#### ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SUN-TRACKING ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΑΝΑΔΙΑΤΑΣΣΟΜΕΝΗ ΛΟΓΙΚΗ

ΦΑΝΙΟΥΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ ΕΥΤΥΧΙΟΣ, Επικ. Καθηγητής (Επιβλέπων) ΔΟΛΛΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ, Καθηγητής ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΑΤΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ, Καθηγητής

**XANIA 2013** 

## Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επικ. Καθηγητή, κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για τη βοήθεια που μου πρόσφερε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους Καθηγητές κ. Δόλλα Απόστολο και κ. Πνευματικάτο Διονύσιο για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν για τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ, οφείλω στους γονείς μου και στο περιβάλλον μου για τη συνεχή υποστήριξη τους.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός συστήματος sun-tracking, το οποίο εκμεταλλεύεται την ισχύ εξόδου του συστήματος για τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β (ΦωτοΒολταϊκού) στοιχείου. Παράλληλα με το σύστημα sun-tracking, αναπτύσσεται και ένα σύστημα για την εύρεση του σημείου παραγωγής μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Για την υλοποίηση του MPPT απαιτούνται 2 αισθητήρες, ένας για τη μέτρηση του ρεύματος και ένας για τη μέτρηση της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι το σύστημα sun-tracking που αναπτύχθηκε εκμεταλλεύεται τους ήδη εγκατεστημένους αισθητήρες της διάταξης επεξεργασίας ισχύος, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης του συστήματος. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του υλοποιηθέντος συστήματος είναι ότι η ανάπτυξη του έγινε σε FPGA που προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα εν συγκρίσει με τους μικροελεγκτές. Πιο συγκεκριμένα, η FPGA προσφέρει δυνατότητες rapid prototyping και μπορεί να υποστηρίξει υψηλές συχνότητες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη μείωση του κόστους κατασκευής ενός μετατροπέα DC/DC. Για την κίνηση του φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιούνται δύο βηματικοί κινητήρες.

Συνολικά, πρόκειται για ένα ευέλικτο σύστημα καθώς δεν απαιτούνται αλλαγές τόσο στο hardware όσο και στο software του συστήματος καθόλη τη διάρκεια του έτους. Επίσης, ο υλοποιημένος αλγόριθμος κίνησης μπορεί να εφαρμοστεί με μηδαμινές αλλαγές σε οποιοδήποτε Φ/Β σύστημα.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά πειράματα, τρία με συστήματα sun-tracking με εναλλακτικούς τύπους ελέγχου της κίνησης του Φ/Β στοιχείου και ένα κατά το οποίο το Φ/Β στοιχείο ήταν σταθερής κλίσης. Από τις συγκριτικές μετρήσεις που ελήφθησαν και παρουσιάζονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία προκύπτει μία σημαντική αύξηση της ενέργειας που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και 49%, συνυπολογισμένης και της ενέργειας που καταναλίσκεται από το σύστημα.

## Περιεχόμενα

	Πρόλογος		ii	
	Περίληψη			
	Περιεχόμενα	χ	vi	
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ		1	
	<ol> <li>1.1 Γενικά</li> </ol>		1	
	<ol> <li>Σκοπός</li> </ol>	της διπλωματικής εργασίας	1	
	1.3 Περιγρα	φή της εργασίας	4	
2.	МЕЛЕТН Н	ΙΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	5	
	2.1 Εισαγωγ	ή	5	
2.2 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας			5	
	2.3 Συνιστώ	σες ηλιακής ακτινοβολίας	7	
	2.4 Ηλιακή γεωμετρία			
	2.5 Θέση το	υ Ήλιου ως προς τη Γη	10	
	2.6 Υπολογι	σμός της ηλιακής ακτινοβολίας	14	
	2.6.1	Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα	14	
	2.6.2	Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης	15	
	2.6.3	Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	15	
	2.6.4	Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο	16	
	2.7 Ηλιακή	ακτινοβολία και sun-tracking	19	
3.	ΑΝΑΣΚΟΠ	ΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ SUN-TRACKING ΚΑΙ ΜΡΡΤ	21	
	3.1 Φ/Β τεχ	νολογία	21	
	3.1.1	Φ/Β φαινόμενο	21	
	3.1.2	Φ/Β στοιχείο	22	
	3.1.3	Είδη Φ/Β στοιχείων	22	
	3.1.4	Φ/Β δομές	22	
	3.2 Τεχνικές	; sun-tracking	23	
	3.2.1	Συστήματα sun-tracking ανοιχτού βρόχου	24	
	3.2.2	Συστήματα sun-tracking κλειστού βρόχου	25	
	3.3 Техике́с МРРТ)	; εύρεσης σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point Trad	cking, 33	
4.	ΑΝΑΛΥΣΗ	ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	39	
	4.1 Το σύστημα sun-tracking που αναπτύχθηκε			
	4.2 Βηματικοί κινητήρες			
	4.3 DC/DC	.3 DC/DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης		

	4.4 To FPG	48			
	4.5 Τροφοδ	53			
	4.6 Ανάλυσ	η των αλγορίθμων	54		
	4.5.1	Αλγόριθμος Sun-tracking	57		
	4.5.2	Αλγόριθμοι ΜΡΡΤ	59		
	4.5.2.1	Ι Αλγόριθμος Ρ&Ο ο οποίος είναι ενεργοποιημένος κατά τη διάρκε	του Sun-		
	trackin	ng 59			
	4.5.2.2	2 Αλγόριθμος Ρ&Ο ο οποίος είναι απενεργοποιημένος κατά τη δ	ιάρκεια του		
	Sun-tr	acking	60		
4.5.2.3 Αλγόριθμος Ρ&Ο μεταβλητού βήματος ο οποίος είναι ενεργοποιη			ημένος κατά		
τη διάρκεια του Sun-tracking			62		
	4.5.2.4	4 Αλγόριθμος Ρ&Ο μεταβλητού βήματος ο οποίος είναι απενεργ	<i>γ</i> οποιημένος		
	κατά ι	τη διάρκεια του Sun-tracking	63		
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ					
5.1 Εισαγωγή			65		
5.2 Πειράματα			67		
	5.2.1	Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος σταθερής κλίσης	67		
	5.2.2	Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος sun-tracking στον άξονα αν	ύψωσης70		
	5.2.3	Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος sun-tracking στον άξονα αζι	ιμούθιου.73		
	5.2.4	Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος sun-tracking δύο αξόνων	76		
	5.3 Κατανάλωση ισχύος				
	5.3.1	Σύστημα σταθερής κλίσης	79		
	5.3.2	Σύστημα sun-tracking ενός άξονα	79		
	5.3.3	Σύστημα sun-tracking δύο αξόνων	80		
	5.4 Σύγκριση πειραμάτων80				
6.	5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ				
	Βιβλιογραφία				

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Μη-ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα, από φυσικές διαδικασίες. Στις μη-ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνονται κυρίως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γνωστά και ως ορυκτά καύσιμα. Ο περιορισμός διαθεσιμότητας των μη-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την άνοδο των τιμών τους. Επιπλέον, η εκμετάλλευση τους είναι ζημιογόνα για το περιβάλλον. Αυτά τα μειονεκτήματα έχουν στρέψει την ανθρωπότητα προς την εκμετάλλευση των ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας). Ως ΑΠΕ χαρακτηρίζονται οι πηγές που υπάρχουν στο περιβάλλον και διαθέτουν συνεχώς ενέργεια. Μία από αυτές τις πηγές ενέργειας είναι και η ηλιακή η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των Φ/Β στοιχείων.

Η Φ/Β παραγωγή ενέργειας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η μηδενική επιβάρυνση του περιβάλλοντος και η συνεχής διαθεσιμότητα της. Η χρήση της Φ/Β τεχνολογίας παρουσιάζει τεράστια αύξηση τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμια κλίμακα και πολλές έρευνες πραγματοποιούνται για τη βελτίωση και την ανάπτυξη της.

## 1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από ένα Φ/Β στοιχείο. Για να γίνει κατανοητό το πρόβλημα αυτό, στα Σχήματα 1.1 και 1.2 παρατίθενται τα διαγράμματα ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης για ένα Φ/Β στοιχείο για διαφορετικές ακτινοβολίες και θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.1 Διαγράμματα ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας [1].



Σχήμα 1.2 Διαγράμματα ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας [1].

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα διαγράμματα, η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του και της θερμοκρασίας. Μεγαλύτερη ακτινοβολία συνεπάγεται περισσότερη παραγόμενη ισχύ, ενώ αντίθετα, υψηλότερη θερμοκρασία συνεπάγεται λιγότερη παραγόμενη ισχύ. Η επίδραση της ακτινοβολίας κυριαρχεί έναντι της θερμοκρασίας όσον αφορά την παραγωγή ισχύος, οπότε το σύνολο των ερευνών σε συστήματα sun-tracking αφορά τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή, δηλαδή για κάθε συγκεκριμένο σετ ακτινοβολίας-θερμοκρασίας αντιστοιχεί ένα μόνο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος.

Συμπερασματικά, υπάρχουν δύο τομείς αύξησης της παραγωγής ισχύος από ένα Φ/Β στοιχείο. Ένας είναι η λειτουργία του στοιχείου στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος και ο δεύτερος η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για το πρώτο απαιτείται ένα σύστημα εύρεσης του μέγιστου σημείου παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT), ενώ για το δεύτερο μία λύση μπορεί να δοθεί από ένα σύστημα sun-tracking. Στην παρούσα εργασία, μας απασχολούν και τα δύο συστήματα.

Οσον αφορά τα συστήματα sun-tracking, πρόκειται για συστήματα τα οποία μετακινούν το φωτοβολταϊκό στοιχείο έτσι ώστε να δέχεται τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία. Ανάλογα με το πλήθος των αξόνων κίνησης, χωρίζονται σε συστήματα ενός άξονα και δύο αξόνων. Τα μονοαξονικά είναι είτε αυτά που μετακινούν το φωτοβολταϊκό στοιχείο έτσι ώστε να μεταβάλλουν τη γωνία ανύψωσης του, είτε αυτά που μεταβάλλουν τη γωνία αζιμούθιου. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δοκιμάζονται και οι δύο τύποι συστημάτων sun-tracking και το σύστημα σταθερής κλίσης.

Επιπλέον, όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων sun-tracking, χωρίζονται σε συστήματα ανοιχτού και κλειστού βρόχου. Κλειστού βρόχου ονομάζονται γενικά εκείνα τα συστήματα που η δράση ελέγχου εξαρτάται από την έξοδο του ελεγχόμενου συστήματος. Στις περισσότερες έρευνες, ως έξοδος θεωρείται η τιμή εξόδου ενός ή πλήθους φωτοαισθητήρων. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου είναι κυρίως συστήματα τα οποία ακολουθούν την πορεία του Ήλιου βάσει γεωμετρικών υπολογισμών της κίνησης του Ήλιου, δεδομένης της γεωγραφικής περιοχής εγκατάστασης του συστήματος. Στην παρούσα εργασία υλοποιείται ένα σύστημα κλειστού βρόχου η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην ισχύ εξόδου του Φ/Β στοιχείου. Ουσιαστικά, χρησιμοποιεί δύο αισθητήρες για την ανάγνωση των τιμών ρεύματος και τάσης εξόδου του Φ/Β στοιχείου. Επιπλέον, οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται και από το σύστημα εύρεσης του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος. Με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία επιτυγχάνεται μικρότερο κόστος, μικρότερη πολυπλοκότητα, ευελιξία και ευκολότερη συντήρηση. Για την υλοποίηση του συστήματος εύρεσης του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος χρησιμοποιείται η μέθοδος "Διαταραχή και παρατήρηση" (Perturb and observe). Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει μία διαταραχή στη τάση λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Η διαταραχή αυτή επιτυγχάνεται με τη διαταραχή στη σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) ενός PWM (Pulse Width Modulation) σήματος το οποίο ελέγχει τον διακόπτη ενός μετατροπέα DC/DC, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην έξοδο του Φ/Β στοιχείου και στο φορτίο του συστήματος. Επιπλέον, στην παρούσα διπλωματική εργασία δοκιμάζεται μία εκδογή της ίδιας μεθόδου στην οποία η διαταραχή είναι μεταβλητή. Τόσο η ίδια η μέθοδος, όσο και η παραλλαγή της, δοκιμάζονται έτσι ώστε εναλλακτικά να απενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας sun-tracking. Συνεπώς, για κάθε διαφορετικό πείραμα sun-tracking δοκιμάζονται τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι του συστήματος εύρεσης του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος. Για να γίνουν πιο κατανοητά τα προηγούμενα, στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 1.3 Γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

## 1.3 Περιγραφή της εργασίας

Η δομή αυτής της εργασίας έχει ως εξής:

- Το κεφάλαιο 2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας και την ηλιακή γεωμετρία.
- Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τη Φ/Β τεχνολογία και τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση της.
- Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα δομικά στοιχεία του συστήματος που αναπτύχθηκε.
- Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα της.
- Το κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές επεκτάσεις.

# 2. ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

## 2.1 Εισαγωγή

Ως ηλιακή ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που φτάνει από τον Ήλιο στη Γη. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται από τον Ήλιο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του και μεταδίδεται στο διάστημα με τη μορφή ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία διακρίνεται εύκολα από τα άλλα είδη μεταφοράς ενέργειας, καθώς δεν απαιτείται παρουσία υλικού μέσου για τη διάδοση της και διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός.

Η ηλιακή ενέργεια αποτέλεσε και αποτελεί τη βασική ενεργειακή πηγή στη Γη, καθώς σε αυτήν οφείλεται ο σχηματισμός και η διαθεσιμότητα της πλειονότητας των ενεργειακών πόρων, εξαντλήσιμων και μη, με εξαιρέσεις την πυρηνική ενέργεια, τη γεωθερμική (οφείλεται στη θερμοκρασία της Γης) και την παλιρροιακή (οφείλεται στην έλξη μεταξύ Γης και σελήνης).

Γενικά, με τον όρο ηλιακή ακτινοβολία (solar radiation) συμβολίζεται η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και μετριέται σε W/m<sup>2</sup>. Συμβολίζει το ρυθμό με τον οποίο προσπίπτει η ισχύς της ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας.

## 2.2 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η μάζα αέρος (Air Mass, AM). Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται από το ακρωνύμιο AM0. Εκτός από το φάσμα AM0 υπάρχουν και τα AM1, AM1.5, AM2 τα οποία αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία όπως αυτή καταμετρείται στην επιφάνεια της Γης και αφού το φως διαγράψει τροχιές των οποίων οι γωνίες με την κατακόρυφο του τόπου είναι 0°, 48° και 60° αντίστοιχα, θεωρώντας ότι η τροχιά είναι ευθεία. Η μάζα αέρα υπολογίζεται από τη ζενίθια γωνία του Ήλιου ( $\theta_z$ ) ως εξής:

$$AM = (\cos \theta_z)^{-1} \tag{2.1}$$

Η ηλιακή ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε AM1 και είναι κάθετη στην επιφάνεια συλλογής ισούται περίπου με 950 W/m<sup>2</sup>. Η AM1 μπορεί να μετρηθεί μόνο σε τόπους με γεωγραφικό πλάτος [-23.5°, 23.5°], καθώς μόνο σε αυτούς η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διαπεράσει κάθετα την ατμόσφαιρα. Η ηλιακή ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε AM1.5 ισούται με 935 W/m<sup>2</sup> και αποτελεί αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέγιστης ισχύος που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς την ηλιακή ακτινοβολία σε ιδανικές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει την περίοδο του καλοκαιριού, κατά το μεσημέρι και χωρίς συννεφιά.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η φασματική πυκνότητα ισχύος για διαφορετικά AM ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.1 Φασματική πυκνότητα ισχύος για διαφορετικά ΑΜ ηλιακής ακτινοβολίας [2].

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός γήινης ατμόσφαιρας μοιάζει αρκετά με μέλανος σώματος στην θερμοκρασία των 6000° Κ. Ο Ήλιος εκπέμπει φως με διαφορετικά μήκη κύματος συμπεριλαμβανομένων της υπεριώδους, της ορατής και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο έντονη στα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας και παρουσιάζει αιχμές στο μπλε-πράσινο κομμάτι του φάσματος [2, 3].

## 2.3 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται οι διαφορετικές συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας όπως αυτή εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.2 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολία [3].

Κατά τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση της ελαττώνεται καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και αφετέρου σε σωματίδια/αιωρήματα όπως υδρατμοί, σκόνη και καπνό. Επιπλέον, ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας, ενώ ένα άλλο ανακλάται πίσω στο διάστημα. Τέλος, η προσπίπτουσα στο έδαφος ακτινοβολία μπορεί είτε να ανακλαστεί είτε να απορροφηθεί από αυτό.

Οπότε, συνοψίζοντας, η ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σημείο της επιφάνειας της Γης αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- Αμεση (Direct) ακτινοβολία: η ακτινοβολία που προσπίπτει απευθείας από τον Ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση,
- Διάχυτη (Diffuse) ακτινοβολία: η ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα,
- Ανακλώμενη στο έδαφος (Albedo) ακτινοβολία.

Το άθροισμα των προηγούμενων συνιστωσών ονομάζεται Ολική (Global) ηλιακή ακτινοβολία. Η ανακλώμενη ακτινοβολία εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψης του (π.χ. χιόνι, γρασίδι), ενώ η διάχυτη και η άμεση εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες [2-4]:

- Σύσταση της ατμόσφαιρας,
- Ημέρα του έτους και

Γεωγραφικές συντεταγμένες του τόπου.

## 2.4 Ηλιακή γεωμετρία

Η ηλιακή γεωμετρία συνδέεται με τις δύο κύριες κινήσεις της Γης:

- Την ημερήσια περιστροφή γύρω από τον άξονα Βορρά-Νότο (πολικό άξονα), από τα δυτικά προς τα ανατολικά, η οποία διαρκεί περίπου 24 ώρες.
- Την ετήσια περιστροφή γύρω από τον Ήλιο που διαρκεί 365 ημέρες, 5 ώρες, 48 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα.

Η Γη κινείται γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά και με μεταβλητή ταχύτητα ανάλογα με την απόσταση της από αυτόν. Λόγω της μεγάλης ακτίνας της ελλειπτικής τροχιάς, περίπου 150.000.000 Km, οι ηλιακές ακτίνες φτάνουν στη Γη σχεδόν παράλληλα, σχηματίζοντας γωνία ίση με 0.5° [5].

Ο πολικός άξονας της Γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς κατά σταθερή γωνία 23.45°. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γωνία της διακέντρου Γης-Ήλιου και του ισημερινού επιπέδου να μεταβάλλεται καθόλη τη διάρκεια του έτους από -23.45° έως 23.45° (Σχήμα 2.3). Η γωνία αυτή ονομάζεται ηλιακή απόκλιση (solar declination) και συμβολίζεται με δ(°). Η μεταβολή της θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Οι τιμές της απόκλισης του Ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο.



Σχήμα 2.3 Ηλιακή απόκλιση (δ) [6].

