργούμενο πεδίο. μαγνητικής πάνω στο μαγνητικό Εναλλάσσοντας τα ενεργοποιούμενα τυλίγματα του στάτορα, το πεδίο του στάτορα αλλάζει και ο ρότορας μετακινείται σε νέα θέση. Ο στάτορας του βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχει έναν μαγνητικό πυρήνα κατασκευασμένο από ατσάλι. Ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από μη μαγνητικό, μαλακό μέταλλο με δόντια και εγκοπές. Η σχέση μεταξύ γωνίας

βήματος, δοντιών του ρότορα και δοντιών του στάτορα εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Psi = \left(\frac{(N_s - N_r)}{N_s \times N_r}\right) \times 360^{\circ}$$
(34)

όπου : Ψ= γωνία βήματος,

Νr=αριθμός δοντιών του ρότορα core και

Ν₅=αριθμός δοντιών του στάτορα core.



Σχήμα 66. Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και ακολουθία εναλλαγής φάσης.

Το σχήμα 66 παρουσιάζει έναν βηματικό κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Το ότι ο ρότορας έχει λιγότερα δόντια από τον στάτορα εξασφαλίζει ότι μόνο ένα ζευγάρι από δόντια ρότορα-στάτορα θα ευθυγραμμίζονται κάθε φορά. Τα τυλίγματα του στάτορα ενεργοποιούνται σε ομάδες που ονομάζονται φάσεις Στο παραπάνω σχήμα ο στάτορας έχει 6 δόντια και ο ρότορας 4. Σύμφωνα με την εξίσωση (34) ο ρότορας θα περιστρέφεται 30° με την ενεργοποίηση κάθε παλμού. Στο σχήμα 73(α) παρουσιάζεται η θέση του ρότορα όταν είναι ενεργοποιημένη η φάση Α. Για όσο χρονικό διάστημα είναι ενεργοποιημένη η φάση Α. ο ρότορας μένει ακίνητος σε αυτή τη θέση. Όταν η φάση Α απενεργοποιηθεί και ενεργοποιηθεί η φάση B ο ρότορας θα περιστραφεί κατά 30° και θα πάρει τη θέση που φαίνεται στο σχήμα 73(β). Αντίστοιχα όταν η φάση Β απενεργοποιηθεί και ενεργοποιηθεί η φάση C ο ρότορας θα περιστραφεί κατά 30° και θα πάρει τη θέση που φαίνεται στο σχήμα 73(γ). Το σχήμα 73(δ) δείχνει τη σειρά εναλλαγής ενεργοποίησης των φάσεων για να συμπληρώσει ο συγκεκριμένος κινητήρας μια πλήρη περιστροφή 360° με φορά σύμφωνη με αυτή των δεικτών του ρολογιού. Για να αντιστραφεί η φορά πρέπει να αντιστραφεί η σειρά ΟΝ και OFF κάθε φάσης. Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής είναι όλοι μονής στοίβας (single-stack) κινητήρες, δηλαδή όλες οι φάσεις κανονίζονται σε μια μονή στοίβα. Το μειονέκτημα αυτής της σχεδίασης είναι ότι τα βήματα του κινητήρα είναι εν γένει μεγάλα (πάνω από 15°). Οι βηματικοί κινητήρες με πολλές στοίβες (multistack) μπορούν να παράγουν βήματα μικρότερου μεγέθους επειδή ο κινητήρας διαιρείται κατά μήκος του άξονα του σε μαγνητικά απομονωμένους τομείς ή στοίβες. Κάθε ένα από τα τμήματα αυτά διεγείρεται από ένα ξεχωριστό τύλιγμα ή μια ξεχωριστή φάση. Σε αυτού του είδους τους κινητήρες κάθε στοίβα αντιστοιχεί σε μια φάση και οι στάτοραςρότορας έχουν την ίδια έκταση δοντιών.

4.2.3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες αυτού του είδους αποτελούνται από 2 κομμάτια μαλακού σιδήρου όπως επίσης και από έναν αξονικά μαγνητισμένο κυκλικό ρότορα μόνιμου μαγνήτη. Ο όρος "υβριδικός" οφείλεται στο γεγονός ότι ο κινητήρας λειτουργεί συνδυάζοντας τις αρχές των βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Η κατασκευή του πυρήνα του στάτορα σε ένα υβριδικό κινητήρα είναι βασικά η ίδια με αυτή του αντίστοιχου κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Η διαφορά είναι ότι στον κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης ότι στον κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής παι βασικά η ίδια με αυτή του αντίστοιχου κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Η διαφορά είναι ότι στον κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Η διαφορά είναι ότι στον κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης μόνο το ένα από τα δυο τυλίγματα μιας φάσης είναι τυλιγμένα σε έναν πόλο, ενώ ένας τυπικός υβριδικός βηματικός κινητήρας έχει τυλιγμένα σε έναν

σχηματισμό που ονομάζεται σύνδεση bifilar. Κάθε πόλος του υβριδικού κινητήρα είναι καλυμμένος με ομοιόμορφα τοποθετημένα δόντια φτιαγμένα από μαλακό ατσάλι. Τα δόντια στους δυο τομείς κάθε πόλου είναι μη ευθυγραμμισμένα το ένα με το άλλο. Η ροπή στρέψης δημιουργείται σε ένα υβριδικό βηματικό κινητήρα λόγω της αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του μόνιμου μαγνήτη και του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον στάτορα. Σχηματικά ο υβριδικός κινητήρας παρουσιάζεται στο σχήμα 67.



Σχήμα 67. Υβριδικός βηματικός κινητήρας.

Οι βηματικοί κινητήρες εκτιμούνται με βάση τον αριθμό των βημάτων ανά δευτερόλεπτο, τη γωνία βήματος και την ροπή στρέψης που ο κινητήρας μπορεί να παράγει. Ο αριθμός των βημάτων ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται και ποσοστό βήματος (stepping rate). Η πραγματική ταχύτητα του βηματικού κινητήρα εξαρτάται από τη γωνία βήματος και το ποσοστό βήματος και υπολογίζεται με βάση τη παρακάτω εξίσωση:

$$N = \frac{\Psi \times (s/s)}{6}$$
(35)

όπου Ν: ταχύτητα κινητήρα σε RPM

Ψ: γωνία βήματος

s/s: αριθμός βημάτων το δευτερόλεπτο(step/second)

Το σχήμα 68 δείχνει γραφικά τη σχέση μεταξύ της pull-in ροπής και των παλμών (βημάτων) ανά δευτερόλεπτο για ένα συμβατικό βηματικό κινητήρα. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η ροπή μειώνεται όσο αυξάνονται τα βήματα ανά δευτερόλεπτο.



Σχήμα 68. Σχέση μεταξύ της pull-in ροπής και των παλμών (βημάτων) ανά δευτερόλεπτο για ένα συμβατικό βηματικό κινητήρα.

Η φορά περιστροφής καθορίζεται δίνοντας τους κατάλληλους παλμούς στο αντίστοιχο κύκλωμα οδήγησης. Η μετακίνηση του ρότορα είναι ακριβής και επαναλαμβανόμενη με κάθε επιτυχημένο παλμό. Οι βηματικοί κινητήρες υλοποιούνται χωρίς ανάδραση με αποτέλεσμα να έχουν γενικά απλά κυκλώματα οδήγησης.

Οι βηματικοί κινητήρες διαχωρίζονται και σε 3 άλλες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο οδήγησής τους [13]:

- Μονοπολικοί (unipolar) βηματικοί κινητήρες,
- Διπολικοί(bipolar) βηματικοί κινητήρες και
- Bifilar βηματικοί κινητήρες.

4.2.4 Μονοπολικοί (unipolar) βηματικοί κινητήρες

Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από 2 τυλίγματα κάθε ένα από τα οποία έχει μια κεντρική ελικοτομή (center tap). Οι ελικοτομές έχουν 2 τρόπους σύνδεσης. Ο πρώτος τρόπος είναι φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν δυο ξεχωριστά καλώδια όπως φαίνεται στο σχήμα 69.



Σχήμα 69.Τυλίγματα μονοπολικού βηματικού κινητήρα.

Ο δεύτερος είναι αυτά τα δυο καλώδια να συνδέονται εσωτερικά και να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν ένα καλώδιο. Έτσι οι μονοπολικοί κινητήρες έχουν συνήθως 5 ή 6 ακροδέκτες. Ανεξάρτητα με τον αριθμό καλωδίων οι μονοπολικοί κινητήρες οδηγούνται με τον ίδιο τρόπο. Τα κεντρικά καλώδια ή το κεντρικό καλώδιο συνδέεται με την τροφοδοσία και τα καλώδια από τις άκρες των τυλιγμάτων γειώνονται.

Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες όπως και οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αλλά και οι υβριδικοί, λειτουργούν διαφορετικά από αυτούς με μεταβλητή μαγνητική αντίσταση. Συγκεκριμένα δεν λειτουργούν ελαχιστοποιώντας το μονοπάτι ροής μεταξύ των πόλων του στάτορα και των δοντιών του ρότορα, όπου η διεύθυνση της ροής του ρεύματος στο στάτορα είναι τυχαία, αλλά λειτουργούν από την έλξη των βορείων ή των νοτίων πόλων του μόνιμα μαγνητισμένου ρότορα προς τους πόλους του στάτορα . Η κατεύθυνση του ρεύματος στους μονοπολικούς κινητήρες εξαρτάται από ποιο μέρος του τυλίγματος ενεργοποιείται. Το εάν ένα τύλιγμα συμπεριφέρεται σαν βόρειος ή νότιος πόλος εξαρτάται από ποιο μέρος του είναι

Το σχήμα 70 δείχνει μια εγκάρσια τομή ενός μονοπολικού κινητήρα 30° ανά βήμα.



Σχήμα 70. Εγκάρσια τομή ενός μονοπολικού κινητήρα 30° ανά βήμα.

Το τύλιγμα 1 μοιράζεται ανάμεσα στο πάνω και στο κάτω μέρος των πόλων του στάτη ενώ το τύλιγμα 2 μοιράζεται ανάμεσα στο αριστερό και στο δεξί μέρος των πόλων του κινητήρα. Ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης 6 πόλων: 3 βορείων και 3 νοτίων. Για να κινηθεί ο κινητήρας τα τυλίγματα τροφοδοτούνται με τους κατάλληλους παλμούς ενεργοποιώντας κάποια από τα τυλίγματά του. Δίνοντας την ακολουθία παλμών του σχήματος 71, όπου κάθε φορά ενεργοποιείται το ένα μισό του ενός τυλίγματος, ο κινητήρας κινείται σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού 30° σε κάθε βήμα.

Winding 1a:	100010001000								
Winding 1b:	001000100010								
Winding 2a:	010001000100								
Winding 2b:	000100010001								
time 🛶									

Σχήμα 71. Παλμοί οδήγησης μονού βήματος μονοπολικού βηματικού κινητήρα.

Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται ενεργοποιώντας σε κάθε βήμα το μισό και των δύο τυλιγμάτων. Αυτό δεν αλλάζει το βήμα αλλά δίνει περισσότερη ροπή στρέψης. Από την άλλη η ακολουθία παλμών του σχήματος 72 απαιτεί περισσότερη ισχύ.

Winding 1a:	110011001100
Winding 1b:	001100110011
Winding 2a:	011001100110
Winding 2b:	100110011001
	time 🗕



Οι δυο παραπάνω ακολουθίες δίνουν στον κινητήρα λειτουργία μονού βήματος. Ένας συνδυασμός των δυο αυτών λειτουργιών δίνουν στον κινητήρα λειτουργία μισού βήματος (15⁰). Η ροπή στρέψης κατά τη λειτουργία μισού βήματος δεν είναι σταθερή. Η ακολουθία αυτή παλμών παρατίθεται στο σχήμα 73.



Σχήμα 73. Παλμοί οδήγησης μισού βήματος μονοπολικού βηματικού κινητήρα.

Φυσικά οι κινητήρες με μικρότερη γωνία βήματος έχουν ρότορα με περισσότερους πόλους από τον κινητήρα του παραπάνω παραδείγματος.

4.2.5 Διπολικοί (bipolar) βηματικοί κινητήρες

Οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από 2 τυλίγματα και έχουν τέσσερα καλώδια. Αντίθετα με τους μονοπολικούς κινητήρες οι διπολικοί δεν έχουν κεντρικές ελικοτομές στα τυλίγματα τους δηλαδή δεν υπάρχει καλώδιο που να ξεκινά από τη μέση ενός τυλίγματος. Σαν αποτέλεσμα αυτού το ρεύμα περνά μέσα από όλο το τύλιγμα και όχι από το μισό όπως συμβαίνει στους μονοπολικούς κινητήρες και έτσι οι διπολικοί κινητήρες παράγουν περισσότερη ροπή στρέψης από τους μονοπολικούς αντίστοιχου μεγέθους. Το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι οι διπολικοί κινητήρες έχουν πολύ πιο πολύπλοκο κύκλώμα ελέγχου από ότι οι μονοπολικοί. Το ρεύμα στα τυλίγματα των διπολικών κινητήρων μπορεί να ρέει και από τις 2 κατευθύνσεις αλλάζοντας την πολικότητά τους. Όπως φαίνεται στο σχήμα 74 όπου παρουσιάζεται ένας διπολικός κινητήρας 30° ανά βήμα, το ρεύμα ρέει από δεξιά προς τα αριστερά στο τύλιγμα 1 όταν το 1a είναι θετικό και το 1b αρνητικό. Αλλάζοντας την πολικότητά τους το ρεύμα ρέει από αριστερά προς δεξιά.



