

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου και έλεγχος απόδοσης του

Μπινώλη Μαρία

Αρ. Μητρώου 504



Ξάνθη, Οκτώβριος 2010



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου και έλεγχος απόδοσης του

Μπινώλη Μαρία Αρ. Μητρώου 504

Διπλωματική εργασία η οποία υποβλήθηκε τον Οκτώβριο του 2010 για την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης

Μαρία Χ. Μπινώλη Διπλωματούχος Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης Δ.Π.Θ.

Copyright © Μαρία Μπινώλη, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, το διεθνές ενδιαφέρον για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει συνεχώς. Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πλέον αρκετά διαδεδομένη και συμβάλλει στην περαιτέρω υιοθέτηση των ήπιων μορφών ενέργειας, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πλαισίων, έτσι ώστε να αξιοποιείται η ηλιακή ακτινοβολία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Για την ευρεία χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει πραγματοποιηθεί σημαντική ερευνητική προσπάθεια σε διάφορους τομείς όπως στη χρήση διαφορετικών υλικών για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων, στους τρόπους υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς και στην ανάπτυξη εργαλείων σχεδίασης και απεικόνισης. Ειδικότερα, στον τομέα της ανάπτυξης εργαλείων σχεδίασης και απεικόνισης, υπάρχουν προγράμματα τα οποία παρέχουν την δυνατότητα 'πιστής' απεικόνισης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και με αυτό τον τρόπο συντελούν στην δημιουργία αξιόπιστων αναλύσεων στον τομέα αυτό.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως για ένα μεγάλο διάστημα ετών και έχουν αρχίσει να εμφανίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από την χρήση τους. Έχει διαπιστωθεί ότι, τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά την λειτουργία τους αντιμετωπίζουν ορισμένες αστοχίες ή προβλήματα, τα οποία επιδρούν στην λειτουργία των συστημάτων αλλά και στην απόδοση τους. Οι αιτίες των αστοχιών αυτών είναι ποικίλες. Αρχικά, αυτό που είναι πρωτεύοντος σημασίας είναι να ανιχνευτούν και να εντοπιστούν οι αστοχίες. Στην κατεύθυνση αυτή συντελούν οι τεχνικές ανίχνευσης, με πιο διαδεδομένες, τις μη καταστροφικές μεθόδους αξιολόγησης και κυρίως την υπέρυθρη θερμογραφία. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να διαπιστωθεί πως και σε ποιο βαθμό αυτές οι αστοχίες επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προσομοιωθεί η λειτουργία και να ελέχθη η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία είναι εγκατεστημένα στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Δημοκρίτειο Πανεπιστημίου Θράκης στην πόλη της Ξάνθης, με την χρήση προγράμματος προσομοίωσης και με τις αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στην πηγή ενέργειας αυτών των συστημάτων, την ηλιακή ακτινοβολία. Στη συνέχεια, αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας τους και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Έπειτα, αναλύεται η δομή των ηλιακών κυψελών, των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την περαιτέρω κατανόηση της λειτουργίας τους. Τέλος, αναλύονται οι πιθανές αστοχίες που μπορεί να εμφανιστούν στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο για την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σ' αυτό το κεφάλαιο, αναλύεται το ηλεκτρικό κύκλωμα της ιδανικής και της μη ιδανικής ηλιακής κυψέλης. Επίσης, παρουσιάζεται η απόδοση της ηλιακής κυψέλης και του φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς και η αξιολόγηση της απόδοσης με την βοήθεια μαθηματικών σχέσεων. Στο τέλος του κεφαλαίου, αναλύονται ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών

Εν συνεχεία, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αρχικά, γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών των πλαισίων που μελετήθηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Σ' αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πρόγραμμα προσομοίωσης Multisim και γίνεται η κατασκευή του ηλεκτρικού κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης και του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο πρόγραμμα αυτό.

Έπειτα, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία των μετρήσεων και τα αποτελέσματα τους. Αναλύεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, ο οποίος περιλαμβάνει έναν φορητό θερμικό αναλυτή εικόνας, ένα πυρανόμετρο, ένα μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας και ένα πολύμετρο. Στη συνέχεια, περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία των μετρήσεων και τα αποτελέσματα τους. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τα θερμογραφήματα των φωτοβολταϊκών πλαισίων με την χρήση του προγράμματος MikroSpec 4.0 Professional. Ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και η σύγκριση τους με τα αποτελέσματα από το μοντέλο προσομοίωσης. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, γίνονται προτάσεις για περεταίρω έρευνα και εξέλιξη της εργασίας.

Μπινώλη Μαρία

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

Τον κύριο Παντελή Ν. Μπότσαρη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ, στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την συνεργασία του, καθ' όλη την διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Τον κύριο Ιωάννη Τσανάκα, Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την καταλυτική βοήθεια που μου προσέφερε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συμπαράσταση τους.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή	i
Ευχαρ στίες	iv
Πίνακας περιεχομένων	\mathbf{v}
Πίνακας σχημάτων	viii
Κατάλογος πινάκων	xi
Περίληψη	xii
Abstract	xiii

Λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων	1
Περιεχόμενα	1
1.1 Εισαγωγή	2
1.2 Ηλιακή ακτινοβολία	3
1.3 Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική	4
1.4 Οι ηλιακές κυψέλες	8
1.4.1 Η δομή των ηλιακών κυψελών	8
1.4.2 Τα είδη των ηλιακών κυψελών	9
1.5 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια	11
1.6 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα	12
1.7 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων	15
1.8 Προβλήματα λειτουργίας	17

1.9 Σύνοψη	21
1.10 Βιβλιογραφία	22

A / S 0 1 / 1	r r	22
Αποδοση φωτοβολταικων πλαι	ισιων και συστηματων	23
		=0

п		,		
311	በ1ድ'	voi	1181	va
110	pw	\mathcal{L}	uu	100

2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης	24
2.2.1 Μη ιδανική ηλιακή κυψέλη	24

2.2.2 Ιδανική ηλιακή κυψέλη	26
2.3 Απόδοση ηλιακής κυψέλης	31
2.4 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου	31
2.5 Αξιολόγηση απόδοσης	37
2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων	38
2.7 Σύνοψη	42
2.8 Βιβλιογραφία	43

Κεφάλαιο 3

Προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων	44

Περιεχόμενα	44
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Περιγραφή των φωτοβολταϊκών πλαισίων	45
3.3 Προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου	46
3.3.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Multisim	47
3.3.2 Κατασκευή ηλεκτρικού κυκλώματος ηλιακής κυψέλης στο Multisim	48
3.3.3 Ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Multisim	53
3.4 Σύνοψη	56
3.5 Βιβλιογραφία	57

Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου	
Περιεχόμενα	58
4.1 Εισαγωγή	59
4.2 Περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις	59
4.2.1 Φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας	59
4.2.2 Πυρανόμετρο	60
4.2.3 Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας	61
4.2.4 Πολύμετρο	62
4.3 Διαδικασία μέτρησης	63
4.4 Ανάλυση θερμικών εικόνων	72

4.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων	83
4.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης	88
4.7 Σύνοψη και συμπεράσματα	95
4.8 Βιβλιογραφία	98

Συμπεράσματα και προτάσεις	99
Περιεχόμενα	99
5. 1 Συμπεράσματα	100
5. 2 Προτάσεις	102

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1. 1	Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας	3
Σχήμα 1. 2	Άτομο πυριτίου	5
Σχήμα 1. 3	Το ηλεκτρικό πεδίο μιας ηλιακής κυψέλης	7
Σχήμα 1. 4	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	7
Σχήμα 1. 5	Σύνθεση ηλιακών κυψελών και πλαισίων	8
Σχήμα 1. 6	Δομή ηλιακής κυψέλης	9
Σχήμα 1. 7	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου	9
Σχήμα 1. 8	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου	10
Σχήμα 1. 9	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο άμορφου πυριτίου	11
Σχήμα 1.10	Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου	12
Σχήμα 1.11	Φωτοβολταϊκό σύστημα	13
Σχήμα 1.12 Προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου		16
Σχήμα 1.13	Απεικόνιση θερμής κηλίδας	18
Σχήμα 2. 1	Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικής ηλιακής κυψέλης	25
Σχήμα 2. 2	Χαρακτηριστική Ι-V της ηλιακής κυψέλης	27
Σχήμα 2. 3	Χαρακτηριστική Ι-V της ηλιακής κυψέλης με τις κυριότερες παραμέτρους	28
Σχήμα 2. 4	Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την αντίσταση σειράς	29
Σχήμα 2. 5	Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την παράλληλη αντίσταση	29
Σχήμα 2. 6	Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	30
Σχήμα 2. 7	Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την θερμοκρασία	30
Σχήμα 2. 8	Διάταξη φωτοβολταϊκού πλαισίου	31
Σχήμα 2. 9	Σύνδεση ηλιακών κυψελών σε σειρά	34
Σχήμα 2.10	Σύνδεση ηλιακών κυψελών παράλληλα	35
Σχήμα 2.11	Καμπύλες Ι-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά	36
Σχήμα 2.12	Καμπύλες Ι-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα	37
Σχήμα 2.13	Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση	39

Σχήμα 3. 1	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο SP75	45
Σχήμα 3. 2	Η επιφάνεια εργασίας του χρήστη του Multisim	47
Σχήμα 3. 3	Επιλογή στοιχείων του κυκλώματος	49
Σχήμα 3. 4	Μενού επιλογών	49
Σχήμα 3. 5	Ορισμός της τιμής της πηγής ρεύματος	50
Σχήμα 3. 6	Η πηγή ρεύματος του κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης	50
Σχήμα 3. 7	Η δίοδος του κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης	51
Σχήμα 3. 8	Η αντίσταση σε σειρά και η παράλληλη αντίσταση του κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης	52
Σχήμα 3. 9	Το ηλεκτρικό κύκλωμα της ηλιακής κυψέλης	52
Σχήμα 3.10	Επιλογή πολυμέτρου από την εργαλειοθήκη των οργάνων μέτρησης	53
Σχήμα 3.11	Το ηλεκτρικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου	54
Σχήμα 3.12	Μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης	55
Σχήμα 3.13	Μέτρηση της τιμής της τάσης ανοικτού κυκλώματος	56
Σχήμα 4. 1	Φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας IVN 780-P	60
Σχήμα 4. 2	Πυρανόμετρο SL 200	61
Σχήμα 4. 3	Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας	62
Σχήμα 4. 4	Πολύμετρο 41/2 DMM RE69	63
Σχήμα 4. 5	Πρόσοψη φωτοβολταϊκών πλαισίων	64
Σχήμα 4. 6	Πίσω όψη φωτοβολταϊκών πλαισίων	65
Σχήμα 4. 7	Διαδικασία μέτρησης με τον φορητό θερμικό αναλυτή εικόνας	67
Σχήμα 4. 8	Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας	67
Σχήμα 4. 9	Διαδικασία μέτρησης με το πυρανόμετρο	68
Σχήμα 4.10	Κουτί διακλάδωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 1	69
Σχήμα 4.11	Διαδικασία μέτρησης με το πολύμετρο	70
Σχήμα 4.12	Κουτί διακλάδωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 2	70
Σχήμα 4.13	Η επιφάνεια εργασίας του χρήστη του MikroSpec 4.0 Professional	73
Σχήμα 4.14	Ορισμός των τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας	74
Σχήμα 4.15	Ορισμός του συντελεστή ικανότητας εκπομπής	75
Σχήμα 4.16	Επιλογή περιοχών ενδιαφέροντος τύπου γραμμής	76
Σχήμα 4.17	Περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής	76
Σχήμα 4.18	Αντιστοίχηση των περιοχών ενδιαφέροντος τύπου γραμμής με το αντίστοιχο χρώμα απεικόνισης	77
Σχήμα 4.19	Θερμική εικόνα μέτρησης 11	78
Σχήμα 4.20	Θερμική εικόνα μέτρησης 11 με τις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής	78
Σχήμα 4.21	Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 της μέτρησης 11	79
Σχήμα 4.22	Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2 της μέτρησης 11	79
Σχήμα 4.23	Θερμική εικόνα μέτρησης 12	80
Σχήμα 4.24	Θερμική εικόνα μέτρησης 12 με τις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής	81

Σχήμα 4.25	Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 της μέτρησης 12	81
Σχήμα 4.26	Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2 της μέτρησης 12	81
Σχήμα 4.27	Θερμική εικόνα μέτρησης 13	82
Σχήμα 4.28	Θερμική εικόνα μέτρησης 13 με τις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής	82
Σχήμα 4.29	Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 της μέτρησης 13	83
Σχήμα 4.30	Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2 της μέτρησης 13	83
Σχήμα 4.31	Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για την μέτρηση 12	90
Σχήμα 4.32	Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 460 mΩ της μέτρησης 18 για το πλαίσιο 1	93
Σχήμα 4.33	Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 390 mΩ της μέτρησης 18 για το πλαίσιο 2	93
Σχήμα 4.34	Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 320 mΩ της μέτρησης 2 για το πλαίσιο 1	94
Σχήμα 4.35	Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 290 mΩ της μέτρησης 2 για το πλαίσιο 2	95

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. 1	Απόδοση ηλιακών κυψελών πυριτίου	
Πίνακας 3. 2	ικας 3. 2 Χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου SP75	
Πίνακας 4. 3	ικας 4.3 Χαρακτηριστικά φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας IVN 780-P	
Πίνακας 4. 2	Ιίνακας 4. 2 Χαρακτηριστικά πυρανομέτρου SL 200	
Πίνακας 4. 3	νακας 4.3 Χαρακτηριστικά μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας	
Πίνακας 4. 4	Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά πολυμέτρου 41/2 DMM RE69	
Πίνακας 4. 5	I. 5 Αποτελέσματα μετρήσεων	
Πίνακας 4. 6	Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου και του αναμενόμενου	96
	ρεύματος βραχυκύκλωσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1	80
Πίνακας 4. 7	Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου και του αναμενόμενου	07
	ρεύματος βραχυκύκλωσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2	8/
Πίνακας 4. 8	Τιμές φωτορεύματος για την κάθε μέτρηση	89
Πίνακας 4. 9	Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης	
	και του ρεύματος βραχυκύκλωσης του μοντέλου προσομοίωσης για το	90
	φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1	
Πίνακας 4.10	Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης	
	και του ρεύματος βραχυκύκλωσης του μοντέλου προσομοίωσης για το	91
	φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2	

Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει την επίδραση που προκαλούν οι αστοχίες στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με την χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων και με τις αρχές τις υπέρυθρης θερμογραφίας.

Αρχικά, αναφέρονται ορισμένα από τα προβλήματα και τις αστοχίες κατά την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, τα οποία φαίνεται να επηρεάζουν την απόδοση του. Επίσης, παρουσιάζεται η προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την χρήση του προγράμματος σχεδιασμού, ανάλυσης και προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων, Multisim. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών (τιμές ταχύτητας ανέμου, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, ρεύματος βραγυκύκλωσης, τάσης ανοικτού κυκλώματος) στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι τοποθετημένα στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών στην πόλη της Ξάνθης, για διάφορες χρονικές στιγμές. Μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, από το μοντέλο προσομοίωσης και από το θεωρητικό μοντέλο και με την χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας, εξάχθηκαν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ορισμένα από τα συμπεράσματα αυτά είναι ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης επηρεάζεται σημαντικά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και ότι στα φωτοβολταϊκά πλαίσια με hot spot προκαλείται μείωση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Λέξεις-κλειδιά: Θερμογραφία, Απόδοση, Φωτοβολταϊκό πλαίσιο, Προσομοίωση, Multisim, Mikrospec 4.0, Hot spot

Abstract

" Simulation of operation of photovoltaic modules and control of performance "

Thesis submitted to the Department of Production Engineering and Management, School of Engineering, Democritus University of Thrace, Greece, on October 2010

For the degree: Diploma in Production Engineering and Management (Dip. Eng.)

Supervisor: Assoc. Prof. P. N. Botsaris

This thesis examines the impact caused by failures in the performance of photovoltaic modules using electrical circuit simulation programs and the principles of infrared thermography.

Initially, are referred some of the problems and the failures at the operation of a photovoltaic module, which seem to affect performance. Also, is presented the simulation of the electric circuit of the photovoltaic module using the program Multisim which is used for design, analysis and simulation of electrical circuits. As part of this work, was realized measurement of certain characteristics (speed of wind, temperature, relative humidity, solar radiation, short circuit current, open circuit voltage) in photovoltaic modules that are placed in the roof of the building of Electrical Engineering in the city of Xanthi, for various periods of time. Through the results, which obtained from the measurements of the photovoltaic modules, from the model of simulation and from the theoretical model and using infrared thermography, were exported some important conclusions about the photovoltaic modules. Some of the conclusions are that the short circuit current is affected significantly from the solar radiation and that at the photovoltaic module with hot spot, the short circuit current is reduced.

Keywords: Thermography, Performance, Photovoltaic module, Simulation, Multisim, Mikrospec 4.0, Hot spot

Κεφάλαιο 1 **Λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων**

Περιεχόμενα

2
3
4
8
8
9
11
12
15
17
21
22

1.1 Εισαγωγή

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της σημερινής εποχής είναι η έντονη περιβαλλοντική και ενεργειακή κρίση. Η μείωση των φυσικών καυσίμων εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης τους, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η καταστροφή του οικοσυστήματος και του περιβάλλοντος είναι μερικά από τα προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών. Επιτακτική, λοιπόν, προβάλλει η ανάγκη για την ανάπτυξη εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας με υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλή εκπομπή ρύπων.

Μια λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αποτελούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η γεωθερμία, η ενέργεια των ανέμων και των ωκεανών, η καύση φυτικών προϊόντων (βιομάζα) ή οργανικών αποβλήτων.

Μια άλλη πηγή ενέργειας που φαίνεται να συνδυάζει ιδανικά τις παραπάνω απαιτήσεις για νέες ενεργειακές αναζητήσεις, και που η ενδεχόμενη αξιοποίηση της βρήκε ανεπιφύλακτη αποδοχή στη διεθνή κοινή γνώμη, είναι η ηλιακή ακτινοβολία, που μετατρέπεται αφ' ενός σε θερμότητα και αφ' ετέρου σε ηλεκτρισμό βάσει του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Γι' αυτό, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτού του είδους έχουν την δυνατότητα να παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα όταν εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία [1].

Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας στη Γη. Το ετήσιο συνολικό ποσό ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης είναι περίπου ίσο με 10.000 φορές την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή με ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο και δεν δημιουργεί απόβλητα ή άλλα άχρηστα προϊόντα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών με κριτήριο την απαίτηση ισχύος, από πολύ μικρές τιμές έως πολύ μεγάλες. Υπάρχει αφθονία πρώτων υλών για την κατασκευή των ηλιακών κυψελών. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και πολύ μικρό κόστος συντήρησης.

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

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την σωστή λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επίσης, παρουσιάζονται ορισμένα από τα προβλήματα λειτουργίας τους.

1.2 Η ηλιακή ακτινοβολία

Για την παραγωγή ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας, την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται από τον πυρήνα του Ήλιου, όπου γίνεται η πυρηνική σύντηξη ατόμων υδρογόνου και ατόμων ηλίου. Κάθε δευτερόλεπτο αυτής της διεργασίας, 700 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου μετατρέπονται σε 695 εκατομμύρια τόνους ηλίου. Οι υπόλοιποι 5 εκατομμύρια τόνοι μετατρέπονται σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, η οποία εκλύεται από την επιφάνεια του Ήλιου στο διάστημα.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέλθει στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος της σκεδάζεται (από μόρια αέρα, νερού και σκόνης) και ένα μέρος απορροφάται (από O3, H20, CO2). Μόνο, λοιπόν, ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει στο έδαφος χωρίς να έχει υποστεί κάποια επίδραση. Αυτή η συνιστώσα ακτινοβολία ονομάζεται ακτινική ή άμεση ακτινοβολία.