Στη διάρκεια του έτους, υπάρχουν στιγμές που η ηλιακή απόκλιση λαμβάνει κάποιες μοναδικές τιμές (Σχήμα 2.4). Αυτές είναι οι εξής:

- Στις 22/12 λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της, -23.45°. Εκείνη την ημέρα του έτους λαμβάνει χώρα το Χειμερινό ηλιοστάσιο κατά το οποίο στο βόρειο ημισφαίριο υπάρχει η μικρότερη σε διάρκεια ημέρα και η μεγαλύτερη σε διάρκεια νύχτα. Τα αντίθετα ισχύουν για το νότιο ημισφαίριο.
- Στις 21/6 η ηλιακή απόκλιση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, 23.45°. Εκείνη την ημέρα του έτους λαμβάνει χώρα το Θερινό ηλιοστάσιο κατά το οποίο στο βόρειο ημισφαίριο υπάρχει η μεγαλύτερη σε διάρκεια ημέρα και η μικρότερη νύχτα. Τα αντίθετα ισχύουν για το νότιο ημισφαίριο.
- Στις 22/3 και στις 23/9 η ηλιακή απόκλιση ισούται με 0°, που σημαίνει ότι η διάκεντρος Γης-Ήλιου περνάει μέσω του ισημερινού. Εκείνες τις δύο μέρες λαμβάνουν χώρα η εαρινή και η φθινοπωρινή ισημερία, αντίστοιχα. Το ξεχωριστό των ημερών αυτών είναι η ισόποση διάρκεια ημέρας-νύχτας.



Σχήμα 2.4 Τιμές ηλιακής απόκλισης [7].

Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισής του Ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχιές που διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, αντίθετα από ότι στη διάρκεια του χειμώνα. Παράλληλα διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε διάφορες εποχές του έτους.

Μία μαθηματική προσέγγιση της ηλιακής απόκλισης είναι ως εξής:

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{^{360}}{^{365}} * (d - 81)\right) \tag{2.2}$$

όπου:

d είναι η ημέρα του έτους (τη<br/>ν $1^\eta$ Ιανουαρίου είναι d = 1).

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η διακύμανση της τιμής της ηλιακής απόκλισης καθόλη τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 2.5 Ηλιακή απόκλιση ανά ημέρα του έτους [6].

### 2.5 Θέση του Ήλιου ως προς τη Γη

Η σχετική θέση Γης Ήλιου αναπαρίσταται ευκολότερα με τη χρήση της ουράνιας σφαίρας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Πρόκειται για ένα γεωκεντρικό μοντέλο στο οποίο ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τη Γη. 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. Κατά αυτό τον τρόπο, ο Ήλιος διαγράφει έναν κύκλο γύρω από τη Γη. Η διάμετρος του κύκλου αλλάζει καθημερινά και γίνεται μέγιστη στις ισημερίες και ελάχιστη στα ηλιοστάσια.



**Σχήμα 2.6** Ουράνια σφαίρα [9].

Ο πολικός άξονας της Γης τέμνει την ουράνια σφαίρα σε δύο σημεία που ονομάζονται βόρειος ουράνιος πόλος και νότιος ουράνιος πόλος, αντίστοιχα. Ο μέγιστος κύκλος της ουράνιας σφαίρας που είναι κάθετος στον πολικό άξονα ονομάζεται ουράνιος ισημερινός και το επίπεδο του συμπίπτει με το επίπεδο του γήινου ισημερινού. Σε κάθε τόπο, η κατακόρυφος διεύθυνση, όπως αυτή ορίζεται από το νήμα της στάθμης, τέμνει την ουράνια σφαίρα στα σημεία ζενίθ (Σχήμα 2.7) και ναδίρ. Το συμπλήρωμα της γωνίας μεταξύ αυτής της κατακόρυφου και του πολικού άξονα είναι το γεωγραφικό πλάτος (φ,°). Ο μέγιστος κύκλος της ουράνιας σφαίρας που είναι κάθετος στην κατακόρυφο του τόπου ονομάζεται "ουράνιος ορίζοντας" ή απλώς ορίζοντας.



Σχήμα 2.7 Ανάλυση της ουράνιας σφαίρας [8].

Η γεωγραφική θέση ενός σημείου στην επιφάνεια της Γης ορίζεται από το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος. Γεωγραφικό πλάτος (φ) ενός σημείου ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο σε εκείνο το σημείο με το επίπεδο του ισημερινού. Το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται βόρειο ή νότιο ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη. Σε μια υδρόγειο, τα γεωγραφικά πλάτος (Σχήμα 2.8). Ο μεγαλύτερος κύκλος είναι ο ισημερινός, όπου το γεωγραφικό πλάτος είναι 0°, ενώ στους πόλους ο κύκλος γίνεται σημείο με γεωγραφικό πλάτος +90° και -90° για τον βόρειο και τον νότιο πόλο, αντίστοιχα.

Γεωγραφικό μήκος (λ,°) ενός σημείου είναι η στερεά γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του μεσημβρινού του σημείου και του πρώτου μεσημβρινού (Σχήμα 2.8). Πρώτος μεσημβρινός θεωρείται ο μεσημβρινός του Greenwich. Το γεωγραφικό μήκος παίρνει τιμές από  $0^{\circ}$  έως -180° για τόπους ανατολικά του Greenwich και από  $0^{\circ}$  έως 180° για τόπους δυτικά του Greenwich.



Σχήμα 2.8 Γεωγραφικό πλάτος και μήκος [4].

Για τον υπολογισμό της θέσης του Ήλιου ως προς ένα σημείο στη Γη, πρέπει να γνωρίζουμε τη γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ) ή τη γωνία ανύψωσης (α) και την αζιμούθια γωνία ( $\gamma_s$ ) του Ήλιου (Σχήμα 2.9). Αζιμούθια γωνία ονομάζεται η γωνιακή απόκλιση από το νότο, της προβολής του Ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο. Το αζιμούθιο ορίζεται θετικό στη δύση και αρνητικό στην ανατολή. Ανύψωση ονομάζεται η γωνία μεταξύ του ορίζοντα και της ευθείας του παρατηρητή με τον Ήλιο. Γωνία ζενίθ είναι η συμπληρωματική της γωνίας ανύψωσης. Η γωνία ανύψωσης συνδέεται με τη ζενίθια γωνία ως εξής:



Σχήμα 2.9 Ανύψωση (altitude) και αζιμούθιο(azimuth) [7].

Η γωνία ζενίθ είναι συνάρτηση της ώρας, της ημέρας και του γεωγραφικού πλάτους και υπολογίζεται ως εξής:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \tag{2.4}$$

(2.3)

Η ανύψωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \tag{2.5}$$

Το αζιμούθιο υπολογίζεται ως εξής:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha} \tag{2.6}$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega - \cos \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \alpha} \tag{2.7}$$

όπου το ω είναι μια ποσότητα που ονομάζεται ωριαία γωνία και ορίζεται ως η γωνιακή μετατόπιση του Ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού. Προκύπτει από την περιστροφή της Γης γύρω από τον πολικό άξονα με ρυθμό 15°/hr και παίρνει θετικές τιμές μετά το μεσημέρι και αρνητικές τιμές πριν από αυτό. Η τιμή της υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\omega(^{\circ}) = (t_s - 12hr) \cdot \frac{15^{\circ}}{hr}$$
(2.8)

Το t<sub>s</sub> ονομάζεται ηλιακός χρόνος και είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινομενική κίνηση του ηλίου στον ουρανό και δε συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο του ρολογιού. Έτσι, ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή που ο Ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή [6, 7, 8]. Για τον υπολογισμό του ηλιακού χρόνου χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$t_s = t_c + \frac{\lambda - LSM}{15^\circ/hr} + E - DST$$
(2.9)

όπου:

- $t_c$ είναι ο τοπικός χρόνος σε ώρες,
- DST (Daylight Saving Time) είναι η θερινή ώρα (DST =0 αν δεν ισχύει η θερινή ώρα, αλλιώς DST=1),
- LSM (Local Standard Meridian) το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (°),
- λ το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή (°),
- $d_n$  η ημέρα του έτους ( $d_n$ =1,2,...,365) και

Ε ο χρόνος που δίδεται από την εξίσωση του χρόνου. Χρησιμοποιείται για τις μεταβολές
 της ηλιακής ώρας λόγω της μη σταθερής ταχύτητας της Γης στην περιστροφή της γύρω
 από τον Ήλιο και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

 $E = 3.82 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot B) - 0.04089 \cdot \sin(2 \cdot B))$ (2.10) óπου:

$$B = 360^{\circ} * \frac{dn-1}{365^{\circ}} \tag{2.11}$$

Το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος σε σχέση με το GMT υπολογίζεται ως εξής:

$$LSM = GMT * 15^{\circ} \tag{2.12}$$

Οι ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης του ηλίου,  $\omega_{st}$  and  $\omega_{ss}$  αντίστοιχα, υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\omega_{st} = -\cos^{-1}(-\tan\delta\cdot\tan\varphi) \tag{2.13}$$

$$\omega_{ss} = -\omega_{st} \tag{2.14}$$

#### 2.6 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας

#### 2.6.1 Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα

Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της έξω από την ατμόσφαιρα της Γης όταν η απόσταση Γης-Ήλιου λαμβάνει τη μέση τιμή της ονομάζεται ηλιακή σταθερά ( $G_{sc}$ ) και ισούται με 1367 W/m<sup>2</sup>. Η ηλιακή ακτινοβολία σε μια περιοχή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον πολικό άξονα και λόγω της περιστροφής της γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά κατά τη διάρκεια της απόστασης Γης-Ήλιου προκαλεί μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά ±3% γύρω από τη μέση τιμή της. Η ακτινοβολία (G<sub>on</sub>) που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας κάθετο στις ακτίνες του Ήλιου υπολογίζεται για κάθε

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot d_n}{365}\right)$$
(2.15)

Η ακτινοβολία για κάποια ημέρα του έτους σε οριζόντια επιφάνεια έξω από της ατμόσφαιρα της Γης υπολογίζεται ως εξής:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos \theta_z \tag{2.16}$$

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα της Γης σε διάστημα μιας ώρας υπολογίζεται ως εξής [10, 11]:

$$\overline{G_o} = \frac{12}{\pi} * G_{on} * \left[\cos\varphi * \cos\delta * (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \sin\varphi * \sin\delta * \frac{\pi * (\omega_2 - \omega_1)}{180^\circ} (2.17)\right]$$

όπου:

 $\overline{G_o}$  (KW/m<sup>2</sup>) η ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ώρας,

 $\omega_1 \left( ^{o} \right)$ η ωριαία γωνία στην αρχή της ώρας και

 $ω_2$  (°) η ωριαία γωνία στο τέλος της ώρας.

#### 2.6.2 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης

Το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της Γης ονομάζεται Ολική ηλιακή ακτινοβολία και εξαρτάται κυρίως από την καθαρότητα του ουρανού (π.χ. λόγω συννεφιάς), την ημέρα του έτους, το γεωγραφικό πλάτος και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του τόπου. Προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η ηλιακή ενέργεια στη διάρκεια μιας ώρας είναι αριθμητικά ίση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ώρας αυτής. Για παράδειγμα, αν η συνολική ακτινοβολία στις 12:00 είναι 600 W/m<sup>2</sup> είναι και ίση με την ηλιακή ενέργεια από τις 11:30 έως τις 12:30, δηλαδή 600 Wh/m<sup>2</sup>. Αυτή η υπόθεση βρίσκεται πολύ κοντά στην πραγματικότητα και απλοποιεί τους υπολογισμούς. Οπότε, στη συνέχεια η αναφορά σε ηλιακή ακτινοβολία σημαίνει την ηλιακή ενέργεια της αντίστοιχης ώρας.

#### 2.6.3 Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Στο [12] παρουσιάζεται μία σχέση η οποία συνδέει το "διάχυτο κλάσμα" της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και το "δείκτη καθαρότητας". Διάχυτο κλάσμα (f<sub>d</sub>) ονομάζεται ο λόγος της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ( $\overline{D_H}$ ) ως προς τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο ( $\overline{G_H}$ ). Δείκτης καθαρότητας (K<sub>t</sub>) ονομάζεται ο λόγος της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ως προς τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της ατμόσφαιρας ( $\overline{G_o}$ ). Οι τιμές τους υπολογίζονται ως εξής:

$$K_t = \frac{\overline{G_H}}{\overline{G_o}}, \ 0 \le K_t \le 1 \tag{2.18}$$

και:

$$f_{d} = \frac{\overline{D_{H}}}{\overline{G_{H}}} = f(x)$$

$$= \begin{cases} 1 - 0.09 \cdot K_{t} \text{ for } K_{t} \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604 \cdot K_{t} + 4.388 \cdot K_{t}^{2} - 16.638 \cdot K_{t}^{3} + 12.336 \cdot K_{t}^{4} \text{ for } 0.22 < K_{t} \leq 0.8 \\ 0.165 \text{ for } K_{t} > 0.8 \end{cases}$$

$$(2.19)$$

Εάν η τιμή του Κ<sub>t</sub> είναι μεγαλύτερη της μονάδας τότε το Κ<sub>t</sub> παίρνει την τιμή 1.

Γνωρίζοντας λοιπόν την διάχυτη ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια μπορούμε να υπολογίσουμε και την απευθείας ακτινοβολία σύμφωνα με την παρακάτω σχέση γνωρίζοντας ότι για οριζόντιες επιφάνειες η Ολική ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από δύο συνιστώσες:

$$\overline{G_H} = \overline{B_H} + \overline{D_H} \tag{2.20}$$

#### 2.6.4 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Οι ηλιακοί συλλέκτες συνήθως τοποθετούνται σε κεκλιμένο επίπεδο. Για τον υπολογισμό της Ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο αυτό, υπολογίζονται αρχικά οι τιμές της διάχυτης και της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Η Ολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο αποτελείται από τρεις συνιστώσες: την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη στο έδαφος. Το άθροισμα αυτών μας δίνει τη Ολική ηλιακή ακτινοβολία [13].

Η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο  $(\overline{B_T})$  εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης (θ). Ο συντελεστής διόρθωσης ( $R_b$ ) για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ορίζεται ως ο λόγος της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο προς τη προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο:

$$R_b = \frac{\overline{B_T}}{\overline{B_H}} = \frac{\max(0, \cos\theta)}{\cos\theta_z}$$
(2.21)

όπου:

θ είναι η γωνία πρόσπτωσης και

 $\theta_z \eta \gamma \omega v i \alpha \zeta \epsilon v i \theta$ .

Ο παράγοντας max χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις που το *cosθ* παίρνει αρνητικές τιμές, πχ. τις πρώτες πρωινές ώρες που θ>π/2.

Αντίστοιχα, για την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο ( $\overline{R_T}$ ), είναι συνηθισμένη η υπόθεση ότι το έδαφος είναι οριζόντιο και ότι αντανακλά ισοτροπικά. Η τιμή της δίδεται από τον τύπο:

$$\overline{R_T} = \overline{G} \cdot p \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2} \tag{2.22}$$

όπου p είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους και

β η κλίση του συλλέκτη (°).

Η διάχυτη ακτινοβολία αποτελείται από 3 επιμέρους συνιστώσες. Η πρώτη είναι η ισοτροπική συνιστώσα (isotropic) η οποία λαμβάνεται ομοιόμορφα από όλο τον ουράνιο θόλο. Η δεύτερη, η περιήλια (circumsolar), έχει σκεδαστεί γύρω από τον Ήλιο και ακολουθεί την κατεύθυνση της άμεσης ακτινοβολίας. Η τρίτη, γνωστή ως πυράκτωση ορίζοντα (horizon brightening diffuse radiation), συγκεντρώνεται κοντά στον ορίζοντα και είναι περισσότερο εμφανής σε συνθήκες καθαρού ουρανού.

Το πιο απλό μοντέλο για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας θεωρεί ότι η ακτινοβολία στον ουρανό είναι ισοτροπική, το οποίο σημαίνει πως από κάθε σημείο του ουράνιου θόλου εκπέμπεται η ίδια ακτινοβολία. Το μοντέλο αυτό είναι μία πολύ καλή προσέγγιση για συννεφιασμένο ουρανό αλλά υποτιμά τη συμβολή της διάχυτης ακτινοβολίας σε καθαρό ουρανό. Η τιμή του υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{D_T} = \overline{D_H} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \tag{2.23}$$

Στο [14] παρουσιάζεται ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της ισοτροπικής και της περιήλιας διάχυτης ακτινοβολίας. Συμπεραίνοντας ότι η ανισοτροπική συμπεριφορά της περιήλιας διάχυτης ακτινοβολίας γίνεται πιο ξεκάθαρη κάτω από καθαρό ουρανό, προτείνεται ο ανισοτροπικός δείκτης:

$$A_i = \frac{\overline{B_H}}{\overline{G_o}} \tag{2.24}$$

Ο ανισοτροπικός δείκτης ορίζει ένα κομμάτι της διάχυτης ακτινοβολίας ως περιήλια και το εναπομείνων ως ισοτροπική. Η ισοτροπική και η περιήλια ακτινοβολία υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\overline{D_{T,cir}} = \overline{D} \cdot A_i \cdot R_b \tag{2.25}$$

$$\overline{D_{T,iso}} = \overline{D} \cdot (1 - A_i) \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2}$$
(2.26)

Έτσι, η συνολική διάχυτη ακτινοβολία σε επικλινή επιφάνεια ισούται με:

$$\overline{D_T} = \overline{D} \cdot \left[ (1 - A_i) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + A_i \cdot R_b \right]$$
(2.27)

Σε περιπτώσεις αίθριου καιρού, ο ανισοτροπικός δείκτης παίρνει υψηλές τιμές, ενώ σε συνθήκες συννεφιάς, που απουσιάζει η απευθείας συνιστώσα, γίνεται 0.

Το μοντέλο αυτό δεν υποστηρίζει τη διάχυτη ακτινοβολία από τον ορίζοντα. Έρευνες έδειξαν ότι σε περιοχές του νότιου ημισφαιρίου το μοντέλο δεν υπολόγισε σωστά τη διάχυτη ακτινοβολία. Στο [15] προτάθηκε ένας παράγοντας για την ισοτροπική διάχυτη ακτινοβολία ο οποίος υπολογίζει τόσο την ισοτροπική όσο και την διάχυτη από τον ορίζοντα. Οπότε, ο τύπος γίνεται:

$$\overline{D_{T,iso}} = \overline{D} \cdot (1 - A_i) \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \cdot (1 + (\sin(\beta/2))^3)$$
(2.28)

Το μοντέλο επίσης τροποποιήθηκε από έναν διορθωτικό παράγοντα f, που έχει επικρατήσει να δίνεται από τη σχέση:

$$f = \sqrt{\frac{B_H}{G_H}} \tag{2.29}$$

Επομένως, το ανισοτροπικό μοντέλο είναι το εξής:

$$\overline{D_T} = \overline{D} \cdot \left[ (1 - A_i) \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \cdot (1 + f \cdot (\sin(\beta/2))^3) + A_i \cdot R_b \right]$$
(2.30)

Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην ισοτροπική διάχυτη ακτινοβολία, διορθωμένος να εμπεριέχει και τη διάχυτη από τον ορίζοντα ακτινοβολία. Ο δεύτερος όρος παρουσιάζει τη συμμετοχή της περιήλιας ακτινοβολίας. Κάτω από αίθριες συνθήκες, ο διορθωτικός παράγοντας και ο ανισοτροπικός δείκτης μηδενίζονται, οπότε ουσιαστικά το μοντέλο γίνεται ισοτροπικό. Τελικά, η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια στο επίπεδο της Γης υπολογίζεται από το HDKR (Hay, Davies, Klucher, Reindl) μοντέλο ως εξής:

$$G(d, t, \gamma_c, \beta) = (\overline{B} + A_i \cdot \overline{D}) \cdot R_b + (1 - A_i) \cdot \overline{D} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot (1 + f \cdot (\sin(\beta/2))^3) + \overline{G} \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

$$(2.31)$$

όπου:

$$\overline{D} = f_d \cdot \overline{G} \quad \text{kal} \quad \overline{B} = \overline{G} - \overline{D} \tag{2.32}$$

#### 2.7 Ηλιακή ακτινοβολία και sun-tracking

Η διαδικασία αναζήτησης του Ήλιου κατά την καλοκαιρινή περίοδο έχει σημαντικές διαφορές έναντι της χειμερινής περιόδου, υποθέτοντας ότι ένα έτος χωρίζεται ουσιαστικά σε αυτές τις δύο περιόδους.