Σχήμα 74. Διπολικός βηματικός κινητήρας 30° ανά βήμα.

Ένα κύκλωμα ελέγχου γνωστόν σαν Η-γέφυρα χρησιμοποιείται για να αλλάζει την πολικότητα στην άκρη των τυλιγμάτων. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το τύλιγμα 1 μοιράζεται μεταξύ των πόλων του στάτορα στο πάνω και στο κάτω μέρος του κινητήρα, ενώ το τύλιγμα 2 μοιράζεται μεταξύ των πόλων του στάτορα στο πάνω και στο στάτορα στο αριστερό και στο δεξιά μέρος του κινητήρα. Ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης 6 πόλων, 3 βορείων και 3 νοτίων.

Όπως και οι μονοπολικοί οι διπολικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με μονό βήμα με χρήση δυο διαφορετικών ακολουθιών παλμών. Στο σχήμα 75 φαίνεται μια ακολουθία τέτοια για περιστροφή του κινητήρα κατά 360° δηλαδή 12 βήματα. Οι συμβολισμοί "+" και "-" δείχνουν την πολικότητα της τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στο τερματικό του κινητήρα και το "0" δείχνει ότι δεν εφαρμόζεται τροφοδοσία. Η πρώτη ακολουθία μειώνει την ισχύ που καταναλώνεται ενεργοποιώντας ένα μόνο τύλιγμα κάθε φορά ενώ η δεύτερη αυξάνει τη ροπή στρέψης ενεργοποιώντας και τα δύο τυλίγματα ταυτόχρονα.

Terminal 1a:	+	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0		
Terminal 1b:	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0	+	0		
Terminal 2a:	0	+	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-		
Terminal 2b:	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0	+		
time —>														
Terminal 1a:	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-		
Terminal 1b:	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+		
Terminal 2a:	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-		
Terminal 2b:	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+		
time —>														

Σχήμα 75. Ακολουθία παλμών οδήγησης μονού βήματος διπολικού κινητήρα.

Η ακολουθία παλμών για λειτουργία μισού βήματος, δηλαδή 15° ανά βήμα είναι ένας συνδυασμός των δυο παραπάνω ακολουθιών και φαίνεται στο σχήμα 76.

Terminal 1a:	++0.		0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+
Terminal 1b:	0+	+ +	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-
Terminal 2a:	0+++	0.	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-
Terminal 2b:	0	0 4	+ +	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+
time —>																				



4.2.6 Bifilar βηματικοί κινητήρες

Οι κινητήρες με bifilar τυλίγματα είναι πανομοιότυποι ως προς το στάτορα και το ρότορα με τους διπολικούς κινητήρες με τη διαφορά ότι κάθε τύλιγμα αποτελείται από δυο μικρότερα με δυο άκρες το καθένα. Σαν αποτέλεσμα οι bifilar κινητήρες έχουν 8 καλώδια αντί για 4 που έχουν οι παρόμοιοι με αυτούς διπολικοί. Οι bifilar κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως μονοπολικοί είτε ως διπολικοί. Για να χρησιμοποιηθούν ως μονοπολικοί, τα δυο μικρότερα τυλίγματα συνδέονται σε σειρά και το σημείο σύνδεσης χρησιμοποιείται ως κεντρική ελοκοτομή. Στο τύλιγμα 1 του σχήματος 77 φαίνεται αυτή η σύνδεση. Στο τύλιγμα 2, αντίθετα, φαίνεται η σύνδεση για να υπάρχει διπολική λειτουργία. Σε αυτή τη περίπτωση τα μικρότερα τυλίγματα συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Η παράλληλη σύνδεση συνίσταται σε λειτουργίες υψηλών ρευμάτων, ενώ η σε σειρά σε λειτουργίες υψηλής τάσης.



Σχήμα 77. Bifilar βηματικός κινητήρας.

4.3 Επιλογή Βηματικού κινητήρα

Για την επιλογή σωστού βηματικού κινητήρα σε μια εφαρμογή λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένοι παράγοντες [13]. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι:

- Το είδος του κινητήρα
- Η απαιτούμενη ροπή στρέψης της εφαρμογής
- Η πολυπλοκότητα του ελεγκτή δηλαδή του κυκλώματος ελέγχου
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά του κινητήρα

Ακολουθούν κάποιες συγκρίσεις που διευκολύνουν την επιλογή κάποιου κινητήρα έναντι κάποιου άλλου.

4.4 Σύγκριση βηματικών κινητήρων Μεταβλητής αντίστασης-Μόνιμου μαγνήτη ή Υβριδικών

Οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης έχουν το πλεονέκτημα της απλής σχεδίασης τους. Αυτοί οι κινητήρες δεν απαιτούν πολύπλοκους ρότορες μόνιμου μαγνήτη έτσι είναι περισσότερο εύρωστοι από τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Σε όλους τους κινητήρες η ροπή στρέψης τους μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας τους όμως στους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης αυτή η μείωση είναι λιγότερο έντονη. Με την κατάλληλη σχεδίαση οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης μπορούν να υπερβούν ταχύτητες των 10000 βημάτων/δευτερόλεπτο ενώ οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη καθώς και οι υβριδικοί λειτουργούν σε ταχύτητες συνήθως των 1000 βημάτων/δευτερόλεπτο. Η χαμηλή drop-off ροπή των κινητήρων μεταβλητής αντίστασης επιτρέπει την λειτουργία τους χωρίς κιβώτια ταχυτήτων σε εφαρμογές που άλλοι κινητήρες απαιτούν κιβώτια ταχυτήτων.

Οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα. Με ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης οι υβριδικοί και οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι λιγότερο θορυβώδεις σε αντίθεση με τους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης που είναι θορυβώδεις ανεξάρτητα από την κυματομορφή που τους οδηγεί. Σαν αποτέλεσμα οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης δεν προτιμούνται σε εφαρμογές που λαμβάνονται σοβαρά υπόψη ζητήματα κραδασμών ή θορύβου.

Σε αντίθεση με τους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης οι υβριδικοί και οι μόνιμου μαγνήτη δεν μετακινούνται όταν δεν τροφοδοτούνται με ρεύμα διότι ο μόνιμος μαγνήτης τους έλκει τον στάτορα ακόμα και όταν δεν υπάρχει ισχύ. Αυτή η ανασταλτική ροπή (detent torque) είναι επιθυμητή σε κάποιες εφαρμογές αλλά αποτελεί πρόβλημα σε κάποιες άλλες που απαιτούν ομαλή κίνηση.

Στην επιλογή μεταξύ υβριδικών και κινητήρων μόνιμου μαγνήτη σημαντικό ρόλο παίζουν δυο ζητήματα, αυτά του κόστους και της ανάλυσης. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ανήκουν στην κατηγορία των πιο φθηνών κινητήρων ενώ οι υβριδικοί κινητήρες έχουν ρυθμούς βήματος υψηλότερους από τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αν και λίγοι παράγουν χρήσιμη ροπή σε ρυθμούς υψηλότερους από 5000 βήματα/δευτερόλεπτο.

4.5 Σύγκριση μονοπολικών-διπολικών βηματικών κινητήρων

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και οι υβριδικοί κινητήρες είναι διαθέσιμοι με μονοπολικές, διπολικές αλλά και bifilar περιελίξεις πηνίου. Οι τελευταίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μονοπολικές και σε διπολικές διατάξεις. Η επιλογή μεταξύ μονοπολικών και διπολικών συστημάτων οδήγησης εξαρτάται από την απλότητα της οδήγησης αλλά και την παρεχόμενη ισχύ στο φορτίο.Οι διπολικοί κινητήρες έχουν περίπου 30% περισσότερη ροπή στρέψης από τους αντίστοιχους τους μονοπολικούς. Ο λόγος είναι ότι στους μονοπολικούς κινητήρες μόνο το μισό τύλιγμα ενεργοποιείται κάθε χρονική στιγμή ενώ στους διπολικούς κινητήρες ενεργοποιείται ολόκληρο το τύλιγμα κάθε χρονική στιγμή.

5. Ανάλυση του συστήματος που αναπτύχθηκε

Το σύστημα sun-tracking που κατασκευάσθηκε σε αυτή την εργασία κινείται σε 2 άξονες. Οι δυο αυτοί άξονες μετακινούνται σύμφωνα με τη μεταβολή των γωνιών β και α. Η γωνία β είναι η γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού δηλαδή η γωνία που σχηματίζει το φωτοβολταϊκό με το έδαφος. Η γωνία α είναι η γωνία αζιμουθίου της κάθετης στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Ο άξονας XX' αντιστοιχεί στη γωνία α και ο άξονας YY' στη γωνία β. Οι άξονες κίνησης του συστήματος φαίνονται στο σχήμα 78.



Σχήμα 78. Άξονες κίνησης του συστήματος που αναπτύχθηκε.

5.1 Υπολογισμός ταχύτητας του συστήματος

Στη συνέχεια με κατάλληλο κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab θα προσεγγιστεί η μεταβολή των γωνιών α και β κατά τη διάρκεια μιας οποιαδήποτε ημέρας του χρόνου. Για να γίνει αυτό χρειάστηκε να υπολογιστούν οι γωνίες α και β σε σχέση με τις ήδη υπολογισμένες από τις σχέσεις 6 και 7 γωνίες ανύψωσης του ήλιου γ_s και αζιμουθίου του ήλιου ψ_s:

 $\cos\theta_{zs} = \sin\delta \times \sin\phi + \cos\delta \times \cos\phi \times \cos\omega = \sin\gamma_s$ (6)

$$\cos(\Psi_{s}) = \frac{(\sin\gamma_{s} \times \sin\varphi - \sin\delta)}{(\cos\gamma_{s} \times \cos\varphi)}$$
(7)

Η σχέση 6 δίνει την γωνία ανύψωσης του ήλιου γ_s. Από τη γεωμετρία συσχετίζεται η γωνία αυτή με τη γωνία κλίσης β όπως φαίνεται στο σχήμα 79.



Σχήμα 79. Γεωμετρική συσχέτιση γωνιών β,γ_s.

Η σχέση που προκύπτει είναι:

$$\gamma_{s} + 90^{\circ} + \beta = 180^{\circ}$$
$$\gamma_{s} + \beta = 90^{\circ}$$
$$\beta = 90^{\circ} - \gamma_{s}$$
(36)

Το αζιμούθιο του ήλιου που δίνεται από τη σχέση 7 συμπίπτει με τη γωνία α που είναι η κάθετη γωνία αζιμουθίου του φωτοβολταϊκού αφού στην εφαρμογή επιδιώκεται οι ακτίνες του ηλίου να προσπίπτουν κάθετα στο φωτοβολταϊκό. Άρα :

$$\alpha = \Psi s$$
 (37)

Οι τελικές σχέσεις από τις οποίες υπολογίζονται τα α και β από τις 6 ,7,36,37 είναι:

 $\beta = 90 \text{-}asin(sin\delta \times sin\phi + cos\delta \times cos\phi \times cos\omega)$ (38)

$$\alpha = a\cos\frac{(\sin\gamma_s \times \sin\phi - \sin\delta)}{(\cos\gamma_s \times \cos\phi)} \quad (39)$$

Σκοπός είναι η εύρεση του εύρους των βέλτιστων γωνιών β και α κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Για αυτό το σκοπό σχεδιάζεται το διάγραμμα κάθε γωνίας ως προς την ηλιακή ώρα ω. Η ηλιακή ώρα παίρνει τιμές από ω_ς (γωνία ανατολής) έως -ω_ς (γωνία δύσης). Για τον υπολογισμό του ω_ς χρειάζεται η γνώση για τη συγκεκριμένη μέρα που εξετάζεται της γωνίας ηλιακής απόκλισης δ(°) και του αριθμού της μέρας d_n. Τέλος πρέπει να είναι γνωστό και το γεωγραφικό πλάτος της υπό εξέτασης περιοχής. Στην περίπτωσή της συγκεκριμένης εργασίας η υπό εξέταση

περιοχή είναι τα Χανιά Κρήτης με γεωγραφικό πλάτος 35,53°. Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα εξεταστεί η μεταβολή των γωνιών α και β σε σχέση με τη διάρκεια της ηλιοφάνειας για την μέρα της 15^{ης} Απριλίου. Η μέρα αυτή έχει d_n=105. Το πρόγραμμα matlab χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μεταβολής των γωνιών β και α κατά τη διάρκεια όλης της μέρας και τα αντίστοιχα σχεδιαγράμματα φαίνονται στα σχήματα 80-81.