Ένα μέρος της σκεδασμένης ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει στο διάστημα, όμως το υπόλοιπο μέρος της σκεδασμένης ηλιακής ακτινοβολίας καταφέρνει να 'φτάσει' στο έδαφος. Η ηλιακή αυτή ακτινοβολία, της οποίας η κατεύθυνση έχει αλλάξει λόγω της σκέδασης στην ατμόσφαιρα, ονομάζεται διάχυτη ακτινοβολία. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1. 1: Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Κεφάλαιο 1: Σωστή λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο είναι το άθροισμα της ακτινικής και της διάχυτης ακτινοβολίας:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\mathbf{b}} + \mathbf{I}_{\mathbf{d}} \tag{1.1}$$

όπου:

Ι είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, $I_{\rm b}$ είναι η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, $I_{\rm d}$ είναι η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

Εάν η υπό εξέταση επιφάνεια είναι κεκλιμένη, τότε στον προηγούμενο ορισμό πρέπει να προστεθεί η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος (ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία).

$$\mathbf{I}_{\mathbf{T}} = \mathbf{I}_{\mathbf{b},\mathbf{T}} + \mathbf{I}_{\mathbf{d},\mathbf{T}} + \mathbf{I}_{\mathrm{refl},\mathbf{T}}$$
(1.2)

όπου:

 I_{T} είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, $I_{b,T}$ είναι η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, $I_{d,T}$ είναι η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, $I_{refl,T}$ είναι η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο [2,3].

1.3 Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική

Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Henri Becquerel. Ο Becquerel ανακάλυψε πως είναι δυνατόν να εμφανισθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν μια φωτεινή πηγή εφαρμοσθεί σε ορισμένα χημικά διαλύματα. Το 1883, η πρώτη ηλιακή κυψέλη κατασκευάστηκε από τον Charles Fritts, ο οποίος χρησιμοποίησε το σελήνιο με ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα χρυσού για την κατασκευή των ενώσεων. Η συσκευή ήταν περίπου 1% αποτελεσματική. Στη συνέχεια, ο Ρώσος φυσικός Aleksandr Stoletov κατασκεύασε την πρώτη ηλιακή κυψέλη με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (το ανακάλυψε ο Heinrich Hertz νωρίτερα το 1887). Ενώ, το 1946 ο Russell Ohl κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την κατασκευή ενώσεων ηλιακών κυψελών. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο άρχισε να γίνεται παγκοσμίως γνωστή κυρίως με την ανακοίνωση της πρώτης κατασκευής ηλιακής κυψέλης πυριτίου από τους Fuller, Pearson και Chappin το 1954 [4,5].

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά (διαπερατότητα) είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα.

Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

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



Σχήμα 1. 2: Άτομο πυριτίου

Το πυρίτιο έχει κάποιες ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική του δομή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι πρώτες δύο στοιβάδες, αυτές που είναι πιο κοντά στο κέντρο, είναι συμπληρωμένες (2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα). Η εξωτερική στοιβάδα όμως έχει μόνο 4 ηλεκτρόνια ενώ θα έπρεπε να έχει 8. Γι' αυτό μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Έτσι, τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κρυσταλλική δομή του πυριτίου, που είναι πολύ σημαντική για τις ηλιακές κυψέλες.

Αυτό είναι το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο. Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού αφού κανένα ηλεκτρόνιο του δεν είναι ελεύθερο να μετακινηθεί όπως τα ηλεκτρόνια στους καλούς αγωγούς, σαν το χαλκό. Αντίθετα τα ηλεκτρόνια του είναι 'κλειδωμένα' στην κρυσταλλική δομή του. Το πυρίτιο σε μια ηλιακή κυψέλη τροποποιείται ελαφρά έτσι ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει σαν ηλιακή κυψέλη. Το κρυσταλλικό πυρίτιο αναμιγνύεται με άτομα φωσφόρου. Ο φώσφορος έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και όχι 4 όπως το πυρίτιο. Πάλι συνδέεται με τα γειτονικά του άτομα πυριτίου αλλά ο φώσφορος έχει ένα ηλεκτρόνιο που δεν συνδέεται με κάποιο άλλο. Δεν σχηματίζει δεσμό, αλλά υπάρχει ένα θετικό πρωτόνιο στον πυρήνα του φωσφόρου που το συγκρατεί.

Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο καθαρό πυρίτιο, για παράδειγμα με τη μορφή θερμότητας, μερικά ηλεκτρόνια σπάζουν τους δεσμούς τους και φεύγουν από τα άτομα τους. Τότε δημιουργείται μια κενή θέση στο άτομο. Αυτά τα ηλεκτρόνια περιφέρονται τυχαία μέσα στο κρυσταλλικό πυρίτιο αναζητώντας μια άλλη θέση. Έτσι μεταφέρουν την ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα). Είναι τόσο λίγα που δεν είναι πολύ χρήσιμα. Το πυρίτιο, όμως, με άτομα φωσφόρου είναι κάτι διαφορετικό. Χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να ελευθερωθεί το επιπλέον ηλεκτρόνιο του φωσφόρου, αφού αυτό δεν σχηματίζει δεσμό με άλλο (τα γειτονικά ηλεκτρόνια δεν το συγκρατούν). Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η διαδικασία μίξης ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί πυρίτιο πού ονομάζεται πυρίτιο τύπου Ν (Negative, Αρνητικό) εξαιτίας της υπεροχής του αριθμού των ηλεκτρονίων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος.

Στην πραγματικότητα μόνο ένα μέρος της ηλιακής κυψέλης είναι πυρίτιο τύπου Ν. Το άλλο μέρος είναι ανάμειξη κρυσταλλικού πυριτίου με βόριο, το οποίο έχει μόνο 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα αντί για 4, και μετατρέπεται σε πυρίτιο τύπου Ρ. Αντί να έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια, το πυρίτιο τύπου Ρ (Positive, θετικό) έχει ελεύθερες θέσεις. Οι θέσεις αυτές είναι ουσιαστικά απουσία ηλεκτρονίων, και έτσι μεταφέρουν αντίθετο φορτίο (θετικό) και περιφέρονται όπως και τα ηλεκτρόνια.

Όταν τοποθετηθούν μαζί πυρίτιο τύπου P και N, η ηλιακή κυψέλη έχει τουλάχιστον ένα ηλεκτρικό πεδίο. Χωρίς ηλεκτρικό πεδίο, η κυψέλη δεν θα λειτουργούσε. Ξαφνικά τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N ψάχνουν για ελεύθερες θέσεις και προσπαθούν να καλύψουν τις κενές θέσεις στο πυρίτιο τύπου P. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N αλλά όχι αντίστροφα. Έτσι, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, στο οποίο τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν σε μια μόνο κατεύθυνση. Κεφάλαιο 1: Σωστή λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων



Σχήμα 1. 3: Το ηλεκτρικό πεδίο μιας ηλιακής κυψέλης

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

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις της ηλιακής κυψέλης σύμφωνα με την διαδικασία που προαναφέρθηκε ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο [1,5,6].



Σχήμα 1. 4: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

1.4 Οι ηλιακές κυψέλες

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



Σχήμα 1. 5: Σύνθεση ηλιακών κυψελών και πλαισίων

1.4.1 Η δομή των ηλιακών κυψελών

Για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, οι ηλιακές κυψέλες έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμα τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου και, για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό.

Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από:

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου Ρ

Κεφάλαιο 1: Σωστή λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Πυρίτιο τύπου Ν
- Μη-ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγώγιμα ελάσματα [7].



Σχήμα 1. 6: Δομή ηλιακής κυψέλης

1.4.2 Τα είδη των ηλιακών κυψελών

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

1. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους οι ηλιακές κυψέλες έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή μετατρέπουν μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η κατασκευή τους όμως είναι πιο πολύπλοκη γιατί απαιτεί την κατασκευή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος κατασκευής.



Σχήμα 1. 7: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

2. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

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



Σχήμα 1.8: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

3. Άμορφο πυρίτιο

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

Κεφάλαιο 1: Σωστή λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων



Σχήμα 1. 9: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο άμορφου πυριτίου

Εκτός από τους παραπάνω τρεις τύπους ηλιακών κυψελών από πυρίτιο που διατίθενται στην παγκόσμια αγορά, γίνονται έρευνες και προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση και άλλων στοιχείων (είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό) όπως γάλλιο-αρσενικό (GaAs),θείο-κάδμιο (CdS), φώσφορο-ίνδιο (InP).

Ο Πίνακας 1.1 απεικονίζει την απόδοση των τριών συνηθέστερων τύπων ηλιακών κυψελών [5].

Πίνακας 1. 1: Απόδοση ηλιακών κυψελών πυριτίου

Υλικό της ηλιακής κυψέλης	Απόδοση ηλιακής κυψέλης
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	13-16%
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	12-14%
Άμορφο πυρίτιο	6-8%

1.5 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό ηλιακών κυψελών. Για να γίνει εφικτή η λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό να προστατεύονται οι ηλιακές κυψέλες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες είναι πολύ λεπτές και άρα επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η δομή τους συχνά είναι διαφορετική για τα διάφορα είδη ηλιακών κυψελών ή για τις ποικίλες εφαρμογές τους.

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

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

Κεφάλαιο 1: Σωστή λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Οι ηλιακές κυψέλες περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1. 10: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή και συνδυασμένες προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Επίσης, οι ηλιακές κυψέλες πρέπει να όμοιες, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και, συνακόλουθα, η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [1,7].

1.6 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα

Στο Σχήμα 1.11 απεικονίζεται ένα βασικό φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένα φορτίο και ένα καλώδιο σύνδεσης.

Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων αλλά και τα συμβαλλόμενα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτώνται από την απαιτούμενη ισχύ του συστήματος και το είδος της εφαρμογής. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και τα μέρη από τα οποία αποτελούνται και συμβάλλουν στην σωστή λειτουργία τους.



Σχήμα 1. 11: Φωτοβολταϊκό σύστημα

Οι βασικοί τύποι Φ/Β συστημάτων είναι οι εξής:

1. Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

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

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από:

Φωτοβολταϊκά πλαίσια

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

Ανεμογεννήτρια

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

Ρυθμιστής φόρτισης

Πρόκειται για μία ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου της φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Είναι απαραίτητη συσκευή για την μακροχρόνια χρήση του συσσωρευτή και την σωστή λειτουργία του. Οι περισσότεροι ρυθμιστές φόρτισης διαθέτουν οθόνη με όλες τις πληροφορίες του συστήματος.

Συσσωρευτής

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

Μετατροπέας

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

2. Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, εφ' όσον υπάρχει, διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία, τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης, στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης.

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν διαθέτουν συσσωρευτή, λειτουργούν μόνο ταυτόχρονα με άλλη πηγή ρεύματος και δεν προσφέρουν αυτονομία σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Αποτελούνται από:

Φωτοβολταϊκά πλαίσια

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

Μετατροπέας δικτύου

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

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

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

- Στήριξη με σταθερό σύστημα στο έδαφος.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επικληνή στέγη.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επίπεδη οροφή κτιρίου [1,7].

1.7 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια για να έχουν την μέγιστη απόδοση, θα πρέπει να δέχονται συνεχώς την μέγιστη ακτινοβολία. Οι ηλιακές ακτίνες θα πρέπει να προσπίπτουν πάντα κάθετα στην επιφάνεια του γιατί τότε έχουν την μεγαλύτερη πυκνότητα στην μονάδα επιφανείας και δεν ανακλώνται στην γυάλινη επικάλυψη του πλαισίου. Ωστόσο, ο ήλιος κινείται κατά την διάρκεια της ημέρας και για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του πλαισίου, θα πρέπει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να παρακολουθεί συνεχώς την κίνηση του ήλιου [7]. Οπότε, η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τη σωστή τοποθέτηση και διάταξη των πλαισίων.

Αυτό για πρακτικούς λόγους δεν είναι εύκολο. Ωστόσο, επιλέγοντας τον καταλληλότερο σταθερό προσανατολισμό για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, θα

υπάρξουν ικανοποιητικά αποτελέσματα απόδοσης. Στη συνέχεια, ορίζονται οι γωνίες που βοηθούν στον ορισμό του κατάλληλου προσανατολισμού:

1. Γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ω:

Η γωνία ω ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή.

2. Προσανατολισμός του πλαισίου (β), αζιμούθια γωνία επιφάνειας (α):

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία είναι ο προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες, την κλίση (β) και την αζιμούθια γωνία επιφάνειας (α), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.12.

Η κλίση του πλαισίου (β) είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του πλαισίου και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 180°. Η αζιμούθια γωνία επιφάνειας του πλαισίου (α) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του πλαισίου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι +180°.

Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς το πλαίσιο (π.χ. με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή ή φωτοκύτταρων), ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις ειδικών εφαρμογών [1].



Σχήμα 1. 12: Προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου

1.8 Προβλήματα λειτουργίας

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ο κύκλος ζωής τους είναι 30 χρόνια. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων για 30 χρόνια δεν είναι εφικτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορα σφάλματα που παρατηρούνται στην λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία όχι μόνο μειώνουν τον χρόνο ζωής αλλά μειώνουν και την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Για να κατανοηθεί ο όρος αστοχία ή σφάλμα που αναφέρεται παραπάνω είναι απαραίτητο να καθοριστεί ο όρος αξιοπιστία. Όταν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφέρεται ως αξιόπιστο, τότε αυτό σημαίνει ότι το πλαίσιο έχει μεγάλη πιθανότητα να λειτουργήσει επαρκώς για τον σκοπό που έχει σχεδιαστεί, στον αναμενόμενο χρόνο ζωής του και με την αναμενόμενη απόδοση όπως αυτή έχει οριστεί από τον κατασκευαστή. Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν είναι αξιόπιστο όταν εμφανίζει κάποια αστοχία και η απόδοση του μειώνεται για κάθε χρόνο χρήσης του.

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

Η πρώτη κατηγορία αφορά σε σφάλματα που σχετίζονται με την ηλιακή κυψέλη και μπορεί να προκληθούν από μερικώς ή ολικώς κατεστραμμένες ηλιακές κυψέλες. Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, από την οποία η ηλιακή κυψέλη μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά και δεν είναι δυνατόν να προστατευτεί ανεξαρτήτως του περιβλήματος. Επίσης, στις ηλιακές κυψέλες μπορεί να υπάρχουν ρωγμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από την μηχανική κοπή των κυψελών κατά την δημιουργία τους. Τέλος, από την κακή σύνδεση των ηλιακών κυψελών μπορεί να υπάρξει μείωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Τα σφάλματα που σχετίζονται με το περίβλημα της ηλιακής κυψέλης μπορεί να οφείλονται στην αστοχία υλικού (υλικά κακής ποιότητας) των δομικών στοιχείων του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επίσης, η έλλειψη ακεραιότητας της δομής του πλαισίου μπορεί να προκαλέσει την μείωση της αντοχής του σε φορτία ανέμου και την εύκολη στρέβλωση του. Με αποτέλεσμα ρυπασμένα αέρια ή υγρασία να εισχωρούν στο εσωτερικό του πλαισίου και να προκαλούν την μείωση της απόδοσης του πλαισίου σε ποσοστό μεγαλύτερο του 1% για κάθε χρόνο χρήσης. Ιδιαίτερα, η υγρασία μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των ηλιακών κυψελών και των συνδέσεων τους. Τέλος, η κακή ποιότητα ή η καταστροφή της μόνωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να προκαλέσει διαρροή ρεύματος, το οποίο με τη σειρά του να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα [8].
Εκτός από τα είδη των σφαλμάτων που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχει μια ξεχωριστή κατηγορία που είναι πολύ σημαντική και η οποία παρατηρείται συχνά. Η κατηγορία αυτή ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας (hot spot). Για την σωστή παρουσίαση του φαινόμενου θερμής κηλίδας είναι απαραίτητη η εξήγηση της λειτουργίας της ηλιακής κυψέλης.

Όπως αναφέρεται και στην αρχή του κεφαλαίου, η ηλιακή κυψέλη είναι ουσιαστικά μια επαφή P-N. Όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, λειτουργεί σαν μια πηγή ρεύματος σε κλειστό κύκλωμα. Αν συνδεθούν σε σειρά ηλιακές κυψέλες, οι τάσεις στα άκρα τους αθροίζονται και συμπεριφέρονται σαν μια ενιαία πηγή. Όταν μια ηλιακή κυψέλη σκιάζεται, τότε αυτή δεν συμπεριφέρεται σαν μια πηγή ρεύματος αλλά σαν μια δίοδο που μάλιστα είναι πολωμένη ανάστροφα αφού η συνολική τάση των υπολοίπων κυψελών εφαρμόζεται πάνω της με αντίστροφη φορά. Η σκιασμένη ηλιακή κυψέλη με την σειρά της εμποδίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Άρα, η συνολική συμπεριφορά του πλαισίου καθορίζεται από την συγκεκριμένη ηλιακή κυψέλη.

Όταν μια ηλιακή κυψέλη σκιάζεται και δέχεται την ανάστροφη τάση των υπολοίπων, είναι δυνατόν να καταρρεύσει η επαφή P-N και να δημιουργηθεί το φαινόμενο zener. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού είναι δυνατόν να περάσει ρεύμα κατά την ανάστροφη φορά και με μικρή αύξηση της τάσης να διέλθει μεγάλο ρεύμα. Το ανάστροφο ρεύμα αυξάνει την θερμοκρασία της κυψέλης και μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή της. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας [9,10].



Σχήμα 1. 13: Απεικόνιση θερμής κηλίδας

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

- 1. Χαμηλή παράλληλη αντίσταση
- Η χειρότερη περίπτωση σκίασης είναι όταν ολόκληρη η ηλιακή κυψέλη είναι σκιασμένη.
- Στις κυψέλες χαμηλής παράλληλης αντίστασης, το φαινόμενο θερμής κηλίδας δημιουργείται επειδή ένα υψηλό ποσό ρεύματος ρέει σε μια μικρή περιοχή. Επειδή αυτό είναι ένα τοπικό φαινόμενο, παρατηρείται διακύμανση στην τιμή της απόδοσης για αυτού του είδους τις κυψέλες. Οι ηλιακές κυψέλες με τη χαμηλότερη παράλληλη αντίσταση έχουν πιθανότητα να λειτουργούν σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες σε εντοπισμένες περιοχές.
- Επειδή η περιοχή που δημιουργείται η θερμότητα είναι μικρή, μπορεί να απαιτείται λίγος χρόνος για την θέρμανση του σημείου που έχει πρόβλημα.
- 2. Υψηλή παράλληλη αντίσταση
- Η χειρότερη περίπτωση σκίασης είναι όταν μια μικρή περιοχή της ηλιακής κυψέλης είναι σκιασμένη.
- Οι κυψέλες υψηλής παράλληλης αντίστασης περιορίζουν την αντίστροφη ροή του ρεύματος στο κύκλωμα και γι' αυτό τον λόγο θερμαίνονται. Η ηλιακή κυψέλη με την υψηλότερη παράλληλη αντίσταση θα έχει την υψηλότερη διάχυση ενέργειας.
- Επειδή η θερμότητα είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρη την περιοχή της ηλιακής κυψέλης, μπορεί να απαιτείται πολύς χρόνος για την θέρμανση του σημείου που έχει πρόβλημα [11].

Για την εξάλειψη των θερμών κηλίδων είναι απαραίτητο να τοποθετείται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η συγκράτηση σκόνης ή χιονιού και η σκίαση από αντικείμενα του περιβάλλοντος να μην εμποδίζει την ηλιακή κυψέλη.