Το ακριβές σημείο ανατολής και δύσης του Ήλιου καθώς και η τιμή της μέγιστης ανύψωσης του Ήλιου, εξαρτώνται από την ημέρα του έτους και από το εκάστοτε γεωγραφικό πλάτος. Το μονοπάτι του Ήλιου μεταβάλλεται συνεχώς. Το μεγαλύτερο μονοπάτι συμβαίνει κατά το θερινό ηλιοστάσιο, ενώ το μικρότερο κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (Σχήμα 3.15). Όλα τα υπόλοιπα μονοπάτια παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών των δύο και ισχύει το εξής: δύο μήνες του έτους μοιράζονται ένα κοινό μονοπάτι, π.χ. το μονοπάτι του Ήλιου στις 21 Μαρτίου είναι ίδιο με το μονοπάτι του Ήλιου στις 23 Σεπτεμβρίου (οι δύο αυτοί μήνες είναι συμμετρικοί ως προς το θερινό ηλιοστάσιο). Τα προαναφερθέντα ισχύουν για το βόρειο ημισφαίριο.



Σχήμα 3.15 Τα κύρια μονοπάτια του Ηλιου [5].

Κατά το θερινό ηλιοστάσιο ο Ήλιος ταξιδεύει στο υψηλότερο (μέγιστη γωνία ανύψωσης) μονοπάτι και η αζιμουθιακή γωνία ανατολής και δύσης του είναι μικρότερη των -90° και μεγαλύτερη των 90°, αντίστοιχα (κόκκινη γραμμή, Σχήμα 3.15). Ακριβώς τα αντίθετα ισχύουν για το χειμερινό ηλιοστάσιο (μπλε γραμμή, Σχήμα 3.15). Αυτά αποτελούν και τα άκρα των μονοπατιών του, όλα τα υπόλοιπα μοιράζονται ισόποσα μεταξύ αυτών και των ισημεριών [5].

Όσον αφορά, όμως, τη χειμερινή περίοδο είναι πολύ πιο έντονες οι ασταθείς καιρικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια τέτοιων συνθηκών (εναλλαγή μεταξύ ηλιοφάνειας και συννεφιάς) η απόδοση του Φ/Β συστήματος εξαρτάται κυρίως από τη χρονική διάρκεια της ηλιοφάνειας. Ένα ιδιαίτερο φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια ημερών έντονης συννεφιάς είναι το "edge effect". Πρόκειται για το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο γίνεται ορατός ο Ηλιος σε μια οπή των σύννεφων που τον καλύπτουν, με αποτέλεσμα αύξηση της συνολικής ακτινοβολίας λόγω των ανακλάσεων στη διαδρομή της [16]. Επιπλέον, τις συννεφιασμένες ημέρες η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας παίρνει μεγάλες τιμές, όπως έχει αναλυθεί και στην παράγραφο 2.6. Επομένως, και για τη χειμερινή περίοδο ισχύει η ανάγκη για συστήματα sun-tracking, κι αυτό λόγω κυρίως της διάχυτης ακτινοβολίας η οποία είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αποκλείσουμε τα συστήματα sun-tracking ανοιχτού βρόχου καθώς η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από το αποτέλεσμα, το οποίο έχει μεγάλες πιθανότητες να είναι αρνητικό. Καταλήγουμε λοιπόν στα συστήματα κλειστού βρόχου τα οποία είναι αρκετά ευαίσθητα και στη διάχυτη ακτινοβολία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιείται ένα σύστημα το οποίο δε διαχωρίζει τις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, απλά ελέγχει το συνολικό αποτέλεσμα της, δηλαδή την παραγωγή ισχύος από το Φ/Β στοιχείο.

Για να φανεί η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην απόδοση ενός Φ/Β συστήματος, αρκεί να αναφερθεί η εξής παρατήρηση που προέκυψε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας: όταν υπήρχαν σύννεφα επάνω από το Φ/Β στοιχείο, η ηλιακή ακτινοβολία ήταν μεγαλύτερη στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου, όταν το πλαίσιο δεν ήταν προσανατολισμένο ακριβώς στην κατεύθυνση του Ήλιου, αλλά η γωνία κλίσης του ήταν μικρότερη.

Συνοψίζοντας, τα συστήματα sun-tracking είναι πιο αποδοτικά όταν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία αλλά αυτή δεν είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμη λόγω της σταθερής θέσης του Φ/Β στοιχείου. Αυτό ισχύει κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες, ημερών της καλοκαιρινής περιόδου. Επίσης, τα συστήματα sun-tracking απαιτούνται και κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου κατά την οποία η συννεφιά αυξάνει τη διάχυτη ακτινοβολία [7].

## 3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ SUN-TRACKING KAI MPPT

### 3.1 Φ/Β τεχνολογία

Ο όρος Φ/Β (ΦωτοΒολταϊκή) τεχνολογία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τεχνική της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο παράγεται ρεύμα από το ηλιακό φως ανακαλύφθηκε από τον Α. Ε. Becquerel το 1839. Ο όρος "Φωτοβολταϊκό" προέρχεται από την ελληνική λέξη "φως" και τη μονάδα του συστήματος SI για την ηλεκτρική τάση "Volt".

#### **3.1.1** Φ/Β φαινόμενο

Η αρχή του Φ/Β φαινομένου συνοψίζεται στα εξής: όταν σε ένα Φ/Β στοιχείο προσπίπτουν φωτόνια, διεγείρονται ηλεκτρόνια τα οποία καθίστανται ελεύθερα να κινηθούν και έτσι αναπτύσσεται ηλεκτρική τάση.

Ειδικότερα, το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια, τα οποία περιέχουν ποικίλα ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος. Όταν αυτά προσπίπτουν σε μία επιφάνεια, ένα μέρος την διαπερνά, ένα μέρος ανακλάται και ένα μέρος απορροφάται από την επιφάνεια αυτή. Όταν το φωτόνιο απορροφηθεί από μια επιφάνεια με υψηλή φωτοαγωγιμότητα (ημιαγωγός), η ενέργεια του φωτονίου μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια του υλικού. Τα ηλεκτρόνια αποδρούν από την κανονική τους θέση, αφήνοντας οπές. Σε αυτή την απλή αρχή ροής, στηρίζεται το Φ/Β φαινόμενο.

#### **3.1.2** Φ/Β στοιχείο

Η βασική δομική μονάδα της Φ/Β τεχνολογίας είναι το Φ/Β στοιχείο (PV cell). Διαφορετικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του, αλλά το πιο διαδεδομένο είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμεσσο ενεργειακό διάκενο 1.1 eV. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό Φ/Β στοιχείο.



Σχήμα 3.1 Φ/Β στοιχείο [17].

#### 3.1.3 Είδη Φ/Β στοιχείων

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες Φ/Β στοιχείων:

**Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)**. Πλεονέκτημα τους είναι η λίγο μεγαλύτερη απόδοση και χρησιμοποιούνται συνήθως όταν υπάρχει πρόβλημα χώρου.

**Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (m-Si)**. Έχουν μικρότερη απόδοση από τα Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού τύπου, αλλά ταυτόχρονα είναι χαμηλότερο και το κόστος παραγωγής τους.

Άμορφου πυριτίου (a-Si). Από κατασκευαστική άποψη είναι ο απλούστερος τύπος και επομένως ο πιο φθηνός, αλλά η απόδοσή του είναι συγκριτικά μικρότερη.

#### **3.1.4 Φ/Β δομές**

Η ισχύς ενός Φ/Β στοιχείου είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στις συνήθεις ηλεκτρικές καταναλώσεις. Για αυτό, τα Φ/Β στοιχεία τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο αυτό, τα στοιχεία συνδέονται σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την δημιουργία της επιθυμητής τάσης. Το Φ/Β πλαίσιο (PV module) αποτελεί τη βασική δομική μονάδα του Φ/Β συστήματος. Αποτελείται από στοιχεία που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμα για εγκατάσταση.

Σε μία Φ/Β εγκατάσταση που λειτουργεί ως σταθμός παραγωγής ενέργειας, δεν επαρκεί ένα Φ/Β πλαίσιο, αλλά απαιτείται ένα πλήθος αυτών. Για αυτό το λόγο συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους δημιουργώντας τη Φ/Β συστοιχία [18, 19].

#### **3.2** Τεχνικές sun-tracking

Τα συστήματα sun-tracking είναι μηχανισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση ενός Φ/Β πλαισίου ή μιας Φ/Β συστοιχίας με τον Ήλιο. Αν και ο μηχανισμός αυτός δεν είναι αναπόσπαστο κομμάτι ενός Φ/Β συστήματος, η υλοποίηση του μπορεί να αυξήσει δραματικά την παραγόμενη ισχύ του συστήματος διατηρώντας το πλαίσιο εστιασμένο στον Ήλιο ή γενικότερα στο σημείο του ουράνιου θόλου όπου μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται, ειδικότερα, τις πρωινές και απογευματινές ώρες κατά τις οποίες ένα Φ/Β σύστημα σταθερής κλίσης έχει χαμηλή παραγωγή ενέργειας.

Γενικά, τα Φ/Β πλαίσια είναι ακριβά και η κατασκευή ενός συστήματος sun-tracking ανεβάζει αρκετά το κόστος του συστήματος. Η κατασκευή όμως ενός αποδοτικού συστήματος sun-tracking, μπορεί να μειώσει το αρχικό κόστος του συστήματος, καθώς θα απαιτούνται λιγότερα Φ/Β πλαίσια για την ίδια παραγωγή ισχύος. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα κίνησης σε έναν ή δύο άξονες ταυτόχρονα, αζιμούθιου και ύψους. Τα συστήματα sun- tracking, ανάλογα με τη βασική αρχή λειτουργίας τους χωρίζονται σε παθητικά και ενεργά. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα συστήματα sun-tracking που έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν.

Τα παθητικά συστήματα sun-tracking χρησιμοποιούν ένα συμπυκνωμένο ρευστό με χαμηλό σημείο βρασμού για το σωστό προσανατολισμό του Φ/Β πλαισίου. Η ηλιακή θερμότητα δημιουργεί αύξηση της πιέσεως στο χώρο του ρευστού με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του συστήματος μέχρι να αποκατασταθεί ξανά η ισορροπία. Τα παθητικά συστήματα sun-tracking είναι λιγότερο περίπλοκα έναντι των ενεργών αλλά έχουν χαμηλή απόδοση και δυσκολία λειτουργίας σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, μελέτες έχουν δείξει ότι μπορούν να πετύχουν υψηλές τιμές απόδοσης.

Τα ενεργά συστήματα sun-tracking χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες για τη μετακίνηση του Φ/Β πλαισίου και απαιτούν κάποιο σήμα ελέγχου για τη λειτουργία τους. Είναι τα πλέον διαδεδομένα. Υπάρχει μεγάλο πλήθος τεχνικών για τα ενεργά συστήματα sun-tracking, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Τα ενεργά συστήματα sun-tracking χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: ανοιχτού και κλειστού βρόχου. Παρακάτω παρουσιάζονται συστήματα που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν, ταξινομημένα σύμφωνα με τις προαναφερθείσες κατηγορίες.

#### 3.2.1 Συστήματα sun-tracking ανοιχτού βρόχου

Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου υπολογίζουν την κίνηση τους, με βάση μόνο την παρούσα κατάσταση και κάποιον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος δε χρειάζεται ανατροφοδότηση για τον έλεγχο της επίτευξης του επιθυμητού στόχου. Τα συστήματα αυτά είναι απλούστερα και φθηνότερα έναντι των συστημάτων κλειστού βρόχου. Το μειονέκτημα τους, όμως, είναι ότι δεν μπορούν να αντιληφθούν λάθη κατά την εκτέλεση τους. Συνήθως, χρησιμοποιούν κάποιο μοντέλο υπολογισμού της θέσης/κίνησης του Ήλιου.

Στο [20] παρουσιάζεται ένας απλός αλγόριθμος για τον υπολογισμό της θέσης του Ήλιου. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, η ηλιακή ζενίθια γωνία, το ηλιακό αζιμούθιο και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας εξάγονται από τον υπολογισμό των εξής παραμέτρων: ελλειπτικό γεωγραφικό πλάτος και μήκος, ηλιακή απόκλιση και ανύψωση σε συνδυασμό με το πλήθος των ποσοτήτων για τη διόρθωση των προαναφερθέντων παραμέτρων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να υπολογίσει την ακριβή θέση του Ήλιου με μέση απόκλιση της τάξης των 0.0003°. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Αποκλίσεις ηλιακής αζιμούθιας και ζενίθιας γωνίας [20].

Μία παρόμοια μέθοδος με αυτή που υλοποιήθηκε στο [20] παρουσιάζεται στο [21]. Ο νέος αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη την καθολική ώρα (universal time), την διαφορά μεταξύ ηλιακού

και τοπικού χρόνου και υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τη θέση του Ήλιου ως προς τη Γη. Το σφάλμα αυτού του αλγορίθμου φτάνει τις 0.00278° συγκρινόμενο με τον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε στο [20]. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ της θέσης του Ήλιου όπως αυτή υπολογίζεται από τον αλγόριθμο, με την πραγματική θέση του. Πραγματική θεωρείται η θέση του Ήλιου η οποία προκύπτει από τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο [20]. Προφανώς, το λάθος είναι μεγαλύτερο, αλλά ο αλγόριθμος έχει αρκετά μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Στη συγκεκριμένη εργασία, ο αλγόριθμος δεν εφαρμόστηκε σε σύστημα sun-tracking.

Στο [21] γίνεται μία αρκετή σημαντική έρευνα πάνω σε ανοιχτού βρόχου συστήματα suntracking. Τα συστήματα αυτά δε μπορούν να αντιληφθούν σφάλματα λειτουργίας, οπότε για την υιοθέτηση τους απαιτείται μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, πρέπει να έχουν μικρό υπολογιστικό κόστος. Ένα πλήθος αλγορίθμων αναλύεται για να προκύψει τελικά ένας αλγόριθμος με βάση τον καθολικό χρόνο και την τοποθεσία. Η βασική αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου στηρίζεται στο γεγονός ότι υπολογίζει τη θέση του Ήλιου όχι με βάση τις τοποκεντρικές γεωγραφικές συντεταγμένες αλλά τις γεωκεντρικές γεωγραφικές συντεταγμένες. Ο αλγόριθμος αυτός πετυχαίνει 15% και 22% καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τους άλλους αλγόριθμους, όσον αφορά τη ζενιθιακή και αζιμούθια γωνία του Ήλιου.

#### 3.2.2 Συστήματα sun-tracking κλειστού βρόχου

Τα συστήματα sun-tracking κλειστού βρόχου βασίζονται στην αρχή της επίβλεψης και ανατροφοδότησης. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχει ένα σύνολο αισθητήρων οι οποίοι μετράνε κάποιες ποσότητες και μεταδίδουν τα δεδομένα σε έναν ελεγκτή, ο οποίος τα επεξεργάζεται και αποφασίζει για την επόμενη κίνηση.

Στο [22] παρουσιάζεται ένα μονοαξονικό σύστημα sun-tracking το οποίο παρακολουθεί την κίνηση του Ήλιου στον άξονα ανατολή-δύση. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από τρεις φωτοαντιστάσεις (LDRs). Κάθε φωτοαντίσταση είναι υπεύθυνη για διαφορετική λειτουργία: η πρώτη ανιχνεύει την κατάσταση εστίασης του συλλέκτη, η δεύτερη την παρουσία ή απουσία σύννεφων και η τρίτη το διαχωρισμό νύχτας-ημέρας. Οι έξοδοι των φωτοαισθητήρων εισέρχονται σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, το οποίο με τη σειρά του ελέγχει ένα χαμηλών στροφών 12 V DC κινητήρα έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη κλίση του Φ/Β συλλέκτη. Το σχεδιάγραμμα του συστήματος και οι λειτουργίες του παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα συστήματος [22].

Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος φωτοαισθητήρας είναι τοποθετημένος στην ανατολική περιοχή του συλλέκτη και σκιάζεται μερικώς από το πλαίσιο του. Ο αισθητήρας αυτός ενεργοποιείται μόνο στην απευθείας ακτινοβολία, οπότε και ο συλλέκτης είναι εστιασμένος. Οποιαδήποτε αλλαγή της θέσης του Ήλιου, συνεπάγεται αλλαγή της αρχικής σκίασης του αισθητήρα και ενεργοποίηση του κινητήρα. Ο δεύτερος αισθητήρας απλά ελέγχει αν η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι κάτω από ένα κατώφλι, γεγονός το οποίο σημαίνει συνθήκες συννεφιάς. Η ύπαρξη συννεφιάς έχει ως αποτέλεσμα την απενεργοποίηση του κινητήρα για ένα χρονικό διάστημα ίσο με 2 λεπτά και 7 δευτερόλεπτα. Μετά από αυτό το διάστημα, ο αισθητήρας ελέγχει ξανά για συννεφιά. Αν η συννεφιά υποχωρήσει, εκκινείται η διαδικασία εστίασης με τη χρήση του πρώτου αισθητήρα. Ο τρίτος είναι ο αισθητήρας ημέρας ο οποίος επαναφέρει τον Φ/β συλλέκτη στην προκαθορισμένη θέση για την ανατολή του Ήλιου μόλις ο Ήλιος δύσει. Το σύστημα έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια στην ανίχνευση του Ήλιου. Η απόκλιση του είναι περί τις 0.2° και μπορεί να φτάσει 0.05° σε συνθήκες υψηλών τιμών ακτινοβολίας  $(600 \text{ W/m}^2 \text{ και μεγαλύτερες})$ . Το κύριο μειονέκτημα των φωτοαντιστάσεων είναι ότι δε μπορούν να διακρίνουν τη διάγυτη από την απευθείας ακτινοβολία. Το πρόβλημα, όμως, αυτό λύνεται με την προσθήκη μιας μεταβλητής αντίστασης και τον καθορισμό ενός κατωφλίου για την διάκριση της Ολικής ακτινοβολίας σε διάχυτη και απευθείας. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του ελέγχου κίνησης.



Design and construction of a one-axis Sun-tracking system

Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ελέγχου [22].