Σχήμα 80. Μεταβολή γωνίας β κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 15 Απριλίου.



Σχήμα 81. Μεταβολή γωνίας α κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 15 Απριλίου.

Από τα δυο παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι η γωνία ηλιακής ώρας στις 15 Απριλίου παίρνει τιμές από -96° έως 96°, η γωνία β μεταβάλλεται από τις 90° έως τις 26° μέχρι το μεσημέρι ενώ στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της ηλιοφάνειας μεταβάλλεται από τις 26° έως και πάλι τις 90° κατά την αντίθετη φορά. Συνολικά δηλαδή μεταβάλλεται κατά 2*(90°-26°)=128°. Η γωνία α μεταβάλλεται από τις 101° έως τις 0° μέχρι το μεσημέρι ενώ στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της ηλιοφάνειας μεταβάλλεται από τις 26° έως και πάλι τις 90° κατά την αντίθετη φορά. Συνολικά δηλαδή μεταβάλλεται κατά 2*(90°-26°)=128°. Η γωνία α μεταβάλλεται από τις 101° έως τις 0° μέχρι το μεσημέρι ενώ στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της ηλιοφάνειας μεταβάλλεται από τις 0° έως και πάλι τις 101° κατά την αντίθετη φορά. Συνολικά δηλαδή μεταβάλλεται κατά 2*(101°)=202°. Στα σχήματα 82-89 φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για 4 διαφορετικές εποχές του χρόνου.



Σχήμα 82. Μεταβολή γωνίας β κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 27 Φεβρουαρίου (d_n=58).



Σχήμα 83. Μεταβολή γωνίας α κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 27 Φεβρουαρίου (d_n=58).



Σχήμα 84. Μεταβολή γωνίας β κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 20 Μαΐου (d_n=140).



Σχήμα 85. Μεταβολή γωνίας α κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 20 Μαΐου (d_n=140).



Σχήμα 86. Μεταβολή γωνίας β κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 20 Ιουλίου (d_n=201).



Σχήμα 87. Μεταβολή γωνίας α κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 20 Ιουλίου (d_n=201).



Σχήμα 88. Μεταβολή γωνίας β κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 20 Οκτωβρίου (d_n=293).



Σχήμα 89. Μεταβολή γωνίας α κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας στις 20 Οκτωβρίου (d_n=293).

Είναι φανερό ότι η γωνία β στην ανατολή και στη δύση του ήλιου είναι 90° ενώ παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή της το μεσημέρι (ω=0). Άρα η ολική μεταβολή της γωνίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας δίνεται από την εξίσωση:

$$\beta_{\mu\epsilon\tau} = 2 \times (90 - \beta_0) (40)$$

όπου β_0 η γωνία β για ω=0.

Στη συνέχεια εξετάζεται η μεταβολή της γωνίας β για ω=0 για ολόκληρο το χρόνο. Το διάγραμμα που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 90.



Σχήμα 90. Μεταβολή β το μεσημέρι(ω=0) κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η γωνία β παίρνει μικρότερη τιμή β=12° για d_n=172 (21 Ιουνίου) και μεγαλύτερες τιμές β=58° στις αρχές Ιανουαρίου και στα τέλη Δεκεμβρίου. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι στις 21 Ιουνίου υπάρχει η μεγαλύτερη μεταβολή του β κατά τη διάρκεια όλης της μέρας που είναι 2*(90-12)=156° και στις αρχές Ιανουαρίου και στα τέλη Δεκεμβρίου υπάρχει η μικρότερη μεταβολή του β κατά τη διάρκεια όλης της μέρας που είναι 2*(90-58)=64°. Αντίστοιχοι υπολογισμοί θα γίνουν για τον υπολογισμό της μεταβολής της γωνίας α κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Παρατηρείται ότι η γωνία α στην ανατολή και στη δύση του ήλιου της ίδιας ημέρας έχει την ίδια τιμή (ας την ονομαστεί α_s) ενώ το μεσημέρι (ω=0) κάθε μέρας και για όλο το χρόνο παίρνει την τιμή 0. Άρα η ολική μεταβολή της γωνίας α κατά τη διάρκεια μιας ημέρας δίνεται από την εξίσωση:

$$\alpha_{\mu\epsilon\tau} = 2 \times (\alpha_s) (41)$$

όπου α_s η γωνία α για $\omega=\omega_\varsigma$ και για $\omega=-\omega_s$.

Στη συνέχεια εξετάζεται η μεταβολή της γωνίας α για ω= ω_ς για ολόκληρο το χρόνο. Το διάγραμμα που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 91.



Σχήμα 91. Μεταβολή α για ω= ως κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η γωνία α παίρνει μικρότερη τιμή α_s=62° στις αρχές Ιανουαρίου και στα τέλη Δεκεμβρίου και τη μεγαλύτερη τιμή για d_n=172 (21 Ιουνίου) αs=119°. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι στις 21 Ιουνίου υπάρχει η μεγαλύτερη μεταβολή του α κατά τη διάρκεια όλης της μέρας που είναι 2*(119°)=238° και στις αρχές Ιανουαρίου και στα τέλη Δεκεμβρίου υπάρχει η μικρότερη μεταβολή του α κατά τη διάρκεια όλης της μέρας που είναι 2*(62°)=124°.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας μεταβολής των γωνιών α και β σε μια συγκεκριμένη μέρα θα πρέπει να είναι γνωστή η διάρκεια της ηλιοφάνειας τη μέρα αυτή. Το παρακάτω σχήμα 92 που σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του matlab δίνει το διάγραμμα της διάρκειας ηλιοφάνειας για όλες τις μέρες του χρόνου.



Σχήμα 92. Διάγραμμα της διάρκειας ηλιοφάνειας για όλες τις μέρες του χρόνου.

Όπως παρατηρείται και πάλι στις 21 Ιουνίου έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια ηλιοφάνειας σε μοίρες 216° ενώ στις αρχές Ιανουαρίου και στα τέλη Δεκεμβρίου έχει τη μικρότερη διάρκεια ηλιοφάνειας 143°.

Στις 21 Ιουνίου η διάρκεια ηλιοφάνειας σε μοίρες είναι 216°. Εφόσον η γη κάνει μια πλήρη περιστροφή (360°) γύρω από τον ήλιο σε 24 ώρες τότε η διάρκεια ηλιοφάνειας στις 21 Ιουνίου σε χρόνο είναι (216°*24)/360°=14,4 ώρες. Η μεταβολή των γωνιών που εξετάζονται για αυτό το χρονικό διάστημα της συγκεκριμένης μέρας είναι για τη α 238° και για την β 156°. Το ζήτημα είναι σε πόσο χρονικό διάστημα οι γωνίες αυτές μεταβάλλονται κατά 1,8° διάστημα που αντιστοιχεί στο βήμα των βηματικών κινητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασίας αυτή. Για

την γωνία α το χρονικό αυτό διάστημα είναι (1,8*14,4)/238=0,109 ώρες=6,5 λεπτά. Δηλαδή κάθε 6,5 λεπτά η γωνία α μεταβάλλεται κατά 1,8 μοίρες στις 21 Ιουνίου. Για την γωνία β το χρονικό αυτό διάστημα είναι (1,8*14,4)/156=0,16 ώρες=9,9 λεπτά. Δηλαδή κάθε 9,9 λεπτά η γωνία β μεταβάλλεται κατά 1,8 μοίρες στις 21 Ιουνίου.

Για τις 1 Ιανουαρίου διάρκεια ηλιοφάνειας σε μοίρες 145° αντιστοιχούν σε χρόνο (145°*24)/360°=9,6 ώρες. Η μεταβολή των γωνιών που εξετάζεται για αυτό το χρονικό διάστημα της συγκεκριμένης μέρας είναι για τη α 124° και για την β 64°. Το ζήτημα είναι να βρεθεί σε πόσο χρονικό διάστημα οι γωνίες αυτές μεταβάλλονται κατά 1,8° διάστημα που αντιστοιχεί στο βήμα των βηματικών κινητήρων της εργασίας αυτής. Για την γωνία α το χρονικό αυτό διάστημα είναι (1,8*9,6)/124=0,13 ώρες=8,3 λεπτά. Δηλαδή κάθε 8,3 λεπτά η γωνία α μεταβάλλεται κατά 1,8 μοίρες στις 21 Ιουνίου. Για την γωνία β το χρονικό αυτό διάστημα είναι (1,8*9,6)/64=0,27 ώρες=16,2 λεπτά. Δηλαδή κάθε 16,2 λεπτά η γωνία β μεταβάλλεται κατά 1,8 μοίρες στις 1 Ιανουαρίου.

Το συμπέρασμα είναι ότι η γωνία α μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου με μεγαλύτερη ταχύτητα 1,8° κάθε 6,5 λεπτά (21 Ιουνίου) και με μικρότερη ταχύτητα 1,8° κάθε 8,3 λεπτά (1 Ιανουαρίου). Η γωνία β μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου με μεγαλύτερη ταχύτητα 1,8° κάθε 9,9 λεπτά (21 Ιουνίου) και με μικρότερη ταχύτητα 1,8° κάθε 16,2 λεπτά (1 Ιανουαρίου). Η παραπάνω μελέτη εκπονήθηκε προκειμένου να αποφασιστεί κάθε πότε το sun-tracking σύστημα θα αναζητεί τη νέα θέση του ήλιου, δηλαδή κάθε πότε θα κάνει tracking. Έτσι επιλέχθηκε ως χρονικό διάστημα αυτό των 6,5 λεπτών, χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ταχύτητα μεταβολής γωνίας στο χρόνο(6,5 λεπτά/1,8°). Με αυτή την επιλογή δεν θα υπάρξει καμία μέρα μέσα στο χρόνο στην οποία ο ήλιος ανάμεσα σε δυο tracking θα μεταβάλει τη θέση του περισσότερο από 1,8° (όσο δηλαδή είναι το βήμα του βηματικού). Ουσιαστικά δηλαδή επιλέχθηκε η καλύτερη περίπτωση προκειμένου να δεχθεί το φωτοβολταϊκό καθ'όλη τη διάρκεια του έτους τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία.

5.2 Θεωρητική απόδειξη του αλγόριθμου κίνησης του suntracking συστήματος

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του συστήματος sun-tracking έχει συνοπτικά ως εξής:

Ένα αισθητήριο hall μετρά το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου και στη συνέχεια κινείται το σύστημα μέσω των βηματικών κινητήρων με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε φορά να προσανατολίζεται στη διεύθυνση που δέχεται τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Περιληπτικά, όσο το ρεύμα αυξάνει ο ενεργοποιημένος άξονας του συστήματος κινείται προς την ίδια φορά ενώ όταν μειώνεται προς την αντίθετη ώσπου να βρει το μέγιστο ρεύμα. Το μέγιστο ρεύμα αντιστοιχεί στην μέγιστη ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό αφού ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όσο πιο μεγάλη ακτινοβολία δέχεται τόσο πιο μεγάλη τιμή ρεύματος παράγει στην έξοδο του. Για να ισχύσει ο παραπάνω αλγόριθμος ώστε να δεχτεί το φωτοβολταϊκό την μέγιστη ακτινοβολία θα πρέπει οι γωνίες β,α (σύμφωνα μα τις οποίες κινούνται οι δύο άξονες του συστήματος) να πάρουν μια συγκεκριμένη μοναδική τιμή σε κάθε χρονική στιγμή δηλαδή θα πρέπει να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση της ακτινοβολίας σε σχέση με τις γωνίες β και α δεν παρουσιάζει τοπικά μέγιστα.