Έχουν αναπτυχθεί, και μάλιστα σε υψηλό επίπεδο, τρόποι για τον έλεγχο των σφαλμάτων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Μερικοί από τους τρόπους ανίχνευσης σφαλμάτων είναι:

- Υπέρυθρη απεικόνιση
- P-Spice προσομοίωση
- AMPS προσομοίωση
- Ανάλυση καμπύλης τάσης-ρεύματος
- Οπτική απεικόνιση [8].

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

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζονται και ερμηνεύονται οι θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει. Με την θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας.

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

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

Υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την υπέρυθρη ακτινοβολία, η παθητική και η ενεργητική προσέγγιση. Στην παθητική θερμογραφία, τα προς εξέταση αντικείμενα είναι σε υψηλότερη ή χαμηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον και ασυνήθιστα θερμοκρασιακά προφίλ υποδεικνύουν ένα πιθανό πρόβλημα. Γενικά, η παθητική θερμογραφία είναι ποιοτική μέθοδος γιατί ο στόχος είναι η ανίχνευση αστοχιών. Στην ενεργητική θερμογραφία, είναι απαραίτητο να δοθεί ενέργεια στο αντικείμενο για να παρατηρηθούν θερμοκρασιακές διαφορές οι οποίες αποδεικνύουν την ύπαρξη υποεπιφανειακών αστοχιών [12,13,14].

1.9 Σύνοψη

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στην πηγή ενέργειας αυτών των συστημάτων, την ηλιακή ακτινοβολία. Δίνονται ορισμένα σημαντικά στοιχεία για την κρυσταλλική δομή των ηλιακών κυψελών. Στη συνέχεια, αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας των ηλιακών κυψελών και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο μέσω του οποίου μετατρέπεται η ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Περιγράφεται η δομή των ηλιακών κυψελών, των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την περαιτέρω κατανόηση της λειτουργίας τους. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την καλύτερη απόδοση τους. Τέλος, περιγράφονται οι σιθανές αστοχίες που μπορεί να εμφανιστούν στα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι οποίες επηρεάζουν την λειτουργία τους και μειώνουν την απόδοση τους.

1.10 Βιβλιογραφία

[1] Καγκαράκη, Κ., (1992), Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, ΕκδόσειςΣυμμετρία

[2] Duffie, J. A. & Beckman, W. A., (1991), Solar Engineering of Thermal Processes, 2η Έκδοση, Wiley, New York

[3] <u>http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html</u>, προσπελάστηκε στις 17 Ιουλίου 2010

[4] Markvart, Τ., (2003), Ηλεκτρισμός Από Ηλιακή Ενέργεια, Εκδόσεις ΙΩΝ

[5] <u>www.selasenergy.gr</u>, προσπελάστηκε στις 25 Ιουλίου 2010

[6] <u>www.telematica.gr</u>, προσπελάστηκε στις 17 Ιουλίου 2010

[7] Luque, A. & Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering

[8] McMahon, T.J, (2008), *Solar Cell/ Module Degradation And Failure Diagnostics*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado

[9] Molenbroek, E., Waddington, D.W. & Emery, K.A., *Hot Spot Susceptibility And Testing Of PV Modules*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado

[10] Simon, M. & Meyer, E.L, (2010), 'Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells', *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, pp. 106–113

[11] Wohlgemuth, J. & Herrmann, W., (2005), *Hot Spot Tests For Crystalline Silicon Modules*, BP Solar International, Frederick, Maryland, US

[12] <u>http://en.wikipedia.org/wiki/thermographic_inspection</u>,

προσπελάστηκε στις 30 Ιουλίου 2010

[13] <u>http://cooperator.com/articles/1046/1/X-Ray_vision/page1.html</u>, προσπελάστηκε στις 30 Ιουλίου 2010

[14] Botsaris, P.N. & Tsanakas, J.A., (2010), *Infrared thermography as* an estimator of a photovoltaic module performance via operating temperature measurements, The 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia.

Κεφάλαιο 2

Απόδοση φωτοβολταϊκών πλαισίων και συστημάτων

Περιεχόμενα

2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης	24
2.2.1 Μη ιδανική ηλιακή κυψέλη	24

2.2.2 Ιδανική ηλιακή κυψέλη	26
2.3 Απόδοση ηλιακής κυψέλης	31
2.4 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου	31
2.5 Αξιολόγηση απόδοσης	37
2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων	38
2.7 Σύνοψη	42
2.8 Βιβλιογραφία	43

2.1 Εισαγωγή

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου χαρακτηρίζεται ικανοποιητική ανάλογα με την απόδοση του. Γι' αυτό, ο βαθμός απόδοσης του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες σωστής λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο αναμενόμενος βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου δίνεται από το φυλλάδιο του κατασκευαστή και έχοντας τον βαθμό απόδοσης αναφοράς μπορεί να παρατηρηθεί κάποιο σφάλμα στην λειτουργία του. Ωστόσο, για να οριστεί ο βαθμός απόδοσης είναι απαραίτητο πρώτα να δοθεί μια λεπτομερής περιγραφή του ηλεκτρικού κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης για να κατανοηθεί περαιτέρω ο τρόπος λειτουργίας της.

2.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης

Για να κατανοηθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά των ηλιακών κυψελών, είναι χρήσιμο να δημιουργηθεί ένα πρότυπο το οποίο είναι ηλεκτρικά ισοδύναμο, και βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή. Ένα ιδανικό ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να διαμορφωθεί από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο. Στην πράξη καμία ηλιακή κυψέλη δεν είναι ιδανική, έτσι, μια παράλληλη αντίσταση και μια αντίσταση σε σειρά προστίθενται στο μοντέλο.

2.2.1 Μη ιδανική ηλιακή κυψέλη

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

Κεφάλαιο 2: Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων



Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικής ηλιακής κυψέλης

όπου:

I_L είναι το φωτόρευμα, δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα της ηλιακής κυψέλης που οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από τον τύπο **I**_L = $\frac{I_{L,0}G}{G_0}$ όπου το **G** αντιστοιχεί στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, το **G**₀ στην ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς και το **I**_{L,0} στο φωτόρευμα αναφοράς,

Ιρ είναι το ρεύμα της διόδου,

 ${\it I}_{\it SH}$ είναι το ρεύμα που διέρχεται από την παράλλη
λη δίοδο,

Ι είναι το ρεύμα φορτίου,

 R_{s} είναι η αντίσταση σειράς (συνήθως R_{s} <5Ω),

 \mathbf{R}_{sh} είναι η παράλληλη αντίσταση (συνήθως \mathbf{R}_{sh} >500Ω).

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

$$I = I_{L} - I_{D} - I_{SH} \quad (A) \tag{2.1}$$

ή αλλιώς

$$I = I_{L} - I_{SH} \left(e^{\frac{q(V+R_{S}I)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+R_{S}I}{R_{SH}} \quad (A)$$
(2.2)

όπου:

V είναι η τάση στα άκρα της διόδου,

Τείναι η απόλυτη θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης σε $^{\rm o}\!K,$

k είναι η σταθερά του Boltzmann,

n είναι ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου και παίρνει τιμές 1 ή 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Όταν η ηλιακή κυψέλη λειτουργεί στο ανοικτό κύκλωμα, τότε I = 0 και η τάση σε όλους τους ακροδέκτες εξόδου ορίζεται ως η τάση ανοιχτού κυκλώματος. Η **V**_{oc} είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης και προκύπτει από την σχέση 2.2 για I=0. Όταν I=0, όλο το φωτόρευμα περνά μέσα από τη δίοδο D του Σχήματος 2.1 και:

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_{SH}} + 1 \right) \quad (V)$$
(2.3)

Ομοίως, όταν η ηλιακή κυψέλη λειτουργεί σε βραχυκύκλωμα, τότε V = 0 και το ρεύμα Ι ορίζεται ως το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Το I_{SC} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης της ηλιακής κυψέλης και προκύπτει από την σχέση 2.2 για V=0:

$$I_{SC} = I_L - I_{SH} \left(e^{\frac{qR_S I_{SC}}{nkT}} - 1 \right) - \frac{R_S I_{SC}}{R_{SH}} \quad (A)$$
(2.4)

2.2.2 Ιδανική ηλιακή κυψέλη

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

$$I = I_{L} - I_{SH} (e^{qV/nkT} - 1)$$
 (A) (2.5)

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

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_{SH}} + 1 \right) \quad (V)$$
(2.6)

Η γραφική παράσταση μεταξύ του ρεύματος εξόδου (Ι) και της τάσης εξόδου (V) μιας ηλιακής κυψέλης ονομάζεται Ι-V χαρακτηριστική και παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Μια τέτοια αντιπροσωπευτική καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2:

Κεφάλαιο 2: Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων



Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική Ι-V της ηλιακής κυψέλης

Η ισχύς που παράγει μια ηλιακή κυψέλη είναι:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{I} \quad (W) \tag{2.7}$$

όπου:

V είναι η τάση στην έξοδο,

Ι είναι το ρεύμα στην έξοδο.

Η μέγιστη ισχύς **Ρ**_{mex} επιτυγχάνεται όταν το γινόμενο IV είναι μέγιστο:

$$P_{max} = V_m I_m \quad (W) \tag{2.8}$$

όπου:

 $\mathbf{V}_{\mathbf{m}}$ είναι η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος,

 \mathbf{I}_m είναι το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το σημείο μέγιστης ισχύος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} και η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} . Η μέγιστη ισχύς P_m προφανώς ισούται με το εμβαδό του ορθογωνίου $I_m V_m$ και αναφέρεται ως ονομαστική ισχύς της ηλιακής κυψέλης.

Κεφάλαιο 2: Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική Ι-V της ηλιακής κυψέλης με τις κυριότερες παραμέτρους

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

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{0C}I_{SC}}$$
(2.9)

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

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

Οι αντιστάσεις ονομάζονται εσωτερικές παράμετροι της ηλιακής κυψέλης διότι σχετίζονται με τον τρόπο κατασκευής της, ενώ η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία αποτελούν τις εξωτερικές παραμέτρους.

Η αντίσταση σειράς αντιπροσωπεύει τις ωμικές απώλειες της κυψέλης λόγω των μεταλλικών επαφών της. Αυξάνοντας την τιμή της αντίστασης σειράς, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται και άρα μειώνεται και η ισχύς εξόδου της ηλιακής κυψέλης (Σχήμα 2.4). Η παράλληλη αντίσταση οφείλεται στο ρεύμα διαρροής της επαφής. Αν αυξηθεί η τιμή της παράλληλης αντίστασης, το εμβαδό του ορθογωνίου της ισχύς εξόδου μεγαλώνει και άρα αυξάνεται η ισχύς εξόδου (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την αντίσταση σειράς



Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την παράλληλη αντίσταση

Η ισχύς εξόδου της ηλιακής κυψέλης αποκτά υψηλότερες τιμές με την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, επειδή τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνονται (Σχήμα 2.6). Όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, παρατηρείται μια μικρή αύξηση του φωτορεύματος και μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Όμως, η ισχύς εξόδου της κυψέλης τελικά μειώνεται (Σχήμα 2.7). Από τα Σχήματα 2.6 και 2.7 φαίνεται, ότι το σημείο μέγιστης ισχύος εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασιακή μεταβολή της ηλιακής κυψέλης. Επίσης, παρατηρείται ότι η παραγόμενη ισχύς από την ηλιακή κυψέλη είναι σχεδόν ευθέως ανάλογη προς την ένταση του ηλιακού φωτός. Ένα σημαντικό γνώρισμα των ηλιακών κυψελών είναι ότι η τάση της κυψέλης παραμένει σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της έντασης του φωτός. Εντούτοις, το ρεύμα σε μια διάταξη ηλιακής κυψέλης είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο προς την ένταση του φωτός.



Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικές Ι-V σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

2.3 Απόδοση ηλιακής κυψέλης

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

$$n_c = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{GA_C} = \frac{FFV_{OC}I_{SC}}{GA_C}$$
(2.10)

όπου:

G είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία,

A_c είναι το εμβαδόν της επιφάνειας της ηλιακής κυψέλης.

2.4 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από $N_{\rm F}$ παράλληλους κλάδους με $N_{\rm S}$ ηλιακές κυψέλες, ο καθένας.



Σχήμα 2.8: Διάταξη φωτοβολταϊκού πλαισίου

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

$$I^{M} = I_{SC}^{M} \left(1 - e^{\frac{q \left(v^{M} - v_{OC}^{M} + R_{S}^{M} I^{M} \right)}{N_{S}^{M} n k T}} \right)$$
(A) (2.11)

όπου:

$$\begin{split} I_{SC}^{M} &= N_{p} I_{SC}^{C} \text{ είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου,} \\ V_{oc}^{M} &= N_{S} V_{oc}^{C} \text{ είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος του πλαισίου,} \\ R_{S}^{M} &= (N_{S}/N_{p}) R_{S}^{C} \text{ είναι ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά του πλαισίου.} \end{split}$$

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

- Θερμοκρασία = 25° C,
- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$.

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

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

- Μέγιστη ισχύς $P^{M}_{max,0}$
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC, O}^{M}$
- Τάση ανοιχτού κυκλώματος $V^{M}_{oc,0}$
- Αριθμός εν σειρά στοιχείων N₅
- Αριθμός παράλληλων στοιχείων N_P
- 2. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζονται τα $P_{max,0}^{c}$, $I_{sc,0}^{c}$, $V_{oc,0}^{c}$ και R_{s}^{c} (ο δείκτης 0 αναφέρεται σε STC) από τις μαθηματικές σχέσεις:

$$P_{max,0}^{c} = \frac{P_{max,0}^{M}}{N_{S} N_{P}} \quad (W)$$
 (2.12)

$$V_{0C,0}^{C} = \frac{v_{0C,0}^{M}}{N_{S}} \quad (V)$$
(2.13)

$$I_{SC,0}^{C} = \frac{I_{SC,0}^{M}}{N_{P}} \quad (A)$$

$$V_{t,0}^{\mathcal{C}} = \frac{nkT}{q} \quad (V) \tag{2.15}$$

$$v_{0C,0} = \frac{v_{0C,0}^{c}}{v_{c,0}^{c}}$$
(2.16)

$$FF = \frac{v_{0C,0} - \ln(v_{0C,0} + 0.72)}{v_{0C,0} + 1}$$
(2.17)

$$FF_0 = \frac{P_{max,0}^C}{V_{GC,0}^C I_{SC,0}^C}$$
(2.18)

$$r_{S} = 1 - \left(\frac{FF}{FF_{0}}\right) \tag{2.19}$$

$$R_{\mathcal{S}}^{\mathcal{C}} = \frac{r_{\mathcal{S}} V_{\mathcal{GC}, \mathfrak{D}}^{\mathcal{C}}}{I_{\mathcal{SC}, \mathfrak{D}}^{\mathcal{C}}} \quad (\Omega)$$
(2.20)

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

Κεφάλαιο 2: Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων

$$I_{SC}^{C} = \frac{I_{SC,0}^{C}}{G_{0}} G \quad (A)$$
(2.21)

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

$$T = T_a + \frac{T_{ref} - T_{a,ref}}{c_{ref}} G$$
(2.22)

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

$$V_{QC}^{C} = V_{QC,0}^{C} + c(T - T_{0}) \quad (V)$$
(2.23)

όπου:

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

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

$$I^{M} = N_{P} I_{SC}^{C} \left(1 - e^{\frac{\left(v^{M} - N_{S} v_{OC}^{c} + R_{S}^{c} I^{M} N_{S} / N_{P} \right)}{v_{t}^{C} N_{S}}} \right)$$
(A) (2.24)

όπου:

$$V_t^c = nk(273 + T)/q$$
 (V) (2.25)

Η ισχύς εξόδου του πλαισίου επομένως είναι:

$$P_{out}^{M} = V^{M} I^{M} \quad (W) \tag{2.26}$$

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα όπως φαίνεται από τα Σχήματα 2.9 και 2.10 αντίστοιχα:



Σχήμα 2.9: Σύνδεση ηλιακών κυψελών σε σειρά



Σχήμα 2.10: Σύνδεση ηλιακών κυψελών παράλληλα

Στο Σχήμα 2.9 όπου οι ηλιακές κυψέλες είναι συνδεδεμένες σε σειρά, τότε:

$$V = V_1 + V_2$$
 (V) (2.27)

και

$$I = I_1 = I_2$$
 (A) (2.28)

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

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

V_{σειρας} = (Αριθμός κυψελών) * V_{max} μιας κυψελης

Η παραγόμενη ισχύς από μία συνδεσμολογία κυψελών ισούται με το ρεύμα της συνδεσμολογίας πολλαπλασιαζόμενο με την τάση της. Οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, αλλά κάθε μία κυψέλη θα λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα όπως και οι άλλες στη συνδεσμολογία. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της εν σειρά συνδεσμολογίας.



Σχήμα 2.11: Καμπύλες Ι-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά

Για το Σχήμα 2.10 στο οποίο οι ηλιακές κυψέλες είναι συνδεδεμένες παράλληλα, τότε:

$$V = V_1 = V_2$$
 (V) (2.29)

και

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I_1} + \boldsymbol{I_2} \quad (A) \tag{2.30}$$

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

$I_{\pi\alpha\rho\dot{\alpha}\lambda\lambda\eta\lambda\alpha} = (A\rho_i\theta_{\mu}\dot{o}\varsigma \kappa v\psi_{\epsilon}\lambda\dot{o}v) * I_{max} \mu_i\alpha\varsigma \kappa v\psi_{\epsilon}\lambda\eta\varsigma$

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

$V_{\pi \alpha \rho \dot{\alpha} \lambda \lambda \eta \lambda \alpha} = V_{m \alpha \kappa}$ μιας κυψελης

Η παραγόμενη ισχύς από κυψέλες εν παραλλήλω είναι ίση με το παράλληλο ρεύμα πολλαπλασιασμένο με την παράλληλη τάση της. Όταν μια ομάδα κυψελών συνδέεται παράλληλα, οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, αλλά κάθε κυψέλη θα λειτουργεί στην ίδια τάση. Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της ομάδας των κυψελών εν παραλλήλω [1-3].



Σχήμα 2.12: Καμπύλες Ι-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα

2.5 Αξιολόγηση απόδοσης

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

Η τελική απόδοση ενέργειας Y_F για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ορίζεται ως το πηλίκο της ολικής ενέργειας εξόδου **Ε** και της ονομαστικής ισχύος P_0 όπως ορίζεται από το φυλλάδιο προδιαγραφών του κατασκευαστή. Η τιμή της ενέργειας μπορεί να δοθεί είτε σε AC είτε σε DC. Ο παράγοντας αυτός δίνει την δυνατότητα να συγκριθεί η ενέργεια που παράγεται όσον αφορά το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος με συστήματα διαφορετικού μεγέθους.

$$Y_{\mathbf{F}} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{p}_0} \tag{2.31}$$

Ένας ακόμη χρήσιμος παράγοντας είναι η απόδοση αναφοράς $\mathbb{Y}_{\mathbb{R}}$, η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας \mathcal{G} και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αναφοράς \mathcal{G}_{ref} του φωτοβολταϊκού συστήματος. Γενικά, η απόδοση αναφοράς επηρεάζεται από την γεωγραφική τοποθεσία της εγκατάστασης, τον προσανατολισμό του συστήματος και τις ετήσιες καιρικές συνθήκες.

$$\mathbf{Y}_{R} = \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{G}_{ref}} \tag{2.32}$$

Επιπρόσθετα με την παραγωγή ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, η απόδοση συνδεδεμένων συστημάτων χαρακτηρίζεται από τον λόγο απόδοσης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μετρούμενης απόδοσης του συστήματος και της ονομαστικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο λόγος απόδοσης *PR* ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η τιμή που δίνεται διαιρώντας την απόδοση ενέργειας Y_F με την απόδοση αναφοράς Y_R . Είναι ένας χρήσιμος τρόπος για να ποσοτικοποιηθεί η ολική επίδραση των απωλειών λόγω των συνδέσεων, της θερμοκρασίας, του μετασχηματιστή κ.α.