Στο [23] παρουσιάζεται ένας μηχανισμός sun-tracking 2 αξόνων για την αύξηση της απόδοσης ενός παραβολικού συλλέκτη. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να ελέγχει τη θέση του Ήλιου στον άζονα αζιμούθιου κάθε 3-4 λεπτά και στον άζονα ύψους κάθε 4-5 λεπτά. Τα σύστημα αποτελείται από δύο πανομοιότυπα υποσυστήματα, ένα υπεύθυνο για κάθε άξονα. Κάθε υποσύστημα αποτελείται από δύο παρακείμενες φωτοαντιστάσεις, με ένα διαχωριστικό συγκεκριμένου ύψους ανάμεσα τους. Το διαχωριστικό εξυπηρετεί τη σκίαση των αντιστάσεων έτσι ώστε να δημιουργείται διαφορά της σκίασης τους, δηλαδή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Το σύστημα στηρίζεται στην αρχή ότι μηδενική διαφορά τάσης μεταξύ των αντιστάσεων συνεπάγεται κάθετη πρόσπτωση στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου, δηλαδή μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Πειράματα έδειξαν ότι το σύστημα αυτό με κατανάλωση μόλις 0.5 Whr παρήγαγε 75% περισσότερη ενέργεια έναντι ενός συστήματος σταθερής κλίσης.

Στο [24] παρουσιάζεται ένα σύστημα ανίχνευσης της θέσης του Ήλιου δύο αξόνων (αζιμούθιο, ανύψωση) το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απευθείας ακτινοβολίας του Ήλιου με τη χρήση ενός πυρηλιόμετρου (pyrheliometer). Το σύστημα αυτό έχει την εξής καινοτομία: μπορεί να λειτουργήσει με δύο διαφορετικούς τρόπους, είτε ως κλειστού είτε ως ανοιχτού βρόχου. Υπό συνθήκες συννεφιάς το σύστημα λειτουργεί ως ανοιχτού βρόχου και ένα πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θέσης του Ήλιου βάσει της συγκεκριμένης γεωγραφικής θέσης και αναλαμβάνει τον έλεγχο της κίνησης.

Η ακριβής παρακολούθηση της θέσης του Ήλιου από το πυρηλιόμετρο, πραγματοποιείται από τη συνδυαστική κίνηση και των δύο αξόνων. Ένα ποτενσιόμετρο και δύο διακόπτες χρησιμοποιούνται σε κάθε πλαίσιο κάθε άξονα για την αποφυγή της μετακίνησης του πυρηλιόμετρου εκτός επιθυμητών ορίων. Ένας ανιχνευτής καταγραφεί την ηλιακή ακτινοβολία για τον εντοπισμό της έναρξης και της λήξης της ημέρας. Ο αισθητήρας ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον εντοπισμό της θέσης του Ήλιου είναι μια φωτοδίοδος τεσσάρων τεταρτημορίων. Ο αισθητήρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Αισθητήρας τεσσάρων τεταρτημορίων [24].

Ο αισθητήρας αποτελείται από τέσσερις βασικές ζώνες: νοτιοδυτική (SW), βορειοδυτική (NW), βορειοανατολική (NE) και νοτιοανατολική (SE). Κάθε ζώνη παράγει μία τιμή ρεύματος ανάλογα με το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτή. Το φως κατευθυνόμενο στον αισθητήρα περνάει μέσω μιας οπής η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μη-ισόποση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στις τέσσερις ζώνες του αισθητήρα εφόσον αυτός δεν είναι εστιασμένος. Η κίνηση του πυρηλιόμετρου γίνεται έως ότου επέλθει η ισορροπία των ζωνών της φωτοδιόδου. Για όσο χρονικό διάστημα η τιμή της φωτοδιόδου δεν πέφτει κάτω από ένα όριο, το σύστημα εξακολουθεί να δουλεύει σαν κλειστού βρόχου. Γενικά πρόκειται για ένα αξιόπιστο και οικονομικό σύστημα που μπορεί να εξυπηρετήσει και μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, όπως Φ/Β πλαίσια.

Στο [25] παρουσιάζεται ένα σύστημα διόρθωσης ενός αυτόματου ηλιοστάτη. Ο ηλιοστάτης χρησιμοποιούσε ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου υπολογίζοντας τη θέση του Ήλιου σύμφωνα με ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο παρουσίαζε αρκετά προβλήματα. Το διορθωμένο σύστημα βασίζεται σε μηχανική όραση και στη λήψη εικόνων από έναν αισθητήρα εικόνας (CCD). Πρόκειται για μία ηλιακή πλατφόρμα στην οποία ένα πλήθος ηλιοστατών συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν δέκτη ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος σε έναν πύργο έτσι ώστε η θερμότητα που αναπτύσσεται να τροφοδοτεί μία ηλεκτρική γεννήτρια. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το σύστημα.


Σχήμα 3.6 Σχηματική παρουσίαση του συστήματος [25].

Το προτεινόμενο σύστημα χρησιμοποιεί μία ασπρόμαυρη CCD κάμερα η οποία λαμβάνει εικόνα της αντανάκλασης του Ήλιου από κάθε ηλιοστάτη σε ένα συγκεκριμένο σημείο ελέγχου. Το σχήμα της αντανάκλασης μεταβάλλεται συνεχώς λόγω της σχετικής κίνησης Γης-Ήλιου. Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στο γεγονός ότι το προβλεπόμενο σχήμα της αντανάκλασης είναι γνωστό. Οπότε, ένας πολύπλοκος αλγόριθμος υπολογίζει τις παραμέτρους που απαιτούνται και κινεί τον κάθε ηλιοστάτη έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στο [26] προτείνεται ένα σύστημα sun-tracking το οποίο χρησιμοποιείται σε έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας (power plant). Το συγκεκριμένο είδος αποτελείται από ένα κεντρικό πύργο λήψης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία εστιάζεται σε αυτόν με τη χρήση ηλιοστατών που διαθέτουν καθρέφτες. Η κίνηση των ηλιοστατών στη συγκεκριμένη κατασκευή γίνεται με χρήση πολύπλοκων εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του Ήλιου. Όμως, η μέθοδος αυτή δεν είναι επιτυχής σε συνθήκες συννεφιάς. Μία μέθοδος με χρήση κάμερας υλοποιήθηκε στο [25] για την ίδια εγκατάσταση, αλλά η μεγάλη πολυπλοκότητα του είναι μειονέκτημα. Οπότε, προτείνεται ένα σύστημα με τη χρήση ενός ηλιακού αισθητήρα. Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από δύο φωτοδιόδους οι οποίες είναι μερικώς καλυμμένες από μία μεταλλική επιφάνεια με οπή, η οποία επιτρέπει τη διέλευση του ηλιακού φωτός. Ο αισθητήρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Ο αισθητήρας του συστήματος [26].

Όταν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία στον αισθητήρα, μόνο ένα κομμάτι της επιφάνειας κάθε φωτοδιόδου φωτίζεται. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παράγει μία τιμή ρεύματος η οποία είναι ανάλογη της φωτιζόμενης περιοχής κάθε φωτοδιόδου. Η περιοχή, εξαρτάται από τη σκιά που δημιουργείται από τη μεταλλική επιφάνεια, και επομένως εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Συμπερασματικά, ο αισθητήρας στηρίζεται στη διαφορά της τιμής ρεύματος που παράγεται από τις δύο φωτοδιόδους. Υπάρχουν συνολικά δύο αισθητήρες, ένας για κάθε άξονα κίνησης του ηλιοστάτη. Σε περιπτώσεις συννεφιάς, ο αλγόριθμος, συγκρίνοντας την τιμή ρεύματος με ένα κατώφλι, βάζει το σύστημα σε αναμονή. Η αναμονή διαρκεί 15 λεπτά, μετά από αυτό ο αλγόριθμος ψάχνει εκ νέου τη βέλτιστη θέση όπου οι τιμές ρεύματος των δύο φωτοδιόδων είναι ίσες. Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και επιτυγχάνεται πολύ μικρή απόκλιση.

Στο [27] προτείνονται τρόποι βελτίωσης του συστήματος sun-tracking που αναπτύχθηκε στο [26]. Μία από αυτές είναι η αντικατάσταση της μεταλλικής επιφάνειας με οπή που χρησιμοποιήθηκε, από μία άλλη η οποία καλύπτει μερικώς τις φωτοδιόδους. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με τη μόνη διαφορά ότι η ευαισθησία του κυκλώματος στη διάχυτη ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη, κάτι το οποίο θεωρείται μειονέκτημα στη συγκεκριμένη έρευνα. Η βασική διαφορά έγκειται στην υλοποίηση ενός αισθητήρα τεσσάρων τεταρτημορίων. Κάθε τεταρτημόριο αποτελείται από μία φωτοδίοδο η οποία σκιάζεται μερικώς από μία μεταλλική επιφάνεια. Ο αισθητήρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Ο αισθητήρας του συστήματος [27].

Παρόλα ταύτα, το πρόβλημα που δημιουργείται σε συνθήκες συννεφιάς εξακολουθεί να ισχύει, αν και το σύστημα πετυχαίνει μεγάλη ακρίβεια σε συνθήκες ηλιοφάνειας. Λύση στο πρόβλημα αυτό δίδεται με την αποθήκευση των τελευταίων κινήσεων του sun-tracking μηχανισμού. Όταν το σύστημα ανιχνεύσει συννεφιά, κινείται σύμφωνα με το πρότυπο των τελευταίων κινήσεων του σε συνθήκες ηλιοφάνειας. Το προτεινόμενο σύστημα αφού εξετάστηκε πειραματικά πέτυχε πολύ καλά αποτελέσματα.

Στο [28] προτείνεται ένας ελεγκτής προγραμματιζόμενης λογικής (PLC) για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου. Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε δύο φωτοαντιστάσεις οι οποίες χωρίζονται από ένα εμπόδιο το οποίο εξυπηρετεί την παροχή σκίασης σε μία από τις δύο. Αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται μείωση της αντίστασης του αισθητήρα. Οι αναλογικές τιμές ρεύματος των δύο αισθητήρων συγκρίνονται από το PLC το οποίο παράγει ένα κατάλληλο σήμα κίνησης του συστήματος. Ο επιθυμητός στόχος είναι η ισότητα των τιμών των αισθητήρων, δηλαδή ισόποση προσπίπτουσα ακτινοβολία που σημαίνει ότι το Φ/Β πλαίσιο είναι εστιασμένο. Πρόκειται για σύστημα ενός άξονα και συγκεκριμένα του άξονα ανατολή-δύση και έχει ένα εύρος κίνησης 120°. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν 40% αύξηση της παραγόμενης ισχύος έναντι ενός σταθερού συστήματος τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Περί το μεσημέρι, η αύξηση δε ξεπέρασε το 2-4%, οπότε η συνολική αύξηση πλησιάζει το 20% στη διάρκεια της ημέρας, εν συγκρίσει με ένα σύστημα

Στο [29] προτείνεται ένας ηλιοστάτης κλειστού βρόχου για τον προσανατολισμό μιας ισημερινής βάσης (πρόκειται για βάσεις σχεδιασμένες ειδικά για όργανα τα οποία ακολουθούν την περιστροφή του ουράνιου θόλου, συνήθως χρησιμοποιούνται από αστρονομικά τηλεσκόπια). Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται δύο φωτοκύτταρα τα οποία βρίσκονται δίπλα στον πυθμένα ενός κουτιού. Στην κορυφή του κουτιού υπάρχει μία εγκοπή για να διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία. Τα φωτοκύτταρα παράγουν ρεύμα στην έξοδο τους, ανάλογη του μεγέθους της φωτιζόμενης επιφάνειας. Οπότε, στόχος του συστήματος είναι η κίνηση του, έτσι ώστε τα φωτοκύτταρα να παράγουν ίδια τιμή ρεύματος στην έξοδο τους, το οποίο ισούται με ίδια ποσότητα ακτινοβολίας στην επιφάνεια τους. Τα πειράματα έδειξαν ότι σε συνθήκες ηλιοφάνειας το περιθώριο λάθους άγγιζε τις 0.6°. Γενικά, το σύστημα δε προτείνεται σε μεγάλες εγκαταστάσεις λόγω μειωμένης απόδοσης σε συνθήκες συννεφιάς.

Στο [30] προτείνεται ένα σύστημα sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου με τη χρήση δύο φωτοαντιστάσεων (LDRs). Η αρχή λειτουργίας έγκειται στην διαφορά του ρεύματος εξόδου των δύο φωτοαντιστάσεων η οποία πρέπει να διατηρείται μηδενική ώστε να επιτυγχάνεται ο σωστός προσανατολισμός του Φ/Β πλαισίου. Επιπλέον, δύο αντιστάσεις ορίου χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του εύρους κίνησης του. Οι φωτοαντιστάσεις βρίσκονται τοποθετημένες πάνω στο πλαίσιο σχηματίζοντας γωνία 30° όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτείται χειροκίνητη εποχιακή αλλαγή της κλίσης του.



Σχήμα 3.10 Σχηματική αναπαράσταση του αισθητήριου μηχανισμού [30].

Στο [31] υλοποιείται ένα σύστημα το οποίο συνδυάζει έναν παραβολικό συλλέκτη και ένα μηχανισμό sun-tracking για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου. Το αισθητήριο του συστήματος είναι μία κάμερα η οποία εξασφαλίζει την εστίαση του συλλέκτη στον Ήλιο. Η κίνηση ελέγχεται μέσω μιας κάρτας ήχου. Η κάμερα λαμβάνει φωτογραφίες και ο αλγόριθμος μετακινεί κατά τέτοιο τρόπο τον παραβολικό συλλέκτη, έτσι ώστε ο Ήλιος να κεντράρεται στη φωτογραφία. Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η μορφή του συλλέκτη.



Σχήμα 3.11 Σχεδιασμός του συστήματος [31].

Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι επιτυγχάνονται σαφώς καλύτερα αποτελέσματα συγκρινόμενα με ένα Φ/Β στοιχείο που είχε τοποθετηθεί στη βέλτιστη σταθερή θέση.

Στο [32] προτείνεται ένα σύστημα sun-tracking με φωτοαντιστάσεις. Το σύστημα είναι μονοαξονικό (άξονα αζιμούθιου) και αποτελείται από τρία υποσυστήματα: τις φωτοαντιστάσεις, ένα βηματικό κινητήρα και ένα κύκλωμα οδήγησης. Το πλήθος των φωτοαντιστάσεων είναι δύο και βρίσκονται τοποθετημένες επάνω στο Φ/Β πλαίσιο για να εξασφαλίζουν την κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στο πλαίσιο. Τα πειράματα έδειξαν 50% αύξηση της παραγόμενης ισχύος έναντι ενός συστήματος σταθερής κλίσης.

Ένα σύστημα δύο αξόνων παρουσιάζεται στο [33], στο οποίο ο αισθητήρας του συστήματος είναι μία φωτοδίοδος. Η φωτοδίοδος αποτελείται από τέσσερα στοιχεία τα οποία είναι οργανωμένα στη μορφή ενός κύκλου και κάθε αισθητήρας αντιστοιχεί σε ένα τεταρτημόριο. Οι τιμές ρεύματος των στοιχείων αυτών είναι ανάλογες της προσπίπτουσας ακτινοβολία. Έτσι, όταν τα στοιχεία αυτά φωτίζονται ισόποσα παράγουν ίσες τιμές ρεύματος. Σε αυτό στηρίζεται και η λειτουργία του συστήματος. Ο έλεγχος του συστήματος πραγματοποιείται από έναν αλγόριθμο ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Οι κινητήρες ελέγχονται με PWM σήματα. Το σύστημα, μετά από πειράματα σε εργαστήριο, αποδεικνύεται να εντοπίζει αποδοτικά τον Ηλιο.

### 3.3 Τεχνικές εύρεσης σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT)

Η ηλιακή ενέργεια είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη μέσω των Φ/Β στοιχείων. Ωστόσο, η εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από ένα Φ/Β στοιχείο δεν είναι εύκολη διαδικασία. Απαιτείται ανίχνευση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος. Ένα Φ/Β στοιχείο λειτουργεί σύμφωνα με μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης/ισχύος-τάσης, όπως έχει αναφερθεί στην

παράγραφο 1.2 υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Σε αυτή την χαρακτηριστική καμπύλη υπάρχει μόνο ένα σημείο στο οποίο το Φ/Β πλαίσιο παράγει τη μέγιστη ισχύ. Προφανώς, το σημείο αυτό δεν είναι σταθερό. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος εύρεσης του σημείου παραγωγής μέγιστης ισχύος είναι με τη χρήση ενός DC/DC μετατροπέα τάσης (DC/DC converter) στον οποίο ελέγχεται η σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) ενός PWM (Pulse Width Modulation) σήματος που εφαρμόζεται στο διακόπτη του μετατροπέα. Σκοπός είναι η λειτουργία του μετατροπέα με τάση εισόδου, ίση με την τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου που παράγει τη μέγιστη ισχύ [34]. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου.



Σχήμα 3.12 Σχηματικό διάγραμμα Φ/Β συστήματος με χρήση DC/DC μετατροπέα [34].

Πλήθος τεχνικών εύρεσης του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος έχουν ερευνηθεί, οι οποίες ποικίλλουν από πλήθος απόψεων: πολυπλοκότητα, απαιτούμενοι αισθητήρες, ταχύτητα σύγκλισης στο μέγιστο σημείο, κόστος και τρόπος υλοποίησης. Η ποικιλία είναι τεράστια και κάθε τεχνική εξυπηρετεί διαφορετικές προτεραιότητες. Παρακάτω αναλύονται οι πιο γνωστές-δημοφιλείς τεχνικές MPPT.

Η μέθοδος της κλασματικής τάσης ανοιχτού-κυκλώματος (fractional open circuit voltage) βασίζεται στην παρατήρηση ότι ο λόγος της τάσης μέγιστης ισχύος ( $V_{MPP}$ ) προς την τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) είναι περίπου σταθερός για κάθε πιθανό σετ ακτινοβολίας - θερμοκρασίας:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \approx k$$
 (3.1)

όπου k μία σταθερά η οποία εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε  $\Phi/B$  στοιχείου.

Εφόσον είναι γνωστή η τιμή του k, μπορεί να υπολογιστεί η  $V_{MPP}$  από τη  $V_{oc}$ . Η τεχνική αυτή είναι πολύ απλή αλλά έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, για τη μέτρηση της  $V_{oc}$  πρέπει να απενεργοποιηθεί προσωρινά ο μετατροπέας DC/DC, γεγονός που σημαίνει απώλεια

ενέργειας και δεύτερον το  $\Phi/B$  πλαίσιο δε λειτουργεί ποτέ ακριβώς στο  $V_{MPP}$  αφού το k αποτελεί μία εκτίμηση [35].

Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι MPPT είναι οι "**Ανάβασης Λόφου** (Hill Climbing)" ή "**Διαταραχής & Παρατήρησης (Perturb & Observe)**". Περιλαμβάνουν μία διαταραχή στη σχετική διάρκεια αγωγής του DC/DC μετατροπέα ή στην τάση λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου. Η διαταραχή της σχετικής διάρκειας αγωγής του μετατροπέα, συνεπάγεται διαταραχή στο ρεύμα εξόδου του Φ/Β πλαισίου και κατά επέκταση στην τάση και στην ισχύ εξόδου του.

Στο Σχήμα 3.13, φαίνεται ότι αύξηση ή μείωση της τάσης συνεπάγεται αύξηση ή μείωση της ισχύος, αντίστοιχα, όταν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά του MPP. Δεξιά της καμπύλης, αύξηση της τάσης συνεπάγεται μείωση της ισχύος και αντίστροφα.



Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Φ/Β στοιχείου. [38].