Για την απόδειξη αυτή, χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα matlab προκειμένου να εξαχθούν τα επιθυμητά διαγράμματα. Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής εξισώσεις:

 $G(\beta,\alpha) = B(\beta,\alpha) + D(\beta,\alpha) + R(\beta,\alpha)$ (21)

 $B(\beta,\alpha) = B \times max(0,\cos\theta s)$ (22)

$$B = \frac{B(0)}{\cos \theta_{zs}}$$
(23)

 $D(\beta,\alpha) = (1 + \cos\beta) \times D(0)/2$ (31)

$$R(\beta,\alpha) = G(0)(1 - \cos\beta) \times \rho/2$$
(33)

 $\cos\theta_{c} = \sin\delta \times \sin\phi \times \cos\beta - \sin\delta \times \cos\phi \times \sin\beta \times \cos\alpha + \cos\delta \times \cos\phi \times \cos\beta \times \cos\omega$

 $+\cos\delta\times\sin\varphi\times\sin\beta\times\cos\alpha\times\cos\omega+\cos\delta\times\sin\alpha\times\sin\omega\times\sin\beta$ (12)

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta \times \sin\varphi + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\omega = \sin\gamma_{\varsigma}$$
(6)

 $\delta(^{\circ}) = 23,45 \times \sin(\frac{360}{365} \times (d_n + 284)) \quad (4)$ $K_D = 0.99 \quad \gamma \iota \alpha \ K_T \le 0.17$ $K_D = 1.188 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^{-2} - 21.856 K_T^{-3} + 14.648 K_T^{-4}$ $\gamma \iota \alpha \quad 0.17 \le K_T \le 0.8 \quad (18)$ $K_D = \frac{D_d(0)}{G_d(0)} \quad (19)$ $\kappa \alpha \iota$ $K_T = \frac{G_d(0)}{B_{Od}(0)} \quad (20)$

 $\mathbf{B}_{\mathrm{Oh}}(0) = \mathbf{BO} \times \boldsymbol{\varepsilon}_{o} \times \cos \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{zs}} \quad (14)$

$$\mathbf{B}_{\mathrm{Od}}(0) = \frac{24}{\pi} \times \mathbf{B}_{o} \mathcal{E}_{o} \times (\cos\varphi \times \cos\delta) \times (\omega_{\mathrm{s}} \cos\omega_{\mathrm{s}} - \sin\omega_{\mathrm{s}})$$
(15)

Επίσης ισχύει:

Bo=Go-Do (42)

Όλα τα διαγράμματα της ακτινοβολίας που θα παρουσιαστούν θα είναι ως προς G(0) (ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο). Στους τελικούς υπολογισμούς επειδή το D(O) δεν είναι γνωστό θα δοθεί προσεγγιστικά στην σχέση 19 η μορφή Kd=D(0)/G(0) με βάση την οποία προκύπτει D(0)=K_d*G(0). Με βάση πίνακα [11], ο οποίος περιέχει τιμές της μηνιαίας ακτινοβόλισης στα Χανιά για όλους τους μήνες του έτους, εξάγεται προσεγγιστικά η ακτινοβόλιση κατά τη διάρκεια μιας μέρας διαιρώντας τη τιμή της μηνιαίας ακτινοβόλισης ενός μήνα με τον αριθμό των ημερών αυτού του μήνα. Έτσι για τον υπολογισμό του K_τ (σχέση 20) δίνεται στο BOd(0) (ακτινοβόλιση στη διάρκεια μιας μέρας) τιμή 4900Wh/m² για μια μέρα του Απριλίου.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις αρχικά εξετάστηκε με τη βοήθεια του matlab η συνάρτηση G(β))/G(0) για μια συγκεκριμένη μέρα(για παράδειγμα 15 Απριλίου d_n=105), μια συγκεκριμένη ώρα (ω=30°) θεωρώντας τη γωνία α σταθερή (για παράδειγμα ίση με 0°).Το διάγραμμα που αντιστοιχεί σε αυτό το πρόγραμμα δίνεται στο σχήμα 93.



Σχήμα 93. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία β στις 15 Απριλίου για α=0°, ω=30°.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα δεν υπάρχουν τοπικά μέγιστα παρά ένα μόνο ολικό μέγιστο το οποίο δείχνει πως για μεγιστοποίηση της ακτινοβολίας στις 15 Απριλίου την ηλιακή ώρα 30° και ενώ η γωνία α είναι 0° η γωνία β θα πρέπει να πάρει την τιμή 30°.Παρακάτω στα σχήματα 94-98 ακολουθούν μερικά παρόμοια διαγράμματα για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων d_n, α και ω με σκοπό να δειχθεί πως οποιαδήποτε μέρα (d_n),οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ω) για οποιαδήποτε τιμή τις γωνίας α, η γωνία β παίρνει μια μόνο τιμή η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση G(β)/G(0).


Σχήμα 94. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία β στις 19 Ιουλίου για α=0°, ω=30°.



Σχήμα 95. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία β στις 19 Ιουλίου για α=0°, ω=0°.



Σχήμα 96. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία β στις 19 Ιουλίου για α=35°, ω=30°.



Σχήμα 97. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία β στις 28 Φεβρουαρίου για α=-30° , ω= 30°.



Σχήμα 98. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία β στις 28 Φεβρουαρίου για α=60°, ω=0°.

Παρατηρείται ότι σε όλα τα διαγράμματα η γωνία β παίρνει μια τιμή η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση G(β)/G(0). Στη συνέχεια επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία για τη συνάρτηση G(α)/G(0). Τα δεδομένα είναι ίδια με πριν με τη μόνη διαφορά ότι σε αυτή τη περίπτωση η γωνία κλίσης β θεωρείται σταθερή. Θα εξεταστεί η συνάρτηση G(α))/G(0) για μια συγκεκριμένη μέρα (για παράδειγμα 15 Απριλίου d_n=105), μια συγκεκριμένη ώρα ω=30°) θεωρώντας τη γωνία β σταθερή (για παράδειγμα ίση με το γεωγραφικό πλάτος 35,53°). Το διάγραμμα του matlab που αντιστοιχεί στα παραπάνω δεδομένα φαίνεται στο σχήμα 99.



Σχήμα 99. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία α στις 15 Απριλίου για β=35,53°, ω=0°.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα δεν υπάρχουν τοπικά μέγιστα παρά ένα μόνο ολικό μέγιστο το οποίο δείχνει πως για μεγιστοποίηση της ακτινοβολίας στις 15 Απριλίου την ηλιακή ώρα 30° και ενώ η γωνία β είναι 35,53° η γωνία α θα πρέπει να πάρει την τιμή 0°. Παρακάτω στα σχήματα 100-104 ακολουθούν μερικά παρόμοια διαγράμματα για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων d_n, β και ω με σκοπό να δειχθεί πως οποιαδήποτε μέρα (d_n),οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ω) για οποιαδήποτε τιμή τις γωνίας β, η γωνία α παίρνει μια μόνο τιμή η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση G(α)/G(0).



Σχήμα 100. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία α στις 15 Απριλίου για β=10°, ω=30°.



Σχήμα 101. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία α στις 19 Ιουλίου για β=35°, ω=-30°.



Σχήμα 102. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία α στις 19 Ιουλίου για β=65°, ω=10°.



Σχήμα 103. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία α στις 28 Φεβρουαρίου για β=35°, ω=10°.



Σχήμα 104. Διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία α στις 28 Φεβρουαρίου για β=35°, ω=-10°.

Παρατηρείται ότι σε όλα τα διαγράμματα η γωνία α παίρνει μια τιμή η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση G(α)/G(0).

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η συνάρτηση G(α,β)/G(0).Δηλαδή για μια συγκεκριμένη μέρα, μια συγκεκριμένη ώρα θα εξεταστούν όλα τα ζεύγη τιμών των γωνιών α,β ως προς την ακτινοβολία που αντιστοιχούν. Παρουσιάζεται αρχικά το διάγραμμα για τις 15 Απριλίου για ω=0°. Το διάγραμμα 3-διαστάσεων που προκύπτει από το πρόγραμμα matlab παρουσιάζεται στο σχήμα 105.



Σχήμα 105. Τρισδιάστατο διάγραμμα μεταβολής ακτινοβολίας σε σχέση με τις γωνίες α,β στις 15 Απριλίου για ω=30°.

Στα σχήματα 106-107 φαίνεται το διάγραμμα από άλλες οπτικές γωνίες έτσι ώστε να φανεί διαδοχικά η ακτινοβολία ως προς β και η ακτινοβολία ως προς α.



Σχήμα 106. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 105.



Σχήμα 107. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 105.

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει τοπικό μέγιστο αλλά δυο ολικά μέγιστα. Δηλαδή δυο ζεύγη τιμών μεγιστοποιούν την συνάρτηση και επομένως την ακτινοβολία. Η ακτινοβολία μεγιστοποιείται όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, όταν α=-125° και β=-25° ή όταν α=55° και β=25°. Τα δύο ζεύγη αυτά γωνιών φέρνουν την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στο ίδιο επίπεδο, γι' αυτό και δίνουν την ίδια συνάρτηση G(α,β)/G(0) οποιαδήποτε ακτινοβολία. Δηλαδή n μέρα και οποιαδήποτε ώρα θα παρουσιάζει δύο ολικά μέγιστα δηλαδή δύο ζεύγη τιμών α και β που θα μεγιστοποιούν την τιμή της ακτινοβολίας. Οι απόλυτες τιμές των δύο γωνιών α που μεγιστοποιούν την ακτινοβολία έχουν πάντα άθροισμα 180° και οι τιμές των δύο γωνιών β που μεγιστοποιούν την ακτινοβολία είναι πάντα αντίθετες έτσι ώστε η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού να είναι και στα δυο ζεύγη τιμών στο ίδιο επίπεδο. Στη συνέχεια, δίνονται κάποια άλλα διαγράμματα που πιστοποιούν τα παραπάνω.

1)Διαγράμματα της συνάρτησης G(α,β)/G(0) για τις 20 Ιανουαρίου και για γωνιακή ώρα ω=-45°, σχήματα 108-109-110.



Σχήμα 108. Διάγραμμα της συνάρτησης G(α,β)/G(0) για τις 20 Ιανουαρίου και για γωνιακή ώρα ω=-45°.



Σχήμα 109. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 108.



Σχήμα 110. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 108.

Παρατηρείται και στο παραπάνω παράδειγμα ότι τα δύο ζεύγη τιμών είναι α=-40 β=40 και α=140 β=-40, τιμές που φέρνουν το φωτοβολταϊκό στο ίδιο επίπεδο.

2)Διαγράμματα της συνάρτησης G(α,β)/G(0) για τις 20 Ιουλίου και για γωνιακή ώρα ω=45°,σχήμα 111-113.



Σχήμα111. Διάγράμμα της συνάρτησης G(α,β)/G(0) για τις 20 Ιουλίου και για γωνιακή ώρα ω=45°.



Σχήμα 112. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 111.



Σχήμα 113. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 111.

Παρατηρείται και στο παραπάνω παράδειγμα ότι τα δύο ζεύγη τιμών είναι α=85 β=30 και α=-95 β=-30, τιμές που φέρνουν το φωτοβολταϊκό στο ίδιο επίπεδο.

3)Διαγράμματα της συνάρτησης G(α,β)/G(0) για τις 7 Οκτωβρίου και για γωνιακή ώρα ω=20°,σχήμα 114-116.



Σχήμα 114. Διάγραμμα της συνάρτησης G(α,β)/G(0) για τις 7 Οκτωβρίου και για γωνιακή ώρα ω=20°.



Σχήμα 115. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 114.



Σχήμα 116. Διαφορετική οπτική γωνία σχήματος 114.

Παρατηρείται και στο παραπάνω παράδειγμα ότι τα δύο ζεύγη τιμών είναι α=35 β=45 και α=-145 β=-45, τιμές που φέρνουν το φωτοβολταϊκό στο ίδιο επίπεδο.

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα κάθε στιγμή η συνάρτηση της ακτινοβολίας ως προς τις γωνίες α και β σχηματίζει δύο 'λόφους' η κορυφή των οποίων αντιστοιχεί στην μέγιστη ακτινοβολία. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται Hill-Climbing και έχει ως σκοπό να φτάνει στην κορυφή σε έναν από τους δύο αυτούς 'λόφους', συγκεκριμένα στον πιο κοντινό 'λόφο' των τρεχουσών τιμών α και β ,κάθε φορά που γίνεται αναζήτηση της μέγιστης ακτινοβολίας.

.

6. Υλοποίηση του συστήματος sun-tracking

6.1 Block διάγραμμα



Σχήμα 117.Block διάγραμμα του sun-tracking συστήματος.

Η κεντρική ιδέα λειτουργίας του συστήματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε δίνεται στο γενικό διάγραμμα του σχήματος 117. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Με βάση την ποσότητα αυτής της ηλιακής Βηματικός ακτινοβολίας παράγει στην έξοδο του μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος η οποία ΚΙνητήρας 2 είναι ανάλογη αυτής της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα αυτό που παράγεται από το φωτοβολταϊκό φορτίζει τον συσσωρευτή. Ανάλογα με την τιμή ρεύματος

125

εξόδου του φωτοβολταϊκού το αισθητήριο ρεύματος παράγει μια συγκεκριμένη τιμή τάσης. Ο μικροελεγκτής διαβάζει την τιμή αυτή με τη βοήθεια του μετατροπέα A/D και ανάλογα με την τιμή της αποφασίζει προς τα πού θα κινηθεί το σύστημα δίνοντας τους κατάλληλους παλμούς στους βηματικούς κινητήρες οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν το φωτοβολταϊκό. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το φωτοβολταϊκό να δεχτεί τη μέγιστη τιμή ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα εξόδου του.

6.2 Στοιχεία συστήματος

6.2.1 Φωτοβολταϊκό

Το φωτοβολταϊκό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας είναι το USP10 10watt/12volt της εταιρίας Phaesun. Η μέγιστη ισχύς του είναι 10Watt ενώ το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει στην έξοδό του είναι 0,68Ampere. Το φωτοβολταϊκό αυτό ανοιχτοκυκλωμένο δίνει μέγιστη τάση εξόδου 20,5Ωvolt. Τέλος έχει τις εξής φυσικές διαστάσεις:μήκος 40,4cm, πλάτος 34,4cm,πάχος 4cm και βάρος 2,4Kgr. Το φωτοβολταϊκό που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 118.