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R}$$
(2.33)

Αν και ο λόγος απόδοσης δίνει μια καθολική εικόνα για την συμπεριφορά του συστήματος, είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την αναγνώριση κυψελών οι οποίες δεν λειτουργούν κανονικά [4].

2.6 Παράγουτες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Για να λειτουργήσουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα επιτυχώς κατά τη διάρκεια μιας αναμενόμενης διάρκειας ζωής, απαιτείται έρευνα σε όλες τις πτυχές. Οι εκτιμήσεις ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν δίνουν συνήθως μια ακριβή ένδειξη της απόδοσης τους. Τα αποτελέσματα ερευνών, επίσης, έδειξαν ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες θα μπορούσαν να προκαλέσουν μείωση μέχρι και 18% της πιθανής ισχύος τους. Η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία είναι οι δυο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως ο αέρας, η βροχή, η κάλυψη σύννεφων και η διανομή του ηλιακού φάσματος, επηρεάζουν τη θερμοκρασία, κάτω από την οποία τα συστήματα λειτουργούν, καθώς και την αναμενόμενη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι:

1. Θερμοκρασία

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ιδανικά συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C. Τις περισσότερες φορές όμως, η θερμοκρασία του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρει σημαντικά κυρίως κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Οι υψηλές θερμοκρασίες της κυψέλης έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού της ηλιακής κυψέλης με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Σε περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασίες πάνω από την ενδεικτική τιμή, τότε η δυναμική παραγωγική ενέργεια τους μπορεί να μειώνεται περισσότερο από το 14%.

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά στην αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυψελών και μάλιστα η σχέση των δυο αυτών μεγεθών είναι αντιστρόφως ανάλογη, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.13 [5,6].



Επιρροή αποδοτικότητας ΡV σε σχέση με τη θερμοκρασία του

Σχήμα 2.13: Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση

2. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, όταν αναφέρεται ο όρος ηλιακή ακτινοβολία εννοείται η σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Δηλαδή, δυο δέσμες ακτινοβολίας ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικού μήκους κύματος μπορούν να προκαλέσουν σε μια κυψέλη διαφορετική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως να διαμορφώσουν διαφορετικό βαθμό απόδοσης.

Η επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει για τις διάφορες παραμέτρους εξόδου. Η επίδραση μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα λαμβάνοντας υπ' όψιν την διαφορά του ρεύματος και της ηλεκτρικής τάσης που δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στην αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρονίων (λόγω της αυξανόμενης ροής των φωτονίων) και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

3. Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθότι μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του. Όταν οι ανεμισμοί είναι ψυχροί, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [7].

4. Ρύπανση

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από την επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών στην επιφάνειας τους. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι), για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βρίσκονται σε μία περιοχή που εκτιμάτε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [1].

5. Σκίαση

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων, όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από ηλιακές κυψέλες όμοιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη μιας και μόνο ηλιακής κυψέλης, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Μια σκιασμένη κυψέλη, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η δίοδος, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τις υπόλοιπες κυψέλες, οι οποίες δεν αντιμετωπίζουν αστοχίες, μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν οι υπόλοιπες ηλιακές κυψέλες του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της.

Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η σκιασμένη κυψέλη λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός μιας κυψέλης σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της κυψέλης αυτής και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης μιας 'κατεστραμμένης' κυψέλης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο hot spot (φαινόμενο θερμής κηλίδας). Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (δίοδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυψελών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποια ηλιακή κυψέλη του υστερεί ή καταστραφεί [8].

6. Γήρανση

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων στοιχείων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος [1].

7. Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος

Πέρα από τους διάφορους παράγοντες που αναφέρονται πιο πάνω, πρέπει κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να λαμβάνονται υπόψη οι ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο [1].

8. Οπτικές απώλειες

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοείται η διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών κυττάρων) σε σχέση με την αντίστοιχη ανακλαστικότητα σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (STC). Η ανακλαστικότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°.

Επιπλέον, οπτικές απώλειες παρατηρούνται λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση της ηλιακής κυψέλης μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m^2 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6. Οι οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται σημαντικές και υπολογίζονται σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος [8].

2.7 Σύνοψη

Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο για την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σ' αυτό το κεφάλαιο, αναλύεται το ηλεκτρικό κύκλωμα της ιδανικής και της μη ιδανικής ηλιακής κυψέλης. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της απόδοσης της ηλιακής κυψέλης και του φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς και η αξιολόγηση της απόδοσης με την βοήθεια μαθηματικών σχέσεων. Στο τέλος του κεφαλαίου, αναλύονται ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων όπως είναι η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση ανέμου, η ρύπανση, η σκίαση, η γήρανση, οι απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος και οι οπτικές απώλειες.

2.8 Βιβλιογραφία

[1] Καγκαράκη, Κ., (1992), Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία

[2] Green, M.A., (1982), Solar cells, Prentice-Hall

[3] Περράκη, Β., (2006), Φυσική των φωτοβολταϊκών στοιχείων, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα

[4] Kymakis, E., Kalykakis, S. & Papazoglou, T.M., (2009), 'Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete', *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 433-438

[5] Μπαταγιάννης, Π.Κ. & Gibbons, C., (2002), Θερμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, Μέθοδοι εκτόνωσης της θερμότητας, 70 Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πάτρα

[6] Luque, A. & Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering

[7] Carlson, T., (2001), *Experimental Setup for Full Scale Field Tests of CdTe and CIS Thin-film PV Modules*, Espoo

[8] Φραγκιαδάκης, Ι.Ε, (2007), Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Κεφάλαιο 3 **Προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων**

Περιεχόμενα

3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Περιγραφή των φωτοβολταϊκών πλαισίων	45
3.3 Προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου	46
3.3.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα στο Multisim	47
3.3.2 Κατασκευή ηλεκτρικού κυκλώματος ηλιακής κυψέλης στο Multisim	48
3.3.3 Ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Multisim	53
3.5 Σύνοψη	56
3.4 Βιβλιογραφία	57

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πρόγραμμα προσομοίωσης Multisim και κατασκευάζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα της ηλιακής κυψέλης και του φωτοβολταϊκού πλαισίου με χρήση του προγράμματος αυτού. Επομένως, για να καταστεί δυνατή η προσομοίωση του κυκλώματος, κρίνεται απαραίτητο να γίνει η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου των φωτοβολταϊκών πλαισίων που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία.

3.2 Περιγραφή των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στην παρούσα εργασία μελετώνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία είναι τοποθετημένα στην οροφή του κτιρίου των εργαστηρίων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στην πόλη της Ξάνθης. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τα μοντέλα SP75 της εταιρίας Siemens. Το κάθε πλαίσιο αποτελείται από 36 ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου και είναι συνδεδεμένες σε σειρά με την διάταξη 9x4, δηλαδή το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από N_p =4 παράλληλους κλάδους με N_s =9 ηλιακές κυψέλες ο καθένας. Η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου έχει διαστάσεις 1200×527 mm². Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο SP75.



Σχήμα 3. 1: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο SP75

Οι ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν την μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τα άλλα είδη ηλιακών κυψελών πυριτίου. Η κατασκευή τους, όμως, είναι πιο πολύπλοκη με αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος κατασκευής. Οι ηλιακές κυψέλες περικλείονται από ένα στρώμα συμπυκνωμένου υλικού (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet), από το περίβλημα και από ένα κομμάτι γυαλιού το οποίο έχει υποστεί ειδική κατεργασία σκλήρυνσης. Το συμπυκνωμένο υλικό χρησιμοποιείται για προστασία από το περιβάλλον, προστασία από την υγρασία και για ηλεκτρική μόνωση. Το περίβλημα είναι κατασκευασμένο από ανοδιωμένο αλουμίνιο που προσφέρει μηχανική αντοχή [1].

Το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης και η αναμενόμενη τάση ανοικτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου για τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς STC (θερμοκρασία = 25 °C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G_{\rm D}$ = 1000 W/m²) είναι 4.8 A και 21.7 V αντίστοιχα. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο SP75											
Μέγιστη ισχύς Γ _{max}	75 W/m ²										
Ρεύμα μέγιστης ισχύος	4,4 A										
Τάση μέγιστης ισχύος	17 V										
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	4,8 A										
Τάση ανοικτού κυκλώματος	21,7 V										
Βάρος	7,6 kg										

Πίνακας 3. 1: Χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου SP75

3.3 Προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MultiSIM. Το λογισμικό MultiSIM της National Instruments είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού, ανάλυσης και προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων ή αλλιώς ένα εικονικό εργαστήριο ηλεκτρικών κυκλωμάτων στον υπολογιστή. Περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό ψηφιακών και αναλογικών ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών στοιχείων τα οποία λειτουργούν όπως τα πραγματικά με το πλεονέκτημα ότι δεν καταστρέφονται ποτέ. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στην πανεπιστημιακή κοινότητα καθώς και στον τομέα της βιομηχανίας για διδασκαλία κυκλωμάτων και για σχεδιασμό ηλεκτρονικών διαγραμμάτων. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η έκδοση 10.0.1 [2].

3.3.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Multisim

Στο Σχήμα 3.2 έχουν αριθμηθεί ορισμένες από τις περιοχές της επιφάνειας εργασίας του Multisim για να γίνει ευκολότερη η επεξήγηση του προγράμματος.

🐲 Circuit 1 - Multisim - [Circuit 1]	- 0 X
🗈 Ele Edit View Pace MCU Simulate Transfer Iools Reports Options Window Help (1)	×
* * * * * * * * * * • • • • * * * * • * * • * • * • * • * • * • * • * • * • • * •	6
1	
- (4)	
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	::::::: 🛛 💌
	·····
	🎢
	····· / / / / / / / / / / / / / / / / /
E acort	4 F

Σχήμα 3. 2: Η επιφάνεια εργασίας του χρήστη του Multisim

- Μενού Κειμένου (Text Menus): File, Edit, View, Place, MCU, Simulate, Transfer, Tools, Reports, Options, Window και Help. Αυτά είναι τα τυποποιημένα μενού κειμένου στην κορυφή αριστερά της οθόνης του Multisim.
- 2. Γραμμή Εργαλείων: Τετράγωνα εικονίδια κατά μήκος της κορυφής της οθόνης του Multisim τα οποία αντιστοιχούν στα στοιχεία που περιλαμβάνει η βιβλιοθήκη του Multisim. Πολλά από αυτά τα εικονίδια αποτελούν συντομεύσεις. Επίσης, υπάρχει ο διακόπτης προσομοίωσης ο οποίος πραγματοποιεί την εκκίνηση ή τον τερματισμό της λειτουργίας του εκάστοτε κυκλώματος.

- Εργαλειοθήκη οργάνων μέτρησης: Τετράγωνα εικονίδια στο αριστερό μέρος της οθόνης του Multisim από τα οποία επιλέγονται τα όργανα μέτρησης που περιλαμβάνει η βιβλιοθήκη του Multisim.
- 4. Χώρος σχεδίασης: Αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της κύριας οθόνης. Δείχνει το τρέχον κύκλωμα που σχεδιάζεται [2].

3.3.2 Κατασκευή ηλεκτρικού κυκλώματος ηλιακής κυψέλης στο Multisim

Το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου αποτελείται από 36 υποκυκλώματα τα οποία αντιστοιχούν στις 36 ηλιακές κυψέλες του πλαισίου που μελετάται στην παρούσα εργασία. Τα υποκυκλώματα είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Για να δημιουργηθεί το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου πρέπει να δημιουργηθεί πρώτα το υποκύκλωμα της ηλιακής κυψέλης με την βοήθεια του προγράμματος Multisim. Όπως αναλύεται και στο Κεφάλαιο 2, το κάθε υποκύκλωμα αποτελείται από μια πηγή ρεύματος, μια δίοδο, μια αντίσταση σε σειρά και μια παράλληλη αντίσταση.

Αρχικά, θα δοθεί μια ερμηνεία των στοιχείων των υποκυκλωμάτων. Η ηλεκτρική πηγή είναι ένα στοιχείο το οποίο μετατρέπει μη ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Οι αντιστάσεις είναι ηλεκτρικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορα κυκλώματα για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος. Δηλαδή, η ηλεκτρική αντίσταση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό δυσχεραίνει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος, η δίοδος είναι ένα στοιχείο που περιορίζει τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας. Ουσιαστικά, η δίοδος επιτρέπει στο ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια διεύθυνση, αλλά μπλοκάρει την κίνηση από την αντίθετη διεύθυνση [3,4].

Για την κατασκευή του υποκύκλωματος, επιλέγεται από την γραμμή εργαλείων, Place → Component για να γίνει η επιλογή των στοιχείων του κυκλώματος που θα σχεδιαστεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

🚰 <u>F</u> ile <u>E</u> dit <u>V</u> iew	Place MCU Simulate Transfer Tools Reports Options Window Help
	Component Ctrl+W
+ ┉ ᆎ Ҟ ⊅	✓ Junction Ctrl+J J
	Wire Ctrl+Q
	J Bus Ctrl+U
A	Connectors
	New Hierarchical Block Replace by Hierarchical Block Ctrl+Shift+H
	Re Hierarchical Block from File Ctrl+H
8	New Subcircuit Ctrl+B
	Replace by Subcircuit Ctrl+Shift+B
	Multi-Page
c	Merge Bus Bus <u>V</u> ector Connect
	Comment
	A Text Ctrl+T
	Graphics
P	Title Block
to have been a	n heleselesele heleselesele beleseleselese heleseleset beleseleselese beleseleset beleseleset beleseleset beles

Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Σχήμα 3. 3: Επιλογή στοιχείων του κυκλώματος

Στη συνέχεια, μέσω του μενού επιλογών, μπορεί να γίνει επιλογή του στοιχείου που είναι απαραίτητο για την δημιουργία του υποκυκλώματος. Από το μενού επιλογών που φαίνεται από το βέλος στο Σχήμα 3.4, θα επιλεχθεί μια πηγή ενέργειας. Έπειτα, από την διπλανή στήλη, επιλέγεται η πηγή ρεύματος dc.



Σχήμα 3. 4: Μενού επιλογών

Για να δοθεί μια τιμή σε κάποιο στοιχείο, απαιτείται διπλό αριστερό κλικ με το ποντίκι (mouse) στο στοιχείο αυτό. Εμφανίζεται μια επιλογή και στην καρτέλα Value συμπληρώνεται η τιμή του στοιχείου καθώς και τα πολλαπλάσια και τα υποπολλαπλάσια αυτής. Όπως αναφέρεται και παραπάνω, σύμφωνα με το φυλλάδιο κατασκευαστή του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η αναμενόμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου για τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς STC είναι 4,8 A και 21,7 V αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές αυτές, η τιμή της πηγής ρεύματος ορίζεται 5,5 A.

Current (I):	5.5	A -
AC Analysis Magnitude:	0	A ÷
AC Analysis Phase:	0	
Distortion Frequency 1 Magnitude:	0	A ÷
Distortion Frequency 1 Phase:	0	
Distortion Frequency 2 Magnitude:	0	A ÷
Distortion Frequency 2 Phase:	0	•
Tolerance:	0	%

Σχήμα 3. 5: Ορισμός της τιμής της πηγής ρεύματος

-	Circuit	1 - N	Aultisin	n - [C	ircuit1	*]																																- 6	1	x
P	Eile	Edit	⊻iew	<u>P</u> la	ace !		Simulate	e Tr <u>a</u> nsf	fer <u>T</u> oo	ols <u>R</u>	Reports	Option	<u>W</u> indow	He	þ																								_	a ×
	না	11																																						
15				7.11	Dealths	m (•••				-																												
1	÷001	101	76 44	Ð	Ð	da) i	óv ⊠ :	- nac "	1 40																															-
Е		8, 8,								÷ ÷	2.5.7									2 12 1	191														2.3					121
Ľ											10 10 1			8 28 1 8 28 1					1 12 1 V 10 1	2 (2) 9 (9)						2.2		1.1							1.1					5053
													2 2 2 3								 		÷.				2.2	2.2	10.10	10 100										
	10.0	2. 2.	35 (B)	10 M	1.1	1211			1 11 11 1	2.2	0.0.1	10.00	8.8.8.8			8.8.3	6 10 3	6 16 19		10.10	0.10.1	2.12	2.2	9.9	0.0	(1, 2)	2(-2)	$0 \in \mathcal{D}$	18-18	20.200	1.00	1 (C. 1	6.10	N 10	11.13	12.1	1.12	0.0		
L i	10.1	3. S		8 B	1.1	9			2.2.2.1	8.18	0.0.1		R > R > 1	8.28.	NSI. 01	3.3.3	1.10.3	1 1 1	1 12 1	9 19 1	2 12 3	10	2.2	7 7	2.2	8.8	$\mathbb{R} \setminus \mathbb{R}$	P = P	10 10	10.103	1 31 3	5.51	9.91	9.9	8.8	19.1	2.12	10	÷	***
Ľ		8. S.				14				11							1.1			1.12		12	2.2				2.2	2.2	10.10	10.10			9.9	1.1		19		19		
13																			• • • •	• • •	8 68 6 2 52 5		8 8) 6 6)	40 40 00 00			10.10													1
																											2.2		27.25	20 200				6.6						
		8. 8.								2.2			0.0121	5 25 .		3. 3. s						2.12	2.2	2 2	3.3		8.8		2.2	2012						8				10001
13		3 3	3.3	10.10	13.13	8.3	4.4.4.5	(∞,∞)	(X, X)	8.38	v > s	2.12.27.2	$E_{\rm c} = E_{\rm c} = 0$		c::: ::	3.33	1.12.1	1.11.11	6.65.6	8 (8)	6 26 3	 N 	$X \to X$	8 - 18	$(1,1) \in \mathbb{R}^{n}$	C = C	$i \in \mathcal{R}$	${\cal C} = {\cal C}$		< <	3 (3 (2.12	12.12	(0, 0)	0.0	8.30	$< \infty$		
11	5 45 4	3 3	3.3	10		19.1		(X X 3	(X X)	8 X.			z > z > z	5 40 3	(3) (3)	3.3.3			0.00	e (e)	6 34 3	C 18	2.12	× ×		1.1	2.2			0.00	5 55 5	5 5		14 14	10.10		÷ 14	1.15	· .	
Ľ							1												• • •	• • •			8.8		2.2		1.1			0.00									1	
						1								0 50 5 0 20 1		10 10 1 10 10 1			 	a (a) a (a)							10.00				a sa s Gingin	a .a .							0	
					. 1)5	5 4															x x .							0.00										
			3.3	2.2		1.	1		(X X)	с ж.			$n \in C$			3.3.3	1.11			e (8.)	e se s	18	K K	х х	$\sim \infty$	c = c	5.5	8. 8		< <		9 (9)	8.18	a .a	0.0		8.18	8 R.		-
	10.5	8 S	$\sim \sim$	2.2	8.8	-	_	(X, X, Y)	(N, N)	8 R.	8.8.8	1.5.5.5	$\leq \leq < <$	1.10	era 19	3×3	8 18 1	8 (8 (8	5 (S.)	8 (8)	5 X 3	8.18	8.8	$\mathbf{x} = \mathbf{x}$	$\sim \infty$	(1, 1)	$S_{i} = S_{i}$	5.5	< <	< <	9 (S) (5.5	8.18	10.10	\otimes	18.1	8.18	6.16		2001
13		22.22	22 32	2.12	10.10	8.1			1 2 2 3	5.5	2.2.2		0.0.0.0		100	2.2.1			5 8 5	5 13 1	5 18 1	5 15	5.5	2. 2	2.2	5.5	5 5	0.0		55, 553	8.22.3		2.12		8.9	18	5 8	5.15		00
Ľ											2 2 2									8 (8) 	5 5 5			2. 2.		8.8									8.9					AG
13																																								1
E																																								
		ar ar		12 13		13.1				s 8	0.0		5.5.5			8.81	e ie i	e ie ie		a 18 1	5 15 1	s 18	a a	a a	0.0	$\sim -\epsilon$	5.5	~ 10	13 13	12 52	: :: :		e e	ie 10	12.12	18.1		5 5		200
Ŀ		3 3	2.2	10	8.8				0.00	1 N	$\alpha \approx c$	0.00.00	$N_{\rm e} \propto 10.10$		1997 - 1997 1997 - 1997	\otimes \otimes \otimes	0.00		2.12.1	s (s) (5.8.5	10	5.5	8 B	(1, 1)	C = C		N = N		15 153	1.01	r 81	0.0		\otimes		5.15	0.0		
11	5 18 1	87 B	8 B	30 - 36 3	10.0	10 J			0.00	10 (B)	0.01	1 10 10 10	2.2.2.2	5 16 1	(in 197	ar ar a	191	e e e	1 10 1	0.10.1	10.0	10	a a	a a	9.9	1.1	2.2	20	18 18	10.100	e as a	6 BT	6.6	8 B		10.1		6.6		1.47
Ľ										8 Ø.													8 8. 	e e		200		2.5									8 G :	8 Q.		•
1.						10.0				8 89 8 8				0 - 60 - 1 2 - 12 - 1				6 28 28 8 18 18		8 10 1 8 18 7			8 8 A A	80 80 A A											10.10					12
B										с. ж.																6.6														
E		2. 2.	22.22								2.2.3			S 28 3						1 12 1			÷ •					1.1		20, 203			1.1							æ
Ľ		8. 8. 8. 8		2.3		1					2 2 2			8 28 1 8 28 1						2 82 8 8 88 8			9 9 . M M	9 9 20 20		10.00		1.1		20. 200										· · ·
1		2. 22									0.01									9 19 1 2 19 1						2.2		2.2												
L			_																																					
11			1									-																											۴.	
(P) Circu	t1 *																																						
																					1	-		-			-	-			-		-	-	-	-	-	-	Page 1	

Σχήμα 3. 6: Η πηγή ρεύματος του κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης

Στη συνέχεια, μια δίοδος τοποθετείται παράλληλα στην πηγή ρεύματος. Από το μενού επιλογών, επιλέγεται η δίοδος SB550 ως βέλτιστη λύση. Η δίοδος αυτή επιλέγεται σύμφωνα με την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος από το φυλλάδιο κατασκευαστή.