Επομένως, αν η τελευταία διαταραχή τάσης οδήγησε σε αύξηση της ισχύος, πρέπει να ακολουθήσει διαταραχή προς την ίδια κατεύθυνση και αντίστροφα. Ο αλγόριθμος συνοψίζεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Σύνοψη των μεθόδων Ανάβασης Λόφου/Διαταραχής & Παρατήρησης					
Διαταραχή	Πρόσημο μεταβολής ισχύος	Επόμενη διαταραχή			
Θετική	Θετική	Θετική			
Θετική	Αρνητική	Αρνητική			
Αρνητική	Θετική	Αρνητική			
Αρνητική	Αρνητική	Θετική			

Όπως φαίνεται, ο αλγόριθμος είναι πολύ απλός και δεν απαιτούνται μαθηματικές πράξεις, απλά μία παρατήρηση. Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να λειτουργήσει ακριβώς στο MPP αλλά ταλαντεύεται κοντά και γύρω από αυτό. Μία λύση σε αυτό μπορεί να είναι η μείωση της διαταραχής αλλά αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας σύγκλισης στο MPP. Οπότε, η εφαρμογή ενός μεταβλητού βήματος δίνει μία ικανοποιητική λύση. Οι προαναφερθέντες μέθοδοι έχουν το εξής μειονέκτημα: αποτυγχάνουν κατά τη διάρκεια γρήγορων καιρικών αλλαγών. Παρατηρώντας το Σχήμα 3.13, έστω ότι βρισκόμαστε στο σημείο Α της καμπύλης P<sub>1</sub> και η επόμενη διαταραχή έχει κατεύθυνση δεξιά της καμπύλης. Έστω, ξανά, ότι αλλάζουν οι καιρικές συνθήκες οπότε η νέα καμπύλη είναι η P<sub>2</sub>. Ενώ λοιπόν η διαταραχή θα οδηγούσε στο σημείο B, τελικά θα οδηγήσει στο σημείο C. Αυτό, όμως, θα έχει σαν αποτέλεσμα η επόμενη διαταραχή να έχει δεξιά κατεύθυνση κάτι το οποίο θα μας οδηγήσει μακριά από το MPP.



Σχήμα 3.13 Απόκλιση από το MPP λόγω έντονης ατμοσφαιρικής αλλαγής [36].

Η μέθοδος Επαυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance, IncCond) στηρίζεται στην αρχή ότι η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης στο MPP είναι ίση με 0. Γενικά ισχύουν τα εξής:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0, \ \sigma \tau o \ MPP \\ \frac{dP}{dV} > 0, \ \alpha \rho \iota \sigma \tau \varepsilon \rho \dot{\alpha} \ \tau o \upsilon \ MPP \\ \frac{dP}{dV} < 0, \ \delta \varepsilon \xi \iota \dot{\alpha} \ \tau o \upsilon \ MPP \end{cases}$$
(3.2)

Και γνωρίζοντας ότι:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dv} \cong I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V}$$
(3.3)

Προκύπτει ότι:

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \sigma \tau o MPP\\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \alpha \rho \iota \sigma \tau \varepsilon \rho \dot{\alpha} \tau \sigma v MPP\\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \delta \varepsilon \xi \iota \dot{\alpha} \tau \sigma v MPP \end{cases}$$
(3.4)

Επομένως, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής στο Σχήμα 3.14, το MPP μπορεί να βρεθεί συγκρίνοντας τη στιγμιαία αγωγιμότητα (I/V) με την επαυξητική αγωγιμότητα (ΔΙ/ΔV).



Σχήμα 3.14 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου "Επαυξητικής αγωγιμότητας" [36].

Οι μέθοδοι ελέγχου ασαφούς λογικής (Fuzzy logic controllers) πλεονεκτούν στα εξής σημεία: δεν χρειάζονται κάποιο μαθηματικό μοντέλο και διαχειρίζονται αποδοτικότερα τη μη-γραμμικότητα του συστήματος. Οι μικροελεγκτές ασαφούς λογικής λειτουργούν αρκετά καλά υπό μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες, αλλά η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται από την επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας του ελεγκτή.

Παράλληλα με τους ελεγκτές ασαφούς λογικής δημιουργήθηκαν και τεχνικές οι οποίες στηρίζονται στα **νευρωνικά δίκτυα (neural networks)**. Η απόδοση αυτών των μεθόδων εξαρτάται από το πλήθος των δοκιμών εκπαίδευσης που έχουν γίνει στο νευρωνικό δίκτυο.

# 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

### 4.1 Το σύστημα sun-tracking που αναπτύχθηκε

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρόκειται για ένα σύστημα sun-tracking δύο αξόνων, κλειστού βρόχου το οποίο συνεργάζεται με ένα σύστημα MPPT. Το σύστημα sun-tracking αξιοποιεί τους αισθητήρες μέτρησης τάσης και ρεύματος του συστήματος MPPT για τον έλεγχο του.



Σχήμα 4.1 Γενικό διάγραμμα του συστήματος.

Το σύστημα MPPT στηρίζεται στη μέθοδο "Διαταραχή και παρατήρηση" η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 3.3. Η ίδια μέθοδος δοκιμάστηκε έτσι ώστε να απενεργοποιείται εναλλακτικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του sun-tracking, για την εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν τη λειτουργία του MPPT κατά τη διάρκεια της διαδικασίας sun-tracking. Όπως, περιγράφεται στην ίδια παράγραφο, το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ταλαντώνεται κοντά και γύρω από το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Μία προτεινόμενη λύση είναι η μείωση του βήματος διαταραχής. Αυτή η λύση όμως, έχει σα συνέπεια τη μείωση της ταχύτητας σύγκλισης στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Για αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε μία παραλλαγή της μεθόδου αυτής με μεταβλητό βήμα. Ομοίως με την κλασσική μέθοδο, δοκιμάστηκε η παραλλαγή της έτσι ώστε να απενεργοποιείται εναλλακτικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του sun-tracking.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η FPGA Spartan 3AN η οποία παίρνει σαν εισόδους τις τιμές τάσης και ρεύματος εξόδου του Φ/Β πλαισίου. Για την ανάγνωση των τιμών αυτών απαιτείται μία πρότερη επεξεργασία. Καταρχήν, η τιμή ρεύματος μετατρέπεται σε τιμή τάσης μέσω ενός αισθητηρίου Hall. Μετέπειτα και οι δύο αναλογικές τιμές ρυθμίζονται από δύο τελεστικούς ενισχυτές έτσι ώστε να επιτευχθεί η ανάγνωση τους από τον μετατροπέα A/D (analog to digital) που βρίσκεται στην πλακέτα της FPGA. Για την ανάγνωση των ψηφιακών τιμών από την FPGA υλοποιήθηκε το πρωτόκολλο SPI. Στη συνέχεια, η FPGA υπολογίζει την τιμή της παραγόμενης ισχύος, η οποία χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο του συστήματος για τον έλεγχο της κίνησης των βηματικών κινητήρων και του διακόπτη του μετατροπέα DC/DC. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με ένα σύνολο εννιά εξόδων: τέσσερις εξόδους για κάθε βηματικό κινητήρα και μία για το σήμα μεταβαλλόμενης σχετικής διάρκειας αγωγής (PWM). Το PWM σήμα αφορά την υλοποίηση του συστήματος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος.

Όσον αφορά τους βηματικούς κινητήρες, η κίνηση τους πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση κατάλληλων παλμών. Ο κάθε κινητήρας είναι υπεύθυνος για διαφορετικό άξονα, (Σχήμα 4.2) οι οποίοι είναι οι εξής: ο άξονας κίνησης στον οποίο μεταβάλλεται η αζιμουθιακή γωνία του Φ/Β πλαισίου (άξονας Χ) και ο άξονας στον οποίο μεταβάλλεται η γωνία ανύψωσης (άξονας Υ).



Σχήμα 4.2 Άζονες κίνησης του συστήματος sun-tracking.

Το φορτίο του συστήματος είναι μία μπαταρία 12 V και χωρητικότητας 7 Ah, η οποία χρησιμοποιείται επίσης και για την τροφοδοσία των βηματικών κινητήρων, των κυκλωμάτων οδήγησης τους και των αισθητήρων μέτρησης τάσης και ρεύματος.

## 4.2 Βηματικοί κινητήρες

Για την κίνηση του Φ/Β πλαισίου χρησιμοποιήθηκαν δύο βηματικοί κινητήρες οι οποίοι αποτέλεσαν μέρος συστήματος που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [37]. Η επιλογή τους έγινε με κριτήριο την απαιτούμενη ροπή για την υλοποίηση του πειράματος.

Οι βηματικοί κινητήρες είναι ηλεκτρικοί κινητήρες η οδήγηση των οποίων πραγματοποιείται με ηλεκτρικούς παλμούς συγκεκριμένης ακολουθίας στους ακροδέκτες εισόδου τους. Γενικά, οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε αρκετές κατηγορίες με διάφορα κριτήρια. Η κατηγοριοποίηση που μας ενδιαφέρει στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αυτή που προκύπτει με βάση τον τρόπο οδήγησης. Οι κατηγορίες κινητήρων που προκύπτουν είναι οι εξής: οι μονοπολικοί (unipolar), οι διπολικοί (bipolar) και οι bifilar (ή universal) οι οποίοι μπορούν να οδηγηθούν είτε ως μονοπολικοί είτε ως διπολικοί.

Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα, καθένα από τα οποία έχει μία κεντρική ελικοτομή. Οι ελικοτομές μπορούν να συνδεθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους: σαν δύο ξεχωριστά καλώδια ή σαν ένα καλώδιο το οποίο έχει προκύψει από την σύνδεση τους στο εσωτερικό του κινητήρα. Έτσι, οι μονοπολικοί κινητήρες μπορεί να έχουν πέντε ή έξι ακροδέκτες. Τα κεντρικά καλώδια ή το κεντρικό καλώδιο συνδέεται με την τροφοδοσία και τα υπόλοιπα καλώδια συνδέονται στη γείωση. Οι διπολικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα και έχουν τέσσερα καλώδια. Το ρεύμα περνάει από όλο το τύλιγμα και όχι από το μισό όπως συμβαίνει στους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα τυλίγματα των κινητήρων.



Σχήμα 4.3 Τυλίγματα στη Διπολική και Μονοπολική οδήγηση των βηματικών κινητήρων, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση μας, οι βηματικοί κινητήρες είναι bifilar και χρησιμοποιήθηκε μονοπολική οδήγηση διπλής φάσης. Πιο συγκεκριμένα, οι βηματικοί κινητήρες ως bifilar διαθέτουν τέσσερα τυλίγματα (1, 2, 3, 4 στο Σχήμα 4.4), δηλαδή 8 ακροδέκτες (1, 1', 2, 2', 3, 3', 4, 4'), ανάλογα με τη σύνδεση των οποίων χρησιμοποιούνται είτε ως μονοπολικοί είτε ως διπολικοί. Η μονοπολική οδήγηση επιτυγχάνεται με την ένωση των τυλιγμάτων τους ανά δύο σε σειρά. Έτσι προκύπτουν δύο τυλίγματα (12', 34') με έξι ακροδέκτες (1, 1'2, 2', 3, 3'4, 4). Τα σημεία σύνδεσης των τυλιγμάτων (1'2, 3'4) συνδέονται με την τροφοδοσία ενώ οι ακροδέκτες των τυλιγμάτων (1, 2', 3, 4') γειώνονται. Όσον αφορά την οδήγηση διπλής φάσης, αυτό σημαίνει ότι σε κάθε βήμα ενεργοποιούνται δύο από τα αρχικά τυλίγματα, ένα σε κάθε νέο τύλιγμα. Ο τρόπος σύνδεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



**Σχήμα 4.4** Διπολική οδήγηση bifilar κινητήρα.

Οι διατάξεις για την οδήγηση των βηματικών κινητήρων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας [37].



**Σχήμα 4.5** Το κύκλωμα οδήγησης του βηματικού κινητήρα που είναι υπεύθυνος για την κίνηση στο *Χ* άζονα [37].



**Σχήμα 4.6** Το κύκλωμα οδήγησης του βηματικού κινητήρα που είναι υπεύθυνος για την κίνηση στον Υ άζονα [37].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η οδήγηση των βηματικών κινητήρων επιτυγχάνεται με κατάλληλες ακολουθίες τετραγωνικών παλμών τάσης. Οι παλμοί αυτοί διαβιβάζονται από την FPGA μέσω των pins του transmit header J15 (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Οι παλμοί-εξόδοι της FPGA.

Το σήμα PWM (A) στο Σχήμα 4.7 ελέγχει το διακόπτη του μετατροπέα DC/DC, καθώς κι αυτό μοιράζεται με το ίδιο header. Για κάθε κινητήρα απαιτούνται τέσσερις παλμοί (τέσσερα pins), καθώς τέσσερα είναι και τα τυλίγματα του. Τα σήματα για τον έλεγχο του κινητήρα του X άξονα είναι τα: X1, X2, X3, X4 και για τον έλεγχο του κινητήρα του Y άξονα είναι τα: Y1, Y2, Y3, Y4. Τα 1,2 και 3,4 σήματα για κάθε κινητήρα αντιστοιχούν στα τυλίγματα με κοινή κεντρική σύνδεση (σημεία A1-A4 στα Σχήματα 4.4 και 4.5 αντίστοιχα). Τα προηγούμενα ζευγάρια παλμών δε μπορούν να έχουν ταυτόχρονα την ίδια τιμή.

Το εύρος τιμών τάσης της πλακέτας είναι από 0 έως 3.3 V, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα στη συνεργασία με τους drivers ICL7667. Για αυτό μετατρέπεται η τιμή τους σε -5 έως +5 V από τους συγκριτές στο Σχήμα 4.6. Ο driver ICL7667 απενεργοποιεί τα Mosfet όταν δέχεται στην είσοδο του λογικό "1". Στη συνέχεια, η αναφορά σε παλμούς αντιστοιχεί στους παλμούς εξόδου της FPGA και όχι στους αντεστραμμένους παλμούς που παράγονται από τα ICL7667.

Συνοψίζοντας, για την κίνηση του κινητήρα απαιτείται μία ομάδα τεσσάρων παλμών. Η ομάδα αυτή μπορεί να πάρει μία από αυτές τις πέντε τιμές: 1001, 1010, 0110, 0101 και 1111. Η τελευταία τιμή δίδεται για την απενεργοποίηση των βηματικών κινητήρων. Για να κινηθεί ο κινητήρας προς μία κατεύθυνση πρέπει να ακολουθήσουμε αυτή την αλληλουχία των τεσσάρων πρώτων τιμών. Αντίθετη αλληλουχία συνεπάγεται και αντίθετη κίνηση του κινητήρα. Οι συνδυασμοί τιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Συνδυασμοί παλμών				
1°ς συνδυασμός 2°ς συνδυασμός				
1001	1001			
1010	0101			
0110	0110			
0101	1010			

Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος συνδυασμός αφορά τη θετική φορά κίνησης των κινητήρων και ο δεύτερος την αρνητική. Για τον άξονα Χ, θετική φορά κίνησης θεωρούμε τη φορά Ανατολή-Δύση, ενώ για τον άξονα Υ τη φορά Νότο-Βορρά.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές μεθοδολογίες κίνησης:

- 1. Διατήρηση της προηγούμενης θετικής φοράς,
- 2. Διατήρηση της προηγούμενης αρνητικής φοράς,

- 3. Αντιστροφή της προηγούμενης θετικής φοράς και
- 4. Αντιστροφή της προηγούμενης αρνητικής φοράς

Ουσιαστικά, οι μεθοδολογίες 1 και 4, όπως και η 2 και 3 είναι ίδιες. Οι 1 και 4 αναφέρονται σε θετική φορά κίνησης, ενώ οι 2 και 3 σε αρνητική φορά κίνησης. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται για την υλοποίηση του αλγορίθμου. Σε αλγοριθμικό επίπεδο για τον έλεγχο της κίνησης χρησιμοποιούνται τέσσερα σήματα για κάθε άξονα. Τα σήματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Σήματα ελέγχου κίνησης των βηματικών κινητήρων.					
Σήμα (#bit)	Περιγραφή	Τιμή			
D(1)	Διατήρηση φοράς	1(διατηρείται η φορά)			
F(1)	Φορά	1(θετική φορά)			
P(4)	Παλμοί	Πίνακας 4.1			
O(4)	Παλμοί	Πίνακας 4.1 + "1111"			

Συγκεκριμένα, το σήμα P έχει μία από τις τιμές του Πίνακα 4.1, έτσι ώστε να γνωρίζουμε ποια πρέπει να είναι η επόμενη τιμή. Όσον αφορά το σήμα Ο είναι η έξοδος της FPGA η οποία μπορεί να πάρει και την τιμή "1111" με την οποία απενεργοποιούνται οι βηματικοί κινητήρες. Βασικά, πρόκειται για τα ίδια σήματα με τη διαφορά ότι το σήμα Ο παίρνει την τιμή "1111" όταν σταματάει το sun-tracking. Τα σήματα αυτά είναι διαφορετικά για κάθε άξονα κίνησης εκτός από το σήμα D το οποίο υπολογίζεται εκ νέου κάθε φορά, οπότε δε χρειάζεται κάποιος διαχωρισμός μεταξύ αξόνων. Η αντίστοιχη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων της ακολουθίας παλμών.

Προφανώς, η αλλαγή του σήματος F είναι άμεσα εξαρτώμενη από το σήμα D. Με λίγα λόγια αλλαγή του σήματος F συνεπάγεται αλλαγή του σήματος D. Σε περιπτώσεις που αλλάζει η φορά κίνησης και η κίνηση αποτελείται από πολλά βήματα, το σήμα D θα αλλάξει δύο φορές, μία για την αλλαγή της φοράς όπως υπολογίζεται και μία για να διατηρηθεί η φορά των υπόλοιπων βημάτων της ίδιας κίνησης. Το κάθε βήμα διαρκεί 0.6 δευτερόλεπτα.

#### 4.3 DC/DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Ο DC/DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης που χρησιμοποιήθηκε, κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας [34]. Γενικά, ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step down ή buck converter) παράγει μία τάση εξόδου χαμηλότερη από τη τάση εισόδου. Η μέθοδος ελέγχου της τιμής της τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα (δηλαδή σταθερή περίοδος μετάβασης, T<sub>s</sub>) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι σε κατάσταση OFF (t<sub>off</sub>). Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μεταβάση με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM), με την οποία μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle, D) και συνεπακολούθως η τάση εισόδου. Η λειτουργία του εμφανίζεται στο Σχήμα 4.9. Η σχετική διάρκεια αγωγής ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας σε μία περίοδο μετάβασης κατά την οποία ο διακόπτης είναι σε κατάσταση ON (t<sub>on</sub>) ως προς την περίοδο μετάβασης. Συνοψίζοντας, ισχύουν οι εξής εξισώσεις:

$$T_s = t_{on} + t_{off} \tag{4.1}$$

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \tag{4.2}$$



Σχήμα 4.9 Το σήμα ελέγχου του μετατροπέα DC/DC.

Ο μετατροπέας DC/DC ελέγχεται από το PWM σήμα Α που φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Στο κύκλωμα του μετατροπέα DC/DC που χρησιμοποιήθηκε, περιλαμβάνονται οι αισθητήρες μέτρησης της τάσης και ρεύματος εξόδου του Φ/Β πλαισίου και οι έξοδοι τους συνδέονται στον μετατροπέα A/D του board της FPGA.