Σχήμα 118. Φωτοβολταϊκό USP10 10watt/12volt της εταιρίας Phaesun.

6.2.2 Επιλογή βηματικών κινητήρων συστήματος

Στο σχήμα 119 παρουσιάστηκαν οι άξονες του συστήματος. Η κίνηση του κάθε άξονα έγινε με έναν βηματικό κινητήρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής αυτών των βηματικών κινητήρων [14].



Σχήμα 119. Άξονες κίνησης συστήματος

<u>Για τον άξονα ΧΧ΄</u>

φωτοβολταικό

Ά٤c

Σκοπός της επιλογής του βηματικού κινητήρα ήταν η ροπή στρέψης που παράγει αυτός να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας. Για τον υπολογισμό της ροπής στρέψης είναι απαραίτητο να είναι πρώτα γνωστή η στιγμιαία αδράνεια (J_L) του συστήματος. Η ολική στιγμιαία αδράνεια υπολογίζεται αθροίζοντας τη στιγμιαία αδράνεια λόγω φορτίου (J₁) και στιγμιαία αδράνεια λόγω μοχλού κίνησης (J₂). Η στιγμιαία αδράνεια λόγω φορτίου οφείλεται στο βάρος του φωτοβολταϊκού ενώ η στιγμιαία αδράνεια λόγω μοχλού κίνησης οφείλεται στο μοχλό γύρω ο οποίος κινεί το σύστημα στον άξονα XX'. Στις παρακάτω σχέσεις υπολογίζεται στιγμιαία αδράνεια.

$$J_1 = 1/2 \times W \times (A^2 + B^2)$$
 (43)

όπου Α το μήκος του φωτοβολταϊκού,

Β το πλάτος του φωτοβολταϊκού

και W το βάρος του.

J₁=1/12*2,4*(40,42*34,42)=563,1 Kgr*cm2

$$J2=1/8 \times W \times D^2 \quad (44)$$

όπου D² η διάμετρος του σωλήνα περιστροφής.

$$J_2$$
=1/8*2,4*5²=7,5 Kgr*cm²
 $J_L = J_1 + J_2$ (45)

J_L =570,6 Kgr*cm²

Γνωρίζοντας την ολική στιγμιαία αδράνεια του συστήματος για τον άξονα XX' υπολογίζεται η ροπή επιτάχυνσης (acceleration torque). Αρχικά γίνεται η υπόθεση ότι η στιγμιαία αδράνεια του ρότορα είναι $J_0=0,1$ Kgr*cm². Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι η περίοδος επιτάχυσνης/επιβράδυνσης είναι $t_1=0,25$ sec και ότι η περίοδος θέσης είναι t=1sec. Οι χρόνοι αυτοί φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 120 [14].



Σχήμα 120.Πάλμοι βηματικού κινητήρα.

Επίσης πρέπει να υπολογιστεί ο αριθμός των παλμών που είναι απαραίτητοι για την κίνηση του συστήματος ΧΧ':

αριθμός παλμών =
$$\frac{\text{ολική γωνία κίνησης}}{\Theta_s}$$
 (46)

όπου ολική γωνία κίνησης η κίνηση του άξονα σε μοίρες κατά τη διάρκεια μιας μέρας και Θ_s το βήμα του βηματικού κινητήρα.

Στο συγκεκριμένο σύστημα ο άξονας ΧΧ': κινείται κατά 180° και το βήμα του βηματικού κινητήρα είναι 1,8°, οπότε ο αριθμός παλμών είναι:

Μετά τον υπολογισμό του αριθμού των παλμών υπολογίζεται η συχνότητα των παλμών (f_s) από την επόμενη σχέση:

$$f_s = \frac{\alpha \rho \iota \theta \mu \dot{o} \varsigma \pi \alpha \lambda \mu \dot{\omega} v}{t - t_1}$$
 (47)

Συχνότητα παλμών= αριθμός παλμών/t-t1=133,3Hz

Μετά τον υπολογισμό των παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η ροπή επιτάχυνσης από την επόμενη σχέση:

$$T_{a} = \left(\frac{J_{o} + J_{L}}{g}\right) \times \left(\frac{\pi \times \theta_{s}}{180}\right) \times \left(\frac{f_{s}}{t_{1}}\right)$$
(48)

 $T_a = (570, 6/980, 7)^* (3, 14^*1, 8/180)^* (133, 33/0, 25) = 0, 58^*0, 031^*533, 3 = 9, 58 \text{Kgcm}$

Η απαραίτητη ροπή στρέψης (T_M) που πρέπει να έχει ο βηματικός κινητήρας που θα επιλεγεί ισούται με το άθροισμα της ροπής επιτάχυνσης (T_α) και της ροπής φορτίου (T_L).

$$T_{M} = (T_{L} + T_{a})$$
 (49)

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή για λόγους απλότητας θεωρούνται αμελητέες οι τριβές οπότε T_L =0. Άρα T_M =9,58Kgcm=0,93Nm=93Ncm αφού σύμφωνα με πίνακα μετατροπής [14] 1Nm ισούται με 10,197 Kgcm

Ο κινητήρας που θα επιλεχθεί πρέπει να έχει pull-out ροπή που να έχει μέγιστη τιμή μεγαλύτερη από την Τ_M ροπή. Όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 121 [15] ο βηματικός κινητήρας που επιλέχθηκε για να κινήσει το σύστημα στον άξονα XX ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη αφού έχει μέγιστη τιμή της pull-out ροπής 102Ncm που είναι μεγαλύτερη από την TM ροπή(93Ncm)



Σχήμα 121. Ροπή στρέψης βηματικού κινητήρα 23HSX-306.

<u>Για τον άξονα ΥΥ</u>

Σκοπός της επιλογής του βηματικού κινητήρα ήταν η ροπή στρέψης που παράγει αυτός να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας. Για τον υπολογισμό της ροπής στρέψης είναι απαραίτητο να είναι πρώτα γνωστή η στιγμιαία αδράνεια (J_L) του συστήματος. Η ολική στιγμιαία αδράνεια υπολογίζεται αθροίζοντας τη στιγμιαία αδράνεια λόγω φορτίου (J₁) και στιγμιαία αδράνεια λόγω μοχλού κίνησης (J₂). Η στιγμιαία αδράνεια λόγω φορτίου οφείλεται στο βάρος του φωτοβολταϊκού ενώ η στιγμιαία αδράνεια λόγω μοχλού κίνησης οφείλεται στο μοχλό γύρω ο οποίος κινεί το σύστημα στον άξονα ΥΥ'. Στις παρακάτω σχέσεις υπολογίζεται στιγμιαία αδράνεια.

$$J=1/2 \times W \times (A^2+C^2) \quad (50)$$

όπου Α το μήκος του φωτοβολταϊκού και C το πάχος του φωτοβολταϊκού ST10 και W το βάρος του.

$$J_1=1/12^*2,4^*(40,4^{2*}4^2)=329,6 \text{ Kgr}^*\text{cm}^2$$

 $J_2=1/8^*W^*D^2$
 $J_2=1/8^*2,4^*5^2=7,5 \text{ Kgr}^*\text{cm}^2$
 $J_L=J_1+J_2$

J_L =337,1 Kgr*cm²

Γνωρίζοντας την ολική στιγμιαία αδράνεια του συστήματος για τον άξονα ΥΥ γίνεται ο υπολογισμός της ροπής επιτάχυνσης(acceleration torque). Αρχικά γίνεται η υπόθεση ότι η στιγμιαία αδράνεια του ρότορα είναι $J_0=0,1$ Kgrcm². Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι η περίοδος επιτάχυσνης/επιβράδυνσης είναι t₁=0,25sec και ότι η περίοδος θέσης είναι t=1sec.Επίσης:

αριθμός παλμών = $\frac{\text{ολική γωνία κίνησης}}{\beta$ ήμα κίνησης

Στο συγκεκριμένο σύστημα ο άξονας ΥΥ κινείται κατά 90° και το βήμα του βηματικού κινητήρα είναι 1,8°,οπότε ο αριθμός παλμών είναι:

αριθμός παλμών =90°/1,8°=50

Συχνότητα παλμών =
$$\frac{$$
αριθμός παλμών $t-t_1$

Συχνότητα παλμών= αριθμός παλμών/t-t₁=66,6Hz

Μετά τον υπολογισμό των παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η ροπή επιτάχυνσης από την επόμενη σχέση:

$$T_{a} = \left(\frac{J_{o} + J_{L}}{g}\right) \times \left(\frac{\pi \times \theta_{s}}{180}\right) \times \left(\frac{f_{s}}{t_{1}}\right)$$

 $T_a = (337, 1/980, 7)^*(3, 14^*1, 8/180)^*(66, 6/0, 25) = 0, 34^*0, 031^*266, 4 = 2, 8 \text{Kg*cm}$

Η απαραίτητη ροπή στρέψης (T_M) που πρέπει να έχει ο βηματικός κινητήρας που θα επιλεγεί ισούται με το άθροισμα της ροπής επιτάχυνσης (T_α) και της ροπής φορτίου (T_L).

$$T_{\rm M} = (T_{\rm L} + T_{\rm a})$$

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή για λόγους απλότητας θεωρούνται αμελητέες οι τριβές οπότε $T_L=0$. Άρα $T_M=2,8$ Kgcm=0,27Nm =27Ncm αφού σύμφωνα με πίνακα μετατροπής[14] 1Nm ισούται με 10,197 Kgcm

Όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 122 ο βηματικός κινητήρας που επιλέχθηκε για να κινήσει το σύστημα στον άξονα ΥΥ' ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη που υποδεικνύει ότι ο κινητήρας πρέπει να έχει pull-out ροπή που να έχει μέγιστη τιμή μεγαλύτερη από την Τ_M ροπή, αφού η μέγιστη τιμή της pull-out ροπής είναι 33Ncm που είναι μεγαλύτερη από την T_M ροπή(27Ncm).



Σχήμα 122. Ροπή στρέψης βηματικού κινητήρα 23HSX-102.

Έτσι οι κινητήρες που επιλέχθηκαν τελικά είναι της εταιρίας McLennan και πρόκειται για τα μοντέλα 23HSX-102 για την κίνηση του συστήματος στον άξονα YY' και 23HSX-306 για την κίνηση του συστήματος στον άξονα XX'

6.2.3 Κατασκευή συστήματος

Το επόμενο βήμα της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας ήταν η φυσική κατασκευή του συστήματος που ανατέθηκε στην εταιρία Εργαλειοτεχνική Κρήτης. Η τελική μορφή της κατασκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 123.



Σχήμα 123. Σύστημα sun-tracking 2 αξόνων.

6.2.4 Οδηγοί βηματικών κινητήρων

Οι βηματικοί κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία είναι οι 23HSX-102 και 23HSX-306 της εταιρίας MCLENNAN. Οι κινητήρες αυτοί είναι bifilar, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως μονοπολικοί είτε ως διπολικοί κινητήρες. Οι διπολικοί κινητήρες έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αποδώσουν μέχρι και 30% μεγαλύτερη ροπή στρέψης από ότι οι μονοπολικοί. Το αντίτιμο αυτού όμως είναι ότι οι διπολικοί κινητήρες έχουν πολύ πιο πολύπλοκα κυκλώματα οδήγησης που ανεβάζουν το κόστος ενός project. Στη περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας και επειδή η ροπή στρέψης που δίνουν οι 23HSX-102 και 23HSX-306 στη μονοπολική τους μορφή αρκεί η χρησιμοποίησή τους ως μονοπολικούς.

Οι βηματικοί κινητήρες 23HSX-102 και 23HSX-306 αποτελούνται από 4 τυλίγματα τα οποία στη μονοπολική μορφή τους ενώνονται σε σειρά ανά 2 και έτσι είναι σαν να υπάρχουν 2 τυλίγματα με 4 περιελίξεις. Χρησιμοποιήθηκε μονοπολική οδήγηση διπλής φάσης κατά την οποία σε κάθε βήμα ενεργοποιούνται 2 περιελίξεις μια σε κάθε τύλιγμα. Το κύκλωμα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για τον βηματικό 23HSX-306 που είναι υπεύθυνος για την κίνηση του XX' άξονα του συστήματος αποτελείται από:

- 4 Mosfet IRFZ44 που χρησιμοποιούνται ως διακόπτες για να ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τις 4 περιελίξεις
- 2 drivers για τα Mosfet ICL7667
- 8 διόδους 1N5822
- 6 αντιστάσεις ισχύος,3 παράλληλα (δυο 10Ω και 1 μια 5 Ω) σε κάθε ένα από τα δυο τυλίγματα που χρησιμοποιούνται για προστασία του κυκλώματος και
- 2 ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές 4700μF ο καθένας

Σχηματικά το κύκλωμα οδήγησης αυτού του βηματικού κινητήρα δίνεται στο σχήμα 124 ενώ και στο σχήμα 125 παρουσιάζεται η πλακέτα αυτή.