Σχήμα 3. 7: Η δίοδος του κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης

Έπειτα, τοποθετούνται δυο αντιστάσεις, μια σε σειρά και μια σε παράλληλη συνδεσμολογία. Η τιμή της αντίστασης σειράς ενδείκνυται να είναι μικρότερη από 5 Ω και η τιμή της παράλληλης αντίστασης ενδείκνυται να είναι μεγαλύτερη από 500 Ω. Έτσι, η τιμή της παράλληλης αντίστασης ορίζεται 1kΩ και η τιμή της αντίστασης σε σειρά 100 mΩ.

Η παράλληλη αντίσταση αφορά στην διαρροή μεταξύ των άκρων της επαφής P-N ή αλλιώς της διόδου και εκφράζει τις απώλειες της ηλιακής κυψέλης. Η επίδραση της παράλληλης αντίστασης είναι αμελητέα γι' αυτό η τιμή της είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση σειράς. Η αντίσταση σε σειρά αφορά στην αντίσταση της επαφής κατά την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από την δίοδο και στο σύνολο των ωμικών αντιστάσεων των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής και των μεταλλικών κλάδων τους και εκφράζει τις πρόσθετες απώλειες της ηλιακής κυψέλης όταν σε αυτή συνδεθεί κάποιο φορτίο. Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων



Σχήμα 3.8: Η αντίσταση σε σειρά και η παράλληλη αντίσταση του κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης

Τέλος, όλα τα στοιχεία του υποκυκλώματος συνδέονται μεταξύ τους. Για να ενωθούν δυο στοιχεία μεταξύ τους, τοποθετείται ο δρομέας του ποντικιού στο άκρο του ενός από τα δυο στοιχεία μέχρι να εμφανιστεί μια μαύρη τελεία. Έχοντας πατημένο το αριστερό πλήκτρο του ποντικιού, μετακινείται το ποντίκι στο άκρο του άλλου στοιχείου και ενώνονται τα δυο στοιχεία. Η τελική μορφή του υποκυκλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3. 9: Το ηλεκτρικό κύκλωμα της ηλιακής κυψέλης
3.3.3 Ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Multisim

Το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όπως αναφέρεται και παραπάνω, αποτελείται από 36 υποκυκλώματα όπως το υποκύκλωμα του Σχήματος 3.9. Τα υποκυκλώματα συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Για να συνδεθούν τα 36 υποκυκλώματα σε σειρά, πρέπει να συνδεθεί ο αρνητικός ακροδέκτης του ενός υποκυκλώματος με τον θετικό ακροδέκτη του άλλου υποκυκλώματος. Το κύκλωμα αποτελείται από 4 στήλες και 9 γραμμές. Επίσης, στο κύκλωμα αυτό συνδέεται ένα πολύμετρο για να αποδίδει τις τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η επιλογή του πολυμέτρου γίνεται από την εργαλειοθήκη οργάνων μέτρησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10. Για να συνδεθεί το πολύμετρο, πρέπει να συνδεθεί ο αρνητικός ακροδέκτης του πολυμέτρου με το ελεύθερο άκρο του κόμβου αναφοράς που είναι μια γείωση και ο θετικός ακροδέκτης του πολυμέτρου με το ελεύθερο άκρο του κόμβου που επιθυμείται να μετρηθεί.



Σχήμα 3. 10: Επιλογή πολυμέτρου από την εργαλειοθήκη των οργάνων μέτρησης

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων



Σχήμα 3. 11: Το ηλεκτρικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για να εξαχθούν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του κυκλώματος, είναι απαραίτητο το κύκλωμα να τεθεί σε λειτουργία. Για να λειτουργήσει το κύκλωμα, ο διακόπτης προσομοίωσης τίθεται στην κατάσταση οn. Αφού το κύκλωμα του σχήματος 3.11 τεθεί σε λειτουργία, στην οθόνη του πολυμέτρου εμφανίζεται το αποτέλεσμα για το ρεύμα βραχυκύκλωσης και για την τάση ανοικτού κυκλώματος. Κάνοντας διπλό αριστερό κλικ πάνω στο πολύμετρο, εμφανίζεται η πρόσοψη του πολυμέτρου. Το πολύμετρο λειτουργεί ως αμπερόμετρο για να μετρήσει την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, επιλέγοντας από το πολύμετρο το εικονίδιο 'A'. Στη συνέχεια, επιλέγεται το εικονίδιο για το συνεχές ρεύμα '-' ή το εικονίδιο για το εναλλασσόμενο ρεύμα '~'. Για την λειτουργία του πολυμέτρου ως βολτόμετρο έτσι ώστε να μετρήσει την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος, επιλέγεται το εικονίδιο 'V'. Έχοντας πραγματοποιήσει αυτές τις ρυθμίσεις, η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι 4,8 A και η τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος 21,76 V όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.12 και 3.13.



Σχήμα 3. 12: Μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης



Σχήμα 3.13: Μέτρηση της τιμής της τάσης ανοικτού κυκλώματος

3.4 Σύνοψη

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αρχικά, γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών των πλαισίων που μελετήθηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Σ' αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πρόγραμμα προσομοίωσης Multisim και τα κυριότερα εργαλεία του. Στη συνέχεια, γίνεται η κατασκευή του ηλεκτρικού κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης και του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο πρόγραμμα αυτό.

3.5 Βιβλιογραφία

[1] <u>http://www.abcsolar.com/pdf/sp75.pdf</u>, προσπελάστηκε στις 18 Αυγούστου 2010

[2] <u>http://www.ni.com/multisim</u>, προσπελάστηκε στις 22 Αυγούστου 2010

[3] Malvino A.P., (2006), *Н
λεκτρονική*, 6^η Έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη

[4] Fowler, R.J., (1999), Ηλεκτροτεχνία AC-DC, 4^η Έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη

Κεφάλαιο 4 Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

Περιεχόμενα

4.1 Εισαγωγή	59
4.2 Περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις	59
4.2.1 Φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας	59
4.2.2 Πυρανόμετρο	60
4.2.3 Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας	61
4.2.4 Πολύμετρο	62
4.3 Διαδικασία μέτρησης	63
4.4 Ανάλυση θερμικών εικόνων	72
4.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων	83
4.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης	88
4.7 Σύνοψη και συμπεράσματα	95
4.8 Βιβλιογραφία	98

4.1 Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και αναλύονται τα χαρακτηριστικά των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και συγκρίνονται με το μοντέλο προσομοίωσης και με το θεωρητικό μοντέλο για να εξαχθούν τα συμπεράσματα της εργασίας.

4.2 Περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν όργανα μέτρησης, τα οποία συντέλεσαν ώστε να οριστούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα όργανα αυτά είναι ένας φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας, ένα πυρανόμετρο, ένας μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας και ένα πολύμετρο, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

4.2.1 Φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας

Ο Φορητός Θερμικός Αναλυτής Εικόνας (Imager) ή πιο απλά θερμοκάμερα, που χρησιμοποιήθηκε για την θερμογράφηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, είναι το μοντέλο IVN 780-P της εταιρίας Impac. Ο IVN 780-P παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1:



Σχήμα 4. 1: Φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας IVN 780-P

Ο IVN 780-P είναι μια φορητή θερμοκάμερα υψηλής ανάλυσης, η οποία είναι ειδικά σχεδιασμένη για την ανίχνευση αστοχιών σε ηλεκτρονικό, μηχανολογικό και βιομηχανικό εξοπλισμό. Ο φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας έχει την δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασιών από -40 °C έως 450 °C. Εάν είναι απαραίτητο, το εύρος της μέτρησης μπορεί να επεκταθεί από 450 ° C σε 1000 °C. Το μικρό του βάρος τον κάνει ιδανικό να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εκτός εργαστηριακού χώρου. Έχει την δυνατότητα αποθήκευσης των θερμικών εικόνων στην μνήμη του και στην συνέχεια μέσω θύρας USB την μεταφορά τους σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, οι θερμικές εικόνες μπορούν να επεξεργαστούν και να αναλυθούν με λεπτομέρεια. Η θερμική εικόνα ή θερμογράφημα απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η παρατήρηση αστοχιών. Το λογισμικό, που θα χρησιμοποιηθεί, συντελεί στο να διαπιστωθεί η εύρυθμη ή μη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την παροχή εργαλείων, τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου [1]. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας IVN 780-P.

Φορητός θερμικός αναλυτής εικόνας						
Εύρος θερμοκρασίας μέτρησης	Από -40 °C έως 120 °C					
Μονάδες μέτρησης	°C ή °F					
Αβεβαιότητα μέτρησης	<u>+</u> 2 °C					
Ελάχιστη απόσταση μέτρησης	280 mm					
Ελάχιστο μέγεθος μετρούμενου αντικειμένου	1,26 x1,23 mm (3x3 pixels)					
Εύρος θερμοκρασίας περιβάλλοντος	Από -10 °C έως 45 °C					

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας IVN 780-Ρ

4.2.2 Πυρανόμετρο

Στα πλαίσια των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε το πυρανόμετρο SL 200 της εταιρίας Kimo. Το πυρανόμετρο είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση είτε της διάχυτης είτε της ακτινικής ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, το SL 200 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το πυρανόμετρο SL 200.



Σχήμα 4. 2: Πυρανόμετρο SL 200

Ο αισθητήρας του οργάνου είναι μια επίπεδη θερμοστήλη που είναι καλυμμένη από ειδικό μαύρο επίχρισμα με απορροφητική ικανότητα, ανεξάρτητη του μήκους κύματος. Πρέπει να τοποθετείται οριζόντια και να αποφεύγονται οι σκιάσεις από άλλα αντικείμενα. Η απόκριση του οργάνου είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ωστόσο, το περιβάλλον μέτρησης ενδείκνυται να είναι απαλλαγμένο από παρεμβολές ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και από ταλαντώσεις [2]. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του πυρανομέτρου.

Πίνακας 4. 2: Χαρακτηριστικά πυρανομέτρου SL 200

Πυρανόμετρο SL 200						
Εύρος μετρούμενης ηλιακής ακτινοβολίας	Από 1 έως 1300 W/m²					
Εύρος μετρούμενης ενέργειας	Aπό 1 Wh/m ² έως 500 kWh/m ²					
Συχνότητα μέτρησης	2/s					
Ακρίβεια	5% ανά μέτρηση					
Συχνότητα υπολογισμού	1/min					

4.2.3 Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, το EL-USB-2 της εταιρίας Lascar χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Τα θερμόμετρα αυτά λειτουργούν αυτόνομα με μπαταρία καταγράφοντας στην

εσωτερική τους μνήμη τις τιμές της θερμοκρασίας και της υγρασίας, όπως λαμβάνονται από τον ενσωματωμένο, υψηλής ακριβείας αισθητήρα, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το EL-USB-2 χρησιμοποιείται για την καταγραφή δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας με εύρος από -35 °C έως 80 °C για την θερμοκρασία και από 0 έως 100% RH για την σχετική υγρασία. Το εξειδικευμένο αυτό καταγραφικό έχει τη δυνατότητα να καταγράφει και να αποθηκεύει στη μνήμη του μέχρι 16379 μετρήσεις υγρασίας και 16379 μετρήσεις θερμοκρασίας [3]. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας EL-USB-2 και στον Πίνακα 4.3 δίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 4. 3: Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας

Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας						
Σχετική υγρασία						
Εύρος Από 0 έως 100% RH						
Ακρίβεια	3% RH					
Επαναληψιμότητα	0,1% RH					
Θερμο	κρασία					
Εύρος	Από -35° και 80° C					
Ακρίβεια	0,1° C					
Επαναληψιμότητα	0,5° C					

Πίνακας 4. 3: Χαρακτηριστικά μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας

4.2.4 Πολύμετρο

Στην παρούσα εργασία, το πολύμετρο 41/2 DMM RE69 της εταιρίας Range χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Το πολύμετρο είναι ένα ηλεκτρικό όργανο το οποίο μετράει την τάση, την ένταση και την αντίσταση σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Είναι μια συσκευή που έχει την δυνατότητα να λειτουργεί ως αμπερόμετρο, ως βολτόμετρο και ως ωμόμετρο. Χρησιμοποιεί μονάδες μέτρησης για το ρεύμα τα Α, την τάση τα V, και την αντίσταση τα Ω. Επίσης, το πολύμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη εύρεση ελαττωμάτων σε ηλεκτρικά συστήματα [4]. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το πολύμετρο 41/2 DMM RE69 και στον Πίνακα 4.4 δίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 4. 4: Πολύμετρο 41/2 DMM RE69

Πίνακας 4. 4: Χαρακτηριστικά πολυμέτρου 41/2 DMM RE69

Πολύμετρο 41/2 DMM RE69					
Εύρος μετρούμενου DC ρεύματος	Από 2 mA έως 10 A				
Εύρος μετρούμενης DC τάσης	Από 200 mV έως 1000 V				
Εύρος μετρούμενου ΑC ρεύματος	Από 2 mA έως 10 A				
Εύρος μετρούμενης ΑC τάσης	Από 2 V έως 750 V				
Εύρος μετρούμενης αντίστασης	Από 200 Ω έως 200 ΜΩ				
Χωρητικότητα	Από 2000 Pf έως 20 μF				

4.3 Διαδικασία μέτρησης

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στην πόλη της Ξάνθη και μελετήθηκαν δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια με την χρήση ενός φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας, ενός πυρανομέτρου, ενός μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας και ενός πολυμέτρου.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τις 05 Ιουλίου 2010 έως τις 13 Ιουλίου 2010. Κατά την διάρκεια της ημέρας πραγματοποιούνταν 3 σετ μετρήσεων (πρωινές, μεσημεριανές και βραδινές ώρες), για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ωστόσο, δεν ήταν δυνατή η πραγματοποίηση των μετρήσεων όλες τις ώρες και τις μέρες, που αναφέρονται παραπάνω, λόγω κακών καιρικών συνθηκών (βροχόπτωση). Το πειραματικό υπόβαθρο των μετρήσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5.

Τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια που μελετήθηκαν, περιγράφονται στο κεφάλαιο 3 και η διάταξη τους φαίνεται στα Σχήματα 4.5 και 4.6. Το φωτοβολταϊκό σύστημα, που βρίσκεται στην οροφή του κτιρίου, αποτελείται από 2 φωτοβολταϊκές συστοιχίες, των 6 και των 4 φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ωστόσο, στα πλαίσια της εργασίας αυτής, μελετώνται τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία ανήκουν στην συστοιχία με 4 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα δυο πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά και είναι σταθερά τοποθετημένα σε κατάλληλη σιδηροκατασκευή για να έχουν την απαραίτητη κλίση, όπως αυτή ορίζεται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της θέσης τους καθώς και από την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αυτά τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία. Στην περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η πρόσοψη των φωτοβολταϊκών πλαισίων και στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η πίσω όψη. Στα σχήματα αυτά παρουσιάζεται, επίσης, και η διάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Σχήμα 4. 5: Πρόσοψη φωτοβολταϊκών πλαισίων



Σχήμα 4.6: Πίσω όψη φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Αρχικά, λαμβάνονται οι θερμικές εικόνες των φωτοβολταϊκών πλαισίων με την χρήση του φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας, ο οποίος τοποθετείται στον κατάλληλο τρίποδα. Η χρήση του τρίποδα απαιτείται για την πραγματοποίηση σταθερών λήψεων κατά την διάρκεια της κάθε μέτρησης, δηλαδή οι εικόνες να λαμβάνονται από σταθερή απόσταση (2 m) και από σταθερό ύψος (0,5m), έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση τους κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι θερμικές εικόνες αποθηκεύονται στη μνήμη του φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, που θα αναλυθεί παρακάτω, γίνεται η επεξεργασία τους. Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται ο τρόπος που έγινε η μέτρηση με τον φορητό θερμικό αναλυτή εικόνας καθώς και η απόσταση του από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Η προσαρμογή των παραμέτρων της μέτρησης, δηλαδή του συντελεστή ικανότητας εκπομπής και της αντιστάθμισης του φόντου, είναι πολύ σημαντική για την διεκπεραίωση της μέτρησης.

1. Συντελεστής ικανότητας εκπομπής (emissivity)

Ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα πραγματικό σώμα θερμοκρασίας Τ προς την εκπεμπόμενη ακτινοβολία του μέλανος σώματος της ίδιας θερμοκρασίας. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικούς συντελεστές ικανότητας εκπομπής, που κυμαίνονται από 0% έως 100%. Τα υλικά που αντανακλούν περισσότερη ακτινοβολία έχουν μικρότερο συντελεστή ικανότητας εκπομπής.