## 4.4 To FPGA board

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε το Spartan 3AN Starter Kit Board (Σχήμα 4.10) το οποίο διαθέτει την FPGA της οικογένειας XC3S700AN. Το board διαθέτει και ένα δικάναλο κύκλωμα αναλογικής εισόδου το οποίο αποτελείται από έναν προγραμματιζόμενο ενισχυτή (LTC6912-1) και έναν A/D (analog to digital) μετατροπέα (LTC1407A-1). Το κύκλωμα αυτό, το οποίο ελέγχεται από την FPGA, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10 Spartan 3AN FPGA Starter Kit board [38].



Σχήμα 4.11 Αναλογικό κύκλωμα εισόδου [38].

Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα αποτελείται από δύο προενισχυτές και δύο A/D μετατροπείς (Σχήμα 4.12). Τα αναλογικά σήματα συνδέονται στο header J22 (Σχήμα 4.11). Τα σήματα εισόδου είναι η τιμή τάσης εξόδου του Φ/B στοιχείου και η μετασχηματισμένη σε τάση, τιμή ρεύματος εξόδου του Φ/B πλαισίου, τα οποία παράγονται από τους αντίστοιχους αισθητήρες. Η επικοινωνία της FPGA με τον A/D μετατροπέα πραγματοποιείται μέσω του SPI πρωτόκολλου επικοινωνίας.





Το αναλογικό κύκλωμα του FPGA board διαβάζει την αναλογική τιμή που εφαρμόζεται στα pins VINA ή VINB (Σχήμα 4.12) και τη μετασχηματίζει σε μία 14-bit ψηφιακή αναπαράσταση (D) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$D[13:0] = GAIN \cdot \frac{(V_{in} - 1.65 \cdot V)}{1.25 \, V} \cdot 8192 \tag{4.3}$$

όπου

GAIN το κέρδος του ενισχυτή (ορίζεται από τον χρήστη),

1.65 V η τάση αναφοράς, η οποία παράγεται από έναν διαιρέτη τάσης (Σχήμα 4.12) και

 $V_{in}$ η αναλογική τιμή τάσης εισόδου στο αναλογικό κύκλωμα.

Επομένως, το 1.65 V αφαιρείται από την τάση εισόδου. Το εύρος τιμών εισόδου του A/D μετατροπέα είναι ±1.25 V ως προς την τάση αναφοράς. Η ψηφιακή αναπαράσταση της τιμής είναι συμπληρώματος ως προς δύο (two's complement), οπότε η τιμή μπορεί να είναι από  $-2^{13}$  έως  $2^{13}$ -1 με ακρίβεια  $2^{-13}$ .

Το πρωτόκολλο SPI (Serial Peripheral Interface) χρησιμοποιείται για τη σύγχρονη, σειριακή επικοινωνία της FPGA με τα περιφερειακά της πλακέτας, στην περίπτωση μας του αναλογικού κυκλώματος. Γενικά, η λειτουργία του πρωτοκόλλου είναι αμφίδρομη και ορίζεται ένας "αφέντης" και ένας ή περισσότεροι "σκλάβοι". Προφανώς, "αφέντης" είναι η FPGA και "σκλάβοι" ο δικάναλος προ-ενισχυτής και ο δικάναλος Α/D μετατροπέας.

Στο πρωτόκολλο ορίζονται τα εξής τέσσερα βασικά σήματα:

- SCLK (Serial CLocK): το ρολόι του πρωτοκόλλου όπως ορίζεται από τον "αφέντη",
- MISO (Master Input Slave Output): τα δεδομένα εισόδου του "αφέντη",
- MOSI (Master Output Slave Input): τα δεδομένα εισόδου του "σκλάβου" και
- SS (Slave Select): ενεργοποίηση του "σκλάβου".

Η επικοινωνία αφέντη σκλάβου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13:



Σχήμα 4.13 Το πρωτόκολλο SPI.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας και επικοινωνίας για κάθε κομμάτι του αναλογικού κυκλώματος. Όσον αφορά τον ενισχυτή, πρόκειται για ενισχυτή με αρνητικό και προγραμματιζόμενο κέρδος. Η διεπαφή του είναι σχετικά αργή υποστηρίζοντας συχνότητες ρολογιού μέχρι 10 MHz. Τα σήματα για τη διεπαφή FPGA και ενισχυτή παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3					
Σήμα (#bits)	Κατεύθυνση	Περιγραφή			
SPI_MOSI (8)	FPGA→ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ	ΚΕΡΔΟΣ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ			
AMP_CS (1)	FPGA→ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ	ΣΗΜΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ			
SPI_SCK (1)	FPGA→ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ	РОЛОЇ			
AMP_SHDN (1)	FPGA→ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ	RESET			
AMP_DOUT (8)	ENIΣXYTHΣ →FPGA	ΚΕΡΔΟΣ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ			

Το σήμα SPI\_MOSI αφορά το κέρδος του ενισχυτή. Πρόκειται για ένα 8-bit σήμα, ουσιαστικά δύο σήματα των 4-bit, ένα για κάθε κανάλι του ενισχυτή. Το κέρδος μπορεί να πάρει διάφορες τιμές οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Ο ενισχυτής ενεργοποιείται όταν το σήμα AMP\_CS γίνει 0 και μόλις ολοκληρωθεί η αποστολή όλων των bit κέρδους το σήμα γίνεται 1. Το σήμα AMP\_SHDN παραμένει 0 σε όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου. Το σήμα AMP\_DOUT επιστρέφει την τιμή του κέρδους του ενισχυτή και δε χρησιμοποιείται καθόλου στο σύστημα που αναπτύχθηκε.

Πίνακας 4.4										
κερλος	Σ ΔΥΑΔΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΕΡΔΟΥΣ						ΕΥΡΟΣ ΤΑΣΗΣ			
	B3	B2	<b>B1</b>	<b>B0</b>	A3	A2	A1	A0	MIN	MAX
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
-1	0	0	0	1	0	0	0	1	0.4	2.9
-2	0	0	1	0	0	0	1	0	1.025	2.275
-5	0	0	1	1	0	0	1	1	1.4	1.9
-10	0	1	0	0	0	1	0	0	1.525	1.775
-20	0	1	0	1	0	1	0	1	1.5875	1.7125
-50	0	1	1	0	0	1	1	0	1.625	1.675
-100	0	1	1	1	0	1	1	1	1.6375	1.6625

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η SPI διεπαφή με τον ενισχυτή.



Σχήμα 4.14 SPI διεπαφή με ενισχυτή [38].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14 το Most-Significant Bit στέλνεται πρώτο. Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα χρονισμού της διεπαφής.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα χρονισμού SPI διεπαφής με ενισχυτή [38].

Ο προγραμματισμός του ενισχυτή γίνεται μόνο μία φορά, κατά την έναρξη του αλγορίθμου. Αρχικά, το σήμα AMP\_CS γίνεται 0, οπότε ενεργοποιείται η διαδικασία. Ταυτόχρονα ενεργοποιείται το σειριακό ρολόι και στέλνεται το πρώτο bit. Ο ενισχυτής διαβάζει το bit στη θετική ακμή του ρολογιού. Συνεπώς, η αποστολή και λήψη έχουν διαφορά ενός κύκλου ρολογιού. Μόλις αποσταλούν και τα 8 bit, τότε το σήμα AMP\_CS γίνεται 1 και το σειριακό ρολόι απενεργοποιείται. Το κέρδος του ενισχυτή είναι πλέον προγραμματισμένο.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο A/D μετατροπέας. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα σήματα για τη διεπαφή FPGA και μετατροπέα A/D.

Πίνακας 4.5						
Σήμα (#bits)	Κατεύθυνση	Περιγραφή				
SPI_SCK (1)	FPGA $\rightarrow$ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ	ΡΟΛΟΪ				
AD_CONV (1)	FPGA $\rightarrow$ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ	ΣΗΜΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ				
ADC_OUT (14)	METATPOΠΕΑΣ $\rightarrow$ FPGA	ΨΗΦΙΑΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ				

Το σήμα AD\_CONV ενεργοποιεί τον μετατροπέα όταν η τιμή του γίνει ίση με 1 (δε πρόκειται για κλασσικό σήμα SPI). Μόλις ενεργοποιηθεί ο μετατροπέας, δειγματοληπτεί ταυτόχρονα και τα δύο κανάλια. Τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας (2x14-bit τιμές, μία για κάθε κανάλι) παρουσιάζονται στην επόμενη δειγματοληψία. Η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας είναι περίπου 1.5 MHz. Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η διεπαφή του μετατροπέα A/D.



Σχήμα 4.16 Διεπαφή μετατροπέα A/D [39].

Αρχικά, ενεργοποιείται το σήμα AD\_CONV και παραμένει ενεργό για χρονικό διάστημα ίσο με τρεις κύκλους του σειριακού ρολογιού. Αφού απενεργοποιηθεί, ενεργοποιείται το σειριακό ρολόι. Μετά από τρεις κύκλους του σειριακού ρολογιού αρχίζει η λήψη των bits της ψηφιακής αναπαράστασης των τιμών από την FPGA. Πρώτα στέλνεται η τιμή που διαβάστηκε στο κανάλι 0 και μετέπειτα η τιμή του καναλιού 1, και για τις δύο ψηφιακές τιμές στέλνεται πρώτα το Most-Significant Bit. Αφού διαβαστεί η πρώτη ψηφιακή αναπαράσταση, η FPGA δε διαβάζει για τους επόμενους δύο κύκλους. Στη συνέχεια λαμβάνει και τη δεύτερη ψηφιακή αναπαράσταση. Μετέπειτα, αφού περάσουν τέσσερις κύκλοι ρολογιού, απενεργοποιείται το σειριακό ρολόι. Η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί.

Η περίοδος του σειριακού ρολογιού ισούται με 68 περιόδους του ρολογιού του FPGA board το οποίο είναι συχνότητας 50 MHz, δηλαδή το σειριακό ρολόι έχει συχνότητα 0.375 MHz. Στο module στο οποίο υλοποιείται το SPI πρωτόκολλο, υπολογίζεται και η τιμή της παραγόμενης ισχύος του Φ/Β πλαισίου (θα αναλυθεί παρακάτω).

#### 4.5 Τροφοδοσία των κυκλωμάτων του συστήματος

Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος απαιτήθηκε ο μετασχηματισμός της τάσης τροφοδοσίας (μπαταρία) έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες τιμές τάσης για την τροφοδοσία των στοιχείων των διαφόρων κυκλωμάτων. Χρησιμοποιήθηκε ο ρυθμιστής τάσης LM317 ο οποίος ρυθμίστηκε έτσι ώστε να μετασχηματίζει την τάση της μπαταρίας στα 10 V. Από αυτήν παράγονται οι τιμές τάσης: -5 V, 0 V (γείωση) και +5 V. Το κύκλωμα που υλοποιεί τα παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17 Κύκλωμα μετασχηματισμού της τάσης της μπαταρίας.

# 4.6 Ανάλυση των αλγορίθμων

Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται συνοπτικά η αρχιτεκτονική του κώδικα που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο των κινητήρων και το μετατροπέα DC/DC.



Σχήμα 4.18 Αρχιτεκτονική του κώδικα.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα περιγραφής υλικού VHDL και το πρόγραμμα Xilinx Ise Design Suite. Μέσα στο πλαίσιο της FPGA (Σχήμα 4.18) αναπαρίστανται τα modules που υλοποιήθηκαν. Η βασική ιδέα της υλοποίησης του κώδικα είναι η εξής: η ισχύς δειγματοληπτείται με σταθερή συχνότητα 1 kHz (περίοδος=1 ms) και η τιμή της είναι διαθέσιμη στα modules που υλοποιείται το sun-tracking και το MPPT ανεξάρτητα από το αν απαιτείται η ανανέωση της από τους αλγορίθμους. Η συχνότητα υπολογισμού της τιμής ισχύος ικανοποιεί οποιαδήποτε απαίτηση του αλγορίθμου.

To module "POWER CALCULATION" είναι υπεύθυνο για τη δειγματοληψία των αναλογικών τιμών τάσης και ρεύματος του Φ/Β πλαισίου και τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος. Η κάθε αναλογική τιμή τάσης υπολογίζεται από την αντίστοιχη ψηφιακή ως εξής (από τη σχέση 4.3):

$$V_{IN} = 1.65 - \frac{1.25}{8192} \cdot D \tag{4.4}$$

όπου

Dη ψηφιακή αναπαράσταση του  $V_{\text{in}},$ 

 $V_{in}$ η αναλογική τιμή τάσης και

GAIN το κέρδος του ενισχυτή.

Επιπλέον, πρέπει να λάβουμε υπόψη τα κέρδη των τελεστικών ενισχυτών-αισθητήρων μέτρησης και του αισθητήρα Hall, καθώς και τα αντίστοιχα offset. Το κανάλιθ αντιστοιχεί στην τιμή της τάσης εξόδου του Φ/Β πλαισίου και το κανάλιl στην τιμή του ρεύματος. Οι τιμές τους παρουσιάζονται παρακάτω:

Κανάλιθ (D1):

 $Offset_D1 = 0.43 V$ 

 $Gain_{D1} = 0.087$ 

Κανάλι1 (D2):

 $Offset_D2 = 0.43 V$ 

Gain\_D2 (συνολικό κέρδος τελεστικού και αισθητηρίου Hall) = 0.76

Η διαδικασία υπολογισμού της τιμής ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα ροής του υπολογισμού της ισχύος.

Στο module "SUN-TRACKING" υλοποιείται ο αλγόριθμος sun-tracking και παράγονται οι παλμοί που είναι υπεύθυνοι για την κίνηση των βηματικών κινητήρων. Στο module "MPPT" υπολογίζεται η επόμενη διαταραχή του σήματος PWM και δίδεται σαν είσοδο στο module

"PWM GENERATOR" για τη δημιουργία του. Η είσοδος του module "PWM GENERATOR" είναι μία ψηφιακή λέξη των 8 bit, η οποία μπορεί να λάβει τιμές από 0 έως 255. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος PWM. Για τη δημιουργία του χρησιμοποιείται επίσης ένα 8-bit σήμα, το οποίο παίρνει τιμές από 0 έως 255. Σε κάθε κύκλο ρολογιού η τιμή του σήματος αυτού αυξάνεται κατά 1 και η νέα του τιμή συγκρίνεται με την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής του σήματος PWM. Για όσο η τιμή του είναι μικρότερη από την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής το σήμα PWM του μετατροπέα DC/DC είναι ίση με 1. Όταν το σήμα γίνεται ίσο με 255, αρχικοποιείται στην τιμή 0 και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται.

#### 4.5.1 Αλγόριθμος Sun-tracking

Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου sun-tracking.



Σχήμα 4.20 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου sun-tracking.

Ο αλγόριθμος αναζητά τον Ήλιο κάθε 6.5 λεπτά. Το χρονικό αυτό διάστημα ισοδυναμεί με τη μεγαλύτερη ταχύτητα μεταβολής γωνίας του Ήλιου, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να προλαβαίνει τη μετακίνηση του οποιαδήποτε μέρα του έτους [37]. Φυσικά, η τιμή αυτή έχει προκύψει με βάση τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων βηματικών κινητήρων (βήμα=1.8°). Πρώτα γίνεται αναζήτηση του Ήλιου στον Χ άξονα (άξονας αζιμούθιου) και μετέπειτα στον Υ άξονα (άξονας ανύψωσης). Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου διαβάζεται η τιμή της ισχύος. Στη συνέχεια το Φ/Β πλαίσιο μετακινείται με φορά ίδια με την τελευταία φορά κίνησης. Η πρώτη κίνηση αποτελείται από ένα βήμα. Προφανώς, την πρώτη φορά που εκκινείται ο αλγόριθμος, δεν υπάρχει κάποια προηγούμενη τιμή φοράς, οπότε το πλαίσιο κινείται στην κατεύθυνση Ανατολή-Δύση. Αφού ολοκληρωθεί το βήμα διαβάζεται η νέα τιμή ισχύος. Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά ( $\Delta P$ ). Αν το  $\Delta P$  είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι  $A_z$  (z=X ή Y), το  $\Phi/B$  πλαίσιο μετακινείται προς την ίδια κατεύθυνση με έναν αριθμό βημάτων, ο οποίος υπολογίζεται από τον αλγόριθμο σύμφωνα με το ΔΡ (αναλύεται παρακάτω). Στη περίπτωση που το ΔP είναι μικρότερο από το  $A_z$ , συγκρίνεται με το  $-A_z$ . Αν είναι μικρότερο από αυτή την τιμή, το  $\Phi/B$  πλαίσιο μετακινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση με έναν αριθμό βημάτων. Τέλος, αν το  $\Delta P$  είναι μεγαλύτερο από το  $-A_z$  συνεπάγεται ότι το  $\Delta P$  που προέκυψε είναι αρκετά μικρό και δεν αξίζει περαιτέρω αναζήτηση του Ήλιου. Οπότε, το Φ/Β πλαίσιο έχει βρει τη βέλτιστη θέση στον Χ άξονα και ενεργοποιείται η αναζήτηση του ηλίου στον Υ άξονα. Η διαδικασία είναι η ίδια για τον Υ άξονα με τη διαφορά ότι το κατώφλι έχει διαφορετική τιμή και το πλήθος των βημάτων υπολογίζεται διαφορετικά. Αφού βρεθεί η βέλτιστη θέση και στον Υ, το σύστημα μπαίνει σε αναμονή για 6.5 λεπτά.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16 υπάρχει μία μεταβλητή i. Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται στην εξής περίπτωση: όταν το ΔΡ βρεθεί μικρότερο από το  $-A_z$ , θεωρείται ότι αυτή η τιμή προέκυψε από παροδικά καιρικά φαινόμενα, οπότε το σύστημα μπαίνει σε μία αναμονή 15 δευτερολέπτων μέχρι να εξαλειφτούν, ενδεχομένως, τα φαινόμενα αυτά και υπολογίζεται εκ νέου η τιμή της ισχύος. Προφανώς, το νέο ΔΡ δε προκύπτει από τη νέα τιμή ισχύος με την προηγούμενη, αλλά με τη τιμή ισχύος που προέκυψε το προηγούμενο ΔΡ. Στην περίπτωση που μόλις αναφέραμε το i γίνεται ίσο με 1. Αν εξακολουθεί να ισχύει η μεγάλη διαφορά ισχύος τότε το Φ/Β πλαίσιο κινείται με την αντίθετη κατεύθυνση όπως αναφέραμε προηγουμένως και το i γίνεται ίσο με 0. Στη συνέχεια, η διαδικασία είναι η προαναφερθείσα.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ένα κατώφλι στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε είναι η αποφυγή της απώλειας ενέργειας από περιττές κινήσεις του Φ/Β πλαισίου που η πιθανότητα κέρδους είναι αρκετά μικρή. Η επιλογή των κατωφλίων έγινε με βάση την κατανάλωση ισχύος

των αντίστοιχων βηματικών κινητήρων. Συγκεκριμένα, η παραγόμενη ενέργεια μεταξύ δύο διαδοχικών sun-tracking πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωσης ενέργειας του βηματικού κινητήρα σε ένα βήμα του. Οι τιμές που προκύπτουν για το ΔΡ είναι 0.074 W για τον X άξονα και 0.019 W για τον Y άξονα. Ο αριθμός των βημάτων των βηματικών κινητήρων ανά κίνηση υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{\Delta P}{A_Z} \tag{4.5}$$

όπου

S ο αριθμός των βημάτων (η ακέραια τιμή του)

 $\Delta P$ η διαφορά ισχύος και

 $A_z$  το κατώφλι για κάθε άξονα.