Σχήμα 125. Πλακέτα οδήγησης βηματικού κινητήρα 23HSX-306

Το κύκλωμα ελέγχου που κατασκευάστηκε για τον βηματικό κινητήρα 23HSX-102 που είναι υπεύθυνος για την κίνηση του ΥΥ' άξονα του συστήματος αποτελείται από:

- 4 Mosfet IRFZ44 που χρησιμοποιούνται ως διακόπτες για να ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τις 4 περιελίξεις,
- 2 drivers για τα Mosfet ICL7667,
- 8 ελεύθερης ροής διόδους 1Ν5822 και
- 6 αντιστάσεις ισχύος, 3 σε σειρά (τρεις των 5 Ω) σε κάθε ένα από τα δυο τυλίγματα που χρησιμοποιούνται για προστασία του κυκλώματος.

Το κύκλωμα οδήγησης αυτού του βηματικού κινητήρα δίνεται στο σχήμα 126 ενώ και στο σχήμα 127 παρουσιάζεται η αντίστοιχη πλακέτα.





Σχήμα 127. Πλακέτα οδήγησης βηματικού κινητήρα 23HSX-102

Από τα 4 πρώτα pins του PORTC ή του PORTD του microcontroller ελέγχεται μέσω των Mosfet ο βηματικός κινητήρας ενεργοποιώντας κάθε φορά τις κατάλληλες περιελίξεις. Αυτό γίνεται δίνοντας στα τυλίγματα μέσω των Mosfet τετραγωνικούς παλμούς. Σύμφωνα με την μονοπολική οδήγηση διπλής φάσης και για όσο διάστημα επιθυμείται να κινηθεί κάποιος από τους δυο βηματικούς, τα 4 πρώτα pins του αντίστοιχου PORT παίρνουν τις τιμές του πίνακα Α[1001,1010,0110,0101] οι οποίες επαναλαμβάνονται συνεχώς με τη σειρά A[1]-A[2]-A[3]-A[4]-A[1]-A[2]-A[3]-A[4]-A[1] κ.ο.κ για όση διάρκεια επιθυμείται η κίνηση του βηματικού. Εάν επιθυμείται η κίνηση κάποιου από τους δυο βηματικούς συο βηματικού τους δυο βηματικού τους δυο βηματικού τους δυο βηματικού.

6.2.5 Αισθητήριο hall

Για τη μέτρηση του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου χρησιμοποιήθηκε το αισθητήριο hall που φαίνεται στο σχήμα 128.



Σχήμα 128. Το αισθητήριο hall

Στην εκπόνηση της διπλωματικής το καλώδιο που φέρει το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού τυλίγεται με 23 σπείρες γύρω από τα αισθητήριο hall με αποτέλεσμα το αισθητήριο να βγάζει μια τάση η οποία μέσω ενός διαιρέτη τάσης διαμορφώνεται κατάλληλα και καταλήγει στην είσοδο του μετατροπέα του μικροελεγκτή. Αύξηση του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού αντιστοιχεί σε αύξηση της τάσης εξόδου του αισθητηρίου. Στη συγκεκριμένη εργασία μετράται αυτή η διαφορά τάσης. Αν αυτή είναι θετική τότε σημαίνει ότι το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού έχει αυξηθεί ενώ αν αυτή η διαφορά τάσης είναι αρνητική τότε σημαίνει ότι το ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού έχει μειωθεί. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της θεωρητικής θεμελίωσης του συστήματος αύξηση του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού σημαίνει αύξηση της ακτινοβολίας που δέχεται αυτό. Στην πλακέτα που κατασκευάστηκε και περιέχει το αισθητήριο hall εκτός από τη μέτρηση της τάσης εξόδου του αισθητηρίου γίνονται και οι παρακάτω λειτουργίες:

- Φόρτιση της μπαταρίας μέσω μιας διόδου ισχύος, D στο σχήμα 129.
- Κύκλωμα που ρυθμίζει τη τάση και ενώ δέχεται τάση εισόδου την τάση της μπαταρίας με τον ρυθμιστή LM317 παράγεται τάση εξόδου 8Volt η οποία χρησιμοποιείται στην τροφοδοσία του αισθητηρίου hall αλλά και στην τροφοδοσία των ολοκληρωμένων LM358 και ICL7667
- Κύκλωμα που φροντίζει να διακόπτεται η φόρτιση της μπαταρίας όταν η τάση στα άκρα της ξεπερνά τα 14 Volt. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση του

συγκριτή LM358 ο οποίος όταν ξεπεραστεί η τάση των 14 Volt στα άκρα της μπαταρίας μέσω του ICL7667 ανοίγει το Mosfet IRF244 και έτσι διακόπτεται η φόρτιση

Αναλυτικά οι λειτουργίες της πλακέτας φαίνονται στο διάγραμμα 129, ενώ η πλακέτα στο σχήμα 130.



Σχήμα 129. Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας αιδθητηρίου hall

Vcc

LM358

Αισθητήριο Hall _{Vcc}







Σχήμα 130. Η πλακέτα του αισθητηρίου hall

6.2.6 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι ο ATmega8535. Η επιλογή του έγινε διότι διαθέτει on-chip μετατροπέα που είναι η βασική λειτουργία που χρειάζεται στο σύστημα αλλά και διότι είναι συμβατός με το αναπτυξιακό σύστημα STK500 που ήταν διαθέσιμο και χρησιμοποιήθηκε. Το STK500 που χρησιμοποιήθηκε και για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή μέσω σειριακής από τον υπολογιστή παρουσιάζεται στο σχήμα 131.



Σχήμα 131. Το αναπτυξιακό σύστημα STK500.

6.2.7 Συσσωρευτής

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι 12Volt και έχει χωρητικότητα 3,4AH. Η μπαταρία αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 132, φορτίζεται από το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού ενώ ταυτόχρονα τροφοδοτεί με το κατάλληλο ρεύμα τους βηματικούς κινητήρες αλλά και το STK500.



Σχήμα 132. Ο συσσωρευτής

6.3 Το λογισμικό που αναπτύχθηκε

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του κώδικα και για την φόρτωσή του στον μικροελεγκτή είναι δυο. Για την υλοποίηση του κώδικα ο οποίος γράφτηκε σε C χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα "Image Craft ICCV7 for AVR" το οποίο εσωτερικά μετατρέπει τον κώδικα C σε assembly και παράγει το αντίστοιχο hex αρχείο. Στη συνέχεια μέσω του προγράμματος AVRSTUDIO4.11 το οποίο είναι συμβατό με το STK500 χρησιμοποιείται αυτό το hex αρχείο για να προγραμματιστεί ο μικροελεγκτής. Στο σχήμα 133 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής (flow chart) του αλγόριθμου κίνησης του συστήματος.




Το σύστημα με βάση μελέτη που αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο αναζητά τη θέση του ήλιου κάθε 6,5 λεπτά. Αρχικά ενεργοποιείται ο άξονας ο άξονας ΧΧ' του συστήματος ο οποίος κινείται σύμφωνα με τη μεταβολή της γωνίας αζιμουθίου της κάθετης στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού β. Μέσω του αισθητηρίου Hall το οποίο με βάση το ρεύμα που δίνει στην έξοδο του το φωτοβολταϊκό δίνει κάποια τιμή τάσης, η τάση αυτή διαβάζεται από τον AVR και εν συνεχεία δίνεται εντολή κίνησης του άξονα προς μια φορά. Σημειώνεται ότι η τάση που δίνει το Hall στην έξοδό του αυξάνεται όσο αυξάνει το ρεύμα που δίνει στην έξοδο του το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Άρα αύξηση του ρεύματος που δίνει στην έξοδο του το φωτοβολταϊκό αντιστοιχεί σε αύξηση της τάσης που δίνει το Hall. Επίσης η τάση που μπορεί να διαβάσει στην είσοδό του ο AVR είναι από 0 έως 5Volt και προκειμένου να μετατραπεί η τάση που παράγει το Hall στην έξοδό του σε αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης τάσης. Στη συνέχεια του αλγορίθμου διαβάζεται εκ νέου η τάση στην είσοδο του AVR. Εάν αυτή η τιμή της τάσης είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη, δηλαδή το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού έχει μεγαλύτερη τιμή από την προηγούμενη τότε δίνεται στον άξονα εντολή κίνησης προς την ίδια φορά. Σε αντίθετη περίπτωση δίνεται στον άξονα εντολή κίνησης προς την αντίθετη φορά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να δοθεί εντολή κίνησης στον άξονα του συστήματος προς την αρχική φορά κίνησης. Σε αυτό το σημείο, στο οποίο ο άξονας ΧΧ' έχει πάρει τη βέλτιστη θέση που μεγιστοποιεί το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού άρα μεγιστοποιείται και η ακτινοβολία που δέχεται αυτό σε αυτό τον άξονα, ενεργοποιείται ο άξονας ΥΥ' ο οποίος μεταβάλλεται σύμφωνα με τη γωνία κλίσης β του φωτοβολταϊκού. Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία προκειμένου και ο άξονας ΥΥ' να πάρει τη βέλτιστη θέση που μεγιστοποιεί το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού. Όταν γίνει αυτό το σύστημα εισέρχεται σε αναμονή για 6,5 λεπτά. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται.

7. Πειραματικά αποτελέσματα

Για δυο πανομοιότυπες μέρες από πλευράς ηλιοφάνειας αλλά και τροχιάς του ήλιου έγινε μέτρηση του ρεύματος και της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού σε δυο συστήματα. Την πρώτη μέρα η οποία ήταν στις 30 Μαΐου 2005 μετρήθηκε το ρεύμα και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού χρησιμοποιώντας το σύστημα suntracking που κατασκευάστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Τη δεύτερη μέρα η οποία ήταν στις 31 Μαΐου 2005 μετρήθηκε το ρεύμα και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου το οποίο τοποθετείται σε σταθερή θέση με κλίση 35° προσανατολισμένο ως προς τον νότο. Η επιλογή αυτής της θέσης έγινε με βάση το ότι έχει αποδειχθεί πως η βέλτιστη θέση κατά τη διάρκεια όλου του έτους για τη συλλογή ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό είναι η τοποθέτηση TOU φωτοβολταϊκού προσανατολισμένο ως προς τον νότο και σε γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Το γεωγραφικό πλάτος στα Χανιά όπου έγινε και το πείραμα είναι περίπου 35°. Το πείραμα έγινε και τις δυο μέρες από τις 9:30 το πρωί μέχρι τις 6 το απόγευμα και η περίοδος δειγματοληψίας τάσης και ρεύματος είναι κάθε 3 με 4 λεπτά (μια μέτρηση γίνεται αμέσως μετά το tracking και μια ενδιάμεσα σε δυο tracking). Στο σχήμα 134 παρουσιάζεται το σύστημα suntracking ολοκληρωμένο.



Σχήμα 134. Το σύστημα sun-tracking ολοκληρωμένο.

7.1 Πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το σύστημα sun-tracking

Στις 30 Μαΐου μετρήθηκέ από τις 9:30 το πρωί ως τις 6 το απόγευμα το ρεύμα και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου του συστήματος sun-tracking που κατασκευάστηκε. Οι μετρήσεις περάστηκαν στο πρόγραμμα excel και οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος αλλά και της τάσης ως προς το χρόνο που προέκυψαν παρουσιάζονται στα σχήματα 135-136.



Σχήμα 135. Διάγραμμα ρεύματος εξόδου του φ/β με το σύστημα Sun-tracking συστήματος ως προς τον χρόνο για τις 30 Μαΐου 2005.



Σχήμα 136. Διάγραμμα τάσης εξόδου του φ/β με το σύστημα Sun-tracking συστήματος ως προς τον χρόνο για τις 30 Μαΐου 2005. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα ρεύματος-χρόνου η τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη νωρίς το πρωί και το απόγευμα ενώ το ρεύμα παίρνει μεγαλύτερες τιμές το μεσημέρι. Συγκεκριμένα στις 9:30-10 το πρωί το ρεύμα παίρνει τιμές γύρω στα 0,55Α ενώ στη συνέχεια η τιμή του ρεύματος αρχίζει και αυξάνεται σταδιακά παίρνοντας μέγιστες τιμές γύρω στα 0,62Α στις 1 περίπου το μεσημέρι. Στη συνέχεια η τιμή του ρεύματος διατηρείται γύρω στα 0,6Α μέχρι τις 4 περίπου το μεσημέρι ενώ στη συνέχεια αρχίζει να πέφτει σταδιακά φτάνοντας τα 0,5Α στις 6. Ο μέσος όρος των τιμών του ρεύματος για τις μετρήσεις όλης της μέρας είναι 0,58Α. Γενικά οι τιμές του ρεύματος είναι αρκετά υψηλές καθ'όλη τη διάρκεια των μετρήσεων αν ληφθεί υπόψη ότι το μέγιστο ρεύμα εξόδου που μπορεί να παράγει το φωτοβολταϊκό σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του είναι 0,68Α.