Αν ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής του στόχου ενδιαφέροντος αποκλίνει από την ιδανική τιμή (100%), αυτό έχει αρνητική επίδραση στην ακρίβεια της μέτρησης. Για να διατηρείται η δυνατότητα ακριβούς μέτρησης της θερμοκρασίας σε αντικείμενα ποικίλων συντελεστών ικανότητας εκπομπής, η θερμοκάμερα παρέχει την δυνατότητα προσαρμογής του συντελεστή αυτού. Με τη χρήση του κέρσορα, είναι δυνατή η επίδειξη της τρέχουσας τιμής του συντελεστή ικανότητας εκπομπής στο κέντρο της οθόνης. Η ενεργοποίηση της λειτουργίας αυτής και η προσαρμογή της τιμής γίνεται με την εντολή: [IMAGE]->[EMISS] από το [MENU]. Στη συνέχεια, με χειρισμό του [JOYSTICK] προς τα πάνω ή προς τα κάτω, όσο είναι απαραίτητο, επιλέγεται η επιθυμητή τιμή του συντελεστή ικανότητας εκπομπής.

2. Αντιστάθμιση του φόντου

Η αντιστάθμιση του φόντου μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη μέτρηση. Όταν ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής του αντικειμένου που μετράται είναι χαμηλός, τότε η αντανακλαστικότητα θα είναι υψηλότερη. Αν τα αντικείμενα που βρίσκονται στο φόντο ακτινοβολούν μεγαλύτερες ποσότητες υπέρυθρης ακτινοβολίας, που οφείλεται είτε σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από το στόχο είτε σε υψηλότερη τιμή του συντελεστή ικανότητας εκπομπής, η προερχόμενη από το φόντο υπέρυθρη ενέργεια προστίθεται στη τιμή της θερμοκρασίας που υποδεικνύεται, προκαλώντας σφάλμα στη μέτρηση.

Η θερμοκάμερα έχει ενσωματωμένο ένα σύνθετο αλγόριθμο για να εξαλείφει αυτού του είδους τα σφάλματα αντανακλαστικότητας/φόντου. Για να ενεργοποιηθεί η αντιστάθμιση φόντου, γίνεται αρχικά ένας υπολογισμός της θερμοκρασίας των αντικειμένων που βρίσκονται στο φόντο και επηρεάζουν τη μέτρηση για να υπολογιστεί, σε αυτή τη βάση, μια μέση θερμοκρασία. Στη συνέχεια, με μετάβαση στην εντολή [CAL]→[BACKGROUND] από το [MENU], με χειρισμό του [JOYSTICK] προς τα πάνω ή προς τα κάτω, γίνεται η επιλογή της επιθυμητής τιμής αντιστάθμισης του φόντου[1].



Σχήμα 4. 7: Διαδικασία μέτρησης με τον φορητό θερμικό αναλυτή εικόνας

Στη συνέχεια, με την βοήθεια του μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας μετρώνται οι τιμές για την θερμοκρασία και την υγρασία. Ο μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας τοποθετείται στην θύρα USB ενός φορητού υπολογιστή και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού μετράει απευθείας τις τιμές της θερμοκρασίας σε $^{\circ}$ C ή σε $^{\circ}$ F και τις τιμές της σχετικής υγρασίας σε $^{\%}$ RH.



Σχήμα 4. 8: Μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας

Έπειτα, χρησιμοποιείται το πυρανόμετρο για την μέτρηση της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο αισθητήρας του πυρανομέτρου τοποθετείται παράλληλα στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, για την μέτρηση της ακτινοβολίας του ήλιου που προσπίπτει στην επιφάνεια τους. Πολύ σημαντικό είναι να μην δημιουργείται σκίαση στον αισθητήρα γιατί τότε τα αποτελέσματα της μέτρησης δεν είναι ακριβή. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη του πυρανομέτρου και οι τιμές δίνονται σε W/m^2 . Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η μέτρηση της ηλιακής

ακτινοβολίας από το πυρανόμετρο και ο τρόπος που τοποθετείται στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων για να είναι ακριβής η μέτρηση.



Σχήμα 4.9: Διαδικασία μέτρησης με το πυρανόμετρο

Τέλος, με την χρήση του πολυμέτρου μετρώνται η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αρχικά, θα μετρηθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1. Στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, υπάρχει το κουτί διακλάδωσης, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Στο κουτί διακλάδωσης συνδέονται να καλώδια που συνδέουν το πλαίσιο 1 με τα διπλανά φωτοβολταϊκά πλαίσια και με το ηλεκτρικό φορτίο (το καλώδιο 1 συνδέει το πλαίσιο 1 με το διπλανό πλαίσιο, το καλώδιο 2 συνδέει το πλαίσιο 1 με το πλαίσιο 2 και το καλώδιο 3 συνδέει το πλαίσιο 1 με το ηλεκτρικό φορτίο). Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το κουτί διακλάδωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 1.



Σχήμα 4. 10: Κουτί διακλάδωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 1

Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση, είναι απαραίτητο να αποσυνδεθούν τα καλώδια 1 και 2, τα οποία συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μεταξύ τους, και να τοποθετηθούν οι ακροδέκτες του πολυμέτρου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11, ο αρνητικός ακροδέκτης τοποθετείται στο καλώδιο 1 και ο θετικός ακροδέκτης στο καλώδιο 2.

Το ψηφιακό πολύμετρο, για να λειτουργήσει σωστά, είναι απαραίτητο να οριστεί η λειτουργία και η κλίμακα του. Η λειτουργία αναφέρεται στην ποσότητα που μετριέται, δηλαδή αν το πολύμετρο λειτουργεί ως αμπερόμετρο, βολτόμετρο ή ωμόμετρο. Η κλίμακα αναφέρεται στο εύρος της τιμής που θα μετρηθεί. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα ψηφιακά πολύμετρα δεν διαθέτουν διακόπτη πολικότητας. Αν εφαρμοστεί αντίστροφη πολικότητα σε ένα ψηφιακό πολύμετρο, εμφανίζεται αρνητικό πρόσημο (-) μπροστά από την ένδειξη.

Για την μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης, πρέπει το πολύμετρο να τεθεί στην λειτουργία αμπερομέτρου. Επίσης, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί η κλίμακα της τιμής του ρεύματος. Σύμφωνα με την αναμενόμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης από το φυλλάδιο του κατασκευαστή, η κλίμακα του ρεύματος βραχυκύκλωσης ορίζεται 10 Α. Στη συνέχεια, για την μέτρηση της τιμής της τάσης ανοικτού κυκλώματος, πρέπει το πολύμετρο να τεθεί στην λειτουργία βολτομέτρου. Η κλίμακα της τιμής της τάσης ανοικτού κυκλώματος, σύμφωνα με την αναμενόμενη τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος από το φυλλάδιο του κατασκευαστή, ορίζεται 200 V.

Τα αποτελέσματα και των δυο μετρήσεων εμφανίζονται στην οθόνη του πολυμέτρου. Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται μια τυπική μέτρηση των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος με την χρήση του πολυμέτρου.



Σχήμα 4. 11: Διαδικασία μέτρησης με το πολύμετρο

Για να μετρηθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2, η διαδικασία είναι όμοια με την διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για το πλαίσιο 1. Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται το κουτί διακλαδώσεων του πλαισίου 2. Από το σχήμα αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ότι το καλώδιο 1 συνδέει το πλαίσιο 2 με το πλαίσιο 1 και το καλώδιο 2 συνδέει το πλαίσιο 2 με το ηλεκτρικό φορτίο.



Σχήμα 4. 12: Κουτί διακλάδωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 2

Πίνακας 4. 5: Αποτελέσματα μετρήσεων

Πλαίσιο 1										
Μέτρηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ημερομηνία μέτρησης	05 Ιουλίου	05 Ιουλίου	05 Ιουλίου	06 Ιουλίου	06 Ιουλίου	06 Ιουλίου	07 Ιουλίου	07 Ιουλίου	09 Ιουλίου	09 Ιουλίου
Ωρα μέτρησης	10:00	13:30	20:00	09:30	13:30	20:00	10:00	13:30	10:00	19:30
Ταχύτητα ανέμου	6,5 km/h	31,8 km/h	7,2 km/h	2 km/h	23,1 km/h	2,3 km/h	2,4 km/h	26,4 km/h	2,1 km/h	5,6 km/h
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23,5 °C	31 °C	28 °C	23 °C	29,5 °C	27 °C	23,5 °C	30 °C	20,5 °C	24,5 °C
Υγρασία	65%	35%	45%	60%	55%	50%	60%	40%	70%	55%
Ηλιακή ακτινοβολία	670 W/m²	1001W/m ²	45 ₩/m ²	575 W/m²	315 W/m ²	37 ₩/m ²	540 W/m²	250 W/m ²	650 ₩/m²	57 W/m²
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	2,93 A	4,33 A	0,18 A	2,24 A	1,22 A	0,14 A	2,33 A	0,99 A	2,41 A	0,22 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος	19,86 V	18,88 V	17,93 V	19,91 V	19,31 V	17,43 V	19,80 V	19,01 V	19,92 V	18,31 V

Πλαίσιο 1										
Μέτρηση	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Ημερομηνία μέτρησης	11 Ιουλίου	11 Ιουλίου	11 Ιουλίου	12 Ιουλίου	12 Ιουλίου	12 Ιουλίου	13 Ιουλίου	13 Ιουλίου	13 Ιουλίου	
Ώρα μέτρησης	10:00	14:00	20:00	10:00	13:30	19:30	10:00	13:30	20:00	
Ταχύτητα ανέμου	4,2 km/h	20,6 km/h	2,7 km/h	2,2 km/h	28 km/h	6,1 km/h	1,8 km/h	24,7 km/h	3,7 km/h	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23,5 °C	30,5 °C	27 °C	24 °C	31,5 °C	28 °C	24,5 °C	32 °C	28,5 °C	
Υγρασία	60%	40%	50%	65%	30%	40%	55%	30%	40%	
Ηλιακή ακτινοβολία	$606 W/m^2$	890 ₩/m²	48 ₩/m²	$640 W/m^2$	670 ₩/m ²	70 ₩/m ²	649 W/m²	$880 W/m^2$	42 ₩/m²	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	2,21 A	3,82 A	0,11 A	2,33 A	2,91 A	0,21 A	2,34 A	3,85 A	0,16 A	
Τάση ανοικτού κυκλώματος	20,07 V	18,97 V	17,30 V	19,31 V	19,53 V	18,35 V	19,76 V	18,56 V	17,86 V	

Πλαίσιο 2										
Μέτρηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ημερομηνία μέτρησης	05 Ιουλίου	05 Ιουλίου	05 Ιουλίου	06 Ιουλίου	06 Ιουλίου	06 Ιουλίου	07 Ιουλίου	07 Ιουλίου	09 Ιουλίου	09 Ιουλίου
Ώρα μέτρησης	10:00	13:30	20:00	09:30	13:30	20:00	10:00	13:30	10:00	19:30
Ταχύτητα ανέμου	6-7 km/h	31,8 km/h	7,2 km/h	2 km/h	23,1 km/h	2,3 km/h	2,4 km/h	26,4 km/h	2,1 km/h	5,6 km/h
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23,5 °C	31 °C	28 °C	23 °C	29,5 °C	27 °C	23,5 °C	30 °C	20,5 °C	24,5 °C
Υγρασία	65%	35%	45%	60%	55%	50%	60%	40%	70%	55%
Ηλιακή ακτινοβολία	670 W/m²	$1001W/m^2$	45 ₩/m ²	575 W/m ²	315 ₩/m²	37 ₩/m²	540 W/m ¹	250 W/m²	650 ₩/m²	57 W/m²
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	2,82 A	4,26 A	0,15 A	2,14 A	1,13 A	0,13 A	2,23 A	0,98 A	2,37 A	0,21 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος	19,64 V	17,88 V	17,71 V	19,78 V	19,10 V	17,39 V	19,70 V	18,94 V	19,84 V	18,21 V

Πλαίσιο 2										
Μέτρηση	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Ημερομηνία μέτρησης	11 Ιουλίου	11 Ιουλίου	11 Ιουλίου	12 Ιουλίου	12 Ιουλίου	12 Ιουλίου	13 Ιουλίου	13 Ιουλίου	13 Ιουλίου	
Ώρα μέτρησης	10:00	14:00	20:00	10:00	13:30	19:30	10:00	13:30	20:00	
Ταχύτητα ανέμου	4,2 km/h	20,6 km/h	2,7 km/h	2,2 km/h	28 km/h	6,1 km/h	1,8 km/h	24,7 km/h	3,7 km/h	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23,5 °C	30,5 °C	27 °C	24 °C	31,5 °C	28 °C	24,5 °C	32 °C	28,5 °C	
Υγρασία	60%	40%	50%	65%	30%	40%	55%	30%	40%	
Ηλιακή ακτινοβολία	$606 W/m^2$	890 W/m ¹	48 ₩/m ²	640 W/m²	670 W/m²	70 W/m^2	649 W/m²	880 W/m ²	42 W/m²	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	2,18 A	3,81 A	0,10 A	2,29 A	2,42 A	0,20 A	2,32 A	3,80 A	0,15 A	
Τάση ανοικτού κυκλώματος	19,89 V	18,76 V	17,29 V	19,23 V	19,30 V	18,30 V	19,61 V	18,49 V	17,70 V	

Όλες οι τιμές μέτρησης (θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, ρεύματος βραχυκύκλωσης, τάσης ανοικτού κυκλώματος) είναι στιγμιαίες τιμές. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Παρατηρώντας τις τιμές των αποτελεσμάτων, αξίζει να σημειωθεί ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια επηρεάζεται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας γιατί οι υψηλότερες τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης παρατηρούνται στις μετρήσεις με τις υψηλότερες τιμές της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, η τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος δεν επηρεάζεται άμεσα από ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας γιατί δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή της τιμής της σε σχέση με την μεταβολή της τιμής της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι παρατηρήσεις από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, φαίνεται να συμφωνούν με το Σχήμα 2.6, όπου έχει παρατηρηθεί ότι η ισχύς εξόδου της ηλιακής ακτινοβολίας επειδή τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνονται. Επίσης, στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ότι η τάση του πλαισίου παραμένει σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της έντασης του φωτός. Εντούτοις, το ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο προς την ένταση του φωτός.

Επίσης, οι υψηλότερες τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος παρατηρούνται συνήθως στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις μεσημεριανές ώρες και οι χαμηλότερες τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος παρατηρούνται συνήθως στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις βραδινές ώρες λόγω της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τις βραδινές ώρες, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι χαμηλή, το ρεύμα βραχυκύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σχεδόν μηδενικό και άρα, η απόδοση τους είναι πολύ χαμηλή. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από την θεωρία γιατί, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2, έχει αποδειχτεί ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνεται κατά πολύ στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας.

4.4 Ανάλυση θερμικών εικόνων

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 1, ένας από τους πιο διαδομένους και έγκυρους τρόπους ανίχνευσης αστοχιών σε φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η υπέρυθρη θερμογραφία. Μέσω του φορητού θερμικού αναλυτή εικόνας, μετράται η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και αποτυπώνεται σε θερμικές εικόνες. Η επεξεργασία των δεδομένων των θερμικών εικόνων πραγματοποιείται με κατάλληλο λογισμικό, το MikroSpec 4.0 Professional. Στη συνέχεια, θα επιχειρηθεί μια σύντομη παρουσίαση των εργαλείων του λογισμικού αυτού.



Σχήμα 4. 13: Η επιφάνεια εργασίας του χρήστη του MikroSpec 4.0 Professional

Στο Σχήμα 4.13 έχουν αριθμηθεί ορισμένες από τις περιοχές της επιφάνειας εργασίας του MikroSpec 4.0 Professional για να γίνει ευκολότερη η επεξήγηση του προγράμματος.

- Γραμμή Εργαλείων: Τετράγωνα εικονίδια κατά μήκος της κορυφής της οθόνης του MikroSpec 4.0 Professional τα οποία συντελούν στην ευκολότερη χρήση του προγράμματος. Πολλά από αυτά τα κουμπιά αποτελούν συντομεύσεις.
- 2. Πλευρά Όψεως (View Pane): Η Πλευρά Όψεως βρίσκεται αριστερά και κάτω από την επιφάνεια εργασίας του MikroSpec 4.0 Professional. Από την πλευρά όψεως επιλέγονται τα εργαλεία που φαίνονται στο Ενεργό Παράθυρο Εργαλείων. Τα μενού της Πλευράς Όψεως δείχνουν τις ιδιότητες του τρέχοντος αρχείου. Επίσης, αυτά τα μενού και τα υπομενού ελέγχουν ποια όψη εμφανίζεται κάτω από τη θερμική εικόνα. Καθώς καθεμία από τις διαφορετικές όψεις επιλέγεται, μια αντίστοιχη ετικέτα εργαλείων ανοίγει

κοντά στο κάτω μέρος της επιφάνειας εργασίας του MikroSpec 4.0 Professional.

- Ενεργό Θερμικό Παράθυρο (Active Thermal Window): Αυτό αποτελεί το πάνω μέρος της κύριας οθόνης. Δείχνει την τρέχουσα θερμική εικόνα, τις σχεδιασμένες περιοχές ενδιαφέροντος (ROIs – Regions Of Interest) κλπ.
- 4. Ενεργό Παράθυρο Εργαλείων (Active Tool Window): Αυτό αποτελεί το κάτω μέρος της κύριας οθόνης. Δείχνει την τρέχουσα όψη των εργαλείων που χρησιμοποιούνται, όπως διαγράμματα ή γραφήματα που δημιουργήθηκαν, ισόθερμα, ορατές εικόνες, οτιδήποτε δηλαδή επιλέγεται στην πλευρά όψεως.
- 5. Πλευρά Εργαλείων (Tool Pane): Η πλευρά εργαλείων αποτελείται από τον έλεγχο για τις διάφορες Όψεις, το φιλτράρισμα, τις ρυθμίσεις ικανότητας εκπομπής, τη φωτεινότητα και την αντίθεση (ορατές εικόνες), τον υπολογιστή ποσότητας θερμότητας και τον υπολογιστή φυσικής απόστασης.

Αρχικά, για την καλύτερη απεικόνιση των θερμικών εικόνων, πρέπει η κάθε εικόνα να ρυθμιστεί σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια της μέτρησης. Ο όρος περιβαλλοντικές συνθήκες αναφέρεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος και στην σχετική υγρασία. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας πραγματοποιείται από την πλευρά εργαλείων. Στην πλευρά εργαλείων υπάρχει η επιλογή υπολογισμού της ποσότητας θερμότητας (Heat Quantity) και στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ambient Temperature) και στην σχετική υγρασία (Relative Humidity) εισάγονται οι τιμές των περιβαλλοντικών αυτών δεδομένων.

Heat Quantity	
Ambient Temperature:	
23,5	
Exterior Temperature:	
25,3	
Measurement Unit:	
Watts	•
Relative Humidity (%):	
60,0	
Link with isotherm	
Dewpoint: 15,3 C	

Σχήμα 4. 14: Ορισμός των τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας

Επίσης, από την πλευρά εργαλείων μπορεί να ρυθμιστεί ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής μέσω της επιλογής emissivity όπου δίνεται μια τιμή για τον συντελεστή.

Emissivity	۲
Emissivity:	
2,00	
Ambient:	
23,5	
Correction Type:	
None	-

Σχήμα 4. 15: Ορισμός του συντελεστή ικανότητας εκπομπής

Για την καλύτερη ερμηνεία των θερμικών εικόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα Προφίλ Γραμμής (Line Profile). Το διάγραμμα Προφίλ Γραμμής παράγει ένα δισδιάστατο γράφημα (βασισμένο στην απόσταση και τη θερμοκρασία), χρησιμοποιώντας δεδομένα από μια περιοχή ενδιαφέροντος (ROI - Regions Of Interest) τύπου γραμμής, που έχει καθοριστεί από το χρήστη, σε μια ακολουθία θερμικών εικόνων.