Ο προηγούμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται και στα μονοαξονικά συστήματα sun-tracking με τη διαφορά ότι ενεργοποιείται μόνο ο αντίστοιχος άξονας. Στην περίπτωση του συστήματος sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου, η γωνία ανύψωσης του Φ/Β πλαισίου είναι 35° (τιμή ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής) και την περίπτωση του συστήματος sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου είναι 0° (το Φ/Β πλαίσιο είναι προσανατολισμένο στο νότο).

#### 4.5.2 Αλγόριθμοι ΜΡΡΤ

Παρακάτω αναλύονται οι αλγόριθμοι MPPT που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

# 4.5.2.1 Αλγόριθμος P&O ο οποίος είναι ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του Sun-tracking

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται στο Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Ρ&Ο.

Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου, διαβάζεται η τιμή ισχύος και υπολογίζεται η διαφορά της από την προηγούμενη τιμή ισχύος η οποία είναι αποθηκευμένη σε έναν καταχωρητή. Αν το ΔP (διαφορά ισχύος) είναι θετικό, ελέγχεται η διαφορά της τωρινής τιμής της σχετικής διάρκειας αγωγής (D) του PWM σήματος από την προηγούμενη. Αν και αυτή η διαφορά (ΔD) είναι θετική τότε το D αυξάνεται κατά c (c=2%), ειδάλλως μειώνεται κατά c. Στην περίπτωση που το ΔP είναι αρνητικό, ελέγχεται ομοίως με προηγουμένως το ΔD. Αν το ΔD είναι θετικό τότε το D μειώνεται κατά c, ειδάλλως αυξάνεται κατά c. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, ο αλγόριθμος μπαίνει σε αναμονή για 1 ms μέχρι να επαναληφθεί η διαδικασία. Αυτό γίνεται για να μεταβεί το σύστημα στη νέα μόνιμη κατάσταση που ακολουθεί τη διαταραχή (διαταραχή ονομάζεται η διαδικασία αύξησης ή μείωσης του D).

# 4.5.2.2 Αλγόριθμος P&O ο οποίος είναι απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του Sun-tracking

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται στο Σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου P&O ο οποίος απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια του sun-tracking.

Η αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου είναι η ίδια με τον προηγούμενο αλγόριθμο με τη μόνη διαφορά ότι δεν γίνεται αναζήτηση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος για όσο χρονικό διάστημα είναι ενεργοποιημένο το sun-tracking (S-T). Κατά την εκκίνηση ο αλγόριθμος διαβάζει την τιμή της ισχύος. Στη συνέχεια ελέγχεται αν είναι ενεργοποιημένο το sun-tracking. Αν δεν είναι, τότε συγκρίνεται η νέα διαφορά ισχύος (ΔΡ) με την προηγούμενη (ΔΡ') η οποία είναι αποθηκευμένη σε έναν καταχωρητή. Αν είναι μικρότερη τότε το σήμα D' γίνεται ίσο με την τωρινή τιμή του D. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος συνεχίζει κανονικά. Ουσιαστικά, το σήμα D' κρατάει την τελευταία τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής του PWM σήματος που αντιστοιχεί πιο κοντά στο MPP, αφού αντιστοιχεί στη μικρότερη μεταβολή ισχύος. Σε περίπτωση που είναι ενεργοποιημένο το sun-tracking, το σήμα D γίνεται ίσο με D' μέχρι ότου βρεθεί η βέλτιστη θέση του Φ/Β πλαισίου.

# 4.5.2.3 Αλγόριθμος P&O μεταβλητού βήματος ο οποίος είναι ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του Sun-tracking

Στο Σχήμα 4.23 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Ρ&Ο μεταβλητού βήματος.

Πρόκειται για τον κλασσικό αλγόριθμο MPPT με τη διαφορά ότι η διαταραχή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβαλλόμενη. Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου διαβάζεται η τιμή της ισχύος, υπολογίζεται η διαφορά της από την προηγούμενη και υπολογίζεται ο συντελεστής n ως εξής:

$$n = \frac{|\Delta P|}{m} \tag{4.6}$$

όπου

n το πλήθος των διαταραχών και

m ένας αριθμός που αντιστοιχεί σε ισχύ και ισούται με 0.01 W (η τιμή του επιλέχθηκε με βάση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/β πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έτσι ώστε να μειωθεί η ταλάντωση γύρω από το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος, αφού για

τιμές του |ΔP| μικρότερες του m δεν εκτελείται διαταραχή). Στη συνέχεια ο αλγόριθμος εκτελείται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

#### 4.5.2.4 Αλγόριθμος P&O μεταβλητού βήματος ο οποίος είναι απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του Sun-tracking

Στο Σχήμα 4.24 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου P&O μεταβλητού βήματος ο οποίος απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια του sun-tracking.

Πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων που περιγράφηκαν στις παραγράφους 4.5.2.2 και 4.5.2.3 με τη διαφορά ότι η διαταραχή της σχετικής διάρκειας αγωγής του PWM σήματος είναι μεταβλητή και απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια του sun-tracking. Ο υπόλοιπος τρόπος λειτουργίας του είναι ακριβώς ο ίδιος με τους προαναφερθέντες αλγορίθμους.
# 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

## 5.1 Εισαγωγή

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το σύστημα sun-tracking που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 5.1 Το ολοκληρωμένο σύστημα sun-tracking που αναπτύχθηκε.

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία έχει ονομαστική τάση 12 V και χωρητικότητα 7 Ah. Το Φ/Β πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου USP10 της εταιρείας

Phaesun. Η μέγιστη ισχύς του είναι 10 W ενώ το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι 0.68 A. Ανοιχτοκυκλωμένο η μέγιστη τάση εξόδου του είναι 20.5 V. Τέλος, οι φυσικές του διαστάσεις είναι: μήκος 40.4 cm, πλάτος 34.4 cm, ύψος 4 cm και βάρος 2.4 kgr.

Οι βηματικοί κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση του Φ/Β πλαισίου στον Χ και Υ άξονα είναι τύπου 23HSX-102 και 23HSX-306 αντίστοιχα, και κατασκευάζονται από την εταιρεία "MCLENNAN". Η πλατφόρμα με τα μηχανικά μέρη του συστήματος sun-tracking κατασκευάστηκε από την εταιρεία "Εργαλειοτεχνική Κρήτης".

Για τη μελέτη του συστήματος που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα πειράματα για τέσσερα διαφορετικά συστήματα το μήνα Νοέμβριο του 2011. Τα συστήματα αυτά είναι τα εξής: σύστημα sun-tracking στον άξονα ανύψωσης, σύστημα sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου, σύστημα sun-tracking δύο αξόνων και σύστημα σταθερής κλίσης. Στο σύστημα σταθερής κλίσης το Φ/Β πλαίσιο είναι προσανατολισμένο στο νότο (αζιμουθιακή γωνία=0°) και η γωνία ανύψωσης είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου διεξαγωγής των πειραμάτων, δηλαδή 25.10°. Τα πειράματα διεξήχθησαν στην πόλη του Ηρακλείου Κρήτης.

Σε καθένα από τα προηγούμενα πειράματα-συστήματα εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι MPPT που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.6.2. Οπότε κάθε σύστημα sun-tracking χωρίζεται σε τέσσερα διαφορετικά πειράματα, όσοι και οι αλγόριθμοι MPPT. Όσον αφορά το σύστημα σταθερής κλίσης, προφανώς, εφαρμόστηκαν μόνο δύο από τη στιγμή που η διαφορά των άλλων δύο έγκειται στην απενεργοποίηση τους κατά τη διάρκεια του sun-tracking. Για κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκαν οι εξής μετρήσεις:

- 1. Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας (solar radiation) στο οριζόντιο επίπεδο,
- 2. Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου,
- 3. Μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ambient temperature),
- 4. Μέτρηση της τάσης εξόδου (output voltage) του Φ/Β πλαισίου και
- 5. Μέτρηση του ρεύματος εξόδου (output current) του  $\Phi/B$  πλαισίου.

Οι μετρήσεις αυτές γινόνταν κάθε τρία με τέσσερα λεπτά για τα συστήματα sun-tracking. Μία μέτρηση γινόταν αμέσως μετά την εύρεση της βέλτιστης θέσης του Φ/Β πλαισίου και μία ανάμεσα σε δύο διαδοχικά sun-tracking. Όσον αφορά το σύστημα σταθερής κλίσης οι μετρήσεις γίνονταν κάθε πέντε λεπτά.

#### 5.2 Πειράματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε πείραμα με τη μορφή διαγραμμάτων. Κάθε διάγραμμα είναι χωρισμένο με κόκκινες γραμμές για τη διάκριση των διαφορετικών πειραμάτων MPPT. Τα πειράματα για κάθε MPPT πραγματοποιούνται με την εξής σειρά, για κάθε σύστημα:

- 1. P&O, ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking,
- 2. P&O, απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking,
- 3. Ρ&Ο μεταβλητού βήματος, ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking και
- 4. Ρ&Ο μεταβλητού βήματος, απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking.

Εκτός από τα διαγράμματα των μετρήσεων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5.1, παρουσιάζονται δύο επιπλέον διαγράμματα για κάθε πείραμα. Το πρώτο είναι η ισχύς εξόδου του Φ/Β πλαισίου (προκύπτει απο το γινόμενο της αντίστοιχης τιμής τάσης και ρεύματος). Το δεύτερο αφορά τον "συντελεστή απόδοση ισχύος" (Power Efficiency, PE). Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από το λόγο της παραγόμενης ισχύος του Φ/Β πλαισίου προς το γινόμενο της παρασπίπτουσας ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο με το εμβαδόν της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου:

$$PE = \frac{P}{G_0 \cdot z} \cdot 100\% \tag{5.1}$$

όπου:

Ρ είναι η τιμή ισχύος για κάθε μέτρηση,

 $G_o$ είναι η αντίστοιχη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και

z είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του  $\Phi/B$  πλαισίου και ισούται με  $0.14m^2$ .

Όσον αφορά την απόδοση του DC/DC μετατροπέα η απόδοση του μετρήθηκε πειραματικά και κυμαίνεται από 80% έως 90%.

## 5.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος σταθερής κλίσης

Το πείραμα σταθερής κλίσης πραγματοποιήθηκε στις 17 Νοεμβρίου. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα όπως αναλύθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 5.2 Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου.

Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου ενώ η μπλε στο οριζόντιο επίπεδο. Παρατηρώντας το διάγραμμα, ο καιρός χαρακτηριζόταν από έντονη ηλιοφάνεια μέχρι τις 10:00. Οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν πολύ υψηλές στο οριζόντιο επίπεδο και ακόμα υψηλότερες στο επίπεδο του πλαισίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ύψος του Ήλιου ήταν μικρό, οπότε προκύπτει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Αρκεί να παρατηρήσουμε τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στις 12:00. Εκείνη τη χρονική περίοδο, ενώ η τιμή της ακτινοβολίας στο επίπεδο του πλαισίου είναι χαμηλότερη.

Την επόμενη ώρα (10:00-11:00) ο καιρός συννέφιασε σταδιακά, οπότε λόγω των χαμηλών τιμών ακτινοβολίας δεν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ ακτινοβολίας στο οριζόντιο και στο επίπεδο του πλαισίου. Από τις 11:00 μέχρι τις 12:40 παρατηρήθηκαν χρονικές περίοδοι ηλιοφάνειας εν μέσω της έντονης νέφωσης. Από τις 12:40 μέχρι και τις 14:30 ο καιρός χαρακτηριζόταν από ηλιοφάνεια με αραιές στιγμές συννεφιάς. Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος του πειράματος ο καιρός χαρακτηρίστηκε από αυξημένες στιγμές συννεφιάς.



Σχήμα 5.3 Θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.4 Τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.5 Ρεύμα εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.6 Ισχύς εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.7 Συντελεστής απόδοσης ισχύος (PE).

Ο συντελεστής απόδοσης ισχύος εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Γενικά, ο βαθμός απόδοσης βρίσκεται σε χαμηλές τιμές. Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 5.7 το οποίο παρουσιάζει το συντελεστή απόδοσης για το σύστημα σταθερής κλίσης.

## 5.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος sun-tracking στον άξονα ανύψωσης

Το πείραμα του συστήματος με sun-tracking στον άξονα ανύψωσης πραγματοποιήθηκε στις 17 Νοεμβρίου. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων του πειράματος.



Σχήμα 5.8 Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου.

Από τις 9:20 μέχρι και τις 13:20, ο καιρός χαρακτηριζόταν από αυξημένες στιγμές πυκνής νέφωσης και ηλιοφάνειας, για αυτό και οι απότομες μεταβολές των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας. Αν και υπάρχει διαφορά μεταξύ των τιμών στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου, αυτή δεν είναι μεγάλη, λίγο μεγαλύτερη από μία αντίστοιχη τιμή για το σύστημα σταθερής κλίσης. Αυτό οφείλεται στη γεωμετρία του Ήλιου, δηλαδή ο Ήλιος εκείνη τη χρονική περίοδο βρίσκεται κοντά στο μέγιστο ύψος του οπότε η συμμετοχή της μεταβολής της γωνίας ανύψωσης του Φ/Β πλαισίου είναι μικρή. Ξεχωρίζει το πρώτο ημίωρο κατά το οποίο έχουμε σημαντική αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας λόγω του χαμηλού ύψους του Ήλιου.

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται μετά το προαναφερθέν χρονικό διάστημα έχουν αρκετό ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα, από τις 13:20 έως το τέλος του πειράματος ισχύουν τα εξής: το ύψος του Ήλιου άρχισε να μειώνεται και ο καιρός ήταν αίθριος με αραιή νέφωση. Παρόλα αυτά, οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο είναι αρκετά υψηλές. Το σύστημα suntracking οδηγούσε το Φ/Β πλαίσιο σε μεγάλες γωνίες ανύψωσης, γεγονός που δικαιολογεί τη μεγάλη διαφορά. Επιπλέον, παρατηρήθηκε το εξής φαινόμενο: λόγω της ώρας ο Ήλιος βρισκόταν στο ύψος των σύννεφων και χαμηλότερα, οπότε το γεγονός ότι στην πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας προς την επιφάνεια του πλαισίου, υπήρχαν σύννεφα σε υψηλότερα επίπεδα, η τιμή της συνολικής ακτινοβολίας αυξανόταν λόγω των αντανακλάσεων. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι πυκνότερη νέφωση στο ύψος του Φ/Β πλαισίου συντελούσε στην αύξηση της ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.9 Θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.10 Τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.11 Ρεύμα εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.12 Ισχύς εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.13 Συντελεστής απόδοση ισχύος (PE).

Στο Σχήμα 5.13 παρατηρούμε ότι ο συντελεστής απόδοσης ισχύος κυμαίνεται σε λίγο υψηλότερα επίπεδα από το συντελεστή του συστήματος σταθερής κλίσης με τη διαφορά ότι οι τιμές είναι αρκετά υψηλότερες τις απογευματινές ώρες οπότε και η κλίση του Φ/Β πλαισίου επιτρέπει την εκμετάλλευση της χαμηλής θέσης του Ήλιου στον ορίζοντα.

## 5.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου

Το πείραμα του συστήματος sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου πραγματοποιήθηκε στις 21 Νοεμβρίου. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων του πειράματος.



Σχήμα 5.14 Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου.

Όπως, φαίνεται στο Σχήμα 5.14, πρόκειται για μία ημέρα με ηλιοφάνεια έως περίπου τις 13:15. Οι τιμές της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου είναι πολύ ικανοποιητικές, ιδιαίτερα τις πρωινές και απογευματινές ώρες κατά τις οποίες και η αζιμουθιακή γωνία του Ηλιου έπαιρνε τις τιμές εκείνες που ένα σύστημα σταθερής κλίσης θα αντιμετώπιζε πρόβλημα. Μέχρι τις 14:50 δεν υπήρξε κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Μετά από αυτή τη χρονική στιγμή ο καιρός έγινε νεφώδης, αλλά οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας παρέμειναν υψηλά σε σχέση με τις τιμές στο οριζόντιο. Αυτό έγινε κυρίως λόγω της αύξησης της διάχυτης ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.15 Θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.16 Τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.17 Ρεύμα εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.18 Ισχύς εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.19 Συντελεστής απόδοση ισχύος (PE).

Στο Σχήμα 5.19 παρατηρείται ότι η απόδοση του συστήματος sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου παίρνει πολύ υψηλές τιμές μετά τις 14:00. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη αζιμούθια γωνία του Ήλιου ο οποίος κατευθύνεται στη Δύση. Οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής στο σύστημα sun-tracking στον άξονα ανύψωσης καθώς η μεταβολή της γωνίας ανύψωσης του Ήλιου είναι πολύ μικρότερη εν συγκρίση με την αζιμούθια.

#### 5.2.4 Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος sun-tracking δύο αξόνων

Το πείραμα του συστήματος sun-tracking δύο αξόνων πραγματοποιήθηκε στις 20 Νοεμβρίου. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων του πειράματος.



Σχήμα 5.20 Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου.

Ο διαφορές μεταξύ των δύο τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα δύο αξόνων είναι προφανώς μεγαλύτερες από τα προαναφερθέντα συστήματα-πειράματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20. Οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/β πλαισίου παραμένουν σε υψηλά επίπεδα καθόλη τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 5.21 Θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.22 Τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.23 Ρεύμα εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.24 Ισχύς εξόδου του Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 5.24 Συντελεστής απόδοσης ισχύος (PE).

Στο Σχήμα 5.24 φαίνεται η πολύ καλή απόδοση του συστήματος sun-tracking δύο αξόνων τις απογευματινές ώρες. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες μεταβολές των γωνιών του Φ/Β πλαισίου λόγω της θέσης του Ήλιου στον ουράνιο θόλο.

### 5.3 Κατανάλωση ισχύος

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι καταναλώσεις ισχύος των διάφορων τμημάτων του συστήματος έτσι ώστε στη συνέχεια να υπολογιστεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος sun-tracking για κάθε πείραμα. Η κατανάλωση ισχύος του μετατροπέα DC/DC συμπεριλαμβανομένου του τροφοδοτικού και των αισθητήρων μέτρησης των τιμών τάσης και ρεύματος εξόδου του Φ/Β πλαισίου τα οποία μοιράζονται την ίδια πλακέτα είναι 352 mW. Η κατανάλωση αυτή είναι ίδια για όλα τα πειράματα. Η κατανάλωση ισχύος της FPGA μεταβάλλεται για κάθε πείραμα καθώς τα ψηφιακά κυκλώματα δε χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους. Η κατανάλωση ισχύος της FPGA για κάθε αλγόριθμο υπολογίζεται από την εφαρμογή Xilinx's XPower analyzer.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καταναλώσεις ισχύος για κάθε παραλλαγή του συστήματος sun-tracking που υλοποιήθηκε.

#### 5.3.1 Σύστημα σταθερής κλίσης

Στο σύστημα αυτό η κατανάλωση ισχύος της FPGA είναι 64 mW. Οπότε, αθροίζοντας την τιμή αυτή με την κατανάλωση ισχύος του DC/DC μετατροπέα προκύπτει μία συνολική κατανάλωση ισχύος ίση με 416 mW.