Στο διάγραμμα τάσης-χρόνου η τιμή της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού αυξάνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια όλης της μέρας από τα περίπου 13V έως περίπου 13,7V. Η μικρή σχετικά αυτή αύξηση οφείλεται στο φορτίο που έχει το σύστημα αφού ένα μέρος της ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό καταναλώνεται από τους βηματικούς κινητήρες και από τον μικροελεγκτή. Ο μέσος όρος των τιμών της τάσης για τις μετρήσεις όλης της μέρας είναι 13,3V.

Ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται και στα δυο παραπάνω διαγράμματα (ρεύματος-χρόνου, τάσης-χρόνου) είναι οι μικρές αυξομειώσεις που παρουσιάζουν αυτά τα διαγράμματα. Οπτικά αυτό φαίνεται σαν μικρές κυματώσεις σε όλο την επιφάνεια των δυο διαγραμμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι σε κάθε μέτρηση που γίνεται αμέσως μετά από tracking η τιμή του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού παρουσιάζει μικρή αύξηση σε σχέση με τη προηγούμενη τιμή της ενώ η αντίστοιχη σε αυτή τη μέτρηση τιμή της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού παρουσιάζει μικρή μείωση σε σχέση με τη προηγούμενη τιμή της. Επίσης παρατηρείται ότι σε κάθε μέτρηση που γίνεται ενδιάμεσα από 2 tracking η τιμή του ρεύματος παρουσιάζει μικρή μείωση σε σχέση με τη προηγούμενη τιμή της ενώ η αντίστοιχη σε αυτή τη μέτρηση τιμή της τάσης παρουσιάζει μικρή αύξηση σε σχέση με τη προηγούμενη τιμή της. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού βρίσκεται στο ότι όταν δουλεύουν οι βηματικοί κινητήρες (κατά τη διάρκεια που το σύστημα κάνει tracking) καταναλώνουν ενέργεια οπότε η μπαταρία εκφορτίζεται λίγο με αποτέλεσμα να μειωθεί η τάση της, άρα να μειωθεί και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού. Αποτέλεσμα αυτής της μείωσης της τάσης είναι η αύξηση του ρεύματος σύμφωνα με την χαρακτηριστική Ι-V του φωτοβολταϊκού. Αντίθετα

148

ανάμεσα σε δυο tracking οι βηματικοί κινητήρες δεν καταναλώνουν ενέργεια οπότε η μπαταρία φορτίζεται με αποτέλεσμα να αυξηθεί η τάση της, άρα να αυξηθεί και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού. Αποτέλεσμα αυτής της αύξησης της τάσης είναι η μείωση του ρεύματος σύμφωνα με την χαρακτηριστική Ι-V του φωτοβολταϊκού. Αυτές οι αυξομειώσεις στις τιμές του ρεύματος και της τάσης έχουν ως αποτέλεσμα τις κυματώσεις που παρατηρούνται στα διαγράμματα τάσης-χρόνου, ρεύματος-χρόνου.

Τέλος σε κάθε μέτρηση μπορεί να υπολογιστεί η ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού από τη σχέση *P* = *V* × *I* με αποτέλεσμα να προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα ισχύς-χρόνου του σχήματος 137.



Σχήμα 137. Διάγραμμα ισχύς εξόδου φ/β Sun-tracking συστήματος ως προς τον χρόνο για τις 30 Μαΐου 2005.

Παρατηρείται ότι η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού παίρνει το πρωί τιμές γύρω στα 7,5Watt. Στη συνέχεια ανεβαίνει σταδιακά και γύρω στις 11:30 φτάνει τα 8Watt. Γύρω στις 1 το μεσημέρι φτάνει τις μέγιστες τιμές που αγγίζουν τα 8,2Watt και μέχρι τις 4 το μεσημέρι παραμένει σε υψηλά επίπεδα (γύρω στα 8Watt). Από τις 4 και μετά η ισχύς αρχίζει να μειώνεται σταδιακά φτάνοντας τα 7Watt στο τέλος των μετρήσεων. Γενικά η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια με αυτή του διαγράμματος ρεύματος-χρόνου αφού τις ώρες που παρουσιάζονται υψηλές τιμές ρεύματος εμφανίζονται και υψηλές τιμές ισχύος. Επίσης οι κυματώσεις που εμφανίζονται και σε αυτό το διάγραμμα οφείλονται στις κυματώσεις που εμφανίζονται και στα άλλα δυο διαγράμματα τάσης-χρόνου και ρεύματος χρόνου.

7.2 Αποτελέσματα συστήματος σταθερής κλίσης

Στις 31 Μαΐου μετρήθηκέ από τις 9:30 το πρωί ως τις 6 το απόγευμα το ρεύμα και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού σε σύστημα σταθερής θέσης με κλίση 35° προσανατολισμένο ως προς τον νότο. Οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος αλλά και της τάσης ως προς το χρόνο παρουσιάζονται στα σχήματα 138-139.









Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα ρεύματος-χρόνου η τιμή του ρεύματος είναι αρκετά μικρή νωρίς το πρωί και το απόγευμα ενώ το ρεύμα παίρνει μεγαλύτερες τιμές το μεσημέρι. Συγκεκριμένα στις 9:30 το πρωί το ρεύμα παίρνει τιμές γύρω στα 0,2Α ενώ στη συνέχεια η τιμή του ρεύματος αρχίζει και αυξάνεται σταδιακά παίρνοντας μέγιστες τιμές γύρω στα 0,6Α στις 1:45 περίπου το μεσημέρι. Στη συνέχεια η τιμή του ρεύματος αρχίζει να πέφτει σταδιακά φτάνοντας τα 0,15Α στις 6. Ο μέσος όρος των τιμών του ρεύματος για τις μετρήσεις όλης της μέρας είναι 0,42Α. Γενικά οι τιμές του ρεύματος είναι αρκετά χαμηλές αν ληφθούν υπόψη οι αντίστοιχες του συστήματος sun-tracking που εξετάστηκε προηγουμένως. Ένα άλλο φαινόμενο αρκετά ενδιαφέρον που παρουσιάζεται στο διάγραμμα ρεύματοςχρόνου είναι οι μικρές αυξομειώσεις που παρουσιάζει το διάγραμμα. Οπτικά αυτό φαίνεται σαν κυματώσεις σε ορισμένα σημεία του διαγράμματος. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού βρίσκεται στο γεγονός του ότι το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στο σταθερό σύστημα καταλήγει μόνο στη μπαταρία φορτίζοντάς τη συνεχώς αφού στο σύστημα δεν υπάρχει φορτίο που να τραβάει ρεύμα. Για αυτό το λόγο η μπαταρία φορτιζόταν σχετικά σύντομα με αποτέλεσμα να κριθεί απαραίτητη ορισμένες φορές και όταν η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού έπαιρνε υψηλές τιμές (γύρω στα 14,5V) η τοποθέτηση φορτίου. Το φορτίο αυτό ήταν μια αντίσταση 10Ω που τοποθετούνταν παράλληλα στους πόλους της μπαταρίας. Με την τοποθέτηση της αντίστασης αυτής και για όση ώρα παρέμενε πάνω στη μπαταρία η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού μειωνόταν συνεχώς ενώ το ρεύμα έπαιρνε λίγο μεγαλύτερες τιμές από όταν στο σύστημα δεν υπήρχε φορτίο. Στη συνέχεια όταν η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού, και ενώ ήταν τοποθετημένο το φορτίο παράλληλα στην μπαταρία, έπαιρνε τιμές κάτω από 12V το φορτίο αφαιρούταν από την μπαταρία με αποτέλεσμα μικρή πτώση του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού και αύξηση της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτό άλλωστε εξηγείται από τη χαρακτηριστική Ι-V του φωτοβολταϊκού. Αυτές οι αυξομειώσεις του ρεύματος και της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού όταν τοποθετείται ή αφαιρείται το φορτίο φαίνονται στα διαγράμματα τάσης-χρόνου και ρεύματος-χρόνου σαν κυματώσεις. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα τάσης-χρόνου, η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού παίρνει τιμές από 12 έως 14,5V αφού όταν έφτανε τα 14,5V τοποθετούνταν φορτίο στο σύστημα που προκαλούσε πτώση της τάσης στα 12V περίπου. Στη συνέχεια όταν το φορτίο αφαιρούταν, η τάση

σταδιακά ξανανέβαινε στα 14,5V και η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν καθ'όλη την διάρκεια της ημέρας.

Τέλος σε κάθε μέτρηση μπορεί να υπολογιστεί η ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού $(P = V \times I)$ με αποτέλεσμα να προκύπτει το διάγραμμα ισχύος-χρόνου του σχήματος 140.



Σχήμα 140. Διάγραμμα ισχύς εξόδου φ/β σε σύστημα σταθερής θέσης με κλίση 35° ως προς τον νότο σε σχέση με το χρόνο για τις 31 Μαΐου 2005.

Παρατηρείται ότι η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού παίρνει το πρωί τιμές γύρω στα 2,7W. Στη συνέχεια ανεβαίνει σταδιακά και γύρω στις 13:45 φτάνει τα 7,5W. Από εκεί και μετά η ισχύς αρχίζει να πέφτει σταδιακά φτάνοντας τα 2,2W στο τέλος των μετρήσεων. Γενικά η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια με αυτή του διαγράμματος ρεύματος-χρόνου αφού τις ώρες που παρουσιάζονται υψηλές τιμές ρεύματος εμφανίζονται και υψηλές τιμές ισχύος. Επίσης οι κυματώσεις που εμφανίζονται και στα άλλα δυο διαγράμματα τάσης-χρόνου και ρεύματος-χρόνου.

Κάτι που επίσης αξίζει να σημειωθεί είναι ότι και στο διάγραμμα ισχύος-χρόνου αλλά και στο διάγραμμα ρεύματος-χρόνου στις ώρες περίπου 15:00 με 16:00 παρουσιάζεται μια σημαντική πτώση των τιμών και του ρεύματος και της ισχύος σε σχέση με τις τιμές που αναμένονταν. Αυτό οφείλεται στο ότι την συγκεκριμένη ώρα εμφανίστηκε ένα σύννεφο που είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της ακτινοβολίας που δεχόταν το φωτοβολταϊκό άρα και την μείωση της τιμής του ρεύματος εξόδου αλλά και της ισχύος του.

7.3 Σύγκριση των μετρήσεων

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα ισχύος-χρόνου στα υποκεφάλαια 7.1 και 7.2 η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού που παράγεται από το σύστημα sun-tracking είναι συνολικά εμφανώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που παράγεται από το σύστημα σταθερής θέσης με κλίση 35° ως προς τον νότο. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 141 που παρουσιάζει το ποσοστό % της διαφοράς ισχύος στα δύο συστήματα, ΔΡ, προς την ισχύ του σταθερού συστήματος Ρ_{στ} σε κάθε μέτρηση για όλη την διάρκεια της ημέρας.

$$\frac{\Delta P}{P_{\sigma\tau}}\% = \frac{P_{tr} - P_{\sigma\tau}}{P_{\sigma\tau}} \times 100$$
 (51)

όπου Ptr η ισχύς που παράγει το σύστημα sun-tracking και



Ρ_{στ} η ισχύς που παράγει το σύστημα σταθερής κλίσης.

Σχήμα 141. Διαφοράς ισχύος στα δύο συστήματα.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα η διαφορά ισχύος στα δύο συστήματα είναι πολύ μεγάλη το πρωί και το απόγευμα ενώ είναι σχετικά μικρή κατά την διάρκεια του μεσημεριού (από τις 12:00 μέχρι τις 15:00).