Μια Περιοχή Ενδιαφέροντος (ROI) είναι μια ειδικά καθορισμένη περιοχή που παρακολουθείται, πάνω σε μία θερμική εικόνα. Οι περιοχές ενδιαφέροντος μπορούν να προσδιοριστούν σε μια ποικιλία σχημάτων, στα οποία συμπεριλαμβάνονται σημεία, γραμμές και δισδιάστατες περιοχές, όπως είναι τα οβάλ και τα ορθογώνια.

Για να χρησιμοποιηθεί το Διάγραμμα Προφίλ Γραμμής, πρώτα πρέπει να προσδιοριστούν οι ROI τύπου γραμμής στην θερμική εικόνα που θα αναλυθεί. Υπάρχει η δυνατότητα να προσδιοριστούν έως και 10 Προφίλ Γραμμής, χρησιμοποιώντας προκαθορισμένα χρώματα στο Διάγραμμα Προφίλ Γραμμής. Για την δημιουργία των περιοχών ενδιαφέροντος τύπου γραμμής επιλέγεται από την γραμμή εργαλείων το σύμβολο που απεικονίζει μια γραμμή και φαίνεται στο Σχήμα 4.16.



Κεφάλαιο 4: Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

Σχήμα 4. 16: Επιλογή περιοχών ενδιαφέροντος τύπου γραμμής



Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζονται οι ROI τύπου γραμμής στην θερμική εικόνα.

Σχήμα 4. 17: Περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής

Η δημιουργία των Προφίλ Γραμμής γίνεται μέσω της εντολής Line Profile από την Πλευρά Όψεως και το διάγραμμα εμφανίζεται στο Ενεργό Παράθυρο Εργαλείων.

Για την πρόσθεση ROI τύπου γραμμής, οι οποίες έχουν ήδη δημιουργηθεί στην θερμική εικόνα, είναι απαραίτητο να επιλεχθούν τα χρώματα τα οποία θα αντιστοιχούν στην κάθε γραμμή, για να είναι ευκολότερη η ερμηνεία του διαγράμματος. Δίπλα από το διάγραμμα Line Profile στο Ενεργό Παράθυρο Εργαλείων υπάρχει η χρωματική παλέτα από την οποία γίνεται η επιλογή του χρώματος, με την διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.18 [1].



Σχήμα 4. 18: Αντιστοίχηση των περιοχών ενδιαφέροντος τύπου γραμμής με το αντίστοιχο χρώμα απεικόνισης

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί ενδεικτικά μια θερμική εικόνα και το διάγραμμα Line Profile για κάθε ένα από τα 3 σετ μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια μιας ημέρας. Οι θερμικές εικόνες που παρουσιάζονται αφορούν την 11^η Ιουλίου 2010, και οι ώρες μέτρησης είναι 10:00, 14:00 και 20:00 που αντιστοιχούν στις μετρήσεις 11, 12 και 13 αντίστοιχα. Τα δεδομένα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η θερμική εικόνα που αντιστοιχεί στην μέτρηση 11, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 11 Ιουλίου 2010 και ώρα 10:00 με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 606 W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 23,5 °C. Σε αυτήν την θερμική εικόνα απεικονίζονται τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια που μετρήθηκαν.

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου



Σχήμα 4. 19: Θερμική εικόνα μέτρησης 11

Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζεται η θερμική εικόνα της ίδιας μέτρησης με τις περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) τύπου γραμμής. Η απεικόνιση αυτή είναι απαραίτητη για την επεξήγηση των διαγραμμάτων Line Profile. Για τις θερμικές εικόνες που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία, οι περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής είναι 8. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει 4 περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής και αντιστοιχούν στις 4 γραμμές (strings) από τις οποίες αποτελείται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο όπου η κάθε γραμμή αποτελείται από 9 ηλιακές κυψέλες.



Σχήμα 4. 20: Θερμική εικόνα μέτρησης 11 με τις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής

Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, το Line Profile του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου θα απεικονίζεται σε διαφορετικό διάγραμμα. Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται το διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 και στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται το διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2. Το διάγραμμα Line Profile είναι ένα δισδιάστατο γράφημα που απεικονίζει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κατά μήκος της περιοχής ενδιαφέροντος τύπου γραμμής και συναρτήσει των pixel. Το διάγραμμα Line Profile είναι ένας ακριβής τρόπος για την ανίχνευση θερμών κηλίδων γιατί απεικονίζει την μεταβολή της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4. 21: Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 της μέτρησης 11



Σχήμα 4. 22: Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2 της μέτρησης 11

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.19 φαίνεται ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρουσιάζουν φαινόμενα θερμής κηλίδας (Hot Spot). Hot Spot ή φαινόμενο θερμής κηλίδας, όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 1, συμβαίνει όταν μια ηλιακή κυψέλη, η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά, απάγει την ενέργεια με την μορφή θερμότητας. Δηλαδή, η ηλιακή κυψέλη που αντιμετωπίζει φαινόμενο θερμής κηλίδας συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση ή τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας στην επιφάνεια της. Το φαινόμενο θερμής κηλίδας παρατηρείται όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μερικών ηλιακών κυψελών του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μεγαλύτερη από 5°C. Έχει αναφερθεί ότι η παρουσία hot spots σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή του λόγω υπερθέρμανσης. Ωστόσο, για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, τα εμπορικά φωτοβολταϊκά πλαίσια εφοδιάζονται με διόδους (δίοδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυψελών, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποια ηλιακή κυψέλη του έχει καταστραφεί. Συγκρίνοντας τις τιμές της θερμοκρασίας των ηλιακών κυψελών, οι οποίες εμφανίζουν τοπική αύξηση θερμοκρασίας και που είναι πιθανό να παρουσιάζουν κάποια αστοχία, με την τιμή της θερμοκρασίας του πλαισίου, στο πλαίσιο 1 παρατηρούνται 3 θερμές κηλίδες. Ενώ στο πλαίσιο 2 παρατηρούνται 4 θερμές κηλίδες, δηλαδή η τιμή της θερμοκρασιακής διαφοράς αυτών των ηλιακών κυψελών είναι μεγαλύτερη από 5°C. Μάλιστα, η θερμοκρασιακή διαφορά για ορισμένες κυψέλες πλησιάζει τους 10 °C.

Τέλος, από την θερμική εικόνα φαίνεται ότι από τις θερμές κηλίδες ή hot spot επηρεάζονται και οι γειτονικές ηλιακές κυψέλες αφού έχουν μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όμως είναι μικρότερη από 5°C και άρα δεν θεωρούνται hot spot. Οι ηλιακές κυψέλες σε αυτά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι συνδεδεμένες σε σειρά και λόγω της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή εμφανίζουν τοπική αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η θερμική εικόνα που αντιστοιχεί στην μέτρηση 12, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 11 Ιουλίου 2010 και ώρα 14:00 με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 890 W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 30,5 °C.



Σχήμα 4. 23: Θερμική εικόνα μέτρησης 12

Στο Σχήμα 4.23 απεικονίζεται η θερμική εικόνα της ίδιας μέτρησης με τις περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) τύπου γραμμής.

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου



Σχήμα 4. 24: Θερμική εικόνα μέτρησης 12 με τις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής

Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται το διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 και στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται το διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2.



Σχήμα 4. 25: Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 της μέτρησης 12



Σχήμα 4. 26: Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2 της μέτρησης 12

Συγκρίνοντας τις δυο θερμικές εικόνες από τις δυο μετρήσεις (πρωινές και μεσημεριανές ώρες) δεν παρατηρείται αλλαγή ως προς των αριθμό των θερμών κηλίδων και το που εμφανίζονται αυτές στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στα Line Profile αυτής της μέτρησης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στις θερμές κηλίδες από ότι στην μέτρηση 11, η οποία φτάνει μέχρι και τους 15 °C.

Στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η θερμική εικόνα που αντιστοιχεί στην μέτρηση 13, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 11 Ιουλίου 2010 και ώρα 20:00 με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 48 *W/m²* και θερμοκρασία περιβάλλοντος 27 °C.



Σχήμα 4. 27: Θερμική εικόνα μέτρησης 13

Στο Σχήμα 4.28 απεικονίζεται η θερμική εικόνα της ίδιας μέτρησης με τις περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) τύπου γραμμής.



Σχήμα 4. 28: Θερμική εικόνα μέτρησης 13 με τις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής

Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται το διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 και στο Σχήμα 4.30 παρουσιάζεται το διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2.



Σχήμα 4. 29: Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 1 της μέτρησης 13



Σχήμα 4. 30: Διάγραμμα Line Profile για το πλαίσιο 2 της μέτρησης 13

Κατά την διάρκεια της μέτρησης 13, τα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται μικρή ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας (48 *W/m*²) και το ρεύμα βραχυκύκλωσης που παράγουν είναι σχεδόν μηδενικό. Στην θερμική εικόνα δεν παρατηρείται καμία ηλιακή κυψέλη να εμφανίζει αστοχία και στα διαγράμματα Line Profile δεν υπάρχουν μεταβολές στις περιοχές ενδιαφέροντος τύπου γραμμής εξαιτίας της χαμηλής τιμής της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

4.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων

Στη συνέχεια, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρατήρηση του πίνακα αποτελεσμάτων των μετρήσεων και από τις θερμικές εικόνες συγκρίνονται με το θεωρητικό μοντέλο, το οποίο έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2.

Τα στοιχεία που δίνονται από το φυλλάδιο του κατασκευαστή για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, για το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 4,8 A και για την τάση

ανοικτού κυκλώματος είναι 21,7 V. Οι τιμές αυτές αφορούν τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς STC (Standard Test Conditions) οι οποίες είναι:

- Θερμοκρασία = 25°C,
- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιηθήκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, οι συνθήκες λειτουργίας δεν ήταν πρότυπες και με την διαδικασία που ακολουθεί θα προσαρμοστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, στις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες. Έπειτα, θα συγκριθεί το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 και το ρεύμα βραχυκύκλωσης που μετρήθηκε με την χρήση του πολυμέτρου κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1, στην μέτρηση 1 (05 Ιουλίου 2010 10:00) το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 2,93 Α και αυτό αντιστοιχεί στο μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc_{\mu}}$. Επίσης, η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 19,86 V και η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας είναι 670 W/m².

Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο στο Κεφάλαιο 2, το ρεύμα βραχυκύκλωσης της ηλιακής κυψέλης για STC είναι, σύμφωνα με την σχέση 2.14:

$$I_{SC,0}^{C} = \frac{I_{SC,0}^{M}}{N_{p}}$$

όπου:

 $I_{SC,0}^{M}$ είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου για STC, N_{p} είναι ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$I_{SC,0}^{C} = \frac{4,8 A}{4}$$
$$I_{SC,0}^{C} = 1,2 A$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης της ηλιακής κυψέλης εξαρτάται γραμμικά από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και δίνεται από την σχέση 2.21:

$$I_{SC}^{C} = \frac{I_{SC,0}^{C}}{G_0} G$$

όπου:

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ι^C_{SC,0} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης της ηλιακής κυψέλης για STC,

G είναι η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για STC,

G είναι η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που μετρήθηκε κατά την διάρκεια της κάθε μέτρησης.

$$I_{SC} = \frac{1.2 A}{1000 \text{ W/m}^2} \text{ 670 W/m}^2$$

$$I_{SC} = 0,80 A$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι:

$$I_{SC}^{M} = N_{P}I_{SC}^{C}$$

όπου:

 I_{SC}^{C} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης για την ηλιακή κυψέλη, N_{p} είναι ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$I_{SC}^{M} = 4 * 0,80 A$$

 $I_{SC}^{M} = 3,22 A$

Άρα σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο στο Κεφάλαιο 2, το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι 3,22 A.

Αν συγκριθούν οι δυο τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης, του αναμενόμενου και του μετρούμενου, για το πλαίσιο 1 υπάρχει μια διαφορά ή πτώση που οφείλεται στο φαινόμενο θερμών κηλίδων, οι οποίες παρατηρήθηκαν στις θερμικές εικόνες του πλαισίου 1. Η πτώση στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι 9,1% για την συγκεκριμένη ημέρα/ώρα/ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Με την παρατήρηση αυτή αποδεικνύεται πειραματικά ότι όταν υπάρχουν hot spot σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τότε υπάρχει πτώση στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Ομοίως, υπολογίζεται το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης και η % πτώση για τις υπόλοιπες μετρήσεις του φωτοβολταϊκού πλαισίου 1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πλαίσιο 1							
Μέτρηση	G	I _{SCµ}	I _{SC}	Πτώση			
1	670 W/m ²	2,93 A	3,22 A	9,1%			
2	1001 W/m ²	4,33 A	4,81 A	10%			
3	45 W/m²	0,18 A	0,22 A	18,2%			
4	575 <mark>W/m²</mark>	2,24 A	2,76 A	18,8%			
5	315 W/m²	1,22 A	1,51 A	19,2%			
6	37 W/m ²	0,14 A	0,18 A	22,2%			
7	540 W/m²	2,33 A	2,59 A	10%			
8	250 W/m²	0,99 A	1,20 A	17,5%			
9	650 <mark>W/m²</mark>	2,41 A	3,12 A	22,8%			
10	57 W/m ²	0,22 A	0,27 A	18,5%			
11	606 <mark>W/m²</mark>	2,21 A	2,91 A	24,1%			
12	890 <mark>W/m²</mark>	3,82 A	4,72 A	19,1%			
13	48 W/m²	0,11 A	0,23 A	52,2%			
14	640 W/m ²	2,33 A	3,07 A	24,1%			
15	670 <mark>W/m²</mark>	2,91 A	3,22 A	9,7%			
16	70 W/m²	0,21 A	0,34 A	38,2%			
17	649 <mark>W/m²</mark>	2,34 A	3,12 A	25%			
18	880 <mark>W/m²</mark>	3,85 A	4,22 A	8,8%			
19	42 W/m ²	0,16 A	0,20 A	20%			

Πίνακας 4. 6: Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου και του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1

Με την ίδια διαδικασία, που ακολουθήθηκε για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1, υπολογίζεται το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς και η % πτώση για τις μετρήσεις του φωτοβολταϊκού πλαισίου 2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Πλαίσιο 2				
Μέτρηση	G	I _{SCµ}	I _{SC}	Πτώση
1	670 W/m ²	2,82 A	3,22 A	12,4%
2	1001 W/m ²	4,26 A	4,81 A	11,4%
3	45 W/m²	0,15 A	0,22 A	31,8%
4	575 <mark>W/m²</mark>	2,14 A	2,76 A	22,5%
5	315 W/m²	1,13 A	1,51 A	25,2%
6	37 W/m ²	0,13 A	0,18 A	27,8%
7	540 W/m²	2,23 A	2,59 A	13,9%
8	250 W/m²	0,98 A	1,20 A	18,3%
9	650 <mark>W/m²</mark>	2,37 A	3,12 A	24%
10	57 W/m ²	0,21 A	0,27 A	22,2%
11	606 W/m ²	2,18 A	2,91 A	25,1%
12	890 <mark>W/m²</mark>	3,81 A	4,72 A	19,3%
13	48 W/m²	0,10 A	0,23 A	56,5%
14	640 W/m ²	2,29 A	3,07 A	25,4%
15	670 <mark>W/m²</mark>	2,42 A	3,22 A	24,9%
16	70 W/m²	0,20 A	0,34 A	41,2%
17	649 <mark>W/m²</mark>	2,32 A	3,12 A	25,7%
18	880 <mark>W/m²</mark>	3,80 A	4,22 A	10%
19	42 W/m ²	0,15 A	0,20 A	25%

Πίνακας 4. 7: Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου και του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2

Στους Πίνακες 4.6 και 4.7 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα φωτοβολταϊκά πλαίσια του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης στην πόλη της Ξάνθης και τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου. Από τους πίνακες αυτούς παρατηρείται ότι το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι χαμηλότερο από το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης και αυτό οφείλεται στις θερμές κηλίδες που εμφανίζονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Άρα, σε φωτοβολταϊκά πλαίσια στα οποία ανιχνεύονται θερμές κηλίδες, παρατηρείται μείωση του παραγόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και μείωση της απόδοσης του.

Ωστόσο, η μεγαλύτερη πτώση παρατηρείται και στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά την μέτρηση που πραγματοποιείται τις βραδινές ώρες και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης στις μετρήσεις αυτές είναι πολύ χαμηλές, σχεδόν πλησιάζουν το μηδέν, και άρα δεν είναι ενδεικτικές τιμές της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
4.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, για την απεικόνιση των ηλιακών κυψελών, χρησιμοποιείται ένα πρότυπο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο είναι ηλεκτρικά ισοδύναμο, και βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μια πηγή ρεύματος 5,5 A, μια δίοδο SB550, μια αντίσταση σε σειρά 100 mΩ και μια παράλληλη αντίσταση 1kΩ.

Η τιμή της πηγής ρεύματος έχει οριστεί με βάση τις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας και όχι με βάση τις συνθήκες που επικρατούν κατά την διάρκεια της εκάστοτε μέτρησης. Άρα, η τιμή της πηγής ρεύματος ή αλλιώς η τιμή του φωτορεύματος θα πρέπει να υπολογιστεί ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της κάθε μέτρησης.

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1, θα υπολογιστεί η τιμή του φωτορεύματος σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας της μέτρησης 1 (05 Ιουλίου 2010 10:00) στην οποία η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας είναι 670 W/m^2 .

Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο στο Κεφάλαιο 2, το φωτόρευμα είναι:

$$I_L = \frac{I_{L,0}G}{G_0}$$

όπου:

G είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, **G**₀ είναι η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς, $\mathbf{I}_{\mathbf{L},\mathbf{0}}$ είναι το φωτόρευμα αναφοράς.

$$I_L = \frac{5.5 \, A * 670 \, \text{W/m}^2}{1000 \, \text{W/m}^2}$$

 $I_L = 3,68 A$

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζεται η τιμή του φωτορεύματος για την κάθε μέτρηση.

Μέτρηση	G	IL
1	670 W/m ²	3,68 A
2	1001 W/m²	5,51 A
3	45 <mark>W/m²</mark>	0,25 A
4	575 W/m²	3,16 A
5	315 W/m²	1,73 A
6	37 W/m ²	0,20 A
7	540 W/m²	2,97 A
8	250 W/m ²	1,37 A
9	650 W/m²	3,57 A
10	57 W/m ²	0,31 A
11	606 W/m²	3,33 A
12	890 W/m²	4,89 A
13	48 W/m ²	0,26 A
14	640 W/m²	3,52 A
15	670 W/m²	3,68 A
16	70 W/m ²	0,38 A
17	649 W/m²	3,57 A
18	880 W/m²	4,84 A
19	42 W/m ²	0,23 A

Πίνακας 4.8: Τιμές φωτορεύματος για την κάθε μέτρηση

Αντικαθιστώντας τις τιμές του φωτορεύματος στο μοντέλο προσομοίωσης, η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για την κάθε μέτρηση διαφέρει. Για παράδειγμα, στην μέτρηση 12 (11 Ιουλίου 2010 14:00), στην οποία η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας είναι 890 W/m², η τιμή του φωτορεύματος, όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 4.8, είναι 4,89 Α. Στο μοντέλο προσομοίωσης, με την χρήση του πολυμέτρου το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίζεται 4,485 Α. Στο Σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για την πηγή ρεύματος 4,89 Α της μέτρησης 12.