#### 5.3.2 Σύστημα sun-tracking ενός άξονα

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθούν μαζί οι καταναλώσεις ισχύος των συστημάτων suntracking ενός άξονα (αζιμούθιου ή ανύψωσης αντίστοιχα) καθώς κάποιες καταναλώσεις ισχύος είναι κοινές. Και για τα δύο αυτά συστήματα η κατανάλωση ισχύος της FPGA είναι ίση με 71 mW. Η κατανάλωση ισχύος των κυκλωμάτων οδήγησης των βηματικών κινητήρων είναι 4 mW για το καθένα. Οπότε, η συνολική σταθερή κατανάλωση ισχύος και για τα δύο συστήματα είναι 427 mW, χωρίς να συνυπολογίσουμε τις διαφορετικές καταναλώσεις ισχύος των βηματικών κινητήρων. Η τάση λειτουργίας και των δύο βηματικών κινητήρων είναι 12 V. Επιπλέον, ο 23HSX-102 καταναλώνει 1.2 A ενώ ο 23HSX-306 καταναλώνει 4.8 A. Οπότε η επιπλέον κατανάλωσης ισχύος για καθένα από τα συστήματα sun-tracking ενός άξονα λόγω των βηματικών κινητήρων έχει ως εξής:

- Sun-tracking στον άξονα ανύψωσης (23HSX-102): 14.4 W
- Sun-tracking στον άξονα αζιμούθιου (23HSX-306): 57.6 W

Οι καταναλώσεις αυτές υφίστανται μόνο κατά τη κίνηση των αισθητήρων.

#### 5.3.3 Σύστημα sun-tracking δύο αξόνων

Κατά τη διάρκεια του πειράματος sun-tracking και στους δύο άξονες, λειτουργούν και οι δύο βηματικοί κινητήρες και τα αντίστοιχα κυκλώματα οδήγησης. Επομένως, χρησιμοποιούνται και οι δύο προαναφερθείσες καταναλώσεις ισχύος για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας. Όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος της FPGA είναι ίση με 75 mW. Έτσι, η συνολική σταθερή κατανάλωση ισχύος για αυτό το σύστημα είναι 435 mW.

### 5.4 Σύγκριση πειραμάτων

Για τη αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται ένας συντελεστής που ονομάζεται "συντελεστής απόδοσης ενέργειας" (Energy Efficiency, EE) και υπολογίζεται ως εξής:

$$EE = \frac{EP}{SHE} \cdot 100\% \tag{5.2}$$

όπου

ΕΡ είναι η συνολική παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια του πειράματος και

SHE είναι η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.

Το ΕΡ υπολογίζεται ως εξής:

$$EP = \sum P \cdot \Delta t \tag{5.3}$$

όπου

Ρ είναι η τιμή της ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο σε κάθε μέτρηση (θεωρούμε ότι παραμένει η ίδια μέχρι την επόμενη μέτρηση) και

Δt είναι ο χρόνος μεταξύ δύο μετρήσεων (3.25 mins για τα sun-tracking συστήματα και 5 mins για το σύστημα σταθερής κλίσης).

Το SHE υπολογίζεται ως εξής:

$$SHE = \sum G_o \cdot \Delta t \cdot z \tag{5.4}$$

όπου

 $G_o$  είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο σε κάθε μέτρηση και z είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου (0.14 $m^2$ ).

Επίσης, υπολογίζεται ένας δεύτερος συντελεστής για κάθε πείραμα που ονομάζεται "συντελεστής κατανάλωσης ενέργειας" (Energy Loss, EL) και υπολογίζεται ως εξής:

$$EL = \frac{EC}{SHE} \cdot 100\% \tag{5.5}$$

όπου

το ΕC είναι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η διαδικασία υπολογισμού αυτού του συντελεστή είναι η εξής: αρχικά, υπολογίζεται η σταθερή κατανάλωση ενέργειας του συστήματος, σύμφωνα με τη σταθερή κατανάλωση ισχύος όπως έχει περιγραφεί προηγουμένως. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας λόγω της κίνησης των βηματικών κινητήρων. Προφανώς, το δεύτερο σκέλος της διαδικασίας δεν αφορά το σύστημα σταθερής κλίσης. Τέλος, τα δύο μεγέθη αθροίζονται. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας των βηματικών κινητήρων ισχύουν τα εξής: ο χρόνος που διαρκεί το βήμα κάθε κινητήρα είναι 0.6sec. Γνωρίζοντας τον αριθμό των βημάτων, υπολογίζουμε την κατανάλωση ενέργειας.

Ένας ακόμη συντελεστής που ονομάζεται "συντελεστής ενεργειακού κέρδους" (Energy Gain, EG) υπολογίζεται. Ο παράγοντας αυτός, ουσιαστικά αναφέρεται στο καθαρό ενεργειακό κέρδος από το σύστημα και δίδεται από τον τύπο:

$$EG = EE - EL \tag{5.6}$$

Τέλος, υπολογίζονται δύο συντελεστές k<sub>1</sub> και k<sub>2</sub>. Ο πρώτος συντελεστής είναι η ποσοστιαία διαφορά των συντελεστών ενεργειακών κερδών των διαφόρων συστημάτων και ο δεύτερος η ποσοστιαία διαφορά των συντελεστών απόδοσης ενέργειας. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται ως εξής:

$$k_1 = \frac{EG_f - EG_{no-tracking}}{EG_{no-tracking}} \cdot 100\%$$
(5.7)

$$k_2 = \frac{EE_f - EE_{no-tracking}}{EE_{no-tracking}} \cdot 100\%$$
(5.8)

όπου το f παίρνει τις εξής τιμές: [elevation-axis tracking, azimuth-axis tracking, 2-axis tracking].

Τα πειράματα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τον MPPT αλγόριθμο που έχει εφαρμοστεί. Έτσι, προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες πειραμάτων, όπου η κάθε κατηγορία αποτελείται από τρία συστήματα sun-tracking και το σύστημα σταθερής κλίσης. Όσον αφορά το σύστημα σταθερής κλίσης, κάθε MPPT αλγόριθμος του (σύνολο δύο) ανήκει σε δύο κατηγορίες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.1 P&O ο οποίος είναι ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking					
Sun-tracking σύστημα	EL (%)	EE (%)	EG (%)	k1 (%)	k2 (%)
Σταθερής κλίσης	0.915	6.42	5.505	-	-
Άξονας ανύψωσης	1.131	7.53	6.22	12.9	17.2
Άξονας αζιμούθιου	1.5	8.77	7.27	32.06	36
Δύο αξόνων	1.222	8.01	6.788	23.31	24.8

Πίνακας 5.2 P&O ο οποίος είναι απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking					
Sun-tracking σύστημα	EL (%)	EE (%)	EG (%)	k1 (%)	k2 (%)
Σταθερής κλίσης	0.915	6.42	5.505	-	-
Άξονας ανύψωσης	0.953	6.79	5.837	6.03	5.8
Άξονας αζιμούθιου	1.167	7.28	6.113	11.04	13.3
Δύο αξόνων	1.245	7.30	6.055	10	13.7

Πίνακας 5.3 P&O μεταβλητού βήματος ο οποίος είναι ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun- tracking					
Sun-tracking σύστημα	EL (%)	EE (%)	EG (%)	k1 (%)	k2 (%)
Σταθερής κλίσης	0.903	6.70	5.797	-	-
Άξονας ανύψωσης	1.31	8.13	6.82	17.64	21.3
Άξονας αζιμούθιου	1.217	8.08	6.863	18.4	20.6
Δύο αξόνων	2.021	9.72	7.699	32.8	45

Πίνακας 5.4 Ρ&Ο μεταβλητού βήματος ο οποίος είναι απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια του sun-tracking					
Sun-tracking σύστημα	EL (%)	EE (%)	EG (%)	k1 (%)	k2 (%)
Σταθερής κλίσης	0.903	6.70	5.797	-	-
Άξονας ανύψωσης	2.192	10.16	7.968	37.45	51.6
Άξονας αζιμούθιου	3.46	11.57	8.11	39.9	72.68
Δύο αξόνων	6.807	15.47	8.663	49.44	130

Συγκρίνοντας τους πίνακες με βάση τους συντελεστές κ1 και k2 προκύπτει ότι: ο καλύτερος αλγόριθμος MPPT είναι ο P&O μεταβλητού βήματος ο οποίος απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια του sun-tracking και και το καλύτερο σύστημα sun-tracking είναι το σύστημα δύο αξόνων. Επίσης, το σύστημα sun-tracking δύο αξόνων έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας αλλά ταυτόχρονα παράγει και την περισσότερη ενέργεια από το Φ/Β στοιχείο.

# 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή υλοποιήθηκε ένα σύστημα για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από ένα Φ/Β πλαίσιο. Το σύστημα αυτό συνδυάζει ένα σύστημα sun-tracking και ένα σύστημα MPPT. Το σύστημα sun-tracking είναι υπεύθυνο για τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β, καθώς μεγαλύτερη τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται μεγαλύτερη τιμή της παραγόμενης ισχύος. Όσον αφορά το σύστημα MPPT, αυτό είναι υπεύθυνο για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, βρίσκοντας το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος του Φ/Β πλαισίου της ήδη μέγιστης χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος του πλαισίου, όπως έχει προκύψει από το σύστημα sun-tracking.

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες συστημάτων sun-tracking. Η πρώτη κατηγορία αφορά τα συστήματα εκείνα τα οποία υπολογίζουν τη θέση του Ήλιου ως προς τη Γη και μετακινούν τα Φ/Β πλαίσια έτσι ώστε η ακτινοβολία να προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια τους. Το βασικό μειονέκτημα της κατηγορίας αυτής είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει ο έλεγχος λάθους. Προφανώς, σε ημέρα που χαρακτηρίζεται από ηλιοφάνεια ο αλγόριθμος λειτουργεί σωστά. Σε μία νεφώδη ημέρα όμως, είναι πολύ πιθανό το σημείο μέγιστης ακτινοβολίας να μη βρίσκεται στο σημείο θέασης του Ήλιου, οπότε ο αλγόριθμος αποτυγχάνει. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα συστήματα εκείνα τα οποία χρησιμοποιούν αισθητήρες για τον εντοπισμό του Ήλιου, όπως φωτοαντιστάσεις, φωτοδιόδους, κάμερες κ.α. Η χρήση αισθητήρων ανεβάζει το κόστος κατασκευής του συστήματος, καθώς και της συντήρησης του.

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αποφεύγει τα παραπάνω μειονεκτήματα λόγω του τρόπου υλοποίησης του. Καταρχήν, για την εύρεση του μέγιστου σημείου ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιεί τους αισθητήρες μέτρησης της τάσης και του ρεύματος εξόδου του Φ/Β πλαισίου που χρησιμοποιούνται ήδη από το σύστημα MPPT που είναι διαθέσιμο σε κάθε σύστημα διαχείρισης ενέργειας Φ/Β στοιχείων.

Επιπλέον, το σύστημα έχει υλοποιηθεί σε FPGA. Οι FPGAs έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι η FPGA υποστηρίζει υψηλές συχνότητες, που σημαίνει ότι μπορεί να υλοποιηθεί ένα PWM σήμα με συχνότητα άνω του 1 MHz. Η switching frequency ενός DC/DC μετατροπέα και το μέγεθος του πηνίου του είναι δύο μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Οπότε, μεγαλύτερο switching frequency συνεπάγεται μείωση στο μέγεθος και στο κόστος του DC/DC μετατροπέα. Επιπλέον, ο προγραμματισμός σε FPGA προσφέρει δυνατότητες rapid prototyping.

Για την αξιολόγηση του συστήματος μας, δοκιμάστηκαν διαφορετικά συστήματα suntracking (δύο αξόνων, άξονα αζιμούθιου, άξονα ανύψωσης και σταθερής κλίσης) συνδυασμένα με διαφορετικές τεχνικές MPPT. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο βέλτιστος συνδυασμός συστημάτων μπορεί να αποφέρει έως 49% αύξηση της παραγόμενης ενέργειας έναντι ενός συστήματος σταθερής κλίσης.

Η λειτουργία του συστήματος που αναπτύχθηκε βασίζεται στην αναζήτηση του σημείου στον ουρανό από το οποίο προέρχεται η μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πιο πιθανό είναι το σημείο αυτό και το σημείο που βρίσκεται ο Ήλιος να συμπίπτουν, αλλά όχι πάντα λόγω συμβολής της διάχυτης ακτινοβολίας στην συνολική ακτινοβολία που δέχεται το Φ/Β στοιχείο.

Καταλήγοντας, πρόκειται για ένα αξιόπιστο, χαμηλού κόστους σύστημα με υψηλή απόδοση, το οποίο δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη συντήρηση. Επιπλέον, ο τρόπος υλοποίησης του είναι απλός, γεγονός που το κάνει ευέλικτο σε διαφορετικές εγκαταστάσεις. Μία ενδεχόμενη εφαρμογή του συστήματος θα ήταν η χρήση του ως σημείο αναφοράς σε ένα Φ/Β πάρκο. Το σύστημα μας θα βρίσκει τη βέλτιστη θέση, η οποία θα αντιγράφεται από τα υπόλοιπα Φ/Β πλαίσια του πάρκου.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε μπορεί να επεκταθεί και με τη χρήση άλλων μεθόδων MPPT.

### Βιβλιογραφία

[1] M. Taherbaneh, H. G. Fard, A. H. Rezaie, S. Karbashian. "Combination of Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracker and Sun Tracker for Deployable Solar Panels in Photovoltaic Systems". Fuzzy Systems Conference, pp. 1-6, 2007.

[2] M. Zeman. "Solar cells". Kluwer Academic, 1998.

 $http://aerostudents.com/files/solarCells/solarCellsTheoryFullVersion.pdf\,.$ 

[3] "Solar Simulation". Oriel Product Training, Application note. http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/12298.pdf.

[4] Q. Fu. "Radiation (Solar)". Elsevier Science, pp. 1859-1863, 2003.

[5] Lee Jin You, Lee Ji Hao. "Sun and architecture". National University of Singapore. http://www.math.nus.edu.sg/aslaksen/gem-projects/hm/0304-1-66-sun\_and\_architecture.pdf

[6] Harlan H. Bengston. "Solar Energy Fundamentals".

http://www.cedengineering.com/upload/Solar%20Energy%20Fundamentals.pdf.

[7] D. Heinemann. "Energy Meteorology". Lecture Notes, Postgraduate Programme "Renewable Energy", 2000.

[8] Alistair B. Sproul. "Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis". Renewable Energy, Vol. 32, Issue 15, pp. 2642, 2005.

[9] Digital Image, http://ieet.org/index.php/IEET/more/3228/

[10] S. Al-Hallaj, K. Kiszynski. "Hybrid Hydrogen Systems: Stationary and Transportation Applications (Green Energy and technology)", Springer, 2011.

[11] J. Radosavljevic (2001). "Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surfaces on Earth". Working and Living Environmental Protection, Vol. 2, Issue 1, pp. 77-86, 2001.

[12] B. Y. H. Liu, R. C. Jordan. "A rational procedure for predicting the long term average performance of flat-plate solar-energy collectors". Solar Energy, Vol. 7, Issue 2, p. 53-74, 1963.

[13] J. A. Duffie, W. A. Beckman. "Solar Engineering of thermal processes". Wiley Interscience Publication, 1980.

[14] J.E. Hay, J.a. Davies . "Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface". Renewable Energy, Vol. 3, Issues 4-5, pp. 373-380, 1993.

[15] R. C. Temps, K. L. Coulson. "Solar Radiation incident upon slopes of different orientation". Solar energy, Vol. 19, Issue 2, pp. 179-184, 1977.

[16] http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/optics\_album.html

[17] http://cnbestsolar.88582.net/High-efficiency-solar-cells/mono5%E2%80%9D(r150)125s \_Mono5%E2%80%9D(r150)125s-32.html

[18] T. Markrart. "Solar electricity", Wiley, 1994.

[19] M. A. Green. "Solar cells: Operating principles". Prentice hall, 1982.

[20] I. Reda, A. Andreas. "Solar position algorithm for solar radiation applications". Solar Energy, Vol. 76, Issue 5, pp. 577–589, 2004.

[21] R. Grena. "An algorithm for the computation of the solar position". Solar Energy, Vol. 82, Issue 5, pp. 462–470, 2008.

[22] S. A. kalogirou. "Design and construction of a one axis sun-tracking system". Solar Energy, Vol. 57, Issue 6, pp. 465-469, 1996.

[23] N. Khalifa, S. Al-Mutawalli. "Effect of two axis sun-tracking on the performance of compound parabolic concentrators". Energy conversion and management, Vol. 39, Issue 10, pp. 1073-1079, 1998.

[24] P. Roth, A. Georgiev, A. Poudinov. "Design and construction of a system for suntracking". Renewable Energy, Vol. 29, Issue 3, pp.393-402, 2004.

[25] M. Berenguel, F. R. Rubio, A. Valverde, P. J. Lara, M.R. Arahal, E. F. Camacho, M. Lopez. "An artificial vision based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant". Solar Energy, Vol. 76, pp. 563-575, 2004.

[26] C. Aracil, J. M. Quero, L. Castaner, R. Osuna, L. G. Franquelo. "Tracking system for solar power plants". IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 3024-3029, 2006.

[27] C. Aracil, J. M. Quero, J. Ricart, R. Ortega, L. G. Franquelo, M. Dominguez. "Tracking control system using an incident radiation angle microsensor". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, Issue 2, pp. 3024-3029, 2007.

[28] A. Al-Mohamad. "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun-tracking system". Applied Energy, Vol.79, Issue 3, pp. 345-354, 2004.

[29] K. Aiuchi, K. Yoshida, Y. Katayama, M. Nakamura, K. Nakamura. "Sensor controlled heliostat with equatorial mount". Solar Energy, Vol. 80, Issue 9, pp. 1089-1097, 2006.

[30] B. Koyuncu. "A microprocessor controlled automatic sun tracker". Consumer Electronics, Vol. 37, Issue 4, pp. 913-917, 1991.

[31] E. Hossain. "Efficiency improvement of solar cell using compound parabolic concentrator and sun tracking system". Electric power conference, pp.1-8, 2008.

[32] A. A. Khalil, M. El-Singaby. "Position control of sun tracking system". Circuits and Systems, Vol. 3, pp.1134-1137, 2003.

[33] H. A. Yousef. "Design and implementation of a fuzzy logic computer controlled sun tracking system". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 3, pp. 1030-1034, 1999.

[34] Ι. Καλογιαννάκης. "Ανάπτυξη συστήματος MPPT για φωτοβολταϊκές συστοιχίες που λειτουργούν υπό συνθήκες σκίασης". Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011.

[35] R. Faranda, S. Leva. "Energy comparison of MPPT techniques for PV system". Wseas Transactions on Power Systems, Vol. 3, Issue 6, pp.446-455, 2008.

[36] T. Esram, P. L. Chapman. "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques". Energy Conversion, Vol. 22, Issue 2, pp. 439-449, 2007.

[37] Ι. Καντάρης. "Ανάπτυξη συστήματος sun-tracking για μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία". Πολυτεχνείο Κρήτης, 2005.

[38] "Spartan-3A/3AN FPGA Starter Kit Board User Guide". UG334, Vol 1.1, 2008. http://www.xilinx.com/support/documentation/boards\_and\_kits/ug334.pdf.