Στην συνέχεια θα συγκριθεί η ενέργεια που παράγουν τα δύο συστήματα. Ο υπολογισμός της ενέργειας που συλλέγει το κάθε σύστημα έγινε με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{152} (\mathbf{P}_i \times \Delta t)$$
 (52)

Με βάση αυτό τον τύπο θεωρείται δηλαδή ότι η ενέργεια ανάμεσα σε δύο μετρήσεις παραμένει σταθερή. Επειδή το Δt κυμαινόταν μεταξύ 3 και 4 λεπτών για απλούστευση της παραπάνω σχέσης υπολογίστηκε ο μέσος όρος του και έτσι θα θεωρηθεί Δt=3,2 λεπτά. Με αυτό τον τρόπο η παραπάνω σχέση μετατρέπεται στην επόμενη:

$$E = 3, 2 \times \sum_{i=1}^{152} (P_i)$$
 (53)

Για το sun-tracking σύστημα η ενέργεια αυτή υπολογίστηκε σε 63,40Wh. Για το σύστημα σταθερής κλίσης 35° ως προς τον νότο η ενέργεια αυτή υπολογίστηκε στις 45,79Wh. Άρα το κέρδος του sun-tracking συστήματος σε σχέση με το σταθερό σύστημα είναι $\frac{63,40}{45,79}$ = 1,384 που σημαίνει ότι το σύστημα sun-tracking παρουσιάζει κέρδος ενέργειας 38,4% σε σχέση με το σύστημα σταθερής κλίσης 35° ως προς τον νότο.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι οι μετρήσεις δεν έγιναν κάτω από ακριβώς τις ίδιες συνθήκες αλλά κάτω από παρόμοιες αφού έγιναν σε δυο διαφορετικές μέρες. Βέβαια οι μέρες αυτές ήταν συνεχόμενες και υπήρχε και στις 2 ηλιοφάνεια γεγονός που κάνει το πείραμα αρκετά επιτυχημένο. Η μόνη διαφορά παρουσιάστηκε τη δεύτερη μέρα μεταξύ 15:00-16:00 όπου εμφανίστηκε ένα μικρό σύννεφο που μείωσε την ακτινοβολία του ήλιου που προσέπιπτε στο φωτοβολταϊκό. Μελετώντας τη καμπύλη ισχύος-χρόνου στο σύστημα σταθερής θέσης φαίνεται πως αν δεν υπήρχε το σύννεφο η πτώση της ισχύς μεταξύ 15:00-16:00 θα ήταν σαφώς μικρότερη και πιο ομαλή. Με ένα πρόχειρο υπολογισμό η ισχύς κατά μέσο όρο είναι περίπου 1,5Watt περισσότερη για όλη τη διάρκεια αυτής της μίας ώρας. Δηλαδή αν δεν υπήρχε το σύννεφο προσεγγιστικά το σταθερό σύστημα θα παρήγαγε συνολικά 1,5Wh περισσότερη. Δηλαδή η ενέργειά του θα ήταν Ε=45,79+1,5=47,29. Ακόμα και έτσι το σύστημα sun-tracking παρουσιάζει αρκετά μεγάλο κέρδος ενέργειας σε σχέση με το σταθερό σύστημα που είναι

κέρδος ενέργειας 34% σε σχέση με το σύστημα σταθερής κλίσης 35° ως προς τον νότο.

7.3.1 Απώλεια ενέργειας στο σύστημα sun-tracking

Η λειτουργία του sun-tracking συστήματος έχει κάποιο κόστος ενέργειας που οφείλεται στην ενέργεια που καταναλώνεται για να κινηθούν οι βηματικοί κινητήρες αλλά και στην ενέργεια που καταναλώνεται για να τροφοδοτηθεί ο μικροελεγκτής. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί προσεγγιστικά το ενεργειακό αυτό κόστος. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων 9:30 με 18:00 το σύστημα έκανε 76 φορές tracking. Με την υπόθεση ότι κάθε βηματικός κινητήρας λειτουργεί για 5 δευτερόλεπτα σε κάθε tracking τότε κάθε κινητήρας σε όλο το πείραμα λειτουργεί για 5*76=360 δευτερόλεπτα=0,1 ώρες. Επίσης είναι γνωστό ότι η τάση λειτουργίας τους είναι 12 Volt και ότι ο 23HSX-102 καταναλώνει 1,2Α και ότι ο 23HSX306 καταναλώνει 4,8Α. Άρα η ενέργεια που καταναλώνει ο 23HSX-102 είναι:

$$E = V \times I \times t = 12 \times 1, 2 \times 0, 1 = 1, 44Wh$$

Η ενέργεια που καταναλώνει ο 23HSX-306 είναι:

$$E = V \times I \times t = 12 \times 4, 8 \times 0, 1 = 5, 76Wh$$

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνουν οι κινητήρες είναι 5,76+1,44=7,2Wh

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του ATmega8535 το ρεύμα λειτουργίας του μικροελεγκτή αυτού είναι 30mA. Επίσης ο ATmega8535 διαθέτει power down λειτουργία που σημαίνει ότι μπορεί να μην λειτουργεί ενδιάμεσα σε δυο tracking και άρα να μην καταναλώνει ενέργεια. Άρα και ο μικροελεγτής θα λειτουργεί για όση διάρκεια κάνουν tracking οι δυο κινητήρες, δηλαδή για 0,1+0,1=0,2ώρες. Έτσι η συνολική ενέργεια που καταναλώνει ο μικροελεγκτής κατά τη διάρκεια της μέρας είναι:

$$E = V \times I \times t = 12 \times 0,03 \times 0,2 = 0,072Wh$$

Συνολικά το κόστος ενέργειας που οφείλεται στην ενέργεια που καταναλώνεται για να κινηθούν οι βηματικοί κινητήρες αλλά και στην ενέργεια που καταναλώνεται για να τροφοδοτηθεί ο μικροελεγκτής είναι 7,2+0,072=7,272Wh Το καθαρό ποσό ενέργειας δηλαδή που κερδίζεται από το sun-tracking είναι 63,4-7,272=56,128Wh με αποτέλεσμα το κέρδος ενέργειας σε σχέση με το σταθερό σύστημα να είναι $\frac{56,128}{45,79}$ =1,22. Άρα σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα suntracking παρουσιάζει κέρδος ενέργειας 22% σε σχέση με το σύστημα σταθερής κλίσης 35° ως προς τον νότο. Το ποσοστό αυτό παραμένει αρκετά υψηλό αν ληφθεί υπόψη πως υπάρχουν τρόποι να μειωθεί και άλλο η κατανάλωση των κινητήρων όπως για παράδειγμα η μείωση της διάρκειας των παλμών που δέχονται που θα έχει σαν αποτέλεσμα και την μείωση της διάρκειας λειτουργίας τους. Ένας άλλος τρόπος να μειωθεί και άλλο η κατανάλωση των κινητήρων είναι να γίνει και πάλι μονοπολική οδήγηση μονού βήματος αλλά ενεργοποιώντας κάθε φορά με τους κατάλληλους παλμούς το μισό από τα δύο τυλίγματα (δηλαδή τη 1 από τις 4 περιελίξεις και όχι τις 2 από τις 4 όπως γίνεται τώρα).

8. Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία έγινε η θεωρητική μελέτη αλλά και η κατασκευή ενός πλήρους συστήματος sun-tracking 2 αξόνων. Ο αλγόριθμος κίνησης του συστήματος αυτού έχει ως βάση τη μεταβολή της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο καθώς ο ήλιος αλλάζει θέση. Όπως αποδείχθηκε κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής η συνάρτηση της ακτινοβολίας σε σχέση με τις γωνίες β και α, βάση των οποίων κινούνται οι 2 άξονες, έχει μορφή καμπύλης που δεν παρουσιάζει τοπικά μέγιστα αλλά ένα μόνο ολικό μέγιστο. Έτσι κάθε χρονική στιγμή υπάρχει μόνο ένα σημείο που μεγιστοποιεί την ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και αυτό το σημείο προσεγγίζει ο αλγόριθμος κίνησης που χρησιμοποιήθηκε. Ο αλγόριθμος ενεργοποιείται κάθε 6,5 λεπτά που αποδείχθηκε πως είναι ο απαραίτητος χρόνος προκείμένου κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου να υπάρχει μέγιστη συλλογή ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό. Το σύστημα βρίσκει αρχικά τη θέση που μεγιστοποιεί την ακτινοβολία, άρα και το ρεύμα στον άξονα ΧΧ' και έπειτα βρίσκει τη θέση που μεγιστοποιεί την ακτινοβολία, άρα και το ρεύμα στον άξονα ΥΥ'. Το σύστημα αυτό λειτούργησε στις 30 Μαΐου από τις 9:30 ως τις 18:00 και συγκριτικά με το σύστημα σταθερής θέσης με κλίση 35° προσανατολισμένο ως προς νότο που λειτούργησε στις 31 Μαΐου για την ίδια ώρα παρουσίασε κέρδος ενέργειας εξόδου του φωτοβολταϊκού 38,4%. Το ποσοστό αυτό κέρδους ενέργειας είναι αρκετά σημαντικό και σημαίνει ότι σε μεγάλες εφαρμογές για απόδοση ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας στο sun-tracking σύστημα θα χρειαστούν 38,4% λιγότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σχέση με αυτά που θα χρειαστούν για τη απόδοση της ίδιας ενέργειας σε σύστημα σταθερής θέσης με κλίση 35° προσανατολισμένο ως προς νότο.

Η διαφορά του συστήματος αυτού σε σχέση με τα περισσότερα που έχουν υλοποιηθεί βρίσκεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος κίνησης του γίνεται με βάση τη μεταβολή της ακτινοβολίας που δέχεται. Τα περισσότερα συστήματα αποθηκεύουν τη θέση του ήλιου κατά την διάρκεια όλου του χρόνου και απλά κινούν το φωτοβολταϊκό ανάλογα με την θέση αυτή έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα στο φωτοβολταϊκό. Η μέγιστη ακτινοβολία όμως δεν αντιστοιχεί πάντα στη προγραμματισμένη θέση διότι κάποιες φορές λόγω ιδιαίτερων καιρικών συνθηκών, όπως είναι η συννεφιά, η μέγιστη ακτινοβολία μπορεί να βρίσκεται σε κάποια άλλη θέση στον ορίζοντα. Για παράδειγμα μπορεί

να υπάρχει ένα σύννεφο ανάμεσα στη προγραμματισμένη βέλτιστη θέση του φωτοβολταϊκού και στον ήλιο. Σε αυτή τη περίπτωση μπορεί η μέγιστη ακτινοβολία που μπορεί να δεχτεί το φωτοβολταϊκό τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή να αντιστοιχεί σε κάποια διαφορετική θέση από την προγραμματισμένη. Το σύστημα sun-tracking που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία σε αντίθεση με άλλα συστήματα έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει πάντα τη βέλτιστη θέση, όπου μεγιστοποιείται η ακτινοβολία, ακόμα και κάτω από αυτές τις ιδιαίτερες καιρικές συνθήκες αφού το σύστημα κινείται με βάση τη μεταβολή της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό και δεν έχει αποθηκευμένες προκαθορισμένες θέσεις του ήλιου όπως συμβαίνει σε άλλα συστήματα. Σε αυτή τη περίπτωση η διαχέουσα και η ανακλώμενη ακτινοβολία είναι αρκετά σημαντικές και επισκιάζουν την άμεση ακτινοβολία που λόγω των ιδιαίτερων καιρικών συνθηκών εκείνη τη χρονική στιγμή έχει μικρότερη τιμή. Έτσι σε συνθήκες συννεφιάς το σύστημα sun-tracking που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα έχει μεγάλη διάφορα στο κέρδος ενέργειας σε σχέση με άλλα συστήματα sun-tracking. Επίσης συμβολή θεωρείται ότι το σύστημα sun-tracking που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, δεν απαιτεί πρόσθετα αισθητήρια όπως για παράδειγμα φωτοαντιστάσεις. Το αισθητήριο ρεύματος υπάρχει ήδη σε όλους τους φορτιστές συσσωρευτών ή σε μετατροπείς DC/DC που κάνουν maximum power tracking. Τέλος το σύστημα sun-tracking της εργασίας αυτής μπορεί να επεκταθεί χωρίς να χρειαστούν σημαντικές ηλεκτρονικές αλλαγές σε σύστημα maximum power tracking όπου εκτός από το να βρίσκει τη βέλτιστη χαρακτηριστική I-V όπως κάνει τώρα θα βρίσκει και το βέλτιστο σημείο λειτουργίας πάνω σε αυτή τη χαρακτηριστική.

9. Βιβλιογραφία

9.1 Δημοσιευμένα Papers

[1] **Salah Abdallah.** The effect of using sun-tracking systems on the voltage current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. Energy Conversion and Management 45(2004) 1671-1679

[2] **Ali Al-Mohamad**. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a suntracking system. Applied energy 2004.

[3] **Salah Abdallah**, **Salem Nijmeh**. Two axes sun-tracking system with PLC control. Energy Conversion and Management 45(2004) 1931-1939

[4] **Soteres Kalogirou.** Design and construction of one axis sun-tracking system. Solar Energy 57(1996) 465-469.

[5] **P.Roth**, **A.Georgiev**. Design and construction of a system for sun tracking. Renewable Energy 29(2004) 393-402.

[6] **Abdul-Jabar N.Khalifa, Salman S. Al-Mutawalli**. Effect of the two axis suntracking on the performance of compound parabolic concentrators. Energy Convers, 39(1998) 1073-1079

[7] **Murat Kacira,Mehmet Simsek,Yunus Babur,Sedat Demirkol**. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliourfa,Turkey.Renewable Energy.29(2004) 1265-1275

[8] **Bin Ai, Hui Shen**, **Qun Ban**, **Binghou Ji,Xianbo Liao**. Calculation of hourly and daily radiation incident on three step tracking planes. Energy Conversion and Management. 44(2003) 1999-2011

9.2 Βιβλία

[9] Solar electricity. Engineering of photovoltaic Systems. **E.Lorenzo.**1994 Progensa.

[10] Instrumentation and control: fundamentals and applications. **Chester L.Nachtigal**, Wiley 1990.

[11] Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία. Κ.Καγκαράκης. Εκδόσεις συμμετρία 1992.

9.3 Τεχνικά κείμενα

[12] Types of Stepper Motors. Colin D.Simpson. Application note

[13] Stepping motors fundamentals.Dr Douglas-W.Jones. Application note

[14] **5 phase step motor and driver**. QuinTep. Application note

[15] **High performance size 23 hybrid stepper motors HSX series**. McLennan servo supplies. Application note