Σχήμα 4. 31: Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για την μέτρηση 12

Πίνακας 4. 9: Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και το	υ
ρεύματος βραχυκύκλωσης του μοντέλου προσομοίωσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1	

Πλαίσιο 1					
Μέτρηση	G	I _{SCµ}	I _{sc}	Πτώση	
1	670 W/m ²	2,93 A	3,60 A	18,6%	
2	1001 W/m²	4,33 A	4,80 A	9,8%	
3	45 W/m ²	0,18 A	0,25 A	28%	
4	575 W/m ²	2,24 A	3,13 A	28,4%	
5	315 W/m ²	1,22 A	1,73 A	29,5%	
6	37 W/m²	0,14 A	0,20 A	30%	
7	540 W/m ²	2,33 A	2,95 A	21%	
8	250 W/m ²	0,99 A	1,37 A	27,7%	
9	650 <mark>W/m²</mark>	2,41 A	3,50 A	31,2%	
10	57 W/m²	0,22 A	0,31 A	29%	
11	606 <mark>W/m²</mark>	2,21 A	3,28 A	32,6%	
12	890 <mark>W/m²</mark>	3,82 A	4,48 A	14,7%	
13	48 W/m ²	0,11 A	0,26 A	57,7%	
14	640 W/m ²	2,33 A	3,46 A	32,7%	
15	$670 W/m^2$	2,91 A	3,60 A	19,2%	
16	70 W/m ²	0,21 A	0,38 A	44,7%	
17	649 <mark>W/m²</mark>	2,34 A	3,50 A	33,2%	
18	$880 \mathrm{W/m^2}$	3,85 A	4,46 A	13,7%	
19	42 W/m ²	0,16 A	0,23 A	30,4%	

		Πλαίσιο 2		
Μέτρηση	G	$I_{SC_{\mu}}$	I _{sc}	Πτώση
1	670 <mark>W/m²</mark>	2,82 A	3,60 A	21,7%
2	1001 W/m²	4,26 A	4,80 A	11,3%
3	45 W/m ²	0,15 A	0,25 A	40%
4	575 W/m²	2,14 A	3,13 A	31,6%
5	315 W/m ²	1,13 A	1,73 A	34,7%
6	37 W/m²	0,13 A	0,20 A	35%
7	540 W/m ²	2,23 A	2,95 A	24,4%
8	$250 W/m^2$	0,98 A	1,37 A	28,5%
9	650 W/m ²	2,37 A	3,50 A	32,3%
10	57 W/m²	0,21 A	0,31 A	32,3%
11	606 <mark>W/m²</mark>	2,18 A	3,28 A	33,5%
12	890 <mark>W/m²</mark>	3,81 A	4,48 A	15%
13	48 W/m²	0,10 A	0,26 A	61,5%
14	640 W/m²	2,29 A	3,46 A	33,8%
15	670 <mark>W/m²</mark>	2,42 A	3,60 A	32,8%
16	70 W/m ²	0,20 A	0,38 A	47,4%
17	649 W/m ²	2,32 A	3,50 A	33,7%
18	$880 \mathrm{W/m^2}$	3,80 A	4,46 A	14,8%
19	42 W/m ²	0,15 A	0,23 A	34,8%

Πίνακας 4. 10: Αποτελέσματα σύγκρισης του μετρούμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης του μοντέλου προσομοίωσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2

Στους Πίνακες 4.9 και 4.10 υπολογίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} για την κάθε μέτρηση από το μοντέλο προσομοίωσης και σύμφωνα με τις τιμές του φωτορεύματος I_L από τον Πίνακα 4.8. Επίσης, υπολογίζεται η επί % πτώση μεταξύ του μετρούμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων και του ρεύματος βραχυκύκλωσης που μετράται στο μοντέλο προσομοίωσης.

Στους Πίνακες αυτούς συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης. Τα συμπεράσματα, που εξάγονται με την βοήθεια αυτών των πινάκων, είναι παρόμοια με τα συμπεράσματα από τους Πίνακες 4.6 και 4.7, οι οποίοι συγκρίνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου. Δηλαδή, το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις είναι χαμηλότερο από το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης που μετρήθηκε στο μοντέλο προσομοίωσης. Επίσης, η μεγαλύτερη πτώση παρατηρείται και στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται τις βραδινές ώρες.

Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2, το φαινόμενο θερμής κηλίδας ή hot spot προκαλείται συνήθως από κάποια αστοχία στην ηλιακή κυψέλη, από πρόβλημα στις συνδέσεις ή από μερική σκίαση μερών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτά τα σφάλματα προκαλούν την θέρμανση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η απεικόνιση του φαινομένου θερμής κηλίδας γίνεται με την αύξηση ή την τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στο μοντέλο προσομοίωσης, η αύξηση ή τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας εκφράζεται με την αύξηση της τιμής των αντιστάσεων και συγκεκριμένα της αντίστασης σειράς. Η αντίσταση σειράς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το κύκλωμα και τα αποτελέσματα λειτουργίας του, γι' αυτό το λόγο αυξάνεται η τιμή της.

Για την επαλήθευση αυτού του συμπεράσματος, θα χρησιμοποιηθούν τα κυκλώματα των φωτοβολταϊκών πλαισίων από δυο ενδεικτικές μετρήσεις. Οι μετρήσεις που θα χρησιμοποιηθούν, είναι η μέτρηση 2 (05 Ιουλίου 2010 13:30) με ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας 1001 W/m^2 και η μέτρηση 18 (13 Ιουλίου 2010 13:30) με ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ακτινοβολίας 880 W/m^2 . Μέσω του προγράμματος Multisim θα παρασταθούν τα αποτελέσματα λειτουργίας των δυο πλαισίων για την κάθε μέτρηση.

Όπως διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, σε φωτοβολταϊκά πλαίσια που παρατηρήθηκε το φαινόμενο θερμής κηλίδας, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται. Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, αυτό συμβαίνει γιατί εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος. Επίσης, στο Σχήμα 2.5 φαίνεται ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την αντίσταση σειράς. Άρα, αφού το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται, η αντίσταση σειράς αυξάνεται.

Από την ανάλυση των θερμικών εικόνων παρατηρήθηκε ότι στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1, υπάρχουν 3 θερμές κηλίδες. Οπότε, στο κύκλωμα του μοντέλου προσομοίωσης, θα αυξηθούν οι τιμές των αντιστάσεων σειράς από 3 υποκυκλώματα ή αλλιώς από 3 κυκλώματα ηλιακών κυψελών. Η αύξηση των τιμών της αντίστασης σειράς θα οριστεί ώστε το ρεύμα βραχυκύκλωσης του μοντέλου προσομοίωσης να συμπίπτει με το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αντίστοιχα, στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2, από τις θερμικές εικόνες φαίνεται, ότι υπάρχουν 4 θερμές κηλίδες. Άρα, στο κύκλωμα προσομοίωσης, θα αλλάξουν οι τιμές των αντιστάσεων σειράς από 4 υποκυκλώματα.

Στην μέτρηση 18, το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβλταϊκού πλαισίου 1 είναι 3,85 Α και το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 2 είναι 3,80 Α. Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1, η τιμή της αντίστασης σειράς για την κάθε μια από τις 3 ηλιακές κυψέλες, σύμφωνα με το

μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης, γίνεται 460 mΩ. Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2, η τιμή της αντίστασης σειράς για την κάθε μια από τις 4 ηλιακές κυψέλες, σύμφωνα με το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης, γίνεται 390 mΩ. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.32 και 4.33.



Σχήμα 4. 32: Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 460 mΩ της μέτρησης 18 για το πλαίσιο 1



Σχήμα 4. 33: Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 390 mΩ της μέτρησης 18 για το πλαίσιο 2

Για την μέτρηση 2, το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 1 είναι 4,33 Α και το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου 2 είναι 4,26 Α. Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1, η τιμή της αντίστασης σειράς για την κάθε μια από τις 3 ηλιακές κυψέλες, σύμφωνα με το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης, γίνεται 320 mΩ. Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 2, η τιμή της αντίστασης σειράς για την κάθε μια από τις 4 ηλιακές κυψέλες, σύμφωνα με το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης, γίνεται 290 mΩ. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.34 και 4.35.



Σχήμα 4. 34: Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 320 mΩ της μέτρησης 2 για το πλαίσιο 1

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου



Σχήμα 4. 35: Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αντίσταση σειράς 290 mΩ της μέτρησης 2 για το πλαίσιο 2

4.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα όργανα μέτρησης και η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Έπειτα, έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις, από το μοντέλο προσομοίωσης του ηλεκτρικού κυκλώματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και από το θεωρητικό μοντέλο.

Από τον Πίνακα 4.5 των αποτελεσμάτων των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια επηρεάζεται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, η τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος δεν επηρεάζεται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας γιατί δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή της τιμής της σε σχέση με την μεταβολή της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι παρατηρήσεις αυτές συνάδουν με το Σχήμα 2.6, όπου είχε παρατηρηθεί ότι η ισχύς εξόδου της ηλιακής κυψέλης αποκτά υψηλότερες τιμές με την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας επειδή τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνονται. Επίσης, στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ότι η τάση του πλαισίου παραμένει σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της έντασης του φωτός. Εντούτοις, το ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο προς την ένταση του φωτός.

Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τις βραδινές ώρες, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι χαμηλή, το ρεύμα βραχυκύκλωσης των

φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σχεδόν μηδενικό και άρα, η απόδοση τους είναι πολύ χαμηλή. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από την θεωρία γιατί, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2, έχει αποδειχτεί ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνεται κατά πολύ στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας.

Από τις θερμικές εικόνες, παρατηρείται ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρουσιάζουν φαινόμενα θερμής κηλίδας (Hot Spot). Το φαινόμενο θερμής κηλίδας συμβαίνει όταν μια ηλιακή κυψέλη, η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά, απάγει την ενέργεια με την μορφή θερμότητας. Δηλαδή, η ηλιακή κυψέλη που αντιμετωπίζει φαινόμενο θερμής κηλίδας συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση ή τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας στην επιφάνεια της. Το φαινόμενο θερμής κηλίδας παρατηρείται όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μερικών ηλιακών κυψελών του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μεγαλύτερη από 5°C.

Συγκρίνοντας τις τιμές της θερμοκρασίας των ηλιακών κυψελών, οι οποίες εμφανίζουν τοπική αύξηση θερμοκρασίας και που είναι πιθανό να παρουσιάζουν κάποια αστοχία, με την τιμή της θερμοκρασίας του πλαισίου, στο πλαίσιο 1 παρατηρούνται 3 θερμές κηλίδες. Ενώ στο πλαίσιο 2 παρατηρούνται 4 θερμές κηλίδες, δηλαδή η τιμή της θερμοκρασιακής διαφοράς αυτών των ηλιακών κυψελών είναι μεγαλύτερη από 5°C.

Επίσης, από τις θερμικές εικόνες φαίνεται ότι από τις θερμές κηλίδες ή hot spot επηρεάζονται και οι γειτονικές ηλιακές κυψέλες αφού έχουν μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όμως είναι μικρότερη από 5°C και άρα δεν θεωρούνται hot spot. Οι ηλιακές κυψέλες σε αυτά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι συνδεδεμένες σε σειρά και λόγω της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, εμφανίζουν τοπική αύξηση της θερμοκρασίας.

Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2, το φαινόμενο θερμής κηλίδας ή hot spot προκαλείται συνήθως από κάποια αστοχία στην ηλιακή κυψέλη, από πρόβλημα στις συνδέσεις ή από μερική σκίαση μερών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτά τα σφάλματα προκαλούν την θέρμανση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η απεικόνιση του φαινομένου θερμής κηλίδας γίνεται με την αύξηση ή την τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στο μοντέλο προσομοίωσης, η αύξηση ή τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας εκφράζεται με την αύξηση της τιμής των αντιστάσεων και συγκεκριμένα της αντίστασης σειράς. Η αντίσταση σειράς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το κύκλωμα και τα αποτελέσματα λειτουργίας του, γι' αυτό το λόγο αυξάνεται η τιμή της.

Από τους Πίνακες 4.6, 4.7, 4.9 και 4.10 παρατηρείται ότι το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι χαμηλότερο από το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης και αυτό οφείλεται στις θερμές κηλίδες που εμφανίζονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Άρα, σε φωτοβολταϊκά πλαίσια στα οποία ανιχνεύονται θερμές κηλίδες, παρατηρείται μείωση του παραγόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και μείωση της απόδοσης του. Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, αυτό συμβαίνει γιατί εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος.

4.8 Βιβλιογραφία

[1] <u>http://www.contika.dk/Download/brochurer/impac/ivn780.pdf</u>, προσπελάστηκε στις 25 Αυγούστου 2010

[2] <u>http://www.chevrierinstruments.com/Anglais/Nouveautes-</u> <u>Kimo/FT%20SL200.pdf</u>, προσπελάστηκε στις 25 Αυγούστου 2010

[3] <u>http://www.testequipmentdepot.com/lascar/pdf/el-usb-2.pdf</u>, προσπελάστηκε στις 26 Αυγούστου 2010

[4] <u>http://www.range.com.hk/RE-65-69%20series.htm</u>, προσπελάστηκε στις 26 Αυγούστου 2010

Συμπεράσματα και Προτάσεις

Περιεχόμενα

5.1 Συμπεράσματα	100
5.2 Προτάσεις	102

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα 'Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου και έλεγχος απόδοσης του', αρχικά, αναφέρονται ορισμένα από τα προβλήματα και τις αστοχίες κατά την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, τα οποία φαίνεται να επηρεάζουν την απόδοση του. Επίσης, παρουσιάζεται η προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την χρήση του προγράμματος σχεδιασμού, ανάλυσης και προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων, Multisim. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών (τιμές ταχύτητας ανέμου, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, ρεύματος βραχυκύκλωσης, τάσης ανοικτού κυκλώματος) στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που είναι τοποθετημένα στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών στην πόλη της Ξάνθης, για διάφορες χρονικές στιγμές. Μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, από το μοντέλο προσομοίωσης και από το θεωρητικό μοντέλο και με την χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας, εξάχθηκαν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Κατά την διεξαγωγή της παρούσας έρευνας, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που έχει διαπιστωθεί ότι υπάρχουν ορισμένες αστοχίες ή hot spot, παρατηρείται μείωση του παραγόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και άρα, μείωση της απόδοσης του. Αυτό συμβαίνει γιατί εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος.
- Από τα θερμογραφήματα των φωτοβολταϊκών πλαισίων παρατηρήθηκε ότι από τις ηλιακές κυψέλες, που εμφανίζουν φαινόμενα θερμής κηλίδας, επηρεάζονται οι γειτονικές τους κυψέλες εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή.
- 3. Παρατηρήθηκε ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου παραμένει σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο προς την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

- 4. Το φαινόμενο θερμής κηλίδας ή hot spot προκαλείται συνήθως από κάποια αστοχία στην ηλιακή κυψέλη, από πρόβλημα στις συνδέσεις ή από μερική σκίαση μερών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτά τα σφάλματα προκαλούν την θέρμανση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η απεικόνιση του φαινομένου θερμής κηλίδας γίνεται με την αύξηση ή την τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στο μοντέλο προσομοίωσης, η αύξηση ή τοπική συγκέντρωση θερμοκρασίας εκφράζεται με την αύξηση της τιμής των αντιστάσεων και συγκεκριμένα της αντίστασης σειράς. Η αντίσταση σειράς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το κύκλωμα και τα αποτελέσματα λειτουργίας του, γι' αυτό το λόγο αυξάνεται η τιμή της.
- 5. Κατά την προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Multisim, δεν ήταν γνωστά τα ακριβή δεδομένα για τα διάφορα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το ηλεκτρικό κύκλωμα (αντίσταση σε σειρά, παράλληλη αντίσταση, δίοδο, πηγή ρεύματος). Οι τιμές που δόθηκαν σε αυτά τα στοιχεία, έχουν οριστεί σύμφωνα με τα αναμενόμενα αποτελέσματα του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος από το φυλλάδιο του κατασκευαστή. Ωστόσο, οι τιμές αυτές ικανοποιούν τα γενικά πρότυπα που υπάρχουν, όπως για παράδειγμα, η τιμή της αντίστασης σειράς ενδείκνυται να είναι μεγαλύτερη από 500 Ω.
- 6. Μερικές από τις ημέρες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις παρατηρήθηκε βροχόπτωση. Γεγονός το οποίο είχε σαν αποτέλεσμα να υπάρχει πτώση της θερμοκρασίας και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, αυτό που απαιτεί προσοχή είναι το γεγονός ότι υπήρχε, όπως ήταν φυσικό, πτώση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η οποία όμως επηρέαζε την θερμοκρασία του πλαισίου και μετά το τέλος της βροχόπτωσης. Για παράδειγμα, επειδή το βράδυ της 11^{ης} Ιουλίου 2010 υπήρξε βροχόπτωση, στην μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 12 Ιουλίου 2010, η θερμοκρασία του πλαισίου ήταν χαμηλή και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των ηλιακών κυψελών, οι οποίες φαίνονται να αντιμετωπίζουν το φαινόμενο θερμών κηλίδων, και των ηλιακών κυψελών χωρίς 'πρόβλημα' είναι μικρότερη από 5° C και άρα το φωτοβολταϊκό πλαίσιο φαίνεται να μην να λειτουργεί κανονικά, το οποίο έρχεται σε σύγκρουση με τα προηγούμενα συμπεράσματα. Οπότε, οι μετρήσεις σε φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει να

πραγματοποιούνται υπό καθαρές συνθήκες ουρανού για την παροχή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

5.2 Προτάσεις

- Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ύπαρξη ή όχι αστοχιών σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και αν αυτές επηρεάζουν την απόδοση του. Δεν ασχολείται με την αιτία που προκαλεί αυτό το πρόβλημα στη λειτουργία του. Ο έλεγχος που πραγματοποιείται σε αυτή την εργασία θεωρείται ποιοτικής φύσεως επιθεώρηση, καθώς ο στόχος είναι να εντοπιστούν πιθανές ανωμαλίες. Οπότε, μια πρόταση για μελλοντική έρευνα θα ήταν η ενασχόληση με τις αιτίες των αστοχιών.
- 2. Για την ανίχνευση των θερμών κηλίδων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, χρησιμοποιήθηκε η παθητική θερμογραφία. Στην επιθεώρηση με παθητική θερμογραφία. Στην επιθεώρηση με παθητική θερμογραφία, το εξεταζόμενο αντικείμενο θερμογραφείται στη φυσική του θέση και λειτουργία, χωρίς την επιβολή εξωτερικής πηγής θερμότητας. Ωστόσο, η επιθεώρηση με παθητική θερμογραφία δεν είναι λειτουργική για τις μετρήσεις κατά τις βραδινές ώρες όπου η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλή και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει σχεδόν μηδενικό ρεύμα. Οπότε, μια λύση για την ανίχνευση hot spot με χαμηλή τιμή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας είναι η επιθεώρηση με ενεργητική θερμογραφία. Στον έλεγχο με ενεργητική θερμογραφία, είναι απαραίτητο ένα εξωτερικό αίτιο (πηγή θερμικής ενέργειας) για να θερμανθεί το υπό εξέταση αντικείμενο και να διαπιστωθούν ή όχι σημαντικές ασυνέχειες στη κατανομή του.
- 3. Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MultiSIM της National Instruments. Ωστόσο, για σχεδίαση ηλεκτρικών κυκλωμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα προγράμματα Matlab/Simulink και PSpice, τα οποία είναι προγράμματα προσομοίωσης γενικών και ειδικών εφαρμογών σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και σε συστήματα ελέγχου ηλεκτρικής ισχύος.
- 4. Η πολιτική που ακολουθείται όταν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αντιμετωπίζει φαινόμενο θερμής κηλίδας είναι να αντικαθιστάται ολόκληρο το

φωτοβολταϊκό πλαίσιο και όχι η μεμονωμένη ή οι μεμονωμένες ηλιακές κυψέλες, που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα, γιατί οι κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους και είναι αδύνατον να απομονωθούν. Μια πρόταση, λοιπόν, για μελλοντική εργασία θα ήταν η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος δηλαδή να υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης μεμονωμένων ηλιακών κυψελών.